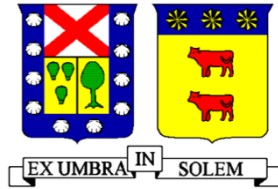


**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE**



**EVALUACIÓN DEL USO DE ADITIVOS QUÍMICOS NO TRADICIONALES COMO
ESTABILIZADORES DE SUELOS LIMOSOS PARA CAMINOS PRODUCTIVOS DE
BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO.**

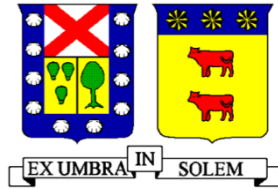
JUAN SEBASTIÁN NIETO VEGA

**Memoria para optar al Título de
Ingeniero Civil**

**Profesor Guía
Álvaro González Vaccarezza**

Febrero 2019

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE



EVALUACIÓN DEL USO DE ADITIVOS QUÍMICOS NO TRADICIONALES COMO
ESTABILIZADORES DE SUELOS LIMOSOS PARA CAMINOS PRODUCTIVOS DE BAJO
VOLUMEN DE TRÁNSITO.

Memoria de titulación presentada por
JUAN SEBASTIÁN NIETO VEGA

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Álvaro González Vaccarezza

Profesor Co-referente
Carlos Wahr Daniel

Febrero 2019

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar este ciclo tan enriquecedor e importante de mi vida quiero agradecer sinceramente a todos quienes estuvieron conmigo en este arduo proceso e hicieron posible que esto ocurriera.

A mis padres Juan y Marcela, por su inagotable apoyo en todo aspecto de mi vida, por sus consejos, preocupación y darme un verdadero ejemplo de perseverancia y enseñarme que no importa cuántas veces nos caemos en la vida, lo que realmente importa es como y cuantas veces nos volvemos a levantar.

A mis hermanos menores Consuelo y José, por su paciencia y apoyo durante todos estos años.

A mis compañeros de universidad y carrera Christian, Cristóbal e Ignacio que siempre estuvieron en las buenas y en las malas durante la carrera y se han vuelto verdaderos amigos de vida.

A mi profesor guía Álvaro González, por entregarme las herramientas y posibilidad de trabajar en la investigación para el desarrollo de esta memoria y por brindar constante apoyo durante todo este proceso.

A la profesora Vivian Aranda, por ser un pilar fundamental durante los primeros años de la carrera, y darme la motivación para continuar luchando y lograr terminar mi carrera.

A todos profesores del departamento de obras civiles, por entregarme sus enseñanzas durante estos años de carrera.

A la Universidad del Desarrollo, por acogerme en su Facultad de Ingeniería, por intermedio de su rector Federico Valdés Lafontaine, permitiéndome hacer uso de las instalaciones del laboratorio de obras civiles, ubicado en la sede de San Carlos de Apoquindo.

“Vive como si fueras a morir mañana, y aprende como si fueras a vivir para siempre”.

Mahatma Gandhi

Pacifista, político, pensador y abogado hinduista indio (1869– 1948)

RESUMEN

El objetivo básico de los caminos de bajo volumen de tránsito (CBVT), muchos de ellos no pavimentados, es proporcionar accesibilidad a pueblos, centros de servicio, centros industriales de explotación, y variados tipos de zonas rurales. (Douglas, 2016).

Una de las soluciones más utilizadas para caminos *productivos*, es decir, CBVT relacionados con la industria, o CBVT-P, es una estructura con capas granulares sobre la subrasante o suelo natural. En esta, y al igual que en la mayoría de las estructuraciones, se necesita un importante consumo de áridos de buena calidad para que el desempeño del camino sea adecuado. Si bien esta es la solución más económica en la mayoría de los CBVT-P, en escenarios donde el recurso árido se encuentra a una gran distancia del lugar de construcción del camino, su costo puede ser muy alto. Esta situación será cada vez más común, debido a que, por restricciones ambientales cada vez va a ser más difícil contar con fuentes de extracción de material granular de buena calidad.

Para muchas zonas del Sur de Chile este problema se acentúa, ya que es común encontrar suelos como *los limos y las arcillas*, los cuales tienen una baja capacidad de soporte, por lo tanto, los caminos construidos sobre ellos requieren de capas de áridos más gruesas para que puedan resistir el tránsito y clima lluvioso de la zona. Considerando esto, surge la necesidad de evaluar e implementar soluciones alternativas que signifiquen un menor costo, como la *estabilización química de suelos*.

El presente estudio forma parte de un proyecto de estabilización química de suelos limosos, para CBVT-P del sur de Chile, propiedad de una importante empresa de la zona, que anualmente construye cientos de caminos para su operación. La construcción de algunos de estos caminos se realiza con una técnica de estabilización química de suelos, a cargo de una segunda empresa que ha desarrollado su propia tecnología. Ambas empresas solicitaron mantener sus nombres de forma confidencial, por resguardo a los resultados del proyecto.

En este estudio, se evaluó dos *aditivos químicos no tradicionales* para el mejoramiento del comportamiento de los limos: una *ceniza* (aditivo B), que es un residuo de un proceso industrial de la empresa mandante de este proyecto, y el aditivo químico líquido (aditivo P), proporcionado por la empresa a cargo de la estabilización de caminos, al igual que la identidad de las empresas se

solicitó confidencialidad respecto del origen y la composición de los aditivos B y P. Además de los aditivos no tradicionales, se trabajó con *cal viva* y *cemento Portland*.

ABSTRACT

Roads of Low Traffic Volume's (RLTV) basic objective, many of them unpaved, is to provide accessibility to towns, service centers, exploitation industrial centers, and several types of rural areas. (Douglas, 2016).

One of the most used solutions for productive roads, that is, RLTV related to industry, or RLTV-P, is a structure with granular layers on the subgrade or natural soil. This structure, as in the most of the structures, requires an important consumption of good quality aggregates for a high performance of an adequate road. This is the most economical solution in almost all the RLTV-P, but if we have the scenario which the arid resource is located from great distance of the construction road's area, the cost could be big. This situation will be even more common, due to environmental restrictions, it will be increasingly difficult to have sources of good quality granular extraction material.

This problem is accentuated in many areas of southern Chile, since it is common to find low support capacity soils, such as silts and clays, which have a low support capacity, therefore, roads built on them require coarser aggregates layers so that they can resist the transit and rainy weather of the area. Considering this, it comes the need to evaluate and implement alternative solutions that mean a lower cost, such as soils stabilization chemical.

The present study is part of a chemical stabilization project of silty soils, for RLTV-P of southern Chile, which belongs to a major company in the area and annually builds a hundreds of roads for its operation. Part of the construction is carried out with the technique of chemical stabilization of soils, which is in charge of a second company that has developed its own technology. Both companies requested to keep their names confidential, in order to safeguard project results.

The study presents an evaluation of two non-traditional chemical additives for the silts behavior improvement: an ash (additive B), which is a waste of an industrial process of the company that is the principal of this project, and the liquid chemical additive (additive P), provided by the company in charge of road stabilization. Like the identity of the companies, confidentiality was requested regarding the origin and composition of additives B and P. In addition to the non-traditional additives, we worked with quicklime and Portland cement.

GLOSARIO

A

AASHTO

American Association of State Highway and Transportation Officials.....2, 36, 38, 51, 55, 84

ASTM

American Society of Testing Materials..... 18, 36, 38, 84

C

CBR

California Bearing Ratio (capacidad de soporte de suelos compactados) 5, 8, 33, 34, 35, 55, 58, 59, 61, 62, 64, 69, 73, 77, 78, 86, 87, 88, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 98, 99, 100, 102, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 112, 113, 114, 119, 120, 121, 127, 128, 129, 130

CBVT

Caminos de Bajo Volumen de Tránsito III, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 11, 12, 44, 55, 87, 101, 121, 130

CBVT-L

Caminos de Bajo Volumen de Tránsito Liviano 4

CBVT-P

Caminos de Bajo Volumen de Tránsito Pesado..... III, 4, 5, 6, 10, 11, 12, 44, 55, 130

D

DMCS

Densidad Máxima Compactada Seca 32, 33, 51, 85, 114, 118, 119, 120

I

IMCM

Índice Mini CBR Modificado 35, 86, 88, 89, 90, 91, 92, 94, 97, 98, 99, 102, 103, 104, 106, 107, 109, 110, 111, 127

IP

Índice de Plasticidad..... 27

IRR

Índice de resistencia retenida 100, 104, 105, 107, 110, 116, 125

L

LC.

Límite de Contracción (NCh. 1517/3 Of. 79, 1979). 40

LI

LL.

Límite Líquido (NCh. 1517/1 Of. 79, 1979)..... 40

L

LP.

Límite Plástico (NCh. 1517/2 Of. 79, 1979). 40

M

MH

Limo de alta plasticidad... 8, 44, 52, 53, 55, 58, 59, 61, 86, 88, 89, 90, 91, 94, 96, 97, 99, 100, 102,
103, 104, 105, 113, 114, 115, 116, 117

ML

Limo de baja plasticidad.. 8, 44, 51, 52, 55, 58, 59, 62, 86, 91, 92, 93, 97, 100, 102, 106, 107, 108,
118, 119, 121, 122, 125

MrTx

Módulo Resiliente Triaxial.....38, 39, 55, 61, 62, 79, 83, 87, 113, 115, 116, 122, 123

S

SB

Suelo Borda, se trata de una arcilla de baja plasticidad con arena, que está en el límite de la
clasificación entre un limo y una arcilla 8, 44, 53, 54, 58, 59, 62, 86

U

UCS

Unconfined Compressive Strenght o CNC en español (Compresión No Confinada) .	36, 37, 38, 39, 55, 58, 59, 61, 62, 87, 90, 91, 93, 95, 96, 97, 100, 113, 116, 117, 125
USCS	
Unified Soil Classification System, o SUCS en español (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)	41, 51, 55, 118
USDA	
United States Departamen of Agriculture, en español Departamento de Agricultura de los Estados Unidos	XIV, XVI, 42, 43

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	I
RESUMEN	III
ABSTRACT	V
GLOSARIO	VI
ÍNDICE GENERAL.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS	XVI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	1
1.1.1. CAMINOS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO.....	1
1.1.2. CAMINOS PRODUCTIVOS Y CONSUMO DE ÁRIDOS DE EN EL SUR DE CHILE	4
1.1.3. ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS LIMOSOS PARA CBVT-P COMO UNA POSIBLE SOLUCIÓN.....	6
1.2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	7
1.2.1. HIPÓTESIS	7
1.2.2. OBJETIVO GENERAL.....	7
1.2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
1.3. ALCANCES DE ESTE ESTUDIO.....	8
1.4. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	9
2. REVISIÓN DE LITERATURA Y TEORIA	10
2.1. INTRODUCCIÓN A LOS CAMINOS NO PAVIMENTADOS	10
2.1.1. DISEÑO ESTRUCTURAL DE CAMINOS	10
2.1.2. CAPACIDAD ESTRUCTURAL CAMINOS.....	11
2.1.3. VIDA UTIL PROYECTADA.....	12

2.1.4.	DETERIOROS EN CAMINOS NO PAVIMENTADOS	12
2.2.	SUELOS LIMOSOS	15
2.2.1.	CARACTERISTICAS Y FORMACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE SUELO LIMOSO	15
2.2.2.	COMPOSICIÓN DE LOS LIMOS	16
2.2.3.	COMPORTAMIENTO Y CLASIFICACIÓN SEGÚN PLASTICIDAD DE SUELOS LIMOSOS Y SUELOS FINOS	18
2.2.4.	PROBLEMAS ASOCIADOS A LOS LIMOS Y LA DIFICULTAD EN SU ESTABILIZACIÓN ...	20
2.2.5.	ESTABILIZACIÓN QUÍMICA EN SUELOS LIMOSOS.....	22
2.3.	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA CAMINOS NO PAVIMENTADOS	25
2.3.1.	TIPOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	25
2.3.2.	BENEFICIOS ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.....	26
2.3.3.	TIPOS DE AGENTES ESTABILIZADORES	26
2.3.4.	ESCENARIO DE LA ESTABILIZACIÓN DE CAMINOS EN CHILE	27
2.4.	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON ESTABILIZADORES CEMENTADOS	28
2.4.1.	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CEMENTO	28
2.4.2.	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL	29
2.4.3.	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CENIZAS VOLANTES.....	30
2.5.	PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS.....	32
2.5.1.	ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO (NCh 1534/II. Of. 1979)	32
2.5.2.	DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD SOPORTE DE SUELOS COMPACTADOS (CBR, California Bearing Ratio, NCh 1852-81).....	33
2.5.3.	DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE DEL SUELO (MINI CBR)	34
2.5.4.	ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA (UCS, Unconfined Compressive Strenght, ASTM D 2166).....	36
2.5.5.	ENSAYO MINI COMPRESIÓN NO CONFINADA (MINI UCS, ASTM D 2166).	38
2.5.6.	ENSAYO TRIAXIAL PARA MÓDULO RESILIENTE (MrTx, AASHTO T-274).....	38

2.5.7.	LÍMITES DE ATTERBERG (NCh 1517.Of79).....	39
2.6.	CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN SU TAMAÑO DE PARTICULA.....	42
2.7.	TEXTURA DEL SUELO	42
3.	MATERIALES Y MÉTODOS DE LABORATORIO.....	44
3.1.	MATERIALES	44
3.1.1.	DESCRIPCION DE MATERIALES	44
3.2.	CLASIFICACION DE LOS SUELOS	51
3.2.1.	CLASIFICACIÓN SUELO ML.....	51
3.2.2.	CLASIFICACIÓN SUELO MH	52
3.2.3.	CLASIFICACIÓN SUELO SB.....	53
3.2.4.	RELACIÓN DENSIDAD-HUMEDAD, ENSAYO PROCTOR MODIFICADO	54
3.2.5.	RESUMEN CLASIFICACIÓN DE SUELOS	54
3.3.	ETAPAS DEL TRABAJO EXPERIMENTAL.....	55
3.3.1.	ESQUEMA DE TRABAJO EXPERIMENTAL	57
3.3.2.	NOMENCLATURA DE LAS MEZCLAS	58
3.4.	DOSIFICACIONES PROPUESTAS Y MATRIZ EXPERIMENTAL.....	59
3.4.1.	ESQUEMA DOSIFICACIONES Y MATRIZ EXPERIMENTAL ETAPA N°1	59
3.4.2.	ESQUEMA DOSIFICACIONES Y MATRIZ EXPERIMENTAL ETAPA N°2	60
3.4.3.	ESQUEMA DOSIFICACIONES Y MATRIZ EXPERIMENTAL ETAPA N°3.A.....	62
3.4.4.	ESQUEMA DOSIFICACIONES Y MATRIZ EXPERIMENTAL ETAPA N°3.B	63
3.5.	MÉTODO ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS CON ADITIVO B Y ADITIVO P EN LABORATORIO	65
3.5.1.	MÉTODO DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS SIN AGREGADO PÉTREO CON ADITIVOS NO TRADICIONALES B Y P EN LABORATORIO.....	65
3.5.2.	MÉTODO DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON AGREGADO PÉTREO Y ADITIVOS NO TRADICIONALES B Y P	68

3.6.	MÉTODO DE LABORATORIO MINI-CBR MODIFICADO.....	70
3.7.	MÉTODO DE LABORATORIO MrTx.....	80
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	86
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	86
4.2.	RESULTADOS Y ANÁLISIS ETAPA N°1.....	89
4.2.1.	ETAPA N°1 ANÁLISIS DE RESULTADOS PRELIMINARES Y DETERMINACIÓN DEL USO DEL SUELO	89
4.2.2.	ANÁLISIS GLOBAL RESULTADOS ETAPA N°1.....	97
4.3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS ETAPA N°2.....	103
4.3.1.	ETAPA N°2.A ANÁLISIS DE RESULTADOS MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE	103
4.3.2.	ETAPA N°2.B ANÁLISIS DE RESULTADOS MEJORAMIENTO DE BASE GRANULAR ...	107
4.3.3.	ANÁLISIS GLOBAL DE RESULTADOS ETAPA N°2	112
4.4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS ETAPA N°3.....	113
4.4.1.	ETAPA N°3.A ANÁLISIS DE RESULTADOS SUBRASANTE ESTABILIZADA.....	114
4.4.2.	ETAPA N°3.B ANÁLISIS DE RESULTADOS BASE GRANULAR ESTABILIZADA	119
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	128
5.1.	CONCLUSIONES	128
5.2.	RECOMENDACIONES	131
6.	REFERENCIAS.....	134
7.	ANEXOS	138
7.1.	LIMO EOLICO O SUELO LOESS	138
7.2.	CAMINOS FORESTALES.....	139
7.3.	NORMATIVA LEGAL SECTOR FORESTAL	141
7.4.	EL SECTOR FORESTAL EN CHILE.....	141
7.5.	CICLO FORESTAL DE LA MADERA Y PROCESO DE ASERRÍO.....	142
7.6.	CAMINOS FORESTALES Y SU IMPORTANCIA	143

7.7.	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS CAMINOS FORESTALES.....	144
7.7.1.	LOCALIZACIÓN RED DE CAMINOS Y ZONAS DE MANEJO FORESTAL.....	144
7.8.	PROPIEADES FISICAS DE LOS SUELOS FORESTALES.....	145
7.8.1.	FACTOR HIDROLOGICO ASOCIADO AL ECOSISTEMA FORESTAL	146

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: DISTRIBUCIÓN DEL TMDA EN LA RED GLOBAL DE CARRETERAS (Faiz, 2012).	2
Tabla 2-1: CLASIFICACIÓN SEGÚN ENFOQUE DE ALGUNOS MÉTODOS DE DISEÑO ,(Rodríguez Moreno, 2014).	11
Tabla 2-2: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL LIMO ,(Zhu & Liu, 2008).	17
Tabla 2-3: COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DEL LIMO ,(Zhu & Liu, 2008).	17
Tabla 2-4: DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS DEL LIMO ,(Zhu & Liu, 2008).	17
Tabla 2-5: SUELOS FINOS DE BAJA PLASTICIDAD , (ASTM, 2011).	18
Tabla 2-6: SUELOS FINOS DE ALTA PLASTICIDAD , (ASTM, 2011).	18
Tabla 2-7: COMPORTAMIENTO DE SUELOS FINOS , (SUCS).	19
Tabla 2-8: TIPOS DE INESTABILIDAD , (Aitchison, Oldecop & Schnaid et al., 2004).	21
Tabla 2-9: REQUERIMIENTOS QUÍMICOS PARA CLASES C Y F DE CENIZAS VOLANTES ,(ASTM C618, 2015).	31
Tabla 2-10: SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)	41
Tabla 2-11: TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE SUELOS, SISTEMAS (ISSS) Y (USDA)	42
Tabla 3-1: GRANULOMETRÍA SUELO ML	51
Tabla 3-2: LÍMITES DE ATTERBERG SUELO ML	51
Tabla 3-3: CLASIFICACIÓN DEL SUELO ML	52
Tabla 3-4: GRANULOMETRÍA SUELO MH	52
Tabla 3-5: LÍMITES DE ATTERBERG SUELO MH	52
Tabla 3-6: CLASIFICACIÓN DEL SUELO MH	53
Tabla 3-7: GRANULOMETRÍA SUELO SB	53
Tabla 3-8: LÍMITES DE ATTERBERG SUELO SB	53
Tabla 3-9: CLASIFICACIÓN DEL SUELO SB	54
Tabla 3-10: RESULTADOS PROCTOR MODIFICADO	54
Tabla 3-11: RESUMEN CLASIFICACIÓN DE SUELOS	55
Tabla 3-12: MATRIZ EXPERIMENTAL ETAPA N°1	59
Tabla 3-13: MATRIZ EXPERIMENTAL ETAPA N°2	61
Tabla 3-14: MATRIZ EXPERIMENTAL ETAPA N°3.A	62
Tabla 3-15: MATRIZ EXPERIMENTAL ETAPA N°3.B	64
Tabla 4-1: DOSIFICACIONES DE ADITIVOS ETAPA N°1	89

Tabla 4-2: RESULTADOS ENSAYO MINI CBR MODIFICADO PARA SUELO MH.....	91
Tabla 4-3: RESULTADOS ENSAYO MINI CBR MODIFICADO PARA SUELO ML.	93
Tabla 4-4: RESULTADOS ENSAYO MINI CBR MODIFICADO PARA SUELO BORDE.	96
Tabla 4-5: VALORES DE CBR ESTIMADOS SEGÚN RESULTADO IMCM.	100
Tabla 4-6: CLASIFICACIÓN Y USO DE SUELO SEGÚN VALOR DE CBR, (Assis A., 1988).	101
Tabla 4-7: DOSIFICACIONES DE ADITIVOS ETAPA N°2.....	103
Tabla 4-8: RESULTADOS ENSAYO MINI CBR PARA SUELO MH.	105
Tabla 4-9: RESULTADOS ENSAYO MINI CBR MODIFICADO PARA SUELO ML.	108
Tabla 4-10: RESULTADOS ENSAYO MINI CBR MODIFICADO PARA SUELO BORDE.	111
Tabla 4-11: DOSIFICACIONES DE ADITIVOS ETAPA N°3.A.	113
Tabla 4-12: DOSIFICACIONES DE ADITIVOS ETAPA N°3.B.....	114
Tabla 4-13: RESULTADOS ENSAYO CBR PARA SUELO MH.	115
Tabla 4-14: RESULTADOS ENSAYO CBR PARA SUELO ML + 30% AGREGADO PÉTREO.	120
Tabla 4-15: RESULTADOS ENSAYO CBR PARA SUELO BORDE + 30% AGREGADO PÉTREO.....	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: DISTRIBUCIÓN DE LA RED VIAL NACIONAL SEGÚN TIPO DE CAPA DE RODADURA, (Dirección de Vialidad (MOP), 2017).....	3
Figura 1-2: ESTRUCTURAS GRANULARES CON CAPA DE PROTECCIÓN, (Thenoux, Halles, & González, 2002).....	5
Figura 2-1: ESTRUCTURA DE CAMINO NO PAVIMENTADO, (Fuente: propia).....	12
Figura 2-2: PARTÍCULAS DE LIMO VISTAS CON UN MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO, (Fuente: http://www.lsu.edu/science/geology/).	16
Figura 2-3: MICROFOTOGRAFÍAS DE LA HIDRATACIÓN DE MEZCLA DEL LIMO CON EL AGENTE ESTABILIZADOR AL DÍA 7, (Zhu & Liu, 2008).	23
Figura 2-4: GRÁFICO DEL ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X DEL MATERIAL MEZCLADO DESPUÉS DE 7 DÍAS, (Zhu & Liu, 2008).	24
Figura 2-5: MICROFOTOGRAFÍAS DEL GEL CSH DURANTE 7 DÍAS, (Zhu & Liu, 2008).	24
Figura 2-6: CENIZA VOLANTE AL MICROSCOPIO, (Fuente: http://www.bibliotecapleyades.net/).	30
Figura 2-7: EJEMPLO DE CURVA DE ENSAYO PROCTOR MODIFICADO, (Fuente: propia).....	33
Figura 2-8: MOLDE CBR, (Fuente: propia).....	34
Figura 2-9: MOLDE MINI-CBR, (Fuente: propia).	35
Figura 2-10: GEOMETRÍA PROBETA TRIAXIAL	37
Figura 2-11: EQUIPO ENSAYO COMPRESIÓN NO CONFINADA (UCS), (Fuente: propia).	37
Figura 2-12: GEOMETRÍA PROBETA MINI UCS	38
Figura 2-13: EQUIPO TRIAXIAL DINÁMICO, ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE (MrTx), (Fuente: propia).....	39
Figura 2-14: APARATO DE CASAGRANDE, (Fuente: propia).....	40
Figura 2-15: TRIÁNGULO TEXTURAL DEL SUELO (USDA).	43
Figura 3-1: SUELOS EN CONDICIONES NATURALES DE TERRENO, (Fuente: propia).	45
Figura 3-2: SACOS DE SUELO NATURAL CON HUMEDAD DESCONOCIDA, (Fuente: propia).....	45
Figura 3-3: SECADO DE SUELOS EN HORNO A 110°C, (Fuente: propia).....	46
Figura 3-4: HOMOGENEIZACIÓN DEL SUELO, (Fuente: propia).	47
Figura 3-5: TAMIZADO DEL SUELO EN HARNERO MALLA N°4, (Fuente: propia).....	47
Figura 3-6: TAMBORES SELLADOS CON SUELO HOMOGENIZADO SECO, (Fuente: propia).	48
Figura 3-7: ADITIVOS Cp y Cv, (Fuente: propia).....	48

Figura 3-8: ADITIVO QUÍMICO SÓLIDO B, (Fuente: propia).	49
Figura 3-9: ADITIVO QUÍMICO LÍQUIDO P. (Fuente: propia)	50
Figura 3-10: ESQUEMA DE TRABAJO EXPERIMENTAL. (Fuente: propia)	57
Figura 3-11: ESQUEMA DOSIFICACIONES ETAPA N°1.	60
Figura 3-12: ESQUEMA DOSIFICACIONES ETAPA N°2.	61
Figura 3-13: ESQUEMA DOSIFICACIONES ETAPA N°3.A.	63
Figura 3-14: ESQUEMA DOSIFICACIONES ETAPA N°3.B.	64
Figura 3-15: PAILA CON CANTIDAD REQUERIDA DE SUELO, (Fuente: propia).	66
Figura 3-16: ADICIÓN DE ADITIVOS SÓLIDOS Y MEZCLADO MANUAL, (Fuente: propia).	66
Figura 3-17: MEDICIÓN CANTIDAD DE AGUA, SEGÚN HUMEDAD ÓPTIMA, (Fuente: propia).	67
Figura 3-18: DOSIFICACIÓN ADITIVO LÍQUIDO CON PROPIPETA, (Fuente: propia).	67
Figura 3-19: ADICIÓN SOLUCIÓN AGUA Y ADITIVO LÍQUIDO EN SUELO SECO, (Fuente: propia)...	68
Figura 3-20: A) CUARTEADOR METÁLICO DE CANALES, B) INCORPORACIÓN DE MATERIAL GRANULAR AL CUARTEADOR, C) MATERIAL GRANULAR CUARTEADO, (Fuente: propia).	69
Figura 3-21: MATERIAL GRANULAR REPRESENTATIVO Y HOMOGÉNEO LUEGO DE CUARTEO, (Fuente: propia).	69
Figura 3-22: BETONERA UTILIZADA EN TRABAJO EXPERIMENTAL, (Fuente: propia).	70
Figura 3-23: MUESTRA DE SUELO SECADA EN HORNO, (Fuente: propia).	71
Figura 3-24: ADICIÓN DE MUESTRA EN MOLDE, (Fuente: propia).	72
Figura 3-25: PISÓN LISTO PARA COMPACTACIÓN, (Fuente: propia).	73
Figura 3-26: EXTRACCIÓN EXCEDENTE DEL SUELO COMPACTADO, (Fuente: propia).	74
Figura 3-27: PROBETA TERMINADA CON TAMAÑO NORMALIZADO, (Fuente: propia).	75
Figura 3-28: PROBETAS ENVASADAS PARA CURADO, (Fuente: propia).	76
Figura 3-29: CAJA DONDE SE ALMACENAN LAS PROBETAS, (Fuente: propia).	76
Figura 3-30: EQUIPO DE INMERSIÓN, (Fuente: propia).	77
Figura 3-31: PROBETAS SUMERGIDAS, (Fuente: propia).	78
Figura 3-32: ENSAYO MINI-CBR MODIFICADO, (Fuente: propia).	79
Figura 3-33: MOLDE PROBETA TRIAXIAL Y APLICACIÓN DESMOLDANTE, (Fuente: propia).	80
Figura 3-34: ADICIÓN DEL SUELO ESTABILIZADO AL MOLDE TRIAXIAL, (Fuente: propia).	81
Figura 3-35: COMPACTACIÓN PROBETA TRIAXIAL, (Fuente: propia).	82
Figura 3-36: RASADO PROBETA TRIAXIAL, (Fuente: propia).	83
Figura 3-37: PROBETAS TRIAXIALES ALMACENADAS PARA CURADO, (Fuente: propia).	84

Figura 3-38: ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE (MrTx), EN PROBETA TRIAXIAL, (Fuente: propia).	84
Figura 3-39: MONITOR SOFTWARE UNIVERSAL, (Fuente: propia).	85
Figura 4-1: IMCM VS. DOSIFICACIÓN PARA SUELO MH.	90
Figura 4-2: RESISTENCIA q_u [kg/cm²] VS DOSIFICACIÓN PARA SUELO MH.	92
Figura 4-3: IMCM VS. DOSIFICACIÓN PARA SUELO ML.	93
Figura 4-4: RESISTENCIA q_u [kg/ cm²] VS. DOSIFICACIÓN PARA SUELO ML.	94
Figura 4-5: IMCM VS. DOSIFICACIÓN PARA SUELO BORDE.	95
Figura 4-6: RESISTENCIA q_u [kg/ cm²] vs. DOSIFICACIÓN PARA SUELO BORDE.	97
Figura 4-7: COMPARACIÓN DE IMCM POR SUELO ETAPA N°1.	99
Figura 4-8: IMCM VS. SUELO MH ETAPA N°2.A.	104
Figura 4-9: RESISTENCIA q_u[kg/cm²] vs. DOSIFICACIÓN PARA SUELO MH.	106
Figura 4-10: IMCM VS. SUELO ML ETAPA N°2.B.	108
Figura 4-11: RESISTENCIA q_u[kg/cm²] vs. DOSIFICACIÓN PARA SUELO ML.	109
Figura 4-12: ÍNDICE MINI-CBR MODIFICADO SUELO BORDE ETAPA N°2.B.	110
Figura 4-13: RESISTENCIA q_u [kg/ cm²] vs. DOSIFICACIÓN PARA SUELO BORDE.	112
Figura 4-14: COMPARACIÓN RESULTADOS ENSAYO MINI CBR MODIFICADO ETAPA N°2.B.	113
Figura 4-15: CBR AL 95% DMCS [%] VS. DOSIFICACIÓN PARA SUELO MH.	115
Figura 4-16: MrTx [MPa] vs. TIEMPO DE REACCIÓN [días] PARA SUELO MH.	117
Figura 4-17: ENSAYO UCS PARA SUELO MH ESTABILIZADO QUÍMICAMENTE CON DOSIS ÓPTIMA.	118
Figura 4-18: REDUCCIÓN DE ESPESOR BASE GRANULAR, SUELO SM, ARENA LIMOSA. (Fuente: Informe de Viabilidad Técnica para la utilización de la estabilización química con aditivos no tradicionales, empresa anónima).	118
Figura 4-19: CBR AL 95% DMCS [%] vs. DOSIFICACIÓN PARA SUELO ML + 30% AGREGADO PÉTREO.	120
Figura 4-20: CBR AL 95% DMCS [%] vs. DOSIFICACIÓN PARA SUELO BORDE + 30% AGREGADO PÉTREO.	121
Figura 4-21: MrTx[MPa] vs. TIEMPO DE REACCIÓN [días] PARA SUELO ML + 30% AGREGADO PÉTREO.	123
Figura 4-22: MrTx [MPa] vs. TIEMPO DE REACCIÓN [días] PARA SUELO BORDE + 30% AGREGADO PÉTREO.	124

Figura 4-23: ENSAYO UCS PARA BASE GRANULAR ESTABILIZADO QUÍMICAMENTE CON DOSIS ÓPTIMA.	126
Figura 7-1: CAMINO FORESTAL RESERVA NACIONAL NONQUÉN CONCEPCIÓN, (Fuente: Google Earth).	140
Figura 7-2: PRODUCTO INTERNO BRUTO SECTOR FORESTAL CHILE (2008-2015), (Ministerio de Agricultura, 2016).	142
Figura 7-3: PROCESO DE ASERRÍO, (CMPC Maderas, 2017).	143
Figura 7-4: ILUSTRACIÓN FRANJA DE PROTECCIÓN DE CAUCE, (Gayoso & Acuña, 1999)	145
Figura 7-5: CAMINO FORESTAL CON ACUMULACIÓN DE SEDIMENTO. (Úbeda, 1996)	146



1. INTRODUCCIÓN

1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1. CAMINOS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO

Los caminos de bajo volumen de tránsito (CBVT) son el orden inferior del transporte terrestre mundial. Son el punto de partida de la economía mundial, ya que todo lo que nos sostiene y nos permite realizar nuestra vida cotidiana (alimentos y materias primas), comienza su viaje hacia nosotros en un camino de bajo volumen de tránsito (Douglas, 2016). El objetivo básico de los CBVT (muchos de ellos no pavimentados), es proporcionar accesibilidad a pueblos, centros de servicio, centros industriales de explotación, y variados tipos de zonas rurales. Además, deben permitir el tránsito de diferentes tipos de vehículos durante todas las estaciones del año, asegurar movilidad y velocidad adecuada, garantizar la seguridad de los peatones, vehículos motorizados y no motorizados, y controlar la emisión de polvo (Thenoux, Halles, & González, 2002). En la actualidad, existen 34 millones de kilómetros de caminos de uso público que se extienden sobre la faz de la tierra (equivalente a 800 veces el perímetro de la Línea del Ecuador). Sólo alrededor del 57% de los caminos del mundo están sellados con mezcla asfáltica, hormigón, o material granular. Prácticamente todos los caminos no pavimentados (13 millones de km), y cerca del 85% de los caminos pavimentados (17 millones de km), poseen un tránsito medio diario anual (TMDA) menor a 1000 vehículos/día (Faiz, 2012). Más allá de los caminos de propiedad pública mencionados, hay millones de kilómetros de caminos privados que prestan servicios a industrias como la minería, la agricultura, el sector forestal, y el sector energético. Las cargas aplicadas por los vehículos que transitan los caminos de servicio o productivos son elevadas, sin embargo, la cantidad de vehículos que utilizan estas vías es baja, por lo que también son considerados *Caminos de Bajo Volumen de Tránsito*. Pero ¿qué es exactamente un camino de bajo volumen de tránsito (CBVT)?, ¿Qué tan “bajo” es? No existe un acuerdo completo, existen distintas opiniones sobre cuál debería ser el volumen de tránsito para ser considerado un CBVT (Douglas, 2016), algunas de estas se mencionan a continuación.



Caminos de Bajo Volumen de Tránsito:

- $TMDA \leq 1000$ veh/día (Faiz, 2012)
- $TMDA \leq 200$ veh/día (Transportation Association of Canadá, TAC)
- $TMDA \leq 400$ veh/día (AASHTO)

Hay razones para aceptar un TMDA de 400 veh/día como límite. El volumen de tránsito en hora punta para caminos rurales de bajo volumen es aproximadamente el 15% del tráfico diario, el 15% de 400 es 60 vehículos y 60 veh/h se traduce en 1 vehículo por minuto, por lo tanto, la “hora punta” en un CBVT es equivalente a una frecuencia de un vehículo por minuto. Si bien, el límite de TMDA puede variar de 200-1000 veh/día, dependiendo de la topografía, uso de la tierra, la población y otros factores socioeconómicos, se acepta el límite propuesto por la AASHTO de un $TMDA \leq 400$ para definir a los CBVT (Douglas, 2016). Esta definición captura aproximadamente el 70-75% de los caminos del mundo, como muestra la Tabla 1-1.

Tabla 1-1: DISTRIBUCIÓN DEL TMDA EN LA RED GLOBAL DE CARRETERAS (Faiz, 2012).

Average daily traffic (ADT), veh/day	% of global road network
<400	70–75
<1000	80–85
<5000	98

Considerando que una parte importante de los caminos de bajo volumen de tránsito se encuentran no pavimentados, es necesario conocer los problemas y condiciones particulares que presentan estos caminos sin pavimentar en comparación con los caminos pavimentados, siendo los principales (Thenoux, Halles, & González, 2002):

- **El nivel de serviciabilidad variable** de los caminos de grava y tierra en cortos períodos de tiempo, por ejemplo: una lluvia intensa puede cortar un camino durante uno o más días.
- **Mayor frecuencia de conservación** lo que genera mayores costos y restricciones al tránsito, produciendo un impacto continuo al usuario.
- Deterioro de la calidad de vida de los habitantes, deterioro ambiental (árboles, plantas, cultivos, aguas, otros) y deterioro de bienes (señalética, alcantarillas, instalaciones urbanas, viviendas, industrias, otros) que se ven impactados por las **emisiones de polvo**.



Capítulo 1: “Introducción”

- Incremento de los costos de operación de los vehículos relacionado al tipo (liviano o pesado), reducción de la velocidad de circulación, tipo de superficie de rodado (tierra o ripio) y del nivel de deterioro.
- Disminución de la seguridad vial en el camino, con la presencia de deterioros superficiales y falta de visibilidad debida al polvo producen un mayor riesgo para los usuarios, lo que se traduce en un mayor número de accidentes.

Los caminos de bajo volumen de tránsito constituyen una parte importante de la red vial interurbana de Chile presentando una gran variedad de estándares tanto geométricos como en la calidad de su superficie de rodado. Los estándares que presentan los CBVT en Chile, van desde caminos de tierra a caminos ripiados, y caminos con estructuras de pavimentos con diferentes tipos de carpetas de rodado (Thenoux, Halles, & González, 2002). Chile presenta actualmente solo un 24,7% de caminos pavimentados con capas tradicionales de hormigón y asfalto (Figura 1-1).

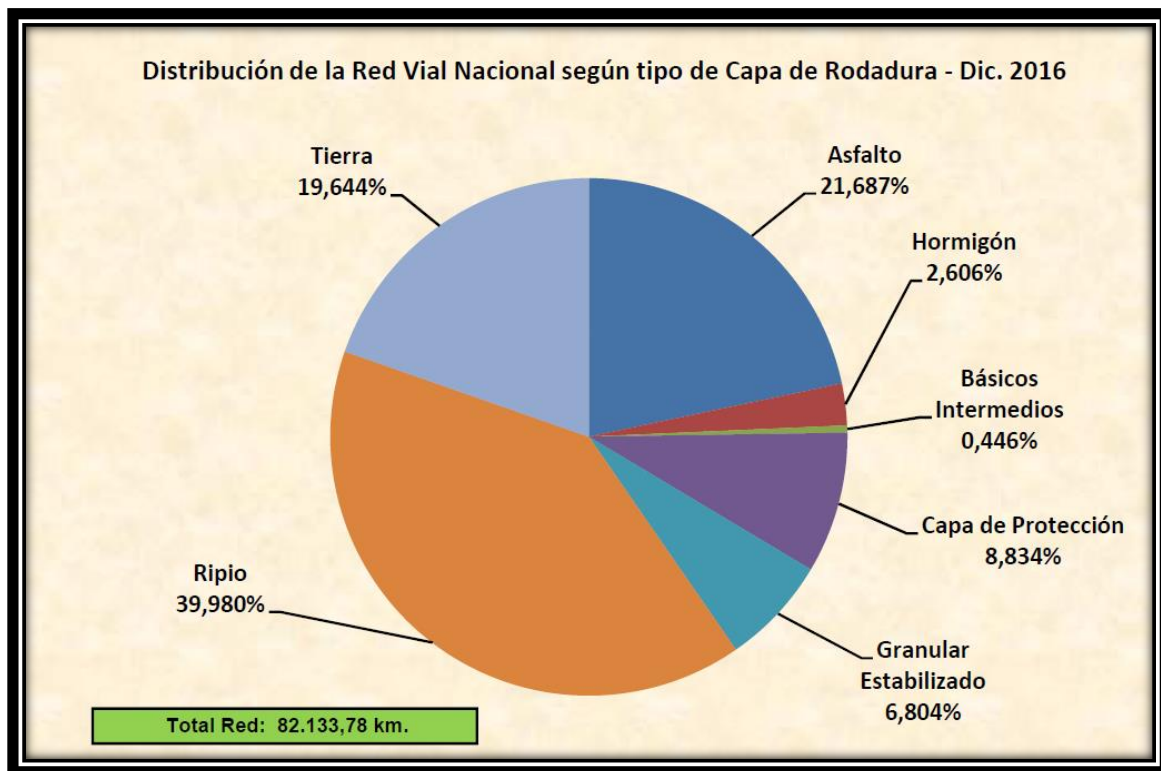


Figura 1-1: DISTRIBUCIÓN DE LA RED VIAL NACIONAL SEGÚN TIPO DE CAPA DE RODADURA, (Dirección de Vialidad (MOP), 2017).

En los CBVT se pueden presentar dos *entornos de diseño*, que dependen de la magnitud y peso de los vehículos que lo transitan, se pueden separar en CBVT de *tránsito liviano* (CBVT-L) cuando se



trata de caminos públicos de localidades rurales con un bajo número de habitantes, y en CBVT de *tránsito pesado* (CBVT-P), cuando se trata normalmente de caminos privados productivos, que son utilizados para servir a la industria o sector productivo. En un CBVT con tránsito liviano podría tener la bicicleta como vehículo típico, mientras que un camino minero podría diseñarse para soportar camiones de hasta 600 toneladas. Claramente, los aspectos de diseño del pavimento de ambos entornos de diseño son muy diferentes (Douglas, 2016).

1.1.2. CAMINOS PRODUCTIVOS Y CONSUMO DE ÁRIDOS DE EN EL SUR DE CHILE

Se les conoce como *caminos productivos* a aquellos caminos de bajo volumen de tránsito, que son utilizados para ser transitados y realizar las faenas del sector industrial o sector productivo, los cuales normalmente se clasifican como CBVT-P. Dentro de esta categoría se encuentran aquellos caminos cuyo porcentaje de vehículos pesados es mayor a 15-20% del flujo total, y los ejes equivalentes estimados son menores a 1 millón. Este tipo caminos se rige por el comportamiento a la fatiga, y a una probabilidad de sobrecargas de trabajo superiores a las máximas permitidas (Thenoux, Halles, & González, 2002). Ya que la mayor parte de la actividad industrial se conecta y ocurre sobre estos caminos, es de vital importancia que se encuentren en las mejores condiciones posibles, para garantizar el funcionamiento continuo y sin interrupciones de la actividad industrial, y para lograr un transporte eficiente y de menor costo posible. Sin embargo, para lograr esto su diseño debe contemplar al menos:

1. Diseño Geométrico Correcto: Que permita un desplazamiento expedito de los vehículos, con una señalización de tránsito adecuada para asegurar los límites de velocidad establecidos y estándares de seguridad mínimos.
2. Diseño Estructural Correcto: Que la carpeta de rodado tenga un espesor que resista el tránsito de vehículos y maquinaria pesados, en condiciones representativas de operación y funcionamiento de las actividades industriales.
3. Diseño Red de Drenaje Correcta: Que facilite una rápida evacuación de las aguas, especialmente en zonas y épocas lluviosas, donde la excesiva humedad puede afectar de manera perjudicial el comportamiento de los materiales que componen los suelos de las capas estructurales de los caminos.



Capítulo 1: “Introducción”

Una de las soluciones más utilizadas para caminos productivos o CBVT-P, se trata de una estructura de pavimento con capas granulares sobre la subrasante o suelo natural, y una capa de protección en la superficie de rodado (Figura 1-2). En esta, y al igual que en la mayoría de las estructuraciones, se necesita un elevado consumo de áridos de buena calidad. Dentro de los requisitos más relevantes como las propiedades mecánicas, un árido de buena calidad para superficie de rodado debería tener una razón de soporte CBR mínima de un 80%; la fracción gruesa deberá tener una resistencia al desgaste, medida por el ensaye de Los Ángeles, de no más de 35%, un contenido de chancado de un 50%, entre otros requisitos (Dirección de Vialidad, 2014).

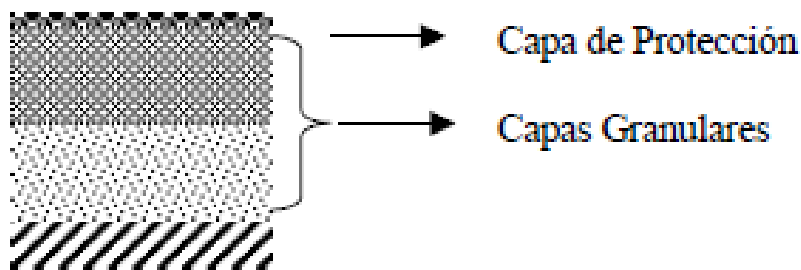


Figura 1-2: ESTRUCTURAS GRANULARES CON CAPA DE PROTECCIÓN,(Thenoux, Halles, & González, 2002).

Esta y otras soluciones pueden ser técnica y económicamente adecuadas, sin embargo, en otros casos como en determinados lugares geográficos, se hace una solución cada vez más difícil de materializar debido a la escasez y cierre de puntos de extracción de material granular de buena calidad, que en ocasiones es transportado en camiones por más de 40-60 km hasta el lugar de construcción del camino, aumentando considerablemente los costos del material por efectos del transporte. Sin embargo, la presencia de áridos en la naturaleza no representa de por sí una condición suficiente para asegurar su explotación, aunque exista la viabilidad técnica y económica para su aprovechamiento. Es preciso determinar previamente los efectos que tendrá la intervención en el territorio en que se desarrollará la extracción de los áridos requeridos (Comisión Nacional de Áridos, 2001).

Para muchas zonas del Sur de Chile este problema se acentúa, ya que es común encontrar suelos con baja capacidad de soporte como *los limos y las arcillas* (suelos finos), lo que requiere de una estructuración con capas granulares de mayor espesor, lo que se traduce en un elevado consumo de áridos de buena calidad. También, hay que considerar el comportamiento hidrológico y las altas precipitaciones existentes durante el año en la mayor parte de esta zona del país. En otras



palabras, la existencia de suelos de baja capacidad de soporte en zonas industriales productivas del Sur de Chile propone un verdadero desafío de ingeniería para la construcción y diseño de CBVT-P productivos.

1.1.3. ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS LIMOSOS PARA CBVT-P COMO UNA POSIBLE SOLUCIÓN

Como se mencionó anteriormente la presencia de suelos limosos que generalmente manifiestan una baja capacidad de soporte, inestables (ver 2.2.4) y junto a que cada vez es más difícil y costoso conseguir áridos de buena calidad para la construcción de caminos, surge la necesidad de evaluar e implementar soluciones alternativas a un menor costo, como podría ser la *estabilización química de suelos limosos*. Esta consiste en alterar las propiedades del suelo usando cierto aditivo, el cual, mezclado con el suelo normalmente produce un cambio en las propiedades moleculares superficiales de los granos del suelo y en algunos casos, adhiere los granos entre sí, a modo de producir un incremento en su resistencia. Los aditivos comúnmente utilizados para la estabilización de suelos son: Cal, Cemento y asfalto (Solminihac, Echeverría, & Thenoux, 1989). Con esto, se reduce el potencial daño provocado por las elevadas solicitaciones de tránsito y el clima, disminuyendo así los deterioros en los caminos, que reducen su vida útil y afectan negativamente la serviciabilidad del camino y la seguridad de los usuarios que lo transitan, teniendo consecuencias negativas en el desarrollo normal de las actividades industriales.



1.2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Según los alcances de esta investigación, se establece la siguiente hipótesis y objetivos generales y específicos.

1.2.1. HIPÓTESIS

La estabilización química utilizando los aditivos no tradicionales B y P, combinados con aditivos tradicionales, genera un efecto positivo sobre las propiedades mecánicas y de estabilidad de tres distintos suelos limosos para la construcción de caminos productivos.

1.2.2. OBJETIVO GENERAL

Determinar la efectividad del aditivo B y el aditivo P combinados con aditivos tradicionales como estabilizadores mecánicos de tres suelos limosos del sur de Chile utilizando una metodología específica.

1.2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para lograr el objetivo general se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Definir dosificaciones de aditivos B y P, combinados con aditivos sólidos tradicionales, para los tres diferentes suelos limosos.
- Evaluar y comparar preliminarmente el comportamiento mecánico de los tres suelos, con distintas dosificaciones de aditivos, a través de ensayos mecánicos en miniatura no tradicionales.
- Determinar, en base a ensayos mecánicos tradicionales, la efectividad de la estabilización química de suelos para su uso como material de subrasante, capa de base, o carpeta de rodado.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos, determinando la efectividad que tienen los aditivos no tradicionales B y P, como agentes estabilizadores químicos de suelos limosos en caminos productivos y así proponer una dosificación adecuada que logre estabilizar las propiedades mecánicas de los suelos analizados.



1.3. ALCANCES DE ESTE ESTUDIO

El trabajo presentado en esta memoria se enfoca en el efecto de dos aditivos no tradicionales B y P en la estabilización química de suelos limosos. Se analizaron tres suelos, un limo de alta plasticidad (Suelo MH) extraído de una localidad ubicada en la provincia de Arauco de la VIII Región del Bío-Bío, un limo de baja plasticidad (Suelo ML) proveniente la provincia de Talca de la VII Región del Maule y un suelo que se encuentra en el límite entre un limo de baja plasticidad (Suelo ML) y una arcilla de baja plasticidad (Suelo CL), que para efectos prácticos de esta investigación se le asigna el nombre de *Suelo Borde* (Suelo SB), extraído de un sector de la provincia de Concepción.

Se utilizó aditivos sólidos tradicionales, como la Cal Viva y Cemento Portland (cemento puzolánico grado corriente), en conjunto con dos aditivos no tradicionales B y P. El aditivo B corresponde a un residuo sólido industrial y el aditivo P a un aditivo químico líquido, utilizado como estabilizador de suelos para caminos, enfocado en aumentar la impermeabilidad y resistencia del suelo. Debido a un acuerdo de confidencialidad con la empresa involucrada en el proyecto, no es posible entregar más información de los aditivos no tradicionales.

Para efectos de optimizar el trabajo experimental de laboratorio, y cumplir con los plazos solicitados por la empresa mandante del proyecto, se decide formar un equipo de trabajo con persona encargada de la investigación sobre los suelos arcillosos y el encargado del laboratorio donde se realizaron los ensayos. El trabajo experimental contempló tres etapas, en las cuales se realizó ensayos no tradicionales Mini-CBR Modificado, considerando un tiempo de curado de siete días con el objetivo de evaluar la reacción de la mezcla de suelo y aditivos, también se hicieron ensayos tradicionales de Módulo Resiliente Triaxial, para conocer el comportamiento en el rango lineal elástico de las dosificaciones finales. En total se realizaron 150 ensayos Mini-CBR Modificado y 20 ensayos de Módulo Resiliente Triaxial. Los resultados se complementaron con ensayos Proctor Modificado, CBR, Compresión no Confinada (Mini UCS y UCS) realizados por una empresa asociada al proyecto, especializada en mecánica de suelos y ensayos de laboratorio.



1.4. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Esta memoria se encuentra estructurada en cinco capítulos, los cuales organizan de la siguiente manera:

Capítulo 1: “Introducción”: Se comienza con la explicación de algunos conceptos necesarios para comprender de mejor manera la motivación para la realización de este estudio, como los caminos de bajo volumen de tránsito y estabilización química de suelos, además se expone la problemática asociada junto a los objetivos y la hipótesis que se busca aceptar. También se resume la estructura de este documento.

Capítulo 2: “Revisión de Literatura y Teoría”: Se explican los principales conceptos asociados a caminos no pavimentados y sus deterioros, se exponen las características de los suelos limosos, composición, estructura molecular y comportamiento. Se presentan los distintos tipos de estabilización de suelos, específicamente la estabilización química con aditivos tradicionales y no tradicionales. También se describen los diferentes ensayos que se considerarán en esta investigación.

Capítulo 3: “Materiales y Métodos de Laboratorio”. Se presentan todos los materiales involucrados en la investigación, tanto los aditivos como los suelos limosos. Además, se presenta la metodología de trabajo experimental, para lograr los objetivos específicos de este estudio.

Capítulo 4: “Resultados y Análisis”. Se presenta el resumen de los resultados obtenidos del trabajo experimental realizado con los tres suelos limosos y se analiza el comportamiento de las distintas dosificaciones utilizadas sobre estos suelos, en los distintos y variados ensayos de laboratorio realizados, determinando cuales fueron las mezclas que presentan el mejor comportamiento en cada etapa.

Capítulo 5: “Conclusiones de la Investigación”. Se presentan las principales conclusiones de la investigación, y se proponen recomendaciones para la implementación de la estabilización química de suelos con los aditivos no tradicionales B y P.



2. REVISIÓN DE LITERATURA Y TEORIA

2.1. INTRODUCCIÓN A LOS CAMINOS NO PAVIMENTADOS

2.1.1. DISEÑO ESTRUCTURAL DE CAMINOS

Para los caminos de bajo volumen de tránsito productivos(CBVT-P) antes mencionados, en la mayoría de los casos se decide la construcción de un camino no pavimentado, debido a que no se justifica invertir en caminos pavimentados definitivos, por su bajo volumen de tránsito, usos intermitentes a lo largo de los años, como en el sector forestal en el cual luego de extraer la madera hay que esperar que los árboles vuelvan a crecer, además de la constante modificación en el diseño geométrico de los caminos, el cual depende de la localización de la materia prima o alimento que se necesite extraer. La elección del método de diseño estructural del camino dependerá de sus necesidades y los recursos que tenga el mandante, es decir, que se trate de un camino que sea factible tanto técnica como económicamente, y que además logre satisfacer las necesidades de sus usuarios, teniendo esto claro se puede optar por el método más adecuado para lograr un diseño correcto. Los métodos de diseño estructural de pavimentos se dividen en tres tipos según su enfoque, pueden ser mecanicistas cuando se basan en la teoría de la mecánica y resistencia de los materiales, empíricos cuando se fundamentan en el desarrollo de pruebas y ensayos de campo, o empírico-mecanicista cuando se implementa el concepto teórico de la mecánica y resistencia de los materiales complementado con las experiencias de ensayos de campo (FHWA, 2006). La Tabla 2-1, presenta un cuadro resumen de los distintos métodos de diseño utilizados a nivel mundial, clasificados según el enfoque utilizado.



Tabla 2-1: CLASIFICACIÓN SEGÚN ENFOQUE DE ALGUNOS MÉTODOS DE DISEÑO, (Rodríguez Moreno, 2014).

ENFOQUE DEL MÉTODO	NOMBRE	REFERENCIA
Empírico	Método de diseño AASHTO-1993	AASHTO (1993)
Empírico Mecanicista	Método de diseño SHPR - LTPP	SHELL (1978)
	Método de diseño del Asphalt Institute	Asphalt Institute A.I. (1999)
	Método de diseño de la PCA 1984	Southgate & Deen (1984)
	Método de diseño AASHTO-1998 para pavimentos rígidos	AASHTO (1998)
	Método de diseño AASHTO-2008	AASHTO (2008)
	Método de diseño Sudafricano	Theyse, De Beer & Rust (1996)
	Método de diseño Francés	Corté & Goux (1996).
	Método de diseño Australiano	Austroads (2010)

Independiente del método de diseño elegido para dimensionar las capas de la estructura, se debe considerar que existe variabilidad de datos de entrada y salida del modelo, además de la aleatoriedad que presentan los procesos constructivos en conjunto con las condiciones climáticas a las cuales estará sometida la estructura de pavimento (Rodríguez, Thenoux, & González, 2016).

2.1.2. CAPACIDAD ESTRUCTURAL CAMINOS

Se define como capacidad estructural de un pavimento a su habilidad para resistir las sollicitaciones del tránsito y medio ambiente. Este parámetro queda determinado por sus características de diseño: espesores, resistencia de las capas constituyentes y capacidad de soporte del suelo de la subrasante (Manual de Carreteras, 1997). Los caminos no pavimentados poseen una estructura más simple y menos resistente en comparación a un camino pavimentado. Sin embargo, ambos deben resistir las mismas sollicitaciones de tránsito, ya que juntos forman parte de la red vial de caminos y sobre ellos debe transitar el mismo tránsito pesado si se trata de un CBVT-P. Su simple estructura está compuesta por una carpeta de rodado de material granular estabilizado, con un espesor diseñado en base a las sollicitaciones de tránsito, que proporciona la resistencia y estabilidad necesarias para proteger la *subrasante* de esfuerzos que provoquen la fatiga de la *estructura de camino* (Figura 2-1).



Figura 2-1: ESTRUCTURA DE CAMINO NO PAVIMENTADO, (Fuente: propia).

2.1.3. VIDA ÚTIL PROYECTADA

Se define como vida de diseño de un pavimento, al tiempo de duración desde su puesta en servicio, hasta que el deterioro que presenta el camino alcanza un grado predefinido como condición terminal. Se entiende por vida útil remanente en un determinado instante, a la vida útil que le falta al pavimento para alcanzar la condición terminal (Manual de Carreteras, 1997).

Entre los principales factores que influyen en la vida útil de un camino se encuentra el tránsito y las condiciones climáticas. Algunos caminos no pavimentados que se encuentran en zonas de montaña, por ser parte de faenas industriales importantes, deben mantenerse operativos el mayor tiempo posible durante el año, debido al fuerte impacto económico que podría significar su cierre (Pradena, Mery, & Novoa, 2010). Las carreteras sin pavimentar se manejan de manera muy diferente a las carreteras pavimentadas, el mantenimiento se necesita mucho más a menudo en las carreteras sin pavimentar, la planificación del mantenimiento a largo plazo para una carretera pavimentada sería de 5 a 20 años mientras que para una carretera sin pavimentar sería durante 1-2 años (Eaton, Gerard, & Cate, 1987). La vida útil de un CBVT-P depende directamente del tipo y frecuencia de mantenimiento que reciba. Por lo tanto, como mínimo se necesita que la vida útil de un CBVT-P se extienda al menos un año o un ciclo productivo.

2.1.4. DETERIOROS EN CAMINOS NO PAVIMENTADOS

En la *política de conservación vial para caminos no pavimentados*, elaborada por la Dirección de Vialidad apoyada por la Dirección de Planeamiento del Ministerio de Obras Públicas (MOP), que consiste en una propuesta para apoyar la labor del mantenimiento de las calzadas de ripio y suelo que administra la Dirección de Vialidad, basado en el análisis del comportamiento de las carpetas granulares sometidas a las condiciones climáticas y de cargas de tránsito, se definen los tipos de deterioros en caminos no pavimentados, los cuales se presentan a continuación (Dirección de Vialidad, 2012).



2.1.4.1. *Calaminas*

Es un daño que se manifiesta por la pérdida de regularidad superficial debido a la aparición de ondulaciones equidistantes a lo largo del camino, provocado por el movimiento de la suspensión de los vehículos que transitan, causando cargas dinámicas a intervalos regulares, como consecuencia del modo su modo de vibrar. Es posible que en la generación de calaminas también influya el nivel de compactación y contenido de humedad del suelo, así como la estabilidad del agregado.

2.1.4.2. *Baches*

Son espacios vacíos y depresiones que se forman de forma puntual en la superficie, debido a fallas localizadas en la superficie de la calzada. Generalmente su aparición ocurre producto de causas tales como: drenaje insuficiente, baja capacidad de soporte, baja densidad, graduación pobre, susceptibilidad térmica y fallas superficiales producto de la acción del tránsito.

2.1.4.3. *Ahuellamiento*

Son depresiones en sentido longitudinal a lo largo del camino, bajo las huellas que dejan las ruedas de los vehículos. El ahuellamiento es ocasionado por la baja capacidad de soporte o baja densidad de la base y/o subbase, debido a una baja e inadecuada compactación del material. El tránsito pesado puede causar ahuellamiento cuando el material de la base y la subbase se encuentra saturado. La humedad excesiva puede generar superficies inestables y presentarse el ahuellamiento de la capa de rodado.

Los materiales granulares no estabilizados en pavimentos flexibles, exhiben un comportamiento dependiente del nivel de tensiones. Esto significa que, cuando se confinan en una capa de pavimento, la rigidez efectiva aumenta o disminuye con el incremento del estado de carga. Cuando los materiales son repetidamente cargados a niveles de tensiones que superan su resistencia última, se presentan deformaciones de corte (cizalle) que se traducen en ahuellamiento (MINVU, 2008).

2.1.4.4. *Levantamiento de Polvo*

Este tipo de problema ocurre luego del paso de los vehículos, los cuales levantan polvo (material fino en suspensión) presente en la carpeta de rodado, que está presente debido a la pérdida de material fino por parte de la capa de rodado, ocasionado principalmente por la acción



de las solicitaciones de tránsito y el efecto abrasivo de los neumáticos sobre la superficie de rodado.

2.1.4.5. Depresiones

Son un tipo de daño que se caracteriza por manifestarse como una depresión localizada en la superficie, y que puede considerarse un daño cuando la profundidad de la falla afecte notoriamente la calidad de la rodadura, o en caso de que se formen pozos de agua en la superficie, lo que se puede transformar en un serio inconveniente para los vehículos.

Las posibles causas de las depresiones pueden deberse a problemas tales como: capacidad de soporte insuficiente de la subrasante, contenido de humedad excesivo, drenaje inadecuado, problemas constructivos o presencia de una superficie inestable. También, pueden ser resultado de fallas producidas en la superficie debido a la acción del tránsito, y particularmente el tránsito pesado cuando la base de la estructura se encuentra saturada.

2.1.4.6. Pérdida de Agregado

La capa de rodadura con el paso del tiempo perderá material de agregado grueso debido a la acción del tránsito. Esto ocurre particularmente cuando se tiene una baja plasticidad por falta de material fino, por una pobre distribución de tamaños de partícula del material de la carpeta de rodadura o simplemente una pobre compactación. La mayor severidad en la pérdida de la fracción gruesa ocurre en caminos que tienen altos volúmenes de tránsito, en zonas con fuertes pendientes y trazados con numeradas curvas.

2.1.4.7. Erosión

Se trata de la pérdida de material de la carpeta de rodado, fundamentalmente por la acción agresiva de la escorrentía superficial del agua lluvia, que produce arrastre de sedimentos y genera irregularidades en la superficie, que pueden ir en aumento tras la ocurrencia de lluvias recurrentes o de gran envergadura y pueden ocasionar daños severos en la superficie de rodadura.

2.1.4.8. Deslizamiento

Ocurre cuando la superficie de rodado contiene excesiva cantidad de agregados finos en proporción a la fracción gruesa. Adicionalmente, por la acción del tránsito, se puede producir el triturado del agregado grueso, convirtiéndose en partículas más finas, lo que genera una capa de



material suelto en la superficie reduciendo significativamente el roce de la capa de rodadura. Como consecuencia se produce el deslizamiento de los neumáticos.

2.2. SUELOS LIMOSOS

Los limos son suelos de grano fino con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser limo inorgánico como el producido en canteras, o limo orgánico como el que suele encontrarse en los ríos, siendo en este último caso de características plásticas. El diámetro de las partículas de los limos está comprendido entre 0.05 mm y 0.005 mm. Los limos sueltos y saturados son completamente inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas. Su color varía desde gris claro a muy oscuro. La permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su compresibilidad muy alta. Los limos, de no encontrarse en estado denso, a menudo son considerados como suelos pobres para cimentar (Crespo Villalaz, 2004). Típicamente, los suelos limosos exhiben propiedades de ingeniería deficientes, es decir, baja resistencia, baja rigidez y dificultad para la compactación, por lo que no se permite utilizar directamente en el terraplén (Zhu & Liu, 2008).

2.2.1. CARACTERÍSTICAS Y FORMACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE SUELO LIMOSO

Las partículas de limo son fragmentos de minerales primarios. Los minerales primarios son aquellos que se cristalizaron bajo las condiciones de formación de las rocas y que, por lo tanto, son parte de ellas. Estos minerales pueden estar presentes en el suelo si éste no ha evolucionado lo suficiente o si han sido muy resistentes a la acción de los procesos de alteración de la roca y el suelo. Cuando se presentan en el suelo constituyen la mayor parte de las partículas del tamaño de arena y limo (entre 0.002 y 2 mm) existentes en él (Jaramillo, 2002). La mayoría de las partículas de limo no son visibles a simple vista, pero se pueden ver a través de un microscopio corriente, aunque si se dispone de un microscopio electrónico se podría ver como en la Figura 2-2. Al tacto se sienten lisos cuando están mojados y como talco en polvo cuando están secos. Poseen una capacidad baja a media para atraer agua. Exhiben algo de plasticidad, cohesión, adhesión y absorción. Además, pueden contener más cantidad de agua que arena, pero menos que la arcilla (Osman, 2013).

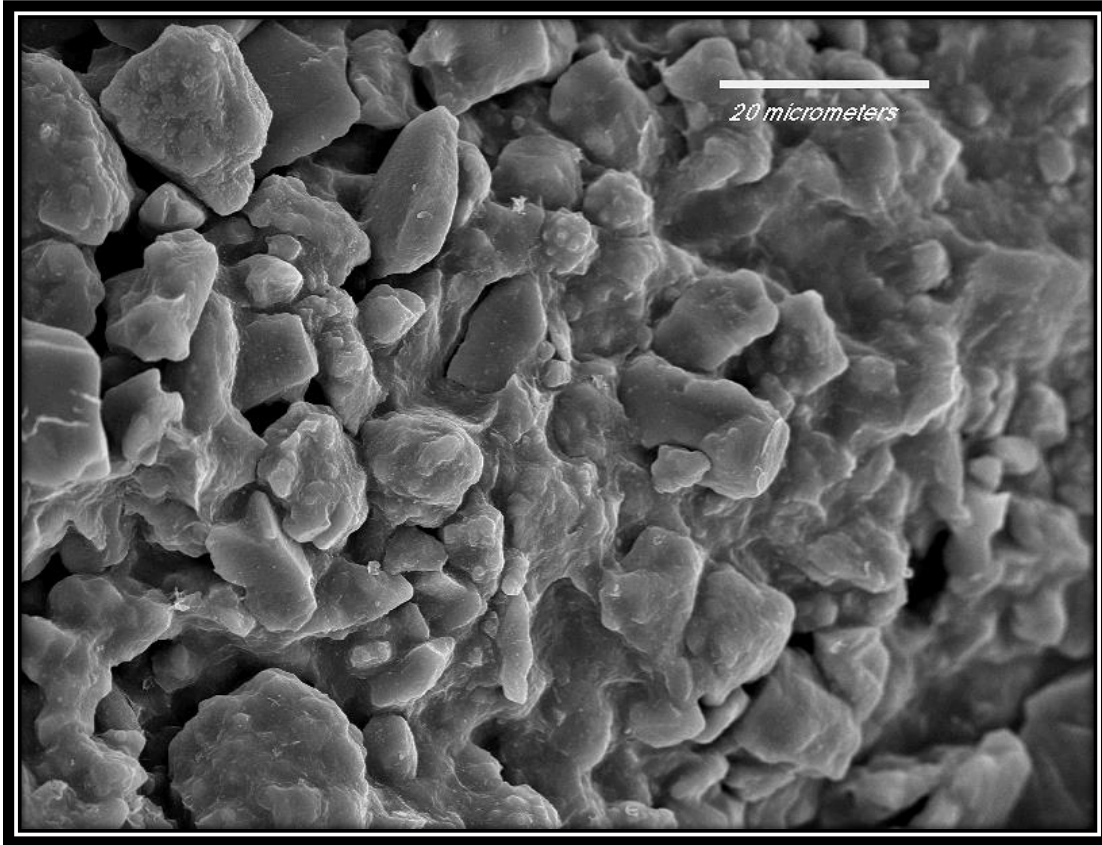


Figura 2-2: PARTÍCULAS DE LIMO VISTAS CON UN MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO, (Fuente: <http://www.lsu.edu/science/geology/>).

2.2.2. COMPOSICIÓN DE LOS LIMOS

El comportamiento de los suelos es dependiente en gran parte, de su composición química, composición mineralógica y distribución del tamaño de las partículas, ya que a nivel micro es donde ocurren reacciones químicas y físicas que definen en gran parte el comportamiento mecánico del suelo (Zhu & Liu, 2008). Ningún suelo posee la misma composición que otro, a pesar de pertenecer al mismo grupo. Los limos pueden variar su composición, pero se mueven dentro de rangos conocidos. En la Tabla 2-2 se muestra la composición química de una muestra de suelo tipo limo, en la cual se expone que los principales componentes son, el dióxido de silicio (SiO_2) con un 75%, seguido por el óxido de aluminio (Al_2O_3) con un 10%, además presenta un 4% de materia orgánica con la cual hay que tener sumo cuidado, ya que producto de su descomposición las propiedades mecánicas se ven disminuidas (Zhu & Liu, 2008).



Tabla 2-2: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL LIMO,(Zhu & Liu, 2008).

Composición	Contenido (%)
SiO_2	74,64
Fe_2O_3	6,53
Al_2O_3	10,2
TiO_2	0,54
CaO	0,63
MgO	0,74
K_2O	1,44
Na_2O	0,57
P_2O_3	0,08
SO_3	0,03
LOI	0,52
Orgánica	4,1

La composición mineralógica de la muestra de suelo tipo limo está compuesta principalmente de cuarzo, en una proporción de un 40%.

Tabla 2-3: COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DEL LIMO,(Zhu & Liu, 2008).

Mineral		Contenido (%)
Minerales no arcillosos	Cuarzo	40
	Feldespato	7
	Mica	8
	Calcita	7
	Dolomita	3
Minerales arcillosos	Montmorillonita	10,2
	Caolinita	4
	Illita	5,6
	Clorito	5,2
Others		10

El 73% del contenido total de la muestra, está en un rango de tamaño de partícula de 0.075-0.005 [mm].

Tabla 2-4: DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS DEL LIMO, (Zhu & Liu, 2008).

Rango de tamaños de partícula [mm]	Contenido (%)
2-0,075	2,9
0,075-0,005	73,8
<0,005	23,3



2.2.3. COMPORTAMIENTO Y CLASIFICACIÓN SEGÚN PLASTICIDAD DE SUELOS LIMOSOS Y SUELOS FINOS

Cuando se habla de suelo fino se refiere a cuyo suelo que tamizado por la malla N°200, el porcentaje que pasa por el tamiz es superior a la mitad y se separa en dos grupos principalmente, cuando el límite líquido está por debajo de 50%, se comporta como un suelo de baja plasticidad, así mismo cuando este límite es mayor a 50% el suelo presenta un comportamiento plástico, y se clasifican de la siguiente manera (ASTM, 2011):

- Límite líquido < 50%

Tabla 2-5: SUELOS FINOS DE BAJA PLASTICIDAD, (ASTM, 2011).

Tipo de Suelo	Nombres Típicos
ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos de baja plasticidad.
CL	Arcillas inorgánicas de baja plasticidad, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas y arcillas magras.
OL	Limos orgánicos y arcillas limosas organicas de baja plásticidad.

- Límite líquido > 50%

Tabla 2-6: SUELOS FINOS DE ALTA PLASTICIDAD, (ASTM, 2011).

Tipo de Suelo	Nombres Típicos
MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, alta plasticidad.
CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas gruesas.
OH	Arcillas orgánicas y limos organicos de alta plasticidad.



Capítulo 2: “Revisión de Literatura y Teoría”

Además de saber cómo se clasifican los suelos finos, es muy importante conocer también cómo se comportan estos suelos con respecto a la permeabilidad, resistencia al corte, compresibilidad, susceptibilidad al agrietamiento, susceptibilidad a la licuación y manejabilidad cuando son utilizados como materiales para la construcción de terraplenes y caminos. Para conocer a grandes rasgos el comportamiento de los suelos finos se presentan a continuación en la tabla 2-7.

Tabla 2-7: COMPORTAMIENTO DE SUELOS FINOS, (SUCS).

Tipo de Suelo	ML	MH	CL	CH
Permeabilidad	Impermeable	Muy Impermeable	Impermeable	Muy Impermeable
Resistencia a la Tubificación	Baja a Muy Baja	Media a Alta	Alta	Muy Alta
Resistencia al Corte	Media a Baja	Baja	Media	Baja a Media
Compresibilidad	Los asentamientos pueden ser grandes y se calculan en base a pruebas de consolidación			
Susceptibilidad al Agrietamiento	Muy susceptibles deben colocarse con alto grado de saturación		Media a Alta	
susceptibilidad a la Licuación	Media a Alta si son mal compactados	Muy Baja	Media a Alta si son mal compactados	Muy Baja
Manejabilidad	Correcta a muy pobre	Buena a correcta	Pobre a muy pobre	Muy pobre



2.2.4. PROBLEMAS ASOCIADOS A LOS LIMOS Y LA DIFICULTAD EN SU ESTABILIZACIÓN

El comportamiento mecánico de los suelos está gobernado por su estructura e interacción entre sus componentes (materia sólida, vacíos y fluido). Usualmente se les clasifica como *estables* o *inestables*, entendiendo por materiales estables a aquellos cuyo comportamiento está asociado a sus propiedades intrínsecas y factores mecánicos, mientras que la *inestabilidad* se atribuye a comportamientos emergentes producto de la presencia de factores externos a la masa de suelo. En la Tabla 2-8, se han reportado diferentes tipos de suelo con la inestabilidad que los caracteriza. En suelos como limos arenosos o limos arcillosos tipo loésicos, la inestabilidad se atribuye a la disminución rápida de volumen (Jennings & Knight, 1957), producida por el aumento aislado o combinado del contenido de humedad (ω), grado de saturación (S_r), tensión media actuante (σ), tensión de corte (τ), o por el aumento en la presión de poros (u) (Zur & Wiseman, 1973). Las causas que provocan la disminución del grado de saturación en el suelo son diversas, entre ellas se pueden mencionar a la evaporación de la superficie en suelos descubierto, evapo-transpiración de árboles y plantas o desecación por la transmisión de energía en forma de calor (Fredlund & Rahardjo, 1993), por el contrario el humedecimiento puede producirse por inundación local del suelo por precipitaciones, filtraciones de agua producto de roturas de cañerías de conducción (Redolfi, 1993), ascenso del nivel freático, modificaciones del régimen de evaporación superficial o irrigación en terrenos cercanos.

Para fines de ingeniería, resulta de interés conocer la potencialidad de colapso y las magnitudes que puede adoptar. A macro-escala, y a niveles de presión moderadamente baja (10kPa) el comportamiento del suelo aparenta una situación contradictoria en el principio de tensiones efectivas, debido a que el aumento del contenido de humedad produciría una disminución de las presiones efectivas, y en consecuencia debería producirse una expansión. Por el contrario, se produce una disminución significativa en la relación de vacío del suelo, fenómeno que puede ser explicado a través de la mecánica de suelos no saturados (Bishop, 1960, Alonso & Lloret 1982, Fredlund & Rahardjo 1993, Mitchell 1993, Lu & Likos 2004). Las condiciones para que la disminución repentina de volumen tenga lugar, requiere de tres condiciones (a) Estructura abierta parcialmente saturada, (b) una profundidad tal que las tensiones produzcan una estructura de suelo metaestable y (c) fuerzas debido al cementante entre partículas que estabilice la fábrica cuando está seca o a humedad natural (Mitchell 1976, Collins 1978). Estas condiciones permiten



Capítulo 2: “Revisión de Literatura y Teoría”

comprender el fenómeno a micro escala caracterizado por el ingreso de agua en la masa de suelo, debilitamiento de los puentes cementante entre partículas correspondientes a la fracción gruesa y falla en el contacto por exceso de tensiones de corte. En consecuencia, el líquido que ingresa a la masa de suelo posee influencia en la magnitud de los asentamientos, debido a la interacción química del líquido saturante y la fracción arcillosa (Reginatto, 1971)(Arrúa, 2008).

Tabla 2-8: TIPOS DE INESTABILIDAD, (Aitchison, Oldecop & Schnaid et al., 2004).

Tipo de suelos	Características generales	Tipo de inestabilidad
Rocas	Empleadas como escolleras	Colapso por humedecimiento
Arenas ⁽¹⁾	Sueltas, saturadas, sin cementar.	Licuefacción ante excitación dinámica.
Arenas	Residuales arenosos sin saturar. Alta porosidad (luego de intensa lixiviación, seguido de desecación).	Colapso por humedecimiento.
Arenas	Eólicas, sin saturar, ligeramente cementadas con alta porosidad. Climas áridos.	Colapso por humedecimiento.
Arenas	Alto índice de huecos y cementación soluble en agua (calcárea).	Colapso por humedecimiento.
Arenas	Alto índice de huecos, sin saturar, con uniones intergranulares asociadas a arcillas potencialmente dispersivas (normalmente altamente sódicas).	Susceptibles de colapso, de licuefacción o de erosión interna luego de la percolación de un electrolito dispersivo.
Limos y loess ⁽²⁾	Limos saturados.	Hinchamiento por congelación.
Loess	Con baja cementación, sin saturar.	Colapso por humedecimiento.
Arcillas y limos eólicos	Sin saturar.	Expansión o colapso por humedecimiento
Arcillas	Densas, altamente reactivas.	Expansión y retracción por humedecimiento. Variación volumétrica por variación del espesor de la doble capa difusa
Arcillas	Mal compactadas.	Erosión interna tubificada.
Arcillas	Sensitivas blandas, saturadas.	Licuefacción en fallas localizadas.
(1) El alto índice de vacíos no es condición suficiente para la inestabilidad estructural, caracterizada por la resistencia del cementante intergranular.		
(2) No siempre manifiestan inestabilidad estructural bajo cargas de servicio.		



2.2.5. ESTABILIZACIÓN QUÍMICA EN SUELOS LIMOSOS

Los suelos limosos existentes en la subrasante de un camino pueden causar asentamientos excesivos y pérdida de la capacidad de carga, si no se implementa una mejora del suelo. La estabilización química es uno de los métodos efectivos y bien practicados para mejorar las propiedades de ingeniería de los suelos limosos. Los aditivos químicos, tales como el Cemento Portland, Cal Viva y Cenizas Volantes, se han utilizado ampliamente para mejorar la resistencia, rigidez y propiedades de compresibilidad de los suelos problemáticos por investigadores anteriores (Zhang, Cai, & Liu, 2016). Sobre los limos caracterizados según su composición en la sección 2.2.2, se realizó un estudio similar al desarrollado en esta memoria, en el cual, el agente estabilizador se compone de cemento, cal, cenizas volantes, aditivo A (subproducto del molino de cemento) y el componente expansivo A, que consiste en una mezcla de alumbre, yeso y sulfato de sodio. El mecanismo de estabilización de solidificación y llenado de vacíos producido sobre este limo se divide en tres reacciones: hidratación, excitación e intercambio de cationes, las cuales se explican a continuación (Zhu & Liu, 2008):

Hidratación: El calcio del cemento, la ceniza volante y la cal del agente estabilizador reacciona con la sílice y la alúmina sobre el limo para formar hidratos cementosos, como los silicatos de calcio hidratados (CSH). La hidratación mejora enormemente como consecuencia del agente activador. También se producen numerosos cristales irradiados (Figura 2-3). Estos hidratos cementosos producen un aumento del contacto entre las partículas de suelo. Los que también llenan eficientemente los vacíos de aire contenidos en el suelo. Por lo tanto, es evidente que mejora la resistencia del suelo.

Intercambio de Cationes: Los iones de calcio en el agente estabilizador formulado reemplazan los cationes monovalentes en el limo. Esto disminuye el grosor de la doble capa de agua y aumenta la atracción entre las partículas. Cuanto mayor es la capacidad de intercambio de cationes, más sensibles son los suelos al cambio en las condiciones físicas y químicas, y más fácilmente se cambian las propiedades.

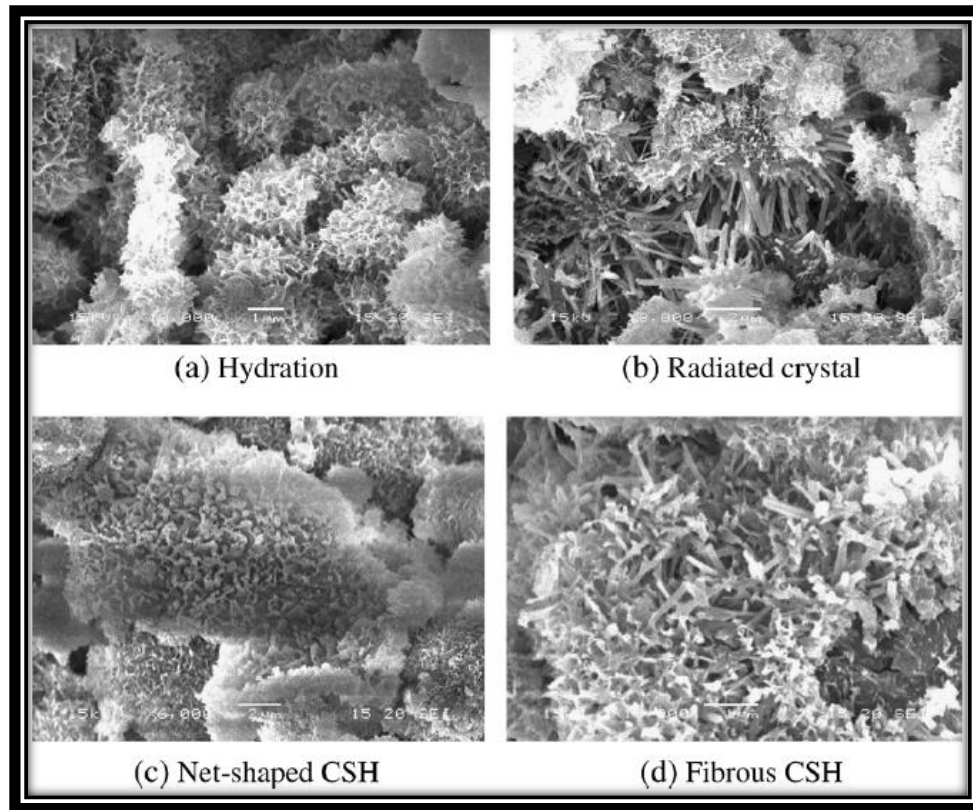


Figura 2-3: MICROFOTOGRAFÍAS DE LA HIDRATACIÓN DE MEZCLA DEL LIMO CON EL AGENTE ESTABILIZADOR AL DÍA 7, (Zhu & Liu, 2008).

Excitación: Los materiales mezclados que consisten en 20% de cal, 18% de agente activador que se incluye en el aditivo A y 62% de limo, los iones de silicio y los iones de aluminio solo provienen del limo, por lo que la generación de CSH y otros cristales demuestra que hay Al_2O_3 y SiO_2 activos que pueden ser excitados en el limo. En la Figura 2-4 se muestran los resultados del ensayo de difracción de rayos X. Se sabe por la capacidad de intercambio de cationes del limo que el intercambio iónico puede consumir una pequeña cantidad de $Ca(OH)_2$. Por lo tanto, la excitación activa consumirá la mayoría de $Ca(OH)_2$. En las muestras, se observa CSH fibroso, lo que indica que el SiO_2 activo se excita continuamente. Entonces el aditivo tiene el limo en estado de excitación. Además, el grado de cristalización de CSH no es alto y el pico de difracción de rayos X es ancho y débil y se solapa con el de otros materiales. Por lo tanto, es difícil juzgar a partir del gráfico de difracción de rayos X si los CSH se han formado o no. Sin embargo, esto se puede determinar a partir de la imagen de la Figura 2-5. La solidificación y el llenado se asocian en la estabilización del suelo, y la acción anterior puede mejorar la última. La hidratación también mejora la excitación y el intercambio iónico.

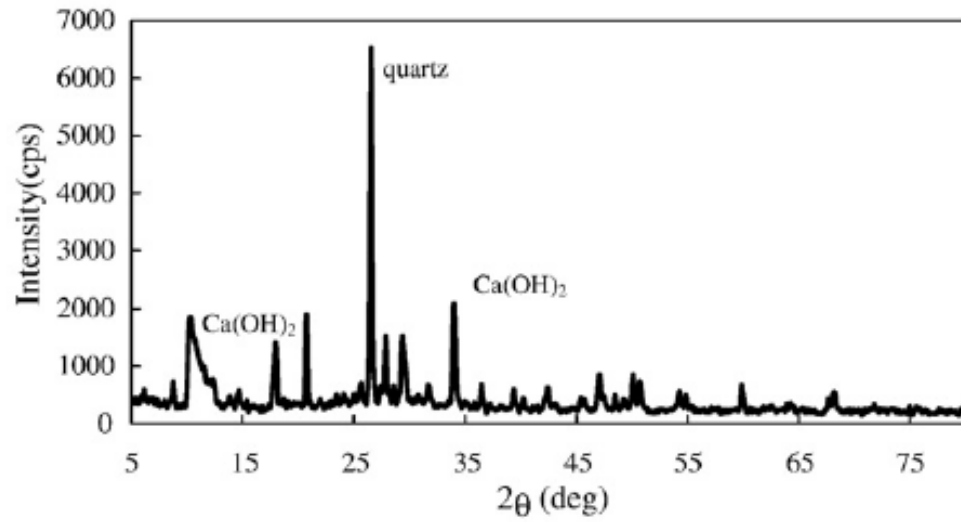


Figura 2-4: GRÁFICO DEL ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X DEL MATERIAL MEZCLADO DESPUÉS DE 7 DÍAS,(Zhu & Liu, 2008).

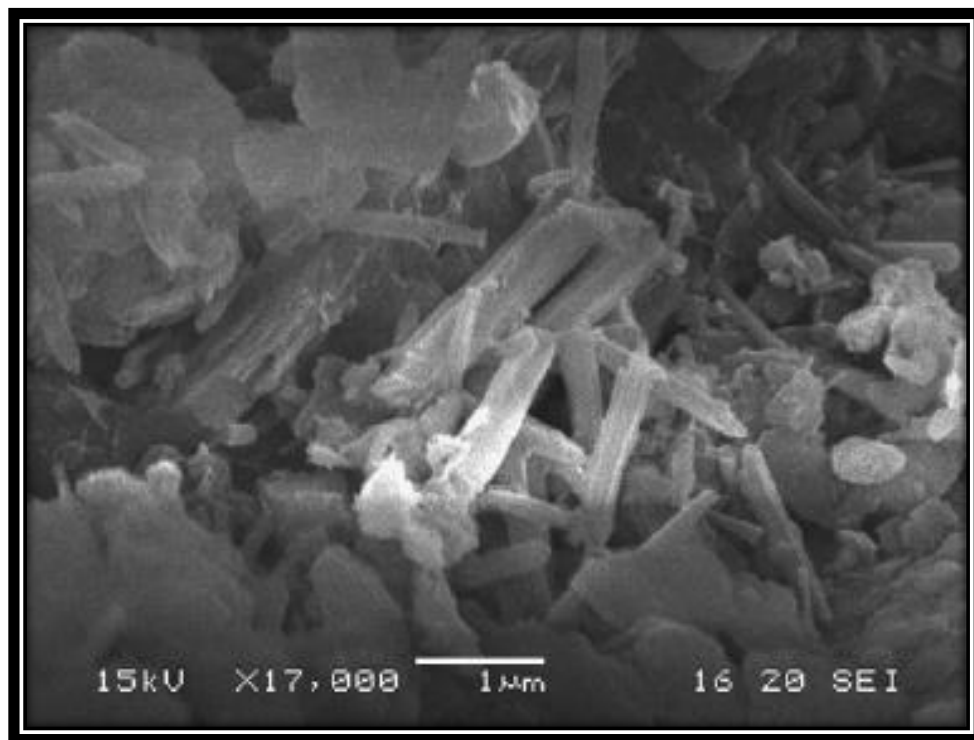


Figura 2-5: MICROFOTOGRAFÍAS DEL GEL CSH DURANTE 7 DÍAS,(Zhu & Liu, 2008).



2.3. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA CAMINOS NO PAVIMENTADOS

En muchas ocasiones los suelos existentes en obra no cumplen los requisitos de calidad para ser empleados en subrasantes, subbases, bases, etc. Lo anterior, conlleva al desarrollo de un proceso para el mejoramiento de dichos suelos, de manera que éstos alcancen los requisitos establecidos. Tal proceso recibe el nombre de estabilización de suelos y consiste principalmente, en mejorar un suelo estabilizando su fase sólida o esqueleto resistente, obteniéndose de esta manera, el aumento de su capacidad de soporte y la disminución de las deformaciones inducidas por solicitaciones externas (MINVU, 2008).

Cuando se necesita mejorar las condiciones de la carpeta de rodado y propiedades del suelo puede recurrirse a la estabilización del suelo por medios mecánicos o químicos, en resumen, la primera alternativa, se trata de una solución que se logra través de la compactación y el mejoramiento de la estructura granulométrica del suelo, mientras que la segunda consiste en la aplicación de aditivos químicos como sales, enzimas, polímeros, sub productos industriales y otros, que se mezclan con el suelo a tratar, según dosis previamente definidas. Algunas de estas soluciones requieren adicionalmente un curado posterior a su aplicación (Thenoux & San Juan, 2000).

2.3.1. TIPOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

En general, como se menciona anteriormente, la estabilización de suelos se puede clasificar como (Solminihaç, Echeverría, & Thenoux, 1989):

I. Estabilización mecánica (solución tradicional):

Consiste en la alteración de las propiedades del suelo, esto se logra modificando su granulometría por medio de agregar (generalmente arenas) o quitar partículas, en conjunto compactación en condiciones óptimas de humedad, logrando la densidad del suelo necesaria para que el incremento de resistencia sea el adecuado para resistir las solicitaciones de tránsito.

II. Estabilización Química (solución no tradicional):

Consiste en alterar las propiedades del suelo usando cierto aditivo, el cual, mezclado con el suelo, normalmente produce un cambio en las propiedades moleculares superficiales de los granos del suelo y en algunos casos, adhiere los granos entre sí, a



modo de producir un incremento en su resistencia. Los aditivos comúnmente utilizados para la estabilización de suelos son: Cal, Cemento y asfalto.

2.3.2. BENEFICIOS ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Las técnicas de estabilización permiten mejorar en forma total o parcial las propiedades de un suelo, por medio de un conjunto de tratamientos y técnicas implementadas en la ejecución de la vía. Sin embargo, una estabilización podría verse afectada por una gran variedad de suelos y composiciones de calle en calle, haciendo que el método sea aplicable a un número limitado de ellos, pero, en cualquier caso, es recomendable que el procedimiento a aplicar sea económico y compatible con el suelo a tratar (MINVU, 2008).

Toda estabilización de suelos, al mejorar sus propiedades, permite obtener los siguientes beneficios o ventajas: el mejoramiento de materiales marginales (materiales que no son utilizados por sus bajas propiedades de resistencia y cohesión), el incremento de la resistencia, el aumento de la durabilidad, el control de cambios volumétricos del suelo, reduce los requerimientos de espesor de las capas estructurales del pavimento, provee un suelo impermeable y reduce el polvo (Solminihaç, Echeverría, & Thenoux, 1989) (MINVU, 2008). La optimización de materiales trae como consecuencia un menor impacto ambiental.

Para ciertos tipos de suelos, la resistencia varía ampliamente al cambiar el contenido de humedad. Con la estabilización se pretende lograr que, dentro de condiciones normales, el contenido de humedad sólo varíe dentro de un rango esperado en terreno, y que las características del suelo se mantengan constantes, se tendrá así una resistencia conocida y estable. Para ello se añaden y mezclan con el suelo diferentes productos hidrófilos, que transmiten esta propiedad al suelo, estabilizando sus características. Así sucede con los suelos predominantemente arcillosos y con los suelos limosos, capaces de absorber y retener por absorción proporciones elevadas de agua. Cuando están secos se disgregan y presentan apreciable resistencia, pero cuando tienen cierta cantidad de humedad se hacen plásticos y deformables llegando incluso a fluidificarse (Marquina, 2008).

2.3.3. TIPOS DE AGENTES ESTABILIZADORES

En la actualidad el mundo cuenta con una variada gama de agentes estabilizadores. Estos incluyen compuestos químicos tales como cloruro de calcio, polímeros y productos derivados del



petróleo (aceites sulfonados), y otros productos y agentes ligantes más convencionales, como cemento, cal y asfalto. Todos ellos apuntan a alcanzar el mismo objetivo de ligar las partículas individuales de agregado para incrementar la resistencia y/o hacer el material más resistente al agua. Algunos son más efectivos que otros en materiales específicos, poseen diferentes costos y ventajas relacionadas, pero todos tienen un lugar en el mercado.

Debido a la amplia variedad y la constante innovación en el campo de productos estabilizantes, cuando se decida qué agente estabilizador emplear, hay que tener presente las siguientes variables según el siguiente orden de importancia (MINVU, 2008):

- Precio: El costo unitario de estabilizar (normalmente expresado en términos de costo por metro cuadrado de superficie completada).
- Disponibilidad de Agentes Estabilizadores Específicos: Puede que no estén disponibles en algunas partes (las regiones).
- Características del material: Algunos agentes estabilizadores son más efectivos que otros en ciertos tipos de materiales. Por ejemplo, la cal debiera ser preferida por sobre el cemento para suelos de alta plasticidad ($IP > 10$).

Los agentes estabilizadores más estudiados son el cemento y derivados del asfalto, los cuales son usados extensamente y los métodos estándar de ensayos están disponibles para determinar diseños óptimos de mezclas y requerimientos de garantía de calidad. Además, tanto el cemento como el asfalto tienen una gran utilización en la industria de la construcción y están generalmente disponibles en el mercado, lo que conlleva a que estos agentes alcancen una gran popularidad (MINVU, 2008).

2.3.4. ESCENARIO DE LA ESTABILIZACIÓN DE CAMINOS EN CHILE

En Chile, la estabilización de suelos para la construcción de caminos ha tenido un escaso desarrollo, debido fundamentalmente a la abundancia de agregados convencionales en gran parte de su territorio, sin embargo la existencia de zonas con escasez o con altos costos de extracción y/o transporte de agregado, especialmente en áreas de desarrollo, pone en vigencia la necesidad de difusión de técnicas de estabilización que puedan aplicarse en dichas zonas (Solminihaç, Echeverría, & Thenoux, 1989).



2.4. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON ESTABILIZADORES CEMENTADOS

Los agentes estabilizadores cementados aportan rigidez, mientras que los agentes asfálticos tienden a producir un material relativamente flexible. El material cementado es propenso a la retracción, que se manifiesta en un agrietamiento en bloque de la capa cuando es sometido a cargas repetidas, mientras que los materiales ligados con asfalto tienden a ser más blandos, con mejores propiedades elásticas, tendiendo a deformarse bajo carga. Sin embargo, en la fibra inferior de las capas de material ligado se generan tensiones de tracción cuando el pavimento se deforma bajo carga. Los ciclos de cargas repetitivas causan que el material sufra una falla por fatiga, o agrietamiento de abajo hacia arriba o “botton-up cracking” y el tipo de agente ligante es uno de los determinantes más importantes en el número de repeticiones que una capa puede soportar antes de que se desarrolle el agrietamiento. La cal, el cemento y mezclas de estos productos con cenizas volantes, escoria de alto horno y otros materiales puzolánicos, son los agentes estabilizadores más utilizados (MINVU, 2008).

2.4.1. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CEMENTO

El cemento es un material pulverizado que por adición de una cantidad conveniente de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire (INN, 1968). La estabilización con cemento consiste en una mezcla de suelo pulverizado con cemento y contenido de agua, que, compactado a humedad óptima y densidad máxima, produce un material resistente, durable y de bajo costo luego de la hidratación del cemento. La estabilización de suelos con cemento tiene aplicaciones de gran importancia en el diseño de pavimentos, de las cuales podemos mencionar algunos usos según capa estructural:

- I. Base:
 - Caminos y calles de tránsito liviano
 - Superficie de tránsito secundario en aeropuertos
 - Playas de estacionamiento
- II. Subbase:
 - Pavimentos de hormigón
 - Pavimentos suelo cemento
 - Pavimentos flexibles



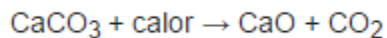
III. Subrasante tratada:

- Estabilización suelo cemento para suelos medianamente plásticos (recomendable).

Cada tipo de suelo requiere una cantidad adecuada de cemento para su estabilización, por lo tanto, es importante tener en consideración las características, el comportamiento, así como las condiciones del terreno. Para suelos arenosos se requiere una cantidad del 7 al 10% en volumen de cemento, mientras que, para suelos arcillosos, se requiere una cantidad de cemento en proporciones del 12 al 16%. En suelos no plásticos o de baja plasticidad, la estabilización con cemento es un método muy eficaz, porque su rápido fraguado, trabajabilidad y su buena compactación, incrementa su resistencia y durabilidad a lo largo del tiempo (Marquina, 2008).

2.4.2. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL

La cal es un reactivo químico que se obtiene a partir de la descomposición, mediante calcinación, del carbonato de calcio, que contienen las calizas, generándose la siguiente reacción química:



Donde CaO es el compuesto sólido y el CO_2 el compuesto gaseoso (Cementos Bío Bío, s.f.).

La cal se utiliza bastante para estabilizar suelos finos, los cuales son ricos en sílice y alúmina, ambos compuestos puzolánicos. Cuando la cal se adiciona al suelo fino y se suministra agua, se forma un medio acuoso que permite la llegada de la cal a las partículas de suelo fino, donde se produce un Intercambio catiónico, que consiste en que los iones de sílice y alúmina son reemplazados por iones de calcio. Esto produce una disminución de la doble capa de la partícula de suelo fino, y la floculación y aglomeración de las partículas. Como resultado de esto, se modifica la textura del suelo, se modifica su plasticidad y se producen partículas de mayor tamaño. Además, la cal se transforma en hidróxido de calcio, la cual reacciona con la sílice y alúmina (reacción puzolánica) para formar compuestos cementantes, como silicatos de calcio hidratados (CSH) y aluminatos de calcio hidratados (CAH). La reacción puzolánica se produce en el mediano y largo plazo, mientras haya compuestos disponibles, lo que implica que la resistencia del suelo estabilizado aumenta con el tiempo (Thenoux & Carrillo, 2002).



2.4.3. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CENIZAS VOLANTES

Las cenizas volantes son residuos industriales sólidos, procedentes de la combustión de carbón, biomasa u otros combustibles, utilizados en las industrias y centrales termoeléctricas. En el hogar (elemento donde se quema combustible en una caldera) la temperatura es tan elevada que las cenizas se funden, al menos parcialmente. Las partículas que no se aglomeran son arrastradas en suspensión de gas a lo largo del circuito de intercambio térmico, que a éstas se le obliga a recorrer. El enfriamiento de las cenizas es rápido, como consecuencia los silicatos fundidos en el hogar no disponen del tiempo necesario para la cristalización, quedando en estado vítreo. Este es el fundamento de la actividad hidráulica de las cenizas volantes, al igual que el de las cenizas volcánicas (puzolanas naturales). A temperatura ambiente en presencia de iones Ca^{2+} y a la elevada alcalinidad ($pH = 12$) que se genera en la hidratación del cemento portland, los silicatos en forma vítrea que contienen las cenizas volantes llegan a cristalizar formando silicatos cálcicos de baja basicidad, de gran estabilidad hidráulica, que aportan resistencias mecánicas e impermeabilidad a los hormigones y morteros que contienen estos vidrios (Ulloa, 1978). La Figura 2-6 muestra las partículas de una ceniza volante al microscopio.

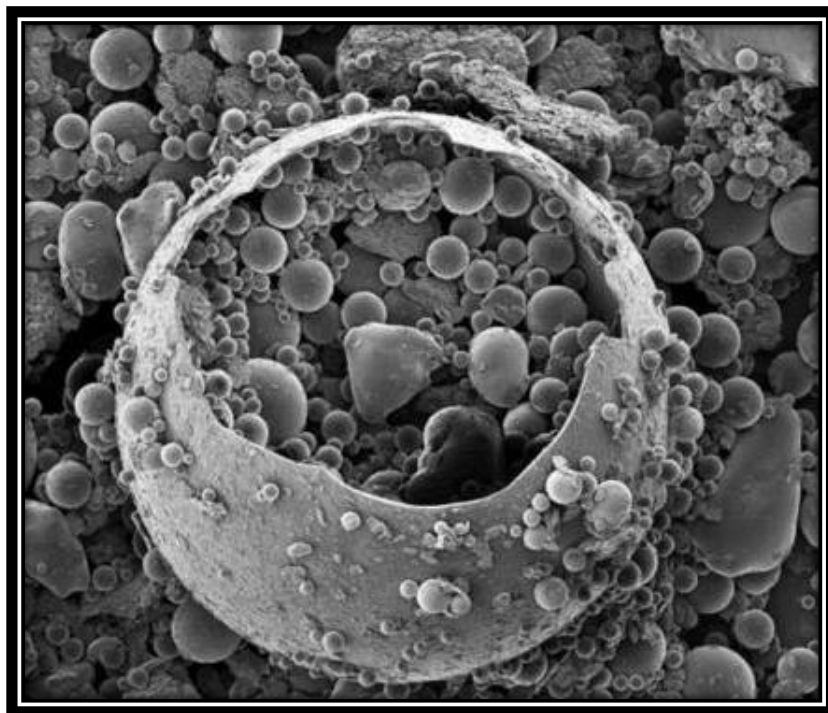


Figura 2-6: CENIZA VOLANTE AL MICROSCOPIO, (Fuente: <http://www.bibliotecapleyades.net/>).



Las cenizas volantes contienen grandes concentraciones de aluminio y sílice y, en fases reactivas, contienen dióxido de silicio y óxido de calcio. Tienen una variada composición química y mineralógica por lo que se pueden esperar distintos comportamientos químicos dependiendo del tipo y composición de la ceniza. Existen principalmente dos tipos de cenizas volantes, Clase C y Clase F. Se clasifican según su contenido de cal (CaO), si el contenido de cal es menor al 10% se clasifica como ceniza volante baja en cal o clase F, por otro lado, si es mayor se clasifica como ceniza volante de alto contenido en cal o clase C (ASTM C618, 2015).

Cenizas Volantes de alto contenido en cal o Clase C: Deben contener un mínimo de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ de un 50% y un máximo contenido de Cal de un 20% para poder ser empleadas para hormigones.

Cenizas Volantes de bajo contenido en cal o Clase F: Obtenidas por la combustión de antracitas (Carbón mineral con alto contenido de carbono) y carbones bituminosos con contenido mínimo de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ de un 70% en peso. Presentan propiedades puzolánicas.

La tabla 2-9 presenta de forma resumida los requerimientos de cada clase de ceniza volante:

Tabla 2-9: REQUERIMIENTOS QUÍMICOS PARA CLASES C Y F DE CENIZAS VOLANTES, (ASTM C618, 2015).

Compuestos	Clase C	Clase F
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	>50%	>70%
CaO	>10%	<10%
SO ₃	<5%	<5%
Humedad	<3%	<3%
Pérdida en Ignición	<6%	<6%

Las cenizas volantes tradicionales se caracterizan por su bajo contenido de cal y alto contenido de sílice, por lo que su utilización como estabilizador de suelos requiere, la adición de un agente activador rico en cal. El agente activador proporciona la cal necesaria para que se produzca la reacción puzolánica, mientras que la ceniza provee los compuestos puzolánicos, sílice y alúmina. Es así, como las mezclas cal-ceniza volante pueden ser utilizadas para estabilizar suelos gruesos o suelos limosos. Normalmente se utiliza cal o cemento como agente activador (Thenoux & Carrillo, 2002).



2.5. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS

Para determinar las propiedades mecánicas de los suelos es necesario realizar algunos ensayos, los cuales arrojan índices y parámetros que ayudan a conocer cómo se comportan los suelos mecánicamente. A continuación, se presentan los ensayos que se consideran para el desarrollo de la investigación.

2.5.1. ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO (NCh. 1534/II. Of. 1979)

El ensayo de Proctor Modificado tiene como fin determinar la Densidad Máxima Compactada Seca (DMCS) que está asociada al contenido de humedad óptima del suelo. A esta humedad la compactación, con cierto grado de energía, permite el ordenamiento óptimo de las partículas del suelo. Este ensayo consiste en la compactación de una muestra de suelo, a través de golpes aplicados con un pisón determinado, en un molde cilíndrico de diámetro de 150 mm con capacidad volumétrica de $2,124 \pm 0,021$ L. El pisón tiene un diámetro de $50 \pm 0,2$ mm, una masa de 4,5 kg y una altura de caída de 46 cm. En este ensayo se deben hacer 5 muestras de suelo a las que se les va agregando humedades aparentes crecientes en intervalos establecidos y se procede a golpear 56 veces por capa con un total de 5 capas en cada probeta. Para todas las muestras utilizadas se debe tener una porción que se ensaya y otra que se lleva al horno para determinar la humedad real del suelo. Teniendo las densidades húmedas de cada una de las probetas junto con sus humedades respectivas, se puede calcular la densidad seca de las probetas, logrando así obtener la curva de compactación que permitirá encontrar la DMCS con su humedad asociada. En la Figura 2-7 se muestra la curva de densidad seca en función del contenido de humedad. Donde el máximo valor de densidad seca nos indica el contenido de humedad óptima.

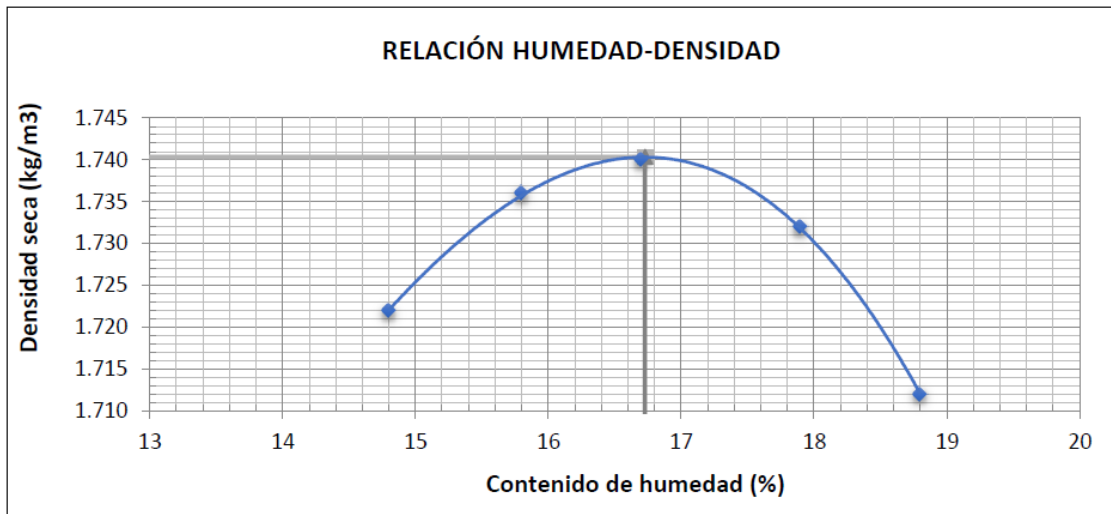


Figura 2-7: EJEMPLO DE CURVA DE ENSAYO PROCTOR MODIFICADO, (Fuente: propia).

2.5.2. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD SOPORTE DE SUELOS COMPACTADOS (CBR, California Bearing Ratio, NCh. 1852-81).

Este método establece el procedimiento para determinar un índice de resistencia del suelo, conocido como Razón de Soporte de California (CBR). El ensaye se realiza normalmente a suelos compactados en laboratorio, con la humedad óptima y niveles de energía variables.

Este método se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de suelos de subrasante, como también de materiales empleados en la construcción de terraplenes, subbases, bases y capas de rodadura granulares, en otras palabras, se trata de un ensayo que mide la resistencia al corte de un suelo saturado al 100% y densidad máxima compactada seca (DMCS).

Este método consiste en medir la presión necesaria para hacer penetrar un pistón de 50 mm de diámetro, en una masa de suelo compactada dentro de un molde cilíndrico de acero (Figura 2-8), luego de sumergirlos en agua durante 4 días (para mezclas con materiales hidráulicos hay que esperar 4 días antes de sumergir las probetas), a una velocidad de 1.27 mm/min, para producir deformaciones de hasta 12.7 mm. El índice CBR es la relación, expresada en porcentaje, entre dicha presión y la que se requiere para producir las mismas deformaciones en un material chancado normalizado, al cual se le asigna un valor de 100%. Para la ejecución del ensaye se compactan al menos 3 probetas con la humedad óptima y niveles de densidad variables. Además, se debe medir la expansión de la muestra de suelo antes y después de la saturación. El índice CBR se calcula de la siguiente manera:

$$CBR = \frac{ESFUERZO \text{ DE CORTE SUELO ENSAYADO}}{ESFUERZO \text{ DE CORTE SUELO PATRÓN}} * 100$$

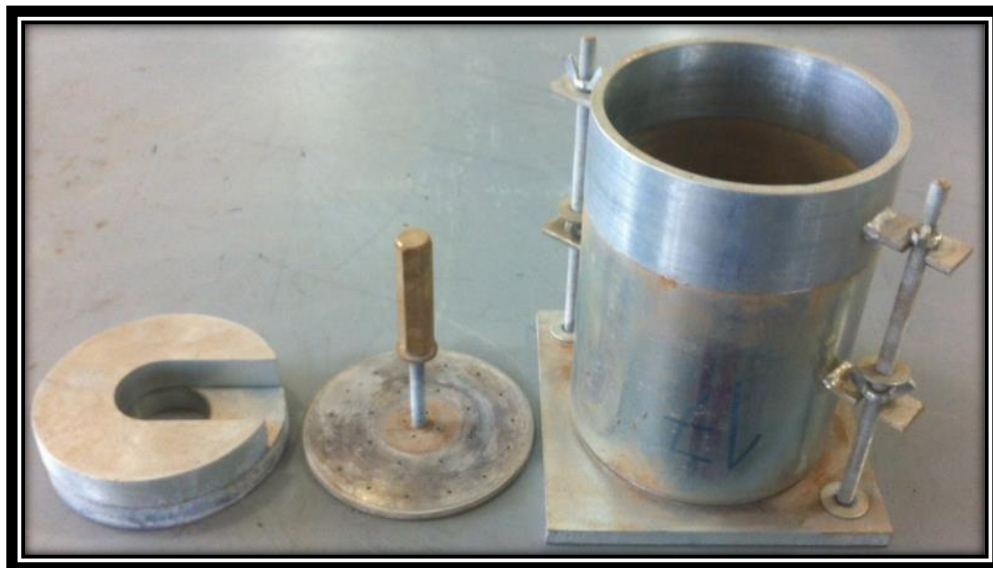


Figura 2-8: MOLDE CBR, (Fuente: propia).

2.5.3. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE DEL SUELO (MINI CBR)

El Mini-CBR es parte de ensayos realizados con equipos miniatura (MCT, Miniature-Compaction-Tropical) desarrollados en Brasil por Nogami & Vilibor (1980) (Riveros, 2016).

El ensayo Mini-CBR tiene por objetivo medir el ‘Índice de Mini-CBR’ y la expansión de suelos finos de diámetro inferior a 2 mm (malla N°10). Para esto se ensayan probetas de tipo miniatura (5 cm de diámetro) en moldes de diámetro interno de 5 cm y volumen de 100 ml. La masa de la muestra es de aproximadamente 250 g, el pistón de penetración debe ser de 16 mm de diámetro mientras que la máquina de carga debe tener una capacidad de 4,5 kN con una velocidad de carga de 1.25 mm/min con el fin de evaluar de forma rápida el valor de soporte de suelos finos.

Para el ensayo Mini-CBR la probeta se confecciona con una muestra con humedad óptima y, luego se sumerge totalmente en agua durante 20 horas (previo a este paso es necesario calcular la altura inicial de la probeta para cálculo de la expansión) y se registran con un extensómetro las lecturas al inicio y al final de las 20 horas. Al término de la inmersión se deja estilar la probeta por aproximadamente 1 hora para luego ser ensayada. El ensayo consiste en registrar las cargas para



Capítulo 2: “Revisión de Literatura y Teoría”

una serie de penetraciones y graficar la curva correspondiente, con corrección de ser necesario ya que al comenzar el ensayo puede producirse una acomodación de partículas que no necesariamente representa la capacidad de soporte en la penetración registrada. Se calcula el índice de Mini-CBR para una penetración de 2 y 2,5 mm (valores en kgf., C.1 y C.2 respectivamente) y se calcula la expansión del suelo con la altura inicial de la probeta y los registros del extensómetro (Fortes & Merighi, 2003). El índice de Mini-CBR estará dado por el máximo de las siguientes expresiones expresadas en las siguientes ecuaciones:

Ecuación 2-2

$$\log (\text{Mini} - \text{CBR}.1) = -0,254 + 0,896 \times \log C.1$$

Ecuación 2-3

$$\log (\text{Mini} - \text{CBR}.2) = -0,356 + 0,937 \times \log C.2$$

Donde el valor final del índice de Mini-CBR(IMCM) corresponde al valor máximo entre Mini-CBR.1 y Mini-CBR.2.El procedimiento descrito está normado a través del documento DNER-ME 254/97 “Compactación de Suelos con Equipos de Miniatura – Mini CBR y Expansión” (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997), utilizado actualmente en Brasil. En la Figura 2-9 se observa el equipo para la compactación de las probetas para el ensayo de Mini-CBR (Riveros, 2016).



Figura 2-9: MOLDE MINI-CBR, (Fuente: propia).



2.5.4. ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA (UCS, Unconfined Compressive Strength, ASTM D 2166).

Este ensayo permite determinar la resistencia uniaxial no confinada de una probeta de suelo en donde los esfuerzos verticales y horizontales aplicados siguen la siguiente relación.

$$\sigma_v \neq 0 ; \sigma_h = 0$$

Básicamente este ensayo consiste en la aplicación de un esfuerzo vertical, que va aumentando de manera gradual hasta llevar a la probeta a la rotura (carga máxima).

El ensayo de compresión no confinada mide la resistencia a compresión e indirectamente la resistencia al corte de una muestra de suelo cohesiva, sometida a una carga axial en condiciones no drenadas, usando deformación o carga controlada. Se mide el esfuerzo de compresión no confinada σ_c como el esfuerzo máximo obtenido al llegar a una deformación unitaria (AASHTO, 2000).

Ecuación 2-4

$$\sigma_c = P/A_c$$

Donde P es la carga máxima de deformación unitaria conocida y A_c es el área corregida por la deformación unitaria correspondiente.

La resistencia al corte del suelo es calculada según la ecuación 2-5.

Ecuación 2-5

$$\sigma_c = q_u/2$$

Donde σ_c es la resistencia al corte del suelo y q_u , es el máximo esfuerzo de compresión no confinada.

La geometría de las probetas triaxiales utilizadas en este ensayo se detalla en la Figura 2-10.

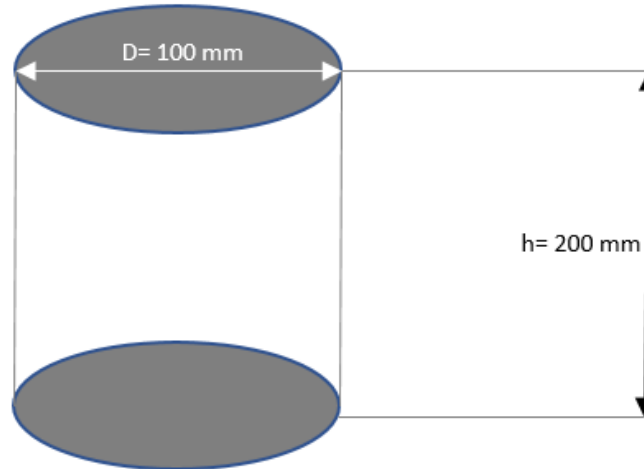


Figura 2-10: GEOMETRÍA PROBETA TRIAXIAL.

En la Figura 2-11 se puede observar el equipo disponible en el laboratorio, el cual es utilizado para la realización de este proyecto.



Figura 2-11: EQUIPO ENSAYO COMPRESIÓN NO CONFINADA (UCS), (Fuente: propia).



2.5.5. ENSAYO MINI COMPRESIÓN NO CONFINADA (MINIUCS, ASTM D2166).

El ensayo mini compresión no confinada, es realizado por una empresa especialista en estudios de mecánica de suelos, la cual está involucrada directamente con este proyecto y según acuerdos previos su identidad es de carácter confidencial. Esta empresa entrega los resultados de este ensayo para ser analizados durante esta investigación.

Este ensayo es similar al ensayo de compresión no confinada (UCS), ya que solo cambian las dimensiones de las probetas y la forma de compactar, además el ensayo a compresión no confinada se debe realizar según el procedimiento indicado en la norma ASTM D2166.

En la Figura 2-12 se detalla la geometría y dimensiones de la probeta utilizada en este ensayo.

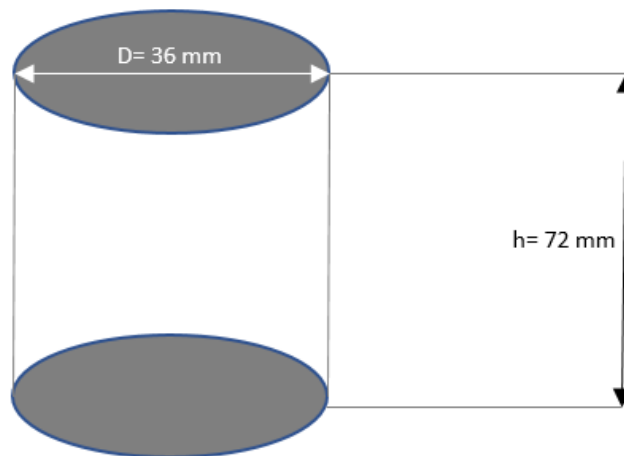


Figura 2-12: GEOMETRÍA PROBETA MINI UCS.

2.5.6. ENSAYO TRIAXIAL PARA MÓDULO RESILIENTE (MrTx, AASHTO T-274).

Para este ensayo se utilizan probetas triaxiales cilíndricas, las cuales son sometidas a esfuerzos de carga axial dentro del rango lineal, para así conocer el comportamiento resiliente de la muestra. A través del ensayo triaxial, se obtiene directamente el módulo resiliente de un suelo (MrTx), que es una medida de las propiedades elásticas del suelo y se define como el cociente entre el esfuerzo aplicado (pulso de carga) y la deformación resiliente (recuperable) que, en general, muestran ciertas características no lineales. El valor del módulo resiliente se determina según el método de ensayo contenido en la norma AASHTO T-274 (MINVU, 2018).



Este ensayo se efectúa en un equipo triaxial dinámico (ver Figura 2-13) para cargas axiales repetidas (3 niveles de carga por presión de confinamiento, 100 ciclos repetidos por estado de carga) y 5 niveles de presiones de confinamiento, se utilizan para medir el Módulo Resiliente (Stolle et al., 2009). Las dimensiones de las probetas cilíndricas triaxiales son las mismas que para el ensayo UCS, detalladas en la Figura 2-10.



Figura 2-13: EQUIPO TRIAXIAL DINÁMICO, ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE (MrTx), (Fuente: propia).

2.5.7. LÍMITES DE ATTERBERG (NCh. 1517.Of79)

Para caracterizar el comportamiento de los suelos finos, es necesario conocer como el suelo reacciona ante los diferentes estados de humedad, y conocer como varía el grado de cohesión de las partículas del suelo. El científico sueco Albert Mauritz Atterberg, fue el primero en sugerir una metodología que postula límites de humedad que definen el comportamiento del suelo. Estos límites se basan, en el concepto de que los granos finos pueden existir en cuatro estados de consistencia, en función de la humedad. Un suelo se encuentra en estado sólido



Capítulo 2: “Revisión de Literatura y Teoría”

cuando está seco, luego al ir aumentando el grado de saturación, el suelo va pasando paulatinamente a los estados semisólido y plástico hasta llegar al estado líquido. El contenido de humedad en el punto de transición entre un estado y otro se conoce como los *Límites de Atterberg* o *Límites de Consistencia*, los cuales se mencionan a continuación:

- Límite Líquido (LL.): Es cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido.
- Límite Plástico (LP.): Es cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico.
- Límite de Retracción o Contracción (LC.): Es cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y se contrae al perder la humedad.



Figura 2-14: APARATO DE CASAGRANDE, (Fuente: propia).



Con los límites de consistencia se puede calcular el *índice de plasticidad*, según la ecuación 2-3:

Ecuación 2-3

$$IP = LL - LP$$

Luego con este índice es posible clasificar los suelos finos según tipo, utilizando el sistema de clasificación USCS, como se indica en la tabla 2-10:

Tabla 2-10: SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS).

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN USCS			
FINOS (≥ 50% pasa 0,08 mm)			
Tipo de Suelo	Simbolo	Lím. Líq. WL	Indice de Plasticidad IP
Limos Inorgánicos	ML	< 50	< 0,73 (WL - 20) ó < 4
	MH	> 50	< 0,73 (WL - 20)
Arcillas Inorgánicas	CL	< 50	> 0,73 (WL - 20) y > 7
	CH	> 50	> 0,73 (WL - 20)
Limos o Arcillas orgánicos	OL	< 50	** WL seco al horno ≤ 75% del WL seco al aire
	OH	> 50	
Altamente Orgánicos	P _t	Materia orgánica fibrosa se carboniza, se quema o se pone incandescente.	
* Si IP ≅ 0,73 (WL - 20) ó si IP entre 4 y 7 e IP > 0,73 (WL - 20), usar simbolo doble: CL-ML, CH-OH			
** Si tiene olor orgánico debe determinarse adicionalmente WL seco al horno			
En casos dudosos favorecer clasificación más plástica Ej.:CH-MH en vez de CL - ML			
Si WL = 50; CL-CH ó ML-MH			



2.6. CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN SU TAMAÑO DE PARTICULA

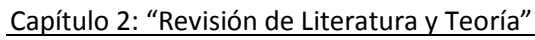
Los suelos están compuestos de partículas de diversos tamaños. Hay dos tipos de partículas, partículas primarias y partículas secundarias. Las partículas discretas individuales se llaman partículas primarias y sus agregados se conocen como partículas secundarias. Las partículas de más de 2 mm de diámetro se conocen como gravas, que incluyen los guijarros (2-7.5 cm), adoquines (7.5-25 cm), piedras (25-60 cm), y cantos rodados (> 60 cm). Las partículas primarias con el "diámetro efectivo" máximo de 2 mm se clasifican en tres categorías, arena, limo y arcilla. Se ha considerado que el diámetro efectivo, es el diámetro de una esfera que tiene una velocidad de caída en un medio líquido igual a la partícula en cuestión, teniendo en cuenta que las partículas del suelo no son todas esféricas. Las dimensiones de las diferentes categorías de partículas de suelo difieren entre los sistemas de clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y la Sociedad Internacional de Ciencias del Suelo (ISSS) (Osman, 2013).

Tabla 2-11: TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE SUELOS, SISTEMAS (ISSS) Y (USDA).

ISSS System		USDA System	
Soil particles	Diameter (mm)	Soil particles	Diameter (mm)
Coarse sand	2.00–0.20	Very coarse sand	2.00–1.00
Fine sand	0.20–0.02	Coarse sand	1.00–0.50
Silt	0.02–0.002	Medium sand	0.50–0.25
Clay	<0.002	Fine sand	0.25–0.10
		Very fine sand	0.10–0.05
		Silt	0.05–0.002
		Clay	<0.002

2.7. TEXTURA DEL SUELO

La textura del suelo se refiere al grado de finura o aspereza creado por el conjunto compacto de partículas de diferentes tamaños en un suelo. Está determinado por la proporción relativa de arena, limo y arcilla en un suelo. Los suelos rara vez se componen de una clase de partículas con un solo tamaño, son mezclas de diferentes clases de partículas y tamaños. Sin embargo, una o dos clases de tamaño generalmente dominan el comportamiento físico del suelo. Por lo tanto, un suelo principalmente limoso muestra las propiedades de las partículas de limo (Osman, 2013). De esta forma, hasta el momento se han identificado 12 clases de texturas,



15.

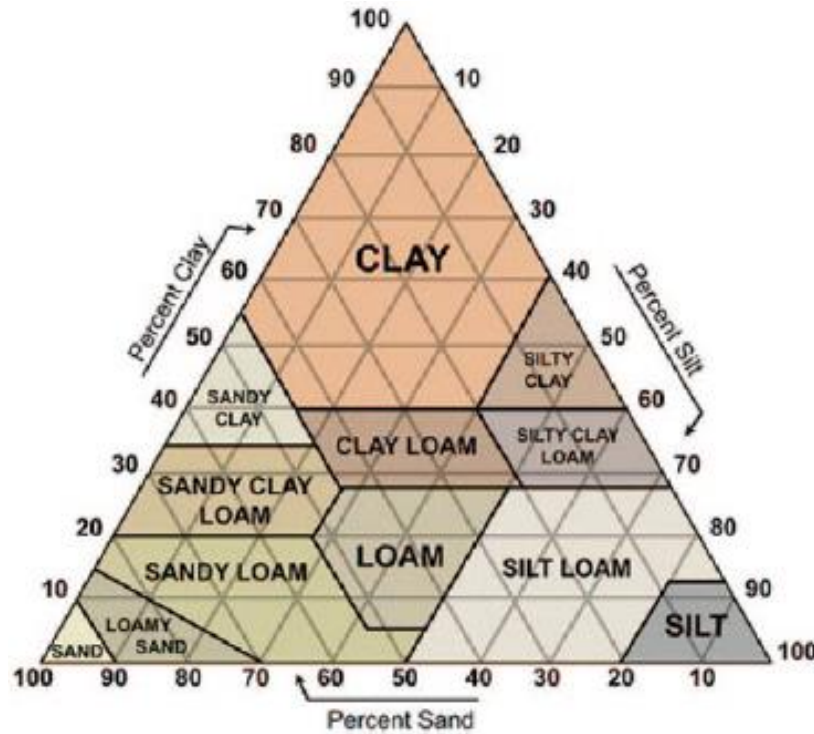


Figura 2-15: TRIÁNGULO TEXTURAL DEL SUELO (USDA).



3. MATERIALES Y MÉTODOS DE LABORATORIO

Para lograr el objetivo general de esta investigación, que es determinar la efectividad de los aditivos no tradicionales B y P como estabilizadores químicos de suelos limosos en caminos de bajo volumen de tránsito productivos, se deben cumplir primero los objetivos específicos propuestos, para ello se emplean los métodos de laboratorio que se describen en este capítulo.

Considerando el aumento de la estabilidad volumétrica que puede lograr utilizando la tecnología de estabilización con aditivos químicos líquidos (Delarze, 2015), también con la reciente incorporación del aditivo no tradicional B como una alternativa sustentable de material cementante y como material complementario al Cemento y la Cal en su reacción puzolánica (Carrasco, Cruz, Corpas, & Pérez, 2013), surge la necesidad de investigar cual es el efecto de la combinación de los aditivos B y P en la estabilización de suelos. Al ser un tema extenso debido a la gran cantidad de suelos existentes, esta investigación se centra en el efecto estabilizador sobre suelos limosos utilizados proporcionados por las empresas involucradas en la investigación.

3.1. MATERIALES

3.1.1. DESCRIPCION DE MATERIALES

3.1.1.1. SUELOS INVESTIGADOS

En esta investigación se estudiaron tres tipos de suelos limosos, que se localizan en diferentes sectores donde se requiere de forma continua la construcción de CBVT-P que soporten elevadas solicitaciones de tránsito, por esta razón, es necesario la implementación de algún método de estabilización que sea efectivo y genere un efecto positivo en el comportamiento mecánico del suelo estabilizado. Los suelos estudiados son; un limo de alta plasticidad (Suelo MH) extraído de una localidad ubicada en la provincia de Arauco de la VIII Región del Bío-Bío, un suelo limoso de baja plasticidad (Suelo ML) proveniente la provincia de Talca de la VII Región del Maule, y un suelo que se encuentra en el límite entre un limo de baja plasticidad (Suelo ML) y una arcilla de baja plasticidad (Suelo CL), que para efectos prácticos de esta investigación se le asigna el nombre de *Suelo Borda* (Suelo SB), extraído de un sector de la provincia de Concepción.



Figura 3-1: SUELOS EN CONDICIONES NATURALES DE TERRENO, (Fuente: propia).

3.1.1.2. PREPARACION DE SUELOS DE LA INVESTIGACIÓN

Lo primero que hay que considerar para la realización de ensayos sobre suelos, es la homogeneización de la muestra, para poder obtener resultados representativos. Los suelos fueron recibidos con una humedad superior a la de terreno producto de la lluvia, con esto el suelo posee humedad desconocida y no presenta las condiciones adecuadas para ser trabajado de forma directa.



Figura 3-2: SACOS DE SUELO NATURAL CON HUMEDAD DESCONOCIDA, (Fuente: propia).



Capítulo 3: “Materiales y Métodos de Laboratorio”

Lo siguiente es secar los suelos en un horno a 110°C durante 24 horas, luego se mezcla el suelo con porúas dentro de las bandejas para redistribuir la humedad de la muestra, inmediatamente después se dejarán nuevamente 24 horas en el horno a 110°C. Para poder realizar la homogeneización del material es necesario tener un suelo relativamente seco, ya que en el estado sobresaturado no es posible de realizar.



Figura 3-3: SECADO DE SUELOS EN HORNO A 110°C, (Fuente: propia).

Luego se extraen las muestras del horno, se dejan enfriar y se procede a realizar la homogeneización del suelo, para ello se vierte el suelo sobre el suelo y se rompen los terrones de suelo compactado.



Figura 3-4: HOMOGENEIZACIÓN DEL SUELO, (Fuente: propia).

A continuación, se realiza el procedimiento de tamizado por la malla N°4, para ello se ocupa un harnero construido para la investigación en proceso.



Figura 3-5: TAMIZADO DEL SUELO EN HARNERO MALLA N°4, (Fuente: propia).



Capítulo 3: “Materiales y Métodos de Laboratorio”

Finalmente, el suelo está listo para ser trabajado. El suelo es almacenado en tambores sellados y así evitar la absorción de humedad posterior al secado, esto permitirá conocer la humedad del suelo a trabajar, y así poder lograr las humedades requeridas en los diferentes ensayos a realizar.



Figura 3-6: TAMBORES SELLADOS CON SUELO HOMOGENIZADO SECO, (Fuente: propia).

3.1.1.3. ADITIVOS QUÍMICOS TRADICIONALES

Cemento Portland y Cal Viva

Los aditivos sólidos tradicionales Cemento Portland y Cal Viva utilizados en esta investigación cumplen la función de ser los “Agentes Activadores”, es decir, que al mezclarlos con el aditivo B son los responsables de generar y activar la reacción puzolánica y así lograr propiedades cementantes.



Figura 3-7: ADITIVOS Cp y Cv, (Fuente: propia).



3.1.1.4. ADITIVOS QUÍMICOS NO TRADICIONALES

Aditivo Químico Sólido B

Se trata de un aditivo sólido generado como residuo de un proceso industrial y su función es actuar como material aglomerante. Para que este aditivo trabaje y actúe como material cementante se necesita la adición de un activador que genere la reacción puzolánica. Con la incorporación de este aditivo en esta investigación, se logra dar un enfoque sustentable que busca la reutilización de desechos que son purgados y desechados a un elevado costo, generando impacto ambiental negativo con su eliminación, además de reducir el consumo de áridos y sus implicancias asociadas. El origen y la composición del aditivo B son de carácter confidencial al igual que el nombre de la empresa que lo proporciona para el proyecto de investigación.



Figura 3-8: ADITIVO QUÍMICO SÓLIDO B, (Fuente: propia).



Aditivo Químico Líquido P

Es un estabilizador químico líquido de suelos, principalmente de granulometría fina, enfocado en mejorar la capacidad de soporte, disminuir su permeabilidad y aumentar la estabilidad volumétrica (se produce ionización y se ordenan las partículas de suelo). El aditivo P cumple con la Norma Chilena Estabilización Química de Suelos (NCh.2505Of.01). Además, está validado por la División Técnica del MINVU para ser utilizado como un aditivo para mejorar las condiciones naturales de los suelos. Además, tiene un impacto neutro en los suelos y en el entorno. Esto ha sido comprobado mediante el test TCLP-EPA1311 de la Norma Chilena “Residuos-Procedimiento de lixiviación para determinar movilidad de analitos tóxicos orgánicos e inorgánicos” (NCh. 2754. Of.03). En el cual se le otorga la clasificación de **Residuo no Peligroso**, teniendo presente los valores máximos permisibles señalados en el D.S. Nº148/03, “Manejo de residuos peligrosos” (Soto & Guzmán, 2013). El origen y la composición del aditivo P son de carácter confidencial al igual que el nombre de la empresa que lo facilitará para el proyecto de investigación.



Figura 3-9: ADITIVO QUÍMICO LÍQUIDO P. (Fuente: propia)



3.2. CLASIFICACION DE LOS SUELOS

En esta sección se presentan los resultados de Granulometría, Límites de Atterberg, DMCS y humedad óptima obtenidas con el ensayo de Proctor Modificado. Luego se presenta la clasificación tradicional de los suelos para las normativas AASHTO y USCS.

3.2.1. CLASIFICACIÓN SUELO ML

- Granulometría (LNV 105 – M.C. 8.102.1)

Tabla 3-1: GRANULOMETRÍA SUELO ML

Tamiz	AASHTO T-27 (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje que pasa
2 1/2"	76.200		100.0
2"	50.800		100.0
1 1/2"	38.100		100.0
1"	25.400		100.0
3/4"	19.000		100.0
1/2"	12.500		100.0
3/8"	9.500		100.0
Nº 4	4.750		100.0
Nº 8	2.360	0.18	99.9
Nº 10	2.000		99.9
Nº 16	1.190		99.9
Nº 20	0.840		99.9
Nº 30	0.600	0.26	99.7
Nº 40	0.425	0.50	99.4
Nº 50	0.300		99.4
Nº 80	0.177		99.4
Nº 100	0.150		99.4
Nº 200	0.075	33.94	78.3
< Nº 200	FONDO	2.20	

- Límites de Atterberg (LNV 89/90 – M.C. 8.102.3/.4)

Tabla 3-2: LÍMITES DE ATTERBERG SUELO ML

Límite Líquido (LL)	(%)	28
Límite Plástico (LP)	(%)	23
Índice de Plasticidad (IP)	(%)	5



- **Clasificación del Suelo**

Tabla 3-3: CLASIFICACIÓN DEL SUELO ML

Clasificación	USCS	ML
	AASHTO	A-4
Índice de Grupo	IG	(3)
Descripción	AASHTO	REG-MALO
	USCS	Limo de baja plasticidad con arena

3.2.2. CLASIFICACIÓN SUELO MH

- **Granulometría (LNV 105 – M.C. 8.102.1)**

Tabla 3-4: GRANULOMETRÍA SUELO MH

Tamiz	AASHTO T-27 (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje que pasa
2 1/2"	76.200		100.0
2"	50.800		100.0
1 1/2"	38.100		100.0
1"	25.400		100.0
3/4"	19.000		100.0
1/2"	12.500		100.0
3/8"	9.500		100.0
Nº 4	4.750		100.0
Nº 8	2.360		100.0
Nº 10	2.000		100.0
Nº 16	1.190		100.0
Nº 20	0.840		100.0
Nº 30	0.600	0.20	99.8
Nº 40	0.425	0.88	98.9
Nº 50	0.300		98.9
Nº 80	0.177		98.9
Nº 100	0.150		98.9
Nº 200	0.075	10.84	88.2
< Nº 200	FONDO	2.20	

- **Límites de Atterberg (LNV 89/90 – M.C. 8.102.3/.4)**

Tabla 3-5: LÍMITES DE ATTERBERG SUELO MH

Límite Líquido (LL)	(%)	54
Límite Plástico (LP)	(%)	38
Índice de Plasticidad (IP)	(%)	16



- **Clasificación del Suelo**

Tabla 3-6: CLASIFICACIÓN DEL SUELO MH

Clasificación	USCS	MH
	AASHTO	A-7-5
Índice de Grupo	IG	(19)
Descripción	AASHTO	MALO
	USCS	Limo de alta plasticidad

3.2.3. CLASIFICACIÓN SUELO SB

- **Granulometría (LNV 105 – M.C. 8.102.1)**

Tabla 3-7: GRANULOMETRÍA SUELO SB

Tamiz	AASHTO T-27 (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje que pasa
2 1/2"	76.200		100.0
2"	50.800		100.0
1 1/2"	38.100		100.0
1"	25.400		100.0
3/4"	19.000		100.0
1/2"	12.500		100.0
3/8"	9.500		100.0
Nº 4	4.750		100.0
Nº 8	2.360	0.38	99.8
Nº 10	2.000		99.8
Nº 16	1.190		99.8
Nº 20	0.840		99.8
Nº 30	0.600	13.34	94.3
Nº 40	0.425	4.77	92.4
Nº 50	0.300		92.4
Nº 80	0.177		92.4
Nº 100	0.150		92.4
Nº 200	0.075	18.85	84.6
< Nº 200	FONDO	2.20	

- **Límites de Atterberg (LNV 89/90 – M.C. 8.102.3/.4)**

Tabla 3-8: LÍMITES DE ATTERBERG SUELO SB

Límite Líquido (LL)	(%)	50
Límite Plástico (LP)	(%)	26
Índice de Plasticidad (IP)	(%)	24



- **Clasificación del Suelo**

Tabla 3-9: CLASIFICACIÓN DEL SUELO SB

Clasificación	USCS	CL
	AASHTO	A-7-6
Índice de Grupo	IG	(22)
Descripción	AASHTO	MALO
	USCS	Arcilla de baja plasticidad con arena

Según la Tabla 3-9, pese a que este suelo se clasifica como arcilla de baja plasticidad, está en el límite de la clasificación entre un limo y una arcilla, por esta razón este suelo se considera en este estudio.

3.2.4. RELACIÓN DENSIDAD-HUMEDAD, ENSAYO PROCTOR MODIFICADO

Se realizó el ensayo de Proctor Modificado para los tres suelos estudiados. Los resultados se muestran en la Tabla 3-10.

Tabla 3-10: RESULTADOS PROCTOR MODIFICADO

Suelo	DMCS(g/cm ³)	Húmedad Óptima (%)
ML	2,128	10
MH	1,617	14
SB	1,583	18

3.2.5. RESUMEN CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Para una mejor comprensión de la clasificación de los suelos, se resumen estos resultados en la Tabla 3-11.



Tabla 3-11: RESUMEN CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Suelo	DMCS(g/cm3)	Húmedad Óptima (%)	LL(%)	LP(%)	IP(%)	AASHTO		USCS	
						Clasificación	Descripción	Clasificación	Descripción
ML	2,128	10	28	23	5	A-4	REG-MALO	ML	Limo de baja plasticidad con arena
MH	1,617	14	54	38	16	A-7-5	MALO	MH	Limo de alta plasticidad
SB	1,583	18	50	26	24	A-7-6	MALO	CL	Arcilla de baja plasticidad con arena

3.3. ETAPAS DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

Con el fin de determinar la efectividad de los aditivos químicos no tradicionales B y P en conjunto con los aditivos sólidos tradicionales Cal Viva y Cemento Portland como estabilizadores mecánicos de suelos limosos de caminos de bajo volumen de tránsito productivos CBVT-P, se propone una metodología la cual consiste en 5 etapas. En la Etapa N°0, se trabajan los suelos que llegan con las condiciones naturales de terreno y humedad desconocida para dejarlos listos para ser trabajados como se explica en la sección 3.1.1.2. También son caracterizados los suelos, con el cálculo de la Granulometría, Límites de consistencia, clasificación AASHTO/USCS y Proctor Modificado. En la Etapa N°1 que contempla una evaluación y comparación preliminar de los suelos MH, ML y Borde a través del ensayo Mini-CBR Modificado para muestras de suelo fino estabilizadas químicamente. El principal objetivo de esta etapa será evaluar el comportamiento de los activadores de la reacción puzolánica y determinar cuál es el mejor para comenzar a tener nociones de las posibles dosificaciones que podrían generar un efecto positivo en el comportamiento de los suelos. En la Etapa N°2, luego de la selección del mejor activador entre los aditivos sólidos tradicionales, se busca ajustar el contenido óptimo del aditivo B, para esto se prueba con distintas cantidades de este aditivo dejando el contenido de activador sólido tradicional constante, con el objetivo de realizar una comparación entre los resultados y lograr determinar el contenido óptimo de aditivo B, a través del ensayo Mini-CBR Modificado, esta vez apoyado por los ensayos de Mini Compresión No Confinada (Mini-UCS) con muestras de suelo natural y saturado. Luego de definir las dosificaciones óptimas y tener una dosis propuesta de estabilización química que permita un mejoramiento del suelo para su potencial uso como subrasante y base o carpeta de rodado, en las Etapas N°3.1 y N°3.2 se evalúa el



Capítulo 3: “Materiales y Métodos de Laboratorio”

comportamiento de la propuesta de subrasante y base granular estabilizada respectivamente, a través de los ensayos mecánicos tradicionales de CBR, UCS natural, UCS saturado y Módulo Resiliente MrTx a los 7, 14 y 28 días de curado. En la Etapa N°3.2 se propone la dosificación final para la estabilización química de una base granular con un 30% de agregado pétreo, que tiene como objetivo el incremento de estabilidad, resistencia y que sea una solución factible, que no tenga la necesidad de la aplicación un sello superficial sobre la carpeta de rodado. En la Figura 3-10 se presenta el esquema de trabajo experimental desarrollado durante este proyecto.



3.3.1. ESQUEMA DE TRABAJO EXPERIMENTAL

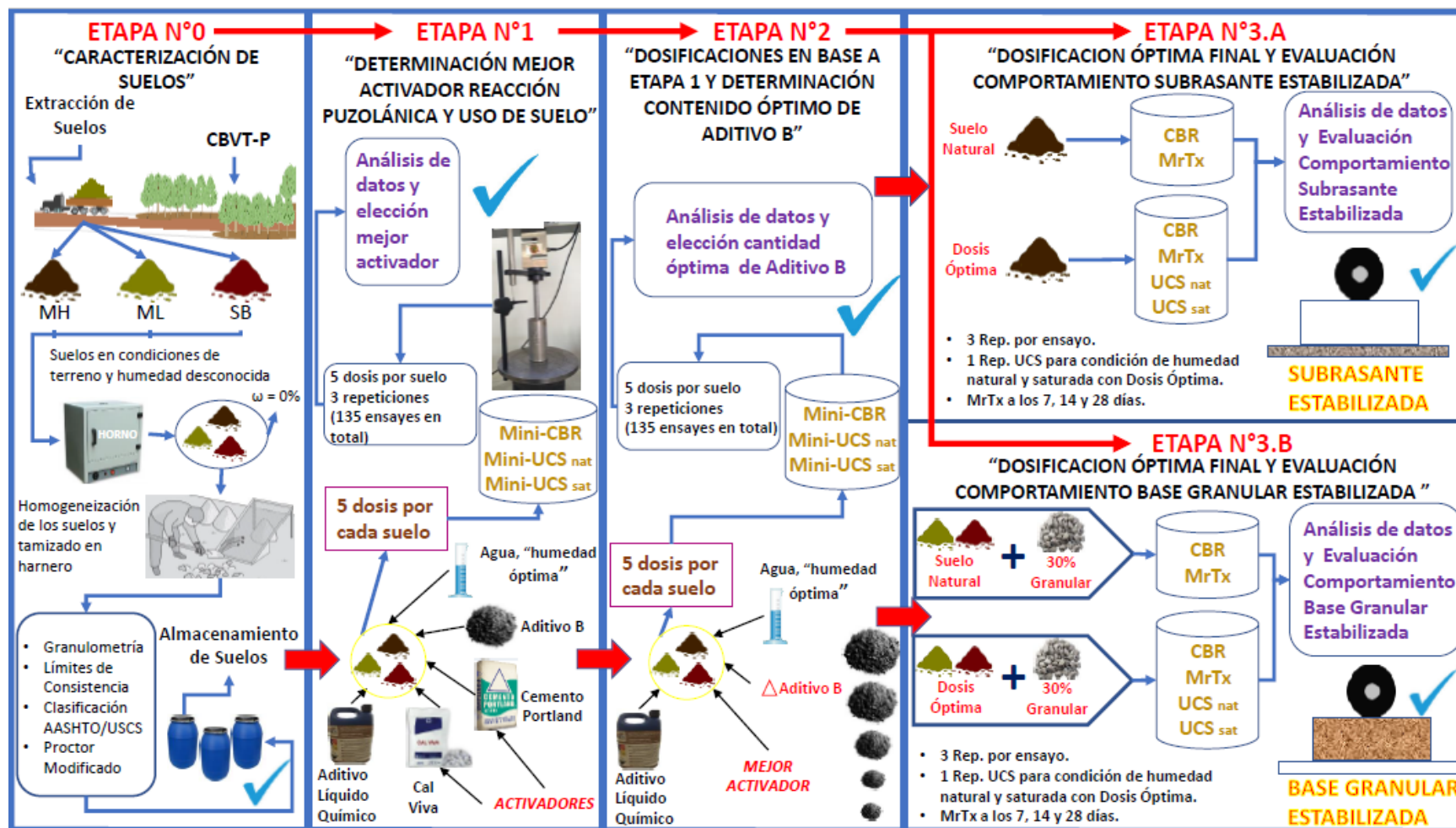


Figura 3-10: ESQUEMA DE TRABAJO EXPERIMENTAL, (Fuente: propia).



3.3.2. NOMENCLATURA DE LAS MEZCLAS

La nomenclatura de las mezclas consiste en letras y números, que contienen la información de cada dosificación, sobre el contenido y la cantidad de cada material, es decir, se refiere a la composición de cada mezcla. Cada material tiene asignado una letra diferente, y el número que la acompaña se refiere a la cantidad de dicho material, resume tal como se explica a continuación:

Nomenclatura por Etapa:

- Etapa N°1 : $Pn_1Bn_2pn_3vn_4$.
- Etapa N°2 y N°3.A : $Pn_1Bn_2vn_4$.
- Etapa N°3.B : $Pn_1Bn_2vn_4(An_5)$.

Donde:

$$Pn_1 : \quad P = \text{Aditivo Químico Líquido}, \quad n_1 = 0, n_1 \left(\frac{lt}{m^3} \right).$$

$$Bn_2 : \quad B = \text{Aditivo Sólido B}, \quad n_2 = n_2 \left(\frac{kg}{m^3} \right).$$

$$pn_3 : \quad p = \text{Cemento Portland}, \quad n_3 = n_3 \left(\frac{kg}{m^3} \right).$$

$$vn_4 : \quad v = \text{Cal Viva}, \quad n_4 = n_4 \left(\frac{kg}{m^3} \right).$$

$$An_5 : \quad A = \text{Agregado Pétreo}, \quad n_5 = \text{porcentaje en volumen}.$$



3.4. DOSIFICACIONES PROPUESTAS Y MATRIZ EXPERIMENTAL

3.4.1. ESQUEMA DOSIFICACIONES Y MATRIZ EXPERIMENTAL ETAPA N°1

La matriz experimental de la Etapa N°1, contiene 5 dosificaciones iniciales propuestas para los ensayos Mini-CBR modificado, Mini UCS natural y Mini UCS saturado, con el fin de determinar cuál es el activador de la reacción puzolánica más efectivo. Las dosificaciones que se seleccionan en esta etapa preliminar consideran los criterios de selección explicados en la sección 4.1, y según la recomendación del fabricante del aditivo líquido P la dosificación utilizada será de 0,3 lt/m³ para toda la investigación. En cuanto a los aditivos sólidos, se utilizarán concentraciones que ya han tenido éxito en suelos similares (Proyectos anteriores de las empresas involucradas). Las dosificaciones que se utilizarán sobre los suelos MH, ML y SB considerarán un total de 3 repeticiones por dosis, para obtener resultados más representativos.

Tabla 3-12: MATRIZ EXPERIMENTAL ETAPA N°1.

							N° PROBETAS		
							SUELOS MH/ML/SB		
		NOMENCLATURA	ADITIVO QUÍMICO LÍQUIDO P(lt/m ³)	ADITIVO B (kg/m ³)	Cemento Portland p(kg/m ³)	Cal Viva v(kg/m ³)	MINI-CBR MODIFICADO	MINI-UCS NATURAL	MINI-UCS SATURADO
DOSIS	1	P0B0p0v0	0	0	0	0	3	3	3
	2	P3B30p0v0	0,3	30	0	0	3	3	3
	3	P3B60p0v0	0,3	60	0	0	3	3	3
	4	P3B30p30v0	0,3	30	30	0	3	3	3
	5	P3B30p0v30	0,3	30	0	30	3	3	3
						Total	135		



Dosificación Aditivo Líquido	Dosificación Aditivo Sólido			Dosis	Nomenclatura
Aditivo Químico Líquido	Aditivo B	Cemento Portland	Cal Viva		
P(lt/m ³)	B(kg/m ³)	p(Kg/m ³)	v(Kg/m ³)	N°	

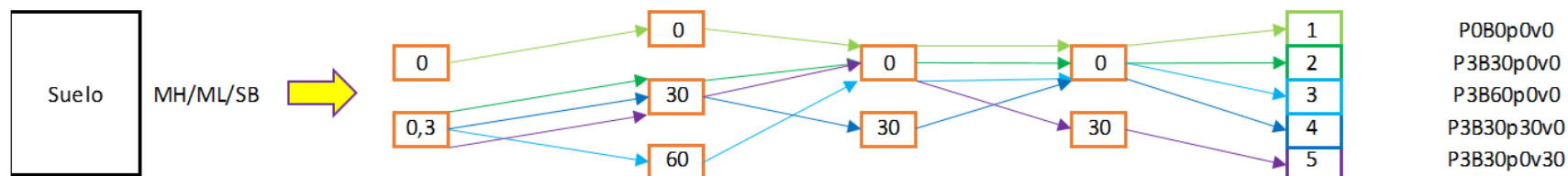


Figura 3-11: ESQUEMA DOSIFICACIONES ETAPA N°1.

3.4.2. ESQUEMA DOSIFICACIONES Y MATRIZ EXPERIMENTAL ETAPA N°2

La matriz experimental de la Etapa N°2, contiene 5 dosificaciones propuestas por cada suelo para la realización de los ensayos Mini-CBR modificado, Mini UCS natural y Mini UCS saturado. Según resultados obtenidos en la etapa anterior, se determina que la Cal Viva es mejor activador que el Cemento Portland, debido a esto las dosificaciones propuestas contienen únicamente Cal Viva, y se decide mantener su concentración constante en 30 kg/m³ (como se menciona anteriormente, esta concentración ha presentado buenos resultados en proyectos anteriores), y luego variando el contenido de aditivo no tradicional B, se busca comparar el efecto del mismo. Estas dosificaciones se utilizarán sobre los suelos MH, ML y SB con un total de 3 repeticiones en todos los ensayos por cada dosis, lo que da un total de 135 probetas.



Tabla 3-13: MATRIZ EXPERIMENTAL ETAPA N°2.

						N° PROBETAS		
						SUELOS MH/ML/SB		
		NOMENCLATURA	ADITIVO QUÍMICO LÍQUIDO P(lt/m3)	ADITIVO B (kg/m3)	Cal Viva v(kg/m3)	MINI-CBR MODIFICADO	MINI-UCS NATURAL	MINI-UCS SATURADO
DOSIS	1	POB0v0	0	0	0	3	3	3
	2	P3B30v30	0,3	30	30	3	3	3
	3	P3B40v30	0,3	40	30	3	3	3
	4	P3B50v30	0,3	50	30	3	3	3
	5	P3B60v30	0,3	60	30	3	3	3
		Total				135		

Dosificación Aditivo Líquido		Dosificación Aditivo Sólido		Nomenclatura
Aditivo Químico Líquido		Aditivo B	Cal Viva	
P(lt/m3)		B(kg/m3)	v(Kg/m3)	

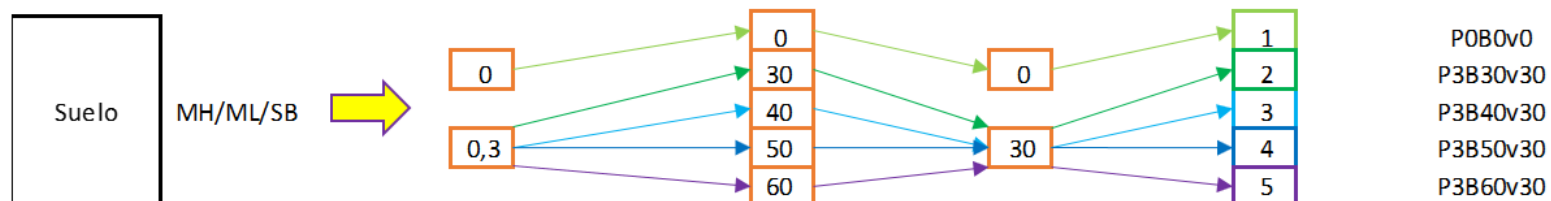


Figura 3-12: ESQUEMA DOSIFICACIONES ETAPA N°2.



3.4.3. ESQUEMA DOSIFICACIONES Y MATRIZ EXPERIMENTAL ETAPA N°3.A

En base a los resultados de la Etapa N°2se selecciona la dosis 5 del Suelo MH, y se propone como dosis óptima con potencial uso para subbases y mejoramiento de subrasante. La matriz experimental de la Etapa N°3.Acontiene dos dosificaciones, la dosis óptima como ya se mencionó y la dosis natural (sin aditivos), esta vez solo para el suelo MH, en esta etapa se realizan los ensayos tradicionales CBR, UCS natural, UCS saturado, y MrTx, de los cuales se realizan tres repeticiones por ensayo para la dosis óptima, por otro lado, para la dosificación con suelo natural, no se realizan UCS natural ni saturado, se realiza una repetición para MrTx y tres repeticiones para CBR.

Tabla 3-14: MATRIZ EXPERIMENTAL ETAPA N°3.A.

						N° PROBETAS			
						SUELO MH			
		NOMENCLATURA	ADITIVO QUÍMICO LÍQUIDO P(lt/m3)	ADITIVO B (kg/m3)	Cal Viva v(kg/m3)	CBR	UCS NATURAL	UCS SATURADO	MrTx
DOSIS	NATURAL	P0B0v0	0	0	0	3	0	0	1
	ÓPTIMA	P3B60v30	0,3	60	30	3	1	1	3
					Total	12			



Dosificación Aditivo Líquido	Dosificación Aditivo Sólido		Dosis	Nomenclatura
Aditivo Químico Líquido	Aditivo B	Cal Viva		
P(lt/m ³)	B(kg/m ³)	v(Kg/m ³)	N°	

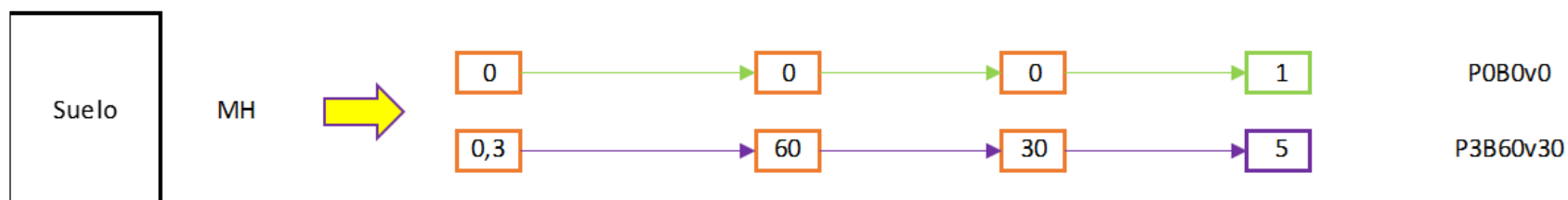


Figura 3-13: ESQUEMA DOSIFICACIONES ETAPA N°3.A.

3.4.4. ESQUEMA DOSIFICACIONES Y MATRIZ EXPERIMENTAL ETAPA N°3.B

En base a los resultados de la Etapa N°2 se selecciona la dosis 4 de los Suelos ML y SB. Se propone como dosis óptima con potencial uso para bases con aporte de material granular. La matriz experimental de la Etapa N°3.B contiene dos dosificaciones, la dosis óptima y la dosis natural, pero esta vez con un treinta por ciento de agregado pétreo, en esta etapa se realizan los ensayos tradicionales CBR, UCS natural, UCS saturado, y MrTx, de los cuales se realizan tres repeticiones por ensayo para la dosis óptima, por otro lado, para la dosificación con suelo natural, no se realizan UCS natural ni saturado, se realiza una repetición para MrTx y tres repeticiones para CBR.



Tabla 3-15: MATRIZ EXPERIMENTAL ETAPA N°3.B.

						N° PROBETAS			
						SUELOS ML/SB			
		NOMENCLATURA	ADITIVO QUÍMICO LÍQUIDO P (lt/m3)	ADITIVO B (kg/m3)	Cal Viva v(kg/m3)	CBR	UCS NATURAL	UCS SATURADO	MrTx
DOSIS	NATURAL + 30% AGREGADO PÉTREO	P0B0v0(A30)	0	0	0	3	0	0	1
	ÓPTIMA + 30% AGREGADO PÉTREO	P3B50v30(A30)	0,3	50	30	3	1	1	3
					Total	12			

Dosificación Aditivo Líquido		Dosificación Aditivo Sólido		Nomenclatura
Aditivo Químico Líquido		Aditivo B	Cal Viva	
P(lt/m3)		B(kg/m3)	v(Kg/m3)	

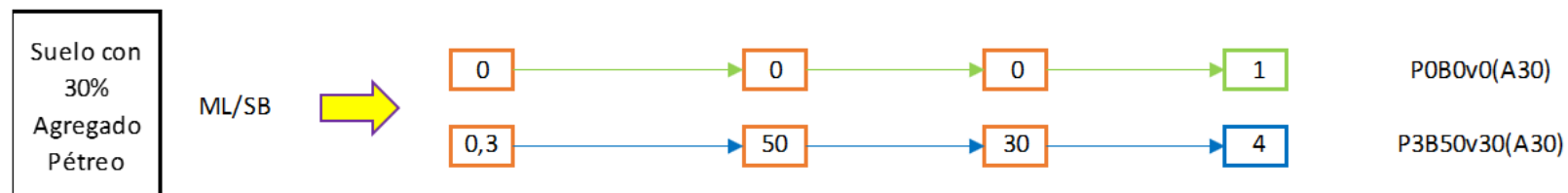


Figura 3-14: ESQUEMA DOSIFICACIONES ETAPA N°3.B.



3.5. MÉTODO ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS CONADITIVO B Y ADITIVO P EN LABORATORIO

3.5.1. MÉTODO DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS SIN AGREGADO PÉTREO CON ADITIVOS NO TRADICIONALES B Y P EN LABORATORIO

- I. Definir el criterio para las dosificaciones de los aditivos. La dosificación de aditivo químico líquido se fijó en 0,3 litros por metro cúbico a estabilizar, para poder evaluar y comparar el efecto de este sobre el suelo con diferentes contenidos de aditivos sólidos. Esta dosificación se basa en la metodología recomendada por el fabricante, que se rige por la ecuación 3-1. Esta cantidad de aditivo químico líquido históricamente ha tenido buenos resultados en proyectos realizados por empresa que lo proporciona, por lo tanto, se define el uso de esta cantidad de forma constante en toda esta investigación. Con respecto al aditivo sólido el método de dosificación propuesto por el fabricante se basa en la ecuación 3-2, pero para esta investigación al incorporar el aditivo B se requiere definir una nueva metodología de dosificación, que se validará a través de la experimentación en laboratorio (ensaye y error), con dosificaciones iniciales propuestas en conjunto con las empresas involucradas en esta investigación.

Ecuación 3-1

$$Cantidad\ de\ aditivo\ Líquido[ml] = \frac{Dosif.\ en\ Terreno \left[\frac{lt}{m^3} \right] \cdot Cant.\ a\ estabilizar[kg]}{D.M.C.S \left[\frac{gr}{cm^3} \right]}$$

Ecuación 3-2

$$Cantidad\ de\ aditivo\ Sólido[gr] = \frac{Dosif.\ en\ Terreno \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot Cant.\ a\ estabilizar[kg]}{D.M.C.S \left[\frac{gr}{cm^3} \right]}$$

- II. Se pesa el suelo dentro de una paila en la cantidad requerida según el ensayo a realizar (500 gr Mini-CBR Modificado, 3,5 Kg Probetas Triaxiales).



Figura 3-15: PAILA CON CANTIDAD REQUERIDA DE SUELO,(Fuente: propia).

- III. Luego que el suelo está dentro de la paila, se agregan los aditivos sólidos en las cantidades especificadas en la dosificación y a su vez se homogeniza mediante el mezclado manual con poruña o cuchara.



Figura 3-16: ADICIÓN DE ADITIVOS SÓLIDOS Y MEZCLADO MANUAL, (Fuente: propia).

- IV. Se pesa la cantidad de agua según la humedad ($\omega\%$) determinada en el ensayo de Proctor Modificado, con respecto al peso de la muestra.



Figura 3-17: MEDICIÓN CANTIDAD DE AGUA, SEGÚN HUMEDAD ÓPTIMA, (Fuente: propia).

- V. Ya definida la cantidad de agua a aplicar sobre la muestra de suelo, se procede a agregar el aditivo químico líquido P (0,3 litros de aditivo líquido por metro cúbico de suelo a estabilizar, se propone dejar fija la dosificación de este aditivo para poder hacer comparaciones entre probetas sobre el comportamiento de los aditivos sobre el suelo) sobre el agua en la probeta de laboratorio, mediante una propipeta. A continuación, mezclar la solución para que la mezcla líquida quede homogénea.



Figura 3-18: DOSIFICACIÓN ADITIVO LÍQUIDO CON PROPIPETA, (Fuente: propia).



- VI. Sobre la muestra homogenizada de suelo se arma un pequeño volcán con la poruña, para luego verter el agua con aditivo líquido en el centro, procurando que el líquido no tenga contacto con la superficie de la paila para asegurarse de perder la menor cantidad de humedad, luego se procede a mezclar la muestra hasta que quede con humedad homogénea. Finalizado este proceso, la mezcla queda lista para ser compactada.



Figura 3-19: ADICIÓN SOLUCIÓN AGUA Y ADITIVO LÍQUIDO EN SUELO SECO, (Fuente: propia).

3.5.2. MÉTODO DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON AGREGADO PÉTREO Y ADITIVOS NO TRADICIONALES B Y P

Esta metodología es idéntica a la explicada en la sección 3.5.1, salvo que se incorpora un paso adicional luego de definir las dosificaciones de aditivos químicos (paso I) y antes de pesar el material de suelo (paso II), este paso adicional consiste en la adición de material granular (agregado pétreo) al suelo natural, utilizando la proporción requerida según proyecto. En esta oportunidad, la proporción será de un 30% de agregado pétreo, ya que, la empresa encargada de la estabilización de caminos en este proyecto ha tenido resultados exitosos en proyectos anteriores. Este procedimiento comienza con el tamizado del agregado pétreo, a través de la malla $\frac{3}{4}$, ya que el árido puede presentar discontinuidades en sus tamaños. Una vez realizado esto, se procede a cuartear el árido en el cuarteador metálico de canales (Figura 3-20). Con el objeto de reducir la muestra de material granular, y formar cantidades de agregado que sean lo más representativas y homogéneas posibles (Figura 3-21) para su posterior mezclado con el suelo natural dentro de la betonera (Figura 3-22).

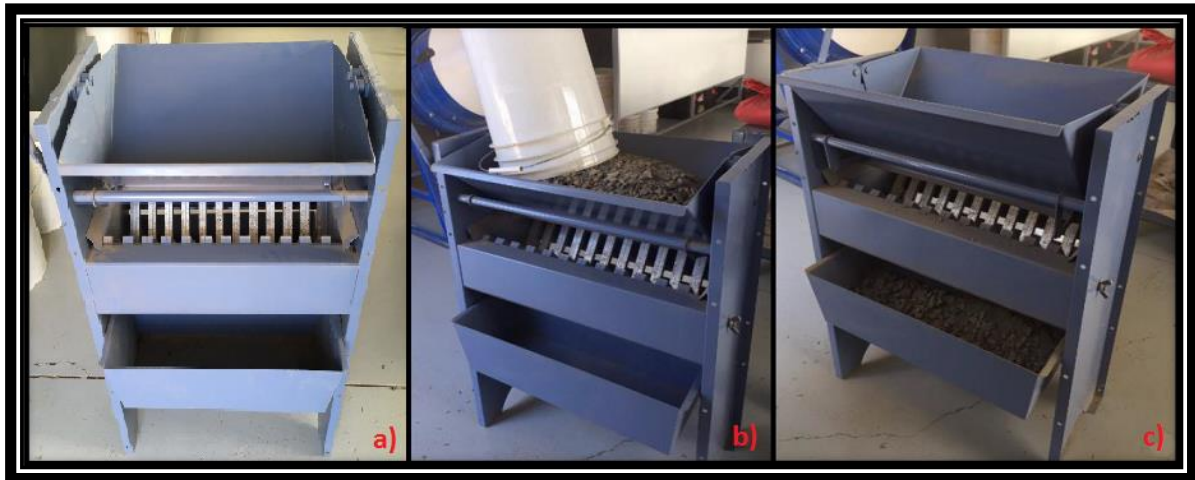


Figura 3-20: A) CUARTEADOR METÁLICO DE CANALES, B) INCORPORACIÓN DE MATERIAL GRANULAR AL CUARTEADOR, C) MATERIAL GRANULAR CUARTEADO, (Fuente: propia).



Figura 3-21: MATERIAL GRANULAR REPRESENTATIVO Y HOMOGÉNEO LUEGO DE CUARTEO, (Fuente: propia).



Figura 3-22: BETONERA UTILIZADA EN TRABAJO EXPERIMENTAL, (Fuente: propia).

3.6. MÉTODO DE LABORATORIO MINI-CBR MODIFICADO

Se presenta a continuación el método a utilizar para la confección de probetas y posterior ensayo de Mini-CBR Modificado. Cabe destacar que este procedimiento es válido sólo para suelos finos (como los estudiados en esta investigación), es decir, deben tener un tamaño inferior a la malla N°4 (Riveros, 2016). Este ensayo se utiliza debido a su fácil realización, se trata de un ensayo miniatura, en el cual, el consumo de suelo, agua y aditivos es muy reducido con respecto al ensayo tradicional CBR. Además, implica un esfuerzo físico menor por parte del operario y los tiempos de elaboración de probetas y su posterior ensaye son muy reducidos también. Esta alternativa, es ideal para ensayos preliminares de investigaciones de suelos finos, ya que en este nivel de la investigación no es necesario obtener resultados exactos, como en el caso de los ensayos tradicionales, los cuales se deben ocupar en etapas definitivas, en la totalidad de los casos:



Capítulo 3: “Materiales y Métodos de Laboratorio”

- I. Primero, con el suelo correctamente homogeneizado, se extrae una muestra de suelo de 500 g.
- II. Con esta muestra, según la humedad óptima obtenida en el ensayo de Proctor Modificado (también puede ser con el ensayo de Mini-Proctor), se dosifica la cantidad de agua a agregar, así como también la cantidad de aditivos para el posterior mezclado de todos los componentes, como se menciona en la sección 3.5.
- III. Con la muestra ya dosificada se pesa otra muestra de 250 g para la confección de la probeta, el resto de suelo se seca en el horno para el cálculo de humedad (se recomienda esperar para después de la compactación del suelo, así, si falta muestra para poder compactar aún se tendrá disponible).



Figura 3-23: MUESTRA DE SUELO SECADA EN HORNO, (Fuente: propia).



Capítulo 3: “Materiales y Métodos de Laboratorio”

- IV. Con la muestra de 250 g (puede variar según tipo de suelo) se comienza a llenar el molde con la ayuda de un embudo procurando que todo el suelo quede adentro del molde (ver Figura 3-24) y, que se rellene en su totalidad o muy cercano al tope.



Figura 3-24: ADICIÓN DE MUESTRA EN MOLDE, (Fuente: propia).

- V. Luego se acomoda el pisón encima del suelo a compactar (ver Figura 3-25), el pisón debe tener una altura de caída de 30,5 cm para lograr la energía específica de compactación propuesta en esta sección.



Figura 3-25: PISÓN LISTO PARA COMPACTACIÓN, (Fuente: propia).

Se procede entonces a golpear la muestra 19 veces por lado (por esto se declaran 2 capas en el cálculo de la energía específica de compactación).

- VI. Con la muestra ya compactada el próximo paso es el uso del extractor que viene con el equipo principal para extraer el excedente de la muestra. La muestra queda con una sección afuera del molde como se puede observar en la Figura 3-26.



Figura 3-26: EXTRACCIÓN EXCEDENTE DEL SUELO COMPACTADO, (Fuente: propia).

- VII. La sección sobrante debe ser eliminada de modo de obtener probetas de tamaños estándar y así, evitar diferencias en el ensayo de Mini-CBR, para esto se enrasa la sección sobrante, como se observa en la Figura 3-27, y, obtenemos la probeta final de altura promedio de 5 cm con diámetro de 5 cm aproximadamente.



Figura 3-27: PROBETA TERMINADA CON TAMAÑO NORMALIZADO, (Fuente propia).

- VIII. Se define en conjunto con las empresas involucradas, un curado para las probetas de una duración de 7 días. Se determinó este tiempo con el objetivo de asegurar la interacción química entre aditivos, permitir la reorganización de las partículas de suelo y que se logre una correcta reacción entre el suelo y los aditivos previo a ser ensayados. Para esto las probetas se embolsan para que no se pierda humedad progresivamente y así lograr un mejor resultado, las probetas se guardan en cajas durante este periodo de tiempo.

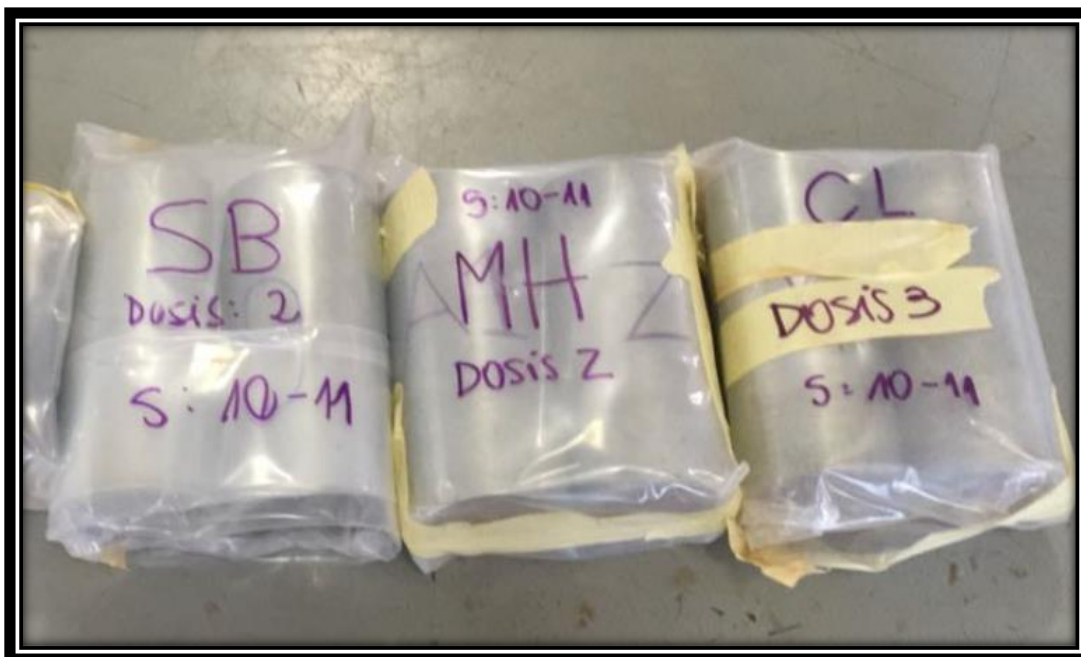


Figura 3-28: PROBETAS ENVASADAS PARA CURADO, (Fuente: propia).



Figura 3-29: CAJA DONDE SE ALMACENAN LAS PROBETAS, (Fuente: propia).



- IX. Luego del curado de las probetas se procede a colocar en los equipos de inmersión. Así, la probeta queda confinada, pero con libre drenaje para la saturación, tanto en la base del equipo de inmersión, así como por la sobrecarga superior. Las probetas están listas para ser sumergidas. Se calcula la profundidad de la muestra con respecto al tope del molde para el posterior cálculo de la expansión.



Figura 3-30: EQUIPO DE INMERSIÓN, (Fuente: propia).

- X. Luego, se sumergen las probetas durante 24 horas para lograr una saturación completa del suelo (Figura 3-31). Después del tiempo de inmersión se retiran las probetas y se dejan estilar durante 15 minutos aproximadamente, se calcula nuevamente la distancia entre el tope del molde y la probeta para el cálculo de la expansión o variación volumétrica.



Figura 3-31: PROBETAS SUMERGIDAS, (Fuente: propia).

- XI. Por último, se realiza el ensayo de Mini-CBR con una velocidad de penetración de 1,25 mm/min (idéntico al CBR) y una penetración final máxima de 5 mm, se registran valores cada 0,05 mm. Se registran las penetraciones a 2 mm y 2,5 mm para el cálculo del índice de Mini-CBR Modificado.



Figura 3-32: ENSAYO MINI-CBR MODIFICADO, (Fuente: propia).

- XII. El cálculo se realiza de acuerdo con las ecuaciones 2-10 y 2-11 presentadas en el capítulo 2, sección 2.5.3. El máximo valor entre el “Mini-CBR.1” y “Mini-CBR.2” será el valor definitivo del índice de Mini-CBR Modificado.



3.7. MÉTODO DE LABORATORIO MrTx

Se presenta a continuación el método a utilizar para la confección de probetas triaxiales y posterior ensayo de MrTx. Cabe destacar que este procedimiento es válido sólo para suelos finos (como los estudiados en esta investigación), es decir, deben tener un tamaño inferior a la malla N°4.

- I. Se debe preparar el molde, para ello se arma y se verifica que todas las piezas estén bien ajustadas, luego se aplica una delgada película de desmoldante en el interior del molde y collerín, para no se desprenda el suelo compactado al momento de retirar el molde.



Figura 3-33: MOLDE PROBETA TRIAXIAL Y APLICACIÓN DESMOLDANTE, (Fuente: propia).

- II. Primero, con el suelo correctamente homogeneizado, se extrae una muestra de suelo de 4 kg.
- III. Con esta muestra, según la humedad óptima obtenida en el ensayo de Proctor Modificado (también puede ser con el ensayo de Mini-Proctor), se dosifica la cantidad de agua a



Capítulo 3: “Materiales y Métodos de Laboratorio”

agregar, así como también la cantidad de aditivos para el posterior mezclado de todos los componentes.

- IV. Se agrega una primera capa de suelo estabilizado dentro del molde y collarín.



Figura 3-34: ADICIÓN DEL SUELO ESTABILIZADO AL MOLDE TRIAXIAL, (Fuente: propia).

- V. Se realizará la compactación manual con la ayuda del mismo pisón de compactación del ensayo Proctor Modificado. Se deben aplicar 56 golpes por capa, para un total de 5 capas. La técnica para golpear es muy importante, se debe hacer de manera continua y en forma de espiral con respecto al centro geométrico de la probeta, por lo que se debe disponer de alguien con experiencia para golpear y que se logren probetas de buena calidad.



Figura 3-35: COMPACTACIÓN PROBETA TRIAXIAL, (Fuente: propia).

- VI. Se debe retirar el collarín con cuidado para no romper la probeta, para luego rasar el excedente de suelo, con un rasador hasta que se retire todo el excedente que queda por encima del molde.



Figura 3-36: RASADO PROBETA TRIAXIAL, (Fuente: propia).

- VII. Se desmonta manualmente el molde, con lo que finaliza la elaboración de la probeta para ser almacenada en bolsas selladas para iniciar el proceso de curado de 7 días, plazo definido en conjunto con las empresas involucradas en la investigación. Se determinó este tiempo con el objetivo de asegurar la interacción química entre aditivos, permitir la reorganización de las partículas de suelo y que se logre una correcta reacción entre el suelo y los aditivos previo a ser ensayados. Las probetas también fueron ensayadas a los 14 y 28 días de curado.



Figura 3-37: PROBETAS TRIAXIALES ALMACENADAS PARA CURADO, (Fuente: propia).

- VIII. Luego del curado, se ensaya la probeta a Módulo Resiliente (MrTx), en el equipo de Ensayos Universales Servoneumáticos, NU Cooper.



Figura 3-38: ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE (MrTx), EN PROBETA TRIAXIAL, (Fuente: propia).



Capítulo 3: “Materiales y Métodos de Laboratorio”

Con la ayuda del Software Universal, que se basa en métodos de ensayo de las normas EN, ASTM y AASHTO. Utilizando ondas estáticas, sinusoidales, medio senoidales, cuadradas y triangulares con frecuencias y velocidades de adquisición seleccionados por el usuario.

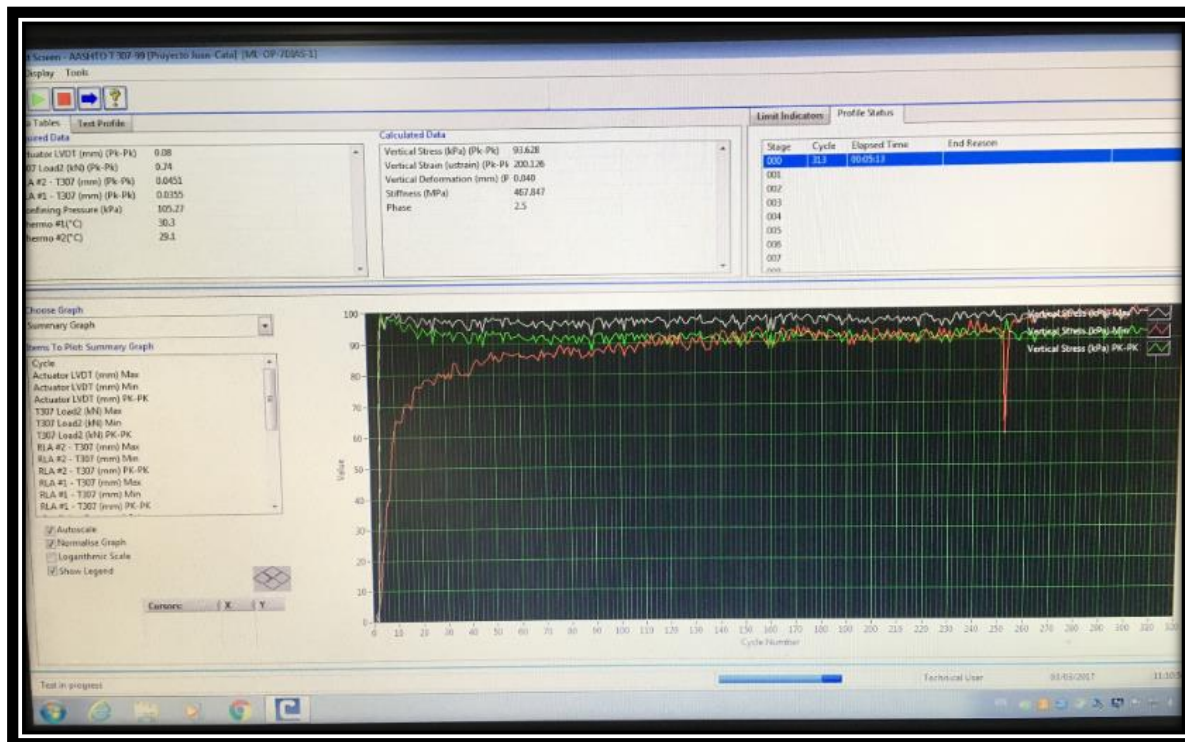


Figura 3-39: MONITOR SOFTWARE UNIVERSAL, (Fuente: propia).



4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan y analizan los resultados de los ensayos de laboratorio propuestos en el capítulo 3. En primer lugar, en la Etapa N°0, se realizaron ensayos de laboratorio con el fin de caracterizar los tres suelos de esta investigación, donde se determinó la DMCS y humedad óptima, límites de Atterberg y granulometría, datos que se encuentran en la sección 3.2.

Luego de conocer y caracterizar los suelos, hay que definir algunos criterios que son necesarios para la selección adecuada de las dosificaciones de las mezclas de suelos y aditivos utilizadas en cada una de las etapas, que ayudarán a definir ciertos rangos y cantidades de cada componente, estos criterios se detallan a continuación:

- **Comportamiento mecánico:** Hay que analizar la validez de cada dosificación y verificar el mejoramiento de las propiedades mecánicas e ingenieriles de cada suelo, seleccionando las dosificaciones que presenten el mejor comportamiento en cada uno de los ensayos y así ir iterando las cantidades de los componentes de las dosificaciones de etapa en etapa.
- **Resultados representativos:** Con el fin de obtener resultados lo más representativos posibles, se define la realización de tres repeticiones en por cada suelo y dosis en cada uno de los ensayos, y así reducir posibles errores causados por el operario en la elaboración y ensaye de probetas.
- **Cantidad de aditivo líquido P:** Definida según la recomendación del fabricante de este producto y que es respaldada por su utilización en proyectos de ingeniería realizados a cargo de esta empresa, además de ser utilizada y validada en 3 investigaciones anteriores a cargo del profesor guía de este proyecto (Delarze, 2015) (Riveros, 2016) (Grünwald, 2017). La concentración de este aditivo se encuentra en un rango de funcionamiento entre 0,25 y 0,4 [lt/m³] pero es fijada en un valor constante de 0,3 [lt/m³], con el objeto de evaluar a través de comparación de resultados, lo cual no sería representativo si esta concentración fuera variable.
- **Cantidad de aditivo sólido B:** Al tratarse de un residuo industrial se requiere que su utilización sea en la mayor cantidad posible con el fin de reducir el impacto ambiental. Sin



Capítulo 4: “Análisis de Resultados”

embargo, es fundamental formular una dosificación que sea manejable y aplicable en terreno.

- **Cantidad de aditivos tradicionales:** Debido a que los aditivos tradicionales en esta investigación son mezclados particularmente con el aditivo líquido P, se define esta cantidad según la recomendación del fabricante de este aditivo, ya que, el aditivo P siempre es utilizado en conjunto con aditivos tradicionales y las concentraciones ya han sido probadas en los mismos proyectos de investigación con resultados satisfactorios. Esta concentración se fija en un valor de 30 [kg/m³] constante para poder realizar comparación de resultados, además que se busca reducir este contenido por el factor económico mencionado a continuación.
- **Factores económicos asociados:** Es necesario considerar el costo asociado a la utilización de los distintos aditivos utilizados, la idea principal es reducir el consumo de los aditivos tradicionales y el aditivo líquido P, los que poseen un elevado costo en el comercio, y complementar esta reducción de material con el uso de la mayor cantidad posible de aditivo B (mencionado en un criterio anterior), ya que con esto se reducen considerablemente los costos asociados al manejo, transporte y eliminación de este residuo.

Definidos los criterios de selección de las dosificaciones de aditivos en la estabilización química de los suelos, enseguida en la Etapa N°1 en función de las propiedades de los tres suelos MH, ML y SB y al tratarse de suelos de granulometría fina, se hace posible la utilización del ensayo Mini CBR Modificado (exclusivo para suelos finos), ensayo que permite conocer un valor preliminar de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo mediante el Índice Mini-CBR Modificado (IMCM). Además, Posee la ventaja de ser un ensayo que necesita una baja cantidad de suelo, solo se requiere entre 300-500 gr (cantidad variable según suelo) de una muestra de suelo. La elaboración y ensayo de las probetas Mini CBR Modificado requiere tiempos considerablemente reducidos con respecto al ensayo CBR y al tratarse de un ensayo “mini” el esfuerzo físico del operario de laboratorio se reduce al mínimo. Este ensayo es realizado por el autor de esta investigación, el cual se capacitó para su realización durante su labor como autor y ayudante del trabajo experimental de laboratorio en el proyecto de investigación *Implementación del Ensayo Mini-CBR en Suelos Finos Naturales y Estabilizados Químicamente* (Riveros, 2016). Sin embargo, para complementar y dar mayor validez a los resultados obtenidos en este ensayo, se ejecutan de



forma simultánea los ensayos de Compresión No Confinada en condición de humedad natural y saturada, realizados por una empresa especializada en ensayos y estudios de mecánica de suelos. Finalmente, en esta etapa se realiza un análisis comparativo de resultados de cada uno de los suelos y dosificaciones propuestas, con el objetivo de clasificarlos según su potencial uso como capa estructural de un CBVT. Para los suelos que presenten una reducida e insuficiente capacidad estructural y/o un mal comportamiento en condiciones de humedad desfavorable es conveniente definir su uso exclusivo como subrasante y proponer posibles dosificaciones para conseguir un mejoramiento de suelo y determinar su potencial uso como subrasante estabilizada de un CBVT, por otro lado seleccionar también los suelos que presenten un comportamiento aceptable, con esto formular y proponer posibles dosificaciones para la estabilización de una base granular para su posterior uso como carpeta de rodado, base o subbase en un CBVT.

Una vez definidos los posibles usos en las capas estructurales de un CBVT para estos suelos, en la Etapa N°2 se ensayan y analizan las dosificaciones propuestas en la etapa anterior, donde la Etapa N°2.A se refiere a mejoramiento de subrasante y la Etapa N°2.B a mejoramiento de base granular, estas etapas son similares a la Etapa N°1, ya que se realizan los mismos ensayos y análisis de datos, pero con distintas dosificaciones. En estas etapas se definirán las dosificaciones óptimas por cada suelo, es decir, las dosificaciones que fueron más efectivas en la estabilización química de las partículas finas de estos suelos.

La Etapa N°3, se divide de igual manera que la etapa anterior. La Etapa N°3.A y N°3.B corresponden respectivamente a mejoramiento de subrasante y base granular, salvo que para la Etapa N°3.B se agrega un 30% de agregado pétreo grueso. En esta última parte se utilizan los ensayos mecánicos tradicionales, tales como: CBR, UCS en estado natural y saturado y MrTx para lograr caracterizar el comportamiento mecánico final de los suelos estabilizados. El autor de esta investigación fue capacitado en la realización de estos tres ensayos tradicionales gracias a su activa participación como autor y ayudante en el trabajo experimental de laboratorio en el proyecto de investigación *Evaluación del Comportamiento Mecánico en Laboratorio de Suelos Estabilizados Químicamente* (Grünwald, 2017). Sin embargo, los ensayos CBR y UCS fueron realizados por la misma empresa de ensaye y estudio de mecánica de suelos mencionada anteriormente, por lo tanto, solo el ensayo MrTx lo debe realizar el autor y equipo de trabajo experimental. Debido al elevado trabajo físico asociado a la realización de cada una de las



probetas de estos ensayos, considerando también que solo el autor de esta investigación logró estar capacitado a tiempo para la ejecución de la compactación de suelo y manejo de moldes para estos ensayos y principalmente considerando los acotados plazos establecidos por las empresas involucradas. Fue necesario contar con la ayuda del encargado del laboratorio para la compactación de algunas probetas, aspecto a considerar ante la posible variabilidad de datos. El mezclado de las dosificaciones fue realizado por el mismo operario en todos los casos. Finalmente se analizan los resultados para validar o rechazar la hipótesis y objetivos de esta investigación.

4.2. RESULTADOS Y ANÁLISIS ETAPA N°1

En esta sección se presenta un resumen de los resultados de la Etapa N°1, donde se exponen los resultados ensayo Mini CBR Modificado y Mini UCS para suelo natural y saturado y su posterior análisis. Como ya se mencionó anteriormente, las dosificaciones utilizadas en la Etapa N°1 son las siguientes:

Tabla 4-1: DOSIFICACIONES DE ADITIVOS ETAPA N°1.

		NOMENCLATURA	ADITIVO QUÍMICO LÍQUIDO P(lt/m ³)	ADITIVO B (kg/m ³)	Cemento Portland p(kg/m ³)	Cal Viva v(kg/m ³)
DOSIS	1	POB0p0v0	0	0	0	0
	2	P3B30p0v0	0,3	30	0	0
	3	P3B60p0v0	0,3	60	0	0
	4	P3B30p30v0	0,3	30	30	0
	5	P3B30p0v30	0,3	30	0	30

4.2.1. ETAPA N°1 ANÁLISIS DE RESULTADOS PRELIMINARES Y DETERMINACIÓN DEL USO DEL SUELO

4.2.1.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS ENSAYO MINI CBR MODIFICADO - SUELO MH

Respecto de los resultados obtenidos en la Figura 4-1, se puede apreciar una reducción de aproximadamente un 50% del IMCM en la dosis 2 y 3 que son dosificaciones que poseen exclusivamente aditivos no tradicionales respecto a la dosis 1 sin aditivos. Sin embargo, la dosis 1 es la que posee la mayor desviación estándar en este suelo, es decir, presenta la mayor variabilidad de datos por lo que su validez se reduce, esto es debido a que la tercera repetición da bastante mayor al resto de los resultados, lo que se contrapone a la reducida desviación estándar



que se observa en la dosis 2 y 3 que presentaron resultados bastante homogéneos, por lo tanto, en esta comparación independiente de esta no despreciable reducción de IMCM y además de no observarse un incremento representativo del IMCM en la dosis 3 respecto a la dosis 2, lo único que si se hace evidente de este análisis es que no existe ningún incremento de resistencia que nos de algún indicio de la generación de la reacción puzolánica en las dosis 2 y 3, entonces es muy probable que se requiera un activador para que se produzca la reacción puzolánica y se incremente la resistencia mecánica.

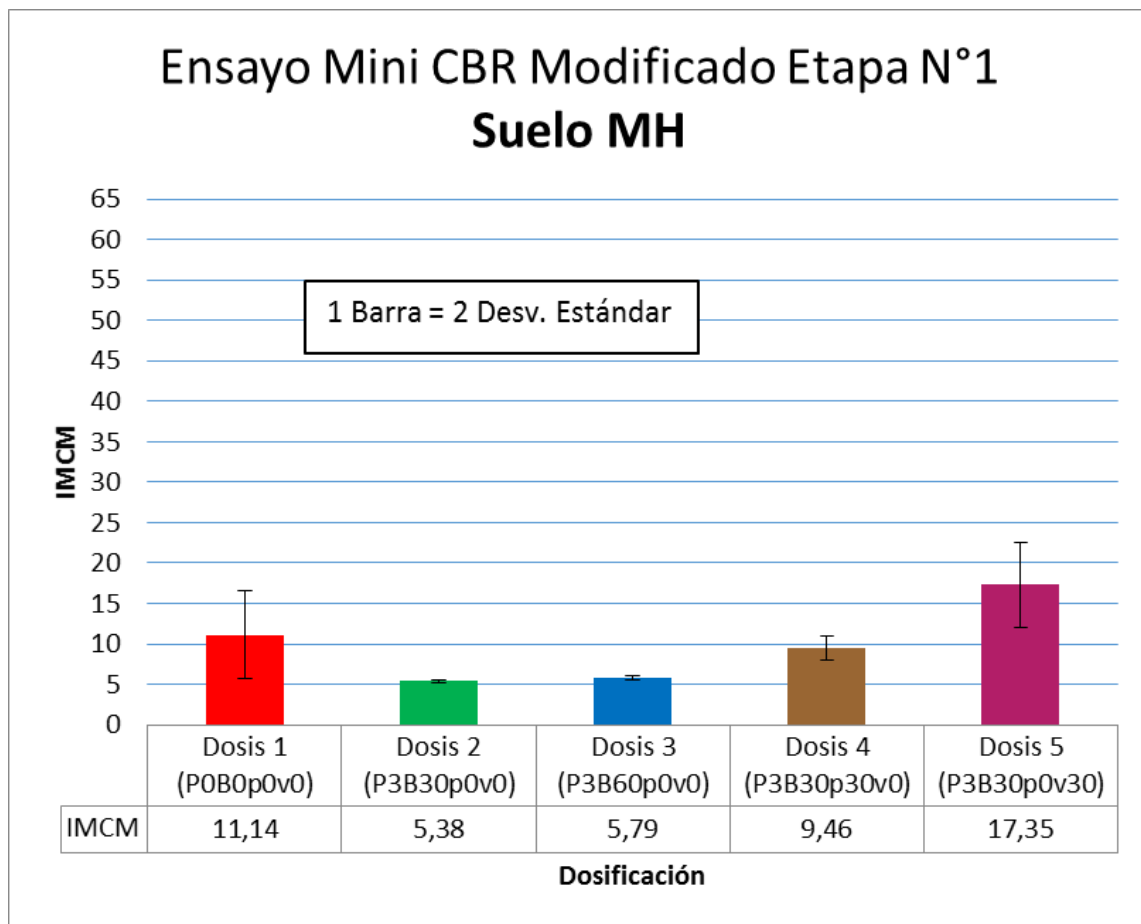


Figura 4-1: IMCM VS. DOSIFICACIÓN PARA SUELO MH.

Analizando los resultados de las dosis 4 y 5, que incorporan en su contenido aditivos tradicionales además de aditivos no tradicionales se puede apreciar que el mejor resultado obtenido para este suelo es la dosis 5 que utiliza Cal Viva como aditivo tradicional con un valor IMCM de 17,35, el cual es muy superior al valor que presenta a su análogo con Cemento Portland en la dosis 4 con un valor un 46% menor con un IMCM de 9,46. Sin embargo, al igual que la dosis 1 la dosis 5 presenta



Capítulo 4: “Análisis de Resultados”

una elevada variabilidad de datos ya que la tercera repetición también da bastante superior a los demás datos, pero también hay que considerar que es la única dosificación de todas que presenta evidencia de una posible reacción puzolánica, esto no confirma en su totalidad pero es muy probable que el aditivo B necesite un activador para desencadenar la reacción puzolánica en este suelo.

Tabla 4-2: RESULTADOS ENSAYO MINI CBR MODIFICADO PARA SUELO MH.

Tipo de Suelo	Dosis	Valores IMCM			Promedio	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación
		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3			
Suelo MH	Dosis 1	8,30	7,74	17,37	11,14	5,402	0,485
	Dosis 2	5,18	5,49	5,49	5,38	0,181	0,034
	Dosis 3	5,49	5,76	6,13	5,79	0,324	0,056
	Dosis 4	9,19	11,01	8,19	9,46	1,428	0,151
	Dosis 5	16,69	12,45	22,90	17,35	5,256	0,303

4.2.1.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS ENSAYO MINI UCS - SUELO MH

Para complementar los resultados de IMCM se analizan los resultados del ensayo Mini UCS contenidos en la Figura 4-2, donde se puede observar que en el caso de las probetas con suelo al natural (no saturadas), la resistencia más alta la posee la dosis 2, pero a pesar de ello la dosis 2 contiene la mayor variabilidad de datos lo que reduce en parte su representatividad y además esta dosificación estaba descartada desde un inicio según los resultados de IMCM, por el contrario el valor más reducido de resistencia para probetas al natural se observa en la dosis 5, sin embargo los valores obtenidos en todas las dosificaciones no presentan diferencias considerables y se mueven en un rango de datos con una diferencia no mayor a los 2[kg/cm²] entre el valor más alto y más bajo, lo que se considera una diferencia muy baja para sacar alguna conclusión asociada. Pero al analizar los resultados obtenidos en las probetas completamente saturadas, se puede apreciar que la única que presenta un resultado es la dosis 5, es decir, que para las otras cuatro dosificaciones analizadas no fue posible la realización del ensayo debido a que estas se destruyeron en el proceso de saturación antes de ser ensayadas, por lo tanto, se observa que la dosis 5 con un valor de 1,87 [kg/cm²] en su condición saturada, es la única que presenta evidencia



de un mejoramiento en su condición más desfavorable de saturación. Debido a esto se comprueba que el aditivo B requiere un activador para desencadenar la reacción puzolánica en este suelo y finalmente la dosis 5 es la que presenta un mejor comportamiento respetando los criterios definidos para la selección de las dosificaciones mencionados anteriormente. Hay que tener presente que gracias a que los ensayos Mini CBR Modificado y UCS saturado, es posible evaluar el comportamiento de los suelos en su condición más desfavorable, es decir, en estado de humedad saturada.

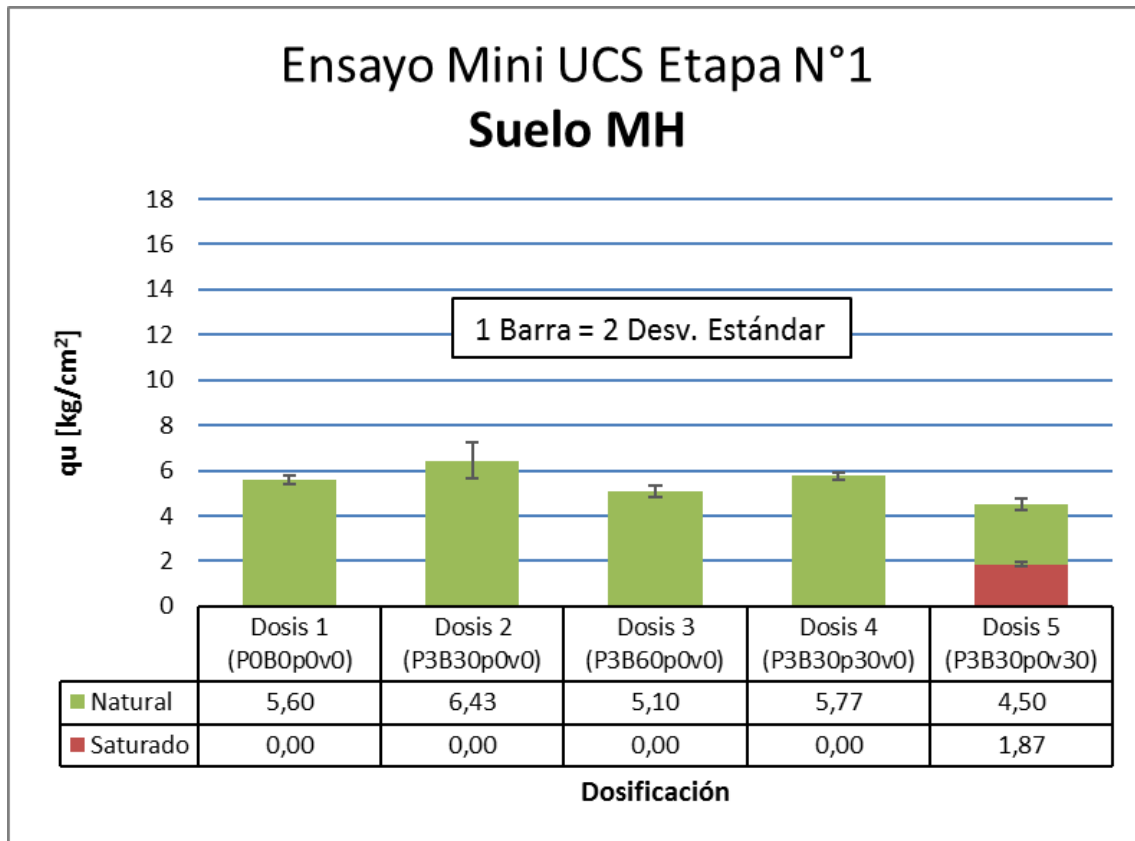


Figura 4-2: RESISTENCIA q_u [kg/cm²] VS DOSIFICACIÓN PARA SUELO MH.

4.2.1.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS ENSAYO MINI CBR MODIFICADO - SUELO ML

Como se observa en la Figura 4-3 según los valores de IMCM, a diferencia del suelo MH la dosificación que presenta el IMCM más bajo en este suelo es la dosis 1 con un valor de 16,65, el cual es seguido por la dosis 2 y 3 con un valor de IMCM de 23,24 y 29,30 respectivamente. En ambas dosificaciones con aditivos no tradicionales, es visible la existencia de un incremento de resistencia, lo que confirma que hay un cierto grado de mejoramiento del suelo. No obstante, la dosis 5 tiene una resistencia 2,7 veces mayor que la dosis 1 y es 1,5 veces superior que la dosis 3.



Capítulo 4: “Análisis de Resultados”

Sin embargo, la dosis que presenta la resistencia más elevada para este suelo es la dosis 4 que supera en casi 3,2 veces la resistencia del suelo natural, pero presenta una elevada desviación estándar de 8,59 que es muy superior a la desviación estándar de la dosis 5 de 1,35, por esta razón no es concluyente que existe un mejor comportamiento en la dosis 4. De todas formas, es evidente el incremento de la resistencia y mejoramiento de estos suelos con ambas dosificaciones que fueron las mejores, lo que confirma nuevamente la necesidad de un activador para la reacción puzolánica del aditivo B.

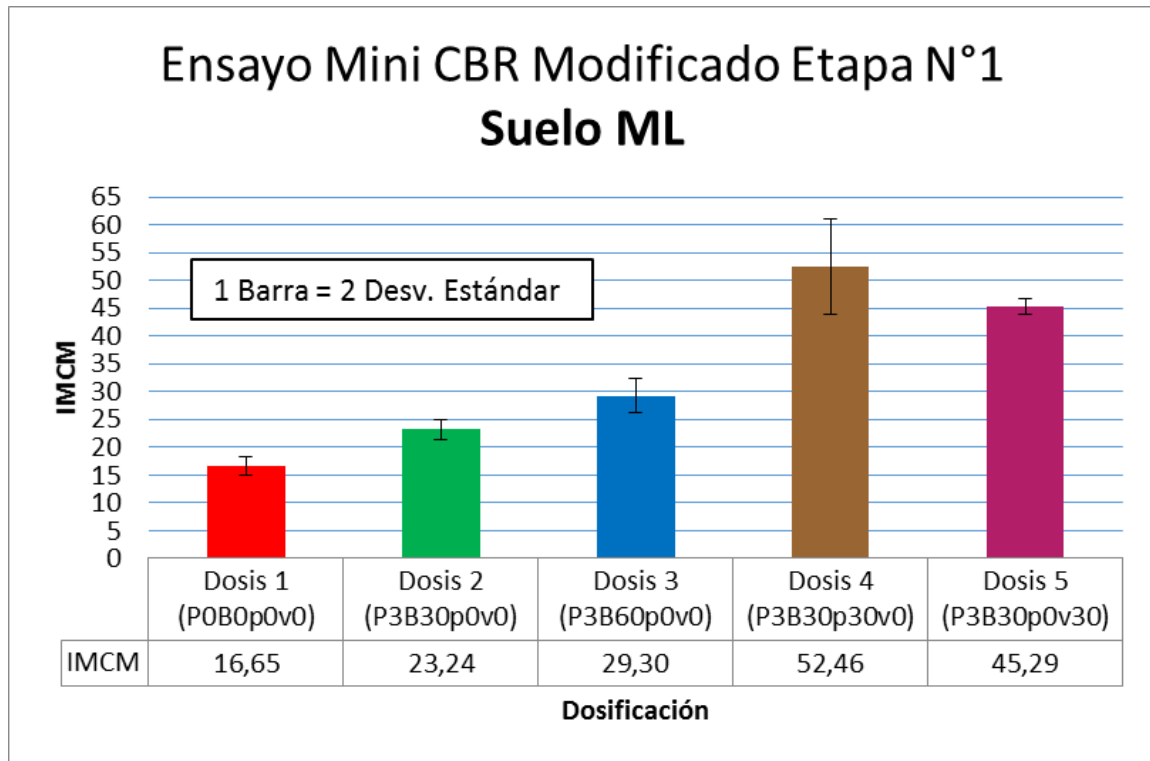


Figura 4-3: IMCM VS. DOSIFICACIÓN PARA SUELO ML.

Tabla 4-3: RESULTADOS ENSAYO MINI CBR MODIFICADO PARA SUELO ML.

Tipo de Suelo	Dosis	Valores IMCM			Promedio	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación
		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3			
Suelo ML	Dosis 1	15,69	18,58	15,68	16,65	1,669	0,100
	Dosis 2	23,90	24,57	21,25	23,24	1,758	0,076
	Dosis 3	26,72	28,60	32,59	29,30	2,996	0,102
	Dosis 4	42,73	59,00	55,64	52,46	8,590	0,164
	Dosis 5	44,77	46,83	44,28	45,29	1,357	0,030



4.2.1.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS ENSAYO MINI UCS - SUELO ML

Con los resultados de la Figura 4-4, se aprecia nuevamente que para las tres primeras dosificaciones no fue posible extraer ningún resultado, ya que sucede lo mismo que en el caso anterior. También se confirma que el mejor comportamiento se logra en la dosis 4, el cual presenta los valores más elevados de resistencia para la condición natural y saturada, no obstante, los valores de la dosis 5 en ambas condiciones son muy cercanos y no difieren en más de 1 [kg/cm²] en el peor de los casos.

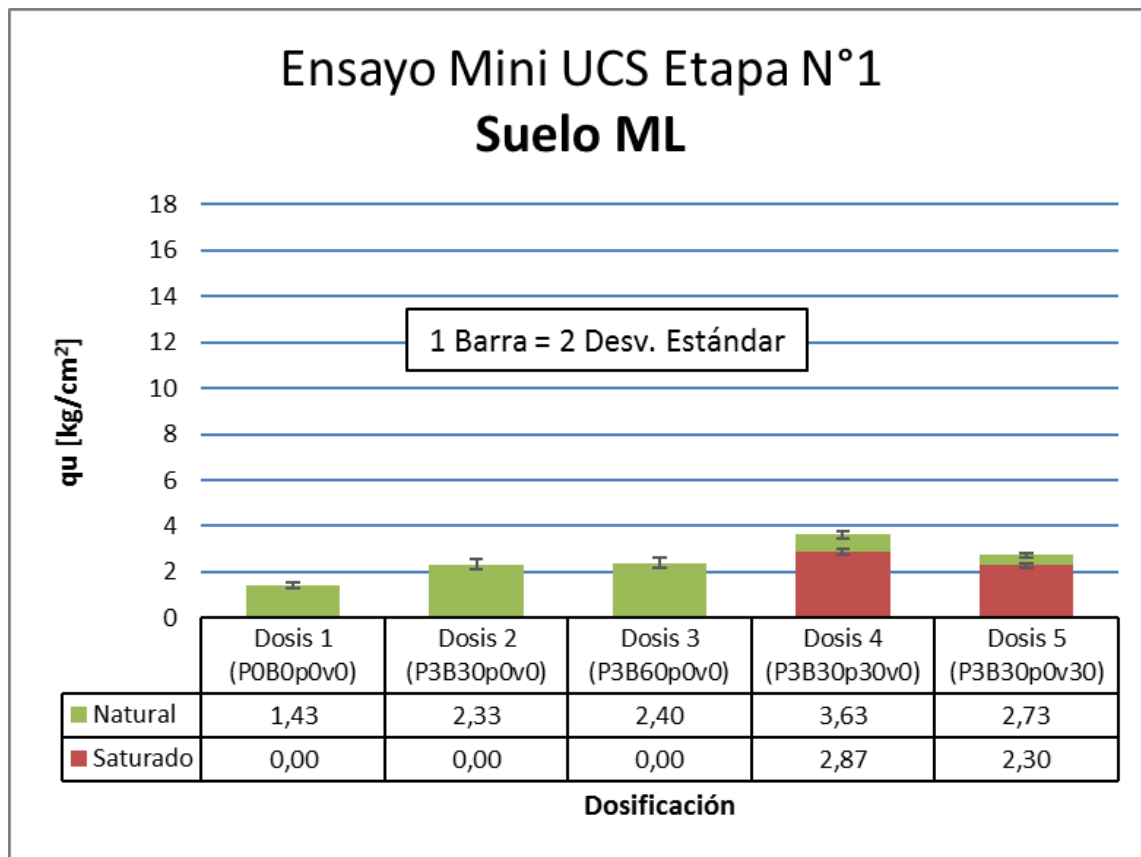


Figura 4-4: RESISTENCIA q_u [kg/cm²] VS. DOSIFICACIÓN PARA SUELO ML.

Cabe destacar, que si se observa la forma que presentan los resultados del ensayo Mini CBR Modificado es muy similar a la forma de los resultados del ensayo Mini UCS, con esto se comprueba la validez mutua entre ambos ensayos para este suelo.



4.2.1.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS ENSAYO MINI CBR MODIFICADO - SUELO BORDE

Al revisar los resultados obtenidos en el ensayo Mini CBR Modificado para el suelo borde, que están contenidos en la gráfica de la Figura 4-5, se aprecia que de la misma manera que para el caso del suelo MH, no hay evidencia de un incremento de resistencia con los aditivos no tradicionales de las dosis 2 y 3, y el aumento obtenido en la dosis 4 no es significativo respecto de la dosis 1, por otro lado, es evidente el incremento de resistencia en la dosis 5 ya que duplica la resistencia que presenta la dosis sin aditivos, por lo tanto, para el caso del suelo borde según este ensayo la única dosis que logra un mejoramiento evidente es la dosis 5. Con respecto a la variabilidad de datos de este análisis y según los coeficientes de variación, todas las muestras se mueven dentro de un rango similar de variabilidad, además de ser menor a un 20% en el peor de los casos, lo que aumenta la validez y comprueba la precisión de estos resultados.

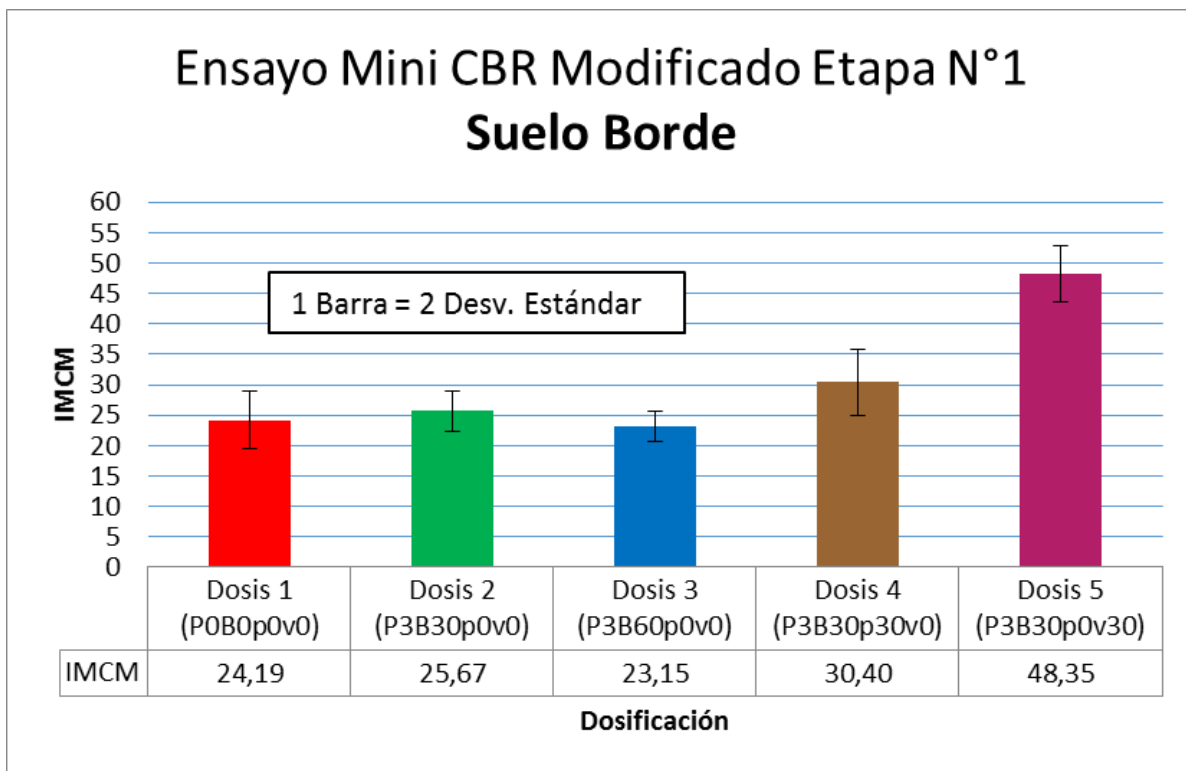


Figura 4-5: IMCM VS. DOSIFICACIÓN PARA SUELO BORDE.



Tabla 4-4: RESULTADOS ENSAYO MINI CBR MODIFICADO PARA SUELO BORDE.

Tipo de Suelo	Dosis	Valores IMCM			Promedio	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación
		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3			
Suelo Borde	Dosis 1	19,48	24,13	28,95	24,19	4,734	0,196
	Dosis 2	28,82	25,98	22,19	25,67	3,328	0,130
	Dosis 3	23,90	25,28	20,28	23,15	2,585	0,112
	Dosis 4	25,28	29,88	36,04	30,40	5,400	0,178
	Dosis 5	52,93	48,43	43,69	48,35	4,619	0,096

4.2.1.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS ENSAYO MINI UCS – SUELO BORDE

Respecto del ensayo Mini UCS para el suelo borde, presentado en la gráfica de la Figura 4-6, para el caso de las probetas en condición de humedad natural se observa un incremento de resistencia en todas las dosificaciones con aditivos, además se mueven dentro de un rango cercano de datos, por lo que no es concluyente una mejoría de los aditivos tradicionales versus los aditivos no tradicionales, por otro lado analizando los resultados en condición saturada y observando que la única dosificación que presenta resultado distinto de cero y la única que se logró ensayar luego de la saturación es la dosis 5, por esta razón la dosificación más efectiva es la dosificación con el aditivo tradicional Cal Viva , el cual es necesario para desencadenar la reacción puzolánica necesaria para el incremento de resistencia y estabilización de las propiedades de este suelo.

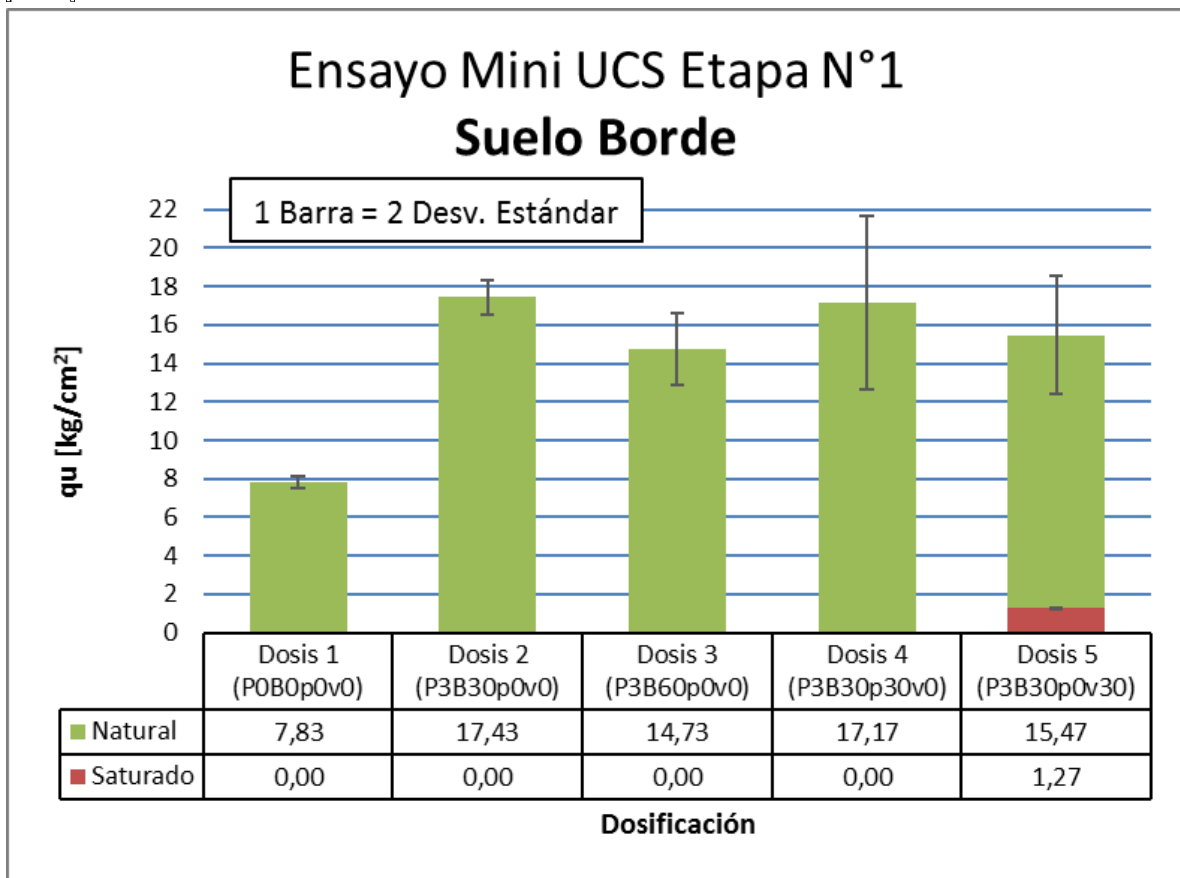


Figura 4-6: RESISTENCIA q_u [kg/cm²] vs. DOSIFICACIÓN PARA SUELO BORDE.

4.2.2. ANÁLISIS GLOBAL RESULTADOS ETAPA N°1

En términos generales, respecto de los resultados de del ensayo Mini UCS saturado y en vista de que no fue posible obtener resultados para las dosificaciones 1, 2 y 3, se confirma la necesidad de la presencia de un activador tradicional como la Cal Viva o el Cemento Portland, ya que sólo las dosificaciones con aditivos tradicionales presentan resultados en condición saturada. Sin embargo, la única dosificación que logra presentar resultados en esta condición en los tres suelos es la dosis 5 que contiene Cal Viva, por esta razón la dosis 5 es la más efectiva para la estabilización de este suelo según este ensayo para esta etapa.

Al realizar un análisis global de los resultados del ensayo Mini CBR Modificado, es evidente que el suelo que presenta los resultados más desfavorables es el Suelo MH o limo de alta plasticidad. Para definir el mejor uso para este suelo, es necesario recordar que dentro de la estructuración de las capas estructurales de un camino, la capa que debe tener la mayor resistencia es la carpeta de



rodado, seguido por la base y subbase que son capas de resistencia intermedia y finalmente la última capa e inferior es la subrasante que debe tener la menor resistencia de toda la estructura del camino, además hay que considerar que en su diseño que se debe presentar una gran diferencia de resistencia entre capas adyacentes del camino, debido a que esto puede ocasionar una indeseable concentración de esfuerzos que puede originar un deterioro en la estructura del camino. Por lo recién mencionado, se decide que el suelo MH es la mejor opción para ser utilizado como subrasante mejorada. Considerando el factor económico asociado, el objetivo es disminuir el uso de material granular en las capas superiores a la subrasante, por esta razón en la Etapa N°2 se proponen nuevas dosificaciones para conseguir un incremento de resistencia en esta capa que permita reducir el consumo de material granular de las capas adyacentes superiores. Para el caso de los otros dos suelos, el suelo ML y el suelo borde obtuvieron un comportamiento aceptable y notablemente superior que el suelo MH, por lo tanto, ambos se seleccionan como material para la elaboración de una base estabilizada y con un contenido de un 30% de agregado pétreo grueso. Este porcentaje ha funcionado con éxito en terreno, en proyectos realizados por la empresa de estabilización, como se menciona en la sección 3.5.2. Con respecto a las dosificaciones está claro que los mejores resultados fueron obtenidos por las dosis 4 y 5 que son las dosificaciones que contienen aditivos tradicionales, lo que verifica la necesidad de la presencia de un activador para que se genere la reacción puzolánica y el incremento de resistencia al igual que en el ensayo Mini UCS. Comparando el IMCM promedio obtenido por los tres suelos entre la dosis 4 y 5, con un valor de 30,77 y 36,99 respectivamente, el mejor comportamiento para todos los suelos a nivel global lo presenta la dosis 5 y complementado a lo anteriormente mencionado respecto del ensayo Mini UCS donde de igual forma la dosis 5 fue la mejor de todas.

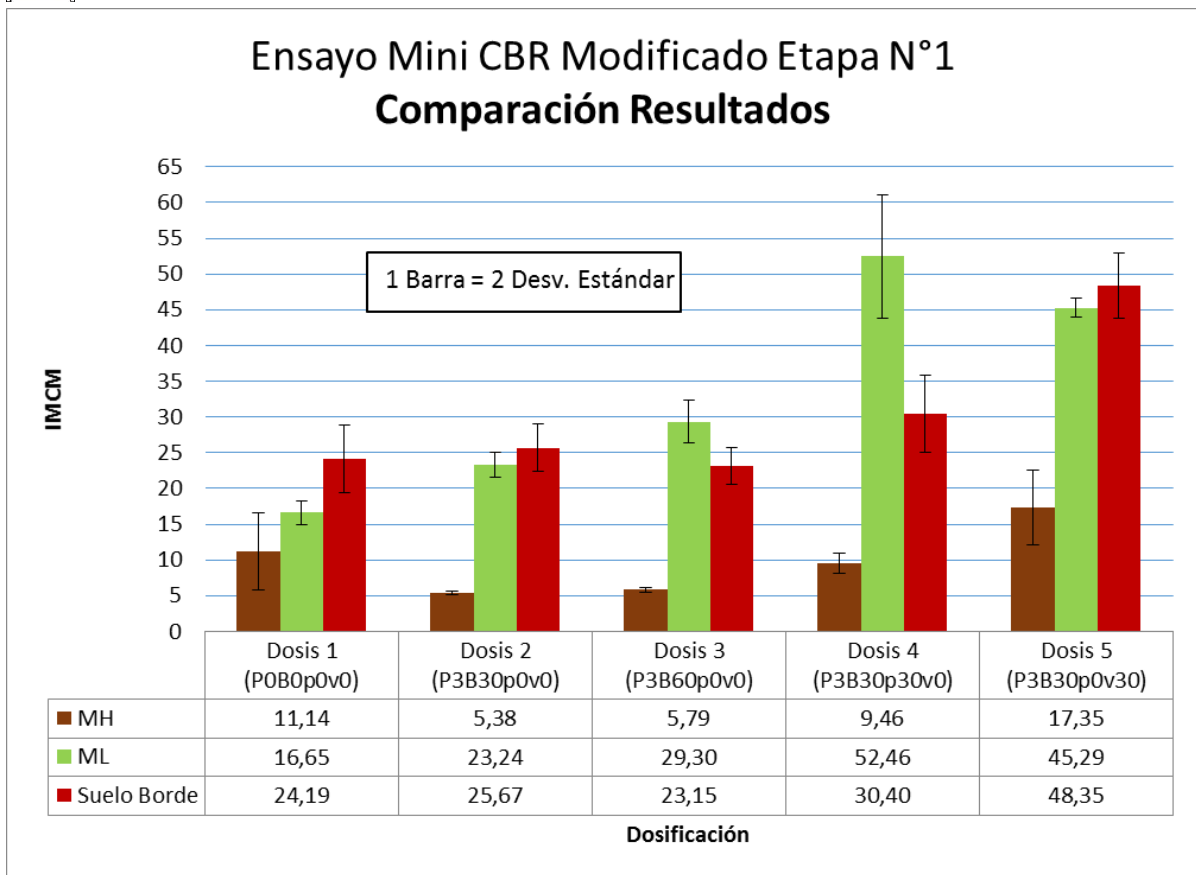


Figura 4-7: COMPARACIÓN DE IMCM POR SUELO ETAPA N°1.

Para validar estos resultados al tratarse de ensayos mecánicos no tradicionales es difícil tener una idea de que significa el IMCM para alguien que no está interiorizado en el tema, por esta razón es necesario realizar la transformación del IMCM a un valor estimado de CBR, para ello se cuenta con una expresión que fue formulada en la investigación previa mencionada anteriormente donde participó el autor de este documento como ayudante del trabajo experimental de laboratorio para su capacitación en este ensayo, la ecuación que correlaciona el valor de IMCM con un valor aproximado de CBR, se expresa a continuación (Riveros, 2016):

$$CBR_{aproximado} = 3 \cdot 10^{-6} \cdot IMCM^{4,2885}$$

Utilizando la ecuación para la transformación de los IMCM de los resultados obtenidos para estos suelos recién analizados a un valor de CBR aproximado, los resultados se presentan en la Tabla 4-5 que viene a continuación:



Tabla 4-5: VALORES DE CBR ESTIMADOS SEGÚN RESULTADO IMCM.

Tipo de Suelo	Dosis	IMCM	CBR Aprox.
Suelo MH	1 (P0B0p0v0)	11,14	0
	2 (P3B30p0v0)	5,38	0
	3 (P3B60p0v0)	5,79	0
	4 (P3B30p30v0)	9,46	0
	5 (P3B30p0v30)	17,35	1
Suelo ML	1 (P0B0p0v0)	16,65	1
	2 (P3B30p0v0)	23,24	2
	3 (P3B60p0v0)	29,30	6
	4 (P3B30p30v0)	52,46	71
	5 (P3B30p0v30)	45,29	38
Suelo Borde	1 (P0B0p0v0)	24,19	3
	2 (P3B30p0v0)	25,67	3
	3 (P3B60p0v0)	23,15	2
	4 (P3B30p30v0)	30,40	7
	5 (P3B30p0v30)	48,35	50

Luego de realizar la transformación de datos, se requiere una interpretación adecuada de los CBR, para esto se cuenta con la información contenida en la Tabla 4-6, que clasifica de forma cualitativa los rangos de valores de CBR entre 2 y 100 y recomienda un uso asociado a cada rango de datos dentro de las capas estructurales de un camino. De acuerdo a los valores de CBR del suelo MH la única dosis que presenta un valor distinto a cero es la dosis 5 con un CBR igual a 1, con esto ni siquiera entra en la categoría de “Muy mala”, por lo tanto, se verifica la necesidad de una estabilización química y su uso ideal como subrasante. En el caso del suelo borde, la dosis 5 que es la mejor dosificación para este suelo, se obtiene un CBR de 50 que lo clasifica dentro de la categoría cualitativa del suelo “Buena” y un uso asociado ideal de subbase, con un ajuste en la



dosificación se podría mejorar este valor y clasificar dentro de la categoría para su uso ideal como base. Finalmente, el suelo ML es el que presentó el mejor desempeño de los tres suelos, con la adición de los aditivos no tradicionales P y B en conjunto con los aditivos tradicionales Cemento Portland o Cal Viva como activadores, ya que en ambas dosis (4 y 5), se logran buenos resultados. El mejor valor para este suelo fue en la dosificación 4 con contenido de Cemento Portland, el que alcanzó un valor de CBR de 71, entrando en la categoría “buena” para su uso como base seguido por la dosificación con Cal Viva (dosis 4) que obtuvo un valor de CBR de 38, clasificándose como “bueno” para su uso como Subbase.

Tabla 4-6: CLASIFICACIÓN Y USO DE SUELO SEGÚN VALOR DE CBR, (Assis A., 1988).

CBR	Clasificación cualitativa del suelo	Uso
2 - 5	Muy mala	Sub-rasante
5 - 8	Mala	Sub-rasante
8 - 20	Regular – Buena	Sub-rasante
20 - 30	Excelente	Sub-rasante
30 - 60	Buena	Sub-base
60 - 80	Buena	Base
80 - 100	Excelente	Base

Considerando que uno de los objetivos principales de la estabilización es maximizar la resistencia del suelo ante diversas condiciones, y aprovechando que el ensayo Mini UCS evalúa tanto la condición natural como la condición más desfavorable o saturada, se puede utilizar el *Índice de Resistencia Retenida* del suelo (IRR), dicho factor establece una relación entre la resistencia Mini UCS saturada y la resistencia Mini UCS natural, la recomendación es que este factor sea el mayor posible y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$IRR(\%) = \frac{Mini\ UCS_{saturada}}{Mini\ UCS_{natural}} \cdot 100$$

Desarrollando esta expresión con los resultados obtenidos, se tiene que para el caso de los resultados en el suelo MH y suelo borde la única dosificación que arroja un IRR es la dosis 5 con un valor de 41,5% y 8,2% respectivamente. Ahora analizando el caso del suelo ML, en el cual la mayor resistencia se obtuvo para la dosis 4, se procede a calcular los valores de IRR para las dosis 4 y 5 en el suelo ML lo que arroja como resultado un valor de 79,1% y 84,25% respectivamente, lo que indica que a pesar de que la dosis 4 presenta una mayor resistencia, la dosis 5 al tener un mayor IRR que la dosis 4, nos indica que el mejor comportamiento en base a los objetivos de la estabilización lo presenta finalmente la dosis 5. Además, hay que considerar también que no sería



representativo realizar alguna comparación de resultados si se contara con mezclas con distintos aditivos tradicionales, ya que lo ideal en un trabajo experimental de laboratorio referido a la formulación de una dosificación efectiva en la estabilización mecánica de suelos es siempre ir variando la cantidad de solo un aditivo y dejar constante la cantidad de los otros para evaluar el efecto único de esa variación. También hay que tener presente que esta investigación es parte de un proyecto que tiene por objetivo final la construcción de CBVT productivos, por lo tanto, la utilización de diferentes aditivos tradicionales puede generar confusiones y errores en la construcción por parte de los obreros, considerando de que ya contiene variados aditivos. Generalmente los suelos finos cuando son mezclados con Cal presentan una disminución en su plasticidad, lo que mejora su trabajabilidad y se reduce la susceptibilidad a cambios de volumen. Por su parte el aditivo líquido no tradicional P, según el estudio *Evaluación de Aditivos Químicos como Estabilizadores Volumétricos de un Suelo Expansivo de la Región Metropolitana* (Delarze, 2015), es efectivo como estabilizador volumétrico de suelos finos, por lo tanto, colabora a la reducción de la susceptibilidad a cambios de volumen generada por la Cal. Finalmente se elige la dosis 5, con un contenido de Cal Viva de $30 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ de suelo a estabilizar y una concentración de aditivo líquido P de $0,3 \text{ [lt/m}^3\text{]}$. Como ya se mencionó estas cantidades serán constantes, lo que se busca ajustar es el contenido de aditivo no tradicional B, para ello se proponen cuatro dosificaciones con distinto contenido de este aditivo, cantidades que van desde los $30 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ a los $60 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, las cuales, varían $10 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ de dosis en dosis, además una dosificación 1 sin aditivos para evaluar el incremento de resistencia.



4.3. RESULTADOS Y ANÁLISIS ETAPA N°2

Esta etapa se divide en dos partes. La Etapa N°2.A se refiere al análisis de los resultados del suelo MH y la evaluación de un posible mejoramiento de subrasante para este suelo y la Etapa 2.B al análisis de resultados de los suelos ML y suelo borde, propuestos como posible material para la elaboración de una base granular con un potencial uso como carpeta de rodado, base y/o subbase. Las dosificaciones utilizadas en esta etapa se presentan a continuación en la Tabla 4-6:

Tabla 4-7: DOSIFICACIONES DE ADITIVOS ETAPA N°2.

		NOMENCLATURA	ADITIVO QUÍMICO LÍQUIDO P(lt/m ³)	ADITIVO B (kg/m ³)	Cal Viva v(kg/m ³)
DOSIS	1	P0B0v0	0	0	0
	2	P3B30v30	0,3	30	30
	3	P3B40v30	0,3	40	30
	4	P3B50v30	0,3	50	30
	5	P3B60v30	0,3	60	30

4.3.1. ETAPA N°2.A ANÁLISIS DE RESULTADOS MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE

En esta sección se presenta un resumen del análisis realizado en esta investigación, respecto del potencial mejoramiento de subrasante en el suelo MH con las dosificaciones propuestas en la Etapa N°1 y se exponen los resultados del ensayo Mini CBR Modificado y Mini UCS para suelo natural y saturado.

4.3.1.1. ANÁLISIS RESULTADOS ENSAYO MINI CBR MODIFICADO - SUELO MH

Es posible realizar una comparación de resultados de IMCM obtenidos entre la Etapa N°1 y Etapa N°2.A, ya que hay dos dosificaciones que se repiten en ambas etapas, como es el caso de la dosis sin aditivos o dosis 1, también se repite la dosis 5 de la Etapa N°1 que es la misma que la dosis 2 de la Etapa N°2.A, el objetivo de repetir estas dosificaciones en esta etapa es asegurar una mayor representatividad de datos, ya que es posible que exista una variabilidad en la composición y comportamiento de estos suelos a pesar de tratarse de un suelo del mismo tipo y origen, esto ocurre debido a que fue necesario realizar una nueva solicitud de este suelo porque la cantidad recibida un principio no fue suficiente para abarcar las siguientes etapas. Realizando la comparación de los resultados IMCM para la dosis 1 del suelo MH, se observa que el valor de IMCM de la Etapa N°2.A de 32,88 es casi 3 veces superior al valor de IMCM en la Etapa N°1 con un



Capítulo 4: “Análisis de Resultados”

valor de 11,14. Ahora comparando el IMCM de la dosis P3B30p0v30 de la Etapa N°1 con un valor de 17,35 con respecto a la dosis P3B30v30 de la Etapa N°2.A de un valor de 36,26 se observa que existe un incremento superior al doble de su valor, lo que confirma que los valores siguen la misma tendencia que para el caso de la dosis 1.

Según los resultados obtenidos de IMCM se aprecia que existe un aumento de la resistencia conforme a un aumento en el aditivo no tradicional B, lo cual es positivo siempre, en las dosis 3, 4 y 5 el valor de resistencia es similar ya que se encuentra en un rango muy cercano de datos, a pesar de aquello el mejor resultado según los criterios definidos en un inicio, es la dosis 5 que posee un mayor consumo de aditivo no tradicional (residuo industrial).

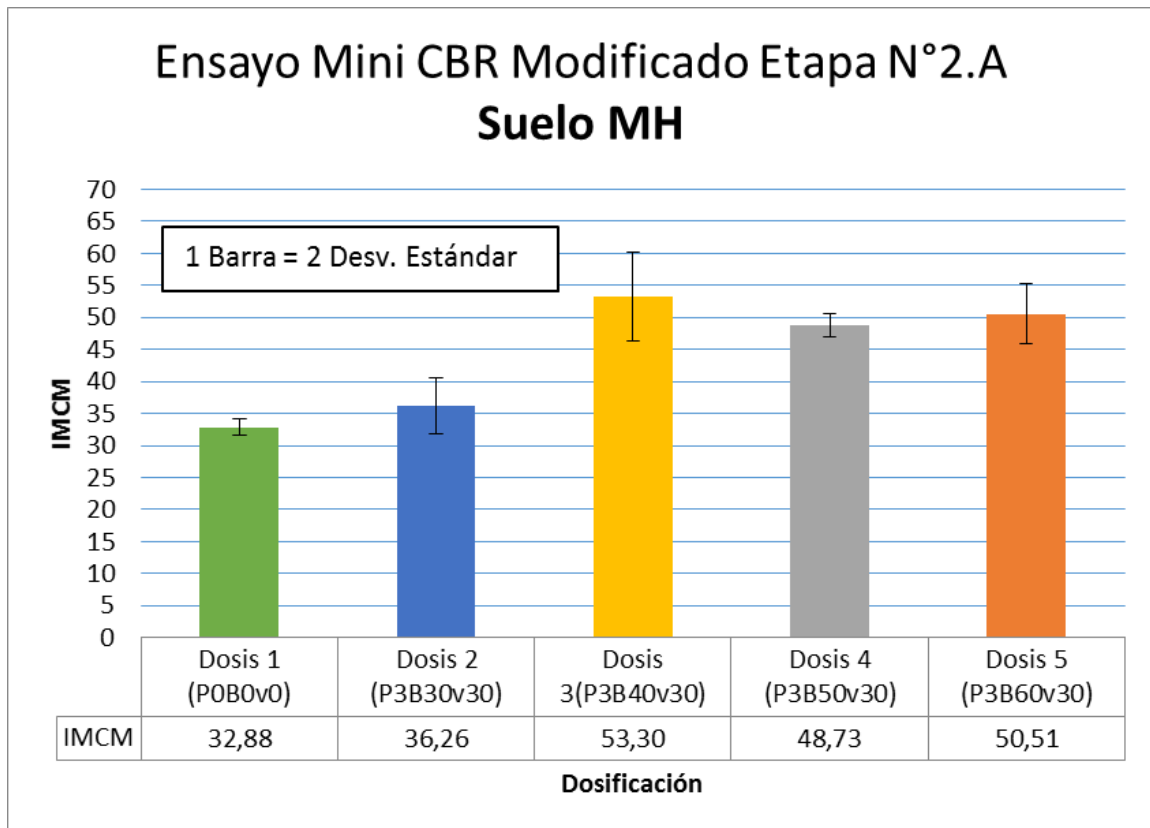


Figura 4-8: IMCM VS. SUELO MH ETAPA N°2.A.



Tabla 4-8: RESULTADOS ENSAYO MINI CBR PARA SUELO MH.

Tipo de Suelo	Dosis	IMCM			Promedio	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación
		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3			
Suelo MH	Dosis 1	32,49	34,36	31,79	32,88	1,327	0,040
	Dosis 2	40,65	31,86	36,27	36,26	4,396	0,121
	Dosis 3	49,11	61,24	49,56	53,30	6,878	0,129
	Dosis 4	47,05	48,43	50,70	48,73	1,842	0,038
	Dosis 5	45,23	54,05	52,26	50,51	4,662	0,092

4.3.1.2. ANÁLISIS RESULTADOS ENSAYO MINI UCS - SUELO MH

Si se hace el mismo ejercicio que para los IMCM de comparar resultados, pero esta vez con el ensayo Mini UCS, se puede observar que también hay un incremento de resistencia en la dosis P3B3v30 de la Etapa N°2. A respecto de la Etapa N°1 con un valor de 4,5 a 5,5 [kg/cm²] en el caso de las probetas en condición natural y para el caso saturado se aprecia el incremento es de un valor de 1,87 a 2,5 [kg/cm²], también si se calcula el IRR se evidencia un incremento de un 41,5% a un 45,5%. Con esto se verifica la existencia de la variabilidad de resultados y comportamiento entre muestras lo que puede ser ocasionado por múltiples factores como, tener un origen geográfico diferente, ya que los procesos físico químicos de los suelos pueden ser variables según su ubicación lo que puede afectar a la composición y comportamiento del mismo, también es posible que afecte en cierto grado el comportamiento del suelo, factores como las condiciones climáticas existentes en el día de la elaboración y ensayo de las probetas, la compactación y el mezclado de las muestras. De todas formas, lo que realmente importa en este análisis es la evaluación del comportamiento del aumento de la concentración de aditivo B, por lo tanto, es más útil analizar el comportamiento de los resultados dentro de la misma Etapa N°2 obviando la presencia de los resultados de la Etapa N°1.

De acuerdo con estos resultados, según la condición natural se aprecia un leve incremento de resistencia mientras se va aumentando la cantidad de aditivo B obteniéndose el mejor resultado en la dosis 5, el cual presenta una baja variabilidad según su desviación estándar. También es satisfactorio observar que esta vez sí se logró obtener resultados en todas las dosificaciones excepto la que no contiene aditivos (destruida en el proceso de saturación), con valores muy cercanos entre todas las dosificaciones, de igual manera la dosis 5 presenta el valor más elevado



Capítulo 4: “Análisis de Resultados”

en su condición saturada, lo que es una buena señal ya que lo ideal como ya fue mencionado anteriormente es maximizar el consumo del aditivo B. Los valores de resistencia retenida IRR que presentan las mezclas luego de su condición de saturación va desde un 0% para la dosis 1 a un 41% para la dosis 5 lo que confirma una reducción en la susceptibilidad volumétrica relacionado a las variaciones de humedad en el suelo.

Se consideran satisfactorios los resultados de todas las dosificaciones con aditivos, pero reiterando la necesidad de aumentar el consumo de aditivo B, la dosis 5 es la que presenta el mejor comportamiento según este ensayo, lo que ocurre de forma similar en el caso del ensayo Mini CBR Modificado, donde se observó resultados de resistencia similares en todas las dosificaciones, pero el mejor desempeño se logra en las muestras estabilizadas con la dosis 5 por su mayor consumo de aditivo B. En conclusión, se elige para la Etapa N°3.A la dosis 5 (P3B60v30), es decir, la correspondiente a 0,3 [lt/m³] de aditivo líquido L, 30 [kg/m³] de Cal Viva y 60 [kg/m³] de aditivo sólido B.

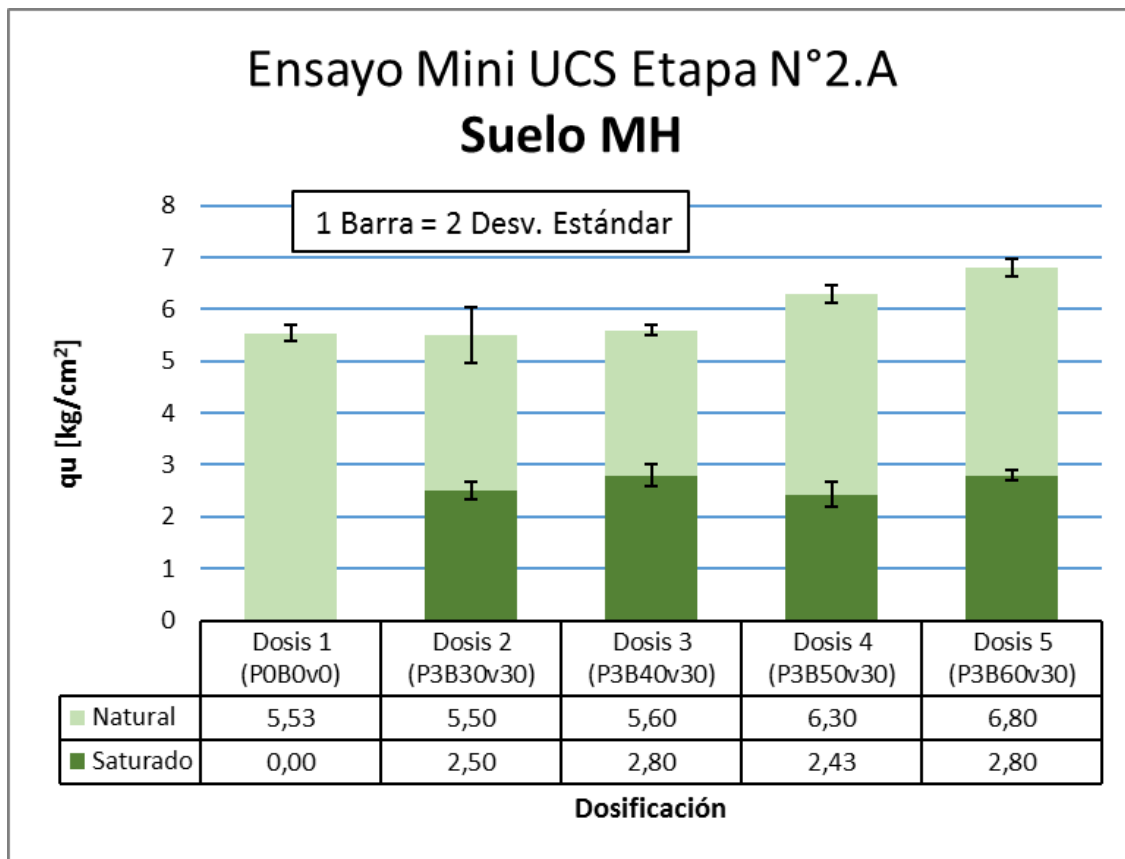


Figura 4-9: RESISTENCIA q_u [kg/cm²] vs. DOSIFICACIÓN PARA SUELO MH.



4.3.2. ETAPA N°2.B ANÁLISIS DE RESULTADOS MEJORAMIENTO DE BASE GRANULAR

En esta sección se presenta un resumen del análisis realizado en esta investigación, respecto del mejoramiento de las propiedades de los suelos ML y suelo borde para su potencial uso como carpeta de rodado, base y/o subbase, con las dosificaciones propuestas en la Etapa N°1 y se exponen los resultados del ensayo Mini CBR Modificado y Mini UCS para suelo natural y saturado.

4.3.2.1. ANÁLISIS RESULTADOS ENSAYO MINI CBR MODIFICADO - SUELO ML

Luego de comparar los resultados de IMCM obtenidos en la Etapa N°1 versus los resultados de la Etapa N°2.B para el suelo ML, se comprueba que los valores son concordantes, ya que poseen valores similares. En la dosis 1 se obtuvo un IMCM de 16,65 en la Etapa N°1 y un valor de 17,77 en la Etapa N°2.B, luego para el caso de la dosis P3B30v30 ocurre lo casi lo mismo con valores de IMCM de 45,29 y 48,58 en la Etapa N°1 y Etapa N°2.B respectivamente, en ambos casos o dosificaciones la diferencia de valores de la Etapa N°1 respecto a la Etapa N°2.B es aproximadamente un 6,5% menor, lo que se considera una diferencia no considerable, por lo tanto, los resultados son coherentes.

En las cuatro dosificaciones con aditivos se observa un incremento de resistencia evidente, y el valor más elevado de resistencia lo presenta la dosis 4 con un valor de IMCM de 58,40 , seguido por la dosis 5 con un valor de 53,51, sin embargo la dosis 5 posee una desviación estándar con un valor que duplica al de la dosis 4, lo que confirma que la dosis 4 es la que mejor se comporta en este ensayo ya que supera en un 228% el valor obtenido en el suelo sin aditivos, esto se considera un excelente resultado. De todas formas, las cuatro dosificaciones con aditivos presentan resultados aceptables.

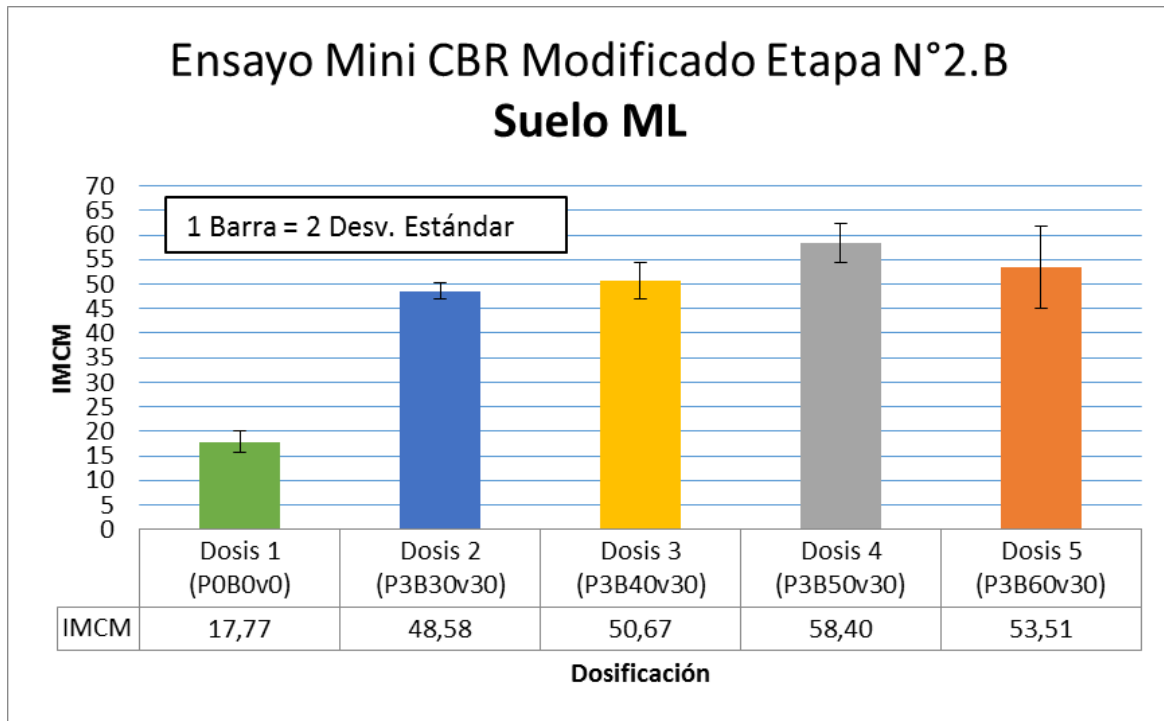


Figura 4-10: IMCM VS. SUELO ML ETAPA N°2.B.

Tabla 4-9: RESULTADOS ENSAYO MINI CBR MODIFICADO PARA SUELO ML.

Tipo de Suelo	Dosis	IMCM			Promedio	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación
		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3			
Suelo ML	Dosis 1	16,41	16,64	20,27	17,77	2,168	0,122
	Dosis 2	50,23	47,04	48,48	48,58	1,597	0,033
	Dosis 3	50,69	46,82	54,50	50,67	3,839	0,076
	Dosis 4	54,29	58,78	62,14	58,40	3,938	0,067
	Dosis 5	46,15	62,56	51,82	53,51	8,335	0,156

4.3.2.2. ANÁLISIS RESULTADOS ENSAYO MINI UCS - SUELO ML

De igual forma que en el ensayo anterior la resistencia más elevada en la condición natural la presenta la dosis 4 y 5 que poseen el mismo valor de resistencia de 2,67 [kg/cm²], seguidos por la dosis 3 con un valor cercano de 2,6 [kg/cm²] continuado por la dosis 2 con un valor de 2,27[kg/cm²]. Ahora para la condición saturada la dosis 2 es la que presenta el mejor comportamiento con un valor de 2 [kg/cm²] y con un IRR asociado de un 88%. No obstante, en este ensayo los resultados son similares y aceptables en todas las dosificaciones con aditivos en



ambas condiciones natural y saturada, por lo que no se considera una ventaja considerable de ninguna dosificación entre otra para este ensayo. Por lo tanto, y considerando que el mejor resultado y con mayor resistencia en el ensayo Mini CBR Modificado fue el obtenido por la dosis 4, se determina que la mejor dosificación según los resultados de ambos ensayos es la dosis 4.

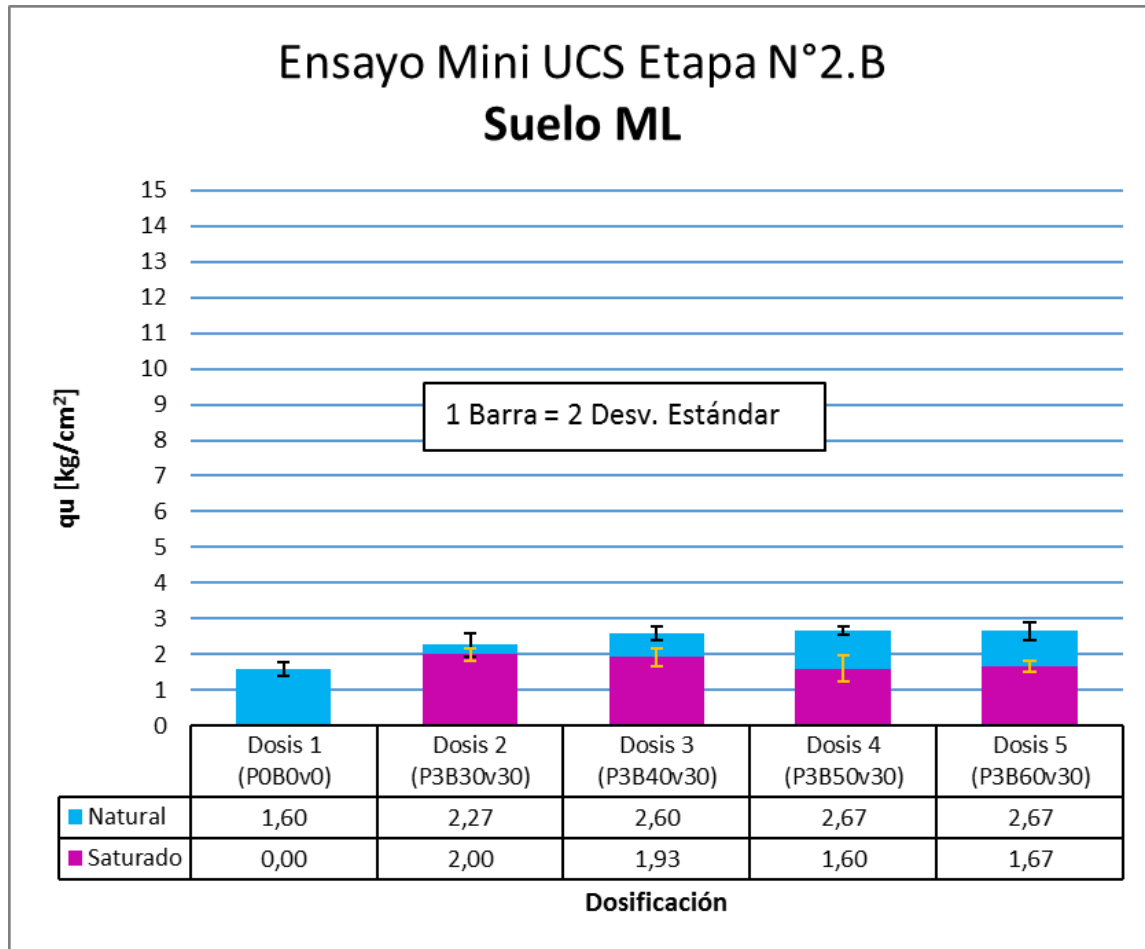


Figura 4-11: RESISTENCIA q_u [kg/cm²] vs. DOSIFICACIÓN PARA SUELO ML.

4.3.2.3. ANÁLISIS RESULTADOS ENSAYO MINI CBR MODIFICADO - SUELO BORDE

Según los resultados contenido en la gráfica de la Figura 4-11, es apreciable que los resultados de en las dosificaciones 3, 4 y 5 son relativamente constantes, obteniendo su máximo valor en la



Capítulo 4: “Análisis de Resultados”

dosis 3 con un IMCM de 39,87, seguido muy cerca por la dosis 4 con un valor de 38,97 de IMCM y en tercer lugar se posiciona la dosis 5 con un IMCM de 38. Sin embargo, ninguno de estos valores supera el máximo valor obtenido en la Etapa N°1, ya que su valor de IMCM fue de un 48,4 para la dosis P3B30v30, por otro lado, esta dosificación en la Etapa N°2.B presenta una disminución de un 50% respecto a su análogo en la Etapa N°1, y la dosis 1 sin aditivos una reducción de un 30% respecto a su análogo de la etapa anterior. Esto indica que es muy probable que la muestra de suelo utilizada en la Etapa N°2.B presente peores propiedades que la muestra de la etapa inicial. Lo que sí es indiscutible es que la dosis 4 es la que presenta el coeficiente de variación más bajo de todas las dosificaciones con un valor de tan solo 0,053, por esta razón esta dosificación es la que presenta la muestra más homogénea de datos, por lo tanto, es la más representativa para este suelo en este ensayo.

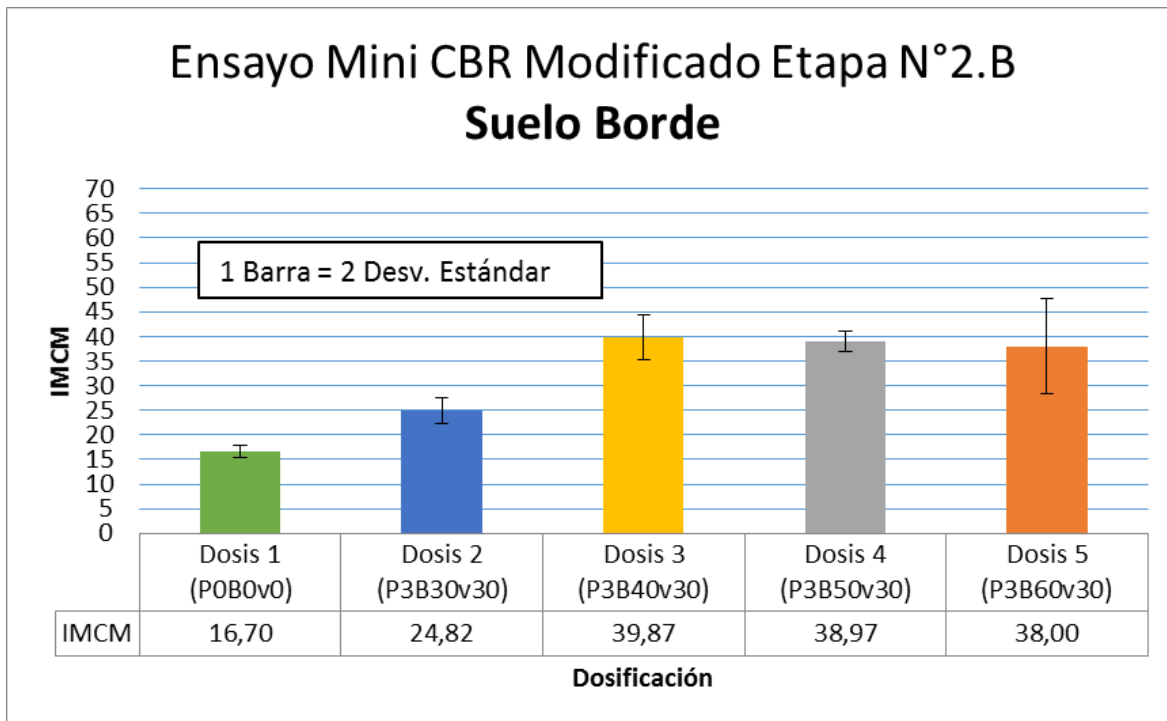


Figura 4-12: ÍNDICE MINI-CBR MODIFICADO SUELO BORDE ETAPA N°2.B.



Tabla 4-10: RESULTADOS ENSAYO MINI CBR MODIFICADO PARA SUELO BORDE.

Tipo de Suelo	Dosis	IMCM			Promedio	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación
		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3			
Suelo Borde	Dosis 1	17,71	15,41	16,96	16,70	1,173	0,070
	Dosis 2	24,09	22,67	27,72	24,82	2,602	0,105
	Dosis 3	44,76	36,03	38,81	39,87	4,458	0,112
	Dosis 4	41,33	38,13	37,44	38,97	2,075	0,053
	Dosis 5	49,10	32,58	32,33	38,00	9,609	0,253

4.3.2.4. ANÁLISIS RESULTADOS ENSAYO MINI UCS - SUELO BORDE

Sobre los resultados del ensayo Mini UCS en estado natural para el suelo borde se observa que los mejores valores se obtuvieron en las dosis 2 y 3 con valores de q_u de 14,07 [kg/cm²] y 14,23 [kg/cm²] respectivamente, no obstante los valores de resistencia retenida incrementan de un 15 a un 24% mediante el aumento del contenido de aditivo B, con respecto de la dosis 3 que es la que presenta los mejores resultados de IMCM y de resistencia para el ensayo Mini UCS en condición natural, se descarta como posible mejor opción debido a su baja resistencia retenida de tan solo un 13%, además de que es necesario incentivar el uso de aditivo B e idealmente ocupar la mayor cantidad posible del mismo, acorde a esto la decisión se debe tomar entre la dosis 4 que presenta un IRR de un 22% y la dosis 5 con un IRR de un 24%, los valores de resistencia retenida en ambas dosis son similares, una diferencia de 2% no es significativa por lo que la elección podría ser cualquiera de los dos, pero considerando que entre estas dos dosificaciones la dosis 4 supera el valor de la resistencia en la condición natural y saturada, por lo tanto, la dosis 4 sería la más conveniente para este suelo.

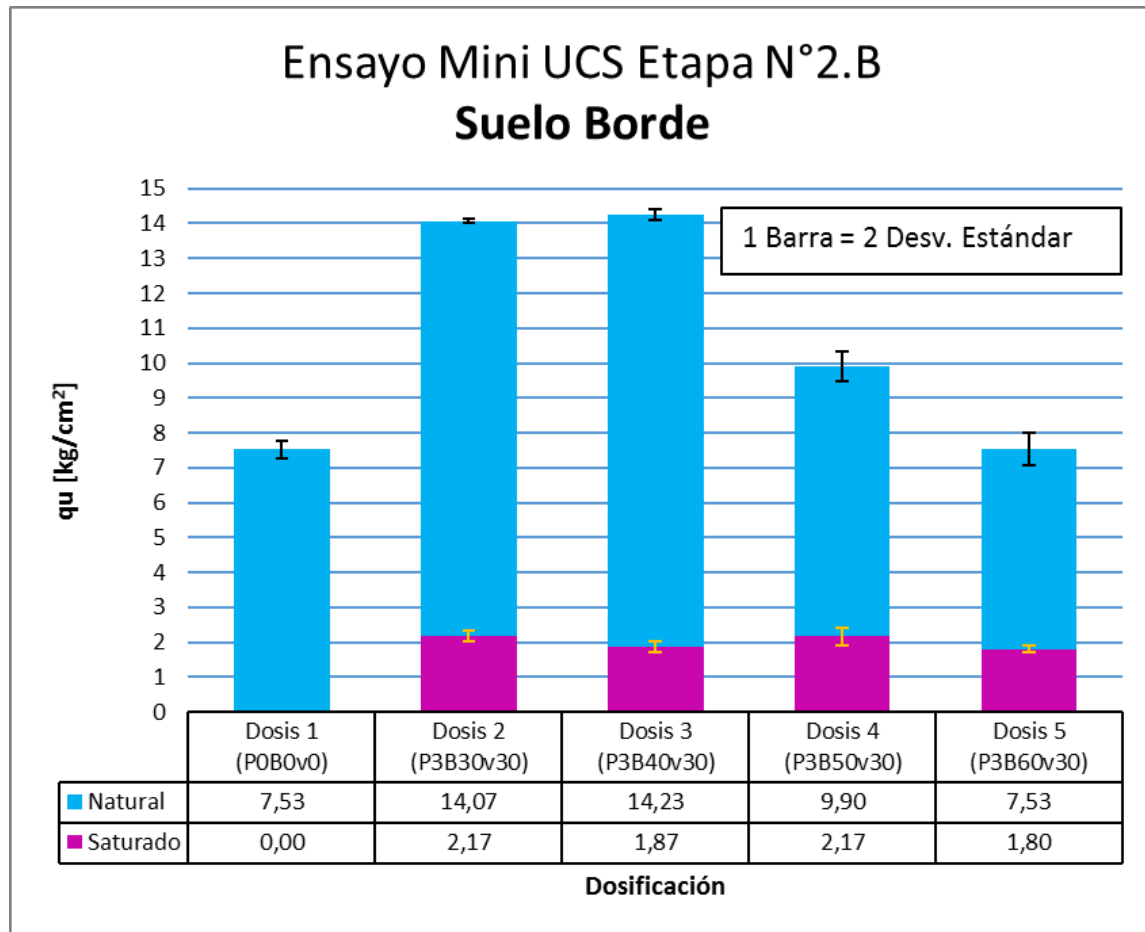


Figura 4-13: RESISTENCIA q_u [kg/cm²] vs. DOSIFICACIÓN PARA SUELO BORDE.

4.3.3. ANÁLISIS GLOBAL DE RESULTADOS ETAPA N°2

Al realizar un análisis global de los datos considerando los resultados de IMCM en ambos suelos propuestos como material para la elaboración de una base granular estabilizada, se aprecia que el IMCM promedio entre ambos suelos para cada una de las dosis presenta su valor más elevado en la dosis 4 con un IMCM promedio de 48,7 seguido por la dosis 5 con un IMCM promedio de 45,8, lo que finalmente es concluyente para seleccionar a la dosis 4 como la dosis óptima para la estabilización de ambos suelos para su uso como material de una base granular. De todas maneras, se espera que la resistencia y estabilidad aumente con la incorporación de un 30% de agregado pétreo. En conclusión, se elige la dosis 4 correspondiente a un contenido de 0,3 [lt/m³] de aditivo líquido P, 30 [kg/m³] de Cal Viva como aditivo tradicional y 50 [kg/m³] de aditivo sólido no tradicional B, con la adicción de un 30% de agregado pétreo en relación de volumen se define una relación volumétrica en el contenido de agregado pétreo para estas dosificaciones ya que en la práctica es más facial de realizar en terreno, ya que solo se necesita un contenedor donde



verter el material para realizar esta relación de lo contrario si la relación fuera en porcentaje de peso sería más complicado debido a la necesidad de una pesa lo que es difícil de transportar y utilizar en terreno.

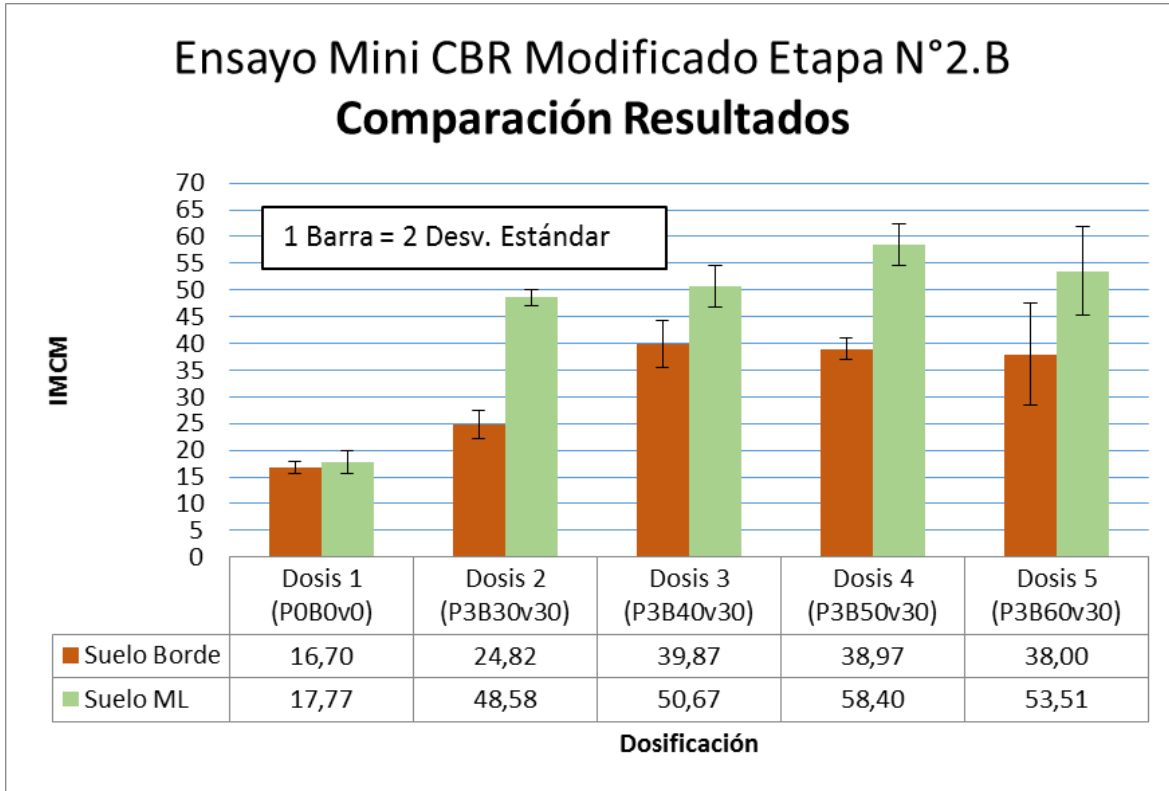


Figura 4-14: COMPARACIÓN RESULTADOS ENSAYO MINI CBR MODIFICADO ETAPA N°2.B.

4.4. RESULTADOS Y ANÁLISIS ETAPA N°3

Las dosificaciones utilizadas en esta etapa, que fueron formuladas en la Etapa N°2 se presentan en la Tabla 4-11 y 4-12, las cuales se utilizarán en las Etapas N°3.A y N°3.B respectivamente, se presentan enseguida:

Tabla 4-11: DOSIFICACIONES DE ADITIVOS ETAPA N°3.A.

		NOMENCLATURA	ADITIVO QUÍMICO LÍQUIDO P(lt/m3)	ADITIVO B (kg/m3)	Cal Viva v(kg/m3)
DOSIS	NATURAL	POB0v0	0	0	0
	ÓPTIMA	P3B60v30	0,3	60	30



Tabla 4-12: DOSIFICACIONES DE ADITIVOS ETAPA N°3.B.

		NOMENCLATURA	ADITIVO QUÍMICO LÍQUIDO P (lt/m ³)	ADITIVO B (kg/m ³)	Cal Viva v(kg/m ³)
DOSIS	NATURAL + 30% AGREGADO PÉTREO	P0B0v0(A30)	0	0	0
	ÓPTIMA + 30% AGREGADO PÉTREO	P3B50v30(A30)	0,3	50	30

En esta etapa se presentan los resultados de los ensayos mecánicos tradicionales correspondientes a los ensayos CBR, MrTx y UCS realizados en los suelos con las dosificaciones recién mencionadas, correspondiente a la dosis 5 propuesta para el mejoramiento de subrasante y a la dosis 4 formulada para estabilizar este material fino propuesto como material de una base granular con un 30% de agregado pétreo. Las probetas triaxiales para el ensayo MrTx fueron ensayadas para los tiempos de curado de 7, 14 y 28 días, cabe destacar que para el ensayo UCS se utilizaron las mismas probetas luego de ser ensayadas a los 28 días es decir el tiempo de reacción para el ensayo UCS fue de 29 días.

4.4.1. ETAPA N°3.A ANÁLISIS DE RESULTADOS SUBRASANTE ESTABILIZADA

4.4.1.1. ANÁLISIS RESULTADOS ENSAYO RAZÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA CBR

Se exponen los resultados del ensayo CBR realizado en sobre la muestra de suelo MH sin aditivos p0B0v0 y la muestra de suelo MH estabilizado con dosis óptima P3B60v30. Para el caso de la muestra estabilizada se consideró un tiempo de reacción de 7 días para favorecer la reacción entre aditivos y se logren incrementos de resistencia, ya que el tiempo de reacción es clave en el incremento de resistencia, ya que si este no se hubiese considerado los valores de CBR deberían ser cercanos. Al igual que en toda esta investigación se consideran 3 repeticiones en este ensayo para que los resultados posean una mayor validez apoyada en la repetitividad de resultados. Se observa que, para el caso de muestra sin aditivos, que el valor de CBR obtenido de 23 corresponde a una clasificación de “Regular-Buena” para su uso como subrasante, lo que es muy positivo considerando que no existe estabilización química. En el caso de la muestra con dosis óptima el incremento de resistencia es superior en un 200% respecto a la dosis natural con un valor de CBR de 50,33 valor que entra en la clasificación de “Buena” para un uso de subbase, lo que es un resultado bastante satisfactorio ya que se esperaba que solamente se incrementará su resistencia



Capítulo 4: “Análisis de Resultados”

para un buen uso como subrasante. Considerando esto gracias a la estabilización incluso se podría utilizar este suelo como una buena subbase, además hay que considerar que el tiempo de reacción de estos ensayos solo fue de 7 días, lo que significa que con el transcurso del tiempo es bastante probable que estos resultados aumenten y se logre un mejor resultado, lo que es bienvenido ya que, mientras más aumente la resistencia serán menores los espesores requeridos en las capas adyacentes superiores a la subrasante, lo que significa un menor consumo de material granular, lo que se traduce un menor costo. La desviación estándar en estos resultados es baja lo que da una mayor seguridad en la representatividad de los datos.

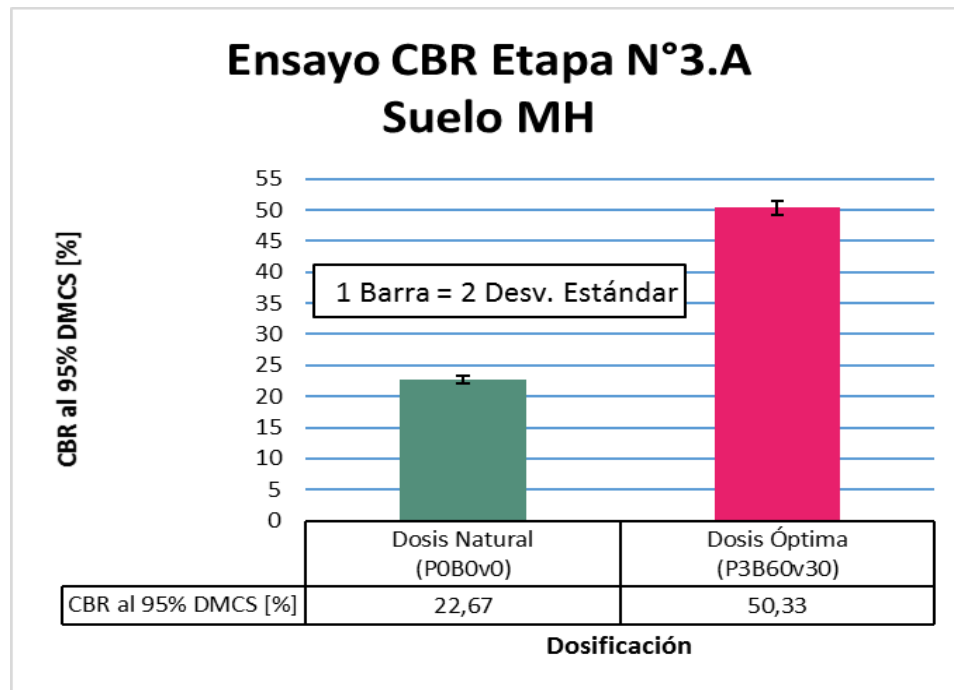


Figura 4-15: CBR AL 95% DMCS [%] VS. DOSIFICACIÓN PARA SUELO MH.

Tabla 4-13: RESULTADOS ENSAYO CBR PARA SUELO MH.

CBR al 95% DMCS			
Suelo MH	Repetición	Dosis	
		POB0v0	P3B60v30
	1	23	49
	2	22	51
	3	23	51
	Promedio	22,67	50,33
	Desv. Estándar	0,58	1,15



4.4.1.2. ANÁLISIS RESULTADOS ENSAYO MÓDULO RESILIENTE TRIAXIAL MrTx

Las deformaciones resilientes o elásticas son de recuperación instantánea y suelen denominarse plásticas a aquellas que permanecen en el camino después de cesar la carga que provoca deformación. Bajo carga móvil la deformación permanente se va acumulando, debe hacerse notar el hecho de que en ciclos intermedios la deformación permanente para cada ciclo disminuye, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales. La muestra llega así a un estado tal en que toda la deformación es recuperable, en ese momento se tiene un comportamiento resiliente. De aquí se desprende el concepto de módulo de resiliente, el cual está definido como el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión triaxial entre la deformación axial recuperable.

Los resultados de MrTx presentados a continuación se obtienen luego del cálculo del promedio obtenido en los 15 estados de carga a los que se sometió cada probeta por ensayo. El fin de este ensayo es conocer el comportamiento de los suelos estabilizados, a las edades de 7, 14 y 28 días para determinar y cuantificar su respuesta lineal elástica. De los resultados obtenidos se puede apreciar claramente que existe un incremento de la respuesta conforme pasa el tiempo. Para el caso de la dosificación sin aditivos se visualiza un incremento del módulo resiliente triaxial de 183,45 [MPa] a 220 [MPa] y para la dosis óptima un aumento de 257,74 [MPa] a 310 [MPa], en ambos casos luego de 21 días (comparando el resultado a los 7 y 28 días), este comportamiento e incremento con el tiempo era el esperado para este ensayo. Sin embargo, hay que considerar que se realiza una sola repetición en la dosificación sin aditivos (suelo natural), lo que científicamente no es representativo, pero el ensayo MrTx en sí, posee una baja variabilidad lo que compensa que se realice solo una repetición para suelo natural. Por otro lado, el objetivo de realizar este ensayo es tener una idea del rango de módulos con los que se está trabajando. El rango de valores de MrTx que es considerado para una base granular de buena calidad fluctúa entre 250-350 [MPa], lo que posiciona al suelo MH con dosis óptima dentro de la clasificación de base granular de buena calidad para los tres tiempos de reacción analizados, ya que en estos tres casos los valores MrTx son superiores a 250[MPa] y solo en la dosis natural a los 28 días se sobre pasa este valor, sin embargo, esto no es suficiente para definir el suelo sin aditivo como una base granular de buena calidad.

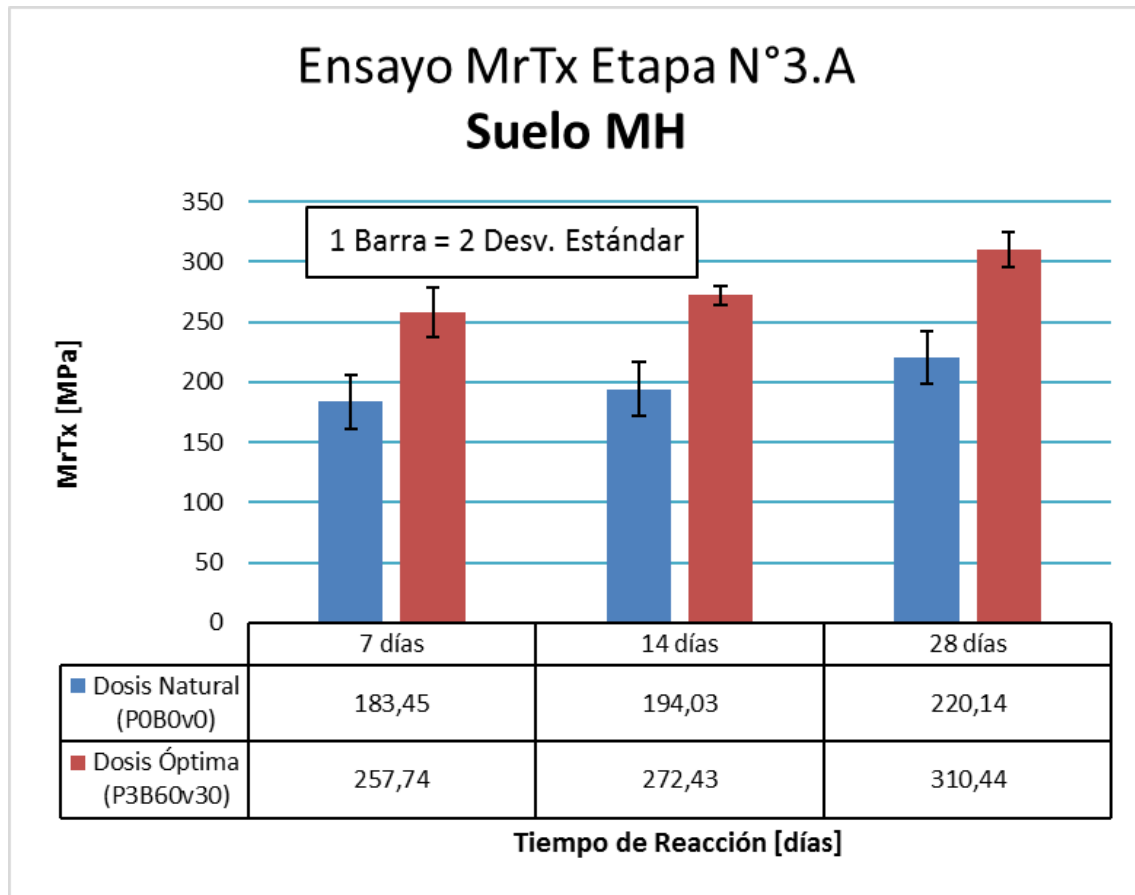


Figura 4-16: MrTx [MPa] vs. TIEMPO DE REACCIÓN [días] PARA SUELO MH.

4.4.1.3. ANÁLISIS RESULTADOS ENSAYO RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA UCS

Se presentan los resultados del ensayo UCS en la subrasante estabilizada con dosis óptima, en condiciones natural y saturada. Como era de esperarse la resistencia para el suelo natural es mayor a la resistencia en condición saturada, este comportamiento se cumple en la mayoría de las ocasiones, sin embargo, en algunas oportunidades nos es posible ni si quiera ensayar la probeta saturada, debido a que se destruye en el proceso de saturación. Se tiene que el valor de resistencia a la compresión no confinada UCS, obtenido para el suelo MH con dosis óptima en condición natural es de 1354 [KPa] y en condición saturada de 586 [Kpa], lo que arroja un IRR de un 43% que es considerado aceptable. En el caso de un material granular para carpeta de rodado el UCS mínimo en condición saturada, debe ser de 700-1000 [KPa], lo cual corresponde a la presión que ejerce el neumático sobre la superficie del camino, por lo tanto, se comprueba que esta dosificación no es utilizable como carpeta de rodado.

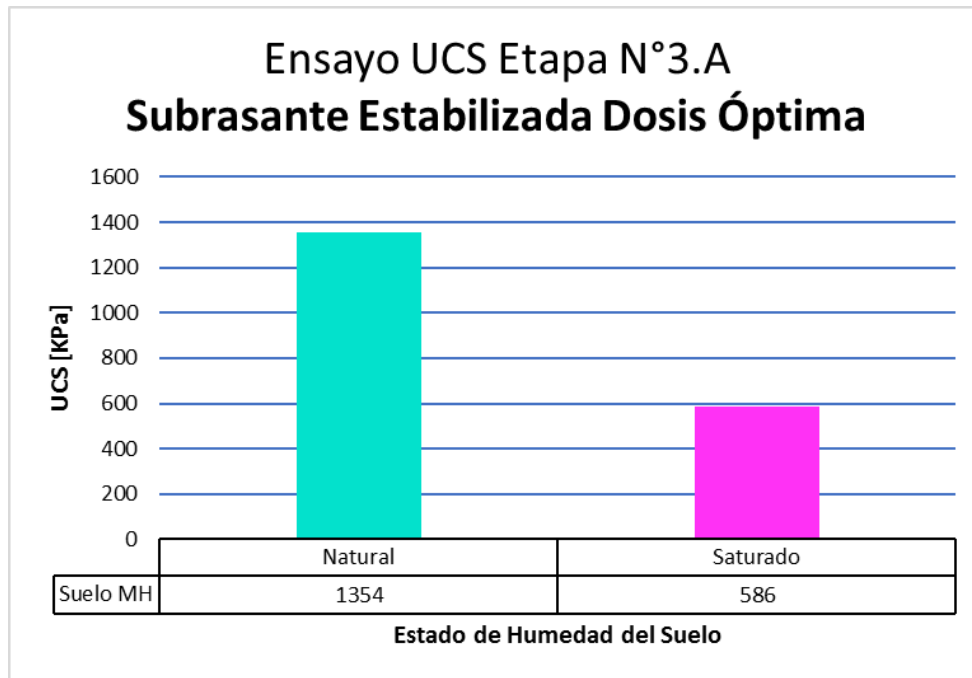


Figura 4-17: ENSAYO UCS PARA SUELO MH ESTABILIZADO QUÍMICAMENTE CON DOSIS ÓPTIMA.

Para finalizar, se puede decir que la estabilización química de las propiedades mecánicas de los suelos con potencial uso para subrasante, propuesta en esta investigación, utilizando aditivos no tradicionales en conjunto con los aditivos clásicos como la Cal Viva y el Cemento Portland, permite utilizar un menor espesor (Figura 5-1) en la carpeta de rodado, reduciendo los consumos y costos de los aditivos y áridos utilizados, también disminuyendo la necesidad del transporte de grandes cantidades de áridos, lo que significa una gran ventaja en términos económicos y de tiempo requerido para la construcción de caminos de bajo volumen de tránsito.

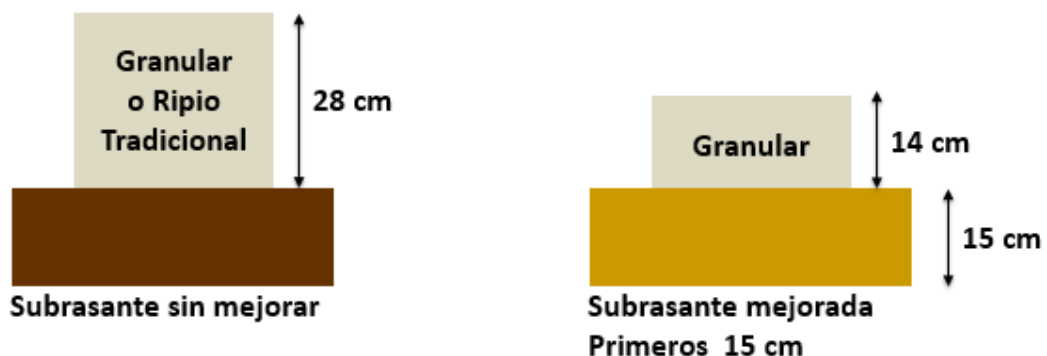


Figura 4-18: REDUCCIÓN DE ESPESOR BASE GRANULAR, SUELO SM, ARENA LIMOSA. (Fuente: Informe de Viabilidad Técnica para la utilización de la estabilización química con aditivos no tradicionales, empresa anónima).



4.4.2. ETAPA N°3.B ANÁLISIS DE RESULTADOS BASE GRANULAR ESTABILIZADA

Para comenzar, se presentan los resultados del ensayo Proctor Modificado realizado a las mezclas de suelo con un contenido de 30% de material granular. La motivación para re calcular este valor recae en que, con la adición de agregados, la granulometría de este suelo se modifica, lo que genera una variación en la DMCS y por consiguiente también la humedad óptima, además es posible que se modifique la clasificación USCS del suelo, estos resultados se presentan a continuación:

- **Suelo ML + 30% Agregado Pétreo:**

1. Datos de la muestra		
Clasificación	USCS	CL-ML
	AASHTO	A-4
Índice de Grupo	IG	(1)

Proctor modificado		
D.M.C.S.	(kg/m ³)	2.040
Humedad óptima	(%)	8.4

- **Suelo Borde + 30% Agregado Pétreo:**

1. Datos de la muestra		
Clasificación	USCS	ML
	AASHTO	A-6
Índice de Grupo	IG	(6)

Proctor modificado		
D.M.C.S.	(kg/m ³)	1.740
Humedad óptima	(%)	16.7

Como se observa la clasificación USCS cambió para ambos suelos. En el caso del suelo ML luego de la adición de material granular la nueva clasificación USCS para este suelo es CL-ML con una humedad óptima de un 8%. En el suelo borde la clasificación USCS inicial los clasificaba como un suelo CL, sin embargo, luego de la adición de material granular su clasificación USCS cambió a ML o limo de baja plasticidad. Para estas probetas se utiliza la nueva humedad óptima presentada en este punto.

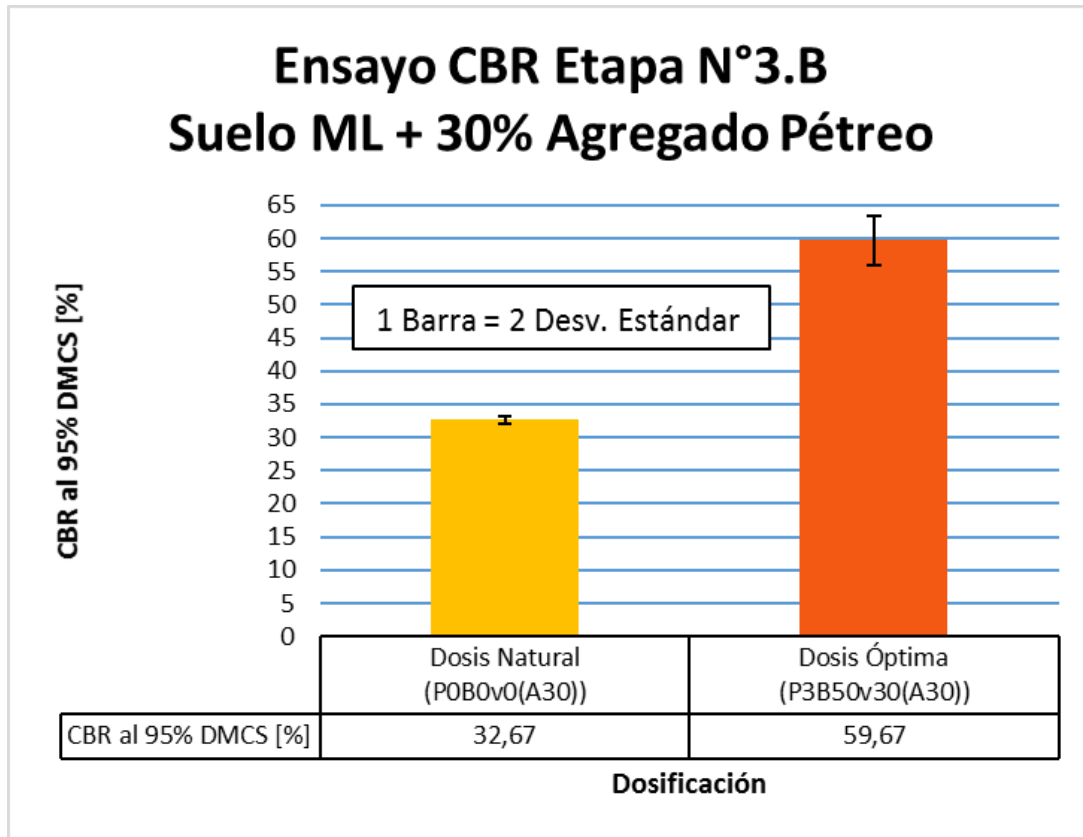


Figura 4-19: CBR AL 95% DMCS[%] vs. DOSIFICACIÓN PARA SUELO ML + 30% AGREGADO PÉTREO.

Tabla 4-14: RESULTADOS ENSAYO CBR PARA SUELO ML + 30% AGREGADO PÉTREO.

CBR al 95% DMCS			
Suelo ML + 30% Agregado Pétreo	Repetición	Dosis	
		POB0v0(A30)	P3B50v30(A30)
	1	33	64
	2	33	57
	3	32	58
	Promedio	32,67	59,67
	Desv. Estándar	0,58	3,79

De los valores obtenidos para el Suelo ML + 30% de agregado pétreo el valor de CBR asociado corresponde a 33 para la dosificación sin aditivos, valor que lo clasifica dentro de la categoría “Buena” para uso como subbase y un valor de CBR de 60 que alcanza justo para ser clasificado como “Buena” para su uso como base, con esto se comprueba que se alcanzó el valor requerido para entrar en esta categoría, y debido a que se alcanza justo este valor y considerando que lo



más probable es que con el correr de los días los resultados aumenten con lo que no quedará duda de que entrará a la clasificación para su uso como base, cumpliéndose así uno de los objetivos buscados en esta investigación. Sin embargo, el material con estos días de reacción(4 días de reacción y 4 días saturado) no estaría sustituyendo a la base granular con un CBR de un 80%, el cual es requerido para su utilización (Thenoux, Halles, & González, Guia de Diseño Estructural de Pavimentos para Caminos de Bajo Volumen de Tránsito., 2002), por lo que se espera se alcance este valor para poder ser utilizada esta solución directamente como carpeta de rodado, de lo contrario se tendría que evaluar alguna solución o tratamiento superficial.

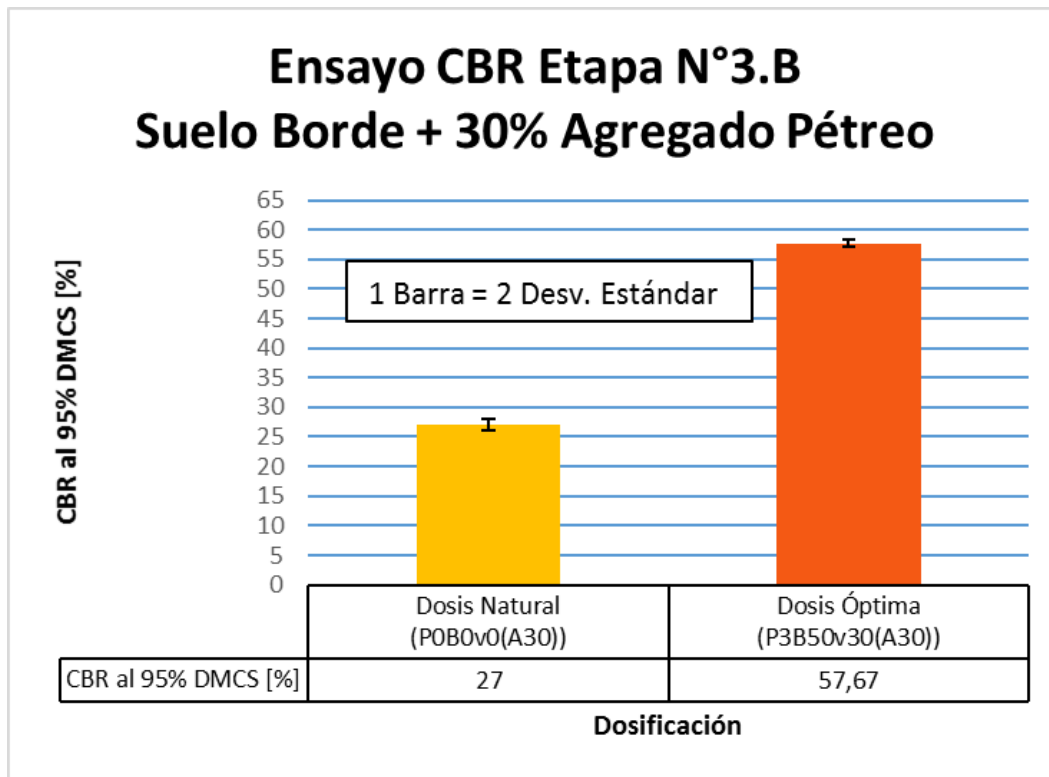


Figura 4-20: CBR AL 95% DMCS [%] vs. DOSIFICACIÓN PARA SUELO BORDE + 30% AGREGADO PÉTREO.



Tabla 4-15: RESULTADOS ENSAYO CBR PARA SUELO BORDE + 30% AGREGADO PÉTREO.

CBR al 95% DMCS			
Suelo Borde + 30% Agregado Pétreo	Repetición	Dosis	
		P0B0v0(A30)	P3B50v30(A30)
	1	26	58
	2	27	57
	3	28	58
	Promedio	27	57,67
	Desv. Estándar	1	0,58

Para la dosificación de suelo borde + 30% de agregado pétreo sin aditivos, se obtiene un valor de CBR de 27%, con esto entra a la categoría de un suelo “excelente” para su uso como subrasante, lo cual hace evidente y necesaria su estabilización química para clasificar para un uso como base o carpeta de rodado. Del resultado de la muestra estabilizada con dosis óptima y 30% de agregado se aprecia un considerable aumento del doble del valor original sin aditivos, con un CBR de 58% el cual clasifica dentro de la categoría “buena” para su uso como subbase, sin embargo, de igual forma que el suelo ML el valor de CBR es muy cercano al límite de CBR que lo clasifica como “bueno” para su uso como base, por lo tanto, como ya se ha mencionado anteriormente se espera que con el paso del tiempo de reacción este resultado incremente y por lo menos entre en la categoría pasa su uso como base, cumpliendo con el objetivo propuesto. Finalmente se determina que ambos resultados son satisfactorios para efectos de este proyecto. Se comprueba que la utilización de los aditivos no tradicionales P y B en combinación con el aditivo tradicional Cal Viva y la adición de la humedad óptima, acompañado de un adecuado proceso de mezclado y compactación lo que permite la formación de agentes cementantes y generando la reacción puzolánica, entre los aditivos, la cual es evidente en vista del no despreciable aumento de resistencia. Finalmente, se puede concluir que luego del paso de los días los valores obtenidos se ajusten y clasifiquen finalmente a ambos suelos estabilizados como un suelo que entre en la categoría de “excelente” y sea apto para ser utilizado en las capas granulares, perteneciente a la estructuración de un CBVT productivo.

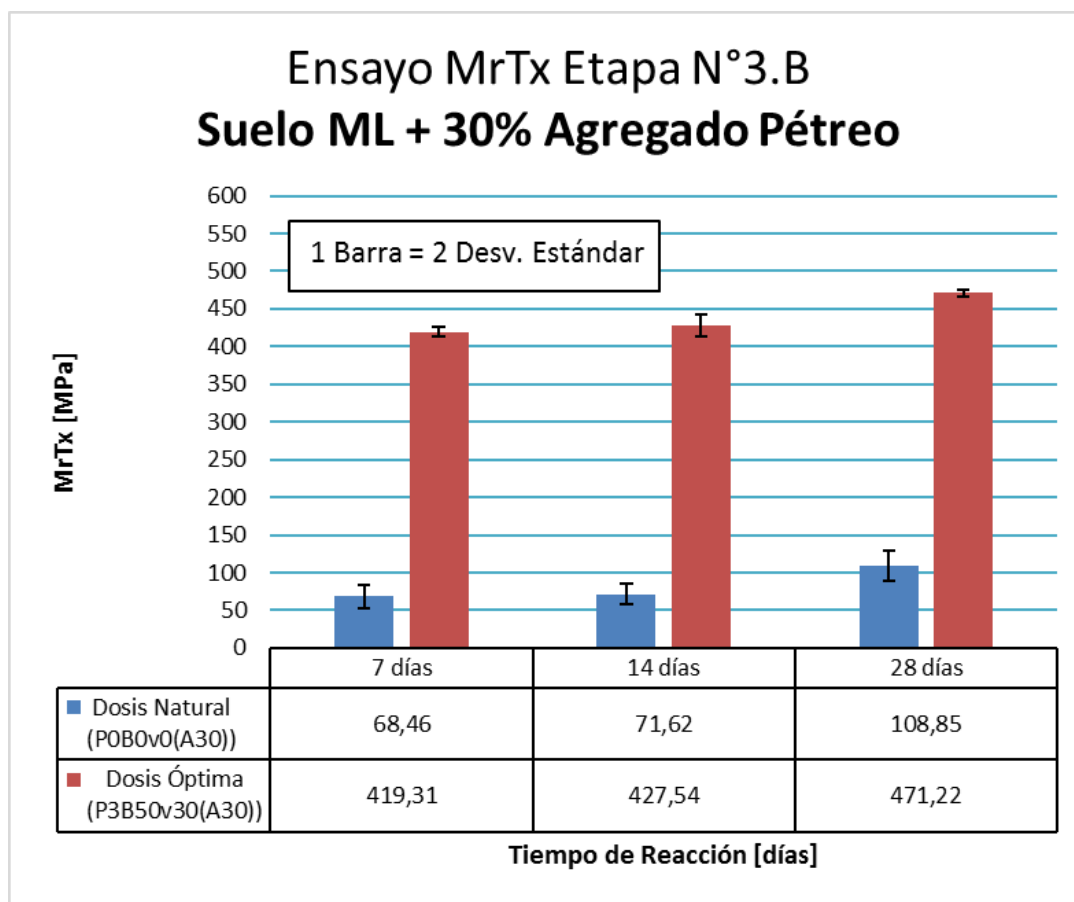


Figura 4-21: MrTx[MPa] vs. TIEMPO DE REACCIÓN [días] PARA SUELO ML + 30% AGREGADO PÉTREO.

Realizando el análisis de datos para el ensayo MrTx en el suelo ML con un 30% de agregado pétreo, se aprecia un elevado incremento en el MrTx si se compara la muestra con aditivos versus la muestra que no los contiene, para un tiempo de reacción de 7 días se tiene, un incremento de 6,1 veces el valor de la respuesta elástica MrTx de la dosis sin aditivo, lo mismo ocurre para los días 14 y 28, donde se registra un incremento de 5,7 y 4,3 veces la respuesta elástica comparada dentro de los mismos tiempos de reacción con su análogo sin aditivo.

De los resultados MrTx arrojados, para la dosis óptima en este suelo y al comparar el valor inicial a los 7 días de 419,31 [MPa] relativo al valor MrTx a los 28 días de 471,22, se comprueba un aumento del 12% de la respuesta solamente, de esto se puede inferir que la mayor parte del incremento de resistencia y mejoramiento de las propiedades de este suelo gracias a la estabilización química ocurre a los 7 días, esto es fundamentado con la gran brecha que existe entre la muestra estabilizada con dosis óptima y la muestra sin aditivos.



Dentro de la dosificación sin aditivos, es posible observar también, un incremento de la respuesta conforme al pasar de los días, obteniéndose un máximo valor de MrTx de 108,9 [MPa] para el día 28, el cual comenzó con un valor de 68,46 a los 7 días, registrando un incremento relativo entre los 7 y 28 días de casi 1,6 veces el valor original, lo que indica que existe cierto grado de mejoramiento debido a la estabilización mecánica producto de la compactación del material. También al comparar los valores de MrTx en la muestra con dosis óptima se aprecia un aumento progresivo de la respuesta en función del tiempo de reacción, esto se atribuye principalmente a la disminución en la tensión elástica a mayor tiempo de reacción y por ende se obtiene un módulo elástico superior

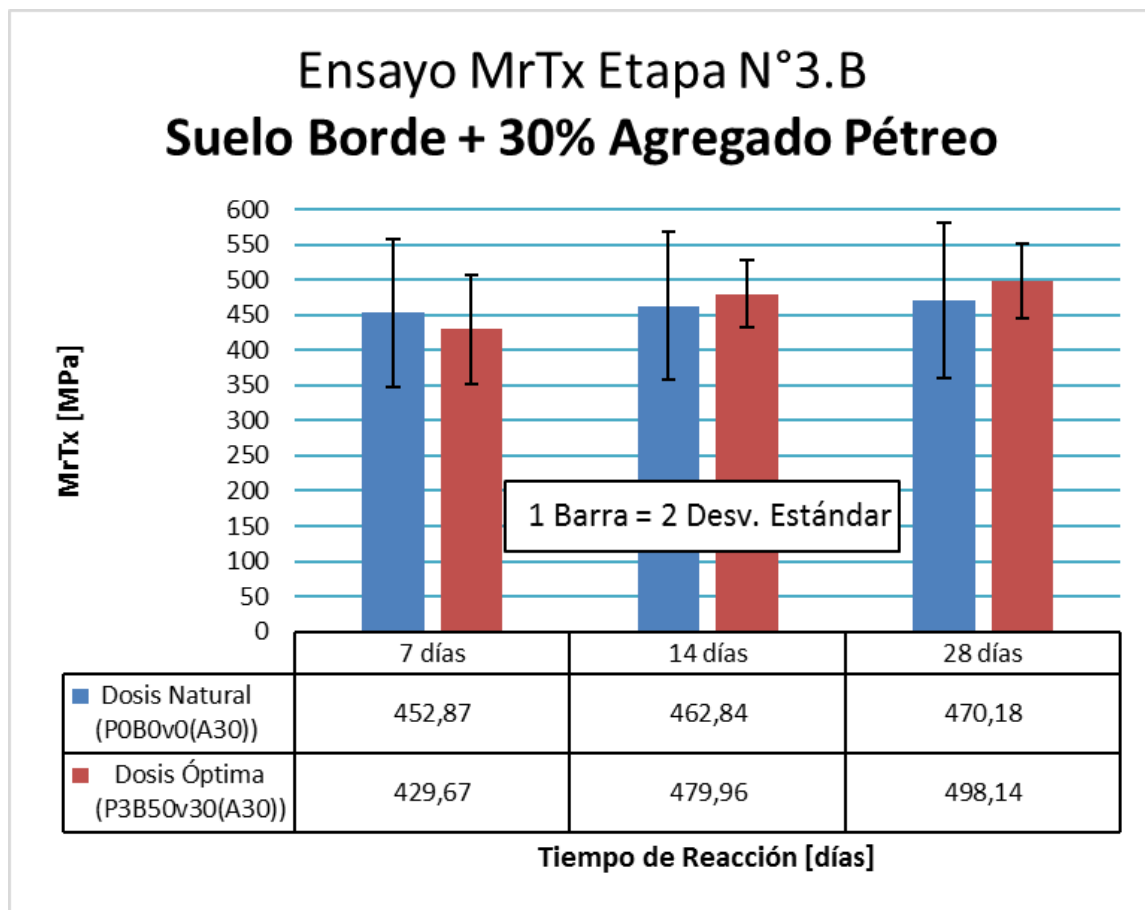


Figura 4-22: MrTx[MPa] vs. TIEMPO DE REACCIÓN [días] PARA SUELO BORDE + 30% AGREGADO PÉTREO.

En el suelo borde se observa la existencia de un pequeño aumento en el módulo resiliente entre el suelo sin aditivos versus el suelo estabilizado, el que presenta un valor de módulo resiliente



triaxial máximo de 498,14 [MPa] a los 28 días con dosis óptima y un valor de 470,18 [MPa] en el suelo sin estabilizar con la misma edad. A los 7 días se observa que la dosis con aditivos presenta un valor inferior que la dosis natural, dicho valor no es coherente con lo esperado, lo que pudo ser ocasionado a algún error en la implementación del ensayo o simplemente, es debido a una baja representatividad de este dato ya que para la dosificación sin aditivos solo se consideró una probeta para ser ensayada, es decir, faltan al menos dos repeticiones de este ensayo para confiar en una mayor representatividad del mismo. Sin embargo, esta anomalía se observa únicamente a los 7 días, ya que para los 14 y 28 días el valor del módulo en la dosis óptima si supera el módulo de la dosis sin aditivos. Sin embargo, para este ensayo no es evidente que estos resultados sean gracias a una estabilización química del material fino de las probetas, sino que es posible que gran parte de este resultado sea gracias a la incorporación de agregado pétreo ya que en teoría debería incrementar la respuesta en todos los casos. En términos generales, existe una tendencia al aumento en el valor de módulo en función del tiempo. De todas formas, el suelo borde presenta el mayor valor de módulo de toda esta investigación, a los 28 días con un valor de 498 [MPa], lo que es un resultado más que satisfactorio para el alcance de esta investigación, además de superar en todos los casos el valor de módulo resiliente asociado a una buena base granular según el rango mencionado anteriormente de una base granular de buena calidad que fluctúa entre 250-350 [MPa], lo que confirma el objetivo de esta investigación.

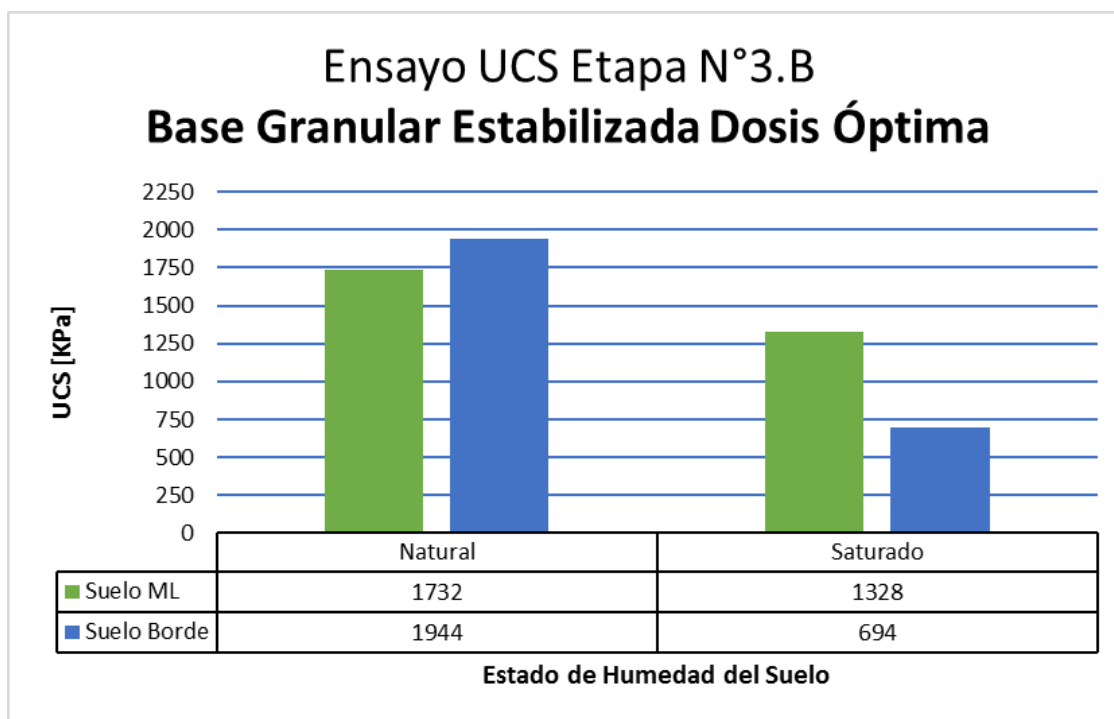


Figura 4-23: ENSAYO UCS PARA BASE GRANULAR ESTABILIZADO QUÍMICAMENTE CON DOSIS ÓPTIMA.

Para los resultados contenidos en la gráfica de la Figura 4-23, se observa que el mejor valor obtenido de resistencia UCS lo presenta el suelo borde en su condición natural con un valor de 1944[KPa], y en su condición saturada con un valor de 1328 [KPa], lo que arroja un índice de resistencia retenida con un valor de un 36%, para el caso del suelo ML, se tiene que la resistencia obtenida en condición natural es de 1732 [KPa] y un valor de resistencia de 1328 [KPa] en su condición saturada, con esto se determina un valor de IRR de un 77%, el cual es superior al doble del IRR para el suelo borde, lo que indica que para el suelo ML se obtiene una susceptibilidad a la humedad de la mezcla un 50% menor que para el suelo borde, lo que significa que se logra una mayor estabilidad volumétrica en este suelo, lo que maximiza la resistencia del suelo ML, es decir, si se aplica la adición de los aditivos no tradicionales en conjunto con el activador de la reacción química que para este caso en la dosificación propuesta se trata de Cal Viva, se consigue la estabilidad de las propiedades de este suelo y como ya se mencionó anteriormente con la reducción de la susceptibilidad a la humedad, al conseguir estabilidad volumétrica en conjunto con una resistencia adecuada que entre al menos en la categoría “buena” para su uso como base, se podría concluir que la estabilización de suelos fue exitosa. Para finalizar este análisis en ambos casos los suelos presentan resultados asociado un mejor comportamiento que lo estipulado para



Capítulo 4: “Análisis de Resultados”

una base de buena calidad, por esta razón ambos suelos clasifican para ser utilizados como tal, por lo tanto, se cumple con el objetivo propuesto para la estabilización de una base granular con un 30% de agregado pétreo, para su uso como material.



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas producto de esta investigación, enfocadas en el objetivo principal y los objetivos específicos. Además, se presentan recomendaciones asociadas al trabajo experimental, análisis de resultados y la discusión durante este trabajo.

El objetivo general de este trabajo fue determinar el efecto sobre las propiedades mecánicas y de estabilidad de tres distintos suelos limosos, gracias a la estabilización química con el uso de aditivos no tradicionales B y P combinados con aditivos tradicionales Cal Viva y Cemento Portland, utilizando una metodología específica en conjunto con ensayos de laboratorio.

5.1. CONCLUSIONES

Finalmente, se comprueba que, con la utilización de los aditivos sólidos tradicionales, Cal Viva y Cemento Portland, se incrementa la capacidad de soporte y la resistencia de los suelos limosos investigados. De igual manera, se implementó la adición de los aditivos no tradicionales B y P, para evaluar el efecto que producen cuando se aplican en combinación con la Cal Viva y el Cemento Portland, esto considerando que, según investigaciones anteriores, el aditivo B (residuo industrial) puede presentar propiedades cementantes y producir la reacción puzolánica, con la ayuda de un activador (aditivos sólidos tradicionales). Mediante el análisis de los resultados de los ensayos realizados, las principales conclusiones obtenidas en esta investigación fueron las siguientes:

- El índice Mini-CBR Modificado (IMCM), es un indicador adecuado y efectivo, en la caracterización de la capacidad de soporte de los suelos finos de esta investigación, con las concentraciones de aditivos químicos propuestas, en las variadas dosificaciones utilizadas durante este proyecto (con y sin aditivos químicos), ya que es un ensayo que ayuda a reducir considerablemente los tiempos de realización, cantidad de suelo y esfuerzo físico por parte del operario, lo que permite realizar más repeticiones, lo que implica una reducción de costos, además el ensayo Mini-CBR Modificado, posee una correlación “significativa positiva” con el ensayo CBR (Riveros, 2016). Por lo tanto, se trata de una buena aproximación para comenzar una caracterización de suelos finos, sin embargo, no



Capítulo 5: “Conclusiones y Recomendaciones”

reemplaza la implementación del ensayo CBR para la validación de los datos finales en la caracterización del suelo.

- Respecto del ensayo no tradicional Mini-CBR Modificado (exclusivo para suelos finos), al tratarse de un ensayo miniatura, es importante destacar, que la utilización de suelo en este ensayo de solo 500 gr, que es bastante menor respecto al ensayo tradicional CBR de 5 kg, esto implica también, un menor consumo de aditivos químicos en este ensayo. Lo que se traduce en una reducción, de al menos diez veces los costos asociados al transporte, utilización y manejo del suelo en conjunto con los aditivos químicos, con respecto al ensayo CBR. Además, el esfuerzo y tiempo requerido por el operario en la confección de las probetas, es mínimo. Esto es una gran ventaja, en términos de ingeniería.
- En Chile la implementación del ensayo Mini-CBR Modificado, en proyectos de ingeniería de caminos, es muy complicada en la actualidad, ya que, al tratarse de un ensayo relativamente nuevo, se encuentra disponible únicamente en el laboratorio de la Universidad del Desarrollo, el que cuenta con el equipamiento necesario para su realización. Además, hay que considerar, que, para su implementación, es necesario también, la capacitación de los operarios encargados para la realización de este ensayo. Por lo recién mencionado, es evidente que existe un elevado costo inicial para su implementación, pero según lo mencionado anterior mente esto se podría compensar en el largo plazo, con la reducción de costos en la utilización de suelos finos y aditivos químicos.
- Debido a que fue necesario realizar una nueva solicitud de suelo MH, ya que la cantidad recibida en un principio no fue suficiente para abarcar todas la etapas, y al comparar los resultados del ensayo Mini-CBR Modificado de las dosificaciones que se repiten de la etapa N°1, en la etapa N°2.A, se verifica la existencia de la variabilidad de resultados y comportamiento entre muestras del mismo suelo, esto puede ser ocasionado debido a que es posible que las muestras tengan un origen geográfico diferente, ya que los procesos químicos de los suelos pueden ser variables según su ubicación lo que afecta a la composición y comportamiento del mismo.
- De acuerdo al análisis de resultados, se hace evidente que el aditivo B requiere un activador para desencadenar la reacción puzolánica, y así lograr la estabilidad y resistencia requerida para el uso de los suelos estabilizados. La Cal Viva presentó mejores resultados



Capítulo 5: “Conclusiones y Recomendaciones”

respecto del Cemento Portland para los tres suelos analizados, sin embargo, en algunos casos podría ser diferente y presentar mejor comportamiento el Cemento Portland que también registró evidencia de la reacción puzolánica, por lo tanto, es necesario analizar caso a caso.

- Se comprueba la efectividad de los aditivos tradicionales Cal Viva y Cemento Portland, en la estabilización química de las propiedades mecánicas de suelos limosos para caminos de bajo volumen de tránsito productivos, además de verificar su conveniencia en términos económicos y constructivos.
- El comportamiento de los suelos varía según el contenido de aditivo B. En general se observa un mejoramiento en los parámetros medidos conforme aumenta el contenido de aditivo B en la mezcla.
- A partir del ensayo de CBR a los 7 días de realizada las mezclas se puede comprobar que, en todos los casos el incremento de CBR fue del doble respecto de la probeta sin aditivos, lo que significa que hay un evidente mejoramiento en las propiedades mecánicas, gracias a la reacción puzolánica producida por la dosificación de aditivos utilizada. Sin embargo, el mayor valor de CBR alcanzado fue de 59,7%, el cual está por debajo del valor de CBR de 80%, requerido para materiales granulares, considerando que el incremento fue del doble del valor en tan solo 7 días, es muy probable que alcance CBR de 80% antes de los 21 días. De lo contrario se debería evaluar alguna posible solución adicional o la realización de un tratamiento superficial.
- Respecto de los valores obtenidos en los ensayos de Módulo Resiliente Triaxial (MrTx) y Compresión no Confinada (UCS) indican que, en general, se percibe un aumento del módulo y la resistencia de los materiales luego del transcurso del tiempo de reacción de las mezclas. Estos valores se sitúan por sobre el rango de una base granular de buena calidad de 250-350 MPa en todos los casos. Los mayores resultados se obtuvieron en el Suelo Borde con 30% material granular, con un valor de 498 [MPa] a los 28 días.
- En la estabilización química de las propiedades mecánicas de los suelos con potencial uso para subrasante, propuesta en esta investigación, utilizando aditivos no tradicionales en conjunto con los aditivos clásicos como la Cal Viva y el Cemento Portland, permite utilizar un menor espesor en la carpeta de rodado, reduciendo los consumos y costos de los aditivos y áridos utilizados, también disminuye la necesidad del transporte de grandes



Capítulo 5: “Conclusiones y Recomendaciones”

cantidades de áridos, lo que significa una gran ventaja en términos económicos y reducción de tiempo requerido para la construcción de caminos de bajo volumen de tránsito.

- Para los suelos finos estudiados en esta investigación y estabilizados químicamente con los aditivos B, P, Cal Viva y Cemento Portland, es evidente el incremento y mejoramiento del comportamiento de las propiedades mecánicas y de estabilidad de los tres suelos limosos estudiados, es decir, esto significa que los aditivos B y P tienen potencial uso como estabilizadores de suelos limosos para caminos productivos, por lo tanto, la hipótesis formulada en esta investigación se acepta.

5.2. RECOMENDACIONES

Luego de la experiencia adquirida por el autor, en el desarrollo del trabajo experimental en esta investigación y las memorias mencionadas anteriormente, con respecto al manejo de suelos finos y aditivos químicos, y además de analizar los resultados de este trabajo, se recomienda:

- Evaluación del comportamiento en terreno de los suelos estabilizados con las dosificaciones óptimas obtenidas para Subrasante y Base Granular, mediante la construcción de caminos de prueba en una eventual Etapa N°4, con el fin de evaluar el verdadero impacto que genera el tránsito pesado en conjunto con las diferentes condiciones climáticas.
- Uso e implementación del ensayo Mini-CBR Modificado cuando se analicen suelos finos, debido a la potencial reducción de consumos en suelos, aditivos, tiempos y esfuerzo del operario. En caso de implementar este ensayo, se recomienda el uso de
- En futuras investigaciones, se recomienda variar la concentración de Cal Viva, dejando constante la concentración de aditivo B y P, para evaluar la posibilidad formular alguna dosificación que presente un mejor comportamiento ingenieril que las dosis óptimas obtenidas en esta investigación.
- Realizar el trabajo experimental de esta investigación, con las mismas dosificaciones de aditivo B, Cal Viva y Cemento Portland utilizadas en cada etapa, pero sin aditivo químico líquido P, con el fin de complementar los resultados ya obtenidos y cuantificar la contribución que genera este aditivo en el comportamiento mecánico de los suelos



Capítulo 5: “Conclusiones y Recomendaciones”

estabilizados. Ya que, si se comprueba que no hay un beneficio o mejora en el comportamiento mecánico de los suelos, no se justificaría su utilización. Este aditivo, contribuye a la estabilidad volumétrica de los suelos finos estabilizados, y aumenta el tiempo que demora la ocurrencia de la reacción puzolánica, lo que se podría traducir en una disminución del agrietamiento por retracción del suelo con materiales cementantes, sin embargo, esto no se ha comprobado. Por lo tanto, y considerando de que esta investigación se centra en CBVT-P, los cuales, se utilizan solo una temporada, es decir, en el corto plazo, los efectos producidos por este aditivo no presentarían una real ventaja para este tipo de caminos.

- Realizar la preparación suelos limosos y arcillosos al aire libre, ya que, al tratarse de suelos finos, se genera un levantamiento de polvo considerable, lo cual afecta a la calidad del aire que respira el operario dentro del laboratorio, y las partículas de suelo se pueden alojar en superficies y lugares, generando suciedad que puede provocar costosos daños en maquinarias y equipos delicados. Idealmente en un día que presente condiciones climáticas favorables para su realización.
- Utilización de todos los elementos de protección personal (EPP), para la realización de ensayos y manejo de suelos estabilizados, los cuales siempre estuvieron disponibles para su uso en el laboratorio donde se realizaron los ensayos de esta investigación.
- Uso de mascarilla, para el mezclado y manejo de los suelos con los diferentes aditivos químicos, considerando lo mencionado en el punto anterior, para reducir la concentración de partículas de suelo que respira el operario.
- Uso de guantes y zapatos de seguridad, durante la realización de los diferentes ensayos, para evitar y reducir posibles accidentes.





6. REFERENCIAS

- Arrúa, P. (2008). *Comportamiento tenso-deformacional de limos loésicos en dirección horizontal*. Universidad Nacional de Córdoba.
- ASTM. (2011). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken.
- ASTM C618. (2015). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. <http://doi.org/10.1520/C0618>.
- Belt, G., O’Laughlin, J., & Merrill, T. (1992). *Design of Forest Riparian Buffer Strips for the Protection of Water Quality: Analysis of Scientific Literature*. Idaho: University of Idaho.
- Carrasco, A., Cruz, N., Corpas, F., & Pérez, L. (2013). *An Evaluation of Bottom Ash From Plant Biomass as a Replacement for Cement in Building Blocks*.
- Cementos Bío Bío. (s.f.). www.cbb.cl.
- CMPC Maderas. (2017). *Proceso de Aserrío*.
- Comisión Nacional de Áridos. (2001). *Industria del Árido en Chile – Tomo I – Sistematización de Antecedentes Técnicos y Ambientales*. Santiago.
- Corporacion Chilena de la Madera. (2016).
- Corporación Nacional de Ciencias Forestales. (2013). *CONECIF CHILE*.
- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. México .
- Delarze, A. (2015). *Evaluación de Aditivos Químicos como Estabilizadores Volumetricos de un Suelo Expansivo de la Región Metropolitana*. Valparaiso: U.T.F.S.M.
- Dirección de Vialidad (MOP). (2017). *Red Vial Nacional, Dimensionamiento y Características*.
- Dirección de Vialidad. (2014). *Manual de Carreteras, Volumen N°8*.
- Dirección de Vialidad, M. d. (2012). *Política de Conservación Vial para Caminos no Pavimentados*.



Capítulo 6: “Referencias”

- Douglas, R. (2016). *Low-Volume Road Engineering – Design, Construction, and Maintenance*. . Boca Raton: CRC Press.
- Eaton, R. A., Gerard, S., & Cate, D. W. (1987). *Rating Unsurfaced Roads: Afield manual for measuring maintenance problems*. U.S. Army Corps of Engineers.
- Faiz, A. (2012). *The Promise of Rural Roads – Review of the Role of Low-Volume Roads in Rural Connectivity, Poverty Reduction, Crisis Management, and Livability*. Washington D.C.: Transportation Research Board of the National Academies.
- FHWA. (2006). *Geotechnical Aspects of Pavements*. Washington: Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation.
- Gayoso, J., & Acuña, M. (1999). *Mejores Prácticas de Manejo Forestal*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Gayoso, J., & Gayoso, S. (2003). *Diseño de zonas ribereñas requerimiento de un ancho mínimo*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Gayoso, J., Alarcón, D., & Vergara, G. (2001). *Estimación del Nivel de Vulnerabilidad de Componentes Ambientales en Bosques Siempreverdes*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Grünwald, E. (2017). *Evaluación del Comportamiento Mecánico en Laboratorio de Suelos Estabilizados Químicamente*. Santiago.
- INN. (1968). *Nch 148*.
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Medellín, Colombia.
- Jefferson, I., Murray, E., Faragher, E., & Fleming, P. (2001). *Problematic Soils*. Inglaterra: Thomas Telford.
- Manual de Carreteras. (1997). *1.302.202 Características de la Superestructura del Camino*.
- Marquina, M. (2008). Tesis para optar al título de Ingeniero Civil, Uso de las escorias obtenidas como sub producto de la elaboracion de acero de la plante N°2 de aceros de arequipa pisco para fines de cimentacion y pavimentación. En U. R. Palma.



Capítulo 6: “Referencias”

- Maximov, S. (2008). *Análisis calorimétrico y de difracción de rayos X de aleaciones base cobre, obtenidas por aleado mecánico*. Santiago.
- Ministerio de Agricultura. (2016). *Chilean Forestry Sector*.
- MINVU. (2008). *Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación*.
- MINVU. (2018). *Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación*.
- National Geographic Encyclopedia. (s.f.). <http://nationalgeographic.org/encyclopedia/silt/>.
- Osman, K. (2013). *Forest Soils, Properties and Management*. DOI 10.1007/978-3-319-02541-4_2.
- Pradena, M., Mery, J., & Novoa, É. (2010). *Unpaved road stabilization and maintenance under ice-snow conditions in mountains areas*. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2010000200010>.
- Riveros, J. (2016). *Implementación del ensayo Mini-CBR en suelos finos naturales y estabilizados químicamente*. Santiago.
- Rodriguez Moreno, M. A. (2014). *Determinación de la Confiabilidad Implícita en el Método de Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles AASHTO-93 en Base a Modelos de Predicción del Deterioro*. Santiago.
- Rodriguez, M., Thenoux, G., & González, A. (2016). *Probabilistic assesment of asphalt pavement design*. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732016000200002>.
- Sarkkinen, M., Kujala, K., Kemppainen, K., & Gehör, S. (2016). *Effect of biomass fly ashes as road stabilisation binder*. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2016.1235508>.
- Shaheen, S. M., Hooda, P. S., & Tsadilas, C. D. (2014). *Opportunities and challenges in the use of coal fly ash for soil improvements - A review*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.005>.
- Siddique, R. (2010). *Utilization of coal combustion by-products in sustainable construction materials*. doi:10.1016/j.resconrec.2010.06.011.



Capítulo 6: “Referencias”

- Solminihaç, H., Echeverría, G., & Thenoux, G. (1989). *Estabilización Química de Suelos: Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos*.
- Soto, M., & Guzmán, C. (2013). *Estudio y evaluación del adobe estabilizado con la tecnología PROES en función de su capacidad de absorción por succión capilar*. Concepción, Chile: Universidad del Bío Bío, Escuela de Ingeniería en Construcción.
- Thenoux, & Carrillo, H. (2002). Estudio para la utilización de cenizas provenientes de la caldera cogeneradora petropower en la estabilización de suelos.
- Thenoux, G. (2013). *LIGNUM*.
- Thenoux, G., & San Juan, M. (2000). *Estabilización físico-química de suelos para caminos [Diapositiva]*. Santiago: PROVIAL.
- Thenoux, G., Halles, F., & González, Á. (2002). *Guía de Diseño Estructural de Pavimentos para Caminos de Bajo Volumen de Tránsito*. Dirección de Vialidad, MOP.
- Úbeda, L. R. (1996). *Cuantificación de la Erosión en un Camino Forestal de un Bosque Típico Mediterráneo*.
- Ulloa, L. (1978). Utilización de cenizas volantes en la fabricación de cementos. *Materiales de Construcción*, Vol 28, N°172, 27.
- Weaver, W., Weppner, E., & Hagans, D. (2014). *MANUAL DE CAMINOS FORESTALES Y RURALES*.
- Zhang, T., Cai, G., & Liu, S. (2016). *Application of lignin based by product stabilized silty soil in highway subgrade: A field investigation*. China.
- Zhu, Z.-D., & Liu, S.-Y. (2008). Utilization of a new soil stabilizer for silt subgrade.



7. ANEXOS

7.1. LIMO EOLICO O SUELO LOESS

Los suelos Loess cubren una gran área (aproximadamente el 10%) de la masa terrestre de la Tierra. El Loess consiste esencialmente de limo (tamaño de partícula 20-30 micras) con partículas de cuarzo primario que se forman como resultado de procesos que involucran gran cantidad de energía sobre la superficie de la tierra, tales como la Erosión Glacial o Meteorización en Clima Frío (Rogers et al., 1994). Estas partículas son transportadas de la fuente (tales como montañas tectónicamente activas, por ejemplo, el Himalaya y Los Alpes) por grandes ríos (tales como, Hwang He, Danubio y Rin). La subsiguiente inundación de estos ríos permite que las partículas de limo de cuarzo se depositen en las planicies. Al secarse estas partículas se separan y transportan por los vientos prevalecientes hasta la deposición por el sotavento a distancias que van desde decenas a miles de kilómetros. Este proceso ha dado lugar a un depósito casi continuo, cubriendo la llanura del norte de China al sureste de Inglaterra. Es posible separar en cinco regiones principales: América del Norte, América del Sur, Europa incluyendo Rusia occidental, Asia central y China. En estas regiones de *Loess* subyacen altamente pobladas, por ende, existen problemas para la cimentación de la infraestructura, ya que son depósitos propensos al colapso, lo que conduce al asentamiento progresivo del terreno. Las áreas de mayor preocupación se concentran en Europa del Este, Rusia y en un número creciente en China (véase Derbyshire et al., 1995), aunque existen problemas graves de colapso potencial dondequiera que se encuentre presente el *Loess*.

Las partículas, que constituyen los depósitos de *Loess*, aunque principalmente de limo de cuarzo, también están formadas por feldespatos y micas. Las partículas de arcilla dentro de la estructura del *Loess* consisten en cuarzo, feldespato y carbonatos, además de verdaderos minerales de arcilla.

Este cuadro composicional se complica aún más por las diferencias (particularmente mineralógicas), en la fracción arcillosa de *Loess* y paleosoles (suelos fósiles), tanto entre las diferentes regiones climáticas como entre las unidades de *Loess* y los horizontes de paleozoides encerrados dentro del mismo ambiente climático.



Estas diferencias son causa fundamental de variabilidad en la estabilidad, y de ahí el colapso potencial que puede resultar después que se aplica una carga sobre un suelo *Loess* saturado. Además, las partículas de cuarzo primarias son de forma irregular (Rogers & Smalley, 1993). Como resultado de su génesis y constitución, los depósitos de *Loess* forman estructuras notablemente abiertas con partículas de tamaño de arcilla en contacto con las partículas de cuarzo. Un proceso de unión inter-partícula, cuya resistencia puede aumentar con el tiempo, mantiene esta estructura abierta.

El *Loess* puede causar una serie de problemas de ingeniería. Estos problemas se deben a que el *Loess* sufre colapso estructural y hundimiento, debido a la saturación cuando tanto la densidad seca y la humedad inicial son bajos (Rogers et al., 1994). Generalmente, los suelos que poseen texturas porosas con altas proporciones de vacíos de aire y densidades relativamente bajas tienen potencial peligro de colapso. Tienen espacio vacío suficiente en su estado natural para mantener su contenido de humedad en el límite líquido cuando están saturados. Con respecto a su humedad natural estos suelos poseen una alta resistencia aparente, pero son susceptibles a grandes reducciones cuando el suelo se humedece. En otras palabras, la textura metaestable colapsa a medida que los enlaces entre los granos se descomponen cuando el suelo se humedece. Por lo tanto, el proceso de colapso representa una reorganización de las partículas del suelo en un estado más denso.

El colapso provocado por la saturación suele tardar un corto período de tiempo. El suelo pasa de una condición sub consolidada a una de consolidación normal. Tales suelos son frecuentemente de origen eólico y sus partículas de limo generalmente presentan tamaño uniforme (Jefferson, Murray, Faragher, & Fleming, 2001).

7.2. CAMINOS FORESTALES

En caminos no pavimentados la capacidad de carga insuficiente es un problema común, especialmente en regiones propensas a ciclos de hielo-deshielo. Tales problemas son típicos en *Caminos Forestales* utilizados para el trabajo y transporte de la madera. Los efectos del cambio climático causando mayores precipitaciones y fuertes fluctuaciones de temperatura, además de



utilizar camiones más grandes y cargas más pesadas, han aumentado la necesidad de estabilizar los caminos no pavimentados (Sarkkinen, Kujala, Kemppainen, & Gehör, 2016).



Figura 7-1: CAMINO FORESTAL RESERVA NACIONAL NONQUÉN CONCEPCIÓN, (Fuente: Google Earth).

El carbón ha sido y sigue siendo una de las mayores fuentes de producción de energía en el mundo y la eliminación de las cenizas volantes de carbón generadas en grandes cantidades como residuo, son un problema (Shaheen, Hooda, & Tsadilas, 2014). Debido a la necesidad de eliminar este residuo, se han desarrollado estudios sobre la utilización de las cenizas volantes de carbón como material suplementario para el cemento y hormigón (Siddique, 2010). Sin embargo, en muchos países los biocombustibles (provenientes de la biomasa) están reemplazando cada vez más el carbón en la producción de energía, además de otros usos como en la industria de la celulosa en la producción de papel y sus derivados, estimulando la necesidad de explorar usos más económicos y sustentables de las *cenizas volantes de biomasa* o *Bioashes* en lugar de vertederos, tales como el uso como material aglutinante en la estabilización de caminos no pavimentados (Sarkkinen, Kujala, Kemppainen, & Gehör, 2016).

Las cenizas de biomasa son materiales que presentan una mayor variabilidad en su composición química en comparación a las cenizas volantes de carbón, debido principalmente a la variabilidad de los biocombustibles utilizados y procesos de incineración (Sarkkinen, Kujala, Kemppainen, &



Gehör, 2016). Por esta razón es necesario realizar numerosas investigaciones y estudiar con mayor detalle los usos y aplicaciones de estos residuos, con el fin de aportar soluciones más sustentables y ecológicas que aporten al desarrollo del sector forestal, además de incentivar el uso de energías renovables de nuestro país.

7.3. NORMATIVA LEGAL SECTOR FORESTAL

Las actividades dentro del manejo forestal deben cumplir con todas las normas establecidas en la legislación vigente en el país (Ley N°19561, D.L. 701 y Reglamento N°259, Ley de Bosques). Además, de cumplir todas las disposiciones legales referidas al cuidado del ambiente (Ley de Bases del Medio Ambiente N°19300, Reglamento del Sistema de Evaluación del Impacto Ambiental) y aquellas consideradas en el código del trabajo (Ley N°18620), así con toda la legislación que afecte directa o indirectamente las distintas actividades forestales (Gayoso & Acuña, 1999).

7.4. EL SECTOR FORESTAL EN CHILE

En el mundo existen 3.695 millones de hectáreas de bosque nativo, de los cuales el 51,3% se concentra entre tan solo cuatro países (Rusia 21,5%, Brasil 13,1%, Canadá 9% y EE. UU. 7,7%), lejos de esta cifra en Chile con un 0,4% hay 14,8 millones de hectáreas de bosque nativo. En otro ámbito el mundo cuenta con 291 millones de hectáreas de plantación forestal, de las cuales el 27,1% se encuentra en China, seguido por EE.UU. que posee el 9,1%, en Chile se cultiva el 1% de esta superficie, es decir, que en el territorio nacional hay 2,9 millones de hectáreas de plantaciones forestales equivalentes al 17,2% del total de bosques en Chile (Ministerio de Agricultura, 2016). En términos productivos al año se generan 1.848 millones de metros cúbicos de madera en troza industrial y 452 millones de metros cúbicos de madera aserrada en el mundo, de los cuales Chile genera el 2,3% y 1,9% de la producción respectivamente y se ubica en el onceavo lugar en el ranking que lidera EE.UU. que aporta con 19,9% y 17% respectivamente, además se producen 176 toneladas de pulpa de madera anuales donde Chile contribuye en un 2,9% ubicándose como decimo productor de pulpa de madera a nivel mundial, ranking que nuevamente lidera EE.UU con un 28,1%(Ministerio de Agricultura, 2016).



El sector forestal se posiciona como un pilar fundamental de la economía en Chile, con una participación del 2,6% del PIB nacional (Banco Central, 2015), registro que se mantiene estable y no ha presentado variaciones significativas dentro de los últimos años, por lo que se espera que siga comportándose de la misma manera en el futuro.

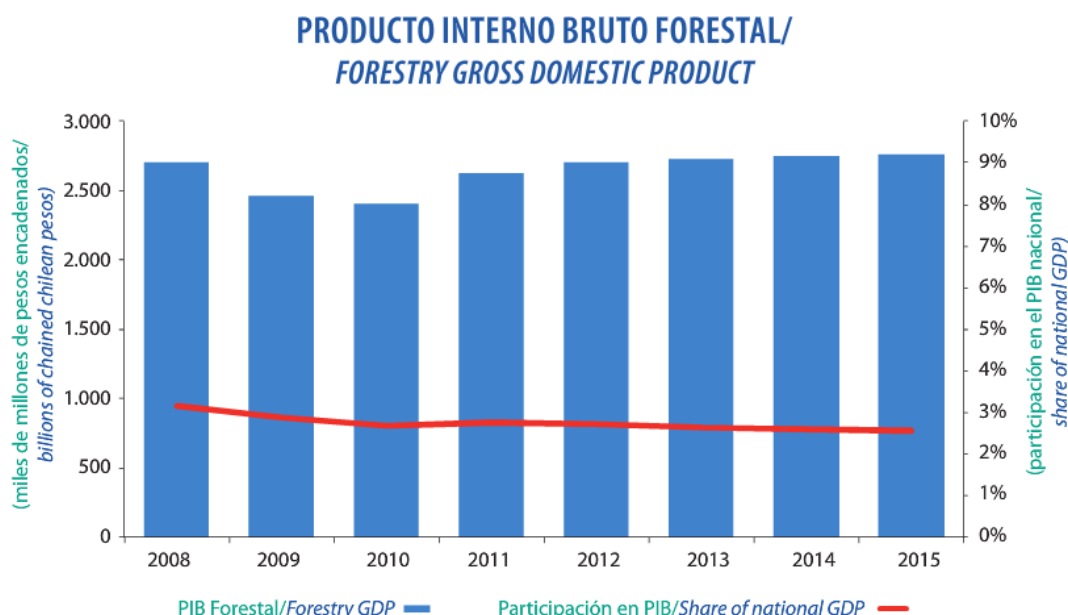


Figura 7-2: PRODUCTO INTERNO BRUTO SECTOR FORESTAL CHILE (2008-2015), (Ministerio de Agricultura, 2016).

7.5. CICLO FORESTAL DE LA MADERA Y PROCESO DE ASERRÍO

Una vez que las plantaciones de bosques (generalmente de pino insignie) llegan a su vida adulta, son cosechados con el uso de maquinaria especializada en labores forestales, de los cuales se obtienen los trozos que se transformarán en madera aserrada, que son colocados en camiones que transitan los caminos forestales hasta las canchas de acopio, lugares destinados a reunir los trozos de madera extraídos, donde son regados con agua para evitar en ellos la presencia de hongos y manchas, luego son clasificados según tamaño y diámetro, atraviesan el descortezador que posee ruedas dentadas que desprenden la corteza de los trozos, para ser trasladados al sector de aserrío de la madera donde se cortan los trozos según la necesidad, para luego ser clasificados según tipo y calidad para ser empaquetados y ser despachados al lugar de destino. La corteza, viruta, astillas y aserrín derivados del proceso de trozado de la madera son transportados a calderas de poder para generar combustibles y vapor, que son conducidos a un turbogenerador, a través del cual se genera energía eléctrica para los procesos industriales o para ser introducidos al



sistema interconectado central (CMPC Maderas, 2017). De procesos industriales en las plantas termoeléctricas se produce el residuo sólido tipo ceniza, ya sea de biomasa o carbón dependiendo según sea el origen del combustible.

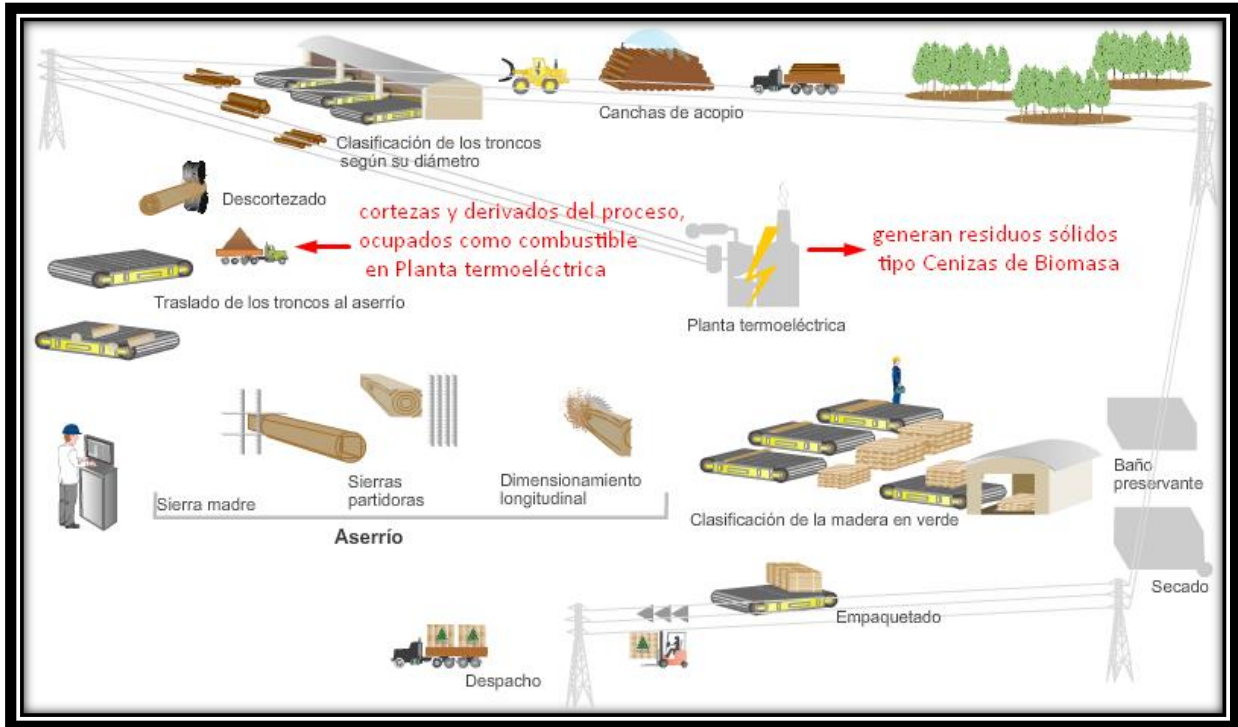


Figura 7-3: PROCESO DE ASERRÍO, (CMPC Maderas, 2017).

7.6. CAMINOS FORESTALES Y SU IMPORTANCIA

Los caminos forestales (generalmente no pavimentados) son utilizados para conectar el tránsito de camiones, maquinaria y equipos necesarios para desarrollar las labores de plantación, mantención, cosecha y transporte de los subproductos forestales, por lo tanto, es de vital importancia que logren cumplir con el desempeño requerido. Con respecto a las solicitudes de tránsito, la etapa más crítica para los caminos forestales que además define su diseño estructural, es la cosecha donde se necesita que camiones cargados con una elevada carga de materia prima, transiten de forma correcta y segura desde las canchas de trozado hasta su destino. Es necesario conocer bien la topografía, tipo de suelo, condiciones climáticas, y solicitudes de tránsito del camino para realizar un adecuado diseño tanto geométrico como estructural además de las obras de drenaje necesarias para lograr un correcto funcionamiento.



Dado que las masas boscosas se encuentran normalmente en terrenos de topografía irregular y de difícil acceso, construir el camino ideal o estable implica toda una filosofía de trabajo donde el diseño y la ingeniería juegan un papel importante, ya que cualquier falla en el camino forestal puede deteriorar la calidad de la materia prima, afectar los plazos establecidos y generar impacto ambiental no permitido, con lo cual se generan pérdidas económicas importantes. Estos caminos no pavimentados se diseñan con consideraciones especiales, dado que por lo general la vida útil requerida es más corta que un camino normal, ya que generalmente sólo soportan cargas pesadas de tránsito durante el periodo de cosecha, que dura aproximadamente una o dos temporadas (Thenoux G. , LIGNUM, 2013).

7.7. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS CAMINOS FORESTALES

7.7.1. LOCALIZACIÓN RED DE CAMINOS Y ZONAS DE MANEJO FORESTAL

La localización de los caminos forestales debe minimizar la alteración de la red de drenaje y cursos de agua, así como la cantidad de cruces de cauces, con el fin de evitar entrada de sedimentos a los mismos, para esto es necesario tomar medidas y controlar la emisión de polvo en los caminos (Gayoso & Acuña, 1999). Se considera una buena práctica la implementación de la *Franja de protección de cauces* (Figura 7-4) (Gayoso & Gayoso, 2003), que consiste en una zona comprendida entre la escorrentía del cauce y el camino forestal o tierra alta, se trata de un área de vegetación inalterada influenciada por la cercanía del agua (Belt, O’Laughlin, & Merrill, 1992).



Figura 7-4: ILUSTRACIÓN FRANJA DE PROTECCIÓN DE CAUCE, (Gayoso & Acuña, 1999) .

También es recomendable minimizar el movimiento de tierras, evitar la localización de caminos sobre o a través de cursos de agua, humedales, terrenos inundables y pendientes mayores a 65% (Gayoso & Acuña, 1999).

7.8. PROPIEADES FÍSICAS DE LOS SUELOS FORESTALES

Las propiedades físicas de los suelos forestales se desarrollan en condiciones naturales, influenciados por la vegetación permanente durante un largo período de tiempo. Estas propiedades físicas de los suelos forestales pueden ser casi permanentes a menos que se modifiquen por las operaciones de extracción, rotación de cultivos, e incendios forestales. Las propiedades más importantes de estos suelos incluyen la textura, estructura, porosidad, densidad, vacíos de aire (aireación), temperatura y la retención y movimiento de agua. Estas propiedades están relacionadas directamente a la fertilidad del suelo y la producción de biomasa forestal. Determinan además la facilidad para la penetración de las raíces, capacidad de absorción del agua por las plantas, cantidad de oxígeno y el grado de movilidad del agua en dirección vertical y horizontal. Sin embargo, las propiedades físicas del suelo son controladas en gran parte por el tamaño, distribución y la disposición de las partículas del suelo (Osman, 2013).



7.8.1. FACTOR HIDROLOGICO ASOCIADO AL ECOSISTEMA FORESTAL

El incremento del tránsito y uso de los caminos no pavimentados conlleva a un cambio en la respuesta hidrológica de la superficie del suelo, que se traduce en un aumento de la escorrentía superficial. Lo que genera arrastre de sedimento y material sin cohesionar provocando también incremento en el levantamiento de polvo en climas secos. Puede provocar acumulación de sedimento en la red de caminos e incluso en la red fluvial produciendo en ocasiones importantes irregularidades aguas abajo. Un clima adverso puede afectar y ocasionar una variación de las características físicas y químicas del camino, lo que puede provocar una disminución de la capacidad estructural del camino no pavimentado (Úbeda, 1996).



Figura 7-5: CAMINO FORESTAL CON ACUMULACIÓN DE SEDIMENTO. (Úbeda, 1996)

En los ecosistemas forestales los mayores impactos al componente ambiental hidrológico están relacionados al tipo de manejo y cosecha del bosque al provocar una disminución de la cobertura vegetal, al cruce de cauces por los equipos de cosecha, a la construcción de caminos, canchas y al transporte asociado a las actividades forestales, los cuales generan alteraciones físicas del suelo y al balance hídrico, lo que simultáneamente provoca la generación y aportación de sedimentos a los cauces (Gayoso, Alarcón, & Vergara, 2001). Considerando esto y que además existe flora y fauna que se pueden ver perjudicadas, es necesario considerar estos efectos y tratar de evitarlos al momento de diseñar los caminos.