



Facultad de Ingeniería

Escuela de Construcción Civil

“Influencia de la Incorporación de Ceniza de Cáscara de Arroz Sobre el CBR de Suelos Arcillosos en Mezclas de Suelo Cemento”

Por:

Eimi Moisés Torres Palma

**Tesis para optar al Grado de Licenciado
en Ciencias de la Construcción y al
Título de Ingeniero Constructor**

Prof. Guía: Nelson Ricardo Valdés Moya

Mayo, 2015

Dedicatoria

A mis padres Ángel Torres Lillo y Mónica Palma Castillo, por su amor, esfuerzo y apoyo incondicional en todo momento de mi vida, entregándome enseñanzas, consejos y las herramientas necesarias para desarrollarme como persona, hijo, hermano, profesional y padre.

Los adoro papá y mamá.

A mi hermana Vanessa Torres Palma, por enseñarme cada día que el esfuerzo y las noches de estudio si tendrán frutos si lo deseas. Te deseo lo mejor y siempre estaré para ti.

Te adoro hermana.

A la mujer, amiga y compañera que estuvo conmigo gran parte de este proceso entregándome amor, ánimo y apoyo incondicional, mi novia Lidia Antúnez Fernández.

Te adoro bonita.

A la chiquitita que llegó a llenar mi vida con sonrisas, dándome el aliento que día a día necesito para salir adelante, mi hija Aimee Ignacia Torres Antúnez.

Te adoro monito.

A mis abuelas, tíos y tías, primos y primas, por hacer de nuestra familia un símbolo de amor y unidad.

Los adoro.

A los angelitos que me apoyan y cuidan desde el cielo, les dedico este trabajo, y aunque hoy no estén con nosotros vivirán por siempre en mi corazón.

A Dios, por estar conmigo cada día de mi vida.

Gracias.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a todos aquellos que de una u otra manera formaron parte de este proceso, ayudando a que hoy pueda dar por finalizada esta tarea.

En primer lugar a mi profesor guía Nelson Valdés Moya, por su sabiduría, paciencia y tiempo para desarrollar este estudio, brindándome consejos para sobrellevar cada obstáculo. Además, de agradecer a esta institución, funcionarios y docentes que la componen.

A mis compañeros y amigos quienes hicieron de este proceso una experiencia próspera, inolvidable y única, llena de noches de estudio, anécdotas y buenas vivencias que recordare siempre.

A mi padrino y cuñado, Juan Torres Lillo y Jonathan Cisternas Guerra, por su voluntad y ayuda en el traslado de material.

Muchas gracias.

A mi suegra, Carmen Fernández Fuentes, por su voluntad y ayuda en gran parte de este proceso.

Muchas gracias.

Y por último, a los funcionarios del Laboratorio Mecánica de Suelos de la Universidad de Valparaíso, Don Juan Abarca y Raúl Barrera, por todo el apoyo brindado cada día de trabajo realizado.

Muchas gracias.

ÍNDICE GENERAL

Lista de figuras	9
Lista de tablas	12
Resumen	17
1. Antecedentes Generales	18
1.1. Introducción.....	18
1.2. Planteamiento del problema.....	19
1.3. Objetivos de la investigación.....	21
1.3.1. Objetivo general.....	21
1.3.2. Objetivos específicos.....	21
1.4. Hipótesis.....	21
1.5. Alcances de la investigación.....	22
1.6. Metodología de la investigación.....	23
1.7. Estructura de la tesis.....	24
2. Mecánica de Suelos, Estabilización de Suelos Arcillosos, Suelo Cemento y Ceniza de Cáscara de Arroz	25
2.1. Generalidades.....	25
2.2. Clasificación de suelos.....	25
2.2.1. Granulometría.....	25
2.2.2. Límites de Atterberg.....	26
2.2.2.1. Límite líquido.....	26
2.2.2.2 Límite plástico.....	27
2.2.2.3 Índice de plasticidad.....	27
2.2.3. Compactación de suelos.....	27
2.2.4. Relación humedad / densidad.....	27
2.2.5. Ensaye CBR.....	28
2.2.6. Sistema de clasificación de suelos.....	28
2.2.6.1. Clasificación según sistema AASHTO.....	28
2.2.6.2 Clasificación según sistema USCS.....	31
2.3. Características de las arcillas.....	33
2.3.1. Generalidades.....	33
2.3.2. Arcillas.....	33
2.3.3. Clasificación de arcillas según su estructura.....	35
2.3.3.1. Caolinitas.....	35
2.3.3.2. Montmorillonitas.....	36
2.3.3.3. Ílitas.....	36

2.3.4. Aspectos físico-químicos de las arcillas	36
2.4. Suelos arcillosos y su estabilización	37
2.4.1. Generalidades	37
2.4.1.1 Textura y composición del suelo fino	37
2.4.2. Suelos arcillosos	38
2.4.2.1. Problemáticas de los suelos arcillosos	39
2.4.3. Estabilización de suelos	40
2.4.3.1. Remoción del material inadecuado según Manual de Carreteras	40
2.4.3.2. Importancia de la estabilización de suelos	41
2.4.3.3. Tipos de estabilizaciones	41
2.4.3.3.1. Estabilización mecánica de suelos	42
2.4.3.3.2. Estabilización física de suelos	42
2.4.3.3.3. Estabilización química de suelos	43
2.5. Suelo cemento y ceniza de cáscara de arroz	43
2.5.1. Suelo cemento	43
2.5.1.1. Generalidades del suelo cemento	43
2.5.1.2. El suelo cemento en la actualidad	43
2.5.1.3 Usos del cemento en la construcción vial	44
2.5.1.3.1. Suelo mejorado o modificado con cemento	44
2.5.1.3.2. Suelo estabilizado con cemento	44
2.5.1.3.3. Suelo cemento plástico	44
2.5.1.3.4. Base granular tratada con cemento	45
2.5.1.3.5. Pavimentos unicapa de alto desempeño	45
2.5.1.3.6. Pavimentos reciclados con cemento	45
2.5.1.4. Ventajas del suelo cemento	45
2.5.1.5. Limitaciones del suelo cemento	46
2.5.2. Ceniza de cáscara de arroz (CCA)	46
2.5.2.1. Generalidades de la CCA	46
2.5.2.2. Métodos de elaboración de la CCA	48
2.5.2.2.1. Calcinación a campo abierto (o en pilas)	48
2.5.2.2.2. Calcinación en hornos (circulares o cuadrados)	48
2.5.2.2.3. Calcinación en lecho fluido	49
2.5.2.3. Propiedades del cemento más adición de CCA	50
2.5.2.3.1. Reacciones de hidratación	50
2.5.2.3.2. Resistencia a la compresión	50
2.5.2.3.3. Resistencia química	50
2.5.2.4. Composición química	50

3. Diseño de la Investigación	52
3.1 Generalidades	52
3.2. Definición de variables	52
3.2.1 Variables independientes	52
3.2.2. Variables dependientes	53
3.3. Etapa I: Caracterización del suelo	53
3.3.1. Muestreo del suelo	53
3.3.2. Clasificación del suelo	53
3.3.3. Compactación del suelo	54
3.3.4. Capacidad de soporte	54
3.3.5. Expansión volumétrica	54
3.4 Etapa II: Suelo-cemento	55
3.4.1. Análisis del suelo estabilizado con cemento	55
3.4.2. Incorporación de cemento	56
3.4.3. Compactación del suelo	56
3.4.4. Capacidad de soporte	56
3.4.5. Expansión	56
3.5. Etapa III: Suelo-cemento-CCA	57
3.5.1. Análisis del suelo estabilizado con cemento y CCA en conjunto	57
3.5.2. Incorporación de cemento y CCA	58
3.6. Etapa IV: suelo-CCA	58
3.6.1. Análisis del suelo estabilizado con CCA	58
3.6.2. Incorporación de CCA	59
4. Investigación de Laboratorio y Estudio Técnico-Económico de suelos arcillosos estabilizados con Cemento y CCA	60
4.1. Etapa I: Caracterización de los materiales constituyentes	60
4.1.1. Caracterización del suelo natural	60
4.1.1.1. Análisis granulométrico del suelo natural (Norma ASTM D-422-63)	61
4.1.1.2. Límites de Atterberg suelo natural (Norma Nch 1517/I y Nch 1517/II Of. 79)	63
4.1.1.3. Clasificación del suelo natural	67
4.1.1.4. Proctor Modificado suelo natural (Norma Nch 1534/II Of. 79)	70
4.1.1.5. Capacidad de Soporte C.B.R. suelo natural (Norma Nch 1852/II Of. 80)	74
4.1.1.6. Expansión Volumétrica suelo natural (Norma Nch 1852/II Of. 80)	78
4.1.2. Caracterización de la ceniza de cáscara de arroz (CCA)	80
4.1.2.1. Análisis granulométrico de la CCA (Norma ASTM D-422-63)	81
4.1.2.2. Peso específico de la CCA según MC-VOL. 8 anexo 2.102.10.	82

4.1.2.3. Límites de Atterberg CCA (Norma Nch 1517/I y Nch 1517/II Of. 79)	82
4.1.3. Caracterización del cemento	84
4.1.3.1. Peso específico del cemento	84
4.2. Etapa II: Suelo-cemento (suelo patrón)	85
4.2.1. Proctor Modificado suelo cemento (Norma Nch 1534/II Of. 79)	85
4.2.2. Capacidad de Soporte C.B.R. suelo cemento (Norma Nch 1852/II Of. 80)	88
4.2.3. Expansión volumétrica suelo-cemento (Norma Nch 1852/II Of. 80)	91
4.3. Etapa III: Suelo-cemento-CCA	93
4.3.1. Proctor Modificado suelo-cemento-CCA (Norma Nch 1534/II Of. 79)	93
4.3.2. Capacidad de Soporte C.B.R suelo-cemento-CCA (Norma Nch 1852/II Of. 80)	103
4.3.3. Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA (Norma Nch 1852/II Of. 80)	114
4.4. Etapa IV: Suelo-CCA	119
4.4.1. Proctor Modificado suelo-CCA (Norma Nch 1534/II Of. 79)	119
4.4.2. Capacidad de Soporte C.B.R suelo-CCA (Norma Nch 1852/II Of. 80)	125
4.4.3. Expansión volumétrica suelo-CCA (Norma Nch 1852/II Of. 80)	133
4.5. Análisis comparativo suelo natural, suelo-cemento, suelo-cemento-CCA, suelo-CCA	136
4.6. Estudio técnico económico: estabilización de suelo-cemento-CCA V/S suelo-cemento	140
4.6.1. Costos para la producción artesanal de CCA	140
4.6.1.1. Costos de equipos y herramientas para la producción de CCA	140
4.6.1.2. Costo de material: cáscara de arroz	141
4.6.1.3. Costos de mano de obra para la producción de CCA	141
4.6.1.4. Costo total para la producción de CCA	142
4.6.2. Proceso constructivo para la estabilización de suelo existente	142
4.6.3. Requerimientos mínimos de la maquinaria a utilizar	143
4.6.4. Estudio de costos	143
4.6.4.1. Bases de cálculo	143
4.6.4.2. Costos de la construcción de una carpeta de rodado de suelo-cemento-CCA	144
4.6.4.2.1. Costos de maquinaria suelo-cemento-CCA	144
4.6.4.2.2. Costos de materiales suelo-cemento-CCA	145
4.6.4.2.3. Costos de mano de obra suelo-cemento-CCA	145
4.6.4.2.4. Costo total de la estabilización suelo-cemento-CCA	145
4.6.5. Costos de la construcción de una carpeta de rodado de suelo-cemento	146
4.6.5.1. Bases de cálculo	146
4.6.5.2. Costos total de la estabilización suelo-cemento	146
5. Conclusiones y comentarios	148
5.1. Conclusiones	148
5.2. Comentarios	149

Referencias Bibliográficas	150
Anexos	152

Lista de Figuras

Figura 1.1: Metodología de la investigación	23
Figura 2.1: Curva Granulométrica tipo de un suelo	26
Figura 2.2: Carta de plasticidad	33
Figura 2.3: Esquema de la estructura de la lámina silícica	34
Figura 2.4: Esquema de una unidad hexagonal de una lámina silícica	34
Figura 2.5: Esquema de la estructura de la lámina alumínica	35
Figura 2.6: Cáscara de arroz y ceniza de cáscara de arroz	47
Figura 2.7: Horno de ladrillo para la calcinación de la cáscara de arroz	48
Figura 2.8: Calcinador de lecho fluido para cáscara de arroz	49
Figura 4.1: Homogenización del suelo	60
Figura 4.2: Almacenamiento del material	61
Figura 4.3: Granulometría promedio del suelo	62
Figura 4.4: Granulometría del suelo	62
Figura 4.5: Curva de fluidez M#1	63
Figura 4.6: Curva de fluidez M#2	64
Figura 4.7: Curva de fluidez M#3	64
Figura 4.8: Ensaye determinación del límite líquido	65
Figura 4.9: Ensaye determinación del límite plástico	67
Figura 4.10: Carta de plasticidad	68
Figura 4.11: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #1, suelo natural	70
Figura 4.12: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #2, suelo natural	71
Figura 4.13: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #3, suelo natural	72
Figura 4.14: Proctor Modificado	73
Figura 4.15: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado a 0.2" de Penetración, suelo natural	74
Figura 4.16: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado a 0.2" de Penetración, suelo natural	75
Figura 4.17: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado a 0.2" de Penetración, suelo natural	76
Figura 4.18: Ensaye de capacidad de soporte (prensa C.B.R)	77
Figura 4.19: Medición de expansión mediante dial	80
Figura 4.20: Ceniza de cáscara de arroz	80
Figura 4.21: Granulometría CCA	81
Figura 4.22: Curva de fluidez muestra CCA	82
Figura 4.23: Cemento a ocupar en la investigación	84

Figura 4.24: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #1, suelo cemento (13%).....	85
Figura 4.25: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #2, suelo cemento (13%).....	86
Figura 4.26: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #3, suelo cemento (13%).....	87
Figura 4.27: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado a 0.2" de Penetración, suelo cemento (13%).....	88
Figura 4.28: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado a 0.2" de Penetración, suelo cemento (13%).....	89
Figura 4.29: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado a 0.2" de Penetración, suelo cemento (13%).....	90
Figura 4.30: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #1, suelo-cemento-CCA (13%-10%).....	93
Figura 4.31: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #2, suelo-cemento-CCA (13%-10%).....	94
Figura 4.32: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #3, suelo-cemento-CCA (13%-10%).....	95
Figura 4.33: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #1, suelo-cemento-CCA (13%-20%).....	96
Figura 4.34: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #2, suelo-cemento-CCA (13%-20%).....	97
Figura 4.35: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #3, suelo-cemento-CCA (13%-20%).....	98
Figura 4.36: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #1, suelo-cemento-CCA (13%-30%).....	99
Figura 4.37: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #2, suelo-cemento-CCA (13%-30%).....	100
Figura 4.38: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #3, suelo-cemento-CCA (13%-30%).....	101
Figura 4.39: D.M.C.S. en suelo-cemento-CCA.....	102
Figura 4.40: Humedad óptima en suelo-cemento-CCA.....	103
Figura 4.41: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado a 0.2" de Penetración, suelo-cemento-CCA (13%-10%).....	104
Figura 4.42: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado a 0.2" de Penetración, suelo-cemento-CCA (13%-10%).....	105
Figura 4.43: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado a 0.2" de Penetración, suelo-cemento-CCA (13%-10%).....	106
Figura 4.44: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado a 0.2" de Penetración, suelo-cemento-CCA (13%-20%).....	107
Figura 4.45: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado a 0.2" de Penetración, suelo-cemento-CCA (13%-20%).....	108
Figura 4.46: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado a 0.2" de Penetración, suelo-cemento-CCA (13%-20%).....	109
Figura 4.47: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado a 0.2" de Penetración, suelo-cemento-CCA (13%-30%).....	110
Figura 4.48: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado a 0.2" de Penetración, suelo-cemento-CCA (13%-30%).....	111
Figura 4.49: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado a 0.2" de Penetración, suelo-cemento-CCA (13%-30%).....	112

Figura 4.50: C.B.R. saturado v/s porcentaje de cemento-CCA.....	113
Figura 4.51: Expansión v/s porcentaje de cemento-CCA.....	118
Figura 4.52: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #1, suelo-CCA (10%).....	119
Figura 4.53: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #2, suelo-CCA (10%).....	120
Figura 4.54: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #3, suelo-CCA (10%).....	121
Figura 4.55: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #1, suelo-CCA (20%).....	122
Figura 4.56: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #2, suelo-CCA (20%).....	122
Figura 4.57: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #3, suelo-CCA (20%).....	123
Figura 4.58: D.M.C.S. en suelo-CCA.....	124
Figura 4.59: Humedad óptima en suelo-CCA.....	125
Figura 4.60: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado a 0.2" de Penetración, suelo-CCA (10%).....	126
Figura 4.61: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado a 0.2" de Penetración, suelo-CCA (10%).....	127
Figura 4.62: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado a 0.2" de Penetración, suelo-CCA (10%).....	128
Figura 4.63: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado a 0.2" de Penetración, suelo-CCA (20%).....	129
Figura 4.64: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado a 0.2" de Penetración, suelo-CCA (20%).....	130
Figura 4.65: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado a 0.2" de Penetración, suelo-CCA (20%).....	131
Figura 4.66: C.B.R. saturado v/s porcentaje de CCA.....	132
Figura 4.67: Expansión v/s porcentaje de CCA.....	136
Figura 4.68: Comparación de D.M.C.S.....	137
Figura 4.69: Disminución de D.M.C.S.....	138
Figura 4.70: Comparación de C.B.R.....	138
Figura 4.71: Disminución de C.B.R.....	139
Figura 4.72: Comparación de Expansión volumétrica.....	139
Figura 4.73: Aumento de expansión.....	140

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Clasificación de suelos AASHTO	30
Tabla 2.2: Clasificación de suelos según sistema USCS para suelos finos	32
Tabla 2.3: Clasificación de suelos según sistema USCS para suelos gruesos	32
Tabla 2.4: Expansividad de las arcillas	38
Tabla 2.5: Cantidad de ceniza producida por distintos cereales	47
Tabla 2.6: Composición química de las cenizas de cáscara de arroz	51
Tabla 2.7: Composición química del cemento	51
Tabla 3.1: Ensayos a realizar Etapa I	54
Tabla 3.2: Factoriales de diseño, suelo cemento	55
Tabla 3.3: Porcentajes óptimos de cemento según AASHTO	56
Tabla 3.4: Ensayos a realizar Etapa II	57
Tabla 3.5: Factoriales de diseño, suelo-cemento-CCA	57
Tabla 3.6: Ensayos a realizar Etapa III	58
Tabla 3.7: Factoriales de diseño, suelo-CCA	59
Tabla 3.8: Ensayos a realizar Etapa IV	59
Tabla 4.1: Granulometría promedio del suelo	61
Tabla 4.2: Contenido de humedad y nº de golpes, M #1	63
Tabla 4.3: Contenido de humedad y nº de golpes, M #2	63
Tabla 4.4: Contenido de humedad y nº de golpes, M #3	64
Tabla 4.5: Humedad para la determinación del límite plástico, M #1	65
Tabla 4.6: Humedad para la determinación del límite plástico, M #2	66
Tabla 4.7: Humedad para la determinación del límite plástico, M #3	66
Tabla 4.8: Índice de plasticidad M #1, 2 y 3	67
Tabla 4.9: Expansividad del suelo según Ávila	69
Tabla 4.10: Resultados proctor modificado M #1	70
Tabla 4.11: Resultados proctor modificado M #2	71
Tabla 4.12: Resultados proctor modificado M #3	72
Tabla 4.13: Promedio resultados proctor modificado	73
Tabla 4.14: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #1, saturado	74
Tabla 4.15: Determinación de C.B.R. al 95% de la D.M.C.S M #1, saturado	74
Tabla 4.16: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #2, saturado	75
Tabla 4.17: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado	75
Tabla 4.18: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #3, saturado	76
Tabla 4.19: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado	76
Tabla 4.20: C.B.R. promedio suelo natural, saturado	77

Tabla 4.21: Expansión volumétrica suelo natural, M #1	78
Tabla 4.22: Expansión volumétrica suelo natural, M #2	78
Tabla 4.23: Expansión volumétrica suelo natural, M #3	79
Tabla 4.24: Expansión volumétrica (%) promedio M #1, 2 y 3	79
Tabla 4.25: Granulometría de la CCA	81
Tabla 4.26: Contenido de humedad y n° de golpes, muestra CCA	82
Tabla 4.27: Humedad para la determinación del límite plástico, muestra CCA	83
Tabla 4.28: Índice de plasticidad, muestra CCA	83
Tabla 4.29: Porcentajes óptimos de cemento según AASHTO	85
Tabla 4.30: Resultados proctor modificado M #1, suelo cemento	85
Tabla 4.31: Resultados proctor modificado M #2, suelo cemento	86
Tabla 4.32: Resultados proctor modificado M #3, suelo cemento	86
Tabla 4.33: Promedio resultados proctor modificado	87
Tabla 4.34: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #1, saturado, suelo cemento	88
Tabla 4.35: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado, suelo cemento	88
Tabla 4.36: Determinación C.B.R. al 0.2" de penetración M #2, saturado, suelo cemento	89
Tabla 4.37: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado, suelo cemento	89
Tabla 4.38: Determinación C.B.R. al 0.2" de penetración M #3, saturado, suelo cemento	90
Tabla 4.39: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado, suelo cemento	90
Tabla 4.40: C.B.R. promedio suelo cemento, saturado	90
Tabla 4.41: Expansión volumétrica suelo cemento, M #1	91
Tabla 4.42: Expansión volumétrica suelo cemento, M #2	91
Tabla 4.43: Expansión volumétrica suelo cemento, M #3	91
Tabla 4.44: Expansión volumétrica (%) promedio M #1, 2 y 3	92
Tabla 4.45: Resultados proctor modificado M #1, suelo-cemento-CCA	93
Tabla 4.46: Resultados proctor modificado M #2, suelo-cemento-CCA	94
Tabla 4.47: Resultados proctor modificado M #3, suelo-cemento-CCA	94
Tabla 4.48: Promedio resultados proctor modificado, suelo-cemento-CCA (13%-10%)	95
Tabla 4.49: Resultados proctor modificado M #1, suelo-cemento-CCA	96
Tabla 4.50: Resultados proctor modificado M #2, suelo-cemento-CCA	96
Tabla 4.51: Resultados proctor modificado M #3, suelo-cemento-CCA	97
Tabla 4.52: Promedio resultados proctor modificado, suelo-cemento-CCA (13%-20%)	98
Tabla 4.53: Resultados proctor modificado M #1, suelo-cemento-CCA	99
Tabla 4.54: Resultados proctor modificado M #2, suelo-cemento-CCA	99
Tabla 4.55: Resultados proctor modificado M #3, suelo-cemento-CCA	100
Tabla 4.56: Promedio resultados proctor modificado, suelo-cemento-CCA (13%-30%)	101
Tabla 4.57: Resumen de la D.M.C.S. y H. Óptima Suelo-cemento-CCA	102
Tabla 4.58: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #1, saturado, suelo-cemento-CCA	103

Tabla 4.59: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado, suelo-cemento-CCA	104
Tabla 4.60: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #2, saturado, suelo-cemento-CCA	104
Tabla 4.61: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado, suelo-cemento-CCA	105
Tabla 4.62: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #3, saturado, suelo-cemento-CCA	105
Tabla 4.63: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado, suelo-cemento-CCA	106
Tabla 4.64: C.B.R. promedio suelo-cemento-CCA, saturado	106
Tabla 4.65: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #1, saturado, suelo-cemento-CCA	107
Tabla 4.66: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado, suelo-cemento-CCA	107
Tabla 4.67: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #2, saturado, suelo-cemento-CCA	108
Tabla 4.68: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado, suelo-cemento-CCA	108
Tabla 4.69: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #3, saturado, suelo-cemento-CCA	109
Tabla 4.70: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado, suelo-cemento-CCA	109
Tabla 4.71: C.B.R. promedio suelo-cemento-CCA, saturado	109
Tabla 4.72: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #1, saturado, suelo-cemento-CCA	110
Tabla 4.73: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado, suelo-cemento-CCA	110
Tabla 4.74: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #2, saturado, suelo-cemento-CCA	111
Tabla 4.75: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado, suelo-cemento-CCA	111
Tabla 4.76: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #3, saturado, suelo-cemento-CCA	112
Tabla 4.77: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado, suelo-cemento-CCA	112
Tabla 4.78: C.B.R. promedio suelo-cemento-CCA, saturado	112
Tabla 4.79: Resumen del C.B.R. saturado, muestra suelo-cemento-CCA	113
Tabla 4.80: Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA, M #1	114
Tabla 4.81: Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA, M #2	114
Tabla 4.82: Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA, M #3	114
Tabla 4.83: Expansión volumétrica (%) promedio M #1, 2 y 3	115
Tabla 4.84: Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA, M #1	115
Tabla 4.85: Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA, M #2	115
Tabla 4.86: Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA, M #3	116
Tabla 4.87: Expansión volumétrica (%) promedio M #1, 2 y 3	116
Tabla 4.88: Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA, M #1	116
Tabla 4.89: Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA, M #2	117
Tabla 4.90: Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA, M #3	117
Tabla 4.91: Expansión volumétrica (%) promedio M #1, 2 y 3	117
Tabla 4.92: Resumen de la expansión volumétrica, muestra suelo-cemento-CCA	118
Tabla 4.93: Resultados proctor modificado M #1, suelo-CCA	119
Tabla 4.94: Resultados proctor modificado M #2, suelo-CCA	120
Tabla 4.95: Resultados proctor modificado M #3, suelo-CCA	120
Tabla 4.96: Promedio resultados proctor modificado, suelo-CCA (10%)	121

Tabla 4.97: Resultados proctor modificado M #1, suelo-CCA	121
Tabla 4.98: Resultados proctor modificado M #2, suelo-CCA	122
Tabla 4.99: Resultados proctor modificado M #3, suelo-CCA	123
Tabla 4.100: Promedio resultados proctor modificado, suelo-CCA (20%)	123
Tabla 4.101: Resumen de la D.M.C.S. y H. Óptima Suelo-cemento-CCA	124
Tabla 4.102: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #1, saturado, suelo-CCA	125
Tabla 4.103: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado	126
Tabla 4.104: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #2, saturado, suelo-CCA	126
Tabla 4.105: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado	127
Tabla 4.106: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #3, saturado, suelo-CCA	127
Tabla 4.107: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado	128
Tabla 4.108: C.B.R. promedio suelo-CCA, saturado	128
Tabla 4.109: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #1, saturado, suelo-CCA	129
Tabla 4.110: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado	129
Tabla 4.111: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #2, saturado, suelo-CCA	130
Tabla 4.112: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado	130
Tabla 4.113: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #3, saturado, suelo-CCA	131
Tabla 4.114: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado	131
Tabla 4.115: C.B.R. promedio suelo-CCA, saturado	131
Tabla 4.116: Resumen del C.B.R. saturado, muestra suelo CCA	132
Tabla 4.117: Expansión volumétrica suelo-CCA, M #1	133
Tabla 4.118: Expansión volumétrica suelo-CCA, M #2	133
Tabla 4.119: Expansión volumétrica suelo-CCA, M #3	133
Tabla 4.120: Expansión volumétrica (%) promedio M #1, 2 y 3	134
Tabla 4.121: Expansión volumétrica suelo-CCA, M #1	134
Tabla 4.122: Expansión volumétrica suelo-CCA, M #2	134
Tabla 4.123: Expansión volumétrica suelo-CCA, M #3	135
Tabla 4.124: Expansión volumétrica (%) promedio M #1, 2 y 3	135
Tabla 4.125: Resumen de la expansión volumétrica, muestra suelo-cemento-CCA	135
Tabla 4.126: Resumen de resultados obtenidos	136
Tabla 4.127: Análisis comparativo	137
Tabla 4.128: Costos de equipos y herramientas	141
Tabla 4.129: Costo de material	141
Tabla 4.130: Costos de mano de obra	141
Tabla 4.131: Costos total producción CCA	142
Tabla 4.132: Costos maquinaria	144
Tabla 4.133: Costos de materiales	145
Tabla 4.134: Costos de mano de obra	145

Tabla 4.135: Costos total de construcción suelo-cemento-CCA	145
Tabla 4.136: Costos total de construcción suelo-cemento	146

Resumen

Los suelos arcillosos en la construcción tienen la particularidad de ser inestables volumétricamente y con esto reducir su capacidad de soporte al verse frente a la presencia de agua, es por este motivo que no son utilizados y son sustituidos por suelos con mejores características y propiedades o siendo mejorados a través de algún tipo de estabilización, generalmente química.

Es por ello que en este estudio se busca mejorar un suelo arcilloso mediante cemento y ceniza de cáscara de arroz. Lo que se propone en la presente tesis, es conocer la influencia de la ceniza de cáscara de arroz trabajando en conjunto con el cemento, aumentando aún más la capacidad de soporte C.B.R. y disminuir la expansión volumétrica en este tipo de suelos.

Luego de variados ensayos de laboratorio, los resultados obtenidos indican que la ceniza de cáscara de arroz no trabaja positivamente en la mezcla, disminuyendo la capacidad de soporte C.B.R. un 0,84% con la incorporación del 10% de ceniza de cáscara de arroz, disminuyendo aún más con la incorporación del 20 y 30% de ceniza. Además de producir un aumento en la expansión volumétrica de un 8% con la incorporación del 10% de ceniza de cáscara de arroz, aumentando de igual manera para el 20 y 30% de ceniza de cáscara de arroz.

Palabras claves: Suelo arcilloso, Capacidad de soporte, Expansión volumétrica, Estabilización, Ceniza de cáscara de arroz.

1. Antecedentes Generales

1.1. Introducción

Cuando un suelo posee resistencia suficiente para no sufrir deformaciones ni desgastes admisibles por la acción del uso o de los agentes atmosféricos y conserva además esta condición bajo los efectos climatológicos normales en la localidad, se dice que el suelo es estable (Hidalgo, 2007)

El suelo en su condición natural posee a veces la composición granulométrica y la plasticidad así como el grado de humedad necesario para que, una vez apisonado, presente las características que lo hacen utilizable para la estructura a recibir.

Cuando esto no sucede y el suelo no es apto para recibir la estructura de pavimento, ya que en algunos casos hay suelos que son difícil de compactar o no proporcionan una aceptable capacidad de soporte para la construcción proyectada, tal es el caso de los suelos que se encuentran bajo el tamiz 0.08 mm, como lo son los suelos limosos o arcillosos, debido a que estos tienen una alta plasticidad, los cuales presentan una gran sensibilidad ante la humedad afectando principalmente a su estabilidad volumétrica y capacidad portante (Metha, 1994; Bentur, 2002). Ante situaciones como estas, solo existen dos soluciones capaces de suplir este problema. Una opción es eliminar el material existente, reemplazándolo por un material graduado y estandarizado en planta y de características normalizadas, la segunda opción es mejorar las condiciones y propiedades del suelo existente evitando la remoción de escombros a través de una estabilización del suelo, reduciendo costos y tiempo (Bentur, 2002).

Estas soluciones presentan desventajas las cuales para la primera opción son: en un primer lugar la escases de recursos naturales, esto producto de la alta demanda por estos materiales de construcción, y en un segundo lugar los costos de transportes, ya que a medida que las cantidades de material para la construcción de caminos disminuyen, las distancias a las que es necesario transportar estos materiales aumentan. Con esto se producen costos más elevados y con esto una cantidad de tiempo considerable. Es por esta razón que se resuelve necesario presentar una alternativa que permita la utilización del suelo existente.

Otro problema que aqueja no solo a nuestro país sino a todo el mundo son los residuos que se acopian en predios acumulándose de manera inmensurable, es por esta razón que surge la posibilidad de utilizar residuos con bienes científicos y tecnológicos que ayuden y contribuyan al desarrollo social de las personas (Sengel, 2003).

Es por estas razones que se propone realizar una estabilización mezclando cemento y ceniza de cáscara de arroz con un suelo bajo el tamiz 0.08, de manera de aportar al suelo capacidad portante, reduciendo la sensibilidad a la humedad y disminuir la expansión volumétrica de estos suelos, propiedades que serán analizadas mediante ensayos que dictan las normas vigentes. Igualmente se quiere ayudar a zonas donde este desecho (cáscara de arroz) se acumula en grandes cantidades (durante 1999, se acumularon 400.000 toneladas de cáscara de arroz), de esta manera ayudando al desarrollo sustentable en la zona.

Respecto a la alternativa que se propone, no existen estudios previos, pero la ceniza de cáscara de arroz se ha estudiado como adición al cemento, alcanzando propiedades similares obteniendo buenos resultados por parte de esta.

1.2. Planteamiento del problema

Tal como lo plantea Barai (2001), la utilización de tierra o suelo natural como material de construcción data de tiempos inmemorables. Sin embargo, a pesar de sus buenas características aislantes y resistentes, el suelo presenta limitaciones en su aplicación, ya que su resistencia mecánica es reducida, es vulnerable a la humedad y se erosiona por acción de agentes externos (Miles, 2006). Lambe y Whitman (1999), agregan que el suelo es el material más abundante de nuestro planeta y muchas veces el único recurso local con el que cuentan los ingenieros para desarrollar sus proyectos, estos recursos son aprovechados en las construcciones de vialidad en su estado natural, pero en algunos casos necesitan ser mejorados cuando no se presentan las condiciones esperadas en el suelo que recibirá la estructura de pavimento (Junco, 2011).

El suelo posee un grupo importante de ventajas como material de construcción, entre ellas, que es un material inocuo, no contiene ninguna sustancia tóxica, es reciclable, fácil de obtener localmente y con poco gasto energético (Hidalgo, 2007).

Aguilar et al. (2005) señalan que los suelos desde un punto de vista geotécnico, son aquellos capaces de deformarse sin agrietarse, cambiando su consistencia al variar el contenido de agua afectando principalmente a la resistencia mecánica y estabilidad volumétrica del suelo en cuestión, debilidades que suelen provocar agrietamientos o asentamientos después de la exposición al tráfico y al medio ambiente en la estructura de pavimento. El alto costo en el retiro de estos suelos o escombros para así incluir un suelo con mejores características suele ser la opción más común, pero en este tiempo no la más acertada, ya que hoy se busca considerar métodos más económicos para construir o reconstruir caminos (Mayorga, 2005).

Debido a lo anterior, Ladeiro (1994) señala que a pesar de su buen comportamiento el suelo no se comporta de la mejor manera, por lo que se ve la necesidad de tratar el suelo mediante tratamientos de estabilización. Crespo (1998) define este tratamiento como un proceso químico o mecánico que consiste en someter a los suelos naturales a ciertos tratamientos para así aprovechar mejor sus cualidades. Topcu y Guncan (1995), agregan la necesidad que ha tenido el hombre de mezclar el suelo con un material que mejore las características de este, viene de civilizaciones como la Inca o la Azteca, los cuales desarrollaron caminos estabilizados, usando cal como distintos aglomerantes puzolánicos para sus diversas actividades. Ya en el siglo XX se lograron avances en la producción de conglomerantes, donde se produce el auge de la industria del cemento (Topcu, 1995). Con el tiempo, se crearon las condiciones óptimas para la realización de muchos experimentos en mezclas de suelo mediante agentes estabilizadores como la cal o puzolanas, asfalto y cemento que mostraron las posibilidades de aprovechamiento de suelos existentes, modificados en mayor o menor grado por la mezcla de estos (Rakshvir et al., 2006), con el fin de mejorar algunas de sus propiedades, disminuyendo costos y efectos ambientales, en especial, si dichos materiales provienen de subproductos industriales, agrícolas o de reciclaje, actualizando las técnicas de mejoramiento de suelos mediante la intervención de materiales alternativos (Alaejos, 2006).

Según Sánchez et al. (2000) uno de los agentes estabilizadores más utilizados y que se ha probado con bastante éxito mejorando suelos es el cemento, donde este al mezclarse con el suelo provoca una reacción, donde convenientemente pulverizado, con determinadas porciones de agua y cemento obtendrá una mayor densidad (Buzzy 2009).

Higuera et al. (2001) sugiere el uso de desechos industriales y agrícolas como el segmento en la producción de cemento Portland donde ha contribuido de manera importante en la práctica de desarrollo sustentable. El aumento en la demanda de cemento coincide con el uso de materiales aglomerantes suplementarios para minimizar el consumo de cemento.

La cascara de arroz es el mayor residuo resultante de la producción agrícola de granos y su disposición final es uno de los mayores problemas existentes en los países productores de arroz. Cada 4 toneladas de arroz producidas, una tonelada es cascara de arroz (Ali et al. 1992). Velupillai et al. (1996) estimaron que más de 100 millones de toneladas de cascara de arroz son generadas cada año en el mundo. Para reducir el residuo de volumen a depositar la cascara de arroz es quemada, las diferentes alternativas de quema de cascara de arroz traen un nuevo problema, la disposición final de la ceniza producida (Sengel, 2003).

Los suelos arenosos o limosos muchas veces no presentan propiedades adecuadas como materiales de capas de base o sub-base de pavimentos (Gonzales, 2008).

Investigaciones fuera del país logran comprobar que la evaluación de la estabilización de suelos arenosos o limosos con adición de ceniza de cascara de arroz y cal es una alternativa de interés, siendo que la ceniza de cascara de arroz está compuesta entre 90-96% por sílice, donde esta proporcionaría a los suelos la sílice necesaria para reaccionar con la cal y formar productos puzolánicos, obteniéndose así, materiales más resistentes, menos deformables y más durables (Juliano, 1985).

Pese a que existen numerosos estudios en cuanto al uso y a las propiedades que tiene el suelo cemento, no todo está dicho, ya que surge la inquietud de incorporar a la mezcla nuevos materiales que mejoren sus propiedades e imagen ante el mercado, junto con esta tendencia de innovar y crear nuevas y mejores soluciones constructivas, se estudiará la incorporación de ceniza de cáscara de arroz en un suelo cemento.

El estudio con esta mezcla suelo-cemento-ceniza de cascara de arroz se concentrara en el mejoramiento de este suelo en base a este estabilizante, contemplando ensayos como granulometría, límites de atterberg, proctor, CBR y expansión. Todos estos ensayos son de vital importancia en busca de una solución empleada, encontrando así la dosis adecuada que sirva como adición al suelo cemento, ofreciéndole así capacidad de soporte al suelo, mejorando sus propiedades y aportando de buena manera al medio ambiente

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

- Evaluar el efecto y costo que produce la adición de ceniza de cáscara de arroz sobre el CBR de suelos arcillosos en mezclas de suelo cemento.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar una dosis óptima de ceniza de cáscara de arroz que aumente al máximo la razón de soporte (CBR) del suelo estabilizado con cemento.
- Establecer los costos asociados que involucra estabilizar un suelo cemento con la adición de ceniza de cáscara de arroz.
- Hallar condiciones de proyecto y trabajo para que esta solución pueda ser empleada en algún tipo de uso vial.

1.4. Hipótesis

- La adición de cemento y ceniza de cáscara de arroz, otorga un mejor CBR del suelo arcilloso en comparación al mismo estabilizado con cemento.

1.5. Alcances de la investigación

- Se trabajará con ceniza de cáscara de arroz, la cual procede de residuos agrícolas de grano.
- La investigación se desarrollará con suelo cemento.
- Este estudio se desarrollará con suelos arcillosos extraídos de la quinta región.
- Se utilizará cemento Portland puzolánico de grado corriente para hacer este tipo de suelo.
- La cáscara de arroz será quemada mediante fuego directo.
- Todas las pruebas, análisis y conclusiones se basaran en la información obtenida en los ensayos realizados en el laboratorio de la Escuela de Construcción Civil de la Universidad de Valparaíso.

1.6. Metodología de la investigación

En el desarrollo de la investigación los pasos a seguir serán los indicados en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 1.1 que se muestra a continuación:

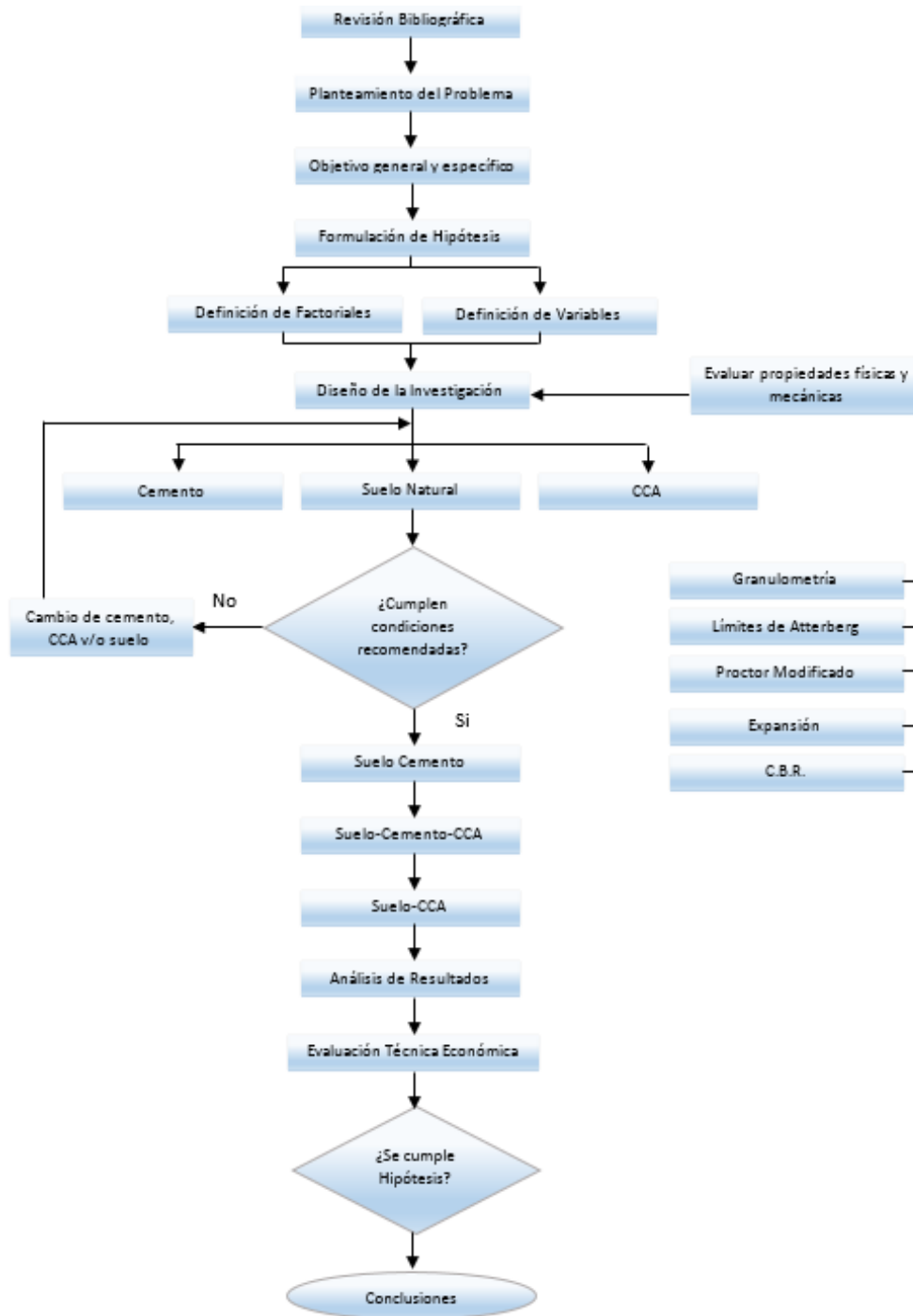


Figura 1.1: Metodología de la investigación

1.7. Estructura de la tesis

La presente tesis está organizada en 5 capítulos con el fin de dar cumplimiento a los objetivos establecidos en esta investigación.

En el capítulo I se plantea el problema que da origen a la presente investigación, justificando las razones de su elección y así, exponer lo que se espera conseguir con el estudio, estableciendo objetivos y alcances.

El capítulo II forma parte del marco teórico, donde se destacan principalmente términos, definiciones, características y normas asociadas a la mecánica de suelos, arcillas, suelos arcillosos en particular, y por último se presentan propiedades y aplicaciones en la construcción de los estabilizantes a utilizar, el cemento y la ceniza de cáscara de arroz.

En el capítulo III se describe el programa experimental respecto a las variables que estarán involucradas, siendo éste uno de los más importantes debido que a través de lo planteado en este capítulo se debe lograr conseguir los objetivos propuestos en esta investigación.

El capítulo IV presenta el análisis de resultados obtenidos, a partir de los distintos ensayos de laboratorio realizados, además de establecer un estudio técnico y económico a la solución suelo-cemento-ceniza de cáscara de arroz con mejores resultados en términos de expansión y soporte determinados previamente en el Capítulo III.

El capítulo V presenta las conclusiones obtenidas en función a los objetivos planteados, trabajo experimental y análisis de costo efectuado.

2. Mecánica de Suelos, Estabilización de Suelos Arcillosos, Suelo Cemento Y Ceniza de Cáscara de Arroz

2.1. Generalidades

La mecánica de suelos es la aplicación de las leyes de la mecánica y la hidráulica a los problemas de ingeniería que tratan con sedimentos y otras acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas, producidas por la desintegración mecánica o la descomposición químicas de la rocas, independientemente de que tengan o no materia orgánica (Escobar, 1992).

Del mismo modo, señala que la mecánica de suelos es la aplicación de la mecánica a los problemas geotécnicos. Ella estudia las propiedades, comportamiento y utilización del suelo como material estructural, de tal modo que las deformaciones y resistencia del suelo ofrezcan seguridad, durabilidad y estabilidad de las estructuras (Escobar, 1992).

2.2. Clasificación de suelos

La clasificación de suelos es una categorización de tierras basado en características distintivas y en criterios de uso. Una clasificación de suelos es muy dinámica, en sí mismo de la estructura del sistema, a las definiciones de clases, y finalmente en la aplicación a campo (Sergio Vera A., 2001).

2.2.1. Granulometría

En cualquier masa de suelo, los tamaños de las partículas varían considerablemente. Para clasificar apropiadamente un suelo se debe conocer su distribución granulométrica, es decir, la distribución en porcentaje de los distintos tamaños dentro de un suelo.

La distribución de granulométrica de partículas de tamaño superior a 0.08 mm se determina generalmente mediante un análisis granulométrico por tamizado.

El análisis granulométrico por tamizado se efectúa en laboratorio de acuerdo a la norma NCh 165 Of. 77, tomando una cantidad medida de suelo seco, bien desmenuzado y pasándolo a través de una serie de tamices (cuyo tamaño de malla suele ir disminuyendo en progresión geométrica de razón dos), agitando el conjunto. La cantidad de suelo retenido en cada tamiz se pesa y se determina el porcentaje acumulado de material que pasa por cada tamiz.

El porcentaje de material que pasa por cada tamiz, determinado de la forma anterior, se representa en un gráfico semilogarítmico. El diámetro de la partícula se representa en una escala logarítmica (abscisas), y el porcentaje de material que pasa se representa en una escala aritmética (ordenada). En la figura 2.1. se muestra una curva tipo de un suelo.

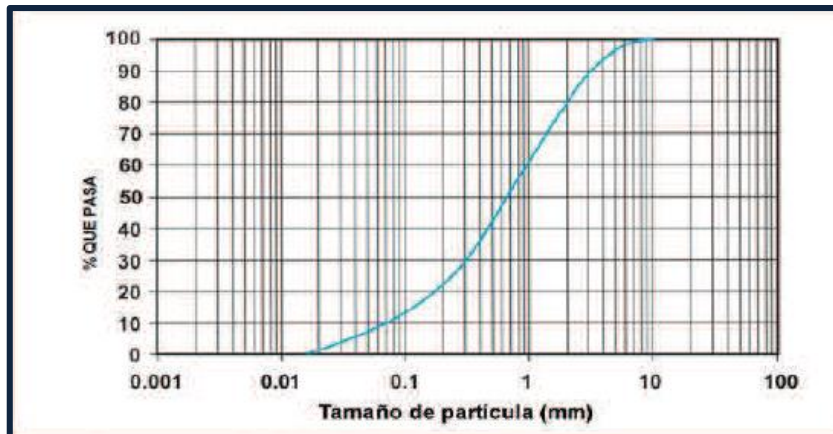


Figura 2.1: Curva granulométrica tipo de un suelo

Fuente: En Rudisky I. (2013)

2.2.2. Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos. El nombre de estos es debido al científico sueco Albert Mauritz Atterberg (1846-1916).

El concepto de un suelo como material que puede presentarse en varios estados, según su contenido de humedad, resulta muy útil. Cuanto mayor sea la cantidad de agua que contiene un suelo, menor será la interacción entre partículas adyacentes y más se aproximara el suelo en su comportamiento al de un líquido.

Los límites se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino solo pueden existir cuatro estados de consistencia según la humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido, cuando está seco. Al agregarle agua, poco a poco va pasando sucesivamente a los estados semisólido, plástico y finalmente líquido. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de unos estados a otros se denominan límite líquido, límite plástico y límite de retracción o de contracción.

2.2.2.1 Limite líquido

Esta propiedad se mide en laboratorio de acuerdo a la norma NCh 1517/1. Of. 79 (V8-MC, 8.102.3), en que una mezcla de suelo y agua, capaz de ser moldeada, se deposita en la cuchara de Casagrande, y se golpea consecutivamente contra la base de la máquina, haciendo girar la manivela, hasta que la zanja previamente cortada, se cierra en una longitud de 12 mm (1/2"). Si el número de golpes para que cierre la zanja es de 25, la humedad del suelo (razón peso de agua / peso de suelo seco) corresponde al límite líquido. Dado que no siempre es posible que la zanja se cierre en la longitud de 12 mm exactamente con 25 golpes, existen dos métodos para determinar el límite líquido: un método mecánico corresponde en graficar el número de golpes en coordenadas logarítmicas, contra el contenido de humedad correspondiente, en coordenadas normales, e interpolar para la humedad correspondiente a los 25 golpes; la humedad obtenida es el límite líquido. Según el método puntual, multiplicar por un factor (que depende del número de golpes) la humedad obtenida y obtener el límite líquido como el resultado de tal multiplicación.

2.2.2.2. Limite plástico

Esta propiedad se mide en laboratorio de acuerdo a la norma NCh 1517/2. Of. 79 (V8-MC, 8.102.4), consiste en medir el contenido de humedad para el cual no es posible moldear un cilindro en el suelo con un diámetro de 3 mm. Para esto, se realiza una mezcla de agua y suelo, la cual se amasa entre los dedos o entre el dedo índice y una superficie inerte, hasta conseguir un cilindro de 3 mm de diámetro. Al llegar a este diámetro, se desarma el cilindro, y se vuelve amasar hasta lograr nuevamente un cilindro de 3 mm. Esto se realiza sucesivamente hasta que el cilindro no obtenga la dimensión deseada. Con ese contenido de humedad, el suelo se vuelve quebradizo (por perder humedad) o pulverulento. Se mide el contenido de humedad, el cual corresponde al límite plástico.

2.2.2.3. Índice de plasticidad

El índice de plasticidad (IP), se obtiene como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico e indica la magnitud del intervalo de humedades en el cual el suelo posee consistencia plástica. Se recomienda realizar este procedimiento al menos tres veces, con el fin de disminuir los errores de interpretación o medición.

2.2.3. Compactación de suelos

La compactación de suelos es el proceso artificial por el cual las partículas de suelo son obligadas a estar más en contacto las unas con las otras, mediante una reducción del índice de vacíos, empleando medios mecánicos, lo cual se traduce en un mejoramiento de las propiedades. Su importancia está en el aumento de la resistencia y la disminución de la capacidad de deformación que se obtiene al someter al suelo a técnicas convenientes, que aumentan el peso específico seco, disminuyendo sus vacíos.

Los fundamentos de la compactación no están bien explicados, sin embargo, se reconoce que el agua juega un papel importante, especialmente en suelos finos. Es así como existe un contenido de humedad óptima para suelos finos, para el cual el proceso de compactación dará un peso específico seco máximo. Para bajos contenidos de humedad, el agua está en forma capilar produciendo compresiones entre las partículas constituyentes del suelo, lo cual tiende a la deformación de grumos difícilmente desintegrables que dificultan la compactación.

De entre todos los factores que influyen en la compactación, se puede decir que son dos los más importantes: uno es el contenido de agua del suelo, antes de iniciarse el proceso de compactación y la energía específica, empleada en dicho proceso. Por energía específica se entiende la energía de compactación suministrada al suelo por unidad de volumen (Giménez Salas, J. A. y coautores, 1992)

2.2.4. Relación humedad / densidad

Para llevar a cabo una compactación adecuada y lograr así una densidad máxima, se han desarrollado ensayos que consideran los factores principales que afectan a la densidad. De esta manera se han creado metodologías que ayudan a los estudios y cálculos de diseño. El ensayo de laboratorio para la evaluación de la densidad máxima de un suelo se conoce como la prueba Proctor. Este ensayo se basa en la norma NCh 1534 I / II (V8-MC, 8.102.7), para determinar la densidad máxima de un suelo compactado y su correspondiente humedad – densidad y que además contenga más de un 12% de partículas menores que 0.08 mm. En el caso de suelos que posean un tamaño máximo nominal hasta 80 mm, que contengan hasta un 12% en masa de partículas menores que 0.08 mm, que la compactación

por impacto de estos no produzca una curva bien definida de relación humedad-densidad y que además la densidad máxima por impacto resulte generalmente menor que la obtenida por métodos vibratorios, la obtención de la densidad máxima y mínima de este suelo se recomendará obtenerla mediante el ensayo de Densidad Relativa.

Determinación de la densidad máxima compactada seca:

$$DMCS = \left\{ \frac{D_h}{1 + \left(\frac{W_o}{100} \right)} \right\}$$

Dónde: DMCS: Densidad máxima compactada seca (g/cm³)

D_h: Densidad humedad del suelo compactado (g/cm³)

W_o: Humedad óptima del suelo compactado (%)

2.2.5. Ensaye CBR

Conocido como Razón de Soporte de California (CBR), es un ensaye que se basa en la norma NCh 1852 Of. 81 (V8-MC, 8.102.11), este efectúa la determinación de la razón de capacidad de suelos. Este método establece el procedimiento para determinar un índice de resistencia de los suelos y se realiza a suelos compactados en laboratorio, con la humedad óptima y niveles de energía variables. Consiste en medir la presión necesaria para hacer penetrar un pistón de 50 mm de diámetro en una masa de suelo compactada en un molde cilíndrico de acero, a una velocidad de 2,27 mm/min, para producir deformaciones de hasta 12,7 mm (1/2"). El índice de 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 que se le asigna un valor de 100%. Para la ejecución del ensaye se compactan al menos tres probetas con la humedad óptima y niveles de densidad variables.

2.2.6. Sistema de clasificación de suelos

Un sistema de clasificación de los suelos es una agrupación de estos con características semejantes. El propósito es estimar en forma fácil las propiedades de un suelo por comparación con otros del mismo tipo, cuyas características se conocen.

2.2.6.1. Clasificación según sistema AASHTO

La clasificación se realiza basada en el tamaño del grano y en la plasticidad, de acuerdo a este sistema el suelo es clasificado en siete grupos principales: desde A-1 hasta A-7; los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son suelos grueso granulares con un 35% o menos pasa por la malla n° 200, y los que presentan una cantidad superior al 35% son clasificados en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7, estos son los suelos finos o materiales limosos y arcillosos.

La clasificación es basada en los siguientes criterios:

- Tamaño de grano: Se distinguen tres tamaños principales: grava, arena y finos (limo y arcilla). Los bloques de roca (tamaño superior a los 75 mm.) encontrados dentro de la muestra de suelo, se excluyen de la porción de análisis para la clasificación, pero se registra la cantidad presente.
- Plasticidad: El término limo es aplicado a aquellas fracciones finas donde el índice de plasticidad es inferior o igual a 10, el término arcilloso a las fracciones con plasticidad superior o igual a 11.
- Índice de grupo (IG): Para evaluar la calidad de un suelo desde el punto de vista de vías, se desarrolló una expresión matemática conocida como índice de grupo o subgrupo: La fórmula para el cálculo es la siguiente:

$$IG = (F - 35) (0,2 + (0,005 (LL - 40))) + 0,01 (F - 15) (IP - 10)$$

Donde:

- F es la fracción del suelo que pasa por la malla n° 200.
- LL es el límite líquido del suelo.
- IP es el índice de plasticidad del suelo.

Algunas reglas con respecto al uso de esta ecuación son las siguientes:

- Si el valor obtenido es negativo, se debe asumir como $IG = 0$.
- No hay un límite superior para el índice de grupo.
- El IG debe redondearse a valores enteros: Por ejemplo si el valor obtenido es $IG = 3,3$, realmente es $IG = 3$ o si es $IG = 3,5$, realmente es $IG = 4$.
- Para los grupos A-2-6 y A-2-7, el índice de grupo se calcula con la segunda parte de la ecuación, dependiendo solo del IP.
- En general, la calidad en el comportamiento de un suelo cuando está como sub-base es inversamente proporcional al índice de grupo.

Tabla 2.1: Clasificación de suelos AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)							Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
	A-1		A-3 ^A	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia											
Límite líquido	...	...	...	B				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.	N.P.	N.P.	B				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. ^B
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

Fuente: En Rudisky I. (2013)

Donde:

- A-1-a Principalmente gravas con o sin partículas finas de granulometría bien definidas.
- A-1-b Arena con o sin partículas finas de granulometría bien definidas.
- A-2-4 Materiales granulares con partículas finas limosas.
- A-2-5 Intermedio.
- A-2-6 Materiales granulares con partículas finas arcillosas.
- A-2-7 Intermedio.
- A-3 Arena de granulometría deficiente que casi no contiene partículas finas ni gravas.
- A-4 Principalmente partículas finas limosas.
- A-5 tipos de suelo poco frecuentes que contienen partículas finas limosas, generalmente elásticas y difíciles de compactar.
- A-6 Contienen partículas finas limosas o arcillosas con un límite líquido bajo.
- A-7-5 Las arcillas y limos más plásticos.
- A-7-6 Las arcillas y limos más plásticos.
- NP No plástico
- B Bueno

2.2.6.2. Clasificación según sistema USCS

La clasificación es basada en las propiedades de plasticidad y en la distribución del tamaño del grano, según esta última, el sistema divide el suelo en dos grandes categorías:

- Suelos Grueso granulares: Son aquellos materiales en los cuales el porcentaje retenido en la malla nº 200 es superior al 50%. Dentro de ellos están las fracciones de arena y grava, son suelos donde la distribución del tamaño y la forma de los granos influye notablemente en las propiedades ingenieriles del suelo.
- Suelos Fino granulares: Son los suelos en los cuales un 50% o más pasa por la malla nº 200. En estos suelos se incluyen las fracciones limo y arcilla, así como las fracciones de carácter orgánico. En los suelos finos son las propiedades de plasticidad las usadas para su clasificación.

La simbología utilizada para la clasificación del suelo es la siguiente:

Tamaño de partículas:

- G: Fracción de suelo más grueso o tamaño grava.
- S: Fracción del suelo con tamaño de grano comprendido entre malla nº 4 y nº 200.
- M: Fracción fina del suelo que no posee propiedades de plasticidad, o de tener, es muy baja.
- C: Fracción fina del suelo que posee propiedades de plasticidad.

Respecto a la distribución de las partículas en el suelo:

- W: Buena graduación del suelo, o sea que, dentro de la masa de suelo hay un predominio de un tamaño de grano.
- P: Mala gradación. Significa que dentro de la masa de suelo hay variedad en el tamaño de grano, aunque haya predominio de uno de ellos

Respecto a la Plasticidad:

- L: Suelos con baja plasticidad, son aquellos donde $LL < 50$.
- H: Suelos con alta plasticidad, aquellos donde $LL > 50$.

Tabla 2.2: Clasificación de suelos según sistema USCS para suelos finos

FINOS ($\geq 50\%$ pasa 0.08 mm)			
Tipo de Suelo	Símbolo	Lim. Liq. w _l	Índice de Plasticidad * I _p
limos inorgánicos	ML	< 50	< 0.73 (w _l - 20) ó < 4
	MH	> 50	< 0.73 (w _l - 20)
arcillas inorgánicas	CL	< 50	> 0.73 (w _l - 20) y > 7
	CH	> 50	> 0.73 (w _l - 20)
limos y arcillas orgánicos	OL	< 50	** w _l seco al horno $\leq 75\%$ de w _l seco al aire
	OH	> 50	
turba	P _t	Materia orgánica fibrosa se carboniza, se quema o se pone incandescente.	
Si I _p ≥ 0.73 (w _l - 20) ó si IP entre 4 y 7 e I _p > 0.73 (w _l - 20), usar símbolo doble: CL-ML, CH-OH			
** Si tiene olor orgánico debe determinarse adicionalmente w _l seco al horno			
En casos dudosos favorecer clasificación más plástica Ej: CH-MH en vez de CL-ML. Si w _l = 50; CL-CH ó ML-MH			

Fuente: En Rudisky I. (2013)

Tabla 2.3: Clasificación de suelos según sistema USCS para suelos gruesos

SISTEMA CLASIFICACION USCS							
GRUESOS (< 50 % pasa 0.08 mm)							
Tipo de Suelo	Símbolo	% pasa 5 mm.***	% pasa 0.08 mm.	CU	CC	** IP	
Gravas	GW	< 50	< 5	> 4	1 a 3	< 0.73 (w _l -20) ó < 4	
	GP			≤ 6	<1 ó >3		
	GM		> 12				
	GC						> 0.73 (w _l -20) ó > 7
Arenas	SW	> 50	< 5	> 6	1 a 3	< 0.73 (w _l -20) ó < 4	
	SP			≤ 6	<1 ó >3		
	SM		> 12				
	SC						> 0.73 (w _l -20) y > 7
* Entre 5 y 12% usar símbolo doble como GW-GC, GP-GM, SW-SM, SP-SC. *** respecto a la fracción retenida en el tamiz 0.080 mm							
** Si IP ≥ 0.73 (w _l -20) ó si IP entre 4 y 7 e IP > 0.73 (w _l -20), usar símbolo doble: GM-GC, SM-SC.							
En casos dudosos favorecer clasificación menos plástica Ej: GW-GM en vez de GW-GC.							
			$C_u = (D_{60}) / (D_{10})$				
			$C_c = (D_{30}^2) / (D_{60} \cdot D_{10})$				

Fuente: En Rudisky I. (2013)

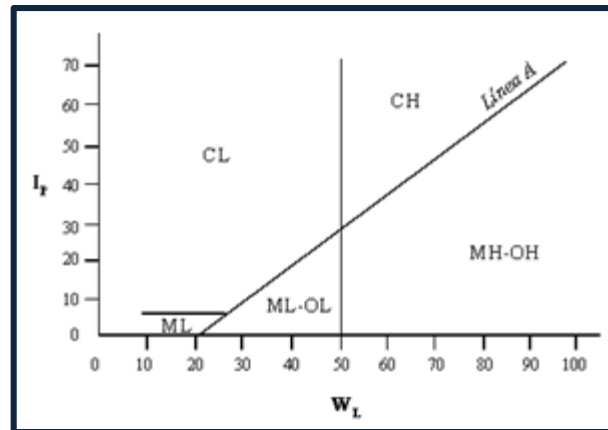


Figura 2.2: Carta de Plasticidad

Fuente: En Rudisky I. (2013)

2.3. Características de las Arcillas

2.3.1. Generalidades

Un mineral es un sólido inorgánico y natural que tiene una estructura interna característica determinada por un cierto arreglo específico de sus átomos e iones. Su composición química y sus propiedades físicas son fijas o varían dentro de límites definidos. Sus características físicas más interesantes, desde el punto de vista de identificación, son: el color, el brillo, la tonalidad de sus raspaduras, la forma de cristalización, la dureza, la forma de su fractura y disposición de sus planos cruceros, la tenacidad, la capacidad para permitir el paso de ondas y radiaciones (luz) y la densidad relativa.

2.3.2. Arcillas

Los minerales arcillosos provienen de la meteorización química de las rocas, y su composición que es muy variable, depende tanto de las rocas de que proceden como también de las condiciones climáticas en que se produjo la meteorización (Rodríguez Ortiz, J.M., 1975).

Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados, presentando además, en algunas ocasiones, silicatos de magnesio, hierro y otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen, casi siempre, una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas. (Garnica et ál., 2002).

Existen dos variedades de tales láminas: la silícica y la alumínica. La primera, de tales láminas, está formada por un átomo de silicio, rodeado de cuatro de oxígeno, disponiéndose el conjunto en forma de tetraedro, tal como se muestra en la figura 2.3. Estos tetraedros se agrupan en unidades hexagonales, sirviendo un átomo de oxígeno de nexos entre cada dos tetraedros.

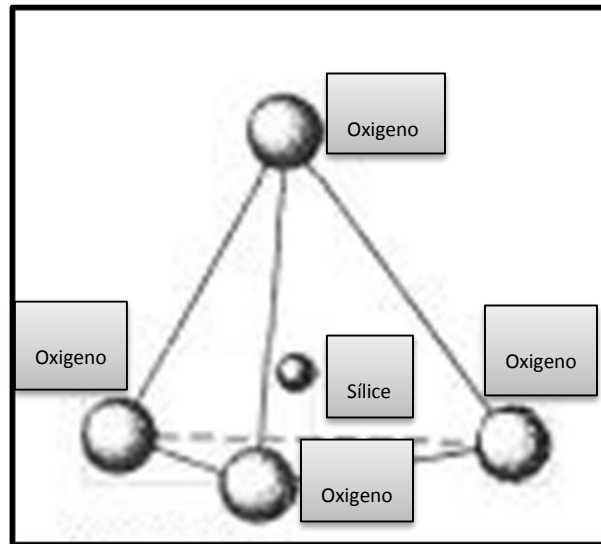


Figura 2.3: Esquema de la estructura de la lámina silícica

Fuente: Patologías por arcillas expansivas, Sengel 2003

Un esquema de una unidad hexagonal aparece en la Figura 2.4. Las unidades hexagonales repitiéndose indefinidamente, constituyen una red de láminas.

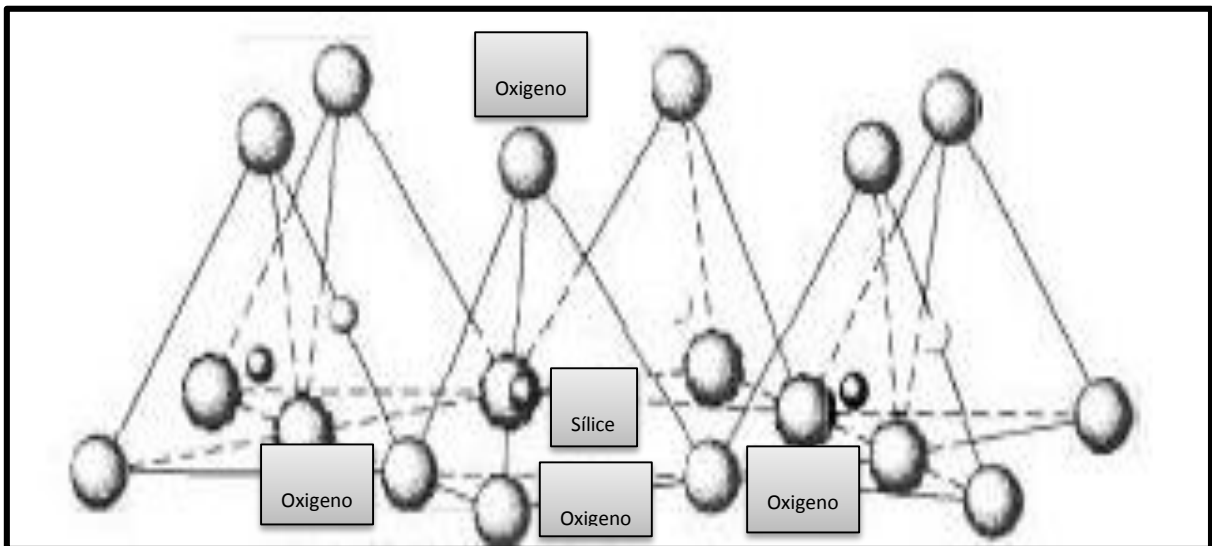


Figura 2.4: Esquema de una unidad hexagonal de una lámina silícica

Fuente: Patologías por arcillas expansivas, Sengel 2003

Las láminas aluminicas están formadas por retículas de octaedros dispuestos con un átomo de aluminio al centro y seis de oxígeno alrededor, tal como aparece en la Figura 2.5. También ahora es el oxígeno el nexo entre cada dos octaedros vecinos, para constituir la red.

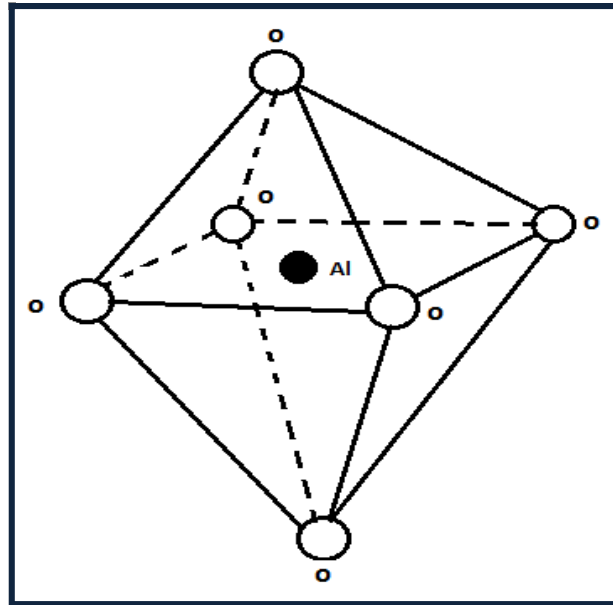


Figura 2.5: Esquema de la estructura de la lámina alumínica

Fuente: Patologías por arcillas expansivas, Sengel 2003

2.3.3. Clasificación de arcillas según su estructura

De acuerdo con su estructura, los minerales de arcilla se clasifican en tres grupos: caolinitas, montmorillonitas e illitas.

2.3.3.1. Caolinitas

Las caolinitas, de fórmula química $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, están formadas por una lámina silícica y otra alumínica, que se superponen indefinidamente. La unión entre todas las retículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua entre ellas (adsorción). En consecuencia, las arcillas caolínicas son relativamente estables en presencia de agua.

La caolinita es una arcilla blanca muy pura que se utiliza para la fabricación de porcelanas y de aprestos para almidonar. El caolín es un suelo natural en el que abunda la caolinita, que le aporta a menudo un color blanco. También es utilizada en ciertos medicamentos y como agente adsorbente. Cuando la materia no es muy pura, se utiliza en fabricación de papel. Conserva su color blanco durante la cocción.

2.3.3.2. Montmorillonitas

Las montmorillonitas, de fórmula química $(OH)_4 Si_8Al_4O_{20} nH_2O$, están formadas por una lámina aluminica entre dos silícicas, superponiéndose indefinidamente. En este caso la unión entre las retículas del mineral es débil: las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad, a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar. Lo anterior, produce un incremento en el volumen de los cristales, lo que se traduce en expansión.

Las arcillas montmorilloníticas, especialmente en presencia de agua, presentan fuerte tendencia a la inestabilidad. Las bentonitas son arcillas del grupo montmorillonítico, originadas por la descomposición química de las cenizas volcánicas y presentan la expansividad típica del grupo en forma particularmente aguda, lo que las hace sumamente críticas en su comportamiento mecánico. Estas arcillas aparecen, con frecuencia en los trabajos de campo.

2.3.3.3. Ialitas

Las ialitas, de fórmula química $(OH)_4 K_y(Si_{8-y}Al_y)(Al_4 Fe_4 Mg_4 Mg_6)O_{20}$, están estructuradas análogamente que las montmorillonitas, pero su constitución interna manifiesta tendencia a formar grumos de materia, que reducen el área expuesta al agua por unidad de volumen; por ello, su potencial de expansión es menor que el de las montmorillonitas y su comportamiento mecánico es más favorable para el ingeniero.

El grupo de las ialitas está constituido por diversos minerales parecidos a la mica muscovita. La ialita es, posiblemente, el grupo más abundante en los depósitos arcillosos marinos modernos, en los depósitos sedimentarios antiguos y predominan en las lutitas.

2.3.4. Aspectos físico-químicos de las arcillas

En general, se considera que las partículas arcillosas tienen un tamaño del orden de 2 micras o menores y presentan una actividad eléctrica importante, que rige su comportamiento dada su gran superficie específica en relación con su superficie y aún su masa.

Una de las teorías más aceptadas, hasta ahora desarrolladas, para explicar la estructura interna de las arcillas es la que menciona que la superficie de cada partícula de suelo posee carga eléctrica negativa. La intensidad de la carga depende de la estructuración y composición de la arcilla. La partícula atrae a los iones positivos del agua (H^+) y a los cationes de diferentes elementos químicos, tales como Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Al^{+++} , Fe^{+++} , etc. Se tiene entonces, en primer lugar, al hecho de que cada partícula individual de arcilla se ve rodeada en forma definitiva y ligada a su estructura (Agua adsorbida).

Las moléculas de agua son polarizadas, es decir, en ellas no coinciden los centros de gravedad de sus cargas negativas y positivas, sino que funcionan como pequeños dipolos permanentes; al ligarse a la partícula por su carga (+), el polo de carga (-) queda en posibilidad de actuar como origen de atracción para otros cationes positivos. Los propios cationes atraen moléculas de agua gracias a la naturaleza polarizada de éstas, de modo que a cada catión está en posibilidad de poseer un volumen de agua en torno a él. El agua adsorbida por cada catión aumenta con la carga eléctrica de éste y con su radio iónico (Peck et ál., 1957).

Por lo anterior, cuando las partículas del suelo atraen a los cationes, se ve reforzada la película de agua ligada a la partícula. El espesor de la película de agua adsorbida por el cristal de suelo es en función, no solo de la naturaleza del mismo, sino también del tipo de los cationes atraídos.

Los cristales de arcilla pueden cambiar los cationes adsorbidos en su película superficial; por ejemplo, una arcilla hidrógena (con cationes H^+) puede transformarse en sódica, si se hace que circule a través de su masa, agua con sales de sodio en disolución. En realidad lo que ocurre es un intercambio de cationes entre el agua y las películas adsorbidas por las partículas minerales, algunas veces en reacción rápida. Los cationes intercambiables más usuales son: Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ y $(NH_4)^+$.

Las caolinitas son menos susceptibles de intercambiar sus cationes que las montmorillonitas y las illitas poseen la propiedad de grado intermedio. La capacidad de intercambio crece con el grado de acidez de los cristales, es decir, es mayor si el pH del suelo es menor; la actividad catiónica se hace notable, en general, para valores de pH menores que 7. La capacidad de intercambio también crece con la velocidad y concentración de la solución que circule por la masa de suelo.

Las propiedades mecánicas de una arcilla pueden cambiar al variar los cationes contenidos en sus complejos de adsorción, pues a diferentes cationes ligados corresponden distintos espesores de la película adsorbida, lo que se refleja sobre todo en las propiedades de plasticidad y resistencia del suelo.

2.4. Suelos Arcillosos y su Estabilización

2.4.1. Generalidades

Se denomina suelo a la parte superficial de la corteza terrestre, que proviene de la desintegración o alteración física y química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que se asientan sobre ella.

Los suelos son sistemas complejos donde ocurren una vasta gama de procesos químicos, físicos y biológicos que se ven reflejados en la gran variedad de suelos existentes en la tierra. Son muchos los procesos que pueden contribuir a crear un suelo particular, algunos de estos son: la deposición eólica, sedimentación en cursos de agua, meteorización, y deposición de material orgánico.

El suelo tiene un conjunto sorprendentemente diverso de propiedades mecánicas, el estudio empírico y teórico de la mecánica de los suelos ha progresado hasta el punto donde los ingenieros son capaces de considerar una amplia variedad de propiedades mecánicas cuando el diseño de estructuras involucra grandes cantidades de tierra. El objetivo principal de la mecánica de suelos es estudiar el comportamiento del suelo para ser usado como material de construcción o como base de sustentación de las obras de ingeniería. La importancia de estos estudios radica en que si se sobrepasan los límites de la capacidad resistente del suelo o si, aún sin llegar a ellos, las deformaciones son considerables, se pueden producir esfuerzos secundarios en los miembros estructurales, quizás no tomados en consideración en el diseño, produciendo a su vez deformaciones importantes, fisuras, grietas, alabeo o desplomos que pueden producir, en casos extremos, el colapso de la obra o su inutilización y abandono.

Lo más importante para un suelo son las características que afectan su capacidad de soportar carga. Estas características son determinadas en primer lugar por la presencia o la ausencia de los minerales arcillosos, y en segundo lugar por la interacción de estos minerales con el agua.

2.4.1.1. Textura y composición del suelo fino

La textura del suelo indica la cantidad de partículas individuales de arena, limo y arcilla presentes en el suelo. Esta es una expresión cualitativa y cuantitativa del tamaño de las partículas. Cualitativa ya que se refiere al comportamiento que resulta del tamaño y de la naturaleza de los constituyentes del suelo, y cuantitativa por ser una expresión porcentual. Se refiere a la proporción

relativa de los diferentes tamaños de partículas existentes en él, expresada como porcentaje de fracción mineral.

Se distinguen básicamente tres tipos de partículas presentes mayoritariamente en suelos finos: arcilla, limo y arena. La distinción se basa en una distribución arbitraria que asocia a cada fracción propiedades relacionadas al tamaño, como la plasticidad. Cuando más pequeña es la partícula más se acerca a la arcilla; cuando más grande es la partícula más se acerca a la arena, el tamaño de las partículas es importante debido a que las partículas pequeñas de arcilla se encuentran más íntimamente unidas entre sí que las partículas más grandes de arena. Esto significa poros más pequeños para retener agua y aire.

Las arenas entonces, retienen pequeñas cantidades de agua debido a que sus poros de tamaño grande permiten que el agua drene libremente del suelo. Las arcillas absorben una cantidad relativamente alta de agua y sus poros pequeños retienen el agua contra las fuerzas gravitacionales. Los suelos arcillosos retienen agua con más fuerza que los suelos arenosos.

2.4.2. Suelos Arcillosos

Las arcillas provienen de la alteración físico-química, por acción principalmente del agua, de minerales que forman parte de otras rocas preexistentes. Producto de lo anterior, la roca se altera y en diferentes grados, originando una serie de minerales denominados "minerales de arcilla". Las partículas que las constituyen son muy pequeñas y su comportamiento está dominado principalmente por la actividad electroquímica. En general tienen una carga negativa neta y presentan afinidad por el agua.

Desde el punto de vista geotécnico, los suelos plásticos o arcillosos, son aquellos capaces de deformarse sin agrietarse, cambiando su consistencia al variar el contenido de agua, afectando principalmente a la resistencia mecánica y estabilidad volumétrica del suelo en cuestión, debilidades que suelen provocar agrietamientos o asentamientos después de la exposición al tráfico y al medio ambiente en la estructura de pavimento (Camacho, 2006).

El grado de expansividad de los suelos arcillosos se puede determinar en función de algunas propiedades geotécnicas de los suelos según tabla 2.4:

Tabla 2.4: Expansividad de las arcillas

Expansividad	Índice de plasticidad	Límite Líquido	Contenido de finos
Baja	<15	<30	<30
Media	15 a 30	30 a 45	30 a 60
Alta	>30	>45	>60

Fuente: Patologías por arcillas expansivas en España, Ávila 2003

2.4.2.1. Problemáticas de los suelos arcillosos

Las principales desventajas o problemáticas que presentan los suelos arcillosos en las obras de construcción, se pueden clasificar según:

- Perturbación de los procesos constructivos que se manifiesta en:
 - Falta de trabajabilidad
 - Dificultades para el drenaje
 - Sensibilidad a las condiciones meteorológicas desfavorables
- Introducción de incertidumbres en la estimación de resistencias, dado que normalmente un incremento en las condiciones de humedad suele repercutir en el reblandecimiento de los suelos y la disminución de su resistencia.
- Deformaciones plásticas, provocando asentamiento en las construcciones.
- Erosión y degradación de su superficie a la intemperie, manifestados por los cuarteos y agrietamientos característicos de ciclos de sequedad y humedad, que afecta negativamente a su durabilidad y a su estabilidad.
- Incremento de los movimientos diferidos o de consolidación debido a la dificultad para eliminar el exceso de agua bajo situaciones de modificación de cargas por su baja permeabilidad.
- Movimientos asociados a cambios volumétricos por diferencias de humedad, que pueden originarse por causas:
 - Naturales, como cambios en el nivel freático o en las condiciones atmosféricas del entorno.
 - Artificiales, por el reajuste de las humedades empleadas en el proceso constructivo a las condiciones ambientales finales.

La presencia de suelos arcillosos, frecuentemente inevitable, suele ocasionar una serie de problemas y riesgos sobre las construcciones que el técnico proyectista o director de unas obras debe evitar o, al menos, atenuar.

Las formas de actuar ante la presencia de materiales problemáticos en el subsuelo suelen agruparse en tres grandes grupos de medidas, una vez que se ha comprobado la imposibilidad de cambiar el emplazamiento de la obra o que su coste es superior al daño o efecto a evitar. Estas son las siguientes:

- La eliminación o sustitución de los materiales, ya en su totalidad ya parcialmente, por materiales aptos o menos sensibles.
- La modificación de la tipología estructural para evitar que los efectos del comportamiento de dichos materiales afecten a la misma.
- La modificación o tratamiento de los suelos mediante diversos mecanismos para hacerlos menos sensibles a los agentes que le hacen comportarse deficientemente.

Es este último, nos propone como posible solución contra las problemáticas propias del suelo arcilloso un tratamiento, el cual recibe el nombre de estabilización.

2.4.3. Estabilización de suelos

Los suelos se estabilizan para modificar las propiedades existentes haciéndolos capaces de cumplir en mejor forma los requisitos deseados, especialmente buscando un buen comportamiento esfuerzo-deformación. (Aguirre & Vélez, 2005). El concepto de mejorar la capacidad de soporte de los suelos a través de su estabilización con aditivos es bastante antiguo; hace 5000 años atrás ya el suelo se estabilizaba con cal o puzolanas. Sin embargo, hoy en día las técnicas más usadas son las de suelo-cemento y las estabilizadas con asfalto (Hidalgo et ál, 2010). Proceso que en Chile se encuentra incorporada en la normativa vial de manera más sistemática con posterioridad al año 2000 (Pradena et ál, 2010).

En Chile, la estabilización de suelos para la construcción de caminos ha tenido un ascendente desarrollo, debido fundamentalmente a la falta de agregados convencionales en parte de su territorio, principalmente en zonas con escasez o con altos costos de extracción y/o transporte, especialmente en áreas de desarrollo.

La estabilización de suelos produce las siguientes ventajas: mejora materiales marginales, mejora la resistencia, mejora la durabilidad, controla el cambio de volumen del suelo, mejora la trabajabilidad del suelo, reduce los requerimientos de espesor de los pavimentos, provee un suelo impermeable y reduce el polvo (Yoder y Witczak, 1975).

2.4.3.1. Remoción del material inadecuado según Manual de Carreteras

Desde el punto de vista legal y según el Manual de Carreteras, volumen n°5 (MC-V5-201.303) en excavaciones generales abiertas, se considera material inadecuado y de exclusiva remoción aquel que cumpla con al menos una de las siguientes condiciones:

- Materiales con un CBR <3%, según adaptación de la norma NCh 1852 Of. 81
- Materiales que contengan más de 3% en peso de materia orgánica seca la horno a 60°C
- Material cuyo porcentaje de expansión sea mayor que 3%, según adaptación de la norma NCh 1852 Of. 81

Sumado a estas condiciones debe tenerse en consideración en la remoción de material inadecuado lo establecido en el proyecto y lo indicado por el inspector fiscal designado en la obra.

En cuanto a la formación y compactación de terraplenes, el MC-V5 (5.205) señala como condición mínima un material con una capacidad portante CBR $\geq 10\%$ al 95% de la DMCS. obtenida en el ensayo proctor modificado, sobre material para subrasante señala que este debe tener un CBR $\geq 20\%$ en una capa de 0,3m de espesor.

Es muy frecuente que al no contar en terreno con un material granular con las características mínimas señaladas en el Manual de Carreteras se realice una remoción del material, sin embargo, un mejoramiento de este a través de una estabilización es una alternativa más rápida y económica que muchas veces se desestima.

2.4.3.2. Importancia de la estabilización de suelos

La mayoría de las especificaciones para los caminos pavimentados se han desarrollado tanto para caminos rurales como urbanos tomando en cuenta altos volúmenes de tráfico. La calidad de los materiales para cada capa en el camino se especifica cuidadosamente dependiendo de la capa, del diseño del tráfico y de las condiciones ambientales que prevalecen. Una situación diferente resulta de los caminos sin pavimentar en las categorías de tráfico ligero, como serían los caminos agrícolas o residenciales. Los materiales usados deben necesariamente estar localmente disponibles.

En el futuro los materiales de construcción para caminos que cumplen con todos los requisitos necesarios, se volverán escasos y muy costosos de conseguir. Además necesitan a menudo un largo procesamiento o ser acarreados desde largas distancias, de tal modo que se vuelven inaccesibles en costo para estructuras ligeras de pavimento. Si los materiales locales no cumplen con los requisitos mínimos pueden ser mejorados a través de la estabilización de suelos, esto implica la adición de un material a otro para producir un nuevo material con una mejor distribución de partículas, ya sea para disminuir la plasticidad o para mejorar su capacidad de soporte.

La disminución de la disponibilidad y el aumento del costo de los materiales de construcción, significa que se deberán considerar métodos más económicos para construir caminos, usando los materiales localmente disponibles aun cuando estos no cumplan con los estándares requeridos. La situación llega a ser aún más crítica cuando se trata de la siempre creciente demanda para la construcción de caminos en las áreas rurales. Por lo tanto, es necesaria la construcción de caminos de óptimo funcionamiento con los menores costos y el mínimo mantenimiento. Todo ello lleva a la necesidad de desarrollar técnicas apropiadas de diseño para la construcción de caminos.

El uso de la estabilización de suelos in situ es una alternativa que ofrece la ventaja de la reducción de procesamiento y los costos de acarreo, reduciendo al mínimo la erosión que produce la importación de materiales. Sin embargo, la estabilización in situ no proporcionará una solución adecuada si el producto estabilizador no genera una mejora considerable en las propiedades originales del suelo tratado.

Las propiedades de los suelos que más frecuentemente se estudian en problemas de estabilización son: Estabilidad volumétrica, resistencia, permeabilidad, compresibilidad y durabilidad (López, et ál. 2009).

2.4.3.3. Tipos de estabilizaciones

Los tipos de estabilizaciones varían de país a país, pero existe una clasificación reconocida mundialmente dependiendo del tipo de material a utilizar para la estabilización dividiéndose de la siguiente forma:

- Mecánica
- Física
- Química

Ahora si nos referimos al proceso constructivo, la estabilización puede dividirse de tres maneras:

- En planta
- In situ
- Inyección a presión

Continuamente se están desarrollando nuevos productos siendo importante para la industria contar con una buena experimentación. Siempre debe promoverse la innovación, ya que no puede pretenderse que un solo agente estabilizador sea el mejor para todas las aplicaciones. La decisión de cuál agente estabilizador sea el mejor para todas las aplicaciones. La decisión de cuál agente usar en un proyecto específico se debe tomar muy en cuenta. Tales decisiones están influidas en el orden de importancia por los siguientes factores:

- Precio, costo unitario del estabilizador
- Disponibilidad, no siempre se consigue el estabilizador deseado
- Características del suelo a estabilizar
- Políticas rígidas con el uso de estabilizadores respecto del medio ambiente
- Proceso constructivo

Además de los factores anteriormente mencionados se tiende a ser muy conservador, y se prefieren prácticas experimentadas y ensayadas. Todo esto hace pensar que estar en la frontera de la tecnología puede representar un riesgo, así como una experiencia aislada. Por eso, los agentes estabilizadores cementantes y los materiales bituminosos, se usan de manera extensiva, y por ende, se han investigado ampliamente. Para estos tipos de estabilizadores se pueden encontrar disponibles métodos estándares de ensayos para determinar el diseño óptimo de las mezclas que aseguran todos los requerimientos de calidad, además por lo general se encuentran en cualquier parte del mundo.

2.4.3.3.1. Estabilización mecánica de suelos

La estabilización mecánica es básicamente la forma más simple de estabilizar un suelo a través de la compactación. Este es uno de los varios métodos de los que hoy se dispone para mejorar la condición de un suelo en obras de vialidad. Es, además, sin duda uno de los más eficientes y de aplicación universal. La compactación va a estar presente en todos los tipos de estabilizaciones de suelos, ya que siempre se debe compactar las diferentes capas que conforman un pavimento. Por lo tanto, se puede decir que existen diferentes combinaciones de estabilizaciones como la química-mecánica y la física-mecánica.

2.4.3.3.2. Estabilización física de suelos

La estabilización como tratamiento físico permite modificar las características de los suelos. Las formas más comunes de hacerlo son a través de mezcla de suelos o la incorporación de un geotextil.

Las mezclas de suelos se hacen generalmente cuando la sub-rasante o la estructura del pavimento no cumplen con los requerimientos del proyecto o bien el material encontrado no sirve para utilizarlo como sub-base o base. Usualmente se usa material granular procesado, ya que de esa forma cumple con todas las condiciones que exige un determinado proyecto.

Los geotextiles son telas permeables no biodegradables que pueden emplearse como filtros en sustitución de agregados graduados como estabilizadores de suelos blandos. Estos se emplean como elementos de distribución de cargas en los pavimentos.

Los materiales de construcción para caminos que cumplan con todos los requisitos necesitan un largo procesamiento o ser transportados desde largas distancias, de tal modo que se vuelven costosos. Por esta razón, si los materiales locales no cumplen con los requisitos mínimos pueden ser mejorados a través de otro tipo de estabilización de suelos.

2.4.3.3.3. Estabilización química de suelos

La estabilización química consiste en alterar las propiedades del suelo usando un 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, pega los granos entre sí de modo de producir un incremento en su resistencia

El uso del material del lugar modificando sus propiedades conforme al proyecto, puede lograrse por diversos métodos, pero sólo uno proporcionará una solución de largo plazo, cambiando las propiedades químicas de sus elementos.

Actualmente, se usa un amplio rango de agentes estabilizadores en el mundo, dentro de los cuales, los más usados son del tipo químico destacando las sales, el asfalto, el cemento y la cal. Todos ellos persiguen el mismo objetivo, que es ligar las partículas individuales para incrementar la resistencia o hacer al material más resistente al agua.

2.5. Suelo Cemento y Ceniza de Cáscara de Arroz

2.5.1. Suelo cemento

2.5.1.1. Generalidades del suelo cemento

Se define al suelo-cemento como un material elaborado a partir de una mezcla de suelos finos y/o granulares, cemento y agua, la cual se compacta y se cura para formar un material endurecido con propiedades mecánicas específicas.

El contenido de cemento en peso suele ser del orden del 5 al 13% en peso de materiales secos y a largo plazo, su resistencia a compresión suele ser superior a 4 MPa. El contenido de agua se elige para obtener mezclas de consistencia seca que permitan su compactación con rodillo. El suelo-cemento se usa normalmente como capa de apoyo de otros materiales tratados con cemento o de concreto hidráulico o bien como capa resistente, bajo capas bituminosas. Puede fabricarse en planta central, o bien ejecutarse in situ.

2.5.1.2. El suelo cemento en la actualidad

Existen diversas razones que actualmente determinan un mayor uso del suelo cemento en la construcción de estructuras de pavimentos. Tanto consultores como entidades encargadas de la administración vial coinciden en que la demanda de un transporte de calidad requiere una mayor durabilidad de los materiales, estructuras de pavimentos y subrasantes (Cortez, 1995).

Para lograr la misma, es indispensable contar con estructuras de pavimento con capas de elevada capacidad de soporte y resistentes a los agentes atmosféricos. Otra razón para usar suelo cemento en carreteras es el aspecto de protección del medio ambiente, el cual cada vez impone mayores limitaciones para la búsqueda y explotación de bancos de materiales, práctica por muchos años utilizada. Finalmente, la posibilidad de reducir espesores de capas que conforman la estructura del pavimento sin disminuir la capacidad estructural de la misma, es uno de los logros que pueden obtenerse de las características que tiene el suelo-cemento, debido a su relativamente elevado módulo de elasticidad. Esto se traduce en ahorros de materiales y aumento en los rendimientos de construcción. Debido a las múltiples ventajas que tienen los suelos tratados con cemento, diversos países lo aplican de forma casi generalizada (Cortez, 1995).

Por ejemplo, en El Salvador, el 95% de los caminos rurales pavimentados tiene base de suelo-cemento y en los últimos 10 años, el 100% de nuevas vías urbanas e interurbanas y pisos industriales tienen bases de suelo cemento (Suart, 2004).

2.5.1.3. Usos del cemento en la construcción vial

2.5.1.3.1. Suelo mejorado o modificado con cemento

Se usa en subrasantes o explanadas y se define como una mezcla de suelo y una cantidad pequeña de cemento, generalmente inferior al 5% en peso, añadida con el fin de mejorar algunas propiedades de los suelos. Al contrario que el suelo-cemento, la mezcla resultante sigue teniendo la estructura de un material suelto, al menos a corto plazo. La mejora o modificación con cemento se usa generalmente con suelos de grano fino, plásticos y a veces con humedades naturales excesivas con dificultades de compactación, expansividad y baja capacidad de soporte. El conglomerante modifica sus características a corto y largo plazo de forma moderada, pasando a ser suelos utilizables.

Por su limitada o nula resistencia mecánica se recomienda su uso en subrasantes de pavimentos de tráfico ligero y medios. Para el caso de tráfico pesado y de alto volumen, se sugiere colocar una subrasante de mayor capacidad de soporte sobre el suelo modificado con cemento.

2.5.1.3.2. Suelo estabilizado con cemento

Se usa también en subrasantes o explanadas, especialmente en estructuras de pavimentos para tráfico pesado. Es una mezcla de suelo, cemento y agua, con un contenido mínimo de conglomerante en peso del 2%, a fin de obtener un material dotado de una cierta rigidez y resistencia mecánica (IECA, 2013).

2.5.1.3.3. Suelo cemento plástico

Consiste en una mezcla de suelo fino, cemento y agua o aditivos suficientes para conseguir una consistencia fluida. Este material se engloba dentro de los denominados Materiales de Resistencia Controlada por el Comité 229R del American Concrete Institute (ACI). Una de las aplicaciones de este material es en la construcción de bases de pavimentos, en cuyo caso se usan mezclas plásticas y no fluidas, diseñadas de tal forma que se puedan colocar y enrasar fácilmente teniendo además la menor contracción posible. Los valores de resistencia a compresión simple sugeridos por el ACI en capas de base de suelo-cemento plástico varían entre 3 y 8,5 MPa (IECA, 2013)

2.5.1.3.4. Base granular tratada con cemento

La Portland Cement Association (PCA) la define como una mezcla de agregados pétreos, cemento Portland y agua, que endurece después de ser compactada y curada para formar un material de pavimento durable. Se usa como capa de base en estructuras de pavimentos, siendo necesaria una capa de rodadura bituminosa o de concreto hidráulico. Las propiedades estructurales de bases granulares tratadas con cemento dependen de los agregados, del contenido de cemento, de las condiciones de compactación y curado, y de la edad. Son usuales valores de resistencia a la compresión de 3 a 6 MPa, módulo de ruptura (resistencia a flexotensión) de 0,7 a 1 MPa y de módulo de elasticidad 7,000 a 14,000 MPa. Es importante mencionar que las bases granulares tratadas con cemento son conocidas también con los nombres de bases tratadas con cemento a bases de agregados estabilizados con cemento (IECA, 2013)

2.5.1.3.5. Pavimentos unicapa de alto desempeño

Son una estructura de pavimento formada por una sola capa usando el suelo existente en el camino, mezclado con un porcentaje de cemento Portland de entre 11 y 20% en peso, que compactada al porcentaje de diseño es capaz de soportar las cargas y el desgaste producido por el tráfico, proporcionando a la vez una superficie de rodaje adecuada.

La filosofía de este pavimento es similar a la del concreto compactado, pero empleando un suelo natural como material de partida en vez de agregados procesados. Este tipo de pavimento tiene un campo de aplicación específico en la red vial no pavimentada y constituye una alternativa a las tradicionales intervenciones de colocación de balasto que se hacen dos veces por año (antes y después de la época lluviosa). Las propiedades estructurales de los pavimentos unicapa, dependen del tipo de suelo y del contenido de cemento así como de la energía de compactación y del curado. Los valores usuales de resistencia a compresión varían entre 5 y 13 MPa, el módulo de ruptura entre 1 y 2.3 MPa y el módulo de elasticidad entre 10,000 y 20,000 MPa.

2.5.1.3.6. Pavimentos reciclados con cemento

Las razones para optar por la solución de reciclado con cemento son varias. Normalmente se trata de pavimentos flexibles agrietados o fisurados debido al volumen de tráfico pesado, al final de su vida útil de servicio, o bien por problemas de drenaje y ahuellamientos.

Frente a otras soluciones de rehabilitación, el reciclado de estos pavimentos con cemento permite el aprovechamiento de las capas deterioradas logrando recuperar y aumentar la capacidad de soporte y características mecánicas en general, lo que se traduce en una mejora del nivel de servicio. Técnicamente se consigue un pavimento mucho más duradero y con menor susceptibilidad al agua.

2.5.1.4. Ventajas del suelo cemento

- Material durable: Numerosos registros de comportamiento indican que el suelo-cemento tiene mayor durabilidad que otros materiales de pavimentos de similar costo inicial.
- Mayor uso de materiales locales: El suelo-cemento permite el uso de gran cantidad de tipos de suelo para su elaboración, con lo que se consiguen reducir considerablemente los costos de transporte de material de aporte y aumentar los rendimientos de construcción.

- Reduce impacto ambiental: Pues existe menor necesidad de explotación de bancos de material. Mayor rigidez y mejor distribución de las cargas aplicadas al pavimento: Las propiedades de las mezclas de suelo-cemento permiten que la carga aplicada se distribuya en un área mayor que en el caso de una capa granular; por tanto, a igualdad de capacidad de soporte es posible contar con estructuras de pavimentos de menor espesor robustas o con un menor número de capas.
- Resistencia a los agentes atmosféricos: Es notable su prolongada durabilidad bajo condiciones adversas. Por ello se ha usado en lugares con condiciones climáticas muy desfavorables.
- Aumento de resistencia y menos intervenciones de mantenimiento: Las propiedades mecánicas del suelo-cemento se incrementan con el tiempo lo que favorece que el mantenimiento del pavimento sea mínimo, obteniéndose prolongada vida útil y una reducción en el total de la estructura del pavimento.

2.5.1.5. Limitaciones del suelo cemento

- Es un material en el que se producen grietas de contracción, las cuales pueden reflejarse en las capas bituminosas superiores.
Sin embargo, es posible controlar considerablemente dicha contracción mediante uso de cementos adecuados, mezclas de cal, cemento y/o técnicas de prefisuración.
- Se debe seleccionar el tipo de cemento adecuado y realizar el número de pruebas necesarias antes de pretender construir capas de suelo-cemento con suelos de mediana alta plasticidad.
- El tiempo para ejecutar el mezclado, conformación y compactación está limitado por el del fraguado del cemento.
- Tiene una reducida resistencia al desgaste. Por ello, las bases de suelo-cemento precisan capas de rodadura de concreto asfáltico, tratamientos superficiales o capas de rodadura de concreto hidráulico.

2.5.2. Ceniza de cáscara de arroz (CCA)

2.5.2.1. Generalidades de la CCA

En Chile, el cultivo de arroz es uno de los más importantes en producción y área cosechada. En el año 1999, la producción de arroz en cáscara fue de aproximadamente dos millones de toneladas. Siendo la cáscara el 20% del peso total, durante 1999, se acumularon 400.000 toneladas de cáscara de arroz, el cual es un subproducto voluminoso y contaminante (Minke, 2008).

Aunque la CCA es un quinto (en peso) del arroz segado y secado, debido a su baja densidad, se acumulan grandes volúmenes en los lugares de molienda. Actualmente la producción anual de arroz en el mundo es aproximadamente 500 millones de toneladas, que originan unos 100 millones de toneladas de cáscara y 20 millones de toneladas de ceniza.

En la Tabla 2.5, se muestra que ningún otro residuo vegetal produce tanta ceniza al ser calcinado.

Tabla 2.5: Cantidad de ceniza producida por distintos cereales

Cosecha	Parte de la Planta	Ceniza (% en peso)
Maíz	Hoja	12
Arroz	Cáscara	20
Arroz	Paja	14
Sorgo	Hoja	12
Caña de azúcar	Bagazo	15
Girasol	Hoja y Tallo	11
Trigo	Hoja	10

Fuente: Mehta, P.K, 2001



Figura 2.6: Cáscara de arroz y ceniza de cáscara de arroz

Fuente: MINAG Ministerio de Agricultura

2.5.2.2. Métodos de elaboración de la CCA

2.5.2.2.1. Calcinación a campo abierto (o en pilas)

Es una técnica sencilla de reducción de CCA. La calcinación a campo abierto se realiza en recintos circulares de ladrillo de hasta 16m de diámetro, con pilas de cáscara de 2,5 m de altura. La cáscara calcinada es extraída cada cierto tiempo obteniéndose una ceniza de color blanco a blanco negro.

Mediante esta técnica de calcinación la temperatura no puede ser controlada. Asimismo, debido a la alta temperatura alcanzada y a la formación resultante de estructuras silíceas altamente cristalinas (cristobalita y tridimita), la calcinación a campo abierto es asociada con puzolanas de bajo índice de reactividad.

2.5.2.2.2. Calcinación en hornos (circulares o cuadrados)

Los hornos tienen paredes de ladrillos los cuales se disponen alternadamente de tal manera que se permita el acceso del aire hacia el interior tal como lo muestra la figura 2.7. La chimenea se extiende hasta la base del horno y está elaborada con una malla fina de alambre que permite que el aire fluya y evita el ingreso de ceniza. Asimismo, las paredes interiores están revestidas con una malla de alambre con la finalidad de retener la cáscara, la cual se carga por la cubierta del horno y se descarga por la base.

Esta técnica de calcinación produce una ceniza de color blanco, altamente activa, de naturaleza amorfa y con presencia minoritaria de cuarzo cristalino.

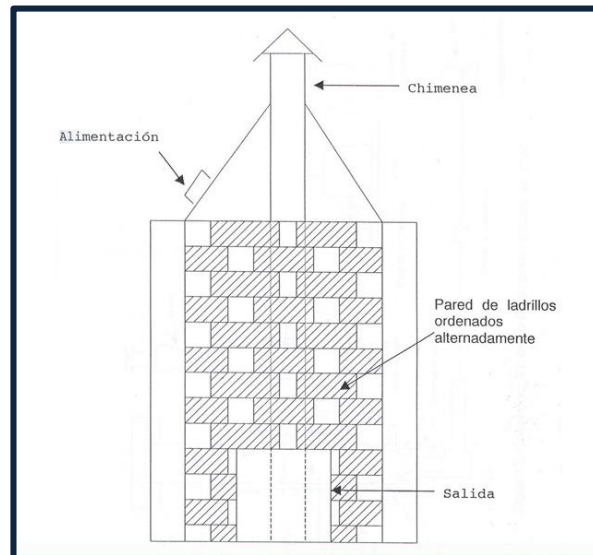


Figura 2.7: Horno de ladrillo para la calcinación de la cáscara de arroz

Fuente: Cementos con adiciones activas, 1997

2.5.2.2.3. Calcinación en lecho fluido

La cámara de combustión es de acero inoxidable y para el lecho fluidizado (partículas no combustibles) se emplea arena con tamaño de partícula de 297 a 590 μm . El aire es suministrado a través de un plato perforado ubicado en la base de la cámara de combustión.

El lecho fluido es precalentado a 500 $^{\circ}\text{C}$ por medio de un dispositivo eléctrico y posteriormente se inicia la alimentación de la cáscara a través de un alimentador de tornillo. Una vez obtenida la ceniza cesa el calentamiento por medio del dispositivo eléctrico. La temperatura de combustión que es monitoreada en el lecho fluido se controla mediante la velocidad de alimentación de la cáscara de arroz. El suministro de aire se fija a una velocidad de 15 cm/s. El tiempo de retención de la ceniza en la cámara de combustión es de sólo unos pocos segundos y posteriormente ésta es colectada a través de un ciclón.

La calcinación controlada de la cáscara de arroz por medio de este tipo de calcinador proporciona una ceniza consistente en sílice amorfa con un alto contenido de SiO_2 y una elevada área superficial. La actividad puzolánica de la ceniza es excelente y proporciona una buena resistencia a la compresión.

Por otra parte, la cáscara de arroz representa una fuente valiosa de energía. El valor energético de la cáscara de arroz es aproximadamente 14 MJ/kg lo cual significa que una tonelada de cáscara de arroz es equivalente a 0,5 toneladas de carbón ó 0,35 toneladas de petróleo. En el proceso Mehta-Pitt se aprovecha el calor de la combustión de la cáscara de arroz, en un horno de lecho fluido, para producir vapor o electricidad.

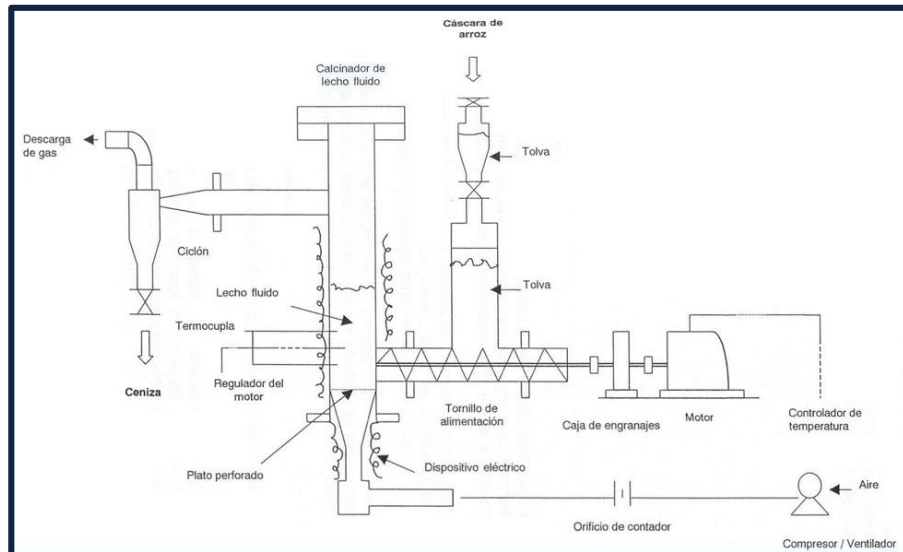


Figura 2.8: Calcinador de lecho fluido para cáscara de arroz

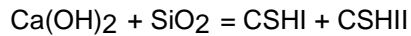
Fuente: Cementos con adiciones activas, 1997

2.5.2.3. Propiedades del cemento más adición de CCA

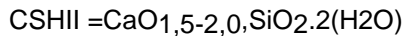
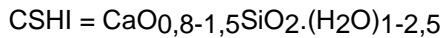
2.5.2.3.1. Reacciones de hidratación

En los cementos y concretos con adición de ceniza de cáscara de arroz, la sílice amorfa de la CCA reacciona con el hidróxido de calcio liberado en la hidratación del cemento para formar silicatos de calcio hidratados del tipo CSHI y CSHII, principales compuestos responsables de la resistencia.

La reacción se ilustra como:



Donde:



2.5.2.3.2. Resistencia a la compresión

La adición de cenizas de cáscara de arroz, con un alto contenido de sílice amorfa, contribuye a la resistencia del cemento y el concreto a edades tempranas y en un periodo intermedio, pero tiene relativamente poco efecto a largo plazo.

Con excepción de la ceniza de cáscara de arroz ningún otro material puzolánico, incluyendo la microsílice, tiene la capacidad de contribuir a la resistencia del cemento a edades tempranas de 1 a 3 días (Inoue, 2003).

Por lo tanto, se puede aprovechar el carácter altamente puzolánico de la ceniza de cáscara de arroz para contrarrestar las pérdidas en las resistencias tempranas que son usualmente asociadas con la incorporación de otros tipos de puzolanas.

2.5.2.3.3. Resistencia química

La adición de ceniza de cáscara de arroz mejora en gran medida la durabilidad del cemento y el concreto.

Se ha demostrado que la ceniza de cáscara de arroz ayuda a reducir sustancialmente la pérdida de masa del concreto expuesto en una solución de ácido clorhídrico, y disminuye considerablemente la expansión debido al ataque de sulfatos y a la reacción álcali-sílice.

2.5.2.4. Composición química

A la ceniza óptima (calcinada a 400°C) y a las cenizas obtenidas a 350 y 900°C se les determinó su composición química obteniéndose un contenido de sílice del 91 al 94%. El segundo componente, en orden de importancia, es el potasio ($\text{K}_2\text{O} = 3\%$ aproximadamente). El contenido de óxido de potasio varía dependiendo del tipo y la cantidad de fertilizantes empleados en el cultivo del arroz.

Tabla 2.6: Composición química de las cenizas de cáscara de arroz

Composición (%)	Ceniza calcinada a:		
	350°C	400°C	900°C
Al ₂ O ₃	0.08	0.07	0.20
CaO	0.20	0.23	0.26
Fe ₂ O ₃	0.09	0.08	0.08
MgO	0.28	0.28	0.32
K ₂ O	3.09	3.08	2.80
Na ₂ O	0.29	0.29	0.39
SiO ₂	91.78	92.92	93.80
Carbón	5.69	4.72	0.39

Fuente: Mehta, P.K, 2001

Tabla 2.7: Composición química del cemento

Composición (%)	Rango
CaO	60-67
SiO ₂	17-25
Al ₂ O ₃	3-8
Fe ₂ O ₃	0,5-6,0
Na ₂ O + K ₂ O	0,2-1,3
MgO	0,1-4,0
Cal libre	0-2
SO ₃	1-3

Fuente: Revista Cemento, Materiales de Construcción 2003

3. Diseño de la Investigación

3.1. Generalidades

En esta parte del informe se detallará la estrategia, variables, procedimientos y pasos que se deberán seguir para plantear de mejor manera el tema de investigación.

La estrategia tiene que ver con el estudio que se hará en relación al tema, dando cumplimiento de esta manera a los objetivos planteados, teniendo en cuenta de esta manera las variables que intervienen en el problema investigativo. Dicho estudio se relaciona con los ensayos de laboratorio que se harán al suelo, para su posterior estabilización.

El estudio se dividirá en cuatro etapas, previo al inicio de éstas se quemará la cáscara de arroz mediante fuego directo, produciendo la ceniza necesaria para implementarla en la experiencia. Posteriormente la cáscara será acopiada en un lugar limpio de elementos que puedan contaminarla y alterar así los resultados de los ensayos a realizar. Luego de quemar la cáscara de arroz comenzara la experiencia en laboratorio.

La primera etapa corresponde al análisis del suelo en su estado natural. En esta etapa se harán ensayos que permitan conocer las características del suelo en su estado natural. La segunda etapa corresponde al análisis del suelo estabilizado con cemento (suelo patrón). En esta etapa se harán ensayos que permitan determinar las propiedades que otorga al suelo la incorporación independiente de cemento en porcentajes establecidos. La tercera etapa corresponde al análisis del suelo arcilloso estabilizado con cemento y CCA. En esta epata se evaluara la influencia de estos dos agentes estabilizadores trabajando en conjunto con el suelo arcilloso. La cuarta etapa corresponde al análisis del suelo estabilizado solo con CCA. En esta etapa se evaluará la influencia que tiene la incorporación de este agente estabilizador trabajando en conjunto con el suelo a estabilizar.

3.2. Definición de variables

Previo a la incorporación de los materiales estabilizantes es fundamental plantear cuáles serán las variables que interviene en el proceso de mejoramiento de suelos.

3.2.1. Variables independientes

- Contenido de cemento: El porcentaje de cemento será una variable muy importante respecto al incremento de capacidad portante que se espera obtener. Se utilizará cemento Portland puzolánico de grado corriente.
- Contenido de CCA: El porcentaje de CCA será una variable muy importante respecto al incremento de capacidad portante que se espera obtener, reduciendo de esta manera el contenido de cemento.

3.2.2. Variables dependientes

- C.B.R. (California Bearing Ratio): Corresponde a la capacidad portante del suelo, obtenida a partir de los variables contenidos de cemento y/o CCA (NCh.1852 Of. 81).
- Expansión volumétrica: Corresponde a la variación de volumen del suelo, producido posterior a 96 horas de inmersión de las probetas, a partir de los variables contenidos de cemento y/o CCA (NCh.1852 Of. 81).

El suelo arcilloso utilizado para este estudio deberá poseer al menos una expansividad media, con un $IP \geq 20$ y con un contenido de finos que pasen la malla n° 200 mayor al 50%, con el fin que el suelo sea de interés, el cual será analizado en cada uno de las etapas previamente mencionadas (Ávila, 2003).

A continuación se describen las tres etapas antes mencionadas y los procedimientos a emplear para el desarrollo de los distintos tipos de ensayos.

3.3. Etapa I: Caracterización del suelo

3.3.1. Muestreo del suelo

Se procede a extraer muestras de suelo, para este estudio se tomarán muestras de suelo del sector Camino La Pólvara, Valparaíso. Sector reconocido por contener suelos arcillosos que son de interés de este estudio.

La cantidad de suelo a extraer deberá ser suficiente para realizar todos los ensayos que contempla el estudio. Se deberá tomar aproximadamente 700 kg de suelo y luego acopiarlos en un lugar limpio de elementos que puedan contaminar el suelo y alterar los resultados de los ensayos a realizar.

3.3.2. Clasificación del suelo

La clasificación del suelo se hará de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS) y con el sistema AASHTO. Para realizar ambas clasificaciones se requiere obtener previamente los resultados de los ensayos de granulometría y límites de Atterberg.

Previamente se realizarán tres análisis granulométricos, el ensayo se realizará de acuerdo a un procedimiento normalizado (Norma ASTM D- 422-63). Con ellos se obtendrá el porcentaje de finos que pasa por la malla N° 200.

Posterior al análisis granulométrico se realizarán los ensayos correspondientes a la determinación de los límites de consistencia o Atterberg (NCh 1517.Of 79). Los límites de consistencia comprenden a los límites líquidos, plásticos y de contracción.

Para este estudio se determinarán los límites líquido y plástico, se omitirá el límite de contracción por ser menos práctico en la estabilización de suelos. Luego de obtener los resultados de los límites líquido y plástico se determina el índice de plasticidad para cada una de las tres muestras.

Con los resultados de los ensayos antes mencionados se ingresará a la tabla de clasificación de suelos USCS y AASHTO, obteniendo así el grupo al cual pertenece cada suelo. Además de estas clasificaciones, el suelo debe ser, al menos, de expansividad media según tabla 2.4. Si la muestra de

suelo no cae dentro del grupo de arcillas que se persigue se deberá proceder a extraer muestras de otro origen que cumpla con este requerimiento.

3.3.3. Compactación del suelo

Se someterá a ensayo de compactación Proctor Modificado (Método A). Se determinará la densidad máxima compactada seca y la humedad óptima, estos valores se utilizarán como referencia para la incorporación de los agentes estabilizadores.

Se harán tres análisis Proctor Modificado, una para cada muestra, de este modo se espera obtener una mayor seguridad de que los resultados obtenidos sean correctos. El procedimiento del ensayo se hará de acuerdo con la norma que lo rige y se utilizará el método A (NCh.1534/2.Of 79).

3.3.4. Capacidad de soporte

La capacidad de soporte de los suelos se hará a través del ensayo de penetración C.B.R. Se confeccionarán tres probetas con distinta energía de compactación con 56, 25 y 10 golpes (Método B). El ensayo de penetración y la expresión de resultados se harán de acuerdo al procedimiento normalizado. (NCh.1852 Of. 81)

El C.B.R. se determinará al 95% de la D.M.C.S. y a 0,2" de penetración. Como las precipitaciones promedio anuales en la quinta región son mayores a 50mm las probetas deben someterse al proceso de inmersión.

3.3.5. Expansión volumétrica

Se procederá a realizar la medición de hinchamiento o expansión de cada probeta posterior al proceso de inmersión de 96 horas acuerdo a la norma vigente (NCh.1852.Of 81). Este ensayo utiliza un trípode y un dial que mide la expansión cada 0,025mm.

Todos los ensayos que se desarrollarán en la primera etapa se resumen en la tabla 3.1:

Tabla 3.1: Ensayos a realizar Etapa I

ETAPA I	MUESTRAS	N° DE PROBETAS												
SUELO NATURAL	1													
	2													
	3													
			GRANULOMETRÍA	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	PROCTOR MODIFICADO			EXPANSIÓN			C.B.R		

Fuente: Elaboración propia, 2014

Total probetas proctor modificado = 15

Total Probetas CBR y expansión = 9

A pesar de ser ensayos distintos, es necesario recordar que para efectuar el ensaye C.B.R. y expansión volumétrica se necesita la misma probeta.

3.4. Etapa II: Suelo-cemento

Parte fundamental de este estudio y para el cumplimiento de los objetivos planteados es la incorporación de los agentes estabilizantes propuestos, para ello se analizará en primer lugar la influencia que tiene el cemento, de modo que se puedan recopilar antecedentes válidos que ayuden posteriormente a encontrar la dosis óptima de la solución suelo-cemento-CCA propuesta y evaluar el aporte de cada uno de estos materiales sobre el suelo.

3.4.1. Análisis del suelo estabilizado con cemento

Una vez considerado que el suelo es apto para su tratamiento con cemento, se pasa a determinar la fórmula de trabajo para la mezcla suelo-cemento que permita conseguir los objetivos propuestos.

La dosificación óptima será aquella que logre aumentar hasta un valor máximo la capacidad portante del suelo (C.B.R.) en estado saturado, además el ensaye será normado mediante el manual de vialidad, una vez determinado y clasificado el suelo.

A modo de síntesis, el tratamiento del suelo con cemento se describe como lo muestra la siguiente tabla:

Tabla 3.2: Factoriales de diseño, suelo cemento

SUELO-CEMENTO	PORCENTAJE DE CEMENTO EN PESO		
PROPIEDAD	X%		
Y			
Z			

Fuente: Elaboración propia, 2014

Donde:

Y= Capacidad de soporte C.B.R. en función de la dosis de cemento.

Z= Expansión volumétrica en función de la dosis de cemento.

Para la proporción planteada en la tabla anterior se realizarán 3 muestras, por lo tanto, se realizarán 9 probetas para analizar el C.B.R. e hinchamiento de éstas.

Tabla 3.3: Porcentajes óptimos de cemento según AASHTO

CLASIFICACIÓN DEL SUELO AASHTO	PORCENTAJE DE CEMENTO (EN PESO)
A-1-a	5
A-1-b	6
A-2	7
A-3	9
A-4	10
A-5	10
A-6	12
A-7	13

Fuente: Manual de Vialidad, 1985

3.4.2. Incorporación de cemento

La incorporación de cemento se hará de acuerdo a lo establecido en el Manual de Vialidad, siguiendo de manera correcta cada paso, con el fin de realizar a cabalidad lo establecido en él. Para el porcentaje de cemento se realizarán 3 probetas C.B.R.

3.4.3. Compactación del suelo

Para obtener la humedad óptima de cada mezcla suelo-cemento se utilizará el método Proctor modificado (Método A), con la diferencia que al confeccionar cada mezcla se debe esperar al menos media hora para que entre en reacción con el suelo

3.4.4. Capacidad de soporte

Se determinará el incremento en la capacidad de soporte del suelo estabilizado con respecto al suelo en condiciones naturales. Esto se hará mediante el ensayo C.B.R. a cada una de las probetas (Método B) y se utilizará el porcentaje obtenido según muestra la tabla 3.3.

3.4.5. Expansión

Se procederá a realizar la medición de hinchamiento o expansión de cada probeta posterior al proceso de inmersión de 96 hrs acuerdo a la norma vigente (NCh.1852.Of 81).

Todos los ensayos y procedimientos que se desarrollarán en la segunda etapa se resumen en la tabla 3.4:

Tabla 3.4: Ensayos a realizar Etapa II

ETAPA II	MUESTRAS	N° DE PROBETAS								
SUELO-CEMENTO	1									
	2									
	3									
		PROCTOR MODIFICADO			EXPANSIÓN			C.B.R		

Fuente: Elaboración propia, 2014

Total probetas proctor modificado = 15

Total Probetas CBR y expansión = 9

3.5. Etapa III: Suelo-cemento-CCA

En esta etapa de investigación se analizarán las propiedades que resulten de la mezcla suelo-cemento-CCA planteada en los objetivos de este estudio, de manera de dar respuesta a estos, utilizando como antecedentes previos los resultados obtenidos en la segunda etapa (3.4), en cuanto al porcentaje óptimo de cemento.

3.5.1. Análisis del suelo estabilizado con cemento y CCA en conjunto

Una vez considerado que el suelo es apto para su tratamiento con cemento y CCA, se pasa a determinar la fórmula de trabajo para la mezcla suelo-cemento-CCA que permita conseguir los objetivos propuestos.

La dosificación óptima será aquella que logre reducir e incluso, anular, el hinchamiento potencial, y aumentar hasta un valor aceptable la capacidad portante del suelo (C.B.R.)

A modo de síntesis, el tratamiento del suelo con cemento y CCA se describe como lo muestra la siguiente tabla:

Tabla 3.5: Factoriales de diseño, suelo-cemento-CCA

SUELO-CEMENTO-CCA		PORCENTAJE EN PESO DE CCA		
PORCENTAJE DE CEMENTO EN PESO	PROPIEDAD	10%	20%	30%
X%	Y			
	Z			

Fuente: Elaboración propia, 2014

Donde:

X= Porcentaje de cemento obtenido en la segunda etapa.

Y= Capacidad de soporte C.B.R. en función de la dosis de cemento y CCA.

Z= Expansión volumétrica en función de la dosis de cemento y CCA

Para cada una de las proporciones planteadas en la tabla anterior se realizarán 3 probetas por muestra (1,2,3), haciendo un total de 27 probetas para analizar el C.B.R. e hinchamiento de éstas.

La humedad óptima de compactación a utilizar será aquella con la que se logre la mayor D.M.C.S en el ensayo proctor modificado para cada mezcla de cemento y CCA.

3.5.2. Incorporación de cemento y CCA

La cantidad de cemento utilizado será aquel que le otorgue al suelo la máxima capacidad de soporte obtenida en la segunda etapa.

La incorporación de CCA se hará en concentraciones que variarán de un 10, 20 y 30%, en peso.

La compactación, capacidad de soporte y expansión se registrarán bajo los mismos procedimientos indicados en la sección 3.4.3, 3.4.4. y 3.4.5. Salvo la cantidad de cemento, la cual permanecerá fija y se realizaran variaciones solo para la cantidad de CCA.

Todos los ensayos y procedimientos que se desarrollarán en la tercera etapa se resumen en la tabla 3.6:

Tabla 3.6: Ensayos a realizar Etapa III

ETAPA III	DOSIFICACIÓN	MUESTRAS	N° DE PROBETAS											
SUELO CEMENTO CCA	10 - 20 - 30 %	1												
		2												
		3												
			PROCTOR MODIFICADO					EXPANSIÓN			CBR			

Fuente: Elaboración propia, 2014

Total probetas proctor modificado = 45

Total Probetas CBR y expansión = 27

3.6. Etapa IV: Suelo-CCA

En esta etapa final de investigación se analizarán las propiedades que resulten de la mezcla suelo-CCA a fin de observar cual es el aporte de la ceniza en la mezcla.

3.6.1. Análisis del suelo estabilizado con CCA

Una vez considerado que el suelo es apto para su tratamiento con CCA, se pasa a determinar la fórmula de trabajo para la mezcla suelo-CCA que permita conseguir los objetivos propuestos.

A modo de síntesis, el tratamiento del suelo con CCA se describe como lo muestra la siguiente tabla:

Tabla 3.7: Factoriales de diseño, suelo-CCA

SUELO-CCA	PORCENTAJE EN PESO	
	10%	20%
Y		
Z		

Fuente: Elaboración propia, 2014

Donde:

Y= Capacidad de soporte C.B.R. en función de la dosis de CCA.

Z= Expansión volumétrica en función de la dosis de CCA.

Para cada una de las proporciones planteadas en la tabla anterior se realizarán 3 probetas por muestra (1,2,3), haciendo un total de 18 probetas para analizar el C.B.R. e hinchamiento de éstas.

La humedad óptima de compactación a utilizar será aquella con la que se logre la mayor D.M.C.S en el ensayo proctor modificado para cada mezcla de cemento y CCA.

3.6.2. Incorporación de CCA

La incorporación de CCA se hará en concentraciones de 10 y un 20%, en peso.

La compactación, capacidad de soporte y expansión se registrarán bajo los mismos procedimientos indicados en la sección 3.4.3, 3.4.4. y 3.4.5.

Todos los ensayos y procedimientos que se desarrollarán en la cuarta etapa se resumen en la tabla 3.8:

Tabla 3.8: Ensayos a realizar Etapa IV

ETAPA IV	DOSIFICACIÓN	MUESTRAS	N° DE PROBETAS										
			SUELO CCA	10--20 %	1								
2													
3													
			PROCTOR MODIFICADO			EXPANSIÓN			CBR				

Fuente: Elaboración propia, 2014

4. Investigación de Laboratorio y Estudio Técnico-Económico de Suelos Arcillosos Estabilizados con Cemento y CCA.

4.1. Etapa I: Caracterización de los materiales constituyentes

4.1.1. Caracterización del suelo natural

La extracción del suelo se realizó en el sector “Camino La Pólvara”, este ubicado en la parte alta del Cerro Playa Ancha, sector altamente reconocido por tener suelos arcillosos con una plasticidad alta.

La primera etapa de la experiencia corresponde a la obtención, acopio y homogenización de 700 kg de material para luego ser guardado y almacenado en sacos a una capacidad de 30 kg de manera de evitar una posible contaminación del suelo. Figura 4.1.



Figura 4.1: Homogenización del suelo

Fuente: Elaboración propia, 2014



Figura 4.2: Almacenamiento del material

Fuente: Elaboración propia, 2014

4.1.1.1. Análisis granulométrico del suelo natural (Norma ASTM D-422-63)

Para el análisis granulométrico se hicieron 3 muestras granulométricas para un mismo tipo de suelo, a fin de presentar un promedio y así poder mostrar un dato más verídico. En la confección de gráficos los valores pertenecientes al eje Y (% que pasa), comenzaran de 70% y no de cero por razones de escala. A modo de análisis se tomó una muestra seca inicial de 500 gr para cada una de las muestras.

Tabla 4.1: Granulometría promedio del suelo

TAMICES		RETENIDO		% QUE PASA
Nch (mm.)	ASTM (pulg.)	Masa (g)	%	
10	N°3/8	0	0	100
5	N°4	1,55	0,31	99,69
2	N° 10	1,50	0,30	99,39
0,5	N°40	45,92	9,18	90,21
0,08	N°200	78,78	15,76	74,45
	Residuo	2,44	0,49	73,96

Fuente: Elaboración propia, 2014

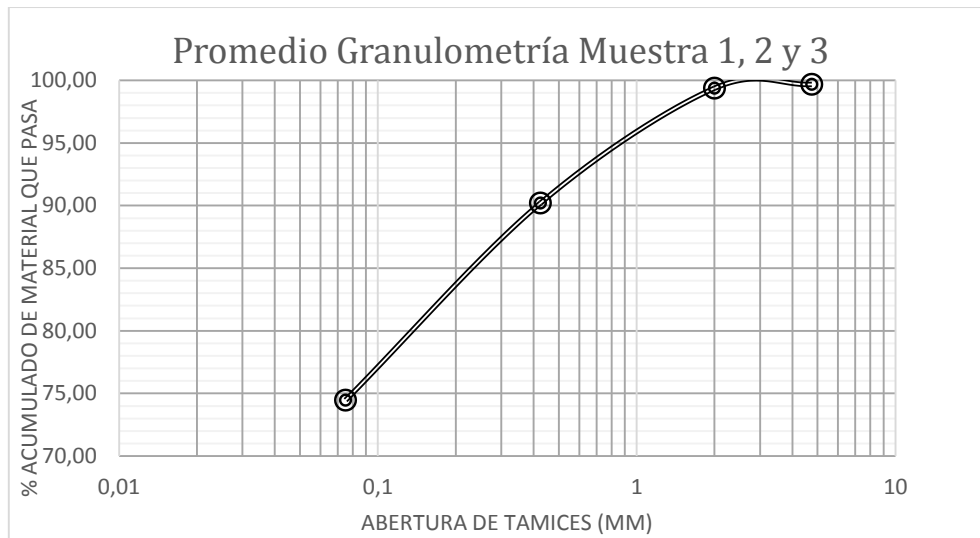


Figura 4.3: Granulometría promedio del suelo

Fuente: Elaboración propia, 2014



Figura 4.4: Granulometría del suelo

Fuente: Elaboración propia, 2014

4.1.1.2. Límites de Atterberg suelo natural (Norma Nch 1517/I y Nch 1517/II Of. 79)

A fin de obtener el índice de plasticidad se ensayaron 3 muestras de un mismo suelo, con el motivo de mostrar un dato más verídico.

- Límite Líquido

Muestra de suelo N° 1:

Tabla 4.2: Contenido de humedad y n° de golpes, M #1

Contenido de Humedad %	51,0	48,5	44,1	42,5	37,7
Numero de Golpes, N	14	20	27	32	40

Fuente: Elaboración propia, 2014

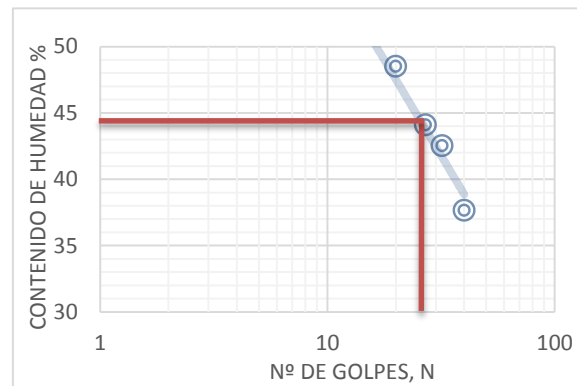


Figura 4.5: Curva de fluidez M #1

Fuente: Elaboración propia, 2014

Según figura 4.5. se obtiene una humedad de 44,74% al interceptar con la abscisa de 25 golpes, correspondiente al límite líquido.

Muestra de suelo N° 2:

Tabla 4.3: Contenido de humedad y n° de golpes, M #2

Contenido de Humedad %	51,4	45,7	39,9	35,8	33,0
Numero de Golpes, N	12	21	29	39	48

Fuente: Elaboración propia, 2014

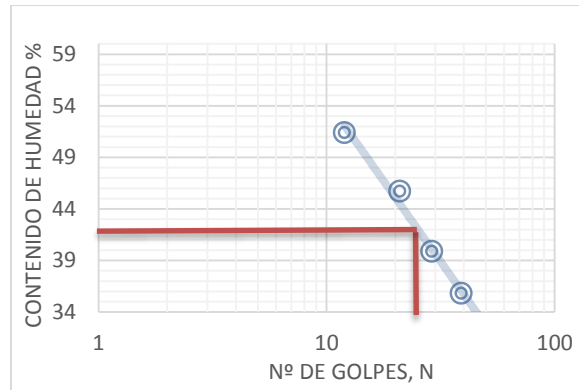


Figura 4.6: Curva de fluidez M #2

Fuente: Elaboración propia, 2014

Según figura 4.6. se obtiene una humedad de 42,10% al interceptar con la abscisa de 25 golpes, correspondiente al límite líquido.

Muestra de suelo N° 3:

Tabla 4.4: Contenido de humedad y n° de golpes, M #3

Contenido de Humedad %	51,1	47,5	42,0	38,3	34,2
Numero de Golpes, N	15	21	32	37	44

Fuente: Elaboración propia, 2014

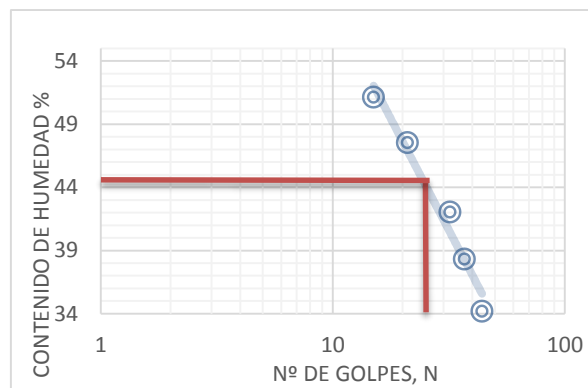


Figura 4.7: Curva de fluidez M #3

Fuente: Elaboración propia, 2014

Según figura 4.7. se obtiene una humedad de 44,25% al interceptar con la abscisa de 25 golpes, correspondiente al límite líquido.



Figura 4.8: Ensayo determinación de límite líquido

Fuente: Elaboración propia, 2014

- Límite Plástico

Muestra de suelo N° 1:

Tabla 4.5: Humedad para la determinación del límite plástico, M #1

Ensayo N°	1	2	3
Recipiente + Suelo Húmedo (gr)	13,43	13,15	13,44
Recipiente + Suelo Seco (gr)	12,60	12,14	12,48
Recipiente (gr)	9,27	8,24	8,50
Peso del Suelo Seco (gr)	3,33	3,90	3,98
Peso de Agua(gr)	0,83	1,01	0,96
Contenido de Humedad %	24,9	25,9	24,1

Fuente: Elaboración propia, 2014

Según tabla 4.5. promediando las humedades, se obtiene una humedad de 24,98%, correspondiente al límite plástico.

Muestra de suelo N° 2:

Tabla 4.6: Humedad para la determinación del límite plástico, M #2

Ensayo N°	1	2	3
Recipiente + Suelo Húmedo (gr)	13,81	12,01	13,43
Recipiente + Suelo Seco (gr)	12,58	10,81	12,00
Recipiente (gr)	7,72	5,80	6,40
Peso del Suelo Seco (gr)	4,86	5,01	5,60
Peso de Agua(gr)	1,23	1,20	1,43
Contenido de Humedad %	25,3	24,0	25,5

Fuente: Elaboración propia, 2014

Según tabla 4.6. promediando las humedades, se obtiene una humedad de 24,93%, correspondiente al límite plástico.

Muestra de suelo N° 3:

Tabla 4.7: Humedad para la determinación del límite plástico, M #3

Ensayo N°	1	2	3
Recipiente + Suelo Húmedo (gr)	13,26	13,91	13,45
Recipiente + Suelo Seco (gr)	12,03	13,05	12,40
Recipiente (gr)	6,26	8,92	7,49
Peso del Suelo Seco (gr)	5,77	4,13	4,91
Peso de Agua(gr)	1,23	0,86	1,05
Contenido de Humedad %	21,3	20,8	21,4

Fuente: Elaboración propia, 2014

Según tabla 4.7. promediando las humedades, se obtiene una humedad de 21,18%, correspondiente al límite plástico.



Figura 4.9: Ensayo determinación de límite plástico

Fuente: Elaboración propia, 2014

- Índice de Plasticidad

Calculando la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP) obtendremos el índice de plasticidad (IP), tal como se muestran los resultados en la tabla 4.8.

Tabla 4.8: Índice de plasticidad M #1, 2 y 3

Muestra N°	LL	LP	IP = LL - LP
1	44,7	25,0	19,7
2	42,1	24,9	17,2
3	44,3	21,2	23,1
Promedio	43,7	23,7	20,0

4.1.1.3. Clasificación del suelo natural

Un sistema de clasificación de los suelos es una agrupación de éstos con características semejantes. El propósito es estimar en forma fácil las propiedades de un suelo por comparación con otros del mismo tipo, cuyas características se conocen. Son tantas las propiedades y combinaciones en los suelos y múltiples los intereses ingenieriles, que las clasificaciones están orientadas al campo de ingeniería para el cual se desarrollaron, por consiguiente, sólo se darán a conocer las clasificaciones empleadas en obras viales. Además se incluirá la clasificación de suelos según su expansividad planteada por Ávila (2003).

- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS)

Ya que el porcentaje de partículas finas que pasa el tamiz N° 200 es superior al 50%, el suelo corresponde a un material fino, para lo cual se debe realizar la clasificación a través de la carta de plasticidad, usando los promedios de LL e IP.

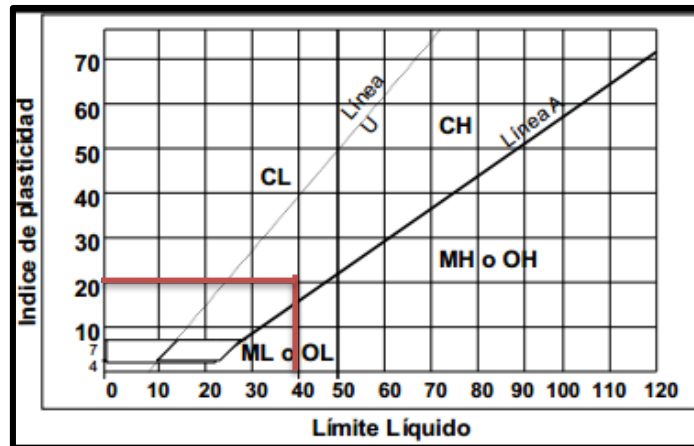


Figura 4.10: Carta de plasticidad

Según la clasificación de suelos y carta de plasticidad el suelo corresponde a un suelo arcilloso inorgánico de baja a media plasticidad (CL).

- Sistema de clasificación de suelo AASHTO

Ya que el porcentaje de finos que pasa el tamiz N° 200 es superior al 35%, el material corresponde a un suelo fino. Este debe completar mediante el índice de grupo (IG).

$$IG = (F - 35) (0,2 + (0,005 (LL - 40))) + 0,01 (F - 15) (IP - 10)$$

Por lo tanto, IG = 15.

Según AASHTO la clasificación corresponde a un suelo arcilloso A-7-5(15).

- Clasificación según expansividad

Según Ávila (2003) este suelo corresponde a un suelo con una expansividad media alta.

Tabla 4.9: Expansividad del suelo según Ávila, 2003

Expansividad	Índice de plasticidad	Límite Líquido	Contenido de finos
Baja	<15	<30	<30
Media	15 a 30	30 a 45	30 a 60
Alta	>30	>45	>60

El suelo natural fue analizado y demostró ser de interés para este estudio, ya que este satisface las condiciones establecidas en cuanto a porcentaje de material fino que pasa el tamiz N° 200, índice de plasticidad y expansividad del suelo.

4.1.1.4. Proctor Modificado suelo natural (Norma Nch 1534/II Of. 79)

*D.M.C.S: Densidad Máxima Compactada Seca.

**H. OPT: Húmedad Óptima.

Muestra de suelo N° 1:

Tabla 4.10: Resultados proctor modificado M #1

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	14,33	16,20	18,56	21,12	22,97
Densidad Seca (g/cm ³)	1,56	1,69	1,70	1,65	1,59

Fuente: Elaboración propia, 2014

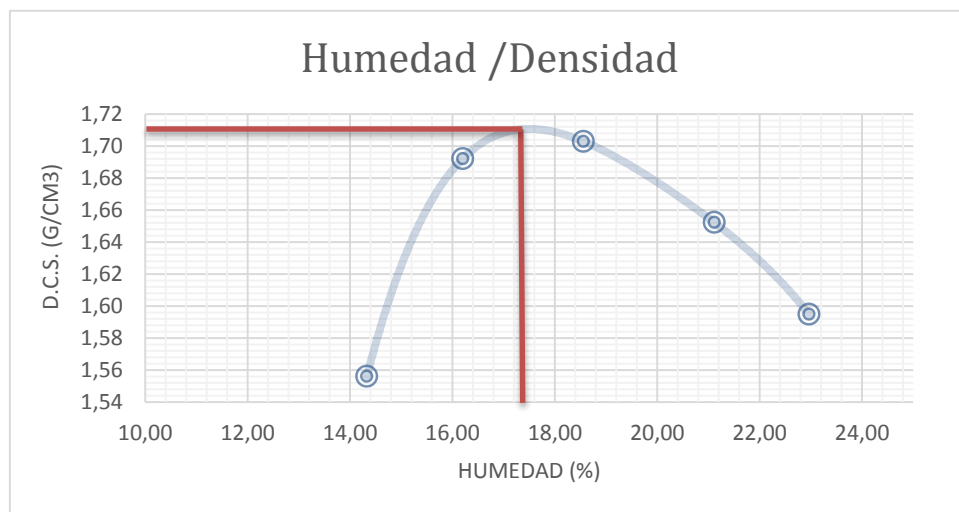


Figura 4.11: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #1

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm ³)	H. OPT. (%)
1,71	17,3

Muestra de suelo N° 2:

Tabla 4.11: Resultados proctor modificado M #2

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	13,04	16,22	18,60	20,46	23,00
Densidad Seca (g/cm ³)	1,41	1,56	1,74	1,67	1,39

Fuente: Elaboración propia, 2014

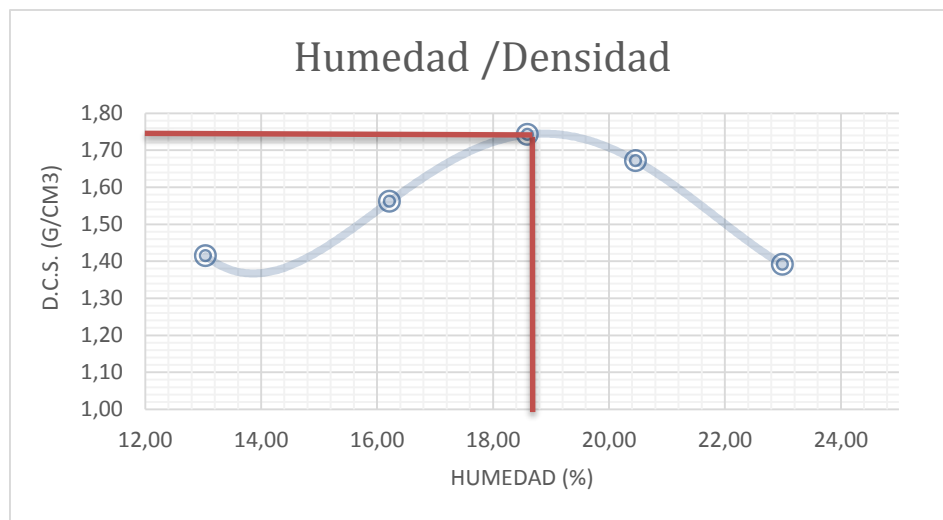


Figura 4.12: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #2

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S (g/cm ³)	H. OPT (%)
1,72	18,6

Muestra de suelo N° 3:

Tabla 4.12: Resultados proctor modificado M #3

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	13,27	15,48	17,50	19,86	21,93
Densidad Seca (g/cm ³)	1,49	1,68	1,78	1,68	1,53

Fuente: Elaboración propia, 2014

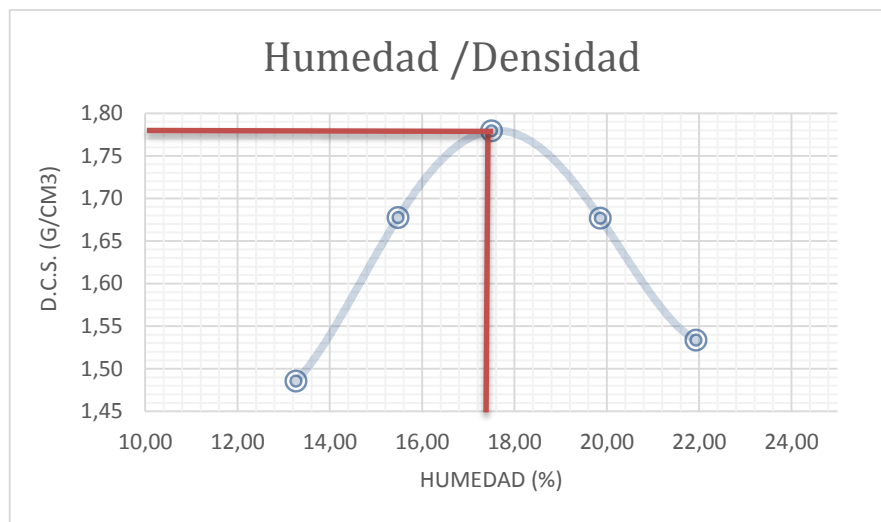


Figura 4.13: Determinación de D.M.C.S. y H. óptima M #3

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S (g/cm ³)	H. OPT (%)
1,77	17,6

En la tabla 4.13 se muestra el promedio de la D.M.C.S. y la humedad óptima de las muestras ensayadas.

Tabla 4.13: Promedio resultados proctor modificado, suelo natural

Muestra N°	D.M.C.S. (g/cm ³)	Humedad Óptima (%)
1	1,71	17,30
2	1,72	18,60
3	1,77	17,60
Promedio	1,73	17,83

Fuente: Elaboración propia, 2014



Figura 4.14: Ensayo Proctor Modificado, Método B

Fuente: Elaboración propia, 2014

4.1.1.5. Capacidad de Soporte C.B.R. suelo natural (Norma Nch 1852/II Of. 80)

Muestra de suelo N° 1:

Tabla 4.14: Determinación C.B.R. a 0,2" de penetración M #1, saturado

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,68	8,74
25 GOLPES	1,49	6,46
10 GOLPES	1,37	4,32

Fuente: Elaboración propia, 2014

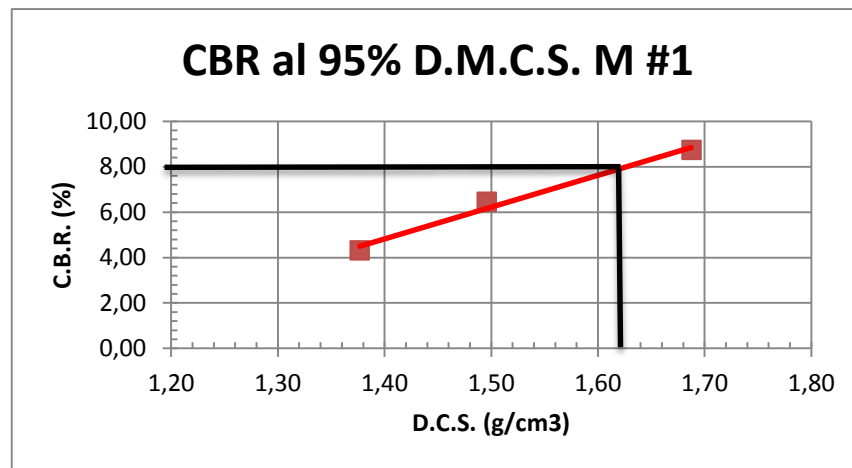


Figura 4.15: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.15: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% de la D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,71	1,62	8,00

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra de suelo N° 2:

Tabla 4.16: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #2, saturado

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,69	9,31
25 GOLPES	1,56	6,32
10 GOLPES	1,42	4,60

Fuente: Elaboración propia, 2014

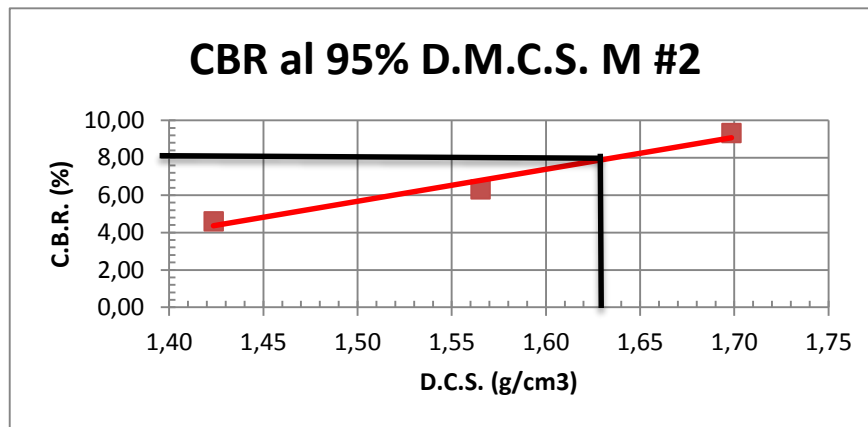


Figura 4.16: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.17: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,72	1,63	8,00

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra de suelo N° 3:

Tabla 4.18: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #3, saturado

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,68	8,17
25 GOLPES	1,58	7,03
10 GOLPES	1,56	4,74

Fuente: Elaboración propia, 2014

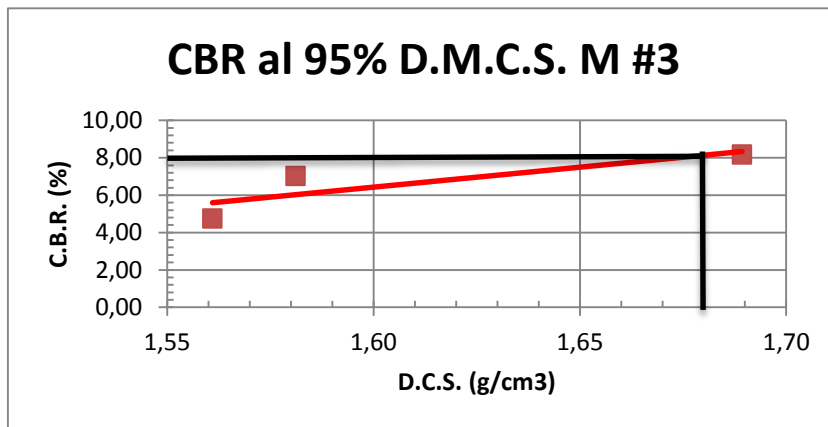


Figura 4.17: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.19: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,77	1,68	8,20

Fuente: Elaboración propia, 2014

En la tabla 4.20 se muestra el promedio de la capacidad de soporte de las 3 muestras de suelo en estado saturado.

Tabla 4.20: C.B.R. promedio suelo natural, saturado al 95% de la D.M.C.S

Muestra N°	C.B.R. saturado (%)
1	8,00
2	8,00
3	8,20
Promedio	8,07

Fuente: Elaboración propia, 2014



Figura 4.18: Ensaye capacidad de soporte (prensa C.B.R.)

Fuente: Elaboración propia, 2014

4.1.1.6. Expansión volumétrica suelo natural (Norma Nch 1852/II Of. 80)

La expansión del suelo fue realizada luego de 96 hrs. De inmersión, a una cantidad de agua constante y con sobrecargas mayores a 4.54 kg, ya que estas simulan las cargas ejercidas por la base y pavimento en construcciones de vialidad. Para cada una de las probetas se registró una lectura inicial antes de la inmersión y una final posterior a la inmersión.

Muestra de suelo N° 1:

Tabla 4.21: Expansión volumétrica suelo natural, M #1

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL(0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL(0,001 pulg)	310	331	386
EXPANSION (mm)	7,87	8,41	9,80
EXPANSIÓN (%)	6,76	7,22	8,42

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra de suelo N° 2:

Tabla 4.22: Expansión volumétrica suelo natural, M #2

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL(0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL(0,001 pulg)	260	330	432
EXPANSION (mm)	6,60	8,38	10,97
EXPANSIÓN (%)	5,67	7,20	9,43

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra de suelo N° 3:

Tabla 4.23: Expansión volumétrica suelo natural, M #3

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL(0,001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL(0,001 pulg)	241	254	283
EXPANSION (mm)	6,12	6,45	7,19
EXPANSIÓN (%)	5,26	5,54	6,18

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.24: Expansión volumétrica (%) promedio M #1, 2 y 3

MUESTRA N°	N° de Golpes		
	56	25	10
1	6,76	7,22	8,42
2	5,67	7,20	9,43
3	5,26	5,54	6,18
PROMEDIO	5,90	6,65	8,01

Fuente: Elaboración propia, 2014

La tabla 4.24 muestra la expansión promedio para cada N° de golpes, y se observa que todos los niveles son superiores al 3% máximo que estipula el Manual de Carreteras (MC5.201.303), por lo que el suelo no puede ser utilizado y se considera material de remoción. Por el contrario este material pudiera ser utilizado mediante una estabilización, fin que se persigue en este estudio.

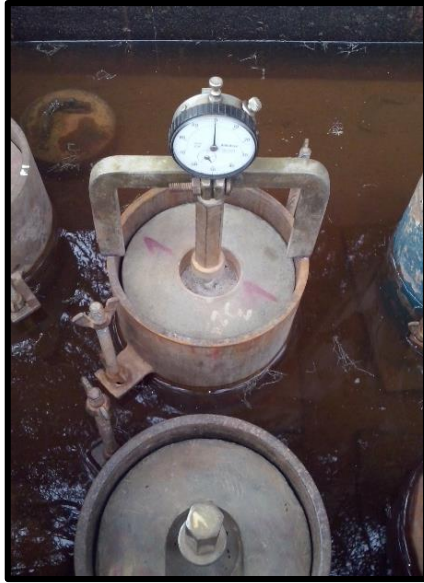


Figura 4.19: Medición de expansión mediante dial

Fuente: Elaboración propia, 2014

4.1.2. Caracterización de la ceniza de cáscara de arroz (CCA)

Para esta investigación se utilizaron 1000 kg de cáscara de arroz procedente de la localidad de Linares, la cual fue quemada mediante fuego directo produciendo 100 kg aproximadamente de ceniza necesaria para este estudio.



Figura 4.20: Ceniza de cáscara de arroz

Fuente: Elaboración propia, 2014

4.1.2.1. Análisis granulométrico de la CCA (Norma ASTM D-422-63)

Con el fin de determinar la distribución de partículas que tiene la CCA que se utilizará como estabilizante se procederá a realizar un análisis granulométrico a ésta. Este será presentado a continuación en la tabla 4.25.

Tabla 4.25: Granulometría de la CCA

TAMICES		RETENIDO		% QUE PASA
Nch (mm.)	ASTM (pulg.)	Masa (g)	%	
10	N° 3/8"	0	0,00	100
5	N°4	0	0,00	100
2	N° 10	0,13	0,03	99,97
0,5	N°40	0,22	0,04	99,93
0,08	N°200	0,39	0,08	99,85
Residuo		468,7		

Fuente: Elaboración propia, 2014

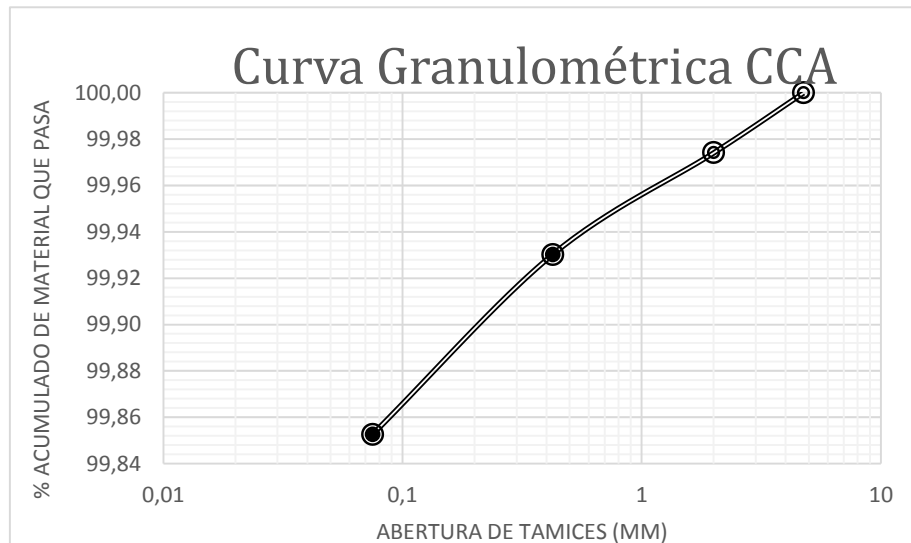


Figura 4.21: Granulometría CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

4.1.2.2. Peso específico de la CCA según MC VOL. 8 anexo 2.102.10.

$$\rho_s = \frac{ms}{(ms + Ma) - Mm} \times \rho_{Wtx}$$

Dónde: Ps: Densidad de partículas sólidas (gr/cm³)

Ma: Masa de picnómetro más agua a la T° de ensaye (gr).

Mm: Masa del picnómetro más la muestra y el agua a la T° de ensaye (gr).

ms: masa seca de la muestra de ensaye (gr).

PWtx: densidad del agua a una temperatura x dada (gr/cm³).

Ma: 667,5 gr.

Mm: 714,3 gr.

Ms: 98 gr.

PWtx: 0,99859 gr/cm³ (tabla 8.102.10.A, MC VOL 8)

Ingresando los datos en la formula, arroja un peso específico para la CCA equivalente a 1,91 gr/cm³.

4.1.2.3. Límites de Atterberg CCA (Norma Nch 1517/I y Nch 1517/II Of. 79)

- Límite Líquido

Muestra CCA:

Tabla 4.26: Contenido de humedad y n° de golpes, muestra CCA

Contenido de Humedad %	32,3	28,8	26,8	19,1	14,2
Numero de Golpes, N	11	18	24	30	35

Fuente: Elaboración propia, 2014

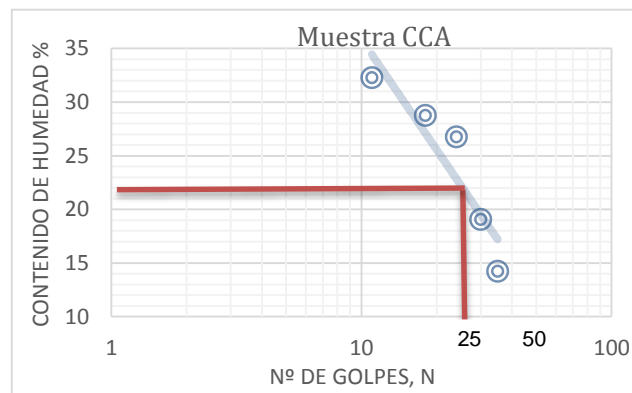


Figura 4.22: Curva de fluidez muestra CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

Según figura 4.22. se obtiene una humedad de 22,22% al interceptar con la abscisa de 25 golpes, correspondiente al límite líquido.

- Límite Plástico

Muestra CCA:

Tabla 4.27: Humedad para la determinación del límite plástico, muestra CCA

Ensayo N°	1	2	3
Recipiente + Suelo Húmedo (gr)	13,92	10,31	11,05
Recipiente + Suelo Seco (gr)	13,37	9,75	10,42
Recipiente (gr)	10,38	6,91	7,49
Peso del Suelo Seco (gr)	2,99	2,84	2,93
Peso de Agua (gr)	0,55	0,56	0,63
Contenido de Humedad %	18,4	19,7	21,5

Fuente: Elaboración propia, 2014

Según tabla 4.27. promediando las humedades, se obtiene una humedad de 19,87%, correspondiente al límite plástico.

- Índice de plasticidad

Tabla 4.28: Índice de plasticidad, muestra CCA

Muestra N°	LL	LP	IP = LL - LP
CCA	22,2	19,9	2,3

Fuente: Elaboración propia, 2014

4.1.3. Caracterización del cemento

Para esta investigación se utilizará cemento Portland puzolánico de grado corriente de la empresa Melón para hacer este tipo de suelo.



Figura 4.23: Cemento a utilizar en la investigación

Fuente: Elaboración propia, 2014

4.1.3.1. Peso específico del cemento.

El peso específico real varía muy poco de unos cementos a otros, oscilando entre 2,9 y 3,15 (gr/cm³). La determinación del peso específico relativo de los cementos consiste en establecer la relación entre una masa de cemento (gr) y el volumen (ml) de líquido que esta masa desplaza en el matraz de Le Chatelier (IECA, 2010).

4.2. Etapa II: Suelo-cemento (suelo patrón)

Según sección 3.4 el porcentaje de cemento esta normado por el tipo del suelo, para el cual este fue clasificado como un suelo arcilloso A-7-5 en la etapa I de la experiencia.

Tabla 4.29: Porcentajes óptimos de cemento según AASHTO

CLASIFICACIÓN DEL SUELO AASHTO	PORCENTAJE DE CEMENTO (EN PESO)
A-1-a	5
A-1-b	6
A-2	7
A-3	9
A-4	10
A-5	10
A-6	12
A-7	13

Fuente: Manual de Vialidad

Previo al desarrollo del ensayo se determinó el índice de plasticidad de la mezcla suelo cemento (13%), obteniendo un $IP = 8,62$

4.2.1. Proctor Modificado suelo-cemento (Norma Nch 1534/II Of. 79)

Muestra N° 1 suelo cemento (13%):

Tabla 4.30: Resultados proctor modificado M #1, suelo cemento

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	12,94	15,14	17,41	19,33	21,54
Densidad Seca (g/cm ³)	1,63	1,75	1,63	1,58	1,59

Fuente: Elaboración propia, 2014

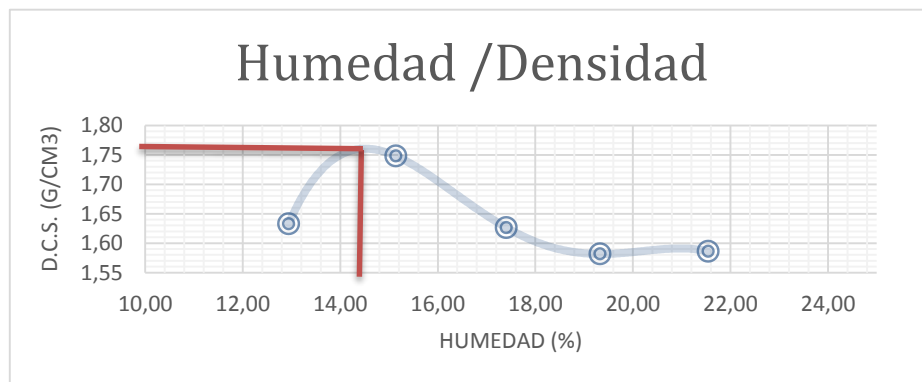


Figura 4.24: Determinación de D.M.C.S y H. óptima M#1, suelo cemento

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm ³)	H. OPT. (%)
1,76	14,6

Muestra N° 2 suelo cemento (13%):

Tabla 4.31: Resultados proctor modificado M #2, suelo cemento

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	12,75	11,91	15,04	17,09	19,19
Densidad Seca (g/cm ³)	1,54	1,57	1,73	1,69	1,68

Fuente: Elaboración propia, 2014

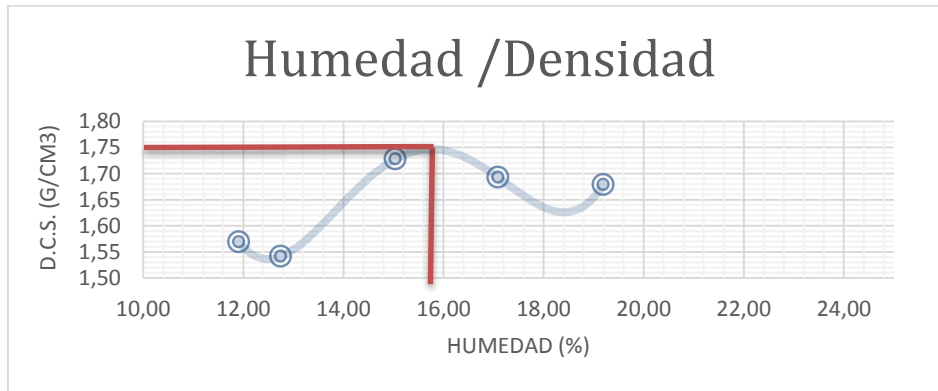


Figura 4.25: Determinación de D.M.C.S y H. óptima M#2, suelo cemento

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm ³)	H. OPT. (%)
1,75	15,8

Muestra N° 3 suelo cemento (13%):

Tabla 4.32: Resultados proctor modificado M #3, suelo cemento

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	13,09	15,38	17,95	20,36	22,28
Densidad Seca (g/cm ³)	1,59	1,69	1,74	1,62	1,61

Fuente: Elaboración propia, 2014

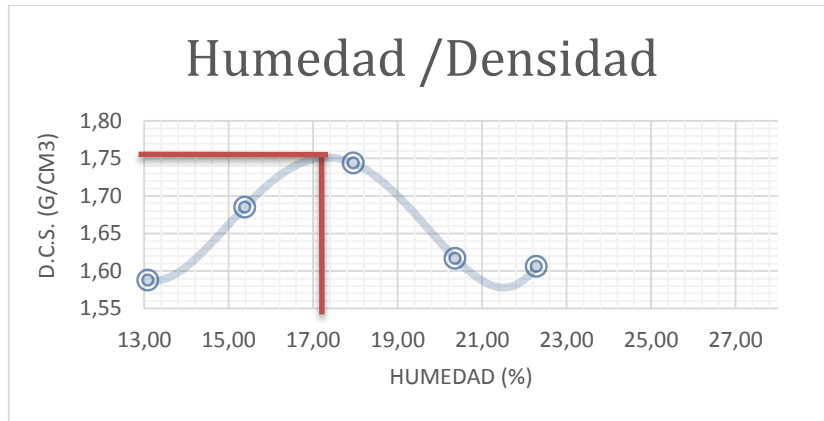


Figura 4.26: Determinación de D.M.C.S y H. óptima M#3, suelo cemento

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm3)	H. OPT. (%)
1,75	17,2

Tabla 4.33: Promedio resultados proctor modificado, suelo cemento

Muestra	D.M.C.S. (g/cm3)	H. óptima
1	1,76	14,60
2	1,75	15,80
3	1,75	17,20
Promedio	1,75	15,87

Fuente: Elaboración propia, 2014

En la tabla 4.33. se muestra un resumen de la influencia que tiene la incorporación del cemento sobre la D.M.C.S. y humedad óptima de la mezcla suelo-cemento.

4.2.2. Capacidad de Soporte C.B.R. suelo-cemento (Norma Nch 1852/II Of. 80)

Muestra N° 1 suelo cemento (13%):

Tabla 4.34: Determinación C.B.R. a 0,2" de penetración M #1, saturado, suelo cemento

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,80	65,90
25 GOLPES	1,68	55,90
10 GOLPES	1,59	39,00

Fuente: Elaboración propia, 2014

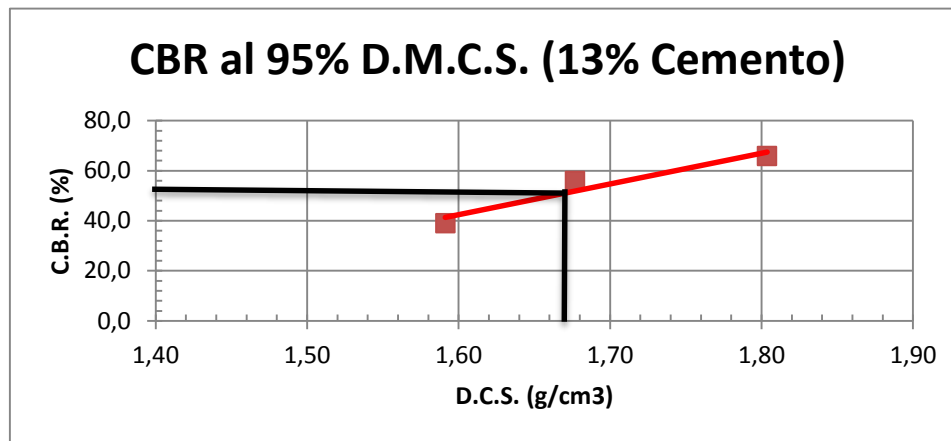


Figura 4.27: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.35: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado, suelo cemento

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,76	1,67	51,30

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N° 2 suelo cemento (13%):

Tabla 4.36: Determinación C.B.R. a 0,2" de penetración M #2, saturado, suelo cemento

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,86	62,70
25 GOLPES	1,67	42,20
10 GOLPES	1,56	27,90

Fuente: Elaboración propia, 2014

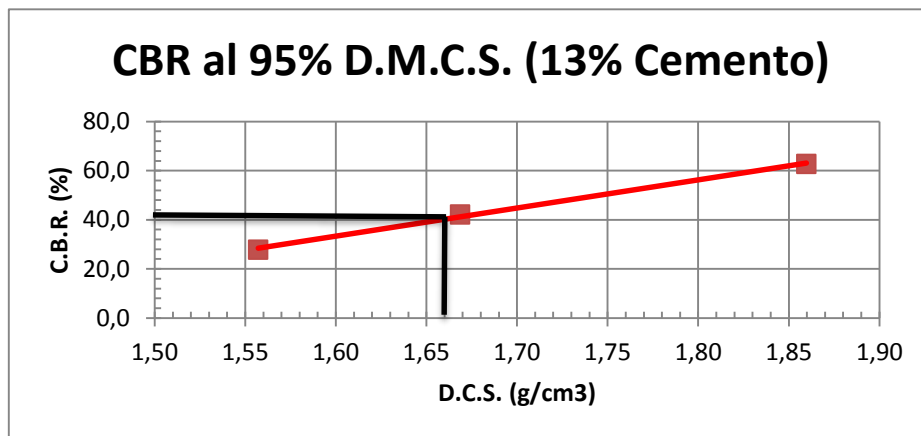


Figura 4.28: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.37: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado, suelo cemento

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,75	1,66	40,50

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N° 3 suelo cemento (13%):

Tabla 4.38: Determinación C.B.R. a 0,2" de penetración M #3, saturado, suelo cemento

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,86	56,10
25 GOLPES	1,66	46,90
10 GOLPES	1,64	33,00

Fuente: Elaboración propia, 2014

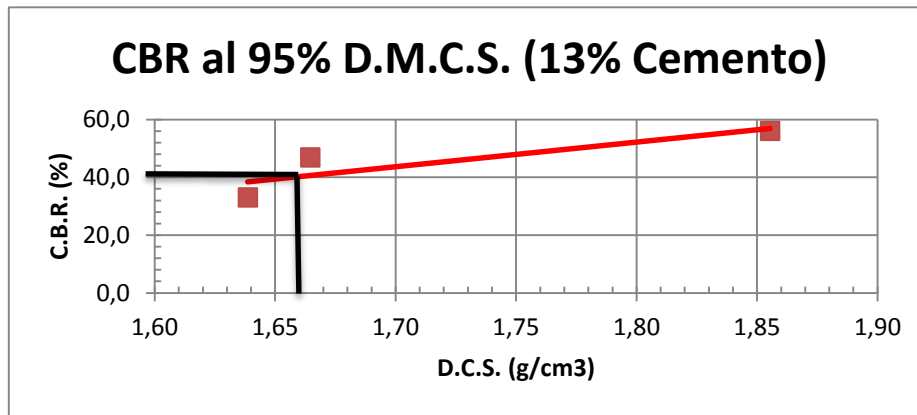


Figura 4.29: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.39: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado, suelo cemento

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,75	1,66	40,50

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.40: C.B.R. promedio suelo cemento, saturado al 95% de la D.M.C.S

MUESTRA N°	C.B.R. SATURADO	% de SATURACIÓN
1	51,30	21,64
2	40,50	21,36
3	40,50	21,45
PROMEDIO	44,10	21,48

Fuente: Elaboración propia, 2014

En la tabla 4.40. se observa el resumen de la influencia que tuvo la dosis de cemento (13%) en la capacidad de soporte C.B.R. saturado de la mezcla.

4.2.3. Expansión volumétrica suelo-cemento (Norma Nch 1852/II Of. 80)

Muestra N° 1 suelo cemento (13%):

Tabla 4.41: Expansión volumétrica suelo cemento, M #1

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL (0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL (0.001 pulg)	222	145	138
EXPANSION (MM)	5.64	3.68	3.51
% EXPANSIÓN	4.84	3.16	3.01

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N° 2 suelo cemento (13%):

Tabla 4.42: Expansión volumétrica suelo cemento, M #2

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL (0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL (0.001 pulg)	212	177	179
EXPANSION (MM)	5,38	4,50	4,55
% EXPANSIÓN	4,63	3,86	3,91

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N° 3 suelo cemento (13%):

Tabla 4.43: Expansión volumétrica suelo cemento, M #3

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL (0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL (0.001 pulg)	205	210	174
EXPANSION (MM)	5,21	5,33	4,42
% EXPANSIÓN	4,47	4,58	3,80

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.44: Expansión volumétrica (%) promedio M #1, 2 y 3

MUESTRA N°	N° de Golpes		
	56	25	10
1	4,84	3,16	3,01
2	4,63	3,86	3,91
3	4,47	4,58	3,80
PROMEDIO	4,65	3,87	3,57

Fuente: Elaboración propia, 2014

De la tabla 4.44. se observa que la expansión volumétrica del suelo disminuyo al incorporar cemento a la mezcla en un 41,17% con respecto al suelo natural.

4.3. Etapa III: Suelo-cemento-CCA

4.3.1. Proctor Modificado suelo-cemento-CCA (Norma Nch 1534/II Of. 79)

A partir del porcentaje de cemento que fue obtenido en la etapa I, obteniendo así un C.B.R. superior al suelo natural en la etapa II, se procederá a obtener la D.M.C.S. y humedad óptima de la mezcla suelo-cemento-CCA, agregando las dosis de CCA ya establecidas en la sección 3.5.

Previo al desarrollo del ensayo se determinó el índice de plasticidad de la mezcla suelo-cemento-CCA (13% - 10%), obteniendo un $IP = 9,15$.

Muestra N° 1 suelo-cemento-CCA (13%-10%):

Tabla 4.45: Resultados proctor modificado M #1, suelo-cemento-CCA

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	12,40	14,33	16,56	18,72	20,24
Densidad Seca (g/cm ³)	1,62	1,64	1,68	1,65	1,61

Fuente: Elaboración propia, 2014

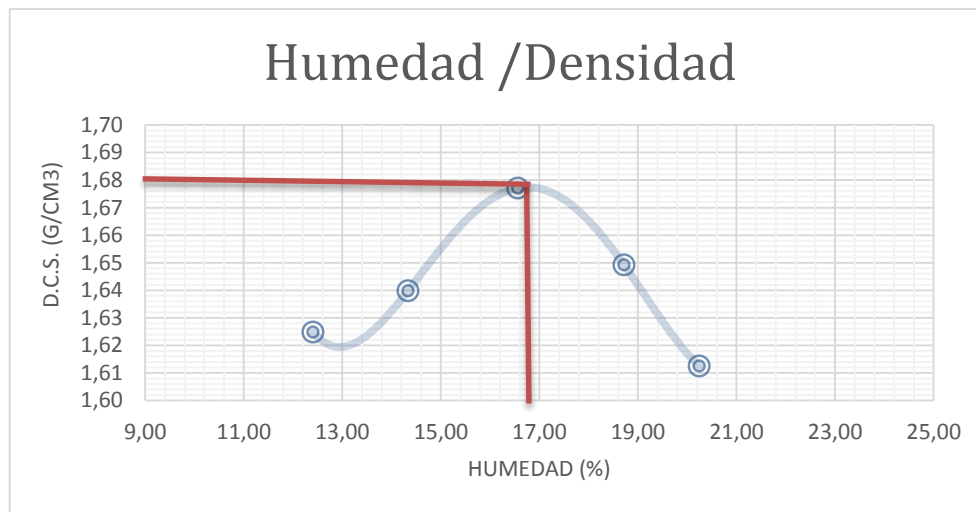


Figura 4.30: Determinación de D.M.C.S y H. óptima M#1, suelo-cemento-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm ³)	H. OPT. (%)
1,68	16,9

Muestra N° 2 suelo-cemento-CCA (13%-10%):

Tabla 4.46: Resultados proctor modificado M #2, suelo-cemento-CCA

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	15,45	17,28	20,16	20,66	22,56
Densidad Seca (g/cm ³)	1,65	1,65	1,68	1,66	1,59

Fuente: Elaboración propia, 2014

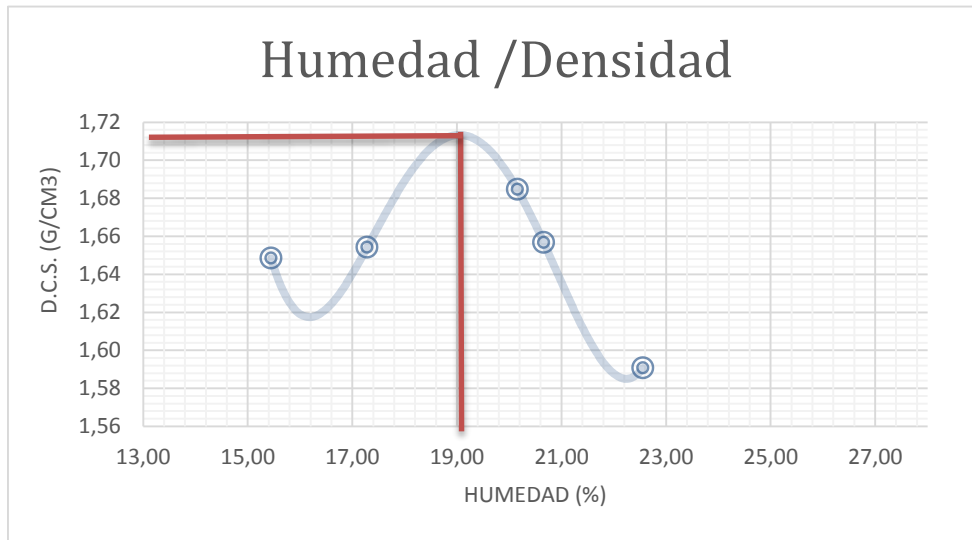


Figura 4.31: Determinación de D.M.C.S y H. óptima M#2, suelo-cemento-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm ³)	H. OPT. (%)
1,71	19,1

Muestra N° 3 suelo-cemento-CCA (13%-10%):

Tabla 4.47: Resultados proctor modificado M #3, suelo-cemento-CCA

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	13,92	15,59	18,46	20,37	22,51
Densidad Seca (g/cm ³)	1,64	1,65	1,73	1,64	1,59

Fuente: Elaboración propia, 2014

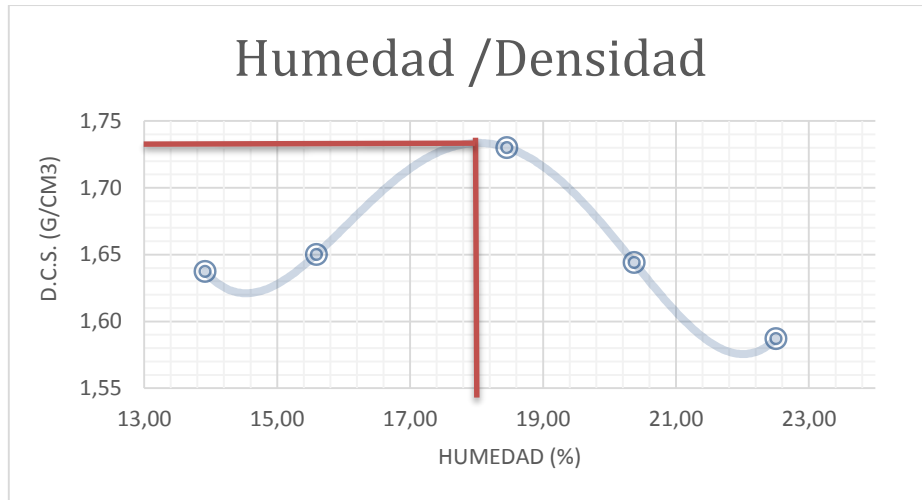


Figura 4.32: Determinación de D.M.C.S y H. óptima M#3, suelo-cemento-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm ³)	H. OPT. (%)
1,73	18,0

Tabla 4.48: Promedio resultados proctor modificado, suelo-cemento-CCA (13%-10%)

Muestra	D.M.C.S. (g/cm ³)	H. óptima
1	1,68	16,90
2	1,71	19,10
3	1,73	18,00
Promedio	1,71	18,00

Fuente: Elaboración propia, 2014

En la tabla 4.48. se muestra un resumen de la influencia que tiene la incorporación del cemento y la CCA en un 10% en peso sobre la D.M.C.S. y humedad óptima de la mezcla suelo-cemento.

Previo al desarrollo del ensayo se determinó el índice de plasticidad de la mezcla suelo-cemento-CCA (13% - 20%), obteniendo un IP= 12,01.

Muestra N°1 suelo-cemento-CCA (13%-20%):

Tabla 4.49: Resultados proctor modificado M #1, suelo-cemento-CCA

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	11,62	13,76	15,77	17,61	19,89
Densidad Seca (g/cm ³)	1,60	1,62	1,65	1,66	1,61

Fuente: Elaboración propia, 2014

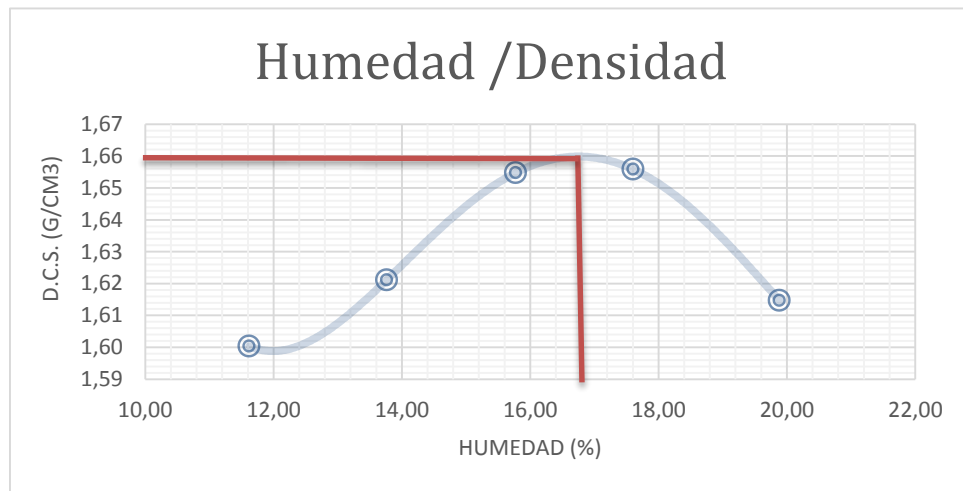


Figura 4.33: Determinación de D.M.C.S y H. óptima M#1, suelo-cemento-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm ³)	H. OPT. (%)
1,66	16,9

Muestra N°2 suelo-cemento-CCA (13%-20%):

Tabla 4.50: Resultados proctor modificado M #2, suelo-cemento-CCA

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	10,69	12,09	15,52	17,63	19,77
Densidad Seca (g/cm ³)	1,62	1,65	1,67	1,58	1,54

Fuente: Elaboración propia, 2014

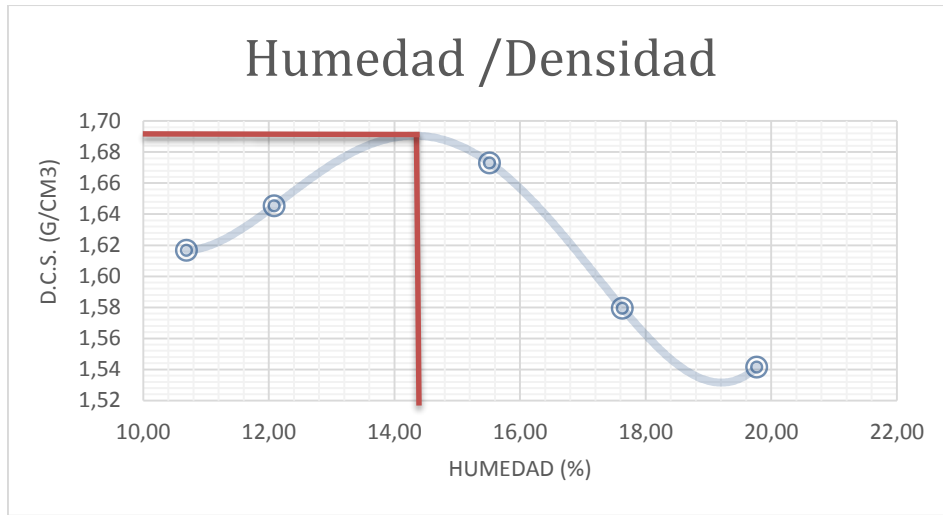


Figura 4.34: Determinación de D.M.C.S y H. óptima M#2, suelo-cemento-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm3)	H. OPT. (%)
1,69	14,5

Muestra N°3 suelo-cemento-CCA (13%-20%):

Tabla 4.51: Resultados proctor modificado M #3, suelo-cemento-CCA

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	11,38	13,16	15,39	17,90	19,20
Densidad Seca (g/cm3)	1,62	1,65	1,69	1,63	1,56

Fuente: Elaboración propia, 2014

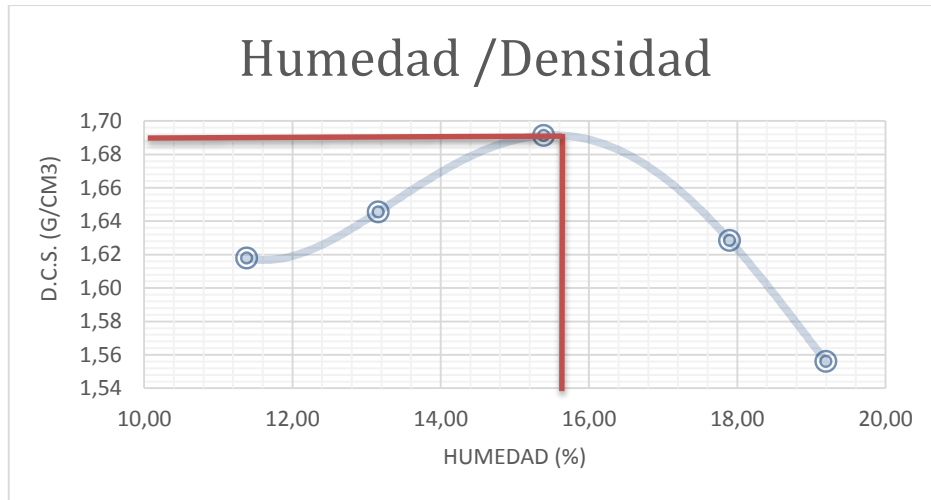


Figura 4.35: Determinación de D.M.C.S y H. óptima M#3, suelo-cemento-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm3)	H. OPT. (%)
1,69	15,5

Tabla 4.52: Promedio resultados proctor modificado, suelo-cemento-CCA (13%-20%)

Muestra	D.M.C.S. (g/cm3)	H. óptima
1	1,66	16,90
2	1,69	14,50
3	1,69	15,50
Promedio	1,68	15,63

Fuente: Elaboración propia, 2014

En la tabla 4.52. se muestra un resumen de la influencia que tiene la incorporación del cemento y la CCA en un 20% en peso sobre la D.M.C.S. y humedad óptima de la mezcla suelo-cemento.

Previo al desarrollo del ensayo se determinó el índice de plasticidad de la mezcla suelo-cemento-CCA (13% - 30%), obteniendo un $IP = 15,88$.

Muestra N°1 suelo-cemento-CCA (13%-30%):

Tabla 4.53: Resultados proctor modificado M #1, suelo-cemento-CCA

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	11,75	14,56	16,42	18,05	20,46
Densidad Seca (g/cm ³)	1,59	1,61	1,62	1,59	1,54

Fuente: Elaboración propia, 2014

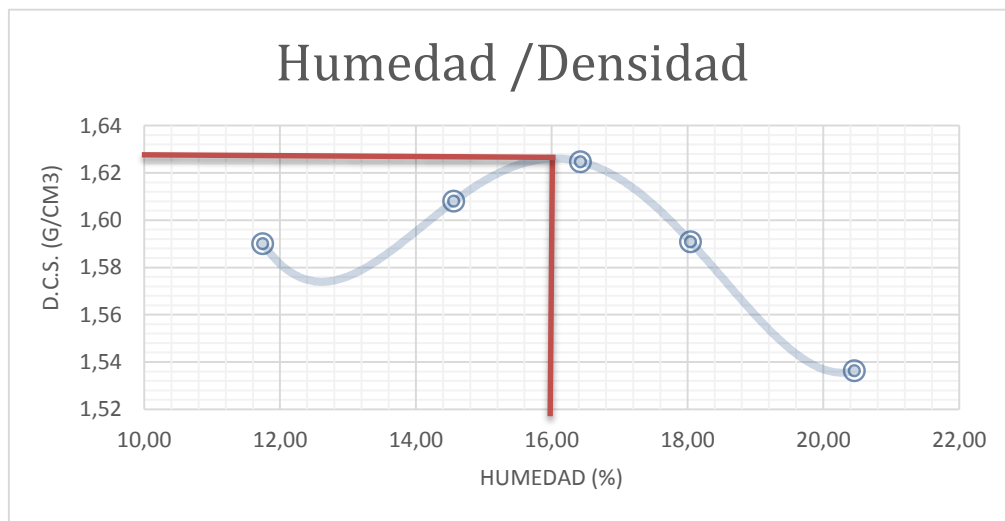


Figura 4.36: Determinación de D.M.C.S y H. óptima M#1, suelo-cemento-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm ³)	H. OPT. (%)
1,63	16

Muestra N°2 suelo-cemento-CCA (13%-30%):

Tabla 4.54: Resultados Proctor modificado M #2, suelo-cemento-CCA

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	12,09	14,02	16,00	17,31	19,10
Densidad Seca (g/cm ³)	1,59	1,61	1,62	1,58	1,55

Fuente: Elaboración propia, 2014

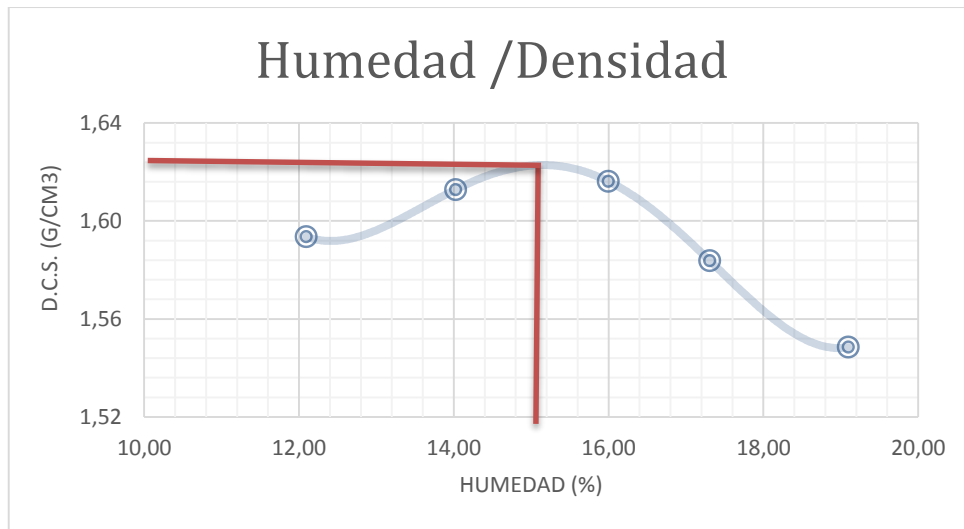


Figura 4.37: Determinación de D.M.C.S y H. óptima M#2, suelo-cemento-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm3)	H. OPT. (%)
1,63	15,2

Muestra N°3 suelo-cemento-CCA (13%-30%):

Tabla 4.55: Resultados Proctor modificado M #3, suelo-cemento-CCA

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	11,43	13,44	15,40	17,07	19,16
Densidad Seca (g/cm3)	1,57	1,62	1,61	1,58	1,52

Fuente: Elaboración propia, 2014

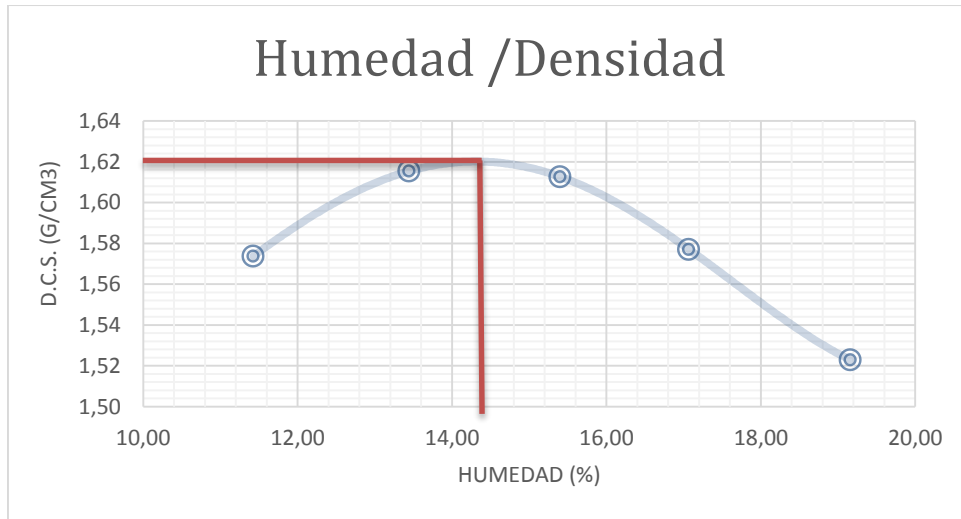


Figura 4.38: Determinación de D.M.C.S y H. óptima M#3, suelo-cemento-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm ³)	H. OPT. (%)
1,62	14,5

Tabla 4.56: Promedio resultados Proctor modificado, suelo-cemento-CCA (13%-30%)

Muestra N°	D.M.C.S. (g/cm ³)	H. óptima
1	1,63	16,00
2	1,63	15,20
3	1,62	14,50
Promedio	1,63	15,23

Fuente: Elaboración propia, 2014

En la tabla 4.56. se muestra un resumen de la influencia que tiene la incorporación del cemento y la CCA en un 30% en peso sobre la D.M.C.S. y humedad óptima de la mezcla suelo-cemento.

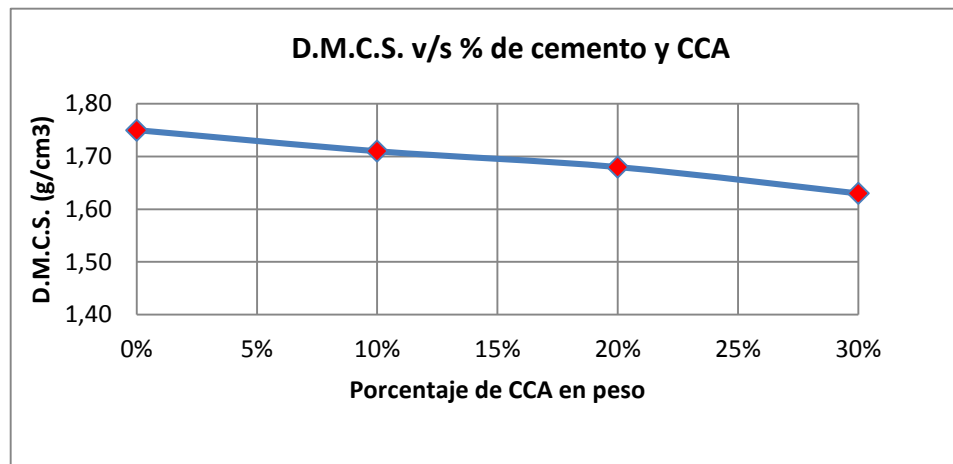
En la tabla 4.57. se muestra un resumen de los promedios de la D.M.C.S. y humedad óptima de las muestras 1,2 y 3 de las distintas dosificaciones de CCA (10-20-30%), manteniendo constante el contenido de cemento (13%).

Tabla 4.57: Resumen de la D.M.C.S. y H. Óptima Suelo-cemento-CCA

Dosificación de cemento	Dosificación de CCA	D.M.C.S (g/cm ³)	H. óptima (%)
13%	0%	1,75	15,87
13%	10%	1,71	18,00
13%	20%	1,68	15,63
13%	30%	1,63	15,23

Fuente: Elaboración propia, 2014

A partir de esta tabla, se desprenden las figuras 4.39. y 4.40. para entender de mejor manera cómo actúan estas dos variables de manera independiente con las distintas dosificaciones de cemento y CCA.

**Figura 4.39: D.M.C.S. en Suelo-Cemento-CCA**

Fuente: Elaboración propia, 2014

De la figura 4.39. se observa que la D.M.C.S. disminuye paulatinamente al aumentar las cantidades de CCA, alcanzando el valor mínimo con el 30% de CCA, donde disminuye en un 5,78% con respecto al suelo natural y un 6,86% con respecto al suelo patrón (suelo-cemento 13%).

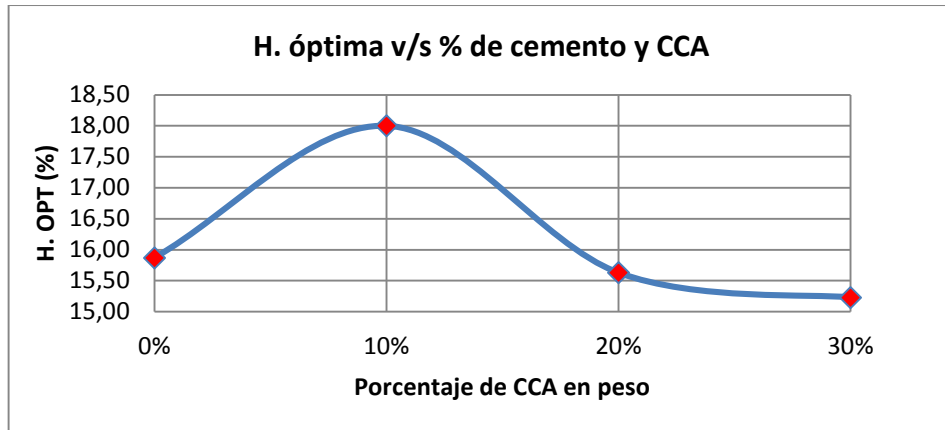


Figura 4.40: Humedad Óptima en Suelo-Cemento-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

De la figura 4.40. Se observa que la humedad aumenta al incorporar un 10% de CCA al suelo patrón en un 0,95%. Mientras que al incorporar el 20% y el 30% de CCA la humedad disminuye un 12,34% y un 14,58% en relación al suelo patrón.

4.3.2. Capacidad de Soporte C.B.R. suelo-cemento-CCA (Norma Nch 1852/II Of. 80)

Luego del proceso de inmersión de 96 hrs de cada probeta, se procedió a penetrar en estado saturado cada una de estas, manteniendo el porcentaje de cemento y variando el porcentaje de CCA.

Muestra N°1 suelo-cemento-CCA (13%-10%):

Tabla 4.58: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #1, saturado, suelo-cemento-CCA

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,85	64,00
25 GOLPES	1,63	55,00
10 GOLPES	1,61	34,90

Fuente: Elaboración propia, 2014

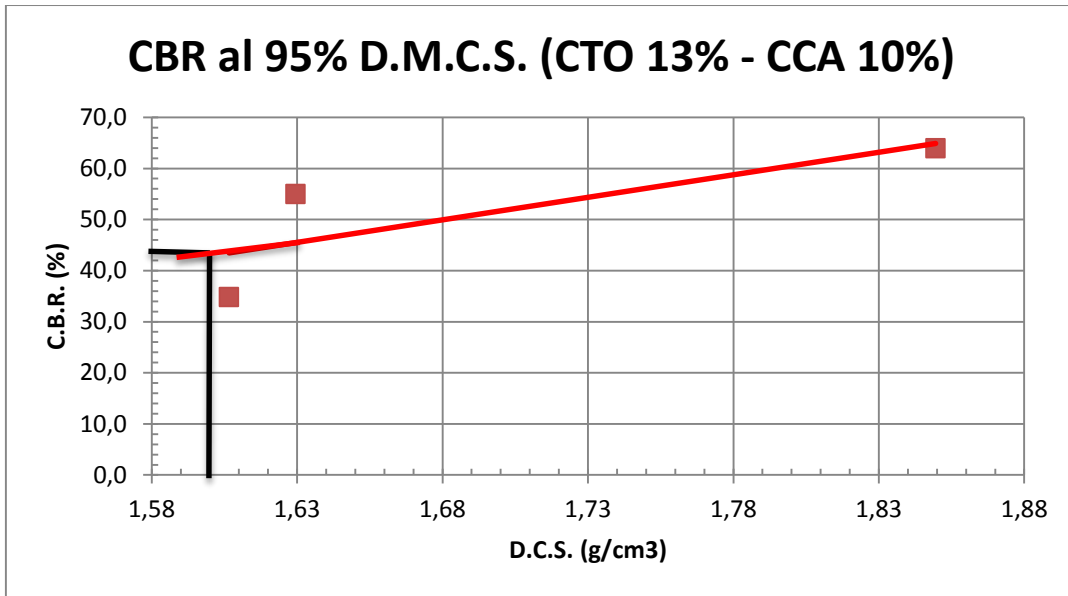


Figura 4.41: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.59: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado, suelo-cemento-CCA

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,68	1,60	42,60

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°2 suelo-cemento-CCA (13%-10%):

Tabla 4.60: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #2, saturado, suelo-cemento-CCA

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,88	67,30
25 GOLPES	1,61	56,40
10 GOLPES	1,56	29,60

Fuente: Elaboración propia, 2014

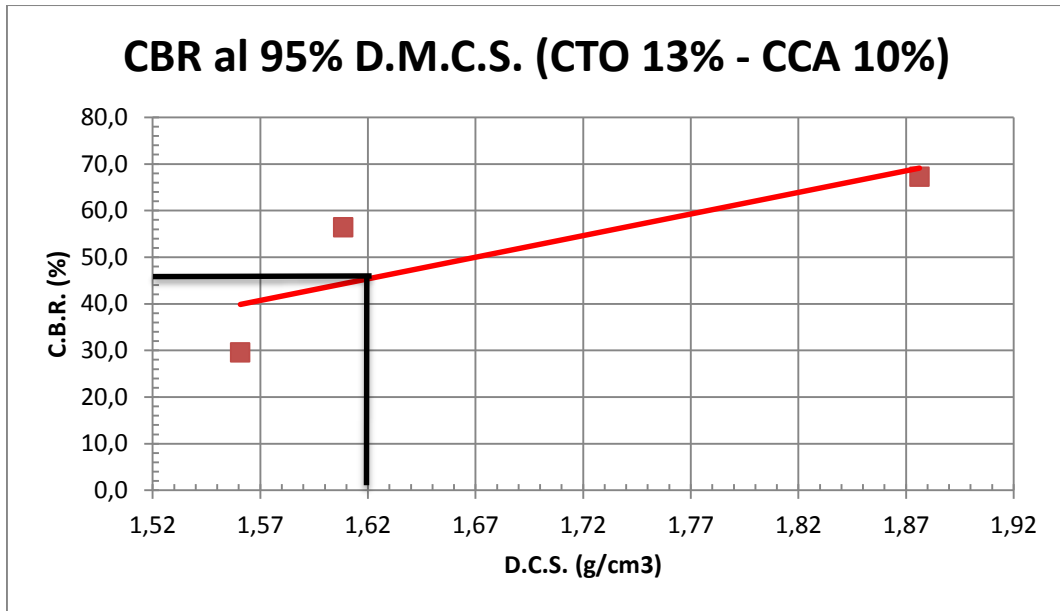


Figura 4.42: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.61: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado, suelo-cemento-CCA

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,71	1,62	45,80

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°3 suelo-cemento-CCA (13%-10%):

Tabla 4.62: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #3, saturado, suelo-cemento-CCA

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,88	65,10
25 GOLPES	1,70	55,40
10 GOLPES	1,57	31,30

Fuente: Elaboración propia, 2014

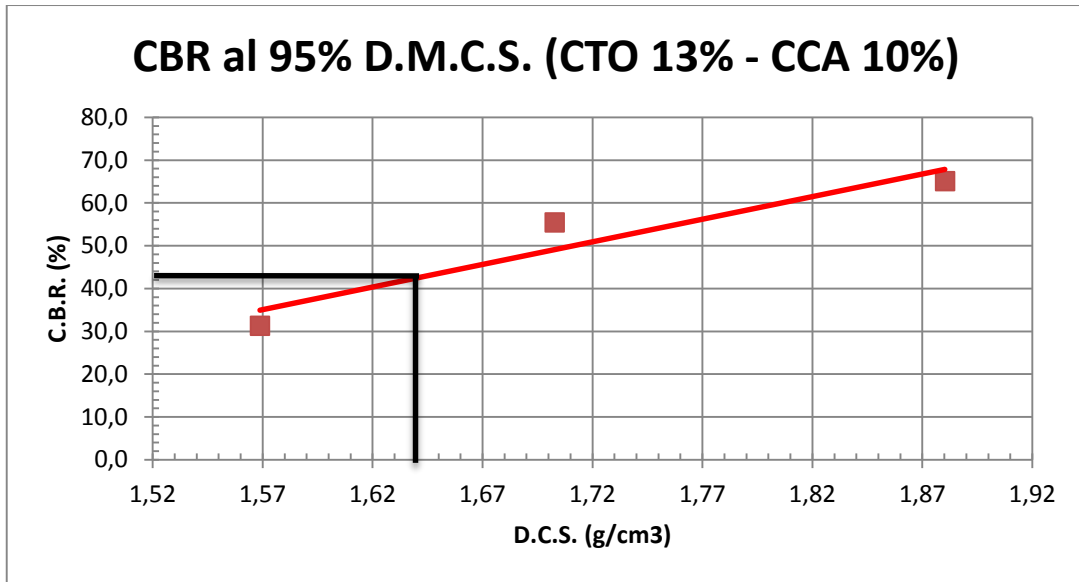


Figura 4.43: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.63: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado, suelo-cemento-CCA

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,73	1,64	42,80

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.64: C.B.R. promedio suelo-cemento(13%)-CCA(10%) , saturado al 95% de la D.M.C.S

MUESTRA N°	C.B.R. SATURADO	% de STURACIÓN
1	42,60	26,64
2	45,80	24,93
3	42,80	25,80
PROMEDIO	43,73	25,79

Fuente: Elaboración propia, 2014

En la tabla 4.64. se observa el resumen de la influencia que tuvo la dosis de cemento (13%) más la adición de CCA (10%) en la capacidad de soporte C.B.R. saturado de la mezcla.

Muestra N°1 suelo-cemento-CCA (13%-20%):

Tabla 4.65: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #1, saturado, suelo-cemento-CCA

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,70	38,0
25 GOLPES	1,69	30,9
10 GOLPES	1,55	27,9

Fuente: Elaboración propia, 2014

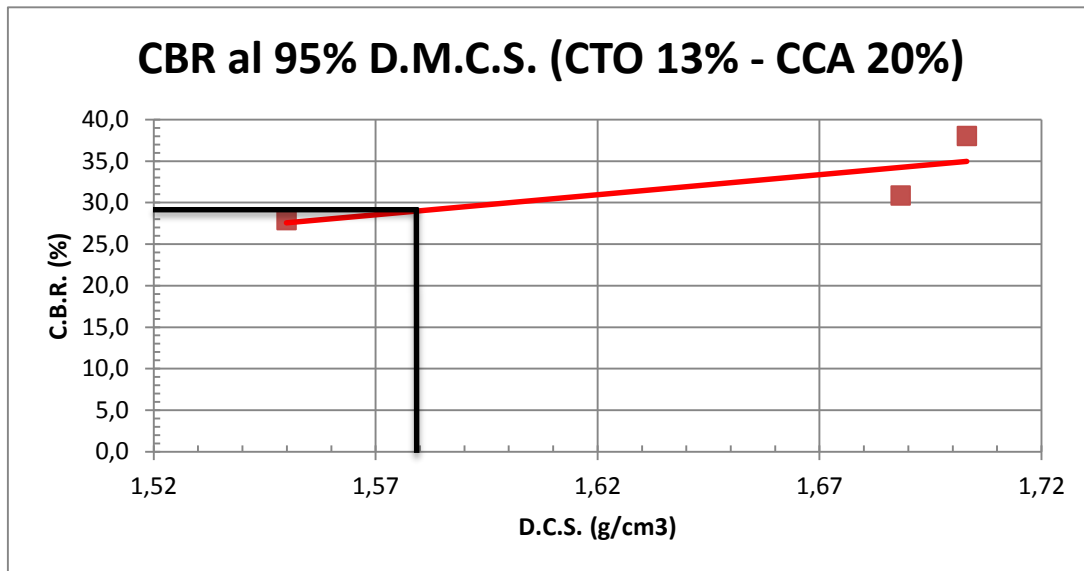


Figura 4.44: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.66: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado, suelo-cemento-CCA

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,66	1,58	28,9

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°2 suelo-cemento-CCA (13%-20%):

Tabla 4.67: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #2, saturado, suelo-cemento-CCA

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,69	37,30
25 GOLPES	1,66	33,02
10 GOLPES	1,39	27,02

Fuente: Elaboración propia, 2014

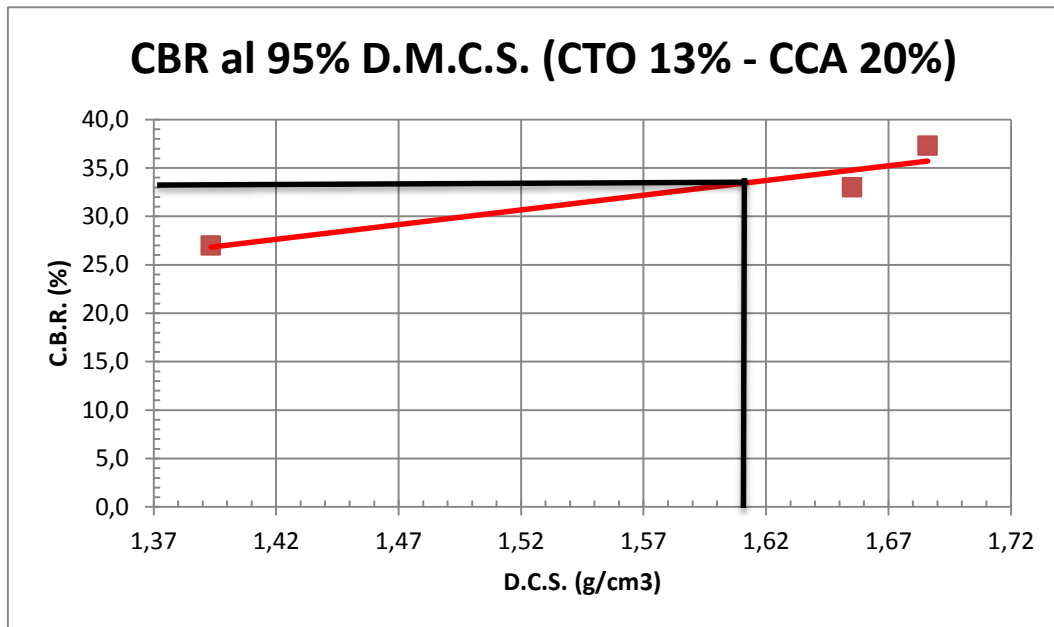


Figura 4.45: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.68: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado, suelo-cemento-CCA

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,69	1,61	33,2

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°3 suelo-cemento-CCA (13%-20%):

Tabla 4.69: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #3, saturado, suelo-cemento-CCA

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,70	37,9
25 GOLPES	1,49	32,3
10 GOLPES	1,47	26,7

Fuente: Elaboración propia, 2014

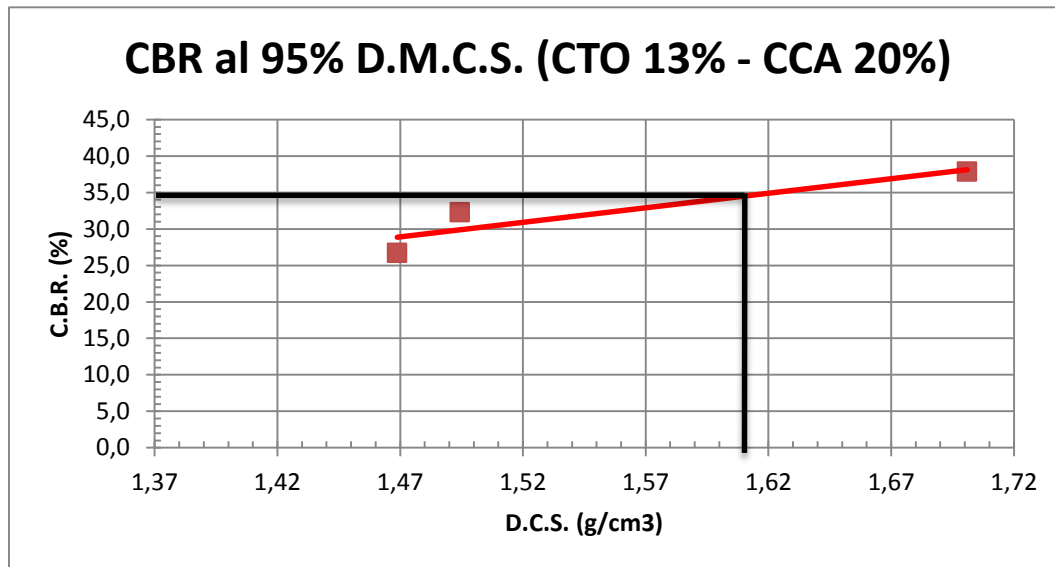


Figura 4.46: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.70: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado, suelo-cemento-CCA

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,69	1,61	34,3

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.71: C.B.R. promedio suelo-cemento(13)-CCA(20%), saturado al 95% de la D.M.C.S

MUESTRA N°	C.B.R. SATURADO	% de STURACIÓN
1	28,90	24,64
2	33,20	24,60
3	34,30	25,01
PROMEDIO	32,13	24,75

En la tabla 4.71. se observa el resumen de la influencia que tuvo la dosis de cemento (13%) más la adición de CCA (20%) en la capacidad de soporte C.B.R. saturado de la mezcla.

Muestra N°1 suelo-cemento-CCA (13%-30%):

Tabla 4.72: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #1, saturado, suelo-cemento-CCA

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,63	27,6
25 GOLPES	1,54	24,9
10 GOLPES	1,52	20,9

Fuente: Elaboración propia, 2014

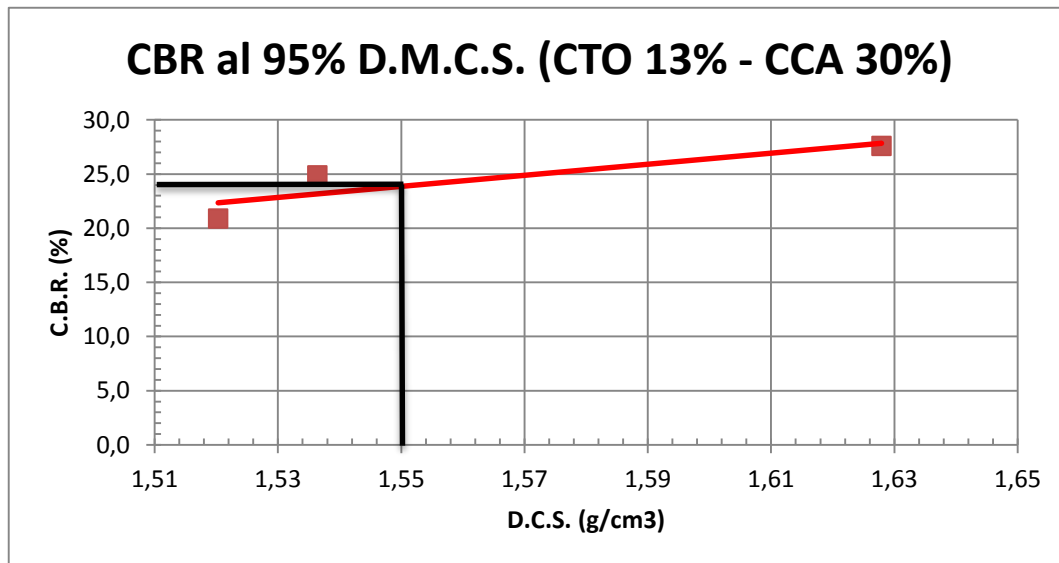


Figura 4.47: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.73: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado, suelo-cemento-CCA

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,63	1,55	23,8

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°2 suelo-cemento-CCA (13%-30%):

Tabla 4.74: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #2, saturado, suelo-cemento-CCA

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,56	23,5
25 GOLPES	1,53	20,9
10 GOLPES	1,50	17,0

Fuente: Elaboración propia, 2014

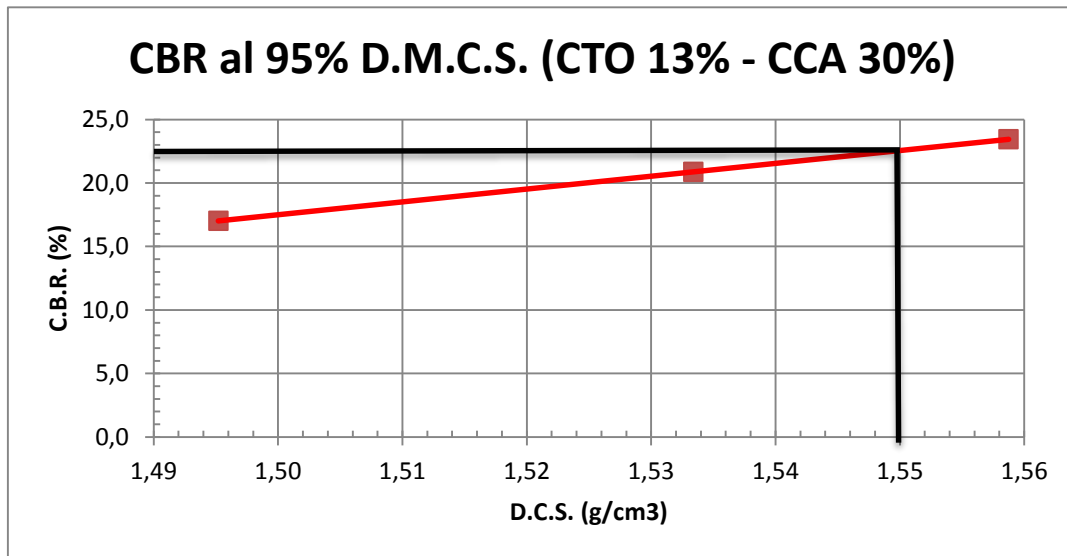


Figura 4.48: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.75: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado, suelo-cemento-CCA

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,63	1,55	22,4

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°3 suelo-cemento-CCA (13%-30%):

Tabla 4.76: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #3, saturado, suelo-cemento-CCA

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,63	26,2
25 GOLPES	1,56	23,9
10 GOLPES	1,54	21,6

Fuente: Elaboración propia, 2014

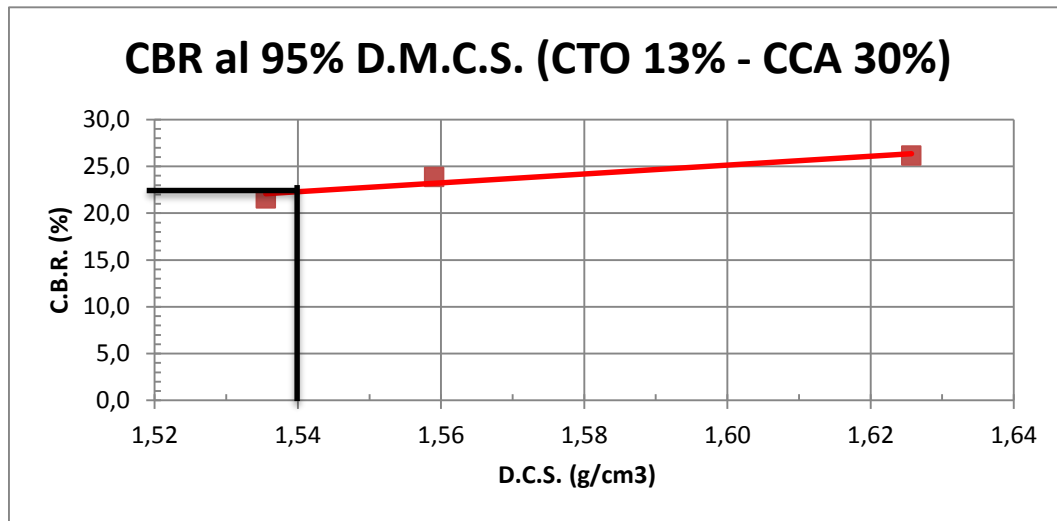


Figura 4.49: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.77: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado, suelo-cemento-CCA

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,62	1,54	22,3

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.78: C.B.R. promedio suelo-cemento(13%)-CCA(30%), saturado al 95% de la D.M.C.S

MUESTRA N°	C.B.R. SATURADO	% de STURACIÓN
1	23,80	32,99
2	22,40	33,60
3	22,30	33,29
PROMEDIO	22,83	33,29

En la tabla 4.78. se observa el resumen de la influencia que tuvo la dosis de cemento (13%) más la adición de CCA (30%) en la capacidad de soporte C.B.R. saturado de la mezcla.

En la tabla 4.79. se observa el resumen promedio de la influencia que tuvo la dosis de cemento y CCA en cada muestra de la capacidad de soporte C.B.R. saturado en la mezcla.

Tabla 4.79: Resumen del C.B.R. saturado, muestra suelo-cemento-CCA

Dosificación de Cemento	Dosificación de CCA	C.B.R. Saturado (%)
13%	0%	44,10
13%	10%	43,73
13%	20%	32,13
13%	30%	22,83

Fuente: Elaboración propia, 2014

A partir de la tabla 4.79. para observar la influencia de la CCA sobre el C.B.R. saturado de la mezcla suelo-cemento-CCA de mejor manera, se confecciono la figura 4.50.

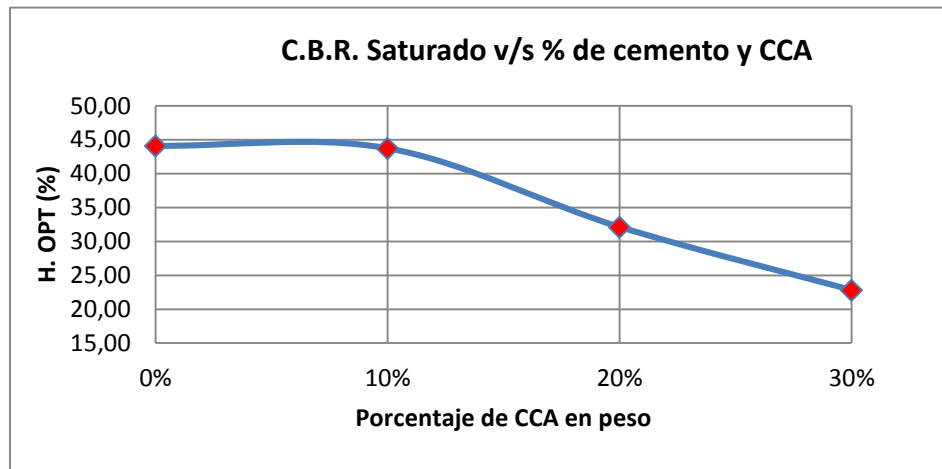


Figura 4.50: C.B.R. saturado V/S porcentaje de cemento-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

A partir de la figura 4.50. se puede apreciar que la capacidad de soporte C.B.R. disminuye con la incorporación de la CCA marcando una tendencia, alcanzando su nivel más bajo con el 30% en peso, sin embargo, ninguna de las dosificaciones alcanzaron soportes mayores a las del suelo patrón obtenida en 4.2.2. En la figura se observa una disminución lineal arrojando un descenso con respecto al suelo patrón con un 10% de CCA de un 0,82%, con un 20% un descenso de 27,14% y con un 30% un descenso de 48,23%.

4.3.3. Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA (Norma Nch 1852/II Of. 80)

Muestra N°1 suelo-cemento-CCA (13%-10%):

Tabla 4.80: Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA, M #1

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL (0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL (0.001 pulg)	238	191	161
EXPANSION (MM)	6,05	4,85	4,09
% EXPANSIÓN	5,19	4,17	3,51

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°2 suelo-cemento-CCA (13%-10%):

Tabla 4.81: Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA, M #2

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL (0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL (0.001 pulg)	230	203	183
EXPANSION (MM)	5,84	5,16	4,65
% EXPANSIÓN	5,02	4,43	3,99

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°3 suelo-cemento-CCA (13%-10%):

Tabla 4.82: Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA, M #3

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL (0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL (0.001 pulg)	240	190	172
EXPANSION (MM)	6,10	4,83	4,37
% EXPANSIÓN	5,24	4,15	3,75

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.83: Expansión volumétrica (%) promedio M #1, 2 y 3

MUESTRA N°	N° de Golpes		
	56	25	10
1	5,19	4,17	3,51
2	5,02	4,43	3,99
3	5,24	4,15	3,75
PROMEDIO	5,15	4,25	3,75

Fuente: Elaboración propia, 2014

De la tabla 4.83. se observa que la expansión volumétrica del suelo aumento al incorporar 10% de CCA a la mezcla, con respecto al suelo patrón.

Muestra N°1 suelo-cemento-CCA (13%-20%):

Tabla 4.84: Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA, M #1

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL (0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL (0.001 pulg)	465	493	520
EXPANSION (MM)	11,81	12,52	13,21
% EXPANSIÓN	10,15	10,76	11,35

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°2 suelo-cemento-CCA (13%-20%):

Tabla 4.85: Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA, M #2

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL (0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL (0.001 pulg)	470	498	513
EXPANSION (MM)	11,94	12,65	13,03
% EXPANSIÓN	10,26	10,87	11,19

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°3 suelo-cemento-CCA (13%-20%):

Tabla 4.86: Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA, M #3

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL (0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL (0.001 pulg)	451	473	503
EXPANSION (MM)	11,46	12,01	12,78
% EXPANSIÓN	9,84	10,32	10,98

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.87: Expansión volumétrica (%) promedio M #1, 2 y 3

MUESTRA N°	N° de Golpes		
	56	25	10
1	10,15	10,76	11,35
2	10,26	10,87	11,19
3	9,84	10,32	10,98
PROMEDIO	10,08	10,65	11,17

Fuente: Elaboración propia, 2014

De la tabla 4.87. se observa que la expansión volumétrica del suelo aumento al incorporar 20% de CCA a la mezcla, con respecto al suelo patrón.

Muestra N°1 suelo-cemento-CCA (13%-30%):

Tabla 4.88: Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA, M #1

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL (0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL (0.001 pulg)	522	558	593
EXPANSION (MM)	13,26	14,17	15,06
% EXPANSIÓN	11,39	12,18	12,94

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°2 suelo-cemento-CCA (13%-30%):

Tabla 4.89: Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA, M #2

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL (0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL (0.001 pulg)	513	545	609
EXPANSION (MM)	13,03	13,84	15,47
% EXPANSIÓN	11,19	11,89	13,29

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°3 suelo-cemento-CCA (13%-30%):

Tabla 4.90: Expansión volumétrica suelo-cemento-CCA, M #3

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL (0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL (0.001 pulg)	521	540	582
EXPANSION (MM)	13,23	13,72	14,78
% EXPANSIÓN	11,37	11,78	12,70

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.91: Expansión volumétrica (%) promedio M #1, 2 y 3

MUESTRA N°	N° de Golpes		
	56	25	10
1	11,39	12,18	12,94
2	11,19	11,89	13,29
3	11,37	11,78	12,70
PROMEDIO	11,32	11,95	12,98

Fuente: Elaboración propia, 2014

De la tabla 4.91. se observa que la expansión volumétrica del suelo aumento al incorporar 30% de CCA a la mezcla, con respecto al suelo patrón.

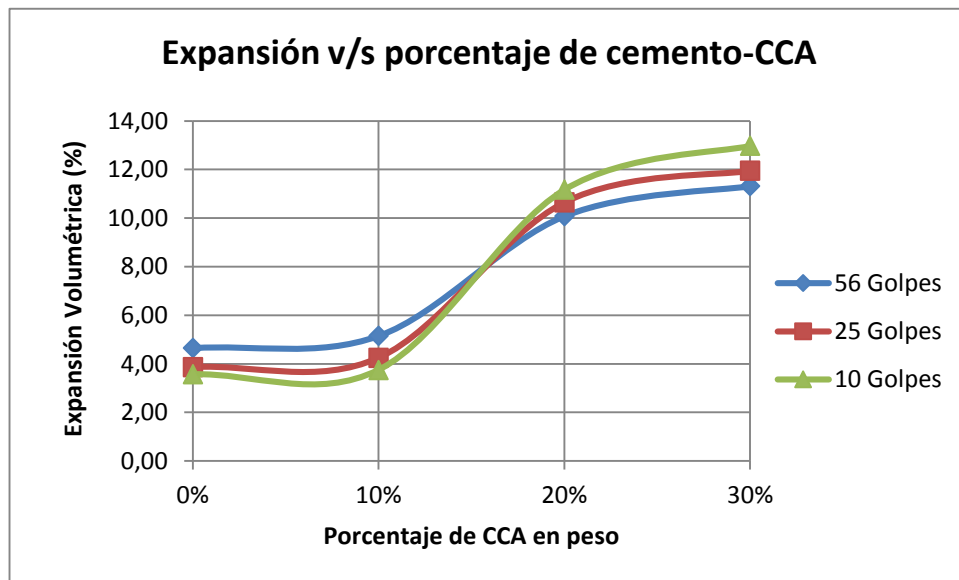
En la tabla 4.92. se observa el resumen promedio de la influencia que tuvo la dosis de cemento y CCA en cada muestra de la expansión volumétrica para las distintas dosificaciones.

Tabla 4.92: Resumen de la expansión volumétrica, muestra suelo-cemento-CCA

DOSIFICACIÓN DE CEMENTO	DOSIFICACIÓN DE CCA	N° GOLPES		
		56	25	10
13%	0%	4,65%	3,87%	3,57%
13%	10%	5,15%	4,25%	3,75%
13%	20%	10,08%	10,65%	11,17%
13%	30%	11,32%	11,95%	12,98%

Fuente: Elaboración propia, 2014

A partir de la tabla 4.92. se desprende la figura 4.51, con el fin de entender de mejor manera la influencia que tienen las distintas dosificaciones de CCA en la expansión volumétrica de la mezcla suelo-cemento-CCA.

**Figura 4.51: Expansión V/S porcentaje de cemento-CCA**

Fuente: Elaboración propia, 2014

De la figura 4.51. se obtiene un aumento con las distintas dosificaciones de CCA con respecto al suelo patrón. Arrojando la mayor expansión con un 30% de CCA, obteniendo un aumento de 143,44% para la probeta compactada con 56 golpes; 208,79% para la probeta compactada con 25 golpes y 263,59% para la probeta compactada con 10 golpes.

4.4. Etapa IV: Suelo-CCA

4.4.1. Proctor Modificado suelo-CCA (Norma Nch 1534/II Of. 79)

Con el fin de observar la influencia que tiene la CCA sobre el suelo arcilloso, se procederá a obtener la D.M.C.S. y humedad óptima de la mezcla suelo-CCA, agregando las dosis de CCA ya establecidas en la sección 3.6.

i) Suelo natural-CCA (10%)

Previo al desarrollo del ensayo se determinó el índice de plasticidad de la mezcla suelo natural-CCA (10%), obteniendo un $IP = 22,13$.

Muestra N° 1 suelo-CCA (10%):

Tabla 4.93: Resultados Proctor modificado M #1, suelo-CCA

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	13,00	15,70	17,95	19,72	21,82
Densidad Seca (g/cm ³)	1,60	1,67	1,68	1,64	1,59

Fuente: Elaboración propia, 2014

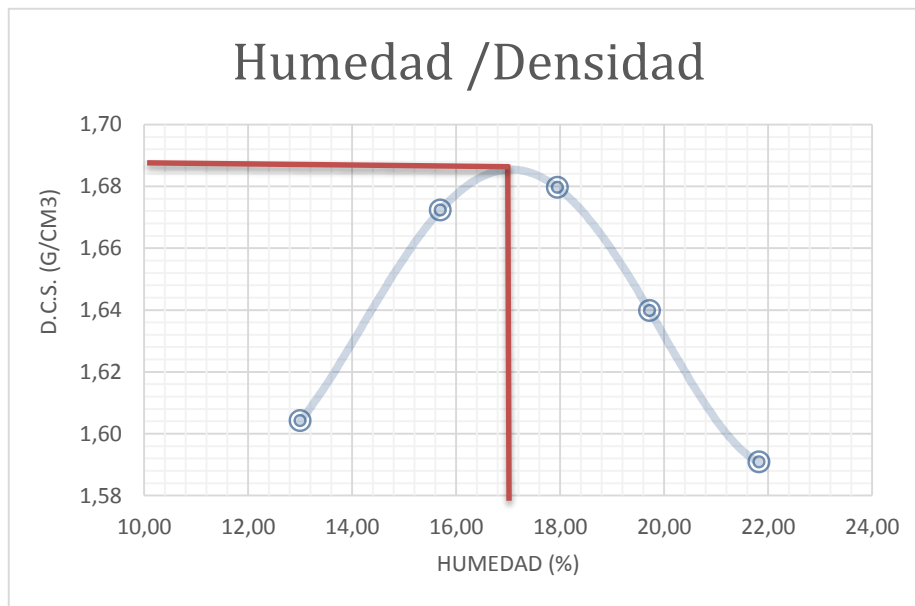


Figura 4.52: Determinación de D.M.C.S y H. óptima M#1, suelo-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm ³)	H. OPT. (%)
1,69	17

Muestra N° 2 suelo-CCA (10%):

Tabla 4.94: Resultados Proctor modificado M #2, suelo-CCA

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	13,90	15,44	17,04	19,49	20,35
Densidad Seca (g/cm ³)	1,63	1,67	1,69	1,63	1,59

Fuente: Elaboración propia, 2014

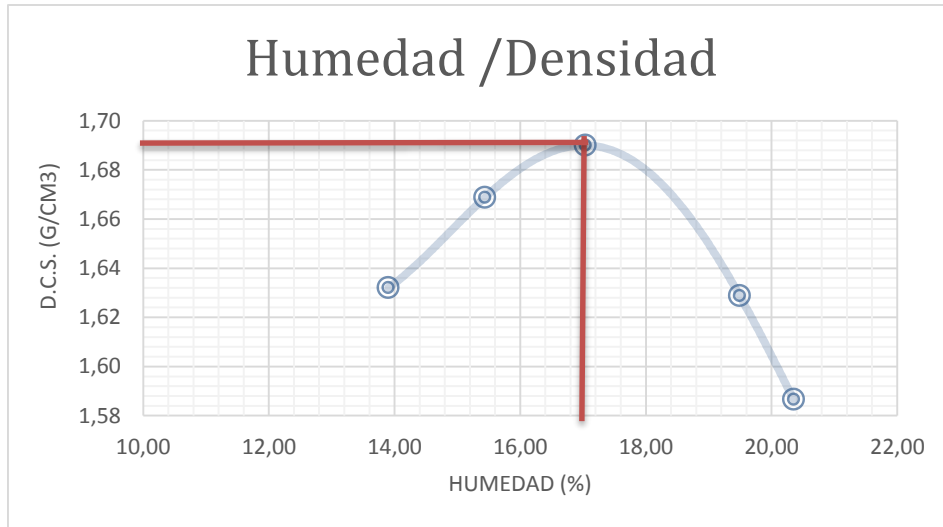


Figura 4.53: Determinación de D.M.C.S y H. óptima M#2, suelo-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm ³)	H. OPT. (%)
1,69	17

Muestra N° 3 suelo-CCA (10%):

Tabla 4.95: Resultados Proctor modificado M #3, suelo-CCA

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	13,75	15,85	17,68	19,28	21,55
Densidad Seca (g/cm ³)	1,63	1,68	1,69	1,64	1,56

Fuente: Elaboración propia, 2014

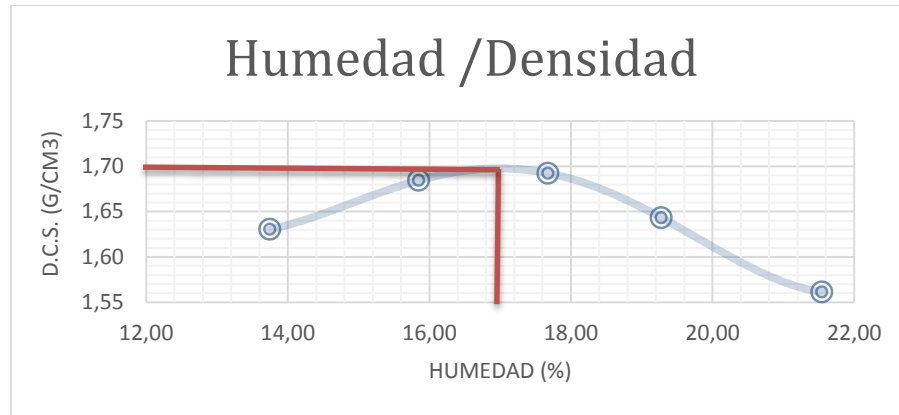


Figura 4.54: Determinación de D.M.C.S y H. óptima M#3, suelo-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm3)	H. OPT. (%)
1,70	16,9

Tabla 4.96: Promedio resultados Proctor modificado, suelo-CCA (10%)

Muestra	D.M.C.S. (g/cm3)	H. óptima
1	1,69	17,00
2	1,69	17,00
3	1,70	16,90
Promedio	1,69	16,97

Elaboración propia, 2014

En la tabla 4.96. Se muestra un resumen de la influencia que tiene la incorporación de la CCA en un 10% en peso sobre la D.M.C.S. y humedad óptima del suelo.

ii) Suelo natural-CCA (20%)

Previo al desarrollo del ensayo se determinó el índice de plasticidad de la mezcla suelo natural-CCA (20%), obteniendo un IP= 23,07.

Muestra N° 1 suelo-CCA (20%):

Tabla 4.97: Resultados Proctor modificado M #1, suelo-CCA

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	15,05	17,42	19,40	21,34	23,70
Densidad Seca (g/cm3)	1,66	1,66	1,67	1,62	1,56

Elaboración propia, 2014

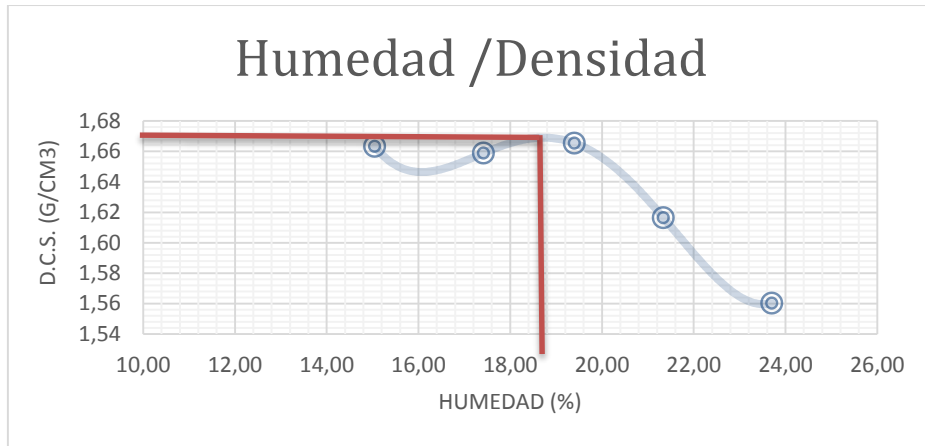


Figura 4.55: Determinación de D.M.C.S y H. óptima M#1, suelo-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm3)	H. OPT. (%)
1,67	18,9

Muestra N° 2 suelo-CCA (20%):

Tabla 4.98: Resultados Proctor modificado M #2, suelo-CCA

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	13,21	15,59	17,02	19,40	21,44
Densidad Seca (g/cm3)	1,66	1,67	1,68	1,62	1,57

Fuente: Elaboración propia, 2014

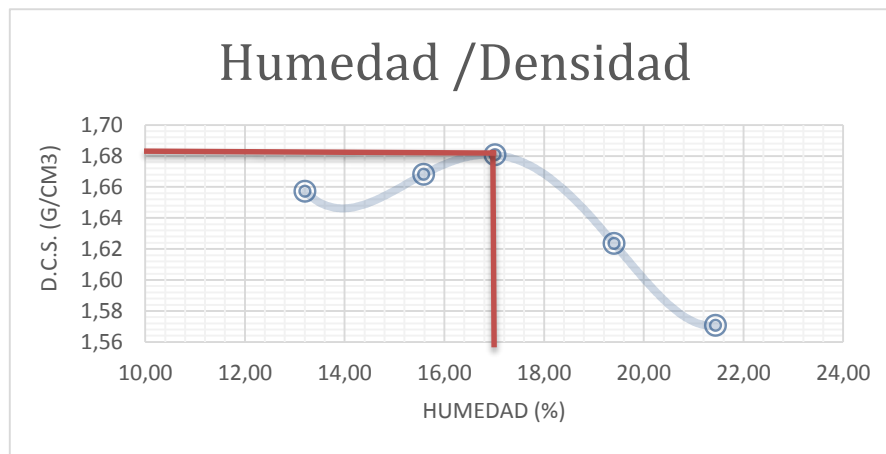


Figura 4.56: Determinación de D.M.C.S y H. óptima M#2, suelo-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm ³)	H. OPT. (%)
1,68	17

Muestra N° 3 suelo-CCA (20%):

Tabla 4.99: Resultados Proctor modificado M #3, suelo-CCA

Probeta N°	1	2	3	4	5
Humedad Promedio (%)	13,04	15,50	17,65	19,02	21,55
Densidad Seca (g/cm ³)	1,68	1,68	1,69	1,65	1,59

Fuente: Elaboración propia, 2014

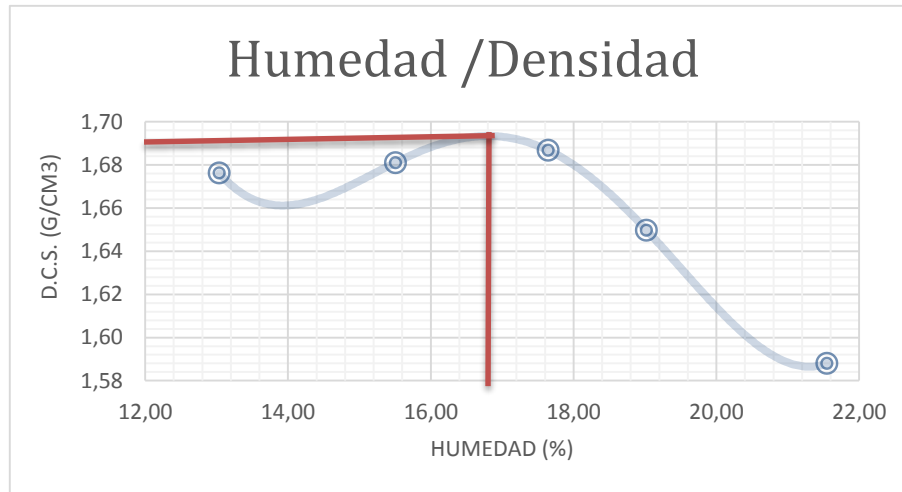


Figura 4.57: Determinación de D.M.C.S y H. óptima M#3, suelo-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

D.M.C.S. (g/cm ³)	H. OPT. (%)
1,69	16,9

Tabla 4.100: Promedio resultados proctor modificado, suelo-CCA (20%)

Muestra	D.M.C.S. (g/cm ³)	H. óptima
1	1,67	18,90
2	1,68	17,00
3	1,69	16,90
Promedio	1,68	17,60

Fuente: Elaboración propia, 2014

En la tabla 4.100. se muestra un resumen de la influencia que tiene la incorporación de la CCA en un 20% en peso sobre la D.M.C.S. y humedad óptima del suelo.

En la tabla 4.101. se muestra un resumen de los promedios de la D.M.C.S. y humedad óptima de las muestras 1,2 y 3 de las distintas dosificaciones de CCA (10-20%).

Tabla 4.101: Resumen de la D.M.C.S. y H. Óptima Suelo-cemento-CCA

Dosificación de CCA	D.M.C.S (g/cm ³)	H. óptima (%)
0%	1,73	17,83
10%	1,69	19,97
20%	1,68	17,6

Fuente: Elaboración propia, 2014

A partir de esta tabla, se desprenden las figuras 4.58. y 4.59. para entender de mejor manera cómo actúa la CCA por sí sola sobre el suelo arcilloso.

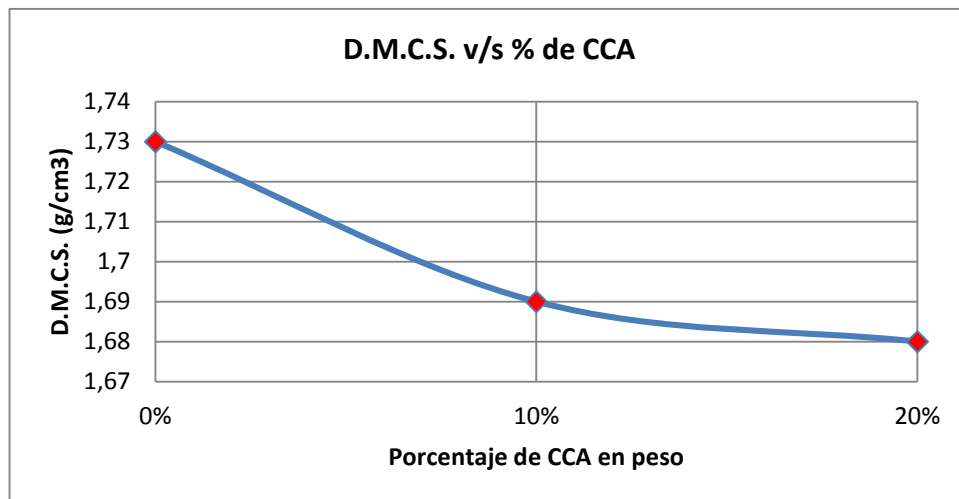


Figura 4.58: D.M.C.S. en Suelo-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

De la figura 4.58. se observa que la D.M.C.S. disminuye al aumentar las cantidades de CCA con respecto al suelo natural, obteniendo un descenso de un 2,31% para la dosificación con un 10% de CCA y 2,89% para el 20% de CCA.

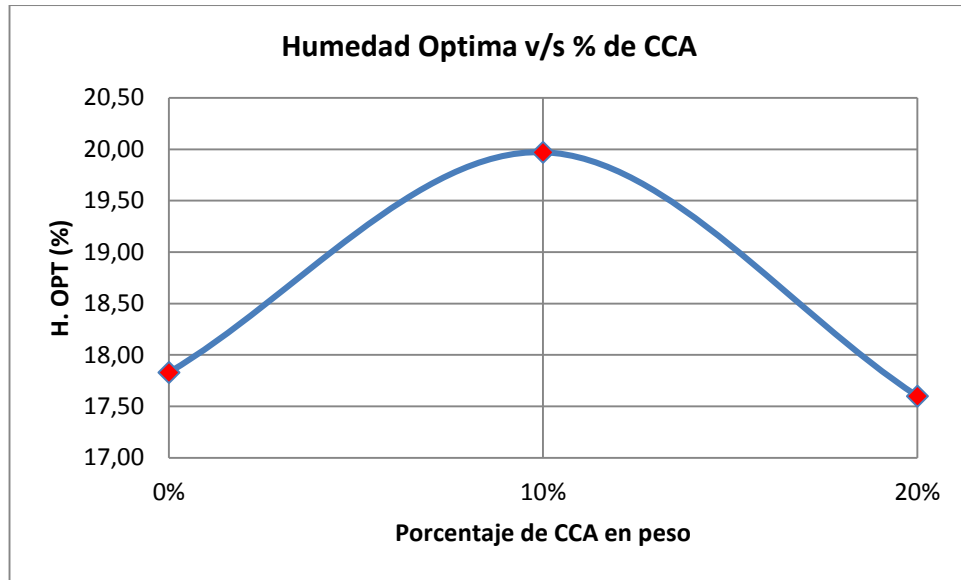


Figura 4.59: Humedad Óptima en Suelo-CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

De la figura 4.59. se observa que la humedad disminuye al aumentar de un 10% a un 20% de CCA, aumentando con un 10% de CCA un 12% con respecto al suelo natural, mientras que con un 20% de CCA se alcanzó una humedad similar al suelo natural disminuyendo un 1,29% con respecto a este.

4.4.2. Capacidad de Soporte C.B.R. suelo-CCA (Norma Nch 1852/II Of. 80)

Luego del proceso de inmersión de 96 hrs de cada probeta, se procedió a penetrar en estado saturado cada una de estas.

Muestra N°1 suelo-CCA (10%):

Tabla 4.102: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #1, saturado, suelo-CCA

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,69	7,6
25 GOLPES	1,57	7,2
10 GOLPES	1,57	4,6

Fuente: Elaboración propia, 2014

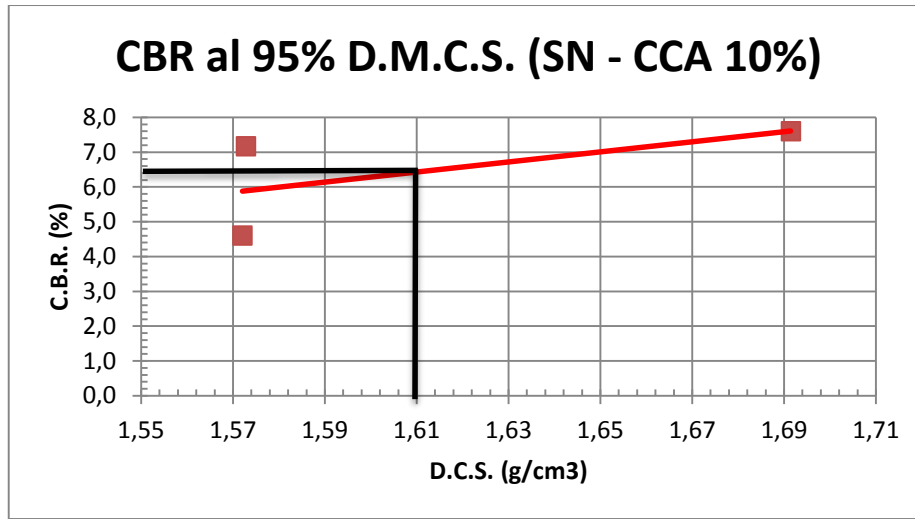


Figura 4.60: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.103: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,69	1,61	6,4

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°2 suelo-CCA (10%):

Tabla 4.104: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #2, saturado, suelo-CCA

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,68	7,9
25 GOLPES	1,58	7,0
10 GOLPES	1,46	5,2

Fuente: Elaboración propia, 2014

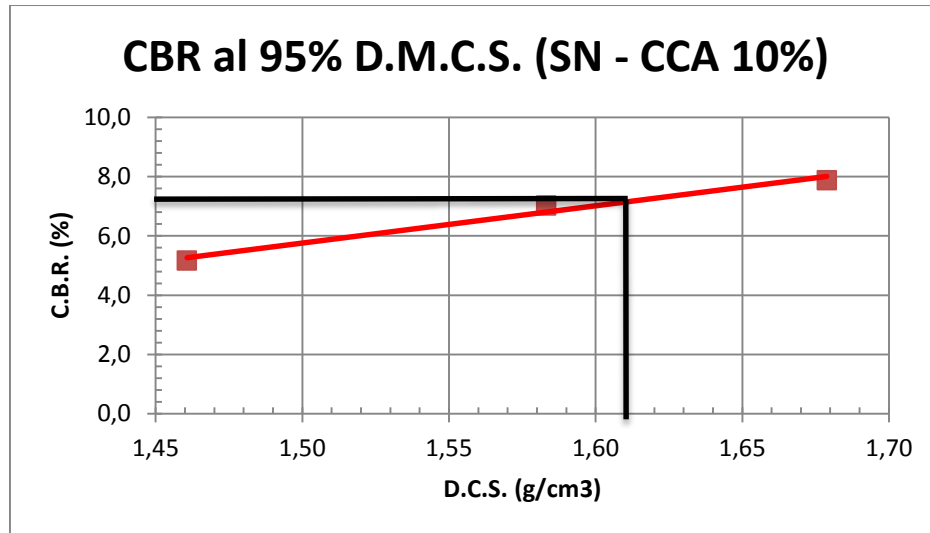


Figura 4.61: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.105: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,69	1,61	7,1

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°3 suelo-CCA (10%):

Tabla 4.106: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #3, saturado, suelo-CCA

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,70	7,5
25 GOLPES	1,61	7,2
10 GOLPES	1,59	4,7

Fuente: Elaboración propia, 2014

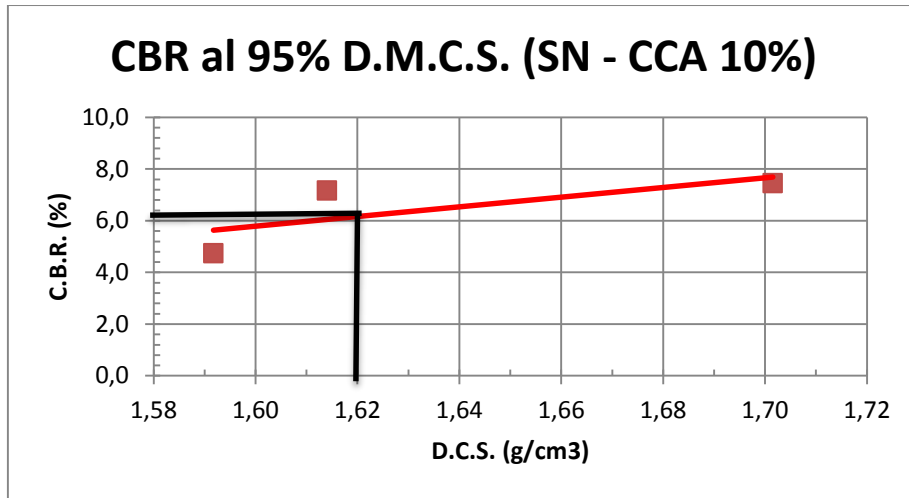


Figura 4.62: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.107: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,70	1,62	6,1

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.108: C.B.R. promedio suelo-CCA, saturado al 95% de la D.M.C.S

MUESTRA N°	C.B.R. SATURADO	% de STURACIÓN
1	6,40	27,52
2	7,10	27,44
3	6,10	27,02
PROMEDIO	6,53	27,33

Fuente: Elaboración propia, 2014

En la tabla 4.108. se observa el resumen de la influencia que tuvo la dosis de CCA (10%) en la capacidad de soporte C.B.R. saturado de la mezcla.

Muestra N°1 suelo-CCA (20%):

Tabla 4.109: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #1, saturado, suelo-CCA

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,66	7,2
25 GOLPES	1,56	6,9
10 GOLPES	1,55	4,5

Fuente: Elaboración propia, 2014

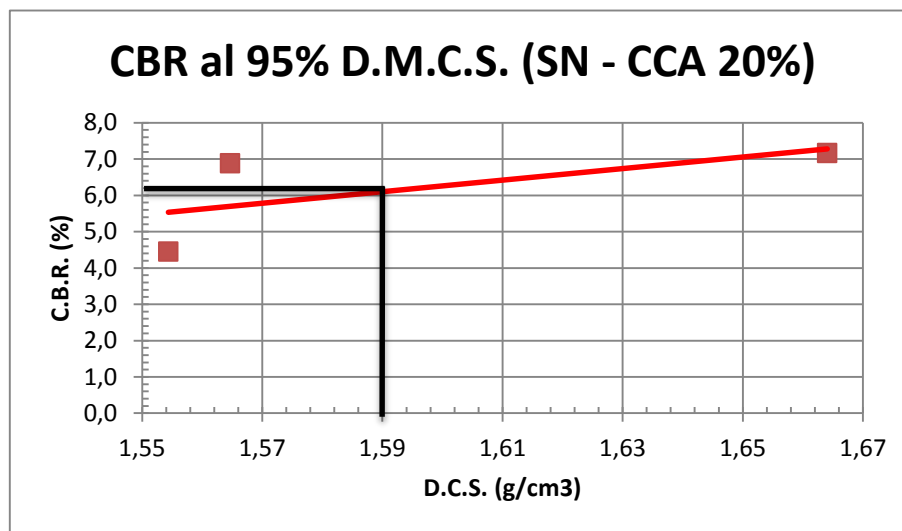


Figura 4.63: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.110: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #1, saturado

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,67	1,59	6,0

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°2 suelo-CCA (20%):

Tabla 4.111: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #2, saturado, suelo-CCA

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,68	8,2
25 GOLPES	1,53	6,3
10 GOLPES	1,51	5,2

Fuente: Elaboración propia, 2014

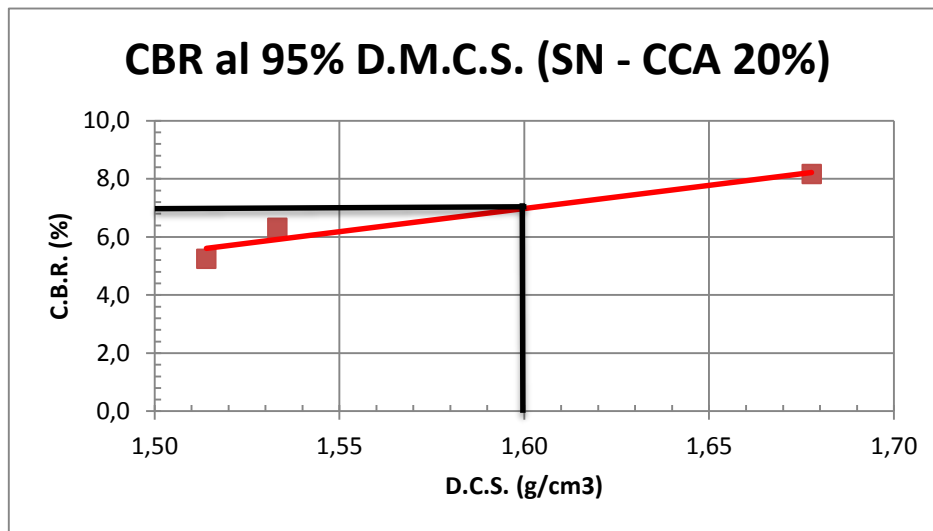


Figura 4.64: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.112: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #2, saturado

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,68	1,60	6,9

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°3 suelo-CCA (20%):

Tabla 4.113: Determinación C.B.R. a 0.2" de penetración M #3, saturado, suelo-CCA

	D.C.S. (g/cm ³)	CAP. SOPORTE C.B.R. (%)
56 GOLPES	1,70	7,3
25 GOLPES	1,58	6,9
10 GOLPES	1,57	4,5

Fuente: Elaboración propia, 2014

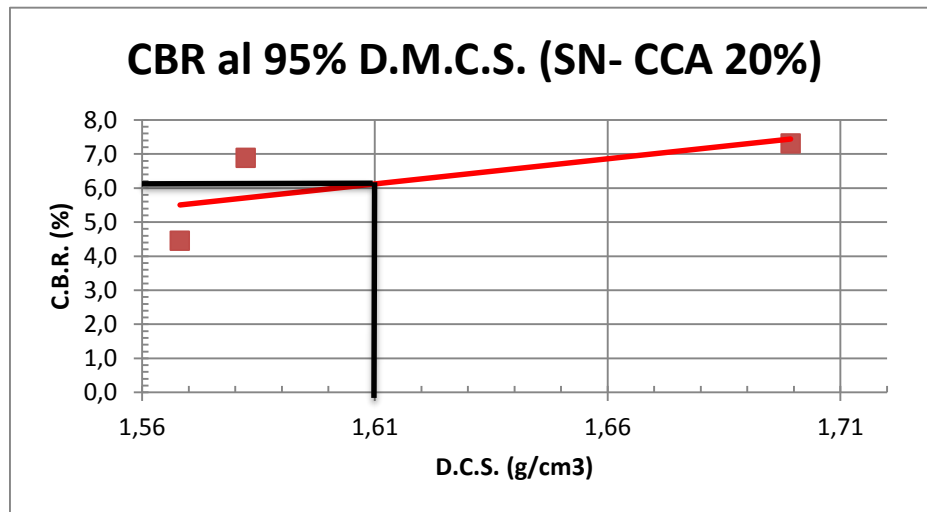


Figura 4.65: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado a 0,2" de penetración

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.114: Determinación C.B.R. al 95% de la D.M.C.S. M #3, saturado

D.M.C.S. (g/cm ³)	95% D.M.C.S. (g/cm ³)	C.B.R. (%)
1,69	1,61	6,1

Tabla 4.115: C.B.R. promedio suelo-CCA, saturado al 95% de la D.M.C.S

MUESTRA N°	C.B.R. SATURADO	% de STURACIÓN
1	6,00	26,90
2	6,90	27,85
3	6,10	27,30
PROMEDIO	6,33	27,35

Fuente: Elaboración propia, 2014

En la tabla 4.115. se observa el resumen de la influencia que tuvo la dosis de CCA (20%) en la capacidad de soporte C.B.R. saturado de la mezcla.

En la tabla 4.116. se observa el resumen promedio de la influencia que tuvo la dosis de CCA en cada muestra de la capacidad de soporte C.B.R. saturado en la mezcla.

Tabla 4.116: Resumen del C.B.R. saturado, muestra suelo-CCA

Dosificación de CCA	C.B.R. Saturado (%)
0%	8,07
10%	6,53
20%	6,33

Fuente: Elaboración propia, 2014

A partir de la tabla 4.116. para observar la influencia de la CCA sobre el C.B.R. saturado de la mezcla suelo-CCA de mejor manera, se confecciono la figura 4.63.

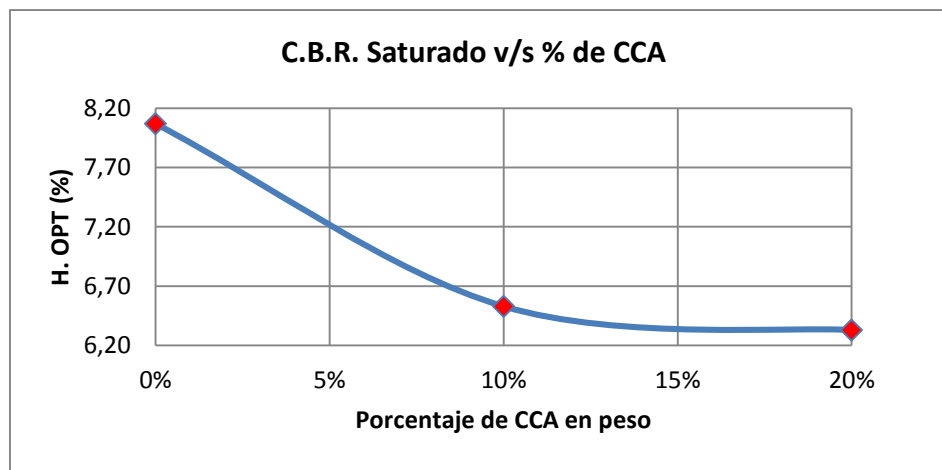


Figura 4.66: C.B.R. saturado V/S porcentaje CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

A partir de la figura 4.66. se puede apreciar que la capacidad de soporte C.B.R. disminuye con la incorporación de la CCA, disminuyendo un 3,06% entre una dosificación y otra. Además la capacidad de soporte C.B.R. disminuye con respecto al suelo natural obtenido en 4.1.1.5.

4.4.3. Expansión volumétrica suelo-CCA (Norma Nch 1852/II Of. 80)

Muestra N°1 suelo-CCA (10%):

Tabla 4.117: Expansión volumétrica suelo-CCA, M #1

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL (0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL (0.001 pulg)	334	355	397
EXPANSION (MM)	8,48	9,02	10,08
% EXPANSIÓN	7,29	7,75	8,66

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°2 suelo-CCA (10%):

Tabla 4.118: Expansión volumétrica suelo-CCA, M #2

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL (0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL (0.001 pulg)	316	351	381
EXPANSION (MM)	8,03	8,92	9,68
% EXPANSIÓN	6,90	7,66	8,31

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°3 suelo-CCA (10%):

Tabla 4.119: Expansión volumétrica suelo-CCA, M #3

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL (0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL (0.001 pulg)	364	391	429
EXPANSION (MM)	9,25	9,93	10,90
% EXPANSIÓN	7,94	8,53	9,36

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.120: Expansión volumétrica (%) promedio M #1, 2 y 3

MUESTRA N°	N° de Golpes		
	56	25	10
1	7,29	7,75	8,66
2	6,90	7,66	8,31
3	7,94	8,53	9,36
PROMEDIO	7,38	7,98	8,78

Fuente: Elaboración propia, 2014

De la tabla 4.120. se observa que la expansión volumétrica del suelo aumento al incorporar el 10% de CCA con respecto al suelo natural, además de aumentar con las distintas compactaciones.

Muestra N°1 suelo-CCA (20%):

Tabla 4.121: Expansión volumétrica suelo-CCA, M #1

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL (0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL (0.001 pulg)	384	411	478
EXPANSION (MM)	9,75	10,44	12,14
% EXPANSIÓN	8,38	8,97	10,43

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°2 suelo-CCA (20%):

Tabla 4.122: Expansión volumétrica suelo-CCA, M #2

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL (0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL (0.001 pulg)	361	393	430
EXPANSION (MM)	9,17	9,98	10,92
% EXPANSIÓN	7,88	8,58	9,38

Fuente: Elaboración propia, 2014

Muestra N°3 suelo-CCA (20%):

Tabla 4.123: Expansión volumétrica suelo-CCA, M #3

N° Golpes	56	25	10
LECTURA INICIAL DIAL (0.001 pulg)	0	0	0
LECTURA FINAL DIAL (0.001 pulg)	352	401	456
EXPANSION (MM)	8,94	10,19	11,58
% EXPANSIÓN	7,68	8,75	9,95

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 4.124: Expansión volumétrica (%) promedio M #1, 2 y 3

MUESTRA N°	N° de Golpes		
	56	25	10
1	8,38	8,97	10,43
2	7,88	8,58	9,38
3	7,68	8,75	9,95
PROMEDIO	7,98	8,77	9,92

Fuente: Elaboración propia, 2014

De la tabla 4.124. se observa que la expansión volumétrica del suelo aumento al incorporar el 20% de CCA con respecto al suelo natural, además de aumentar con las distintas compactaciones.

En la tabla 4.125. se observa el resumen promedio de la influencia que tuvo la dosis de CCA en cada muestra de la expansión volumétrica para las distintas dosificaciones.

Tabla 4.125: Resumen de la expansión volumétrica, muestra suelo-cemento-CCA

DOSIFICACION DE CCA	N° Golpes		
	56	25	10
0%	5,90	6,65	8,01
10%	7,38	7,98	8,78
20%	7,98	8,77	9,92

Fuente: Elaboración propia, 2014

A partir de la tabla 4.125. se desprende la figura 4.67, con el fin de entender de mejor manera la influencia que tienen las distintas dosificaciones de CCA en la expansión volumétrica de la mezcla.

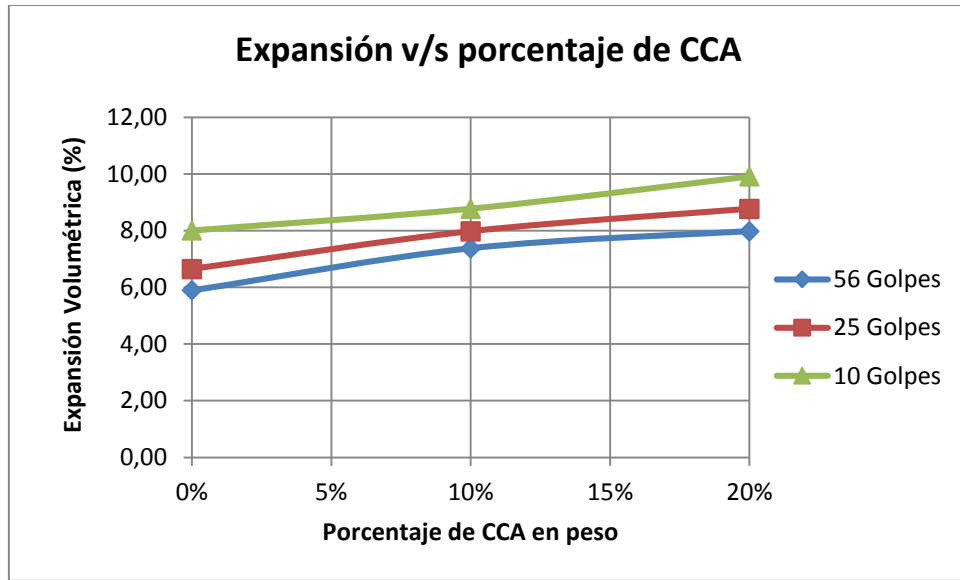


Figura 4.67: Expansión V/S porcentaje de CCA

Fuente: Elaboración propia, 2014

De la figura 4.67. se obtiene un aumento de la expansión volumétrica con las distintas dosificaciones de CCA con respecto al suelo natural. Arrojando la mayor expansión con un 20% de CCA.

4.5. Análisis comparativo suelo natural, suelo-cemento, suelo-cemento-CCA, suelo-CCA.

Luego de realizar la experiencia en laboratorio y haber desarrollado el análisis de los ensayos se presenta un resumen de los resultados obtenidos para cada propiedad en la tabla 4.126.

Tabla 4.126: Resumen de resultados obtenidos

MUESTRA	DOSIFICACIONES (% EN PESO)		ENSAYOS		
			CAPACIDAD DE SOPORTE		
	CEMENTO	CCA	PROCTOR MODIFICADO D.M.C.S. (GR/CM3)	C.B.R. (%)	EXPANSIÓN (%)
SUELO NATURAL	X	X	1,73	8,07	6,85
SUELO PATRÓN (SUELO CEMENTO)	13	X	1,75	44,1	4,03
SUELO-CEMENTO-CCA	13	10	1,71	43,74	4,38
	13	20	1,68	32,13	10,63
	13	30	1,63	22,83	12,08
SUELO-CCA	X	10	1,69	6,53	8,04
	X	20	1,68	6,33	8,89

Fuente: Elaboración propia, 2014

Nota: el resultado ocupado en la expansión es el promedio de las muestras de los niveles de compactación (56,25 y 10 golpes).

Con el fin de realizar una tabla comparativa con los resultados entre suelo patrón y suelo-cemento-CCA, además de observar la influencia de la ceniza en la mezcla haciendo una comparación entre suelo natural y suelo-CCA se elaboró la siguiente tabla en base a los porcentajes de estabilizantes óptimos para cada etapa.

Tabla 4.127: Análisis comparativo

DOSIFICACIÓN	D.M.C.S. (gr/cm ³)	C.B.R. SATURADO (%)	EXPANSION PROMEDIO (%)
SUELO NATURAL	1,73	8,07	6,85
SUELO PATRÓN (SUELO-CEMENTO 13%)	1,75	44,41	4,03
SUELO-CEMENTO 13% - CCA 10%	1,71	43,74	4,38
SUELO-CCA 10%	1,69	6,53	8,04

Fuente: Elaboración propia, 2014

A partir de la tabla 4.127. se desprenden las figuras 4.68, 4.69, 4.70, 4.71, 4.72 y 4.73, con el fin de analizar de mejor manera la D.M.C.S., C.B.R. Y expansión volumétrica para los distintos tipos de mezclas, ya que estas son propiedades relevantes de este estudio.

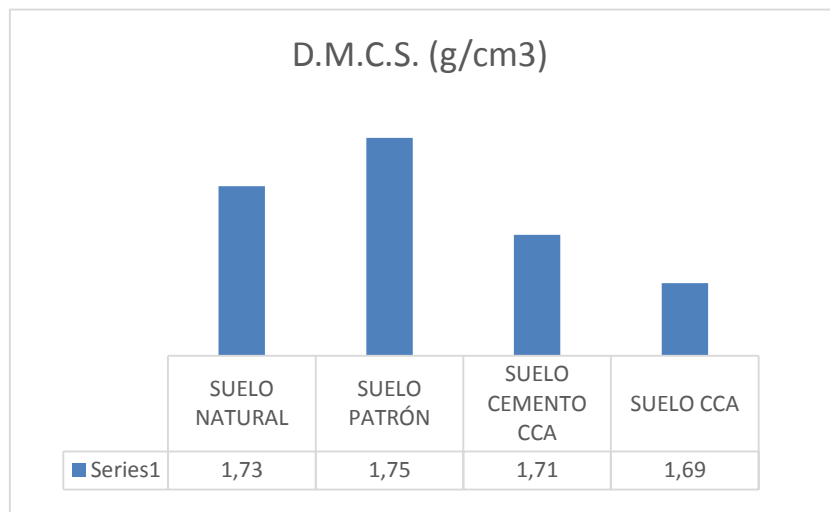


Figura 4.68: Comparación de D.M.C.S.

Fuente: Elaboración propia, 2014

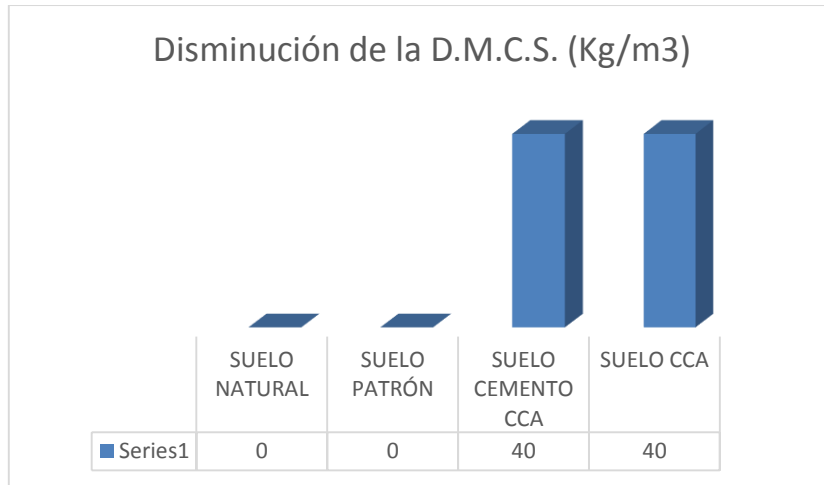


Figura 4.69: Disminución de D.M.C.S.

Fuente: Elaboración propia, 2014

En las figuras 4.68. y 4.69. se muestra una comparación de suelo patrón v/s suelo-cemento-CCA y suelo natural v/s suelo-CCA a fin de mostrar de mejor manera la influencia de la CCA sobre la mezcla. En ambos casos se ve una disminución de un 2,29%, tanto para el suelo-cemento-CCA y suelo-CCA, equivalentes a 40 kg/m³. Estas figuras demuestran que la adición de CCA produce una reducción en la D.M.C.S., lo cual hace que la solución sea más liviana.

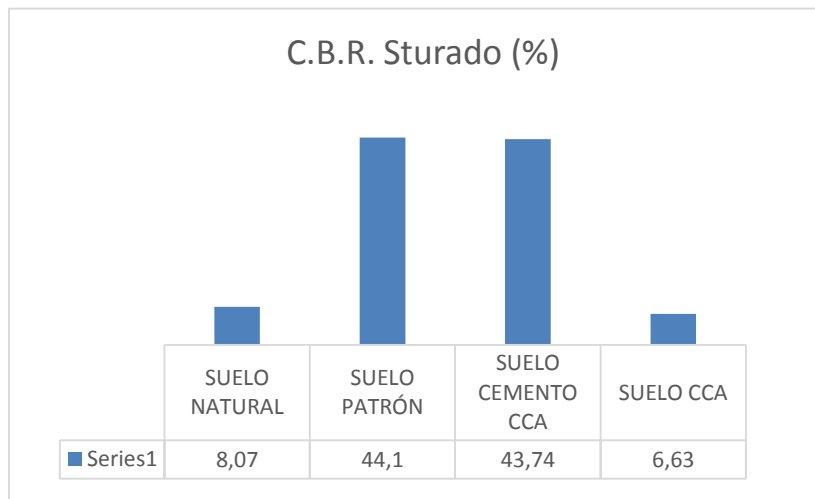


Figura 4.70: Comparación de C.B.R.

Fuente: Elaboración propia, 2014

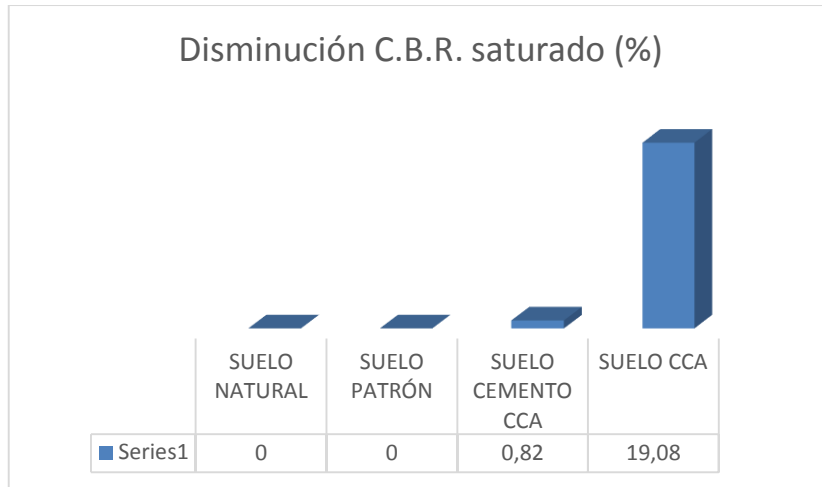


Figura 4.71: Disminución de C.B.R.

Fuente: Elaboración propia, 2014

En las figuras 4.70. y 4.71. se muestra una comparación de suelo patrón v/s suelo-cemento-CCA y suelo natural v/s suelo-CCA a fin de mostrar de mejor manera la influencia de la CCA sobre la mezcla. En las figuras se observa que la capacidad de soporte C.B.R. disminuye, un 0,82% para la combinación suelo-cemento-CCA y 19,08% para la solución suelo-CCA, por lo que la incorporación de la CCA produce un efecto negativo en la mezcla.

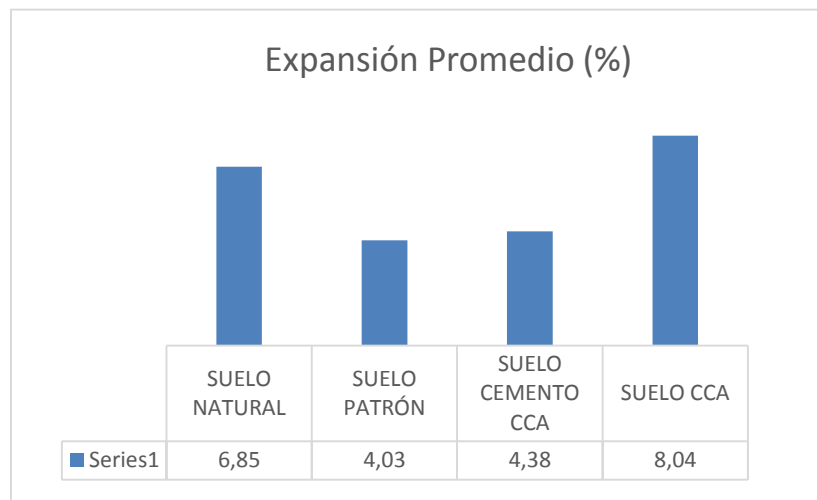


Figura 4.72: Comparación expansión volumétrica

Fuente: Elaboración propia, 2014

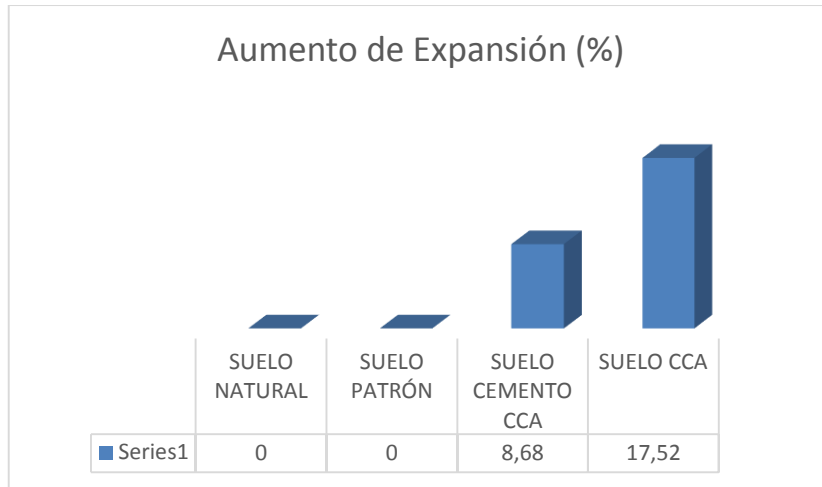


Figura 4.73: Aumento de expansión

Fuente: Elaboración propia, 2014

En las figuras 4.72. y 4.73. se muestra una comparación de suelo patrón v/s suelo-cemento-CCA y suelo natural v/s suelo-CCA a fin de mostrar de mejor manera la influencia de la CCA sobre la mezcla. De las figuras se desprende que la expansión de la mezcla suelo-cemento-CCA aumento un 8,68% con respecto al suelo patrón y un 17,52% la solución de suelo-CCA con respecto al suelo natural, por lo que se confirma que la ceniza produce un efecto negativo a las mezclas visto en el análisis anterior.

4.6. Estudio técnico económico: estabilización de suelo-cemento-CCA v/s suelo-cemento.

Previo a la elaboración del estudio técnico económico, se debe realizar el análisis de costo para producir 100 kg de CCA, ya que esta fue quemada de forma artesanal en campo abierto en horno metálico de dos fondos, resguardando la seguridad de otros predios alrededor, copiada en sacos y guardada en galpones.

4.6.1. Costos para la producción artesanal de CCA

Para la producción de CCA se utilizaron 1000 kg de cáscara de arroz.

4.6.1.1. Costos de equipos y herramientas para la producción de CCA

La elaboración de la ceniza requiere de la utilización de equipos y herramientas, cuyos costos se describen a continuación.

Tabla 4.128: Costos de equipos y herramientas

EQUIPOS Y HERRAMIENTAS	COSTO IMPLEMENTOS (\$/uni)	RENDIMIENTO (mes)	COSTO (\$/mes)	CANTIDAD (uni)	COSTO (\$)
BRASERO	30.000	12	2.500	1	2.500
FOSFOROS	120	1	120	1	120
PORUÑA	1.500	12	125	1	125
SACOS	100	1	100	2	200
PALA	4.990	12	416	1	416
SUBTOTAL					3.361
IVA (19%)					639
TOTAL					3.999

Fuente: Elaboración propia, 2014

4.6.1.2. Costo de material: cáscara de arroz**Tabla 4.129: Costo de material**

MATERIAL	CANTIDAD (Kg)	PRECIO (\$/Kg)	COSTO (\$)
CASCARA DE ARROZ	1.000	550	550.000
TOTAL			550.000

Fuente: Elaboración propia, 2014

4.6.1.3. Costos de mano de obra para la producción de CCA**Tabla 4.130: Costos de mano de obra**

CARGO	N° DE TRABAJADORES	DÍAS	COSTO (*) (\$/día)	COSTO (\$)
MAESTRO	1	7	15.000	105.000
TOTAL				105.000

Fuente: Elaboración propia, 2014

(*) El costo de mano de obra se estima para una jornada de 8 horas de trabajo, con leyes sociales incluidas, además, destacar que el trabajador es remunerado a trato por faena de quemado de cáscara de arroz.

4.6.1.4. Costos total para la producción de CCA

Tabla 4.131: Costos total producción CCA

	COSTO (\$)/100 kg
EQUIPOS	3.999
MATERIAL	550.000
MANO DE OBRA	105.000
TOTAL	658.999

Fuente: Elaboración propia, 2014

4.6.2. Proceso constructivo para la estabilización de suelo existente

1. Escarificar en la profundidad indicada, acordonando el material.
2. Humedecer y compactar la subrasante al 95% de la D.M.C.S.
3. Extender el material arcilloso acordonado.
4. Esparcido del cemento y la CCA: agregar cemento y CCA a la razón predefinida. El cemento deberá aplicarse en aquellas áreas en donde la mezcla se efectuará el mismo día de su colocación.
5. Mezclado y mojado: se realiza un mezclado preliminar para distribuir el cemento y la CCA uniformemente a través del suelo a la profundidad y ancho adecuado y se pulverizará el suelo a un mínimo de 2". Después del mezclado de ambos estabilizantes, se debe agregar agua para alcanzar la humedad óptima, mediante camión aljibe. Posterior al mezclado inicial, la capa tratada con cemento y CCA debe moldearse y compactarse ligeramente antes del curado, con el fin de minimizar la pérdida de humedad por evaporación.
6. Homogeneización del suelo con cemento y CCA mediante sucesivas pasadas de motoniveladora.
7. Extender y compactar al 95% de la D.M.C.S.
8. Al momento de perfilar, no olvidar dar las pendientes longitudinales y transversales establecidas, que permitan el libre escurrimiento de las aguas lluvias.
9. La compactación deberá efectuarse con un rodillo vibratorio, procediéndose desde el borde hacia el centro, evitando pasar el rodillo por el eje de la calzada.
10. La primera pasada de rodillo deberá efectuarse sin vibrar, y deberá procederse al relleno del material en los puntos bajos de tal forma que la superficie quede lo más lisa y homogénea posible.
11. El proceso de fraguado es de 7 a 12 días dependiendo del clima. (En Rudisky, 2013)

4.6.3. Requerimientos mínimos de la maquinaria a utilizar

Con el fin de obtener rendimiento y calidad en la confección de una carpeta de rodado, es importante que las maquinarias a utilizar cuenten con las condiciones mecánicas óptimas. Para ello el control periódico de los equipos claves evitará futuros problemas tanto en la calidad del trabajo como en los cumplimientos de plazos preestablecidos por proyecto. Por lo que es necesario que todo equipo deba estar en condiciones para su uso, cuando este sea requerido.

Según Saampedro (2007), los principales equipos y maquinarias utilizados en la estabilización de suelos y sus requerimientos mínimos son:

- a) Equipo compactador: Para el buen sellado de la superficie y compactación es recomendable el uso de rodillo vibratorio, con la salvedad que no debe ser pasado por el eje, sino siempre a ambos lados de él, para dejar claramente marcado el perfil transversal con el respectivo bombeo, de lo contrario se producen deterioros por la acumulación de agua en el centro de la calzada (la otra opción es dejar una pendiente transversal única)
- b) Aljibe: Este puede ser autopropulsado o de remolque, debiendo ser su capacidad acorde a los trabajos y volúmenes de proyecto. Se debe tener precaución en que estos equipos no tengan pérdida de agua y que los surtidores entreguen de una forma pareja y controlada el agua, ya sea en forma gravitacional o forzada. Los trabajos asignados se centran en riego del cordón para amasado, para lograr la humedad de compactación y riegos de sello de la superficie
- c) Motoniveladora: Esta maquinaria tendrá su uso múltiple en operaciones de construcción como escarificado, acordonar, revolver (si es necesario), extender el material y perfilar. Por esto, es la maquinaria en la que se debe poner un mayor énfasis en su elección. Esta debe ser autopropulsada, con tornamesa ajustable y pala angulable, además para algunos tipos de trabajo de mantención o reparación de caminos debe estar provisto de escarificadores, en lo posible provista de un sensor de pendiente longitudinal y transversal con control hidráulico sobre la hoja o pala. Esta última debe estar derecha y en buenas condiciones, sin juego. (En Rudisky, 2013)

4.6.4. Estudio de costos

Con el fin de evaluar cuantitativamente la confección de una carpeta de rodado con la solución suelo-cemento-CCA propuesta en este estudio, se realizará un estudio de costos para el mejoramiento de 1 km de suelo arcilloso. Para el desarrollo de este estudio se considerará de interés solo la combinación óptima de suelo-cemento-CCA, que en este caso fue de un 10% de ceniza. Determinada anteriormente en el capítulo 4 de la investigación.

4.6.4.1 Bases de cálculo

- a) El material se encuentra en el camino.
- b) Acordonar el material existente y despedrarlo, mediante motoniveladora.
- c) Densidad del material compactado 1,62 ton/m³ (95% del Proctor modificado).
- d) Longitud de la calzada: 1.000 m.

- e) Ancho del camino: 6 m.
- f) Espesor de la carpeta: 0,15 m.
- g) Bermas a cada lado de la calzada: 0,5 m.
- h) Volumen de material a mover, distribuir y colocar incluyendo esponjamiento: 1.365 m³.
- i) Peso compactado seco del material a utilizar (incluye cemento y CCA): 1.701 toneladas.
- j) Agregar cemento melón, correspondiente a un 13% en peso con respecto al peso del suelo compactado seco a estabilizar, equivalentes a 221.130 kg.
- k) Agregar CCA, correspondiente a un 10% en peso con respecto al peso del suelo compactado seco a estabilizar, equivalentes a 170.100 kg.

4.6.4.2. Costos de la construcción de una carpeta de rodado de suelo-cemento-CCA

4.6.4.2.1. Costos de maquinaria suelo-cemento-CCA

Movimiento, transporte, distribución y colocación del material arcilloso será mediante maquinaria pesada, cuyos costos se describen a continuación.

Tabla 4.132: Costos maquinaria

MAQUINARIA	COSTO MAQUINARIA (\$/hr)(*)	RENDIMIENTO (m ³ /hr)	COSTO (\$/m ³)	VOLUMEN (m ³)	COSTO (\$)/km
MOTONIVELADORA	26.000	90	289	1.365	394.333
CARGADOR	22.000	50	440	1.365	600.600
RODILLO	18.000	90	200	1.365	273.000
ALJIBE	15.000	90	167	1.365	227.500
TRANSPORTE	12.000	12	1.000	1.365	1.365.000
SUBTOTAL					2.860.433
IVA (19%)					543.482
TOTAL					3.403.916

Fuente: Elaboración propia, 2014

(*) El costo de maquinaria (\$/hr) incluye trabajo de la maquinaria, costos por conceptos de operación, petróleo, operador y transporte.

4.6.4.2.2. Costos de materiales suelo-cemento-CCA

Tabla 4.133: Costos de materiales

ESTABILIZANTE	CANTIDAD (Kg)	PRECIO (**) (\$/Kg)	COSTO (\$)/km
CEMENTO	221.130	117	25.872.210
CCA	170.100	6.590	1.120.959.000
TOTAL			1.146.813.210

Fuente: Elaboración propia, 2014

(**) Precio de los estabilizantes con IVA incluido y traslado de productos a Valparaíso.

4.6.4.2.3. Costos de mano de obra suelo-cemento-CCA

Tabla 4.134: Costos de mano de obra

CARGO	N° DE TRABAJADORES	DÍAS	COSTO (***) (\$/día)	COSTO (\$)
MAESTRO TRAZADOR	1	8	25.000	200.000
AYUDANTE TRAZADOR	1	8	21.000	168.000
JORNAL	2	8	18.000	288.000
TOTAL				656.000

Fuente: Elaboración propia, 2014

(***) El costo de mano de obra se estima para una jornada de 8 horas, con leyes sociales incluidas.

4.6.4.2.4. Costos total de la estabilización suelo-cemento-CCA

Tabla 4.135: Costos total de construcción suelo-cemento-CCA

	COSTO (\$)/km
MAQUINARIA	3.403.916
MATERIALES	1.146.813.210
MANO DE OBRA	656.000
TOTAL	1.150.891.126

Fuente: Elaboración propia, 2014

4.6.5. Costos de la construcción de una carpeta de rodado de suelo-cemento

Para realizar la comparación entre suelo-cemento-CCA propuesto en este estudio, se considerará suelo-cemento, el cual fue considerado como suelo patrón en sección 4.2. de este estudio.

4.6.5.1. Bases de cálculo

- a) El material se encuentra en el camino.
- b) Acordonar el material existente y despedrarlo, mediante motoniveladora.
- c) Densidad del material compactado 1,66 ton/m³ (95% del Proctor modificado).
- d) Longitud de la calzada: 1.000 m.
- e) Ancho del camino: 6 m.
- f) Espesor de la carpeta: 0,15 m.
- g) Bermas a cada lado de la calzada: 0,5 m.
- h) Volumen de material a mover, distribuir y colocar incluyendo esponjamiento: 1.365 m³.
- i) Peso compactado seco del material a utilizar 1.743 toneladas.
- j) Agregar cemento melón, correspondiente a un 13% en peso con respecto al volumen de material a mover, equivalentes a 226.590 kg.

4.6.5.2. Costos total de la estabilización suelo-cemento

Para el costo total de la estabilización se mantendrán los valores del costo de maquinaria y mano de obra obtenidos en la sección 5.4.2.1. y 5.4.2.3., restando la CCA en la mezcla en la sección 5.4.2.2., por lo que el costo total de la estabilización se muestra a continuación.

Tabla 4.136: Costos total de construcción suelo-cemento

	COSTO (\$)/km
MAQUINARIA	3.403.916
MATERIALES	26.511.030
MANO DE OBRA	656.000
TOTAL	30.570.946

Fuente: Elaboración propia, 2014

Según el estudio de costos realizado se puede comprobar que al realizar un mejoramiento de 1 km de suelo existente con la solución suelo-cemento-CCA, cuyo valor es de \$1.150.891.126, resulta más costoso que mejorar el suelo mediante suelo-cemento cuyo valor es de \$30.570.946. Al comparar los precios de cada solución se obtiene un aumento distorsionado para la solución suelo-cemento-CCA. Este alza de debe principalmente al comprar la cáscara de arroz y quemarla artesanalmente, agregándole el mayor alza al costo de material obtenido en la sección 5.1.2. obteniendo un precio de \$6.590 por kg de CCA.

5. Conclusiones y Comentarios

5.1. Conclusiones:

Según lo desarrollado en esta investigación, en base a ensayos de laboratorio y análisis de resultados, se puede decir que no se cumple la hipótesis, ya que con la incorporación de CCA a la mezcla en distintos porcentajes la tendencia de la capacidad de soporte C.B.R. fue bajar alcanzando la menor capacidad de soporte C.B.R. con un 30% de CCA disminuyendo un 48,23%, siendo comparado con el suelo patrón.

A continuación se señalan las conclusiones obtenidas en base al trabajo experimental:

Con respecto al suelo-cemento-CCA:

La dosis de CCA con la que se obtuvo la mayor capacidad de soporte C.B.R. (saturado) fue con un 10% de CCA alcanzando una capacidad de soporte de 43,74% (0,82% menor al suelo patrón), luego con el 20% se obtuvo un C.B.R. de 32,13% (27,14% menor al suelo patrón) y con un 30% alcanzando un C.B.R. de 22,83% (48,23% menor al suelo patrón), todos estos resultados por debajo del suelo patrón que fue un C.B.R. de 44,10%.

En relación a la expansión, podemos decir que ésta aumento con los distintos porcentajes de CCA para las distintas compactaciones (56, 25 y 10 golpes), obteniendo las mayores expansiones con el 30% de CCA. Obteniendo para esta dosificación una expansión para 56 golpes de 11,32% (143,44% mayor al suelo patrón), para 25 golpes una expansión de 11,95% (208,79% mayor al suelo patrón) y para 10 golpes una expansión de 12,98% (263,59% mayor al suelo patrón).

Con respecto a la D.M.C.S. y humedad óptima, se produce una disminución lineal tanto en la D.M.C.S. como en la humedad óptima obtenidas a partir del ensayo proctor modificado, donde a medida que la dosificación de CCA aumentaba, las densidades y humedades disminuían, obteniéndose la mayor disminución para estas propiedades con el 30% de CCA.

Con respecto a los índices de plasticidad obtenidos para cada dosificación se puede señalar que a medida que los porcentajes de CCA aumentaban, estos aumentaban también, Obteniéndose el índice de plasticidad mayor con un 30% de CCA equivalente a 15,88 (84,22% mayor al suelo patrón), observándose con esto una disminución lineal de la capacidad de soporte C.B.R.

Con respecto al suelo-CCA:

A fin de observar si la CCA tiene o no influencia en la mezcla, se evaluó el suelo arcilloso solamente con CCA obteniendo resultados negativos en la mezcla, ya que al incorporar la ceniza al suelo, éste aumento su índice de plasticidad a 22,13 con un 10% de CCA (10,65% mayor al suelo natural) y a 23,07 con un 20% de CCA (15,35% mayor al suelo natural), por consiguiente la capacidad de soporte C.B.R. disminuyo desde un 8,07% (C.B.R. suelo natural) a un 6,53% con el 10% de CCA (19,08% menor al suelo natural), mientras que con el 20% de CCA disminuyo a un 6,33% (21,56% menor al suelo natural).

Con respecto a la expansión volumétrica de la mezcla, esta aumento para las distintas compactaciones (56, 25 y 10 golpes), teniendo la mayor expansión con el 20% de CCA. Obteniendo una expansión para 56 golpes de 7,98% (35,25% mayor al suelo natural), para 25 golpes una expansión de 8,77% (31,88% mayor al suelo natural) y para la probeta compactada con 10 golpes una expansión de 9,92% (23,85% mayor al suelo natural). Dado estos valores el suelo sigue siendo un material de remoción según el Manual de Carreteras V5-201.303.

Con respecto a la D.M.C.S. y humedad óptima, al igual que en la mezcla suelo-cemento-CCA se produce una disminución tanto en la D.M.C.S. como en la humedad óptima obtenidas a partir del ensayo proctor modificado, disminuyendo ambas propiedades a medida que la dosificación aumentaba (10 y 20% de CCA), obteniéndose la mayor disminución para estas propiedades con el 20% de CCA.

A modo de síntesis, la CCA deteriora las propiedades tanto mecánicas como físicas del suelo, tanto en la mezcla suelo-cemento-CCA como en el suelo en estado natural, además se demuestra su negativo aporte mediante los resultados de los distintos ensayos de laboratorio el cual se vio reflejado en la disminución de las propiedades de resistencia (capacidad de soporte).

Con respecto a los costos que involucra estabilizar un suelo-cemento-CCA v/s un suelo-cemento a pesar de que los resultados no fueron positivos, la solución más conveniente desde el punto de vista económico para 1 km de suelo arcilloso es estabilizarlo solamente con cemento, ya que la solución suelo-cemento-CCA involucra en el presupuesto la compra de la materia prima de la ceniza, además del proceso de quema de forma artesanal, elevando el costo de una manera distorsionada al momento de incorporar el \$/kg (\$6.590 por kg de CCA) en la estabilización con cemento y CCA.

5.2. Comentarios:

Cabe mencionar que con la incorporación del cemento al suelo arcilloso en las probetas en el ensayo C.B.R. y estas luego del proceso de inmersión (luego de haber estado 96 horas sumergidas bajo agua), el material se encontraba completamente rígido para las distintas compactaciones (56, 25 y 10 golpes), debiendo extraer el material para así medir humedades se tornó bastante complicado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Barai Lara, T., Aguilar Zaragoza, J., Horta Rangel, J., Ladeiro Marquez, A. & Castaño Meneses, V. (2009) "Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas".

Buzzy O., Stephen Fityus y Scott W. Sloan (2009) "Use of expanding polyurethane resin to remediate expansive soil foundations".

Camacho T., O. Reyes, C. Mayorga y D. Méndez (2006) "Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas, Ciencia e Ingeniería Neogranadina".

Cortez A. Enteiche G. (1995). Suelo Cemento, su aplicación en la Construcción.

Crespo, C. (1998) "Mecánica de suelos y cimentaciones".

Curso mecánica de suelos DuocUC, 2005.

Estabilización de Suelos con Cemento, IECA 2013.

Gimenez Salas, Escobar J. A. y Coautores (1992). Geotecnia y Cimientos. 2da Edición Rueda, España.

González de la Cotera, M.: "Morteros ligeros de cáscara de arroz". IV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Colegio de Ingenieros del Perú - Filial Lambayeque, Capítulo de Ingenieros Civiles, pp 1-10, November 1999.

Hara, N; Yamada, H.; Inoue, K.; Inoue, N; Tsunematsu, S. y Noma, H. "Hydrothermal reactivity of rice husk ash and its use for calcium silicate products". Proceeding 3th International Conference Trondheim, Norway 2005. Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete. Vol 1, SP 114-23, pp 499-516.

Hemero N, E. Y Baragaño, C., J.R.: "Cementos con adiciones activas". Sección cemento. Cemento Hormigón. Marzo 1997. N° 652, pp180-217.

Hidalgo M., Carlos Sanchez, Boris Pedroza V. y Rodríguez M. (2010) "Comportamiento de una pista experimental de pavimento flexible con base estabilizada con cal".

Higuera J., Joon C. Lee y J. Antonio H. Carraro (2007) "Beneficial use of waste tire rubber for swelling potential mitigation in expansive soils".

Junco del Pino J. (2011) "Aditivo químico obtenido de sales cuaternarias empleado para la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes de carreteras".

Lambe, W & Whitman, R. (1999) "Mecánica de suelos".

Manual de Estabilización de Suelos con Cemento y Cal, IECA.

Mehta, P.K: "Mineral admixtures". Concrete admixtures handbook: Properties, Science and Technology. New Jersey USA, 2001. Cap 6, pp. 303-306. Ed. Ramachandran, V.S.

Mehta, P.K.: "Rice husk ash. A unique supplementary cementing material".Advances in concrete technology. Second Edition, 2001, pp. 419-444. Ed. CANMET Malhotra, V.M.

MINAG Ministerio de Agricultura. Instituto Nacional de Estadística.

Pradena, J.P. Mery, E. Novoa (2010). "Estabilización y mantenimiento de caminos no pavimentados sometidos a condiciones de hielo-nieve en zona de montaña".

Revista Cemento, Materiales de Construcción 2003.

Revista Ingeniería de Construcción: "Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cáscara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación". 2008.

Rudisky I., (2013) "Evaluación de combinación de estabilizadores químicos para el mejoramiento de la capacidad de soporte (CBR) en suelos finos".

Sengel J. (2003) "Patologías por arcillas expansivas".

Suart A. (2005). "Estudio de la estabilización de suelos de plasticidad media con cal-emulsión".

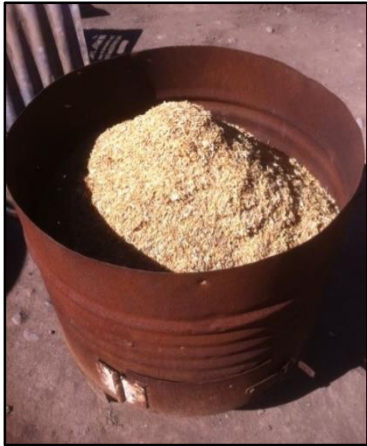
Topcu & Guncan (1995) "Effect of plastic wastes in improving cement-treated soils".

Yoder E. J., and M. W. Witzak. (1975) "Principies of Pavement Desing. Second Edition. New York: John Wiley & Sons Inc."

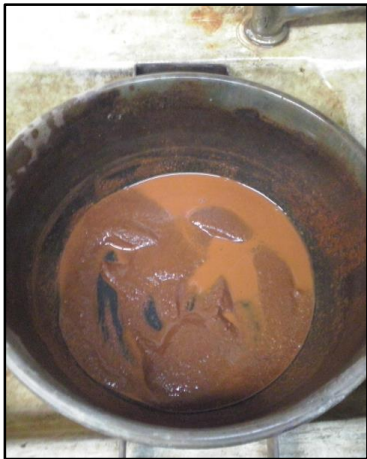
ANEXOS

ANEXO 1

En este anexo se mostrarán algunas de las imágenes más relevantes durante el desarrollo de la investigación.



Muestras cáscara de arroz y CCA



Muestra lavado de material, granulometría suelo natural



Probetas C.B.R. en piscina de curado, suelo natural



Probeta proctor, retiro de material para determinación de humedades, suelo natural



Suelo natural y cemento (13%) antes de homogenización



Probeta proctor suelo-cemento (13%) modificado luego de tomar humedades



Probeta C.B.R. suelo-cemento (13%) posterior a la inmersión



Suelo-cemento-CCA (13%-30%) antes de homogenización



Probeta C.B.R. suelo-cemento-CCA (13%-30%) posterior a penetración



Muestra C.B.R. suelo-cemento-CCA (13%-30%) posterior al secado en horno