



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE  
SUELOS POTENCIALMENTE  
EXPANSIVOS EN ZONAS FORESTALES  
ESTABILIZADOS CON CENIZAS FBC**

**LORETO MILLARAY ACEVEDO ALVARADO**

Tesis para optar al grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:  
**GUILLERMO THENOUX ZEBALLOS**

Santiago de Chile, (Mayo, 2009)

© 2009, Loreto Millaray Acevedo Alvarado



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE  
SUELOS POTENCIALMENTE  
EXPANSIVOS EN ZONAS FORESTALES  
ESTABILIZADOS CON CENIZAS FBC**

**LORETO MILLARAY ACEVEDO ALVARADO**

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

**GUILLERMO THENOUX ZEBALLOS**

**FERNANDO RODRIGUEZ ROA**

**CARLOS CHANG ALBITRES**

**LUIS CIFUENTES LIRA**

Para completar las exigencias del grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería  
Santiago de Chile, (Mayo, 2009)

A mi Papá y abuelos, que desde el cielo me han apoyado en cada paso que doy... y este es uno de los grandes.

## **AGRADECIMIENTOS**

Esta investigación no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional del equipo CIIV. Gracias a todos ellos este proyecto salió adelante de buena forma. Marcelo, Alelí, Felipe, Alvaro y en especial a Guillermo Thenoux por guiarme en todo momento. Cabe destacar la importante labor de Patricio Pinilla, laboratorista, ya que sin él el arduo trabajo de laboratorio hubiera sido aún más difícil.

Mis amigos del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción también juegan un papel importante en esta investigación, ya que son ellos los que facilitan el trabajo administrativo y los que siempre estuvieron ahí para darme aliento en los momentos que los necesite. Así que muchas gracias Lidia, Edith, Xime, Sandra.

No puedo dejar de nombrar a mi familia quienes estuvieron apoyándome constantemente y levantándome cuando quise dejarme caer. En especial a mi madre, la que me ha dado y enseñado todo en esta vida.

Gracias también al Pato que con su paciencia fue capaz de soportarme todo este tiempo, en el cuál uno está constantemente preocupado de la investigación y que tiene que trabajar de domingo a domingo.

## ÍNDICE GENERAL

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>II</b>
<b>ÍNDICE GENERAL.....</b>	<b>III</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>XII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XIII</b>
<b>I INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
I.1 ANTECEDENTES GENERALES .....	1
I.2 HIPÓTESIS DE TRABAJO .....	3
I.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	3
I.4 ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN .....	4
I.5 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	4
I.6 RESULTADOS ESPERADOS .....	7
I.7 ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	8
<b>II ANTECEDENTES SOBRE LAS REDES DE CAMINOS FORESTALES .....</b>	<b>9</b>
II.1 INTRODUCCIÓN.....	9
II.2 CARACTERÍSTICAS DE LA RED DE CAMINOS FORESTALES .....	10
II.3 PROBLEMÁTICA DE LOS CAMINOS FORESTALES .....	11
II.3.1 <i>Planificación y Diseño Geométrico.....</i>	<i>11</i>
II.3.2 <i>Diseño de Pavimentos .....</i>	<i>12</i>
II.3.3 <i>Construcción .....</i>	<i>16</i>
II.3.4 <i>Mantenimiento o Conservación.....</i>	<i>19</i>
<b>III FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE UNA SUBRASANTE DE SUELO ARCILLOSO.....</b>	<b>22</b>
<b>IV MÉTODOS DE MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE.....</b>	<b>33</b>
<b>V ANTECEDENTES SOBRE LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE LA SUBRASANTE.....</b>	<b>40</b>

V.1	AGENTES CEMENTANTES .....	40
	<i>V.1.1 Estabilización con Cal</i> .....	40
	<i>V.1.2 Estabilización con Cemento</i> .....	47
	<i>V.1.3 Cenizas Volantes</i> .....	51
V.2	AGENTES ASFÁLTICOS .....	55
V.3	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE CONGLOMERANTES .....	56
<b>VI</b>	<b>PROPIEDADES GENERALES DE LAS CENIZAS FBC Y SU APLICACIÓN EN LA ESTABILIZACIÓN DE CAMINOS FORESTALES .....</b>	<b>61</b>
VI.1	ANTECEDENTES GENERALES .....	61
VI.2	COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES DE LA CENIZAS FBC .....	62
VI.3	MECANISMO DE ESTABILIZACIÓN.....	65
VI.4	ANTECEDENTES DE LA FORMACIÓN DE COMPUESTOS EXPANSIVOS .....	69
VI.5	PROPIEDADES DE LOS SUELOS ESTABILIZADOS CON CENIZAS FBC.....	81
VI.6	EXPERIENCIAS DE ESTABILIZACIONES CON CENIZAS FBC .....	82
	<i>VI.6.1 Experiencias Internacionales</i> .....	83
	<i>VI.6.2 Experiencias Nacionales</i> .....	87
VI.7	CONSIDERACIONES SOBRE EL USO DE CENIZAS FBC .....	90
VI.8	ANTECEDENTES AMBIENTALES DEL USO DE LAS CENIZAS FBC.....	91
	<i>VI.8.1 Níquel</i> .....	91
	<i>VI.8.2 Vanadio</i> .....	92
	<i>VI.8.3 Estudio de Impacto Ambiental Cenizas FBC</i> .....	93
<b>VII</b>	<b>PROGRAMA DE LABORATORIO .....</b>	<b>95</b>
VII.1	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES A UTILIZAR.....	97
	<i>VII.1.1 Caracterización de Cenizas FBC</i> .....	97
	<i>VII.1.2 Caracterización de los Suelos Utilizados para la Investigación</i> .....	98
	<i>VII.1.3 Caracterización de la Mezcla Suelo-Cenizas FBC</i> .....	99
VII.2	ENSAYOS DE EVALUACIÓN PRELIMINAR .....	99
	<i>VII.2.1 Diseño Experimental</i> .....	100
VII.3	METODOLOGÍA DE DOSIFICACIÓN Y FABRICACIÓN DE PROBETAS.....	101
	<i>VII.3.1 Dosificación</i> .....	101
	<i>VII.3.2 Protocolo para Preparación de Probetas y Ensayos</i> .....	102
	<i>VII.3.3 Criterios para la Determinación Óptima de Ceniza</i> .....	105

VII.3.4	<i>Diseño Experimental</i> .....	107
VII.4	DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE MADURACIÓN ÓPTIMO DE LA MEZCLA .....	108
VII.4.1	<i>Diseño Experimental</i> .....	108
VII.5	ENSAYOS DE DOBLE ESTABILIZACIÓN .....	109
VII.5.1	<i>Diseño Experimental</i> .....	110
VII.6	VARIACIONES DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS .....	110
VII.6.1	<i>Diseño Experimental</i> .....	111
<b>VIII</b>	<b>PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>113</b>
VIII.1	RESULTADOS DE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS CENIZAS FBC .....	113
VIII.1.1	<i>Análisis de Resultados de Ensayos de Caracterización</i> .....	115
VIII.2	RESULTADOS DE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE SUELOS .....	117
VIII.3	RESULTADOS DE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS SUELO-CENIZA FBC .	118
VIII.4	RESULTADOS DE ENSAYOS DE EVALUACIÓN PRELIMINAR .....	119
VIII.4.1	<i>Dosis Inicial Cenizas FBC</i> .....	119
VIII.4.2	<i>Contenido de Sulfato y Alúmina</i> .....	124
VIII.5	DOSIFICACIÓN .....	124
VIII.5.1	<i>Suelos Mininco</i> .....	124
VIII.5.2	<i>Suelos ENAP</i> .....	131
VIII.5.3	<i>Ecobel</i> .....	135
VIII.5.4	<i>Suelos Arauco</i> .....	137
VIII.5.5	<i>Ensayo de Medición de la Cantidad de Etringita</i> .....	139
VIII.6	DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE MADURACIÓN ÓPTIMO DE LA MEZCLA .....	141
VIII.6.1	<i>Efecto del Agua Adicional de Mezclado en el Índice de Expansión</i> .....	143
VIII.6.2	<i>Efecto del Agua Adicional de Mezclado en la Resistencia al Compresión No Confinada (UCS)</i> .....	144
VIII.6.3	<i>Efecto de la Maduración en el Índice de Expansión</i> .....	147
VIII.6.4	<i>Efecto de la Maduración en la Resistencia a la Compresión no Confinada</i> .....	152
VIII.7	ENSAYOS DE DOBLE ESTABILIZACIÓN .....	159
VIII.7.1	<i>Doble Estabilización con Cenizas FBC</i> .....	159
VIII.7.2	<i>Doble Estabilización con Material Granular</i> .....	168
VIII.8	VARIACIONES DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS .....	169
VIII.8.1	<i>Índice de Plasticidad</i> .....	169
VIII.8.2	<i>Absorción</i> .....	170

<b>IX</b>	<b>METODOLOGÍA DE DOSIFICACIÓN PROPUESTA .....</b>	<b>173</b>
<b>X</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>175</b>
<b>XI</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>178</b>
<b>A N E X O S.....</b>	<b>.....</b>	<b>184</b>
<b>ANEXO A: CLASIFICACIÓN DE SUELOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN. ....</b>	<b>.....</b>	<b>185</b>
<b>ANEXO B: MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONSUMO INICIAL DE CENIZAS FBC .....</b>	<b>.....</b>	<b>192</b>
<b>ANEXO C: PROTOCOLO PARA LA REALIZACIÓN DE PROBETAS .....</b>	<b>.....</b>	<b>194</b>
<b>ANEXO D: PROTOCOLO PARA LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS .....</b>	<b>.....</b>	<b>200</b>
<b>ANEXO E: MEDICIÓN DEL CONTENIDO DE ETRINGITA EN SUELOS ESTABILIZADOS CON CENIZAS FBC.....</b>	<b>.....</b>	<b>206</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA V-1: COMPOSICIÓN QUÍMICA CENIZAS VOLANTES-CEMENTO	53
TABLA VI-1: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS CENIZAS FBC V/S CENIZAS VOLANTES CLASE C Y F	63
TABLA VI-2: PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS CENIZAS FBC	64
TABLA VI-3: FRACCIONES IDENTIFICADAS EN LOS SUELOS DEL COLORADO, USA (LITTLE 2007).	76
TABLA VI-4: CONCENTRACIÓN DE SULFATOS SOLUBLES AL AGUA MEDIDOS CON TEX-145E.	77
TABLA VI-5: COMPARACIÓN DE ÍNDICES DE SUELOS ESTABILIZADOS CON CENIZAS FBC (HOPKINS, 1995)	82
TABLA VII-1: MATRIZ EXPERIMENTAL CONSUMO INICIAL DE CENIZAS.	100
TABLA VII-2: MATRIZ EXPERIMENTAL CONTENIDO DE SULFATOS.	101
TABLA VII-3: MATRIZ EXPERIMENTAL DOSIFICACIÓN.	107
TABLA VII-4: ENSAYOS REALIZADOS POR PORCENTAJE DE SUELO.	108
TABLA VII-5: MATRIZ EXPERIMENTAL DE TIEMPO DE MADURACIÓN Y AGUA ADICIONAL ÓPTIMA EN EL RANGO MAYOR DE CONTENIDO SULFATOS.	109
TABLA VII-6: MATRIZ EXPERIMENTAL DE TIEMPO DE MADURACIÓN ÓPTIMO.	109
TABLA VII-7: MATRIZ EXPERIMENTAL DOBLE ESTABILIZACIÓN.	110
TABLA VII-8: MATRIZ EXPERIMENTAL ESTABILIZACIÓN CON ADICIÓN DE MATERIAL GRANULAR.	110
TABLA VII-9: MATRIZ EXPERIMENTAL VARIACIÓN DE IP.	111
TABLA VII-10: MATRIZ EXPERIMENTAL % DE ABSORCIÓN.	112
TABLA VIII-1: ANÁLISIS QUÍMICO DE CENIZAS FBC UTILIZADAS EN EL ESTUDIO.	114
TABLA VIII-2: GRANULOMETRÍA LAS MUESTRAS.	114
TABLA VIII-3: DETERMINACIÓN DE ESPECIES CRISTALINAS DE LAS MUESTRAS.	115
TABLA VIII-4: ANÁLISIS DE CAL LIBRE.	115
TABLA VIII-5: PÉRDIDA DE PESO POR CALCINACIÓN.	115
TABLA VIII-6: RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS ENSAYADOS.	117
TABLA VIII-7: PROPIEDADES DE LA MEZCLAS.	119
TABLA VIII-8: RESULTADOS CONTENIDO DE SULFATOS Y ALÚMINA.	124
TABLA VIII-9: CONCLUSIÓN DE CORRELACIÓN.	141
TABLA VIII-10: RESULTADO UCS E ÍNDICE DE EXPANSIÓN PROBETAS MADURADAS 1 DÍA.	142
TABLA VIII-11: RESULTADOS UCS E ÍNDICE DE EXPANSIÓN PROBETAS MADURADAS 2 DÍAS.	142
TABLA VIII-12: % ABSORCIÓN DE AGUA.	171

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA I-1: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....	5
FIGURA II-1: CAMIÓN TÍPICO DE TRANSPORTE FORESTAL .....	14
FIGURA II-2: VARIABILIDAD EN LOS TIPOS DE SUELO .....	15
FIGURA II-3: DEFORMACIÓN ASOCIADA A PROBLEMAS DE SUBRASANTE .....	17
FIGURA II-4: HETEROGENEIDAD DEL MATERIAL DE BASE .....	18
FIGURA II-5: SECCIÓN TRANSVERSAL QUE REQUIERE MANTENIMIENTO .....	19
FIGURA II-6: PROBLEMA DE DRENAJE MENOR.....	20
FIGURA III-1: CURVA TÍPICA HUMEDAD-DENSIDAD SECA PARA UN SUELO DADO Y UNA DETERMINADA ENERGÍA DE COMPACTACIÓN.....	26
FIGURA III-2: VARIACIÓN DE LOS VALORES DE KYC <sub>BR</sub> V/S EXPANSIÓN PARA PROBETAS SATURADAS Y NO SATURADAS EN SUELOS DE KENTUCKY. ....	31
FIGURA V-1: EFECTO DEL CONTENIDO DE CAL SOBRE LA PLASTICIDAD DE LA ARCILLA LONDRES.....	44
FIGURA V-2: GRÁFICOS TENSIÓN V/S DEFORMACIÓN DE MEZCLAS TRATADAS CON CAL Y MEZCLAS SIN TRATAR (HOPKINS ET AL, 1995) .....	45
FIGURA V-3: GRÁFICO PARA LA SELECCIÓN DE ESTABILIZADORES TRADICIONALES DE ACUERDO AL TIPO DE SUELO.....	58
FIGURA VI-1: PLANTA DE COMBUSTIÓN DE LECHO FLUIDO .....	62
FIGURA VI-2: CURVA GRANULOMÉTRICA CENIZAS FBC.....	64
FIGURA VI-3: CRISTALES DE ETRINGITA. ....	66
FIGURA VI-4: ESTRUCTURA CRISTALINA DE LA ETRINGITA (MOORE ET AL, 1970): (A) PARTE DE UNA COLUMNA EN PROYECCIÓN. (B) PROYECCIÓN DEL PLANO AB. ....	67
FIGURA VI-5: GRÁFICO DE LA DEFORMACIÓN VERTICAL V/S EL LOGARITMO DEL TIEMPO DE LAS MUESTRAS ESTABILIZADAS CON CENIZAS FBC (HOPKINS, 1995).....	68
FIGURA VI-6: VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE REACCIÓN DE FORMACIÓN DE ETRINGITA V/S EL TIEMPO PARA (A) ETRINGITA ARTIFICIAL Y (B) SUELO ESTABILIZADO CON CAL.....	72
FIGURA VI-7: COMPARACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ETRINGITA Y LOS CAMBIOS DE VOLÚMENES (LITTLE, 2009) .....	75
FIGURA VI-8: SENSIBILIDAD DE LOS SUELOS DE COLORADO PARA FORMAR ETRINGITA CADA VEZ CON MÁS CANTIDAD DE SULFATOS SOLUBLES.....	78
FIGURA VI-9: ROL DE LA CONCENTRACIÓN DE SULFATOS PARA UNA MEZCLA DE 0,12 MOLES DE CALCIO... 80	
FIGURA VI-10: ROL DE LA CONCENTRACIÓN DE CALCIO HIDRATADO, EN UNA MEZCLA DE 0,04 ALÚMINA Y 0,06 MOLES DE SULFATO. ....	80

FIGURA VI-11: LAYOUT TRAMO DE PRUEBA KY-11. (HOPKINS, 1995).....	84
FIGURA VI-12: MÁXIMAS EXPANSIONES MEDIDAS ENTRE OCTUBRE 1987 Y AGOSTO 1988 (HOPKINS, 1995) .....	85
FIGURA VI-13: CBR EVALUADO EN TERRENO POR 6 AÑOS (HOPKINS, 1995).....	86
FIGURA VI-14: TEST DE PERCENTIL MAYOR EN FUNCIÓN DE LOS CBR MEDIDOS EN TERRENO (HOPKINS, 1995).....	87
FIGURA VI-15: TRAMOS DE ECOBEL DESPUÉS DE 8 MESES DE FUNCIONAMIENTO EN TEMPORADA LLUVIOSA. .....	89
FIGURA VII-1: RESULTADOS UCS PROBETAS CURADAS A 40°C EN HORNO. ....	104
FIGURA VII-2: TASA DE RESISTENCIA RETENIDA PROBETAS CURADAS A 40°C EN HORNO. ....	104
FIGURA VIII-1: ENSAYO <i>EADES AND GRIMM</i> - SUELOS ARAUCO. ....	120
FIGURA VIII-2: ENSAYO <i>EADES AND GRIMM</i> - SUELOS MININCO. ....	121
FIGURA VIII-3: ENSAYO <i>EADES AND GRIMM</i> - SUELOS ENAP. ....	122
FIGURA VIII-4: ENSAYO <i>EADES AND GRIMM</i> – ECOBEL.....	123
FIGURA VIII-5: UCS PARCELAS CABRERAS 54-A. ....	125
FIGURA VIII-6: EXPANSIÓN PARCELAS CABRERAS 54-A. ....	126
FIGURA VIII-7: TRR PARCELAS CABRERAS 54-A. ....	126
FIGURA VIII-8: UCS PARCELAS CABRERAS 1-B. ....	128
FIGURA VIII-9: EXPANSIÓN PARCELAS CABRERAS 1-B.....	128
FIGURA VIII-10: TRR PARCELAS CABRERAS 1-B. ....	129
FIGURA VIII-11: UCS PEÑABLANCA. ....	130
FIGURA VIII-12: EXPANSIÓN PEÑABLANCA. ....	130
FIGURA VIII-13: TRR PEÑABLANCA. ....	131
FIGURA VIII-14: UCS POZO 7. ....	132
FIGURA VIII-15: EXPANSIÓN POZO 7.....	132
FIGURA VIII-16: TRR POZO 7. ....	133
FIGURA VIII-17: UCS POZO 21. ....	134
FIGURA VIII-18: EXPANSIÓN POZO 21.....	134
FIGURA VIII-19: TRR POZO 21. ....	135
FIGURA VIII-20: UCS ECOBEL. ....	136
FIGURA VIII-21: EXPANSIÓN ECOBEL. ....	136
FIGURA VIII-22: TRR ECOBEL. ....	137
FIGURA VIII-23: UCS SUELOS ARAUCO.....	138
FIGURA VIII-24: EXPANSIÓN SUELOS ARAUCO. ....	139

FIGURA VIII-25: CORRELACIÓN IE V/S CANTIDAD DE ETRINGITA.....	140
FIGURA VIII-26: AGUA ADICIONAL V/S % ADICIONAL DE AGUA - 1 DÍA DE MADURACIÓN.....	143
FIGURA VIII-27: AGUA ADICIONAL V/S % ADICIONAL DE AGUA - 2 DÍAS DE MADURACIÓN.....	144
FIGURA VIII-28 : UCS - 1 DÍA MADURADO – 10% FBC - PC 54-A.....	145
FIGURA VIII-29: UCS - 1 DÍA MADURADO – 20% FBC - PC 54-A.....	145
FIGURA VIII-30: UCS - 2 DÍA MADURADO – 10% FBC - PC 54-A.....	146
FIGURA VIII-31: UCS - 1 DÍA MADURADO – 20% FBC - PC 54-A.....	146
FIGURA VIII-32: IE V/S MADURACIÓN - 10% FBC- PC 54-A.....	148
FIGURA VIII-33: IE V/S MADURACIÓN - 20% FBC- PC 54-A.....	148
FIGURA VIII-34: IE V/S MADURACIÓN - 8% FBC- PC 1-B.....	149
FIGURA VIII-35: IE V/S MADURACIÓN - 5% FBC- PC 1-B.....	150
FIGURA VIII-36: IE V/S MADURACIÓN - 15% FBC- ECOBEL.....	151
FIGURA VIII-37: IE V/S MADURACIÓN - 20% FBC- ECOBEL.....	151
FIGURA VIII-38: RESISTENCIA UCS V/S MADURACIÓN - 10% FBC - PC 54-A.....	153
FIGURA VIII-39: RESISTENCIA UCS V/S MADURACIÓN - 20% FBC - PC 54-A.....	154
FIGURA VIII-40: RESISTENCIA UCS V/S MADURACIÓN - 8% FBC - PC 1-B.....	155
FIGURA VIII-41: RESISTENCIA UCS V/S MADURACIÓN - 5% FBC - PC 1-B.....	156
FIGURA VIII-42: RESISTENCIA UCS V/S MADURACIÓN - 15% FBC - ECOBEL.....	157
FIGURA VIII-43: RESISTENCIA UCS V/S MADURACIÓN - 20% FBC - ECOBEL.....	158
FIGURA VIII-44: VARIACIÓN DEL IE POR LA APLICACIÓN DE DOBLE ESTABILIZACIÓN - 10% CENIZAS FBC – 0% AGUA ADICIONAL - PC 54-A.....	160
FIGURA VIII-45: VARIACIÓN DEL IE POR LA APLICACIÓN DE DOBLE ESTABILIZACIÓN - 10% CENIZAS FBC – 3% AGUA ADICIONAL - PC 54-A.....	161
FIGURA VIII-46: VARIACIÓN DEL IE POR LA APLICACIÓN DE DOBLE ESTABILIZACIÓN - 10% CENIZAS FBC – 0% AGUA ADICIONAL - ECOBEL.....	162
FIGURA VIII-47: VARIACIÓN DEL IE POR LA APLICACIÓN DE DOBLE ESTABILIZACIÓN - 10% CENIZAS FBC – 3% AGUA ADICIONAL - ECOBEL.....	163
FIGURA VIII-48: DOBLE ESTABILIZACIÓN -10% FBC - 0% AGUA ADICIONAL - PC 54-A.....	164
FIGURA VIII-49: DOBLE ESTABILIZACIÓN -10% FBC - 3% AGUA ADICIONAL - PC 54-A.....	164
FIGURA VIII-50: TRR DOBLE ESTABILIZACIÓN PC 54-A.....	165
FIGURA VIII-51: DOBLE ESTABILIZACIÓN -10% FBC - 0% AGUA ADICIONAL - ECOBEL.....	166
FIGURA VIII-52: DOBLE ESTABILIZACIÓN -10% FBC - 3% AGUA ADICIONAL - ECOBEL.....	167
FIGURA VIII-53: TRR DOBLE ESTABILIZACIÓN ECOBEL.....	167

FIGURA VIII-54: UCS DOBLE ESTABILIZACIÓN CON MAT. GRANULAR - 10% FBC + 20% MG - PC 54-A. .....	168
FIGURA VIII-55: VARIACIÓN IP - PC 54-A. ....	169
FIGURA VIII-56: VARIACIÓN IP - ECOBEL. ....	170
FIGURA VIII-57: GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE LOS % DE ABSORCIÓN DE AGUA .....	171

## RESUMEN

Esta investigación presenta los resultados de la segunda fase de un proyecto que estudia la aplicación de las cenizas de combustión de lecho fluido (FBC) en la estabilización de suelos en caminos forestales. Estas cenizas se producen a partir de la combustión de coque de petróleo y caliza en una caldera de lecho fluido perteneciente a una planta de generación de energía eléctrica. La ceniza FBC es diferente a las cenizas volantes convencionales debido a su particular composición química. La reacción producida con la adición de cenizas FBC al suelo es diferente según el tipo de suelo que se estabilice. Dos tipos de respuestas han sido identificadas claramente. El primer tipo corresponde a suelos cuyas propiedades físicas y mecánicas se mejoró considerablemente con la adición de cenizas FBC. En esta clasificación se encuentran las bases granulares, por ejemplo. El segundo tipo de respuesta corresponde a los suelos cuyas propiedades físicas y mecánicas se mejoró en cierta medida. Sin embargo, si la dosis de ceniza FBC se encuentra por encima de un "x" porcentaje, el suelo puede presentar comportamiento expansivo, produciendo un efecto adverso.

El trabajo de investigación examina los diferentes procedimientos a seguir para mejorar el rendimiento del segundo tipo de suelos, con el fin de hacer factible su aplicación en los caminos forestales, ya que presentan este tipo de suelos, y considerando que las cenizas FBC son un residuo que se genera y acumula diariamente en botaderos.

## **ABSTRACT**

The research presents the results of the second phase of a project that studies the applications of Fluid Bed Combustion (FBC) ash in soil stabilization with particular application to forest roads. This material is produced from the combustion of petroleum coke and limestone in a fluidized bed boiler plant belonging to an electric power generation. FBC ash is different from conventional fly ash due to its particular chemical composition. Two types of applications have been identified based on different types of soils which react differently with the addition of FBC ash. The first type application corresponds to those soils whose physical and mechanical properties are improved to a certain extent with the addition of FBC ash and may be used as an improved base course or an improved gravel road. The second type of application corresponds to those soils whose physical and mechanical properties are improved to a certain extent, but above an “x” percentage of FBC ash addition, they may swell and produce an adverse effect. The research work examines different procedures to further improve the performance of the second types of soils in order to make feasible its application on secondary type of forest roads.

## **I INTRODUCCIÓN**

### **I.1 Antecedentes Generales**

Desde los últimos 15 años el sector forestal ha presentado un crecimiento importante en la economía chilena llegando a ser 3.3% del producto interno bruto (PIB). Este crecimiento se ha reflejado en una importante evolución tecnológica de cada uno de los procesos de la industria y en un incremento importante de las áreas de plantación forestal, y como consecuencia de esto un aumento significativo de la red de caminos. Sin embargo, a pesar del crecimiento y desarrollo tecnológico del sector, la red de caminos forestales no ha tenido la misma evolución tecnológica, y su construcción y mantenimiento continúa siendo realizado con técnicas tradicionales.

Gran parte de la red de caminos forestales son de grava o de tierra por cual la gestión de administración presenta problemas típicos asociados a caminos no pavimentados tales como: mayores costos de mantenimiento y operación, menores estándares de seguridad, alta emisión de polvo y problemas de transitabilidad en temporada de lluvias. Por otra parte los caminos forestales en Chile, en muchos casos por su localización geográfica, presentan condiciones particulares que los diferencian de otros caminos no pavimentados, entre estos: periodo de vida útil relativamente corto, operación concentrada de camiones y equipos de carga, en algunos casos geometrías de diseño extremas (pendientes y radios de curvatura), operación en condiciones climáticas de mucha lluvia y escasez o mayores costos para obtener materiales adecuados para la construcción de capas estructurales y de rodado.

Una de las soluciones de ingeniería que se experimenta con alta frecuencia, para enfrentar la problemática descrita es el uso de materiales especiales para la estabilización físico-química de los suelos que componen la estructura de pavimentos. Existen diversas técnicas constructivas que permiten construir y operar caminos de tierra sin la necesidad de llevar a cabo soluciones de pavimentación tradicionales.

La estabilización físico-química es una de ellas y consiste en mejorar las propiedades físicas y/o mecánicas del suelo mediante la adición de un producto químico, de manera de producir un cambio en las propiedades moleculares superficiales de las partículas de suelo y/o la adherencia entre ellos (Thenoux, 2006). Los agentes estabilizadores químicos “tradicionales” son el asfalto, la cal y el cemento, los cuales son ampliamente usados en el mundo, y sobre los cuales existen normas y procedimientos establecidos. Además, existe una amplia variedad de productos o subproductos derivados de diferentes procesos industriales y productos obtenidos de depósitos naturales, los cuales son utilizados a una escala significativamente menor que los estabilizadores químicos tradicionales. En el presente estudio se investiga el uso de cenizas de Caldera de Lecho Fluido debido a que en una de las principales regiones forestales de Chile, opera una central termoeléctrica la cual produce un importante volumen de desecho de este tipo particular de cenizas.

La Combustión de Lecho Fluido (FBC: Fluidized Bed Combustion) es una tecnología que permite utilizar carbón con alto contenido de azufre en la generación de energía eléctrica. Para minimizar las emisiones de SO<sub>x</sub> que produce este tipo de combustibles, se adiciona un elemento para la desulfurización de los gases de combustión, por ejemplo, caliza. La caliza introducida en la caldera captura el azufre presente en el carbón y así reduce la contaminación ambiental (emisión de SO<sub>x</sub>). En Chile, la empresa ENAP Refinerías Bío-Bío opera una planta cogeneradora de energía eléctrica, que utiliza la tecnología de Combustión de Lecho Fluido (FBC). Esta operación genera cada día entre 60 y 80 toneladas de ceniza, las cuales son almacenadas y transportadas a depósitos autorizados.

Las cenizas de calderas de lecho fluido, o cenizas FBC, se diferencian de las cenizas volantes tradicionales, principalmente por su bajo contenido de compuestos puzolánicos (sílice y alúmina) y su alto contenido de cal y sulfatos. Dado a este alto contenido de cal, este desecho industrial ha sido utilizado internacionalmente como estabilizador químico de caminos, obteniendo resultados dispares: en los suelos granulares reacciona positivamente aumentando la resistencia de éste, sin embargo, en los suelos arcillosos se producen reacciones expansivas al generar sulfatos de calcio hidratados, especialmente etringita. La formación de estos minerales luego de la compactación, puede terminar con

un levantamiento del pavimento provocando la pérdida de resistencia de éstos (Puppala, Intharasombat y Vempati (2005).

## **I.2 Hipótesis de Trabajo**

En el año 2006, el Centro de Ingeniería e Investigación Vial de la Universidad Católica de Chile llevó a cabo un estudio de la factibilidad técnica y económica de la utilización de las cenizas FBC como estabilizador en caminos forestales (Vargas, 2006). Los resultados de este estudio permitieron comprobar los beneficios del utilización de cenizas FBC en la estabilización materiales granulares y arenas, también se pudo comprobar que a pesar de que la ceniza FBC producía expansión en suelos arcillosos, era posible adoptar soluciones de estabilización que permitiera estabilizar suelos arcillosos controlando el problema de expansión.

En el marco de un proyecto INNOVA de CORFO, se plantea el desafío de utilizar las cenizas FBC como estabilizador de suelos forestales de origen arcilloso y se plantea la siguiente hipótesis: Es técnicamente factible la aplicación de cenizas FBC en la estabilización de suelos potencialmente expansivos, permitiendo así su uso en la construcción de caminos forestales.

## **I.3 Objetivos de la Investigación**

En concordancia con la hipótesis propuesta, el objetivo general propuesto para esta tesis es: “Investigar a nivel de laboratorio el comportamiento del material potencialmente expansivo estabilizado con cenizas FBC”.

Para cumplir este objetivo, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. Diseñar un procedimiento de laboratorio que permita identificar los suelos potencialmente expansivos.
2. Establecer una metodología de dosificación de laboratorio que permita determinar el óptimo de ceniza FBC para los suelos potencialmente expansivos.

3. Comprobar, a nivel de laboratorio, que la expansión de materiales potencialmente expansivos puede ser reducida introduciendo cambios en el proceso constructivo.

#### **I.4 Alcances de la Investigación**

Los resultados obtenidos a través de la presente investigación se limitan a los suelos forestales de la VIII Región de Chile y a las cenizas obtenidas de la planta co-generadora eléctrica Petropower ubicada en las instalaciones de ENAP Bío-Bío de la misma región.

#### **I.5 Metodología de la Investigación**

La investigación se llevó a cabo en 6 etapas, siguiendo el orden que se plantea en el diagrama de flujo de la Figura I-1.

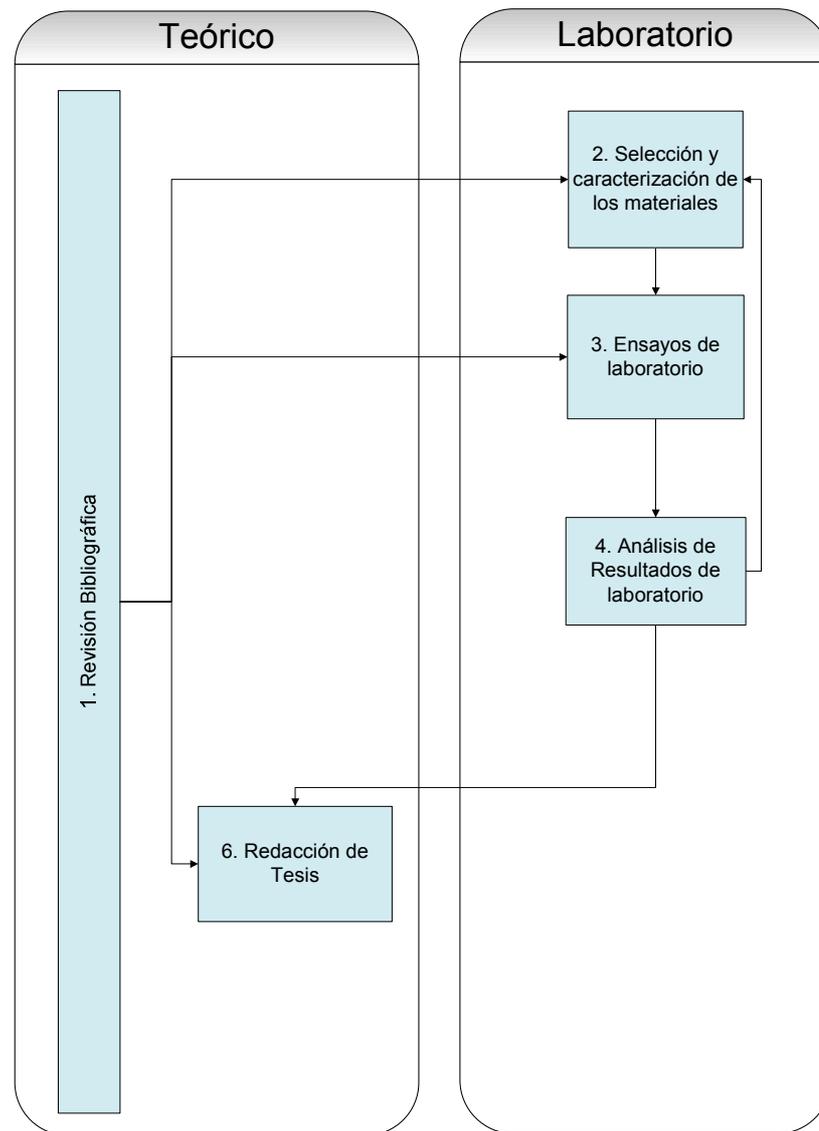


Figura I-1: Metodología de Investigación

A continuación se explica brevemente cada una de las etapas de la metodología de investigación.

#### Etapas 1: Revisión bibliográfica

En esta etapa se realizó una completa revisión bibliográfica de los métodos de estabilización existentes y en especial del estado del arte del uso de las cenizas FBC a

nivel internacional. Esta etapa se desarrolló durante toda la investigación en paralelo a las otras.

### Etapa 2: Selección y caracterización de los materiales

Se analizaron las características de las cenizas FBC para conocer mejor sus propiedades y determinar qué tipo de reacciones pueden producirse cuando se mezcla este material con algunos tipos de suelos. Los análisis realizados son los siguientes:

- Determinación de los principales compuestos químicos en la ceniza.
- Análisis de Cal Libre.
- Granulometría.
- Determinación de especies cristalinas (XRD).

También fueron analizados los suelos que se utilizaron para la investigación. A cada suelo se realizaron los siguientes ensayos:

- Clasificación de Suelos.
- Límites de Atterberg.
- Ensayo de CBR.
- Ensayo Proctor Modificado.
- Medición de pH.

### Etapa 3: Ensayos de Laboratorio

Durante la primera parte de esta etapa se analizó el protocolo de laboratorio propuesto por Vargas (2006), el cual se mejoró y complementó para los suelos potencialmente expansivos. El objetivo del nuevo protocolo es evaluar el efecto de la adición de las cenizas en ciertas características mecánicas del suelo, como su resistencia mecánica, estabilidad en condiciones saturadas y su potencial de expansión.

Se analizó el uso de la maduración de la mezcla para lograr la disminución de las expansiones.

Se realizaron pruebas de doble estabilización con cenizas FBC y con material granular, para evaluar así el desempeño de los materiales con tendencia a la expansión.

También dentro de esta etapa se analizó la variación de las propiedades físicas que determinan si el material al ser mezclado con cenizas se convierte en un material con mejor comportamiento ingenieril. Propiedades como Índice de Plasticidad y capacidad de absorción de la mezcla fueron medidas.

Para evaluar el desempeño de las mezclas se realizaron los siguientes ensayos:

- Ensayos de Resistencia Mecánica (Compresión no confinada, UCS).
- Ensayos de Estabilidad Volumétrica (Ensayo de Expansión).
- Ensayo de Estabilidad Bajo Agua.
- Ensayo de Medición de cantidad de etringita.

#### Etapa 4: Análisis de resultados de laboratorio

Durante esta etapa se verificaron las hipótesis a partir de los resultados de laboratorio.

#### Etapa 5: Redacción tesis

Finalmente, la tesis compila las principales etapas del estudio y entregando las principales conclusiones obtenidas durante el desarrollo de la investigación y recomendaciones para utilizar este producto como estabilizador de caminos.

## **I.6 Resultados Esperados**

Los principales resultados esperados de la investigación son:

- Mejora de las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas suelos-cenizas.
- Se espera determinar el tiempo de maduración óptimo de la mezcla para suelos con diferentes cantidades de sulfatos.
- Determinación del curado representativo de laboratorio de la mezcla.
- Desempeño positivo de las mezclas doblemente estabilizadas.

## **I.7 Estructura de la Tesis**

La tesis está compuesta de 10 Capítulos. El Capítulo I, corresponde a la introducción al tema, en él se plantean las hipótesis y los objetivos de la investigación, y se presenta la metodología de investigación desarrollada.

La revisión bibliográfica se abarca en el Capítulo II “Antecedentes Sobre las Redes de Caminos Forestales”, Capítulo III “Factores que Afectan el Comportamiento de una Subrasante de Suelo Arcilloso”, Capítulo IV “Métodos de Mejoramiento de la Subrasante” Capítulo V “Antecedentes sobre la Estabilización Química de la Subrasante” y en el Capítulo VI “Propiedades Generales de las Cenizas FBC y su Aplicación en la Estabilización de Caminos”

En el Capítulo VII se presenta el programa de laboratorio que se llevó a cabo

El Capítulo VIII presenta los resultados obtenidos y el análisis de éstos.

En el Capítulo IX se entrega la Metodología de Dosificación Propuesta, y por último se entregan las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones en el Capítulo X.

## **II ANTECEDENTES SOBRE LAS REDES DE CAMINOS FORESTALES**

### **II.1 Introducción**

Los caminos forestales son estructuras de ingeniería que deben servir esencialmente a las diversas faenas relacionadas directa e indirectamente al cultivo, protección y explotación del bosque. Y se pueden clasificar de la siguiente manera (“Caminos forestales”, 1998):

- Según su ubicación
  - Caminos de acceso.
  - Caminos interiores.
- Según su funcionalidad
  - Caminos de una vía.
  - Caminos de dos vías.
- Según su importancia
  - Caminos principales.
  - Caminos secundarios.

Los objetivos del uso de las redes de caminos existentes pueden ser muy diversos, en particular los de la red vial forestal, ya que se encuentra inserta dentro de un sistema de la operación mixta (público y forestal). Este sistema impone condiciones y restricciones técnicas y económicas diferentes a otro tipo de redes viales, ya que incluyen desde los caminos de penetración privados, hasta caminos comunales de uso público. Esta situación genera el empleo de diferentes criterios y estándares dentro de la administración de la misma red. Sin embargo, los principios de diseño, manejo de materiales y tecnologías de construcción son desde el punto de vista de la ingeniería los mismos, en otras palabras, las particularidades que puedan presentar los caminos forestales no justifican cambios sobre los principios básicos de la ingeniería de diseño, construcción, operación y mantenimiento.

## **II.2 Características de la Red de Caminos Forestales**

El escenario donde se desarrolla la actividad forestal genera una combinación de factores que desde la perspectiva de la gestión vial puede limitar la efectividad de los tipos de soluciones utilizadas. Convirtiéndose así en un desafío muy particular y diferente a los que plantea la gestión de redes viales públicas (rurales o urbanas).

Entre los factores más relevantes que describen el escenario de los caminos forestales cabe destacar:

- a) Gran tamaño de red: Una sola empresa forestal puede administrar más de 4.000 km de caminos. Además de la extensión de la red, ésta se encuentra parcelada e inserta dentro de la red comunal y regional administrada por la Dirección de Vialidad del MOP.
- b) Variabilidad de funciones y vida útil: Los diferentes segmentos de la red vial pueden cumplir funciones muy variadas y por ende están sometidas a diferentes intensidades de tráfico y cargas de tránsito. Por esta razón, el periodo de tiempo para el cual son diseñados puede variar desde unos pocos meses hasta más de 10 años. Esto último determina diferencias importantes en la asignación de recursos de ingeniería y como consecuencia una variabilidad importante de estándares de diseño, construcción y mantenimiento.
- c) Cargas de tránsito no controladas: Por la ubicación relativamente aislada de los caminos y los tipos de carga, se verifica un exceso de camiones con sobrecarga, ya que no existe ningún mecanismo de control.
- d) Clima: Los caminos forestales de las regiones Sexta a Novena se enfrentan a estaciones lluviosas y frías, con y sin nieve, lo cual no sólo afecta el desempeño de los caminos si no que limita los períodos de tiempo para llevar cabo la construcción y mantenimiento. Esto último representa un inconveniente mayor cuando algunos segmentos de la red forestal debe operar en temporada de invierno en forma continua.

- e) Topografía: En muchas situaciones el trazado de un camino forestal no puede obviar áreas con topografía extrema. En estos casos, los diseños geométricos del trazado superan las recomendaciones de diseño para pendientes, radios de curvatura, sección transversal, etc. Produciendo simultáneamente condiciones extremas para el diseño de sistemas de drenaje.
- f) Emplazamiento geográfico y tipos de suelo: La gran extensión de la red forestal encuentra una importante variabilidad en los tipos de suelo de fundación. A su vez y por las características particulares de suelos boscosos se encuentran suelos de sub-rasantes con baja capacidad de soporte como: limos, arcillas, maicillo arcilloso, etc.

### **II.3 Problemática de los Caminos Forestales**

Se analizará la problemática de los caminos forestales desde el punto de vista de la planificación, diseño, construcción y mantenimiento.

#### **II.3.1 Planificación y Diseño Geométrico**

La planificación del trazado de los caminos y canchas de acopio tiene origen en el proyecto de cosecha. Básicamente se trazan dos tipos de caminos: secundarios y troncales, más los accesos a caminos públicos. Los caminos secundarios y troncales serán utilizados únicamente por vehículos asociados a la explotación de los bosques, mientras que los caminos públicos tendrán tránsito mixto. Sin embargo, muchos caminos públicos que son parte a la vez parte de la red forestal podrán acumular durante los períodos de cosecha, hasta un 80% de su carga proyectada de diseño, en comparación con el camino en sus condiciones normales, lo que transforma a muchos caminos públicos en caminos netamente forestales.

El trazado de los caminos secundarios y troncales se realiza optimizando las distancias de transporte basado en la topografía del terreno. Se desconoce hasta qué nivel se consideran los diferentes factores que en zonas montañosas pueden impactar significativamente en la

funcionalidad tales como: costos de construcción, costos de conservación del camino, costos de operación del sistema de transporte.

Una vez planificado el trazado de los caminos de explotación se lleva a cabo el diseño geométrico. El diseño geométrico está principalmente enfocado al manejo de las pendientes, sección transversal y en segundo lugar al diseño de los radios de curvatura horizontal.

### **II.3.2 Diseño de Pavimentos**

Desde el punto de vista del diseño de pavimentos existen varias categorías de caminos, los cuales se organizan según su temporalidad y cantidad de carga a transportar. Según la temporalidad, los caminos pueden prestar servicio por periodos que van desde 6 meses a 10 años. Generalmente, dependiendo la importancia y la vida útil proyectada, estos pueden ser de tierra, grava, con o sin superficie de rodado pavimentada, o también pueden presentar alguna de las soluciones intermedia como la estabilización de algunas de sus capas. Según los volúmenes de carga a transportar debe considerarse que todos los caminos deben soportar los mismos niveles de cargas máximas, lo que de una forma u otra debería permitir establecer criterios mínimos de diseño.

Este análisis se realiza sobre la soluciones de grava, con capas de rodadura de bajo espesor, ya que son los paquetes estructurales más utilizados en los caminos forestales investigados (Mininco, Arauco, Celco, etc.).

#### **a) Criterios de Diseño de Estructuras de Pavimentos y Especificaciones:**

El diseño de pavimentos considera, en todos los casos, la construcción de una estructura superior sobre el suelo de subrasante con el objeto de permitir la circulación de vehículos en toda estación y evitando que la subrasante falle.

El criterio de falla adoptado para subrasante en caminos no forestales es la deformación máxima, principalmente para controlar la fatiga por deformación o tensión de las capas cementadas superiores que se construyan sobre ella. En cambio el método de diseño

utilizado por las empresas forestales es el AASHTO, que no determina un criterio de falla para la subrasante, por lo tanto no se puede determinar el grado de confiabilidad de este.

Con relación al diseño y especificación de la capa de grava, las formas de falla de las capas de grava rara vez son estructurales. La pérdida de funcionalidad de los caminos de grava ocurre más por el deterioro de la capa granular que por falla estructural de esta misma.

b) Vida Útil:

El criterio para determinar la vida útil del diseño estructural se basa en el volumen total de material a transportar por un determinado camino. Paralelamente se considera diseñar de modo que el valor económico residual del camino sea cero. Este último criterio ha creado un paradigma en el cual se cree que habría una pérdida económica si el camino sigue funcionando adecuadamente por un período más largo al período esperado de explotación.

Según Thenoux (2008),

El criterio de vida residual cero introduce un elemento negativo a la gestión de pavimentos. Primero, ningún método de diseño de pavimento se basa en un modelo que permita aplicar este concepto dado que de por medio existen muchas variables impredecibles y además el comportamiento de los modelos de diseño dependen fuertemente del programa de conservación asociado. Segundo, el criterio se basa en un diseño con “cero” confiabilidad. Cuando en proyectos de ingeniería se trabaja con “cero” confiabilidad se debe tener analizados los riesgos y costo asociados al 100% de factibilidad de no cumplir el período de diseño. Tercero, por experiencia se conoce que el costo mayor de un pavimento está en llevarlo a cabo es decir; materializarlo y mantenerlo, por lo cual variaciones pequeñas en espesores y/o calidad de las especificaciones no necesariamente se traducen en mayores costos. (p. 10).

c) Cargas de Diseño:

Existe un solo parámetro el cual afectará la vida útil de un pavimento desde su inicio hasta el final, la carga de tránsito. (Figura II-1).



Figura II-1: Camión típico de transporte forestal

Los datos de diseño consideran camiones cargados dentro de los límites legales y con esto se asume que la vida útil del pavimento se cumplirá a cabalidad. Durante el período de análisis se determinó que un porcentaje superior al 50% de los camiones circulan sobrecargados por los diferentes segmentos de la red y probablemente más del 80% de la red forestal se ve sometida a sobrecargas eventuales o regulares.

Los métodos de diseño determinan que el nivel de destrucción que produce un eje sobrecargado crece exponencialmente con los niveles de carga.

Sensibilizando los parámetros como: configuraciones y número de ejes, carga máxima por eje, presiones de neumático, entre otros, se puede llegar a recomendar el uso de diferentes estrategias de carga dependiendo del período del año (período de lluvia o período seco) y condiciones de diseño del pavimento. Este concepto se denomina “Racionalización del Uso de la Infraestructura” y permitiría contar con rangos de costos de operación y mantenimientos para los diferentes períodos del año y diferentes soluciones de pavimentos.

d) Estudio de Suelos de Fundación:

La gran extensión de la red forestal encuentra una importante variabilidad en los tipos de suelo de fundación. A su vez y por las características particulares de suelos boscosos se

encuentran suelos de subrasantes con baja capacidad de soporte (limos, arcillas, maicillo arcilloso, etc.). La variabilidad de los suelos se puede producir incluso en sectores muy locales (Figura II-2).



Figura II-2: Variabilidad en los tipos de suelo

e) Soluciones de Pavimentos:

El paquete estructural más utilizado por las empresas forestales en sus caminos, consta de una capa compactada de 20 a 30 cm. de espesor de grava chancada sobre una subrasante de baja capacidad de soporte. Esta es colocada cada vez que el camino presenta problemas de transitabilidad.

La experiencia internacional recomienda alternativas de diseño de pavimentos que incorporan mayor tecnología y mejores materiales, las cuales no necesariamente resultan más baratas que los diseños tradicionales, pero que sí otorgan mayor confiabilidad y durabilidad. Las alternativas de diseño consideran la estabilización de subrasantes y/o de suelos que no cumplan con las especificaciones de diseño (marginales) y también el uso de geotextiles.

f) Diseño de Sistema de Drenaje:

Gran parte del diseño de obras se realiza in-situ, de la observación directa de los problemas que se identifican a lo largo del trazado. Este es un aspecto del diseño el cual se recomienda que sea analizado en el futuro, de modo de llegar a ofrecer recomendaciones que puedan mejorar u optimizar las actuales prácticas. Para esto existe extensa literatura enfocada específicamente al problema de diseño y conservación de obras de drenaje.

### **II.3.3 Construcción**

Los procesos de construcción observados en los proyectos viales forestales no están ajenos a los mismos problemas que se detectan en la construcción en Chile. Sin embargo, en la construcción de caminos forestales se observan dos aspectos complementarios que gravitan negativamente en la calidad de la obra en general. Estos aspectos son: primero los proyectos se ejecutan empleando las tecnologías relativamente “básicas” de construcción y en algunos casos con un grado de artesanía importante y segundo, existe una mayor tolerancia (de mandantes, usuarios y comunidad) respecto de la calidad funcional de los proyectos y se han acostumbrado a desenvolverse dentro de estándares que perfectamente podrían ser superados. Ambos aspectos, cada vez que se discuten son minorizados (por los distintos entes), argumentando que el “statu quo” es lo más económico. Este argumento que se ha hecho muy fuerte en el tiempo, y representa en la actualidad un obstáculo en la búsqueda y experimentación de nuevas soluciones y estrategias.

El análisis de los problemas se presenta considerando las principales etapas del proceso constructivo de estabilización.

a) Compactación Subrasante:

La compactación de la subrasante tiene como por objeto aumentar la densidad del material de fundación y reducir la magnitud de la deformación resiliente una vez que la estructura ha sido entregada al tránsito. Una apropiada compactación de la subrasante es

importante para mejorar el comportamiento de los caminos de ripio sin embargo, para el caso de caminos de mayor estándar, la preparación y compactación de la subrasante, se considerada fundamental para evitar la falla de las capas superiores de pavimentos como lo son la capa de rodado y bases estabilizadas. Especial énfasis en este tipo de mejoramientos debe ser puesto en suelos de subrasante que presentan baja capacidad de soporte a densidad natural ( $\text{CBR} \leq 3\%$  a  $5\%$ ) y en sectores de construcción de obras de drenaje.

Las especificaciones que se utilizan para la preparación de subrasante así como los controles de recepción de estas, deben realizarse prolijamente para así asegurar el buen comportamiento de la capa, ya que una vez que la subrasante falla cuando el camino se encuentra en servicio, la pérdida involucra la estructura de pavimento completo. Especial énfasis se debe dar a las especificaciones para cuando se utilicen estructuras de pavimentos superiores.

La Figura II-3 presenta una deformación asociada a un problema de compactación o preparación de subrasante.



Figura II-3: Deformación asociada a problemas de subrasante

b) Calidad Material de Construcción:

En general, se observa que los materiales utilizados en las carpetas de los caminos forestales son de media a mala calidad en relación a los materiales utilizados en otros tipos de proyectos viales. Son denominados materiales marginales, sin embargo, pueden ser mejorados a través de diferentes técnicas de estabilización.

c) Homogeneidad de Capas Estructurales:

La calidad y el futuro desempeño de cualquier capa de material terminado depende directamente de la homogeneidad del material y construcción (Figura II-4). Homogeneidad, es el único objetivo de calidad que se debe buscar una vez escritas las especificaciones de cualquier tipo de material. El total de las fallas funcionales derivan de la calidad de los materiales utilizados y su homogeneidad.



Figura II-4: Heterogeneidad del material de base

d) Variabilidad en Espesores de Construcción:

Pese a que el control de espesores se realiza con control topográfico, se pudo comprobar que los espesores presentan variabilidad y esto generará fallas locales en la vía.

### II.3.4 Mantenimiento o Conservación

Los principales factores que deterioran el camino son, en orden de importancia: el tránsito pesado y sobrecargado, la calidad constructiva, y en zonas frías las lluvias y la nieve. Por causa individual o la combinación de estos efectos los caminos no pavimentados forestales pueden dejar de ser transitables por períodos relativamente extensos y luego requerirán de inversiones mayores para su rehabilitación.

El programa de conservación no debe estar diseñado para lidiar contra malas prácticas de transporte y/o baja calidad constructiva y/o diseño de drenajes inadecuados. El mantenimiento tiene por objetivo conservar las obras que por uso normal experimentan un deterioro progresivo. El programa de mantenimiento de caminos de grava y tierra en particular debiera enfocarse principalmente a:

a) Mantenimiento Sección Transversal:

Una sección transversal adecuada debe respetar anchos de pista e inclinaciones transversales mínimas, existencia de elementos de drenaje superficial, etc. La Figura II-5 presenta un camino con sección transversal impropia y que debiera ser corregido.



Figura II-5: Sección transversal que requiere mantenimiento

b) Mantenimiento Funcionalidad del Camino:

El mantenimiento de los diversos tipos de deterioro que afectan la funcionalidad del camino, considera la corrección de problemas que conllevan a la formación de: calaminas, deformaciones, baches, pérdida de material, otros. Parte de los deterioros funcionales que se presentan en los caminos de ripio se pueden evitar o extender su aparición en el tiempo si las obras se ejecutan a niveles superiores de calidad logrando la mayor homogeneidad de construcción y logrando controlar el exceso de sobrecargas.

c) Sistema de Drenaje:

Se observó que hasta los mejores proyectos de drenaje requieren ser mejorados in-situ después de las primeras lluvias. Por ejemplo, la Figura II-6, muestra un problema de drenaje de menor envergadura. También se debe corregir otro tipo de problemas como lo son: longitudes de escorrentías de aguas superficiales, velocidad de escorrentías laterales, etc.



Figura II-6: Problema de drenaje menor

d) Polvo:

Dado a que un porcentaje importante de los caminos forestales tiene capa de rodado con grava o tierra se recomienda con el mayor énfasis realizar estudios de aplicación de mitigadores de polvo. En particular el uso de Cloruro de Magnesio (Bischofita) que además de tener una comprobada efectividad, es un producto nacional el cual se encuentra certificado ambientalmente. De este modo logra una significativa reducción de la emisión de polvo en temporada de verano con un beneficio directo a las operaciones forestales y una contribución directa al medio ambiente y comunidad social aledaña.

Este análisis está orientado a identificar oportunidades para el desarrollo e implementación de nuevas medidas de gestión que permitan incorporar ahorros asociados al uso y explotación de la red de caminos forestales y en definitiva traspasar estos ahorros a los costos de producción forestal.

### **III FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE UNA SUBRASANTE DE SUELO ARCILLOSO**

La subrasante es la plataforma donde se apoya la supra-estructura del pavimento y puede llegar a ser la parte más débil de la estructura de un pavimento. El espesor que debe tener un pavimento, sea éste flexible o rígido, depende en gran parte de la calidad de la Subrasante. También la respuesta estructural de un pavimento como tensiones y deformaciones, está influenciada significativamente por la calidad de la subrasante.

Por otra parte tiene una gran influencia en las operaciones de construcción del pavimento y en la eficiencia del mismo. La subrasante con bajo poder de soporte induce problemas en la compactación de los materiales de base y/o subbase y no dan soporte adecuado para que las capas superiores alcancen una densidad adecuada.

Los tipos de subrasante en las cuales pueden quedar emplazados los caminos presentan características muy variables y dependen de la formación geológica que hayan tenido éstos. El suelo incluye desde mezclas bien definidas de unos pocos minerales hasta mezclas heterogéneas; con tamaños diversos como bloques o fragmentos de roca, gravas, arenas y arcillas y limos derivados de las rocas altamente meteorizadas, de planicies aluviales, depósitos glaciares, etc.

Las arcillas, a diferencia del material granular, arenas y limos, son suelos de baja calidad y bastante complejos si son utilizados como fundaciones de cualquier estructura, dada su alta plasticidad y poca permeabilidad. En la literatura se han registrado problemas con estos tipos de suelo, como por ejemplo, los suelos cercanos a la localidad de Kentucky (Hopkins, 1999), donde los pavimentos presentan generalmente fallas prematuras. Este mismo tipo de suelo existe en la mayoría de los predios forestales de la VIII y IX región de Chile, por lo que es muy importante analizarlos en profundidad.

Desde el punto de vista mineralógico el término “arcilla”, engloba a un grupo de minerales, filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y del tamaño del grano, el cual es muy fino (inferior a 2  $\mu\text{m}$ ). Las arcillas

son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, el producto final de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan.

Las variadas aplicaciones industriales de este grupo de minerales, tales como la construcción de tejas, ladrillos, tubos, entre otros, y también el uso de la bentonita como lodo de moldeo o de perforación, radican en sus propiedades físico-químicas. Dichas propiedades derivan principalmente de: su extremadamente pequeño tamaño de partícula; su morfología laminar (filosilicatos); las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de cargas eléctricas en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, las arcillas, presentan una gran área superficial y, con esto una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interactuar con muy diversas sustancias, en especial con compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hincharse, por el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas. Sin embargo, también son capaces de retraerse, esto se produce cuando el suelo tiende a contraerse debido a la reducción natural de humedad, pero esta contracción resulta restringida por las condiciones del contorno, de tal manera que las tensiones que impiden la contracción superan la resistencia a la tracción del suelo (Avila, 2004)

Por otra parte, la existencia de cargas eléctricas en las láminas se compensa con la entrada en el espacio interlaminar de cationes débilmente ligados y con estado variable de hidratación, que pueden ser intercambiados fácilmente mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes, a esta propiedad se la conoce como capacidad de intercambio catiónico y es también la base de multitud de aplicaciones industriales.

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar o

en los canales estructurales. La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad). Se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato). Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina. Las fuerzas que unen las diferentes unidades estructurales son más débiles que las existentes entre los iones de una misma lámina, por ese motivo los filosilicatos tienen una clara dirección de exfoliación, paralela a las láminas.

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento. Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los Índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo: sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso (García et al., 1999). La relación existente entre el Límite Líquido y el Índice de Plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los Límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

Son estas propiedades físicas de los suelos arcillosos las que controlan el comportamiento y funcionamiento mecánico de los pavimentos. Estos factores afectan la tensión de corte de los materiales, que son las impuestas por las cargas de tráfico, por lo tanto intervienen directamente al comportamiento de largo plazo que tendrá el pavimento. Algunas propiedades físicas importantes son:

a) Susceptibilidad a la Humedad

Es necesario tener en cuenta la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en lo que se refiere a la resistencia como a las eventuales variaciones de volumen. Los cambios de volumen en un suelo expansivo, pueden ocasionar graves daños a las estructuras que se apoyan sobre éste, por esta razón, al construir un pavimento hay que intentar al máximo controlar las variaciones volumétricas del mismo a causa de la humedad.

El método más utilizado para estabilizar suelos bien graduados es la compactación. Mediante la aplicación de energía mecánica se reducen los vacíos que se encuentran con aire en la masa de suelo para aumentar así su peso unitario. De esta forma se logra un aumento en la resistencia, la rigidez, una mejora en la estabilidad volumétrica y una disminución de la permeabilidad del suelo. Las especificaciones de compactación para subrasante requieren el valor de la máxima densidad seca y el contenido de humedad óptimo, datos que pueden ser obtenidos del Ensayo Proctor, por ejemplo: las especificaciones de la AASHTO T 99 o ASTM D 698, exigen que la compactación se realice al 95% del máximo de la densidad seca obtenida por los procedimientos estándar de laboratorio. Si se toman varias muestras de un cierto suelo, se les añade diferentes cantidades de agua y se procede a continuación a compactar cada una de ellas siguiendo un método normalizado de compactación, se podrá comprobar que la densidad seca alcanzada depende en cada caso de la humedad de compactación, tal como lo muestra la Figura III-1.

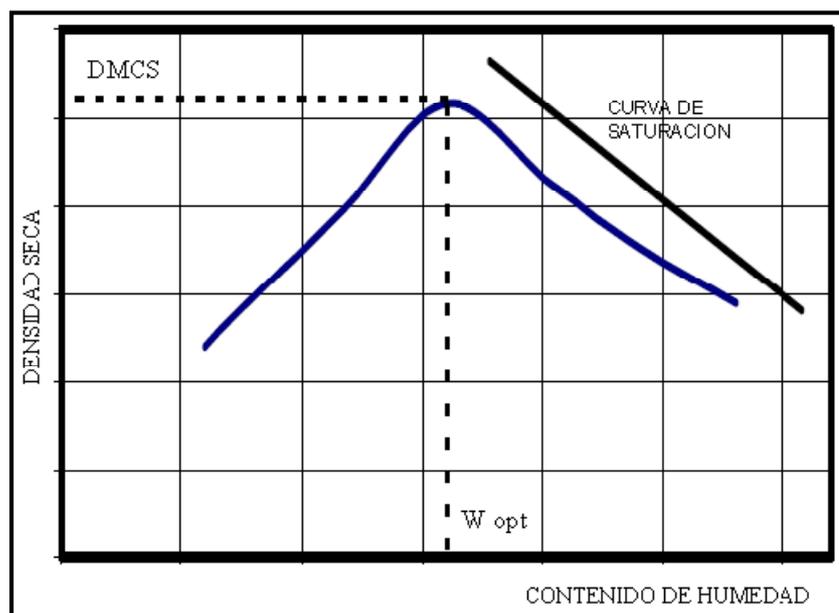


Figura III-1: Curva típica humedad-densidad seca para un suelo dado y una determinada energía de compactación.

El problema que surge en relación al contenido de humedad de la subrasante es que el contenido de humedad del suelo compactado sea mayor o menor al óptimo; en ambos casos la densidad seca alcanzada será menor a la requerida, para un mismo nivel de compactación. Este efecto puede ser explicado por el principio de tensiones de efectivas (Terzaghi, 1943), que en sus propios términos dice:

“Los esfuerzos en cualquier punto de una sección de una masa de suelo pueden calcularse de los esfuerzos principales totales  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  que actúan en ese punto.

Si los vacíos del suelo están llenos de agua con un esfuerzo  $\mu$ , los esfuerzos totales principales consisten de dos partes. Una parte,  $\mu$ , actúa en el agua y en el sólido en todas direcciones con igual intensidad. Se denomina presión de poros. La diferencia  $\sigma_1' = \sigma_1 - \mu$ ,  $\sigma_2' = \sigma_2 - \mu$ ,  $\sigma_3' = \sigma_3 - \mu$ ; representa un exceso sobre la presión de poros y ocurre exclusivamente en la fase sólida.”

Este principio es útil en la visualización del comportamiento mecánico de suelos sometido a cargas de tráfico.

El principio matemáticamente es el siguiente:

$$\tau = c' + \sigma_n' * \tan(\varphi') = c' + (\sigma_n - \mu) * \tan(\varphi') \quad (\text{III.1})$$

Donde:  $\tau$ : *Tensión de corte del suelo de subrasante*

$c'$ : *Cohesión efectiva del suelo*

$\sigma_n'$ : *Tensión normal efectiva.*

$\sigma_n$ : *Tensión normal total*

$\varphi'$ : *ángulo de fricción interno*

$\mu$ : *Presión total de poros*

El parámetro  $\sigma_n'$  depende de las tensiones inducidas por las cargas de tráfico, la rigidez del material y la presión de poros, mientras que la presión total de poros  $\mu$  que actúan en la subrasante, está compuesta por tres partes:

$$\mu = \mu_s + \mu_{ss} + \Delta\mu \quad (\text{III.2})$$

Donde:  $\mu_s$ : *Presión estática de poros*

$\mu_{ss}$ : *Presión debido al flujo*

$\Delta\mu$ : *Hidrostática o exceso de presión de poros debido*

*a el esfuerzo transmitido por el tráfico a la subrasante.*

La parte principal de la presión total de poros ( $\mu$ ) se produce por el exceso de presión de poros transmitido por el tráfico a la subrasante ( $\Delta\mu$ ), por lo tanto la ecuación (III.1) quedaría de la siguiente manera:

$$\tau = c' + (\sigma_n - \Delta\mu) * \tan(\varphi') \quad (\text{III.3})$$

Si  $\Delta\mu$  es grande las tensiones disminuyen notablemente. En suelos arcillosos, los cuales inicialmente tienen una cohesión ( $c'$ ) bastante alta, la subrasante se mantiene estable aunque  $\Delta\mu$  sea grande, por su alta permeabilidad. Sin embargo, cuando las arcillas se expanden las tensiones disminuyen debido a que la cohesión ( $c'$ ) decrece, esta condición

es conocida como “tensión de ablandamiento”. Por otro lado, las repetitivas cargas de tránsito también conseguirán una gradual merma de la cohesión, la cual acompañada de altos valores de  $\Delta\mu$  hacen que la tensión de corte o cizalle sea mínima o cercana a cero. Esta condición puede provocar el bombeo de partículas arcillosas a la base granular causando grietas y colapso de la estructura de pavimento.

Aunque la permeabilidad del limo y arena sea mayor que la de las arcillas, esta no es suficiente para disipar la presión de poros producida por las cargas de tráfico al instante. Por lo tanto, las presiones de poros pueden acumularse rápidamente, esta condición puede ocurrir incluso en bases granulares que contienen sólo un porcentaje pequeño de finos, instando a que estos se trasladen vertical y horizontalmente por las juntas de los pavimentos. El bombeo de finos puede observar en especial en las juntas de los pavimentos de hormigón.

Cuando la subrasante es estabilizada químicamente con cal o cemento, la cohesión aumenta en forma importante. Fuertes enlaces ligantes son creadas entre las partículas de suelo,

$$\tau = c'_{\alpha} + (\sigma_n - \Delta\mu) * \tan(\varphi_{\alpha}')$$

Ahora la cohesión ( $c'_{\alpha}$ ) es mucho mayor en un material estabilizado que en uno sin tratar ( $c'$ ). En la literatura (Hopkins, 1995) existe evidencia que demuestran que  $\varphi_{\alpha}'$  es levemente mayor a  $\varphi'$  entre 2 a 4 grados. Por lo tanto, aunque la presión de poros  $\Delta\mu$  sea cercano a  $\sigma_n$ , la componente ( $c'_{\alpha}$ ) puede ser lo suficientemente grande para prevenir la inestabilidad de la subrasante.

Normalmente se exige compactar en terreno con una humedad cercana al 80-85% de la humedad óptima. La magnitud de la presión de poros ( $\Delta\mu$ ) del suelo compactado va a depender de la permeabilidad y de la tensión aplicada por el compactador.

Diversos estudios (Traylor et al, 1976; cf. Thompson 1988; Liu et al, 1964; Knight, 1961) han demostrado que el contenido de humedad es el factor más importante que controla la tensión y la rigidez de los suelos finos.

Para poder alcanzar la resistencia requerida del pavimento en la construcción, a parte de la compactación mecánica, es posible considerar estabilizadores químicos como: cal hidratada, cemento, cenizas volantes, entre otros. Además de mejorar la resistencia de un suelo la estabilización química puede lograr otros beneficios (Terrel, et al 1979):

- Mayores velocidades de construcción.
- Aumenta rigidez de los suelos estabilizados.
- Disminuye potencial expansión de los suelos.
- Aumenta la durabilidad de la carpeta estabilizada.
- Mejora sustancialmente los suelos marginales que no poseen propiedades ingenieriles útiles para caminos.

Es conocido que el enemigo principal de los pavimentos es el agua, y para los materiales estabilizados no es la excepción. Si durante el periodo de construcción la subrasante está expuesta a lluvia y a nieve, esta será absorbida como agua fácilmente, aumentando de esta forma su contenido de humedad y volumen, llegando a estar saturada sobre su 100%.

Tanto la cohesión ( $c'_\alpha$ ) como el ángulo de fricción ( $\varphi'_\alpha$ ) decrecen, y con esto la tensión de corte también disminuye. Es más, si el camino es transitado en época de lluvia, las presiones de poro ( $\Delta\mu$ ) aumentan, disminuyendo más aún la tensión de corte. Esta situación ocurre con frecuencia cuando los suelos arcillosos siguen expuestos al agua durante el invierno, o cuando las fuertes lluvias (y/o la nieve derretida) se producen antes de la colocación del pavimento.

#### b) Compactación

Generalmente, muchos ingenieros piensan que si la subrasante de origen arcilloso es compactada al 95% de la máxima densidad seca y cerca del contenido óptimo de humedad, el pavimento no sufrirá problemas en el futuro, pero esa condición sólo es cierta en algunos casos puntuales.

La compactación incrementa la resistencia al corte de los suelos. A medida que el grado de compactación aumenta, la cohesión y ángulo de fricción interna también (Hopkins, 1980).

Cuando materiales finos bien graduados, como arcillas y arenas, son compactados en la subrasante se alcanzan densidades cercanas al 80-85% de la máxima densidad seca. Si las cargas de tráfico aplicadas son lo suficientemente altas, y el tamaño de las tensiones inducidas también, sucede que la subrasante de grano fino disminuye su volumen o se comprime, con esto el grado de saturación (porcentaje de volumen de agua, respecto al volumen de huecos) aumenta alcanzando hasta un 100%. Cuando esto ocurre la presión de poros ( $\Delta\mu$ ) aumenta dramáticamente, con esto la tensión de soporte disminuye, ya que el término  $(\sigma_n - \Delta\mu) * \tan(\varphi')$  decrece, llegando hasta ser igual a cero y bajo un ciclo de cargas repetidas la subrasante fallará.

#### c) Potencial Expansión

Como se ha mencionado, los suelos de grano fino, en especial las arcillas, tienen mucho potencial para absorber agua. La absorción de agua en el espacio interlaminar de las partículas arcillosas, tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras (García, Suarez, 1999), esto conlleva a una disminución de tensiones porque se merma la cohesión y levemente el ángulo de fricción del suelo.

El efecto de la expansión en la capacidad de soporte queda ilustrado en la Figura III-2, el cual investigado y analizado por Hopkins entre los años 1983 y 1988, y muestra la ligera tendencia en las muestras no saturadas a aumentar de capacidad de soporte cuando existe mayor deformación unitaria. Contrario es el caso de las probetas saturadas, las cuales disminuyen notablemente su resistencia al aumentar la deformación vertical unitaria. Cuando la deformación unitaria es alrededor de tres el KYCBR (Ensayo CBR según el

procedimiento utilizado en el estado de Kentucky, USA<sup>1</sup>) es 10; cuando es cercana a cuatro el KYCBR disminuye a 6,5.

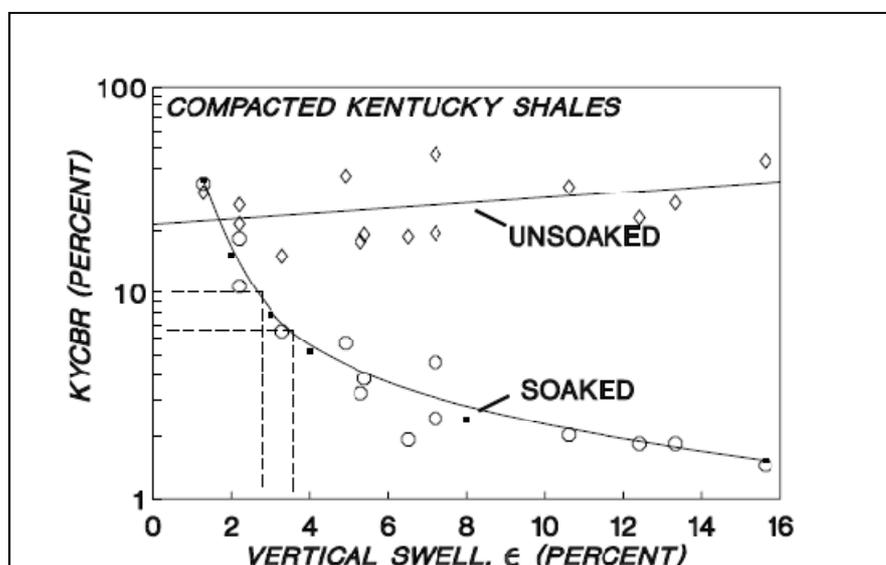


Figura III-2: Variación de los valores de KYCBR v/s Expansión para probetas saturadas y no saturadas en suelos de Kentucky.

Cuando la subrasante arcillosa compactada absorbe agua, el grado de saturación es cercano al 100%, y si la fuente de agua es constante el suelo se satura completamente y la tensión de corte se reduce de dos maneras: primero, como el suelo se hincha el volumen aumenta a medida que el contenido de humedad aumenta por esta razón la fuerza de cohesión disminuye junto con el ángulo de fricción interno. En segundo lugar, cuando las cargas de tráfico son lo suficientemente grandes el exceso de presiones de poros reduce aún más la tensión.

Como se pudo analizar los suelos arcillosos son altamente variables y sus propiedades de cambiarán con el tiempo y a lo largo del proyecto. Sin embargo, una subrasante arcillosa

---

<sup>1</sup> CBR-KYCBR las muestras se realizaron basados en el protocolo de KM-64-501-95 (Métodos de Kentucky, 1995).

puede ser mejorada mediante algún proceso de estabilización mecánica o estabilización físico-química con aditivos como el cemento Portland, cal o asfalto, entre otros. El propósito de la estabilización de caminos es mejorar el comportamiento mecánico y físico de las distintas capas granulares que lo conforman, y permite modificar ciertas propiedades del suelo con la finalidad de que resista mejor la acción de agentes externos, tales como agua, viento y el tránsito.

En el siguiente capítulo analizaremos los diferentes métodos que existen de mejoramiento de la subrasante.

#### IV MÉTODOS DE MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE

La estabilización es “el proceso de combinar y mezclar materiales con un suelo para mejorar ciertas propiedades de éste” (US Army, 1994). El proceso puede incluir la combinación de distintos suelos para alcanzar una granulometría en particular o la mezcla de aditivos químicos que son capaces de alterar la distribución de partículas, la textura o la plasticidad de un suelo, o que pueden actuar como ligante para la cementación del suelo.

Actualmente existen varias razones que nos debiera alentar a un mayor uso de los suelos estabilizados (Kraemer, 2001).

- Existe una demanda social cada vez más fuerte por un transporte vía terrestre de calidad, dado el incremento contante del tráfico pesado, cuyo crecimiento e intensidad no ha alcanzado aún techo. Esto requiere una mayor durabilidad de los materiales y estructuras de firme. Las intervenciones para el mantenimiento y rehabilitación de las infraestructuras deben reducirse aún más, y en general dedicarse a asegurar la funcionalidad de la supraestructura, es decir, a restaurar sólo las características funcionales, ya que cada intervención lleva consigo el cierre temporal de la pista y con esto una baja en el nivel de serviciabilidad prestado por la vía. La estabilidad del cimiento debe estar garantizada a largo plazo resguardando problemas relacionados con el drenaje, post-compactaciones diferenciales, etc.
- La protección del medio ambiente impone grandes limitaciones a empréstitos y vertederos, lo que significa un empleo en los rellenos prioritario de suelos y rocas locales procedentes de los desmontes, buscando un equilibrio del movimiento de tierras. Por otra parte, hay una presión creciente para la utilización de subproductos industriales, desechos mineros, suelos contaminados, etc.
- Una reducción del espesor total de pavimento, sin merma de su durabilidad, contribuye a un ahorro de áridos de calidad y del ligante necesario.

- El costo actual del combustible, se traduce en un encarecimiento del transporte terrestre. En muchos casos, el aprovechamiento de los suelos locales mediante estabilización compensa el costo del producto estabilizador.
- La economía de la ejecución requiere unos plazos lo más reducidos posibles, es decir, elevados rendimientos de la maquinaria y del procedimiento constructivo. Las explanadas deben poder abrirse lo antes posible al tráfico de obra, sin erosiones superficiales y manteniendo una buena regularidad y nivelación.

El propósito de la estabilización de suelos para caminos es mejorar el comportamiento mecánico y físico de las distintas capas granulares que lo conforman, tales como bases o subbases, carpetas de rodado, y subrasante. Junto con esto, es posible mejorar la resistencia del suelo estabilizado frente a la acción del agua y las cargas de tránsito.

Existen dos vías para estabilizar un suelo: estabilización mecánica y estabilización química.

#### a) Estabilización Mecánica

La estabilización mecánica es un proceso que permite mejorar las propiedades físicas y mecánicas de un suelo sin la adición de materiales externos, mediante tres procedimientos: compactación, mezcla de diferentes tipos de suelo, y el uso de refuerzos manufacturados, tales como los geotextiles.

- Compactación

La compactación de un suelo consiste en el proceso de densificación, mediante el cual las partículas de suelo son acomodadas de manera tal de reducir los vacíos de aire contenidos en la masa de suelo, aumentando la fricción entre las partículas y disminuyendo las deformaciones plásticas producto del tránsito.

La densificación también se logra mediante la pérdida de agua y el reacomodo de las partículas más finas, proceso denominado consolidación. La compactación es medida cuantitativamente en términos de la densidad seca del suelo, cuyo valor depende del tipo de suelo, su contenido de humedad y del esfuerzo de compactación aplicado. Valores

mayores de densidad permiten incrementar la resistencia, reducir la compresibilidad, permeabilidad y susceptibilidad a cambios de humedad, y afectan favorablemente la resistencia a los ciclos de hielo-deshielo.

- Mezcla de materiales

La mezcla de dos o más tipos de suelo en las proporciones requeridas tiene la finalidad de obtener un material granular que cumpla ciertos requerimientos de granulometría y plasticidad para lograr la estabilidad deseada. Este proceso puede realizarse en una planta de mezclado o in-situ. Las situaciones más comunes son mejorar la estabilidad de suelos cohesivos de baja resistencia agregando material grueso, y mejorar materiales granulares inestables de baja cohesión adicionando material fino. En este último caso, se mejora la resistencia a cargas, resistencia a la abrasión, reduce la permeabilidad y facilita la compactación.

Obtener un suelo bien graduado mediante el mezclado de dos o más suelos permite llenar los vacíos de aire entre las partículas y obtener una densidad máxima seca mayor después de compactado.

Esta técnica presenta algunas desventajas como:

- Para contar con una sólida plataforma de trabajo, la capa del material granular depositado o mezclado debe ser lo suficientemente gruesa para distribuir las tensiones en toda la subrasante para poder prevenir ahuellamiento futuro.
- Eventualmente podrían producirse grietas de tracción en la parte inferior del material granular durante la construcción inicial.
- Partículas arcillosas podrían invadir la base granular materiales y mermar la resistencia de ésta.

- Uso de geotextiles

Los geotextiles se utilizan sobre suelos muy blandos para incrementar su capacidad de soporte, y/o actuar como separadores para prevenir que los finos penetren a las capas granulares compuestas por materiales de mejor calidad. En caminos pavimentados, el

aumento de la capacidad de soporte que proporciona el geotextil al material de la subrasante permite diseñar pavimentos más durables y más homogéneos en su comportamiento.

b) Estabilización Química

La estabilización química se utiliza como complemento a la estabilización mecánica. Y consiste en mejorar las propiedades físicas y/o mecánicas del suelo mediante la adición de algún producto químico, el cual normalmente produce un cambio en las propiedades moleculares superficiales de las partículas de suelo, cementa y/o adhiere las partículas entre sí (Vera, 2001).

Thenoux y San Juan (2000) establecen cuales son las propiedades físicas y mecánicas del suelo deseables de mejorar mediante la estabilización química, a las que llaman propiedades de desempeño del suelo. Estas son:

- Capacidad de soporte
- Estabilidad bajo agua
- Estabilidad volumétrica
- Permeabilidad
- Trabajabilidad
- Resistencia a la abrasión
- Control del polvo

De acuerdo a la capa granular del camino que se esté estabilizando, pueden mejorarse diferentes propiedades de desempeño. La estabilización de bases o subbases de pavimentos es recomendada para mejorar su comportamiento estructural, en especial la capacidad de soporte, pudiendo así disminuir espesores de diseño por medio de alguno de los siguientes mecanismos:

- Reducir la permeabilidad del suelo, esto permite mantenerlo con un bajo contenido de humedad para el cual su resistencia es adecuada.

- Mejorar la cementación de las partículas finas para controlar la pérdida de resistencia por efecto de la saturación.
- Evitar el bombeo de material fino.

También esta técnica eventualmente permitiría la utilización de materiales marginales (fuera de norma) en la base y/o subbase, ya que la estabilización química permite rectificar las deficiencias de estos materiales y mejorar su comportamiento mecánico y físico. Esta aplicación puede ser muy rentable en regiones con escasez de materiales apropiados para cumplir las especificaciones de bases o subbases.

En carpetas de rodado granulares, usualmente, la estabilización química es utilizada en caminos no pavimentados para mejorar el comportamiento funcional de la superficie de rodado y mejorar ciertas propiedades mecánicas del material. Dependiendo del costo y efectividad del agente estabilizador, se pueden obtener ahorros por conceptos de reducción de costos de conservación del camino y costos de operación de los vehículos. Cabe destacar que no todos los estabilizadores pueden ser utilizados para conformar una capa de rodado, dada su poca resistencia al deslizamiento.

Algunos tipos de suelos que conforman la subrasante pueden ser mejorados tanto por requerimientos constructivos o requerimientos de desempeño específicos, tales como:

- Mejoramiento de la trabajabilidad

En general, los suelos utilizados como subrasante corresponden al terreno natural, el que puede presentar un alto contenido de finos y/o exceso de humedad, lo cual dificulta su homogeneización y compactación. Aunque existen diversos tipos de equipos compactadores, que permiten trabajar con una amplia variedad de suelos, en algunas situaciones se requiere el uso de estabilizadores químicos que facilitan el mezclado, homogeneización y compactación del suelo. También, en algunos casos se requiere mejorar la trabajabilidad de los suelos que conforman las capas granulares de rodado, bases o subbases de caminos, en especial cuando se utilizan materiales marginales.

- Mejoramiento de la estabilidad volumétrica

Los suelos de la subrasante, especialmente aquellos que contienen arcillas, suelen estar sometidos a grandes variaciones de humedad o a ciclos de hielo/deshielo, lo cual genera cambios volumétricos que pueden provocar la deformación de las diferentes capas estructurales que conforman el camino. Tales cambios volumétricos pueden ser controlados utilizando estabilizadores químicos que reduzcan la absorción de humedad del suelo o que disminuyan la temperatura de congelamiento de los mismos.

- Mejoramiento susceptibilidad al agua

La estabilidad bajo el agua es la capacidad de un suelo para resistir los cambios de humedad sin presentar grandes variaciones. Lo ideal es que cuando un suelo está expuesto a la acción del agua sus propiedades mecánicas no se reduzcan en forma significativa.

Los agentes estabilizadores químicos “tradicionales” son el asfalto, la cal y el cemento. Además, existe una amplia variedad de productos o subproductos derivados de diferentes procesos industriales, y productos obtenidos de depósitos naturales, los cuales son utilizados a una escala significativamente menor que los estabilizadores químicos tradicionales.

Los estabilizadores químicos son divididos en las siguientes categorías:

**Agentes cementantes:** incluye la cal, cemento, ceniza volante y la combinación de éstos productos entre sí. La efectividad de este tipo de estabilizadores depende de la resistencia de la matriz estabilizada, si se forma una unión entre las partículas gruesas del suelo y la matriz, o si las partículas individuales o aglomeraciones de partículas son unidas entre sí.

**Agentes asfálticos:** debido a los avances tecnológicos el uso del asfalto como agente estabilizador ha incrementado, y es aplicado en forma de emulsión o de espuma. También se han utilizado asfaltos cortados para estabilizar capas delgadas, pero en la actualidad su uso es poco corriente como consecuencia de la contaminación ambiental que produce la evaporación de los solventes que lo conforman.

**Compuestos químicos:** incluye todos los productos que no forman parte de las dos categorías anteriores, algunos son basados en cloruros o sales, derivados del petróleo y aceites, enzimas, lignosulfonatos, melazas, polímeros, resinas, entre otros. Los compuestos químicos son utilizados principalmente para suprimir el polvo, reducir la formación de deterioros superficiales (baches, calamina, otros), para mejorar la interacción del agua con el suelo y facilitar la compactación. Estos compuestos en general, no se utilizan para estabilizar subrasante, por lo tanto no serán incluidos en la revisión bibliográfica.

## V ANTECEDENTES SOBRE LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE LA SUBRASANTE

En el presente capítulo se presenta el estudio bibliográfico que se realizó de los métodos de estabilización química de la subrasante mediante agentes cementantes y agentes asfálticos. Luego, se exponen los principales factores que influyen en la selección del tipo de estabilización a utilizar.

### V.1 Agentes Cementantes

#### V.1.1 Estabilización con Cal

La estabilización con cal es una de las formas de estabilización más antigua y ha presentado excelentes resultados, demostrando ser una alternativa efectiva en términos económicos.

En general, la cal se utiliza para estabilizar suelos finos con un contenido importante de arcilla. Las gravas o arenas sólo podrán ser estabilizadas con cal cuando se adicione algún material que suministre los compuestos puzolánicos presentes en la arcilla (alúmina y sílice) y que son necesarios para que se produzca la cementación.

La palabra cal es un término genérico utilizado para representar tanto a la cal viva (óxido de calcio, CaO) como la cal apagada o hidratada (Hidróxido de Calcio, Ca[OH]<sub>2</sub>). Sin embargo esta puede Pueden aplicarse en forma de cal viva, cal hidratada o lechada de cal.

La selección de una determinada forma para la aplicación de la cal depende de las ventajas o desventajas que presenten en cada obra. En este sentido, se pueden enumerar las siguientes (Manual Estabilización con cal, 2004):

- Cal viva

#### *Ventajas:*

- La cal viva es más económica puesto que contiene, aproximadamente, un 30% más de cal disponible que la cal hidratada.
- La cal viva tiene una acción de secado más rápida en el caso de suelos húmedos y, además, reacciona más rápidamente con los suelos que las otras formas de aplicar la cal.
- El periodo de aplicación se puede extender a tiempos más fríos a causa de su reacción exotérmica con el agua del terreno.

***Desventajas:***

- La cal viva requiere más agua que la hidratada para la estabilización, por lo que no es aconsejable para zonas secas.
- Presenta un mayor riesgo de quemaduras en la piel y en los ojos, por lo que para su uso deben adoptarse con mayor rigor las medidas de seguridad, establecidas en las fichas de seguridad correspondientes.

- Cal Hidratada

***Ventajas:***

- La cal hidratada puede ser aplicada entre dos y tres veces más rápido que la lechada de cal.
- Es menos agresiva que la cal viva aunque hay que adoptar las medidas de seguridad para evitar accidentes indicados en su ficha de seguridad.

***Desventajas:***

- Por su menor densidad aparente y su mayor finura, produce más polvo que la cal viva durante las operaciones de manejo, extendido y mezclado, por lo que hay que adoptar las medidas adecuadas para evitar su diseminación en la atmósfera, sobretodo en zonas habitadas.

- Lechada de Cal

***Ventajas:***

- No produce polvo durante su aplicación, deseable en zonas habitadas.
- Con la lechada se logra una mejor distribución de la cal.
- Se pueden combinar las operaciones de extensión de la cal y humidificación.
- Durante el verano, la aplicación de la lechada de cal prehumidifica el suelo y minimiza la incidencia del secado.

***Desventajas:***

- La velocidad de aplicación es más lenta.
- Se requieren equipos extra, por lo tanto, los costos son mayores.
- Pueden ser necesarias tareas adicionales para realizar operaciones de secado durante tiempo frío y/o húmedo durante el otoño, invierno o primavera.
- Puede no ser práctico con terrenos muy húmedos.

Cuando se considere el mejoramiento de los suelos utilizando cal, existen dos efectos que se pueden conseguir según la cantidad de cal que es adicionada (Manual de Estabilización con cal, 2004):

- Modificación con cal: un inmediato mejoramiento de la trabajabilidad se produce, facilitando la colocación y compactación del suelo.
- Estabilización con cal: una adicional mejora a largo plazo en la resistencia y mayor durabilidad es conseguida.

La adición de cal para estabilizar suelos finos produce diferentes reacciones que modifican las propiedades físicas y mecánicas del suelo tratado, siendo las más importantes las reacciones de corto plazo caracterizadas por el intercambio de cationes (intercambio catiónico), y las de largo plazo que son el resultado de la formación de agentes cementantes (reacción puzolánica).

a) Mecanismo de estabilización

- **Intercambio catiónico**

Inmediatamente después de agregar cal a suelos arcillosos se produce una reacción denominada intercambio catiónico. Esta reacción consiste en que iones de calcio presentes en la cal reemplazan los iones de hidrógeno y sodio presentes en la arcilla, esto sucede hasta que las partículas de arcilla quedan saturadas de calcio y el pH del suelo se eleva a 12,4 (pH del agua saturada de cal).

El intercambio catiónico tiene dos efectos principales, el primero es la liberación de gran parte del agua perteneciente a la capa adsorbida de la partícula de arcilla, dado que los cationes de sodio pueden retener 79 moléculas de agua y en cambio los de calcio solamente 2. El segundo efecto es la floculación y aglomeración de los minerales de arcilla, formando partículas más grandes (similares en tamaño a los limos).

Como consecuencia de lo anterior, se produce una sustancial reducción y estabilización de la capa de agua; un incremento de la fricción interna entre las partículas floculadas de la arcilla que va acompañada de una mayor resistencia a cizallamiento; una mayor trabajabilidad y compactabilidad del suelo debido al cambio de textura de una arcilla plástica a un material disgregable de comportamiento parecido a una arena.

- **Reacción puzolánica**

Las reacciones de largo plazo se deben a la reacción entre la cal, agua y las partículas puzolánicas de la arcilla (alúmina y sílice). La ecuación V.1 muestra el proceso de hidratación de la cal. Luego, cuando se agrega una cantidad significativa de cal al suelo (ecuación V.2) el pH se eleva hasta 12,4 (a 25°C). A este nivel de pH la sílice y alúmina se vuelven solubles y pueden reaccionar con la cal y el agua formando agentes cementantes (ecuación V.3 y V.4), tales como hidratos de aluminato de calcio (CAH) e hidratos de silicato de calcio (CSH) (Benson et al., 2002).





La reacción puzolánica sólo ocurre mientras el agua está presente y es capaz de llevar los iones de calcio a la superficie de las partículas de arcilla. Sin embargo, esta reacción puede continuar por largos períodos de tiempo, incluso varios años.

Como resultado de esta reacción es posible reducir aún más la plasticidad y el potencial de expansión. También se producen incrementos importantes en la resistencia al corte y la rigidez del material, además de una mejora en las propiedades resilientes de éste (Little, 1999).

Con este mecanismo de estabilización química se modifican algunas propiedades físicas y mecánicas del suelo. Las propiedades que se modifican en el corto plazo son:

- Se reduce el Índice de Plasticidad hasta 4 veces en algunos casos. Esto se debe a una leve disminución del Límite Líquido junto a un gran incremento del Límite Plástico (Little, 1999). Tal como lo muestra la Figura V-1,

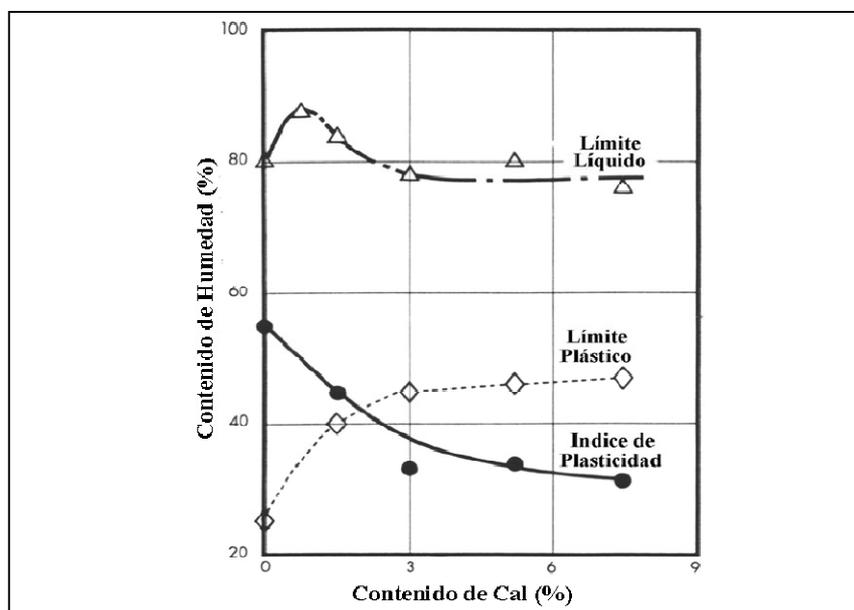


Figura V-1: Efecto del contenido de cal sobre la plasticidad de la Arcilla Londres

- Incremento de la resistencia: tanto la Resistencia a la Compresión no Confinada (UCS) como el CBR aumentan considerablemente con la adición de cal. La experiencia ha mostrado incrementos desde un CBR 3 hasta CBR 20 gracias al tratamiento con cal. La resistencia final de una mezcla suelo-cal puede alcanzar los 7 MPa (Little, 1999). Tal como lo muestra la Figura V-2 a continuación:

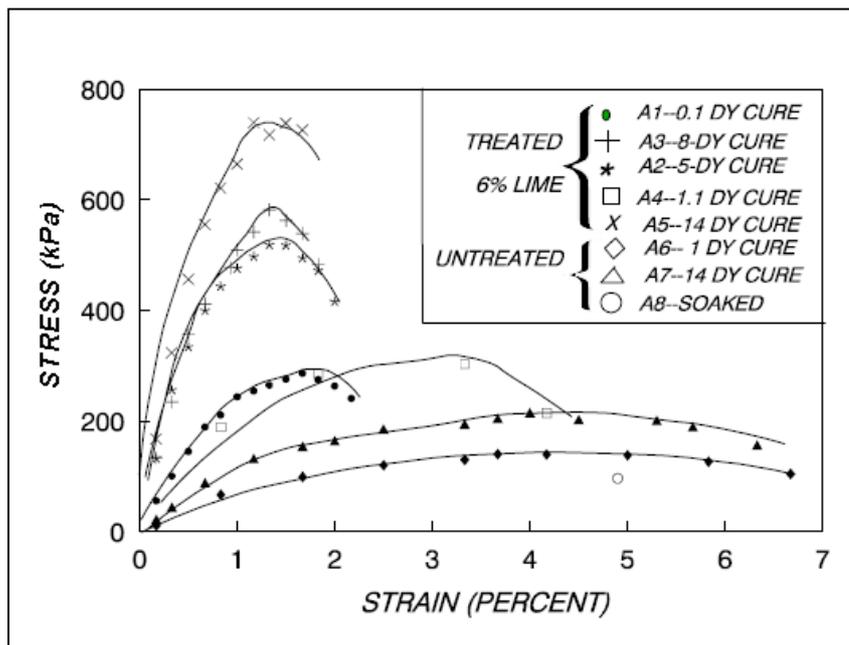


Figura V-2: Gráficos Tensión v/s Deformación de mezclas tratadas con cal y mezclas sin tratar (Hopkins et al, 1995)

- Mejora la estabilidad volumétrica, ya que se reduce el potencial hinchamiento y contracción producto de la pérdida de humedad.
- Modificación de las características de compactación, se reduce la densidad máxima compactada seca en comparación con un suelo no tratado; se incrementa el contenido de humedad óptimo al aumentar el contenido de cal, por lo tanto la curva humedad-densidad es más llana.
- Mejoramiento de la trabajabilidad del suelo, ya que la cal facilita el desmenuzamiento de los terrones de arcilla.

La reacción puzolánica, o de largo plazo, incrementa la resistencia del suelo, mejora su estabilidad volumétrica, aumenta la resistencia al agua, la erosión y las heladas.

Cabe destacar que no todos los suelos muestran una mejora de las características antes señaladas. Los resultados dependerán de diversas variables, tales como: tipo de suelo, tipo de cal utilizado, porcentaje adicionado de cal y condiciones de curado incluyendo el tiempo, temperatura y humedad.

b) Consideraciones sobre el uso de la cal

- Tipos de Suelo a Estabilizar con Cal

La experiencia ha demostrado que la cal puede reaccionar con suelos de granulometrías medias y finas que tengan un contenido de arcilla mínimo del 7% y un Índice de Plasticidad mínimo de 10. La arcilla provee los compuestos puzolánicos (sílice y alúmina) necesarios para el desarrollo de agentes cementantes. La presencia de materia orgánica es perjudicial para la estabilización, por lo tanto debe limitarse a no ser más allá del 2%.

- Uso de los Suelos Estabilizados con Cal

El uso más eficiente de la estabilización con cal es en la estabilización de subrasantes arcillosas, o en el mejoramiento de materiales de base o subbase con alto contenido de material fino (sobre los límites permitidos para bases y subbases, que normalmente es alrededor del 10 %). Los suelos estabilizados con cal no pueden ser usados como carpeta de rodado, dado que en general no tienen una buena resistencia a la abrasión.

- Suelos con Sulfatos

Algunas arcillas tienen un contenido importante de sulfatos, lo que puede traer consecuencias negativas para el suelo estabilizado con cal. Los sulfatos, en conjunto con la sílice, alúmina, cal y agua, producen reacciones expansivas al producirse sulfatos de calcio hidratados, especialmente etringita. La formación de estos minerales luego de la compactación puede resultar en un levantamiento del pavimento y una pérdida de

resistencia. Normalmente se especifica que las arcillas no deben contener más de un 1% de sulfatos para ser estabilizadas con cal.

- Dosis de estabilizador

Las dosis de cal varían entre 2 y 10%, dosis mayores son requeridas cuando el objetivo es incrementar la resistencia del suelo y cuando se estabilizan arcillas muy plásticas. En caso que el propósito de la estabilización sea modificar las propiedades del suelo, se utilizan dosis menores al 4%.

La estabilización con cal de caminos no pavimentados produce una serie de beneficios, como son: reducción de los costos de conservación hasta en un 35% como consecuencia de la menor necesidad de actividades de nivelado y perfilado, extensión de la vida del camino de hasta 15 años, uso de materiales marginales, reducción de defectos superficiales y proporciona una superficie de rodado suave.

### **V.1.2 Estabilización con Cemento**

En la actualidad el cemento es el estabilizador más comúnmente usado. Se fabrica prácticamente en todos los países y es aceptado como un material de construcción, existiendo diversas normas, métodos de ensayos especificaciones para suelos tratados con cemento.

El cemento Portland se define como un material pulverizado muy fino, de naturaleza inorgánica, el cual al ser mezclado con agua endurece tanto al aire como bajo agua, resultando en un producto que en su mayor parte es insoluble y que exhibe altas resistencias mecánicas (ITRRSA, 1986).

El objetivo de estabilizar un suelo con cemento es básicamente el incremento de la resistencia gracias a la formación de agentes cementantes, siendo un efecto secundario la modificación de algunas propiedades físicas del suelo, tales como:

- Características de compactación

Se produce un aumento en el contenido de humedad óptimo y una disminución de la densidad máxima seca.

- Resistencia

La resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad de una mezcla suelo-cemento aumentan con la concentración de cemento.

- Presencia de retracción

El agrietamiento por retracción es una característica natural de los suelos cementados y entrega evidencia de que se ha producido un endurecimiento. Los suelos estabilizados con cemento exhiben retracción producto del curado y secado.

- Permeabilidad

Generalmente todos los tipos de suelos disminuyen su permeabilidad considerablemente al adicionar cemento.

Los materiales estabilizados con cemento generalmente se dividen en dos clases: suelo cemento y suelo cemento-modificado. El suelo cemento es una mezcla de suelo y/o agregados chancado, cemento y agua, la cual es compactada a alta densidad. Suficiente cemento (mayor al 5% del peso del suelo) es adicionado para producir un material endurecido con la resistencia y durabilidad necesaria para ser utilizado como base en un pavimento flexible y como subbase en un pavimento de hormigón.

El suelo cemento-modificado es un suelo o agregado que ha sido tratado con pequeñas cantidades de cemento portland (menos del 4% del peso del suelo), con la finalidad de alterar propiedades indeseables del suelo, tal que sea apropiado para el uso en la construcción de caminos. El suelo cemento-modificado es típicamente utilizado para mejorar el suelo de la subrasante o agregados locales para la construcción de subbases (Little et al, 2000).

a) Mecanismo de estabilización

El mecanismo de estabilización con cemento es semejante a la estabilización con cal, produciéndose principalmente la reacción puzolánica. La principal diferencia es que el material puzolánico está presente en el cemento y no necesita ser proporcionado por el suelo, por lo cual puede ser usado efectivamente para estabilizar todo tipo de suelos. Básicamente, el silicato y aluminato de calcio al reaccionar con agua forma componentes hidratados, los que con el tiempo producen una matriz dura y resistente, la pasta de cemento endurecida. Además, producto de la hidratación se forma hidróxido de calcio (cal), el cual puede reaccionar con el suelo para formar más productos cementantes mediante el proceso indicado anteriormente para la estabilización con cal. Sin embargo, el uso de mezclas con cemento puede estar limitado al tratamiento de materiales con Índice de Plasticidad menor que 10 (Wirtgen, 2004).

b) Consideraciones sobre el uso del cemento

- Tipo de Suelo

El cemento es muy efectivo para estabilizar suelos de mediana a baja plasticidad. Aunque es posible estabilizar prácticamente todo tipo de suelos para mejorar sus propiedades, en la práctica es bastante complicado tratar suelos finos debido a la gran cantidad de cemento que se necesita y la dificultad de pulverizar el suelo y mezclarlo con el cemento. Para esos casos, es mejor utilizar cal en la estabilización.

- Tipos de Usos

La estabilización con cemento es ampliamente usada en caminos pavimentados, para la estabilización de bases y subbases, sin embargo, no es un estabilizador apropiado para carpetas de rodado de grava o tierra. Cuando se utilizan bajas dosis de cemento (suelo cemento-modificado) la carpeta no resiste la acción abrasiva del tránsito, produciéndose el desprendimiento de áridos. Además, el endurecimiento de la carpeta impide realizar las actividades de conservación tradicionales, tales como el nivelado con motoniveladora.

Si se utilizan altas dosis de cemento (suelo-cemento) lo más probable es que la carpeta resista la acción abrasiva del tránsito y el clima, pero puede no resultar factible económicamente. Se debe tener especial cuidado en el proceso de mezclado, compactación y terminación de la superficie, que debe ser realizado antes que la mezcla suelo-cemento comience a endurecer (aproximadamente 4 horas), sino toda depresión o exceso de material producirán una superficie heterogénea rugosa y propensa a futuros deterioros.

- Dosis de estabilizador

El porcentaje de cemento varía generalmente entre 1 y 10%, aunque para suelos arcillosos muy plásticos se pueden requerir dosis que superan el 20% de cemento, en este caso, por razones económicas es recomendable utilizar previamente cal para reducir la plasticidad del suelo y luego agregar cemento en cantidades sustancialmente menores. En gravas, las dosis recomendadas varían entre 3 y 5%.

- Suelos con Materia Orgánica

Aunque ciertos tipos de material orgánico, como vegetación en descomposición, podrían no presentar ningún problema para la estabilización, existen otros compuestos que si son dañinos. Algunos compuestos orgánicos de bajo peso molecular pueden actuar como retardadores del proceso de hidratación del cemento y reducir la resistencia del suelo estabilizado. Estos compuestos absorben iones calcio del cemento hidratado, produciendo una reducción del pH y la precipitación de un gel alúmina-sílice, inhibiendo el proceso normal de endurecimiento.

Si el pH de una mezcla con 10% de cemento en peso, 15 minutos después de mezclado, es a lo menos 12 es probable que cualquier material orgánico que exista no interfiera con el endurecimiento normal de la mezcla (US Army, 1994).

- Suelos con Sulfatos

No se tiene mucha información sobre la resistencia al ataque de sulfatos de los suelos estabilizados con cemento. Sin embargo, se sabe que la resistencia al ataque de los

sulfatos dependerá del tipo de suelo estabilizado. Las reacciones entre la arcilla y los sulfatos pueden causar deterioro en los suelos finos estabilizados con cemento. Por otra parte, los suelos granulares estabilizados con cemento no parecen ser susceptibles al ataque de sulfatos. De hecho, en algunos casos la presencia de pequeñas cantidades de sulfatos en el suelo ha sido incluso beneficiosa (US Army, 1994).

El uso de cemento resistente al ataque de sulfatos no parece ser de utilidad en el caso de estabilizar suelos arcillosos, pero sí ha mostrado buenos resultados al momento de estabilizar suelos granulares.

Normalmente se especifica que las arcillas no deben contener más de un 1% de sulfatos para ser estabilizadas con cemento.

### **V.1.3 Cenizas Volantes**

La principal característica de la ceniza volante es su naturaleza puzolánica, por lo cual se considera como un material con potencial cementante junto con la adición de cal. Esta característica ha convertido a las cenizas volantes en un atractivo material para estabilizar suelos, área en la cual se ha utilizado desde los años 50.

La *American Society for Testing and Materials* (ASTM) define puzolana como un material silíceo o silíceo-aluminoso que posee en sí mismo una pequeña proporción o no posee propiedades cementicias, pero que en una mezcla reacciona con el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) para formar compuestos con propiedades cementicias.

La mayor parte de las cenizas volantes se generan a partir de la combustión de carbón para la generación de electricidad en plantas termoeléctricas, a partir de la precipitación de los gases de escape provenientes de calderas que queman combustibles sólidos. En estas plantas la temperatura de combustión generalmente bordea los  $1200^\circ\text{C}$ , produciendo cenizas con tamaños menores a  $100\mu\text{m}$  las cuales son transportadas por el vapor y recolectadas en sistemas mecánicos (ciclones o colectores de sacos) o electrostáticos (proceso seco). La parte más gruesa de las cenizas es más pesada (15-20% del total), por lo que cae al fondo de las calderas. Esta porción de las cenizas es lo que se

conoce como “Bottom Ash”, mientras que la parte más fina es conocida como “Fly Ash” (Martínez, 2003).

La norma ASTM C 618-92 clasifica las cenizas volantes en dos tipos. Las cenizas Tipo C se producen por la calcinación de carbones ligníticos o sub-bituminosos, poseen propiedades cementantes y puzolánicas y tienen un contenido de CaO superior al 10%. Estas cenizas pueden ser consideradas como un material hidráulico (capaz de endurecer por sí sólo al hidratarse), es decir, se consideran como un material autocementante.

El otro tipo de cenizas, las Tipo F, provienen de la combustión de antracita o lignito. Poseen poco o nada de valor cementante, pero reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio formando compuestos que poseen propiedades puzolánicas. Estas cenizas poseen un bajo contenido de CaO, generalmente inferior al 6%, y se consideran como un material potencialmente hidráulico, es decir, presentan actividad hidráulica como consecuencia de una reacción química con otros compuestos (Martínez, 2003).

Se puede obtener en grandes cantidades. Se produce en la combustión de antracita o lignito. Generalmente contiene pequeñas cantidades de cal (normalmente inferior al 15%) y una superior combinación de sílice, aluminio y hierro que la clase C.

La composición química entre las cenizas volantes es muy similar a la del cemento Portland. Esto se puede ver a partir de los valores de Tabla V-1 donde se representa los análisis realizados a los dos tipos básicos de cenizas volantes respecto al cemento Portland habitual.

Tabla V-1: Composición química cenizas volantes-cemento

<b>Componente químico</b>	<b>Cenizas volantes (clase F)</b>	<b>Cenizas volantes (clase C)</b>	<b>Cemento Portland</b>
SiO	54.90	39.90	22.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.80	16.70	4.30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.90	5.80	2.40
CaO	8.70	24.30	64.40
MgO	1.80	4.60	2.10
SO <sub>3</sub>	0.60	3.30	2.30
Na <sub>2</sub> O & K <sub>2</sub> O	0.60	1.30	0.60

En esta tabla se puede ver que la diferencia principal es la cantidad relativa de cada uno de sus componentes. Mientras el cemento Portland es rico en cal, las cenizas volantes no lo son tanto. Por el contrario, las cenizas volantes contienen altas cantidades de silicatos reactivos que en el cemento son pequeñas.

a) Mecanismo de estabilización

La base de la acción cementante de las cenizas volantes es la reacción puzolánica. La reacción puzolánica se produce entre la sílice y alúmina, y la cal hidratada o hidróxido de calcio Ca(OH)<sub>2</sub>. La reacción puzolánica es relativamente lenta y se produce en el mediano y largo plazo.

La cal al hidratarse produce hidróxido de calcio, el cual reacciona con los compuestos puzolánicos de las cenizas volantes (reacción puzolánica). Al reaccionar la cal con los materiales puzolánicos (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) en presencia del agua se produce la hidratación de la ceniza. Los materiales cementantes que adhieren el material son el Gel Hidratado de Silicato de Calcio y el gel de aluminato de calcio (Benson et al., 2002).

Pese a que existe sólo información básica sobre estas reacciones, se sabe que para una composición de cal-ceniza volante dada, se producirán mayores cantidades de productos de reacción puzolánica para tiempos de curado más extensos o incrementando la temperatura de curado (Copas y Pennock, 1976).

Para estabilizar con cenizas volantes tipo F es necesario adicionar un agente activador, normalmente cal o cemento. En el caso de las cenizas tipo C no será necesario el agente activador ya que tienen un contenido suficiente de cal para ser consideradas como “autocementantes”. La proporción de cal (con respecto a las cenizas) utilizada como activador varía desde 1:10 a 1:2, siendo común utilizar razones de 1:4 (Copas y Pennock, 1976).

Con este mecanismo de estabilización se modifican algunas propiedades físicas y mecánicas del suelo como:

- Expansión: Las cenizas volantes disminuyen la plasticidad de suelos arcillosos, lo cual a su vez disminuye el potencial de expansión.
- Secado del suelo: La ACAA (2003) plantea que la adición de cenizas volantes puede reducir hasta en un 30% el contenido de agua del suelo.
- La resistencia alcanzada generalmente será del orden de dos a tres veces la resistencia del suelo original.

b) Consideraciones sobre el uso de las cenizas volantes

- Tipo de Suelo

Las mezclas preparadas con agregados finos generalmente presentan mayor durabilidad que aquellas con menos finos. Sin embargo, aquellas mezclas que utilizan materiales granulares con menor contenido de finos suelen ser más estables mecánicamente (Copas y Pennock, 1976).

- Consideraciones Constructivas

La ACAA (1999) plantea que las operaciones de estabilización no deben realizarse cuando la temperatura ambiente es menor a 40°F (5°C), ya que la hidratación de la ceniza (necesaria para que la mezcla gane resistencia) necesita una temperatura mínima para ocurrir, por lo que a bajas temperaturas la resistencia mínima requerida podría no alcanzarse.

## V.2 Agentes Asfálticos

El asfalto es un líquido viscoso, que se puede encontrar en estado natural o ser obtenido como un producto de la refinación del petróleo. Tiene importantes propiedades adhesivas y está conformado esencialmente por hidrocarburos. Para estabilización de capas granulares se agrega al suelo en un estado de baja viscosidad, que después de transcurrido un cierto tiempo se convierte en un semi-sólido altamente viscoso.

El uso del asfalto como agente estabilizador se ha incrementado debido a los avances tecnológicos, y es aplicado en forma de emulsión o espumado. También se han utilizado asfaltos cortados para estabilizar capas delgadas, pero en la actualidad su uso es poco corriente como consecuencia de la contaminación ambiental que produce la evaporación de los solventes que lo conforman. Usualmente se utilizan los siguientes agentes asfálticos para la estabilización de caminos (Romero, 2009):

### a) Emulsión asfáltica

Son gotitas de cemento asfáltico suspendidas en agua, las partículas de asfalto no se juntan porque están cubiertas de una película protectora llamada emulsificador. Muchas de las emulsiones usadas como agentes estabilizadores tienen un “asfalto residual” del 60%, es decir, que el 60% del volumen de la emulsión es cemento asfáltico disperso en un 40% del volumen que es agua. Después del mezclado con los áridos, cuando el agua de la emulsión se evapora, el asfalto se vuelve a juntar en una película delgada que es depositada sobre la superficie del agregado.

### b) Asfalto espumado

Es cemento asfáltico caliente mezclado con pequeñas dosis de agua y aire en cámaras especiales, este proceso causa la expansión del cemento asfáltico hasta 20 veces su volumen original. Una vez que el asfalto espuma es inyectado al suelo y revuelto con éste, retornando en pocos minutos a su condición original.

A diferencia de la cal y el cemento, que reaccionan químicamente con el material estabilizado, el asfalto actúa físicamente como un ligante, el cual junta las partículas y tiene un efecto impermeabilizante.

En suelos finos el efecto del asfalto es de impermeabilización, las partículas de suelos son cubiertas con asfalto, lo que produce una membrana que previene o impide la penetración del agua. De este modo los suelos finos mejoran su susceptibilidad a cambios de volumen y mejora su capacidad de soporte.

En materiales no cohesivos, como arenas y gravas, se desarrollan dos mecanismos: impermeabilización y adherencia. El primer mecanismo es similar al descrito para suelos finos. El segundo mecanismo es el de adherencia, el asfalto se adhiere a las partículas de agregado, tal que este actúa como un ligante que mantiene pegadas las partículas del suelo. La estabilización con asfalto mejora las propiedades resilientes del suelo.

### **V.3 Factores que influyen en la selección de conglomerantes**

Uno de los factores clave para la obtención de las mejoras buscadas con la estabilización es la adecuada elección del conglomerante, o mezcla de conglomerantes. El dilema es qué aditivo químico se debe utilizar en cada proyecto específico de estabilización. Esta decisión suele no ser fácil y depende de una gran cantidad de factores, siendo los principales:

a) Tipo de suelo o materiales a estabilizar

Tras un estudio geotécnico de todos los tipos de suelos que se vayan a emplear, se debe decidir qué conglomerante es el más adecuado. No sirve cualquier conglomerante para cualquier tipo de suelo. Esta es una de las razones de alguno de los fracasos en obras de este tipo.

Los dos parámetros que mejor pueden clasificar un suelo de cara al conglomerante más adecuado con la **plasticidad** y la **granulometría**.

- Plasticidad

- En general, puede afirmarse que los suelos plásticos, arcillosos, reaccionan bien con la cal. Los suelos cuyo IP sea mayor de 20 son suelos cohesivos, que reaccionarán mejor con la cal.
- Los suelos granulares, no plásticos, reaccionan bien con el cemento. Los suelos con un IP menor o igual a 12 son suelos que reaccionarán mejor con el cemento. Y los suelos cuyo IP esté entre esos valores, entre 12 y 20, serán suelos más aptos para una estabilización mixta.
- El asfalto puede ser utilizado para estabilizar una gran variedad de suelos, la experiencia ha mostrado que la estabilización con productos asfálticos es más efectiva en suelos arenosos, gravas arenosas, y agregados chancados. El IP de los suelos no debe ser superior a 12. Las emulsiones asfálticas son apropiadas para estabilizar arenas limosas y los suelos granulares, ya que en estos casos se desea cubrir por completo todas las partículas de suelo. A continuación se analizan las dosis utilizadas para la estabilización con cal, cemento y asfalto, y los suelos en los cuales su utilización es adecuada. En general la dosis óptima del aditivo químico depende del propósito de la estabilización y del tipo de suelo.
- Granulometría
  - La cal no puede ser utilizada para estabilizar suelos orgánicos, arenas, o materiales granulares pobremente graduados. Thompson (1975) sugiere un mínimo contenido de arcilla del 10%, mientras que el TRRL (1977) sugiere que al menos un 15% de material pase la malla #40 (0,425 mm).
  - Utilizando cemento Portland es necesario que éste se mezcle en su totalidad con la fracción fina (<0.074 mm), por lo cual los suelos más finos son evitados.

La Figura V-3 muestra un gráfico que indica qué estabilizador tradicional seleccionar para distintos tipos de suelos, en función del porcentaje de finos del suelo e IP del suelo.



c) Factores climáticos

El clima influye directamente en la selección del estabilizador, ya que algunos estabilizadores químicos son más aptos que otros bajo ciertas condiciones climáticas. Estas, también afectan la cantidad requerida de ciertos estabilizadores y la época del año en que pueden ser aplicados.

d) Experiencia y factores constructivos

La experiencia y políticas de la empresa constructora o agencia de conservación influyen en la selección de un estabilizador, ya que algunas entidades son más propensas a utilizar sólo algunos tipos de estabilizadores debido a que han trabajado anteriormente con ellos y a los buenos resultados obtenidos con su aplicación, no arriesgándose a trabajar con otros aditivos químicos de resultados inciertos. También es importante la disponibilidad de maquinaria y equipos, ya que para la aplicación de algunos estabilizadores se requiere el uso de maquinaria específica que puede no estar disponible en algunas regiones del mundo.

e) Disponibilidad del estabilizador

Ciertos agentes estabilizadores pueden no estar disponibles en algunas regiones del mundo. Por otro lado, pueden existir compuestos químicos que están disponibles sólo localmente, y que su elevado costo de transporte impide su comercialización en otras localizaciones.

f) Políticas ambientales

Las normas ambientales regulan el uso de ciertos productos tóxicos que pueden afectar negativamente la fauna y flora adyacente al camino. El uso de agentes estabilizadores asfálticos y cementantes es aceptado en todo el mundo. En cambio, las políticas ambientales específicas de un país pueden limitar o prohibir la utilización de algunos compuestos químicos, debido principalmente a que pueden ser productos de desecho de procesos industriales o porque en algunos casos su formulación química es desconocida.

g) Costo del estabilizador

El costo total que involucra el uso de estabilizadores químicos (precio del estabilizador puesto en obra y costo constructivo adicional) es un factor de gran importancia en la selección de un estabilizador, el cual debe ser comparado con los beneficios económicos directos e indirectos producidos por la utilización de un aditivo químico. Los principales beneficios derivados del uso de estabilizadores químicos son el ahorro de espesores de pavimento, la reducción de los costos de conservación y costos de operación de los vehículos, ahorros debido a la utilización de materiales marginales, entre otros.

En un proyecto de estabilización química se debe estudiar cada uno de los factores mencionados, con el propósito de seleccionar el estabilizador más adecuado técnica y económicamente para cada proyecto específico de estabilización.

## **VI PROPIEDADES GENERALES DE LAS CENIZAS FBC Y SU APLICACIÓN EN LA ESTABILIZACIÓN DE CAMINOS FORESTALES**

### **VI.1 Antecedentes Generales**

La combustión de lecho fluido (FBC: Fluidized Bed Combustion) es una tecnología de combustión utilizada en centrales eléctricas la cual permite una mayor flexibilidad en el uso de combustible y una mejor transferencia del calor producido durante la combustión. De esta manera permite utilizar carbón con alto contenido de azufre, pero para minimizar las emisiones de  $SO_x$  que produce este tipo de combustibles se adiciona un elemento para la desulfurización de los gases de combustión, que generalmente es caliza. La caliza introducida en la caldera captura el azufre presente en el carbón y así reduce la polución ambiental (emisión de  $SO_x$ ). Esta es una de las ventajas que presentan las plantas FBC en comparación con las comúnmente utilizadas llamadas de combustión de carbón pulverizado (PCC: Pulverized Coal Combustión), ya que tienen la posibilidad de eliminar el  $SO_2$  económicamente sin la necesidad de contar con costosos equipos de desulfuración. Las calderas de lecho fluido, utilizan temperaturas de operación menores a las calderas comunes, por lo que el enfriamiento es también menos agresivo.

Estas dos características hacen que las Cenizas FBC sean diferentes a las cenizas producidas en calderas convencionales, en estructura, composición química y en su comportamiento.

La combustión de lecho fluido genera 2 tipos de cenizas: Bottom Ash que cae desde el fondo de la caldera y Fly Ash que es desechada por el filtro “Bag House”, tal como lo muestra la Figura VI-1.

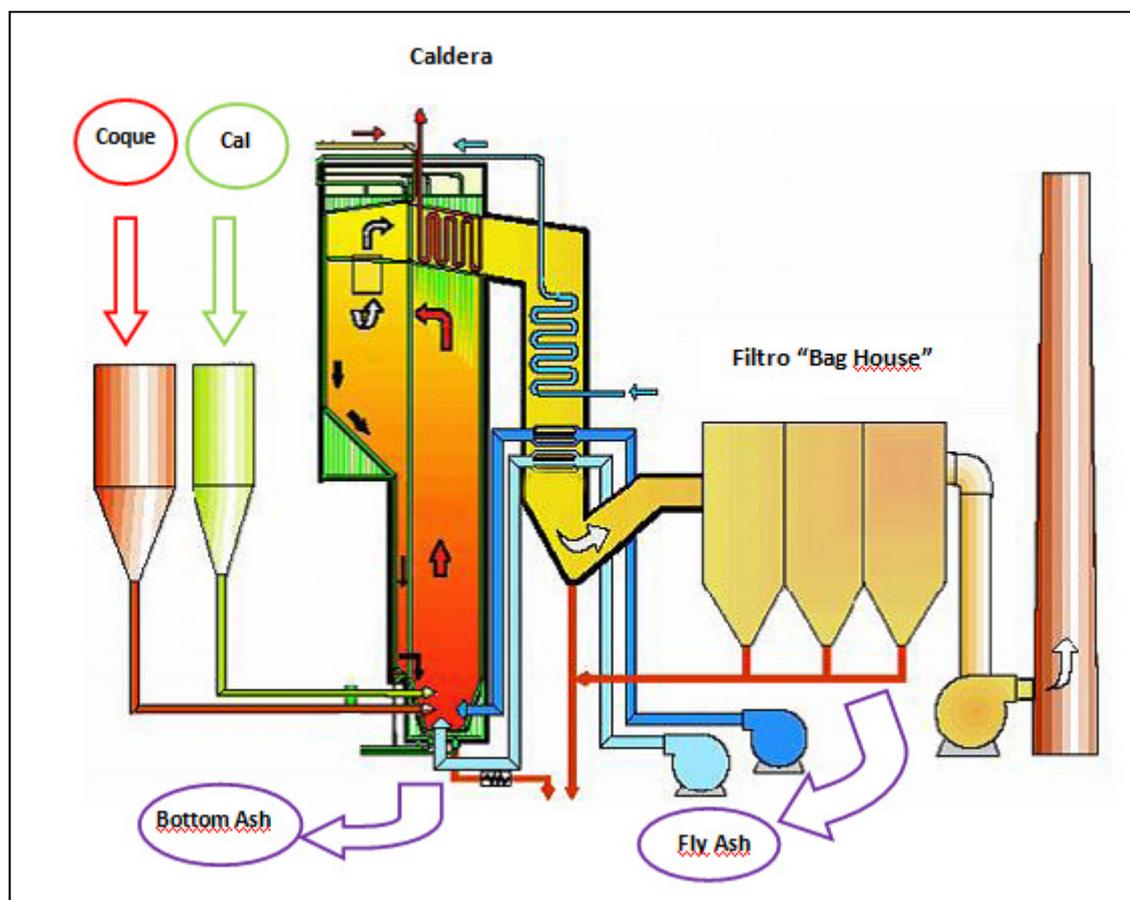


Figura VI-1: Planta de Combustión de Lecho Fluido

## VI.2 Composición y Propiedades de la Cenizas FBC

Las condiciones de funcionamiento de las plantas de combustión de lecho fluido y el combustible utilizado, contribuyen directamente a las características químicas de las cenizas emitidas por la planta. Estas cenizas se generan de la materia mineral original de la combustión, la cual no es derretida dado que las temperaturas utilizadas en el proceso son muy bajas (800-900°C).

Las cenizas de fondo (Bottom Ash) son una mezcla de combustible quemado, residuos de carbón sin quemar y partículas de cal cubierta con algunos residuos de sulfato. Al añadir

caliza para conseguir la desulfuración existirán  $\text{CaO/MgO}$ ,  $\text{CaCO}_3$  o  $\text{SO}_4$  en la composición de los desechos.

En general, la composición de las cenizas volantes FBC claramente difiere de las fly ash producidas por la combustión convencional, sobre todo por la ausencia de cristales, mullita u otros compuestos de fases de alta temperatura. También generalmente presentan altos contenidos de sulfatos, pudiendo llegar hasta un 35% (Vargas, 2006).

Las cenizas FBC están compuestas principalmente de yeso ( $\text{CaSO}_4$ ), cal ( $\text{CaO}$ ), cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), óxidos de hierro y magnesio. Debido al alto contenido de cal libre, los lixiviados de la ceniza FBC serán fuertemente alcalinos. Los residuos de carbono en la ceniza de FBC son más altos que en los de PCC.

La Tabla VI-1 muestra la composición química general de las cenizas FBC y realiza una comparación con las cenizas volantes tradicionales clase C y F (Botha, 2004).

Tabla VI-1: Composición Química de las Cenizas FBC v/s Cenizas Volantes clase C y F

Oxide Analysis	FBC bed material	FBC ash	C-ash	F-ash
Si	45	40	36	44
Al	6	14	15	17
Fe	3	8	7	18
Si+Al+Fe	54	62	57	79
Ca	26	15	22	5
$\text{SO}_3$	16	8	12	1
LOI (950 °C)	2	11	1	8

Las cenizas de calderas de lecho fluido, o cenizas FBC, se diferencian de las cenizas volantes tradicionales, principalmente por su bajo contenido de compuestos puzolánicos (sílice y alúmina) y su alto contenido de cal y sulfatos. Al igual que cualquier tipo de ceniza, las cenizas FBC están formadas por una parte que corresponde a ceniza de fondo (40%) y una parte correspondiente a ceniza volante (60%) (Vargas, 2006).

La Tabla VI-2 muestra las propiedades físicas de las Cenizas FBC (Behr-Andres & Hutzler, 1994). La Figura VI-2 presenta la granulometría de las cenizas (Botha, 2004).

Tabla VI-2: Propiedades Físicas de las Cenizas FBC

Propiedad	Ceniza FBC
Humedad Óptima (%)	32-82
Densidad Máx. Seca (g/cm <sup>3</sup> )	0.7-0.9
Superficie Específica (m <sup>2</sup> /g)	1.1-2.4
Permeabilidad	10 <sup>-9</sup> -10 <sup>-4</sup>
Tamaño Promedio de Partículas (mm)	0.01-0.7
LOI (%)	0.09-20.5
Peso Específico	2.66

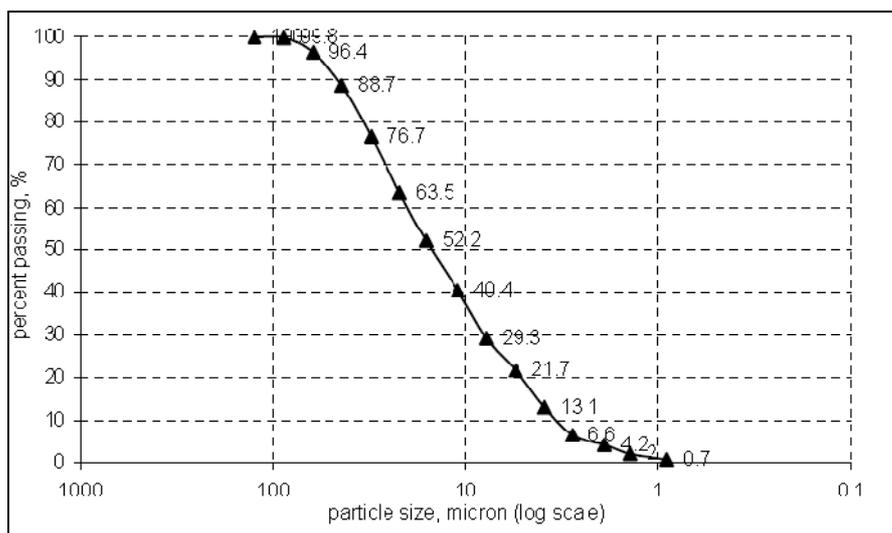


Figura VI-2: Curva Granulométrica cenizas FBC

La curva de distribución del tamaño de las partículas muestra que el 96% de las partículas de cenizas volantes son más pequeños que 63 micrones ( $\mu\text{m}$ ) de tamaño. El tamaño medio de partícula ( $D_{50}$ ) es alrededor de 15 micrones ( $\mu\text{m}$ ). El coeficiente de uniformidad es mayor a 4, esto muestra que la mayoría de los granos son del mismo tamaño. Más del 80% de las partículas están dentro del rango de 44  $\mu\text{m}$  y 5  $\mu\text{m}$ .

### VI.3 Mecanismo de Estabilización

En general, las cenizas FBC funcionan bajo los mismos mecanismos que las cenizas volantes tradicionales, ya que contienen compuestos puzolánicos y cal. La reacción puzolánica se produce entre la sílice y alúmina con la cal hidratada o hidróxido de calcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Sin embargo, a diferencia de las cenizas volantes tradicionales, las cenizas FBC son muy reactivas cuando entran en contacto con el agua, formando etringita, taumasita y yeso.

La adición de cenizas con altos contenidos de sulfuros aumenta el pH del suelo a un valor cercano a 12,4. La ACAA (1999) expuso que cuando el pH de un suelo es mayor a 10.5, la alúmina y el sílice de las partículas de arcilla se vuelven solubles, proporcionando una fuente de iones extra para la formación de materiales expansivos.

Cuando la anhidrita presente en las Cenizas FBC entra en contacto con agua y el aluminio, se forman minerales como yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y etringita ( $\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2 \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ). Para hacerlo aún más complejo un tercer tipo de mineral puede formarse de la misma estructura que la etringita, a temperaturas por debajo de  $15^\circ\text{C}$  en la presencia de sílice soluble y carbonato, llamado taumasita  $\text{Ca}_3\text{Si}(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6 \cdot 12(\text{H}_2\text{O})$  (Little et al, 2007).

La lenta transformación desde anhidrita a etringita es en gran medida la responsable del comportamiento expansivo observado en la estabilización con ceniza FBC. Algunas anhidritas reaccionan muy lento con agua y pueden continuar formando etringita por años, dependiendo del acceso a humedad. La formación de etringita es nociva para la durabilidad, ya que puede hacer que el volumen del suelo aumente hasta dos o tres veces,

ya que la estructura química de los cristales de etringita son prismas hexagonales que se ven a menudo en forma alargada, con diferentes formas: como agujas, listones-cono o de vara, según el tiempo y condiciones de pH durante el período de formación. En la Figura VI-3 se ilustra la estructura de cristales que presenta la etringita. Por otro lado, la formación de taumasita se traducirá en una pérdida de tensión y normalmente es precedida por la formación de etringita.

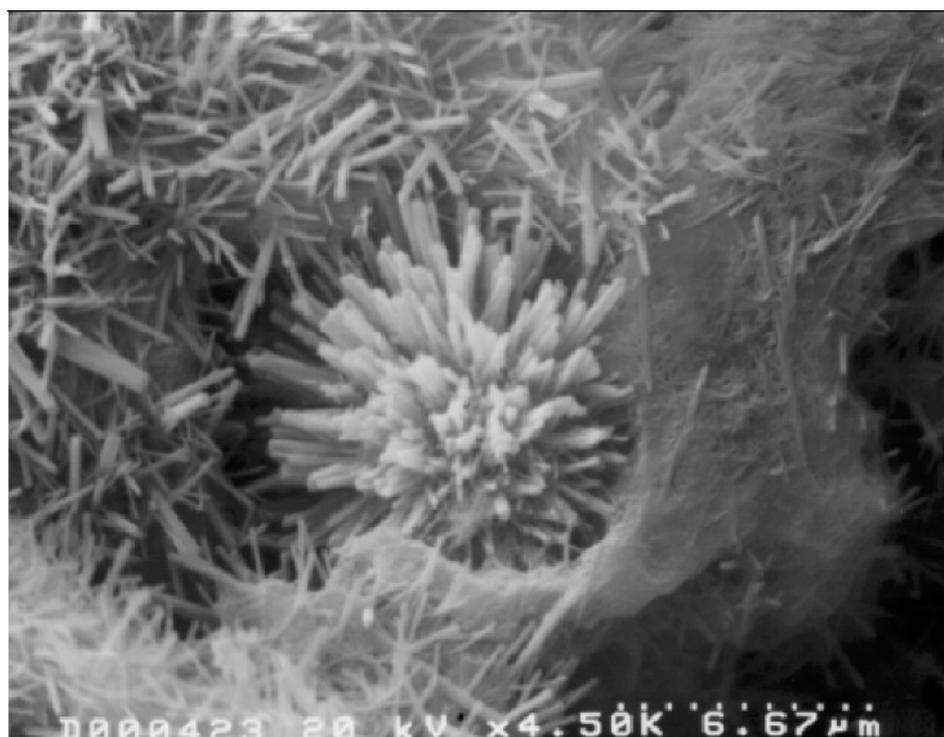


Figura VI-3: Cristales de Etringita.

En la Figura VI-4 se ilustra la estructura cristalina de la etringita pura que es tubular, con columnas y canales paralelos al eje de prismas hexagonales. Las columnas están compuestas por  $\{Ca_6[Al(OH)_6]_2 \cdot 24H_2O\}^{6+}$  donde una cadena de alúmina y tres poliedros de calcio se repiten uniformemente. La molécula de  $[Al(OH)_6]^{3-}$  está vinculado a sus vecinos a través de grupos de tres iones de  $Ca^{2+}$ . El poliedro se completa con las moléculas de agua. Cada poliedro de calcio forma un prisma trigonal con el agua

y los iones  $\text{OH}^-$  ocupando los cuatro ápices. El oxígeno de los iones  $\text{OH}^-$  es compartido entre el calcio y el poliedro de aluminio, formando una cadena continua que se extiende a través del eje de prismas hexagonales. El canal entre las columnas consiste en iones  $[(\text{SO})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]^{6-}$  (Moore y Taylor, 1970).

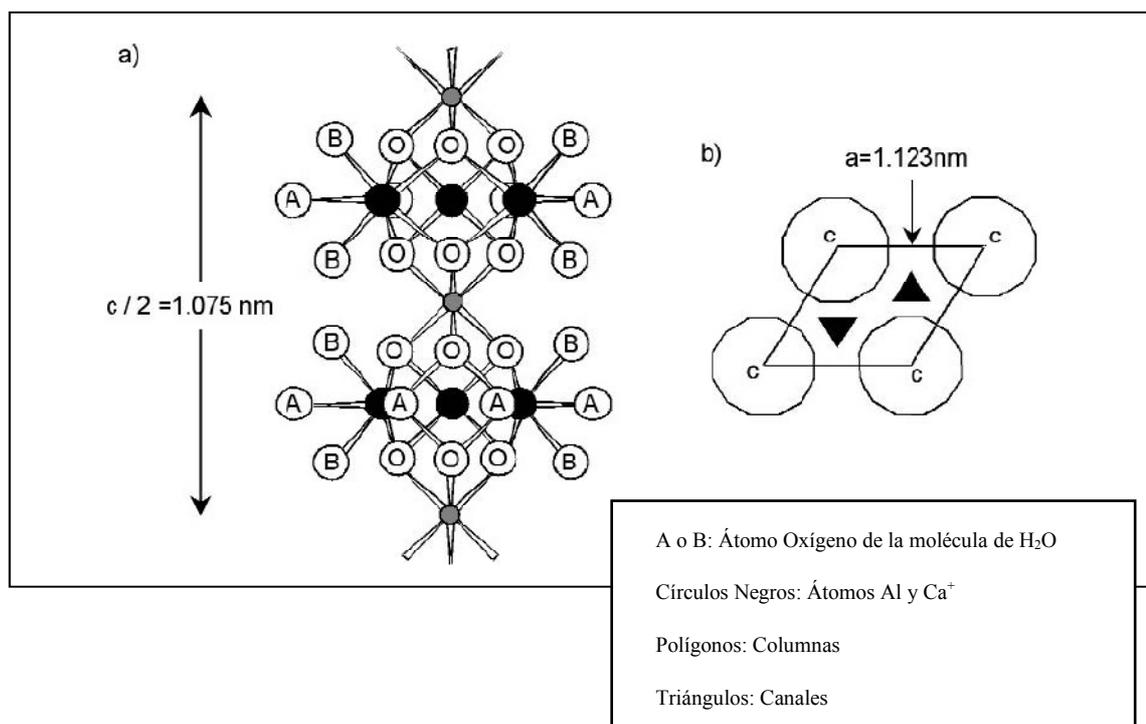


Figura VI-4: Estructura cristalina de la etringita (Moore et al, 1970): (a) Parte de una columna en proyección. (b) Proyección del plano ab.

Las expansiones de los suelos tratados con cenizas FBC, según Hopkins (1995), presentan dos marcados periodos de desarrollo a lo largo del tiempo, tal como lo presenta la Figura VI-5. Una expansión primaria, que alcanza alrededor de un 24%, y una secundaria que sólo hace aumentar el volumen un 4,6% más. El tiempo que demora en producirse ambas expansiones puede ser calculado en base a la teoría de consolidación de Terzaghi (1943).

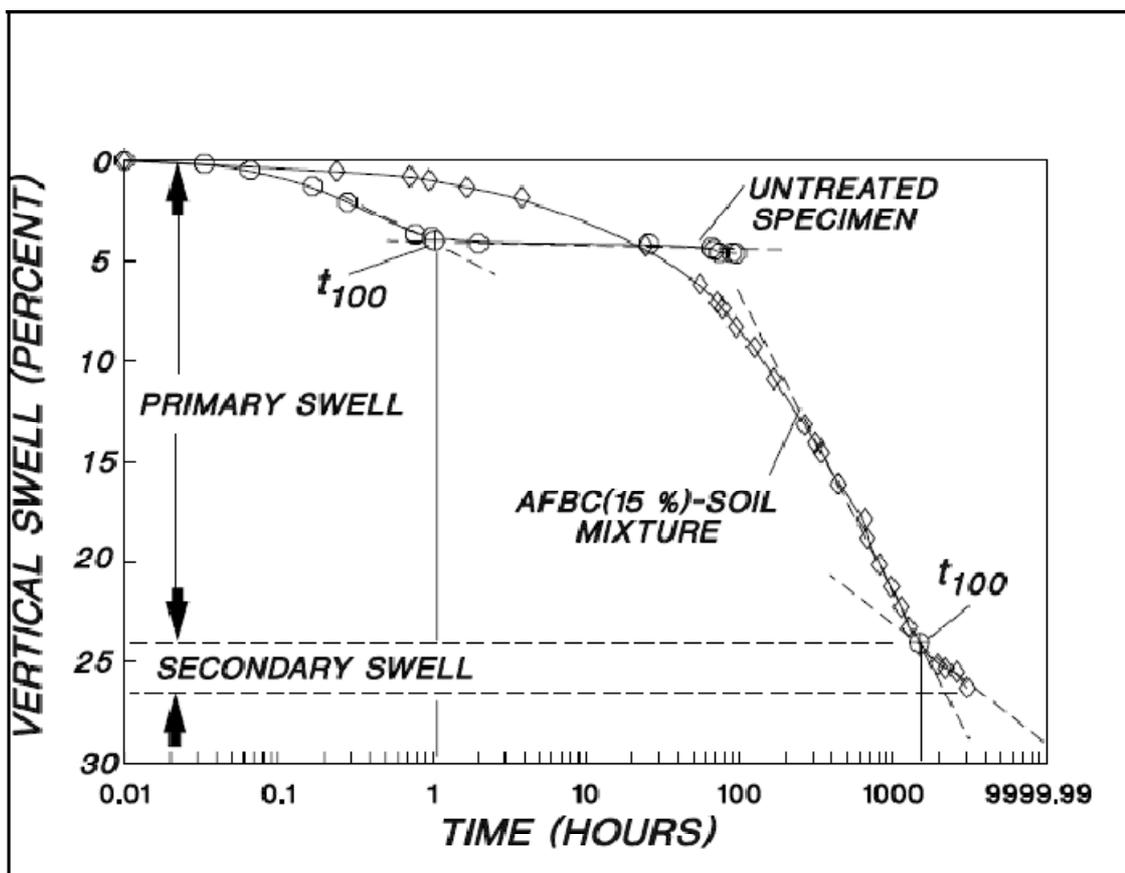


Figura VI-5: Gráfico de la deformación vertical v/s el logaritmo del tiempo de las muestras estabilizadas con cenizas FBC (Hopkins, 1995).

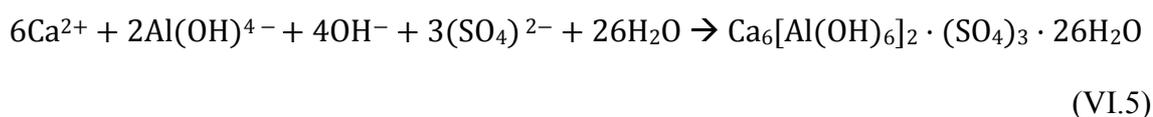
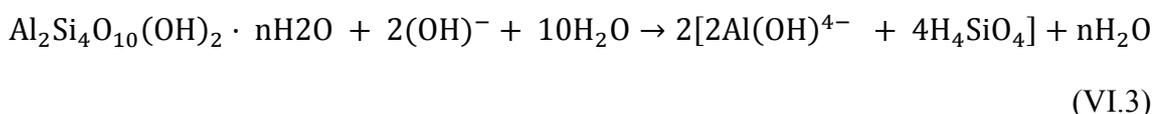
Según Little (2007) la cantidad de etringita que se puede formar depende algunos factores como: (1) la termodinámica que presente la formación de etringita según el tipo de suelo; (2) la cantidad de componentes necesarios que estequiométricamente controlan la masa formada de etringita; (3) la migración de agua y iones de sulfato que facilitan la formación continua de etringita; (4) la fuerza puzolánica de la matriz cementicia; y (5) el arreglo espacial de los cristales de etringita en la matriz. Es posible que la etringita se forme en los vacíos de la matriz, acomodándose sin causar una mayor expansión. Pero también es posible que los cristales de etringita crezcan dentro de una matriz muy densa y no logren acomodarse, provocando la expansión de ésta.

#### VI.4 Antecedentes de la Formación de Compuestos Expansivos

Cuatro son los componentes involucrados en los deterioros producidos por los compuestos expansivos en las estabilizaciones de suelos-ceniza FBC: calcio, alúmina, agua y sulfatos.

El calcio es suministrado por la cal que presenta las cenizas FBC, la alúmina es adicionada por el suelo (arcillas en especial), los sulfatos están también presente en las cenizas FBC y eventualmente en los suelos, por último el agua que es adicionada para provocar la cementación de la mezcla. La formación de etringita y otros minerales similares puede ser prevenida interrumpiendo el abastecimiento de alguno de los cuatro componentes.

Químicamente las reacciones que ocurren son las siguientes:



En primer lugar la cal que tienen las cenizas FBC se hidrata con el agua (ecuación VI.1), ionizándose luego el hidróxido de calcio (ecuación VI.2). Esto consiste en que los iones de calcio presentes en la cal reemplazan los iones de hidrógeno y sodio presentes en la arcilla, esto sucede hasta que las partículas de arcilla quedan saturadas de calcio y el pH del suelo se eleva a 12,4 (pH del agua saturada de cal). A este nivel de pH la sílice y alúmina se vuelven solubles (ecuación VI.3), al igual que los sulfatos (ecuación VI.4).

Todas estas reacciones facilitan la formación de etringita o yeso, según el grado de hidratación que se haya obtenido (ecuación VI.5). La formación y la estabilidad de la etringita en el sistema está controlada por el pH, la temperatura, las concentraciones de iones de CO<sub>2</sub> disuelto (Ouhadi & Yong, 2007) y el abastecimiento de H<sub>2</sub>O (Little and Nair, 2009).

Varios investigadores han tratado de obtener y establecer las ecuaciones para la tasa de formación etringita. La ecuación propuesta por Jander (1927) es la más utilizada. Esta ecuación es la siguiente:

$$\left[1 - (1 - \alpha)^{1/3}\right]^N = Pt \quad (\text{VI.6})$$

Donde:

$\alpha$  : Coeficiente de reacción (fracción de la que ha reaccionado)

t: Tiempo de hidratación

P: Constante de velocidad

Esta ecuación se basa en el supuesto cuando la sustancia A reacciona con la sustancia B, formando AB (Ouhadi & Yong, 2007). Mientras Jander concluía que el valor de N es igual a 2, Minegishi Mori (1968) observó que la cinética de la formación de etringita y, en consecuencia, el valor de N, depende de la variación de la temperatura. Ginstling y Brounshtein (1950) define con más precisión esta derivación. La ecuación planteada por ellos es la siguiente:

$$1 - \frac{2}{3\alpha} - (1 - \alpha)^{2/3} = Pt \quad (\text{VI.7})$$

Donde  $\alpha$  y P expresan lo mismo que en la ecuación de Jander. Esta ecuación tiene la capacidad de considerar el tamaño de las partículas que participan en el proceso de interacción. Plowman y Cabrera (1984) investigaron la cinética de formación de la etringita utilizando aluminato tricálcico, el cual que fue extraído del cemento. En esta instancia la tasa de formación de etringita fue seguida de la siguiente forma:

$$\left[1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}}\right] = (Pt - c)^{1/2} \quad (\text{VI.8})$$

Donde  $\alpha$ , T y P son similares parámetros que se utilizaron en la ecuación de Jander. El parámetro  $c$  es una constante empírica obtenida por el análisis estadístico. En un estudio realizado por LaCroix y Brown (1989), la cinética de formación etringita se evaluó mediante el uso de tri-aluminato de calcio como fuente de formación etringita, y se reorganizó la ecuación sugerida por Jander (1927) y Mori y Minegishi (1968) como sigue:

$$\left[1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}}\right] = Pt^N \quad (\text{VI.9})$$

Ouhadi y Yong en el 2007 realizaron etringita en forma experimental para poder analizar las tasas de formación de ésta, obteniendo los resultados graficados en la Figura VI-6 (a) donde se puede observar que se forma etringita al comienzo del proceso de mezclado, alcanzando el equilibrio después de las 48 hrs. Por su lado, Mitchell y Dermatas (1992) efectuaron mediciones de cantidad de etringita con difracción (XRD) en suelos estabilizados con cal, los resultados quedan plasmados en la Figura VI-6 (b). Esto se puede atribuir al hecho de que la disponibilidad y el flujo de agua son condiciones necesarias para la formación de etringita y en el suelo estabilizado, el cual se encuentra compactado, el transporte requiere de mayor cantidad de tiempo. Además del agua, se filtra en la migración una cantidad significativa de sulfatos, el cual provee una mejor condición para la formación de etringita. Este proceso es bastante lento, que en consecuencia, provoca un retraso en la formación de etringita en el suelo estabilizado. También se pudo concluir que debido a la baja solubilidad de los compuestos de aluminio de la fracción de arcilla, la formación de etringita se rige por el área superficial expuesta de ésta al aumento de pH provocado por la adición de cal. En otras palabras la adsorción de los componentes iónicos presentes, tales como el calcio y el sulfato, sobre la superficie de hidratación de las partículas de arcilla, proporciona las condiciones adecuadas para su interacción con los compuestos de aluminio liberados en la reacción cuando aumenta el pH en la fracción de la arcilla, llevando a la formación etringita (Ouhadi & Yong, 2007)

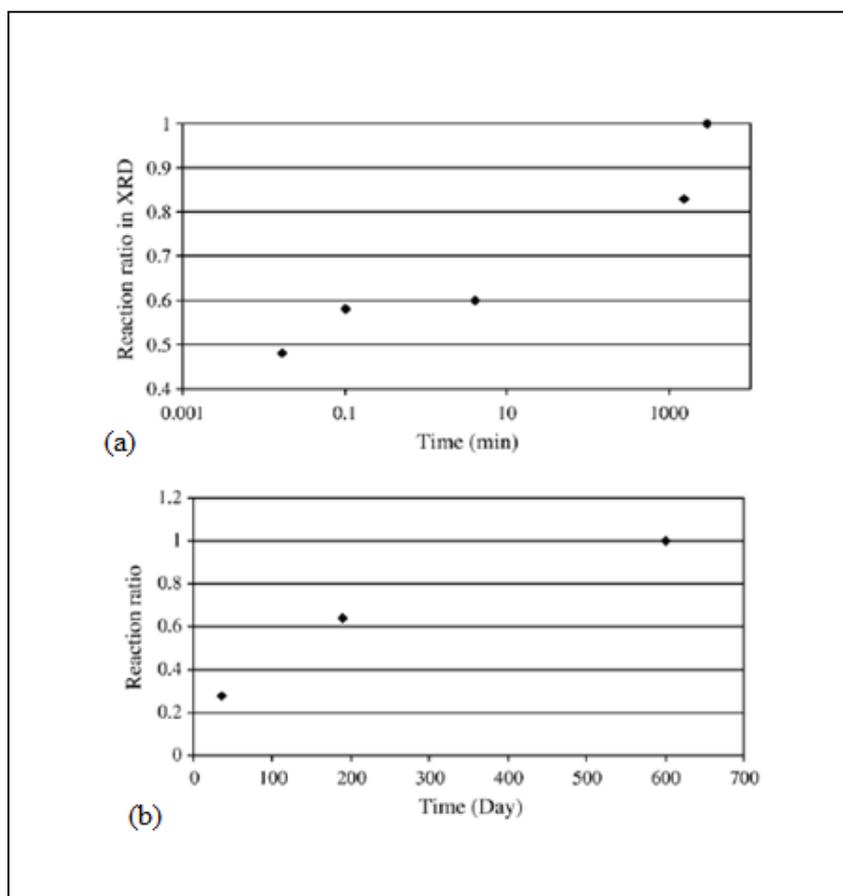


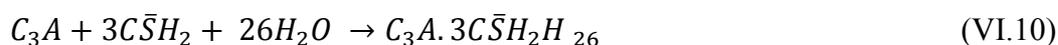
Figura VI-6: Variación del coeficiente de reacción de formación de etringita v/s el tiempo para (a) Etringita artificial y (b) Suelo estabilizado con cal

Existen variadas investigaciones internacionales acerca de la formación de la etringita en pavimentos, pero en ninguna se ha establecido una relación entre la cantidad de etringita formada y los cambios de volumen en la matriz. La expansión producida en el pavimento puede variar según las técnicas de construcción utilizadas; disponibilidad de agua; y el porcentaje de vacío que puede presentar el material.

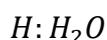
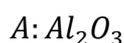
Existen dos teorías que explican la expansión de la matriz (Little et al, 2009). Ambas teorías subyacen en supuestos críticos. El mecanismo topoquímico de precipitación (formación de etringita) respalda un aumento de las presiones de cristalización,

entrelazando y orientando los cristales, provocando la expansión de la matriz. Por otro lado, investigadores que apoyan el mecanismo de formación de etringita por solución sugieren que la absorción de agua por la molécula de etringita es la razón de la expansión. El coloide de etringita en la matriz tiene una alta área superficial y una carga superficial negativa que es capaz de absorber agua causando la expansión. Una combinación de los dos mecanismos es también considerado como una razón de expansión. Independiente de la explicación, el agua es la principal causa de la expansión de la matriz.

Little y Nair (2009) realizaron una investigación que evidencia la importancia del agua en las expansiones producidas por la formación de etringita. Esta establece que para un "sistema cerrado", donde la proporción estequiométrica de los componentes necesarios para formar etringita están contenidos dentro del sistema, el volumen molar del producto (etringita) es menor que el volumen molar de los componentes (aluminio, óxido de calcio, sulfato y agua) que producen la reacción. Esto se puede demostrar usando los cálculos estequiométricos,



Donde:



Basados en la proporción estequiométrica, por cada mol de etringita formado se requiere un mol de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), 3 moles de yeso ( $C\bar{S}H_2$ ) y 26 moles de agua ( $H_2O$ ). De la literatura sabemos que el peso molecular del  $C_3A = 89,1 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ,  $C\bar{S}H_2 = 74,2 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ,  $H_2O = 18,02 \text{ cm}^3/\text{mol}$  y de etringita =  $737,6 \text{ cm}^3/\text{mol}$ . El cambio de volumen asociado con la formación de etringita puede ser determinado por la siguiente ecuación.

$$\Delta \text{Volumen} = \frac{\text{Volumen Productos} - \text{Volumen Reactivos}}{\text{Volumen Reactivos}} \quad (VI.11)$$

Por lo tanto y basados en la ecuación VI.10, el cambio de volumen que ocurre cuando un mol de aluminato tricálcico se combina con tres moles de yeso para formar etringita, consumiendo 26 moles de la matriz, es el siguiente:

$$\Delta Volumen_{Sistema\ cerrado} = \frac{737,6-311,7-468,52}{780,22} = -0,05 \text{ o } 5\% \text{ de contracción.}$$

Donde 311,7 es el peso molecular de C<sub>3</sub>A y de los tres moles de yeso; y 468,52 es el peso de los 26 moles de agua.

En un “sistema abierto”, donde el agua asociada con la formación de etringita entra a la matriz del exterior, la proporción estequiométrica de los reactivos, se traduce en una expansión de la matriz. En este caso, el volumen de los 26 moles de agua no se restan en el numerador, porque el agua se introduce a partir de fuera del sistema.

$$\Delta Volumen_{Sistema\ abierto} = \frac{737,6-311,7}{311,7} = 1,37 \text{ o } 137\% \text{ de expansión.}$$

En un sistema abierto la inclusión de gran cantidad de agua es necesaria para la formación de etringita, traduciéndose en una considerable expansión en la matriz. Esto puede ser debido a la absorción del agua dentro de la matriz de cristal, tal como lo plantea la teoría.

En resumen la expansión inducida por la formación de etringita puede ocurrir por tres razones: (1) agua externa que entra al sistema para formar etringita, (2) agua externa más iones de sulfato (cuando este es el reactivo que limita la formación) que entran al sistema para formar etringita y/o (3) agua adicional que ingresa al sistema que es absorbida por la matriz de cristal.

En esta misma investigación Little realiza probetas con tres tipos de mezclas compuestas con diferentes proporciones de cemento, cenizas volantes y arena. Estas probetas son sometidas a tres formas de curados diferentes, en seco, curado húmedo y absorbiendo sulfatos.

El curado seco consistía en dejar la probeta a 25°C a humedad ambiente, el curado húmedo fue también a 25°C, pero a 100% de humedad relativa alcanzada por absorción

capilar. El curado con sulfatos consistió en someter a las probetas que absorbieran por capilaridad una solución de sulfatos preparada con 50 grs. de reactivo en un litro de agua. Se midió expansión volumétrica y cantidad de etringita todas las muestras. Los resultados se muestran en la Figura VI-7.

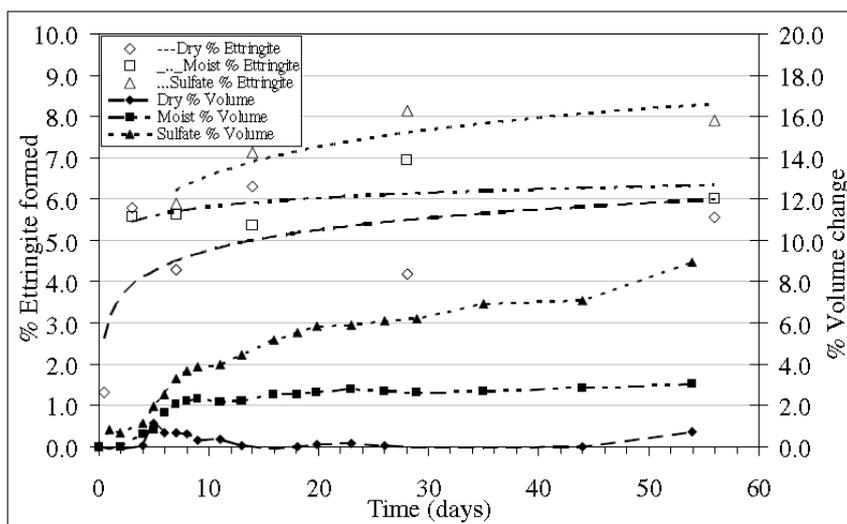


Figura VI-7: Comparación de la concentración de etringita y los cambios de volúmenes (Little, 2009)

Las líneas de color más claro que se presentan en la parte superior de la Figura VI-8 indican el cambio de volumen sufrido por las probetas. En estas es fácil distinguir que las probetas curadas en la solución de sulfato son las que presentaron mayores expansiones llegando hasta más de un 15%, mientras que las probetas que fueron sometidos a un curado húmedo se expandieron a rededor de un 13%, por último las probetas que se curaron en seco son las que presentan menos expansiones. La misma tendencia se presenta con la formación de etringita, la cual fue cuantificada con un calorímetro (DSC: Differential Scanning Calorimeter).

Analizando los resultados observamos que aunque la presencia de agua es crítica en formación de etringita, es el momento en que se introduce el agua lo que determina el nivel de expansión de la matriz. Este hallazgo corrobora la importancia de emplear un

buen drenaje en la práctica proyectándolo desde el diseño y ejecutando en la construcción. Por otro lado se puede considerar que prácticamente toda la etringita fue formada dentro de las primeras 72 horas de curado en las muestras evaluadas, sin embargo, se produjo una expansión mayor en las muestras donde el agua estaba más disponible, pero sin producir un aumento significativo en las cantidades etringita. Esto puede demostrar que la expansión se debió a la absorción de agua en la etringita y no al crecimiento de cristales.

Los resultados también demostraron un nivel mayor de expansión cuando las muestras estaban expuestas a mayor cantidad de sulfatos. Este aumento de volumen se debe a que parte de la formación de etringita está utilizando una fuente externa de agua y con esto adicionando 26 moles de agua que necesita, y también existe mayor disponibilidad de reactivo limitante que es el sulfato. Por esta razón existe una mayor expansión.

En el 2007 Little y Chair realizaron una investigación para analizar los suelos con altos contenidos de sulfatos del estado de Colorado, USA, los cuales se expandían al tratar de ser mejorador con estabilizadores con cal como base. Teniendo en conocimiento que las expansiones eran provocadas por la formación de etringita y taumasita, decidieron analizar cuáles eran las características que hacían a sus suelos propensos a formar compuestos expansivos. Para el análisis utilizaron 5 suelos con las características mostradas en la Tabla VI-4.

Tabla VI-3. Los contenidos de sulfatos de los suelos fueron medidos con el colorímetro (TEX 145-E) y se muestran en la Tabla VI-4.

Tabla VI-3: Fracciones identificadas en los suelos del Colorado, USA (Little 2007).

<b>Soil Type</b>	<b>Sands (%)</b>	<b>Silts (%)</b>	<b>Clays (%)</b>
Ilalaquepts (C1)	70	20	10
Ildefonso (C2)	58	27	15
Berthoud (C3)	37	28	35
Bloom Clay Loam (C4)	19	51	30
Dwyer Loamy Sand (C5)	76	17	7

Tabla VI-4: Concentración de sulfatos solubles al agua medidos con TEX-145E.

<b>Soil Type</b>	<b>Sulfate Content (ppm)</b>
Halaquepts (C1)	1,680
Ildefonso (C2)	2,400
Berthoud (C3)	2,760
Bloom Clay (C4)	11,840
Dwyer loam (C5)	100

Con el fin de investigar la sensibilidad de la formación de etringita a la cantidad de sulfatos presente en los suelos, las concentraciones de sulfato soluble disponibles para reaccionar se fueron variando. Como se observa en la Tabla VI-4 el contenido de sulfato natural de estos suelos es diferente entre ellos y, por lo tanto, para comparar su comportamiento total se varió de 2000 a 20000 ppm los sulfatos disponibles solubles que reaccionan con estos suelos.

La sensibilidad de los cinco suelos de formar etringita se evaluó usando un modelo termodinámico. Estos modelos han sido utilizados con éxito para predecir la disolución y la precipitación de la fase etringita en sistemas complejos (Warren y Reardon, 1994, Myneni et al., 1998, Damidot y Glasser, 1992, Mohamed et al., 1995). Los resultados se presentan en la Figura VI-8.

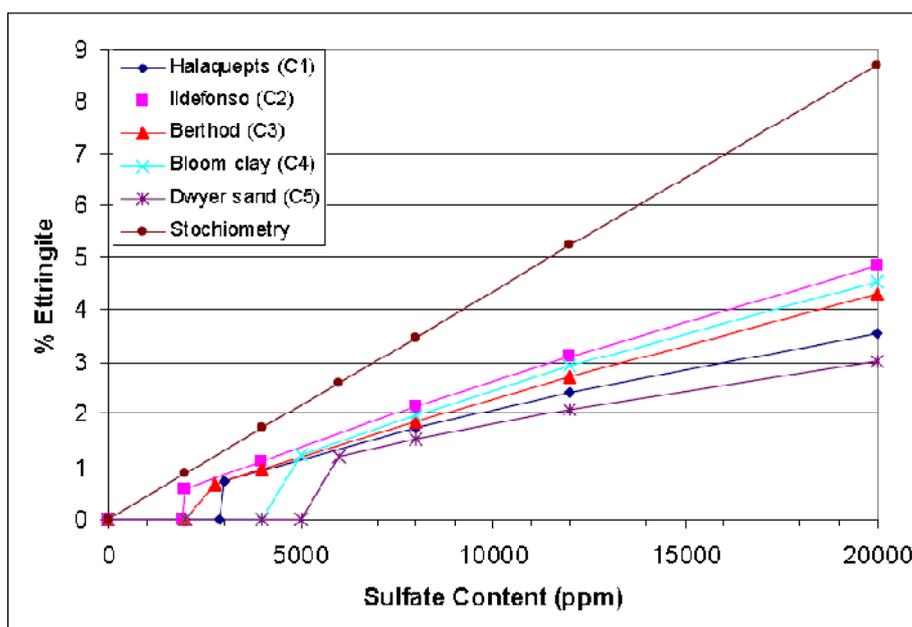


Figura VI-8: Sensibilidad de los suelos de Colorado para formar etringita cada vez con más cantidad de sulfatos solubles.

La reactividad de los suelos para una determinada concentración de sulfato varía en función de la mineralogía de éstos. Una correlación lineal entre el aumento en la concentración de etringita y el aumento contenido de sulfato se muestra en la Figura VI-8. La línea marcada "stoichiometry" representa la cantidad máxima de etringita que teóricamente puede desarrollarse cuando el sulfato es el reactivo limitante. Las concentraciones de etringita son menores que la cantidad dada por la estequiometría. La cantidad de etringita formada en función contenido de sulfato soluble es más alto para los suelos C2, C3 y C4 que para suelos C1 y C5. Por otra parte, la fracción de limo reactivo puede variar entre estos suelos, lo que también puede afectar a la reactividad de estos suelos, pero esto no está comprobado. La liberación de la sílice soluble puede consumir el calcio disponible necesario para la formación del etringita y pudiendo limitar la formación ésta durante los períodos iniciales de hidratación (Wild et al., 1999).

La estabilidad de la etringita resultó ser diferente para cada tipo de suelo. En los suelos C1, C2 y C3 resultó estar en fase estable en concentraciones de sulfato bajas (por debajo de alrededor de 2000 a 3000 ppm.) En comparación con los suelos C4 y C5 que la etringita forma una fase estable sobre 4.000 ppm. para el C4 y 5.000 ppm. para el C5.

La disponibilidad de alúmina puede ser considerada un elemento clave en la formación de etringita, pero no el reactivo limitante. Aunque la tendencia de crecimiento de la etringita sigue de cerca el contenido de arcilla disponible en el suelo, se observó que el porcentaje de peso de etringita no es proporcional a la concentración de arcilla.

Para investigar la influencia de los diferentes iones en la formación etringita, Ouhadi y Yong (2007), realizaron pruebas en muestras variando los siguientes compuestos: sulfato de aluminio, cal y agua destilada.

Ocho diferentes mezclas de sulfato de aluminio, cal hidratada y agua destilada, se prepararon y se les realizó difracción (XRD) para medir la formación de la etringita. En la Figura VI-9 muestra la variación de XRD versus la variación de concentración de sulfato, para mezclas con 0,12 moles de calcio constante. Se puede observar que a medida que la concentración de sulfato va aumentando, la intensidad de formación de etringita crece hasta que llega a los 0,06 moles, donde comienza a disminuir a medida que el sulfato sigue acrecentándose.

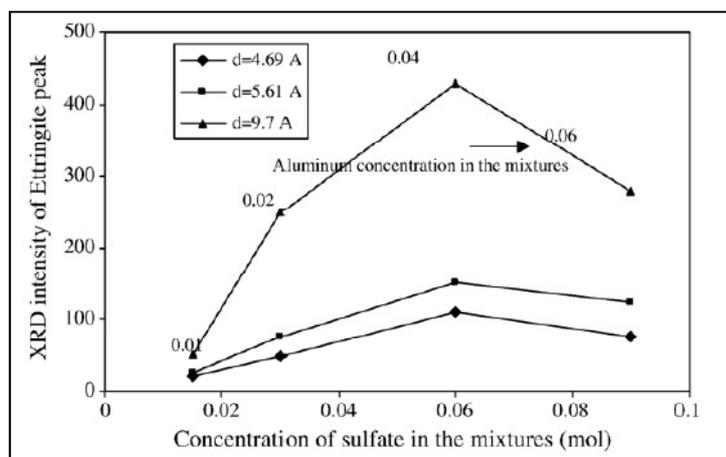


Figura VI-9: Rol de la concentración de sulfatos para una mezcla de 0,12 moles de calcio.

Ahora al analizar la sensibilidad a la concentración de calcio a la máxima cantidad de concentración de sulfato calculado anteriormente, existe nuevamente un peak en la formación de etringita, el cual se encuentra a rededor de los 0,13 moles (Figura VI-10).

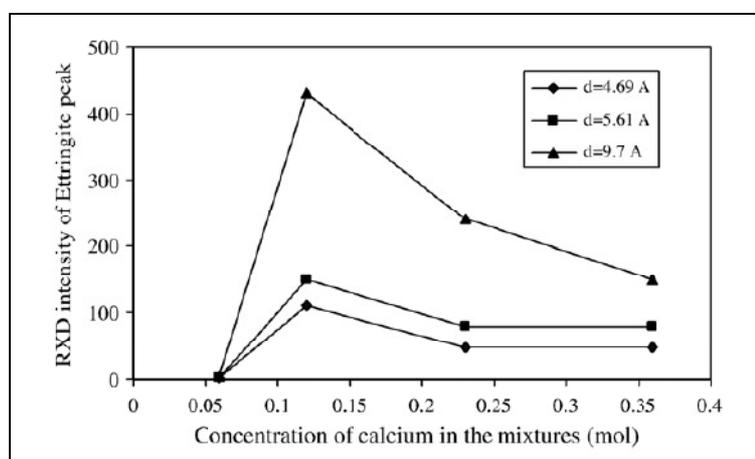


Figura VI-10: Rol de la concentración de calcio hidratado, en una mezcla de 0,04 Alúmina y 0,06 moles de sulfato.

Estos patrones se pueden atribuir a las relaciones estequiométricas de los elementos que forman la etringita. De hecho se observó que en todos los puntos en que los que se alcanza la máxima medición de XRD corresponden exactamente a las proporciones dadas por la estequiometria (ecuación VI.10). Además Ouhadi y Yong concluyeron que la formación de etringita es más sensible a la concentración de sulfatos y alúmina que a la cantidad de óxidos de calcio, esto se puede deducir al comparar la pendiente de los gráficos antes analizados (Figura VI-9 y Figura VI-10) y el rango de variación de los valores de eje horizontal.

## **VI.5 Propiedades de los Suelos Estabilizados con Cenizas FBC**

Entre las propiedades que varían con la adición de cenizas FBC en los suelos están:

### a) Resistencia

Debido a que las cenizas FBC contienen importantes concentraciones cal (óxido de cal) y sulfato de calcio (anhidrita), los cuales reaccionan con agua y otros iones, existe formación de compuestos cementantes. La formación de estos compuestos en etapas tempranas de hidratación permite unir partículas logrando resistencias a la compresión comparables a las de un hormigón pobre (70 a 100 kg/cm<sup>2</sup>). No obstante, las reacciones de expansión producidas por la formación de la etringita provocan una reducción de la resistencia a la compresión. Sin embargo, Deschamps y Tishmack (1999) comprobaron que pese a la disminución en la resistencia de los materiales estabilizados que presentaron expansiones, estos siguieron siendo más resistentes que un suelo rígido natural compactado.

### b) Susceptibilidad al Agua

Al formarse agentes cementantes en etapas tempranas, la susceptibilidad al agua disminuye notablemente con la adición de cenizas FBC. Esta característica es muy importante a la hora de estabilizar suelos que se encuentran constantemente bajo condiciones climáticas adversas.

## c) Plasticidad

La adición de cenizas FBC produce una leve disminución en la plasticidad de los materiales finos. Tal como lo muestra la Tabla VI-5.

Tabla VI-5: Comparación de índices de suelos estabilizados con cenizas FBC

(Hopkins, 1995)

Muestra	% Cenizas FBC	LL	IP	Peso Específico	Granulometría				Clasificación
					No. 4	No. 10	No. 40	No. 200	
1	0%	39	14	2,69	100	91,2	82,4	74	CL
	4%	47	15	2,83	100	91,2	77,5	64	CL
	7%	51	13	2,8	100	91,2	75,6	64	MH
2	0%	43	15	2,8	100	92,4	82	73	CL
	4%	43	12	2,8	100	92,4	80,3	72,6	CL
	7%	49	14	2,8	100	92,4	63,6	48,5	SM

## d) Granulometría

La granulometría de los suelos se hace más gruesa al formarse agentes cementantes, ya que las partículas se aglutinan. Tal como lo muestra la Tabla VI-5

## e) Características de Compactación

Generalmente, se reduce la densidad máxima compactada seca en comparación con un suelo no tratado; se incrementa el contenido de humedad óptimo al aumentar el contenido de cal, por lo tanto la curva humedad-densidad es más llana.

## f) Expansión

Tal como se expuso en los capítulos anteriores, los suelos mezclados con cenizas FBC son propensos a la expansión, dada la formación de etringita.

## VI.6 Experiencias de Estabilizaciones con Cenizas FBC

Son variadas las experiencias que se han tenido con la estabilización mediante cenizas FBC a nivel internacional. Algunas con resultados bastante alentadores, ya que han

comprobado la factibilidad de su uso para ciertos suelos, con y sin problemas de expansión, y por lo tanto se estaría dando uso a un desecho industrial, y otras experiencias con resultados no tan positivos.

En general, el comportamiento de los suelos granulares estabilizados con cenizas FBC no presentan problemas de desempeño de ningún tipo, ya que reaccionan de la misma manera a que estuvieran estabilizados con cal. Sin embargo, cuando se estabilizan suelos con potencial expansión, los resultados son bastantes disímiles, y más aún, la conclusión de las experiencia internacionales es derechamente no estabilizar este tipo de suelos.

### **VI.6.1 Experiencias Internacionales**

El año 1988, Hopkins en cooperación con “Kentucky Transportation Cabinet” propuso realizar un estudio para investigar las fallas prematuras en las subrasantes y en los pavimentos flexibles de Kentucky, USA. Estas fallas se atribuían principalmente a las precarias propiedades ingenieriles que presentan los suelos de ese estado, ya que aproximadamente el 85% de los suelos son arcillas y limos. Cuando estos suelos son compactados inicialmente, suelen alcanzar grandes densidades. Sin embargo, cuando éstos son expuestos a humedad o escorrentías superficiales, las densidades decrecen en forma violenta, ya que absorben agua.

El principal objetivo de esa investigación fue establecer un programa de estabilización química de subrasante, analizando los comportamientos a corto y largo plazo de diferentes estabilizadores como: cal, cemento, cenizas FBC y MKD (multicone kiln dust), en la ruta KY11 con la siguiente distribución:

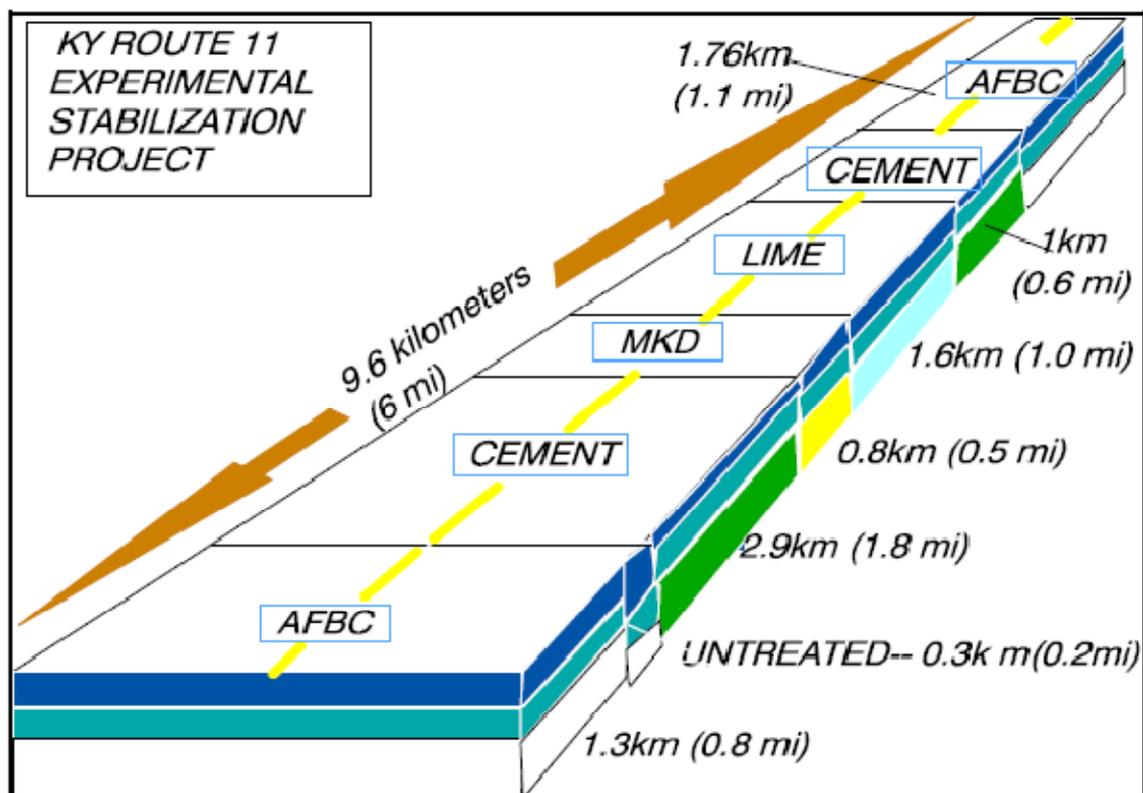


Figura VI-11: Layout tramo de prueba KY-11. (Hopkins, 1995)

El suelo estabilizado fue una arcilla de baja plasticidad en la clasificación USCS (CL), el cual presentaba un Índice de Plasticidad (IP) de 15. Aproximadamente un 70% de partículas pasaba la malla #200 y su CBR era de 3,7%.

El estudio inicial de laboratorio arrojó que añadiendo 7% de ceniza FBC con respecto al peso seco, iba a producir un aumento en la capacidad de soporte del suelo alcanzando un CBR de 48% y la Resistencia a la Compresión no Confinada (UCS) aumentaría a lo menos cuatro veces. También se sumergieron especímenes por 96 horas bajo el agua y sólo presentaron expansiones verticales de un 3,3%.

A los dos meses de la construcción del tramo de prueba, ocurrieron grandes expansiones diferenciales. Esto sucedió inmediatamente después del período de lluvias. El pavimento se levantó en todo el ancho de la franja y en forma perpendicular a la línea central de la

calzada. Las máximas deformaciones medidas llegaron a estar entre 1,8 cm hasta 8,8 cm, tal como muestra la Figura VI-12. En las secciones estabilizadas con cemento, cal y MKD, las expansiones no superaron el centímetro.

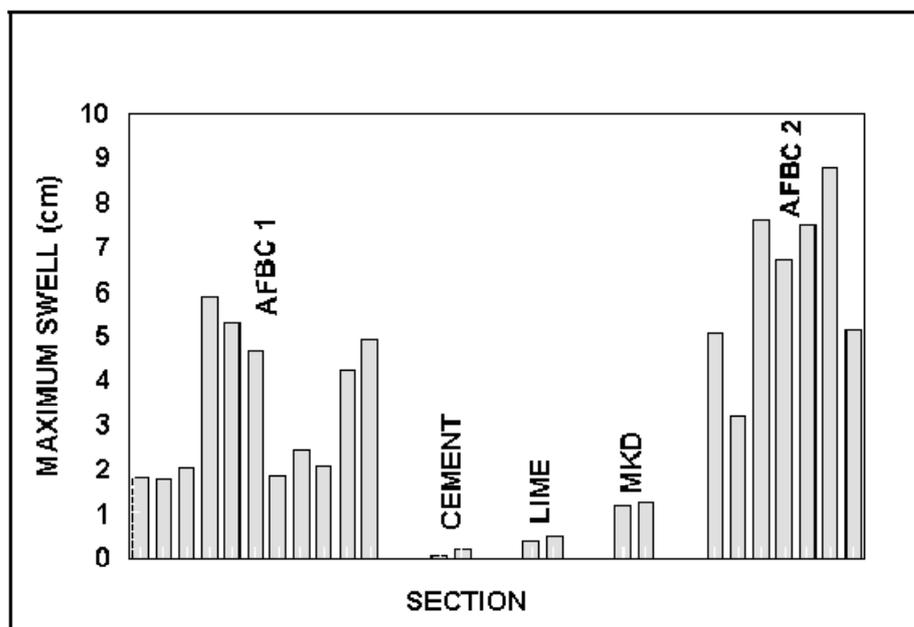


Figura VI-12: Máximas expansiones medidas entre Octubre 1987 y Agosto 1988

(Hopkins, 1995)

Sin embargo, los CBR de las locaciones con mayores expansiones no fueron necesariamente los que presentaron valores más bajos. En un lugar donde se presentaron expansiones el CBR medido fue de 38% mientras donde no se presentaron problemas de hinchamiento el CBR medido fue de 40%. En ambos casos la humedad del suelo fue de 16%. No obstante, en Abril 1988 nuevamente se realizaron estas mediciones y el CBR había variado en el área de mayor expansión a 13%, mientras que el otro sitio sólo había disminuido a 37%. Las humedades medidas esa vez fueron de 36 y 27% respectivamente.

Las especificaciones requeridas señalaban una compactación al 95% de la máxima densidad seca  $\pm$  2% del contenido de humedad óptimo. La razón de compactación entre

la densidad de terreno y la densidad calculada en el laboratorio del suelo sin tratar alcanzó una razón del 99%, mientras el suelo estabilizado con cenizas FBC alcanzó sólo el 95%.

El tramo se monitoreó por más de 12 años. Las humedades aumentaron a medida que pasó el tiempo en los suelos estabilizados, de un 29 a un 39%. A pesar que las humedades aumentaron el CBR no presentó grandes disminuciones (Figura VI-13).

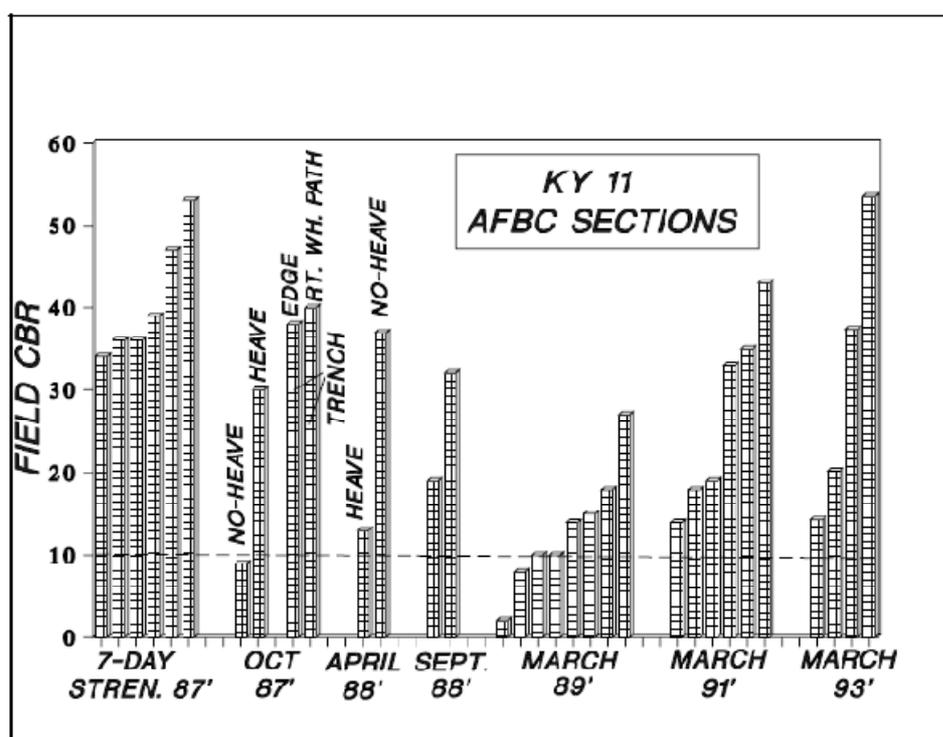


Figura VI-13: CBR evaluado en terreno por 6 años (Hopkins, 1995)

Sin embargo, los valores de CBR medidos en terreno a la subrasante estabilizada fueron en promedio mucho mayores que en las subrasantes no tratadas, tal como se en Figura VI-14 concluyendo que a pesar de las expansiones, la estabilización funciona.

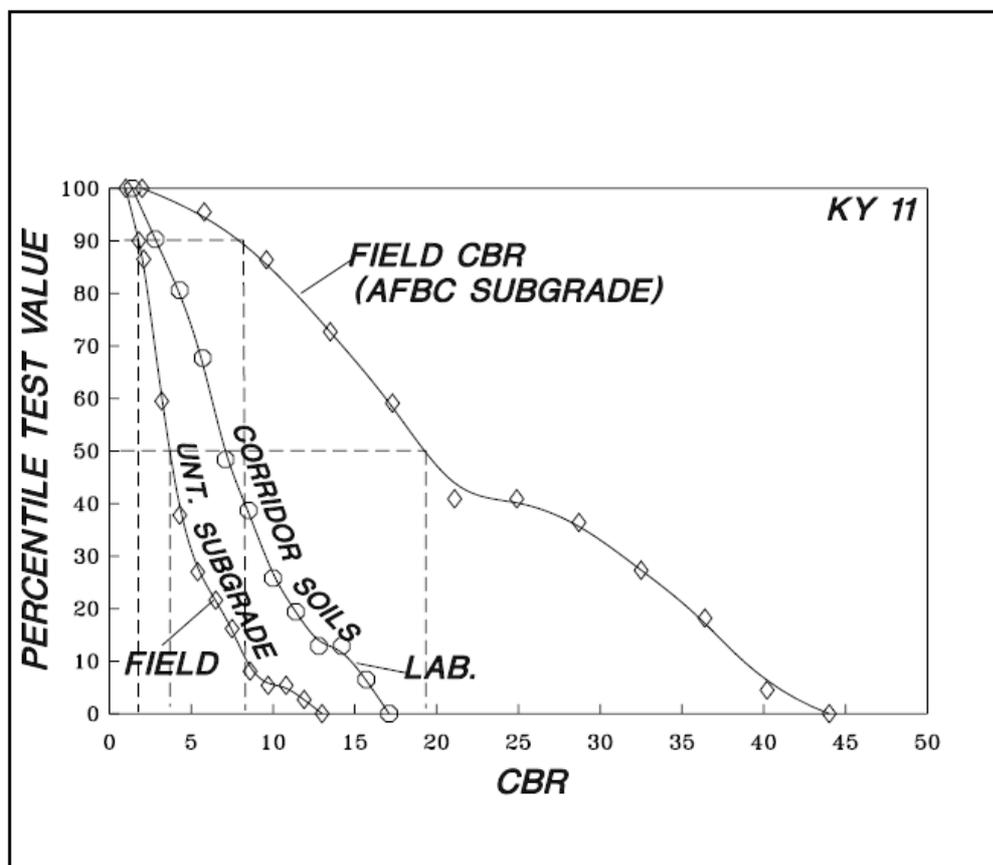


Figura VI-14: Test de percentil mayor en función de los CBR medidos en terreno

(Hopkins, 1995).

### VI.6.2 Experiencias Nacionales

En el año 2005, en nuestro país se decidió evaluar la efectividad de las cenizas FBC, dada la existencia de la planta cogeneradora PETROPOWER, en la VIII Región, que genera esta ceniza como desecho. Para esto se realizaron dos pruebas en terreno. La primera estabilizando un camino de material granular no plástico, por el cual transitaba un alto número de camiones, en los caminos interiores de la planta de ENAP. El segundo un camino de material arcilloso de alta plasticidad, que tenía un tránsito menor de

camiones, y que fue realizado en un fundo de un particular llamado Ecobel, en la VII región.

a) Tramo de Prueba ENAP

El primero fue en un camino interno de la planta de ENAP Refinerías Bío-Bío ubicada en Talcahuano.

El material natural del camino era una base granular, y se decidió estabilizar con un 4,8% de cenizas FBC, basado en la dosificación realizada previamente en laboratorio. El camino fue dividido en dos tramos, uno con protección superficial y uno sin. Durante el período de seguimiento se observó un deterioro mayor en el tramo sin protección superficial, esto demuestra la importancia de la utilización de un sello de protección, ya que bajo las mismas condiciones de tránsito y clima, la diferencia de la condición funcional entre las secciones fue importante. El tramo no presentó aparentemente problemas de expansión.

Se realizaron mediciones de deflectometría de impacto liviano (PRIMA 100) al final del período de evaluación. A partir de estos resultados se pudo observar que existen diferencias importantes en la capacidad de soporte de las distintas secciones que componen el tramo de pruebas. La sección estabilizada y con sello protector fue la que mostró el valor más alto del módulo, aumentando la capacidad de soporte del material en más 4 veces, llegando hasta 450 MPa.

b) Tramo de Prueba Ecobel

El otro tramo de prueba fue construido en un camino de acceso al Fundo San Jorge, Nueva Aldea, VIII Región. Este material correspondió a un suelo arcilloso de clasificación USCS "SC" con 45% de materiales finos y un Índice de Plasticidad de 18. Se construyó una sección adicionando un 10% de cenizas y otra sección utilizando un 5% de cenizas. Esto con el fin de evaluar la diferencia en el comportamiento estructural y funcional de ambas secciones, dado que el estudio previo de laboratorio arrojó que la dosis óptima de estabilizador era de un 5%. También se construyó una sección con

material natural sin estabilizar como tramo patrón, para contrastar su comportamiento con los tramos estabilizados. Las tres secciones recibieron la aplicación de un sello superficial.

Luego de 8 meses de funcionamiento, y habiendo comenzado la temporada lluviosa se pudieron observar diferencias en el comportamiento de las tres secciones. La construida sin agregar ceniza se mostraba considerablemente afectada por baches, lo cual se debe a la baja resistencia a los cambios de humedad que presenta este tipo de suelos. La sección estabilizada con un 10% de ceniza es la que mostraba un mayor deterioro, ya que se presentaron grandes expansiones generando grietas, las cuales en presencia de agua hicieron colapsar el pavimento. Por otra parte, la sección estabilizada con la dosis óptima de 5% de ceniza, se mostró en perfecto estado, con una superficie libre de grietas y baches.



Figura VI-15: Tramos de Ecobel después de 8 meses de funcionamiento en temporada lluviosa.

Se realizaron mediciones de la capacidad de soporte con deflectómetro de impacto liviano (PRIMA 100), luego de una semana de ejecutada la estabilización. Pasado un mes, se volvieron a medir los mismos puntos evaluados en la primera etapa. A partir de los datos recopilados se concluyó que no existe evidencia de aumento de la capacidad de soporte en los tramos estabilizados respecto al tramo patrón. Lo anterior puede deberse a

que al momento de construir se observó que el camino que se estabilizaría tenía incorporado material granular integral, lo que mejoraba las propiedades del sector. Tampoco es posible observar un incremento importante en la resistencia observada a una semana y a un mes de construida la estabilización. Esto puede deberse a que las reacciones de corto plazo ya se habían desarrollado al cabo de una semana y las reacciones de largo plazo necesitan más tiempo para ocurrir y también necesitan la presencia de agua. Como la evaluación se realizó en un período seco, el agua necesaria no se encontró disponible lo cual produjo una evolución lenta de la resistencia.

## **VI.7 Consideraciones Sobre el Uso de Cenizas FBC**

Las consideraciones constructivas son, en general, similares a aquellas correspondientes a la ceniza volante tradicional con respecto a compactación, curado, condiciones ambientales, etc. En cuanto a las consideraciones generales se debe tener precaución con las siguientes variables:

### **a) Tipo de Suelo**

Se debe tener especial consideración con aquellos factores que podrían favorecer las características expansivas del material estabilizado. En este sentido, la cantidad de alúmina presente y el pH del suelo son los factores más importantes en la formación de materiales expansivos.

### **b) Formación de Compuestos Expansivos**

Otro factor importante es el contenido de humedad. Es importante que el material cuente con la humedad suficiente para formar los minerales expansivos al comienzo de la estabilización, de manera de prevenir la formación de éstos una vez que se ha construido el pavimento. Si no se ha suministrado la humedad necesaria, existen mayores riesgos que las capas estabilizadas al entrar en contacto con agua durante su funcionamiento generen estos compuestos que provocarían una disminución de la resistencia alcanzada.

También se recomienda que el material no sea compactado hasta su máxima densidad, ya que de esta manera no se está dejando espacio para la formación de los minerales expansivos, creando más posibilidades de que la estructura falle por las tensiones provocadas durante la expansión.

c) Sulfatos

La presencia de sulfatos en las cenizas es considerada generalmente como un aspecto perjudicial para la estabilización, debido que produce la formación de elementos expansivos.

## **VI.8 Antecedentes Ambientales del Uso de las Cenizas FBC**

Los subproductos de la combustión de coke de petróleo son normalmente ricos en vanadio, níquel y otros metales potencialmente dañinos. Sin embargo, son los primeros dos los que provocan mayor preocupación. A continuación se presentan las principales características de estos componentes y la forma en que afectan a la salud del hombre. También se presentan las concentraciones máximas permitidas por el Ministerio de Salud de Chile y por algunas instituciones internacionales.

### **VI.8.1 Níquel**

El níquel es un compuesto natural que se puede encontrar en variadas formas minerales. Sus aplicaciones son variadas, incluyendo procesos metalúrgicos y componentes eléctricos, como las pilas

La absorción del níquel es dependiente de la forma química en que se encuentre, las formas solubles en agua son más fácilmente adsorbidas. La mayor parte del níquel entra al organismo a través de los alimentos y el consumo de agua.

En grandes dosis (mayores a 5g), algunas formas de níquel pueden ser tóxicos agudos para el ser humano cuando se toman de manera oral. Los órganos blanco para la

toxicidad sistemática del níquel son los pulmones y el tracto respiratorio superior, para la exposición por inhalación, y los riñones para la exposición oral (Barra, 2005).

Existen dos compuestos en el listado del reglamento de residuos peligrosos: el níquel carbonilo ( $\text{Ni}(\text{CO})_4$ ) que en condiciones normales de presión y temperatura es un gas, por lo cual es difícil que lixivie. La otra forma de níquel que está regulada es el cianuro de níquel ( $\text{Ni}(\text{CN})_2$ ), que es un compuesto insoluble en agua, por lo cual también es difícil que se lixivie (DS N°148, MINSAL, 2004).

### **VI.8.2 Vanadio**

El vanadio es un elemento metálico que existe en seis estados de oxidación y en forma de numerosos compuestos inorgánicos. El vanadio se utiliza como un agente de aleación en la industria del acero y metales no ferrosos y como catalizador en aplicaciones químicas y cerámicas.

Los compuestos de vanadio son principalmente absorbidos por los pulmones, distribuyéndose en los huesos, riñones e hígado. En California, USA, las concentraciones máximas totales permitidas en residuos sólidos son de 2400 mg/kg y se permite un máximo de 24 mg/dm<sup>3</sup> en el lixiviado (Vargas, 2006).

Un estudio que analizó los compuestos en una ceniza de características muy similares a aquella utilizada en esta investigación concluyó que no existía la presencia de óxidos de vanadio, de los cuales depende la toxicidad del vanadio. Esto debido a que las condiciones de combustión impiden la producción de dichos óxidos (Barra, 2005).

Estudios recientes con cenizas volantes de una mezcla de petcoke/carbón concluyen que el Ni y V están asociados a la fracción no magnética de las cenizas y con materiales insolubles al agua. No existe una lixiviación significativa de Ni y V, en pruebas del lixiviado (TCLP) (Henke, 2005).

Hasset y Heebkink el 2001, evaluaron los riesgos toxicológicos del uso de una mezcla de cenizas de carbón petcoke (10%) como aditivo para el mejoramiento de suelos. Los resultados de estas pruebas indicaron que la toxicidad de los lixiviados de los suelos

mejorados con cenizas era casi equivalente a la toxicidad observada con el lixiviado de un suelo tratado con cal.

Las concentraciones máximas de níquel y vanadio en el elutriado de dichos experimentos fueron de 10 y 340  $\mu\text{g/L}$  respectivamente. La recomendación que surge de estos estudios es utilizar un porcentaje determinado de cenizas en la mezcla utilizada para mejorar suelos, este porcentaje va entre un 6-15%.

### **VI.8.3 Estudio de Impacto Ambiental Cenizas FBC**

Entre septiembre de 1999 y julio del 2000 se realizaron análisis químicos a las cenizas producidas por la caldera de Petropower (ENAP), con el fin de determinar su peligrosidad. Para realizar este trabajo, ENAP contrató los servicios de la Unidad de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción.

Los análisis se desarrollaron en laboratorios especializados de Concepción y Santiago (laboratorios de la Universidad de Concepción y Centro Nacional del Medioambiente, CENMA). Se realizaron en total tres muestreos de cenizas, con el objetivo de realizar los análisis de contenido de níquel, contenido de vanadio y test de lixiviación.

Los análisis químicos entregaron valores para el contenido de níquel entre 1497-2149 ppm para la ceniza FBC. Los valores encontrados para el contenido de vanadio variaron desde 3437 ppm hasta 6227 ppm.

La lixiviación se observó mediante el Test de Lixiviación denominado TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure), método de la EPA. Este test fue realizado por dos laboratorios, el de la Unidad de Desarrollo Técnico de la Universidad de Concepción (UDT) y el del CENMA. La concentración de níquel observada en la muestra de lixiviado fue de 0.02 mg/l según la UDT y de 0.06 mg/l según el CENMA. La concentración de vanadio observada en la muestra de lixiviado fue de 0.45 mg/l según la UDT y 0.34 mg/l según el CENMA.

Este estudio concluyó que de acuerdo a la norma nacional de manejo de residuos peligrosos y los parámetros inorgánicos indicados en el estándar EPA 1311

(Environmental Protection Agency) las cenizas producidas por Petropower no son tóxicas por lixiviación, no son corrosivas ni reactivas (Vargas, 2006).

## VII PROGRAMA DE LABORATORIO

Según las experiencias internacionales y nacionales narradas en el Capítulo VI.6 las cenizas FBC presentan un excelente comportamiento al estabilizar materiales granulares, mejorando sus propiedades tales como capacidad de soporte, estabilidad bajo agua y estabilidad volumétrica. No obstante, presentan problemas serios a la hora de estabilizar suelos con potencial de expansión, el cual está definido por el contenido de sulfatos de que presenten éstos.

Vargas (2006), en su investigación recomendó un método de dosificación de cenizas FBC, que definía la dosis óptima de ceniza como aquella que proporciona la mayor Resistencia a la Compresión no Confinada seca sin provocar expansiones nocivas para la estabilización. Por lo tanto, la dosis utilizada de cenizas FBC quedaba limitada por la expansión que presentarían las mezclas. Este criterio no presenta ningún problema en materiales granulares, dado la nula expansión existente, pero si limita bastante el porcentaje adicionado en suelos potencialmente expansivos. Esta limitación convierte la estabilización química con cenizas FBC en una forma poco eficiente de utilizar un residuo industrial que diariamente se produce en el orden de 70 a 80 toneladas.

Esta se convirtió en la principal motivación de la investigación, ya que se hace necesario diseñar un procedimiento de laboratorio que permita identificar los suelos potencialmente expansivos y poder dosificarlos sin mayores limitaciones que las ambientales.

Para este análisis fue necesario evaluar las propiedades mecánicas y de desempeño de las mezclas, comparando los resultados de ensayos practicados en el laboratorio sobre el suelo en su estado natural y después de tratados con el estabilizador químico.

Para el estudio se utilizaron los suelos finos y arenas según el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS).

El programa de laboratorio se dividió en 6 etapas:

1. Ensayos de caracterización: Caracterización físico y químico de los materiales a utilizar (cenizas FBC, suelos y mezclas suelo-cenizas FBC).
2. Ensayos de evaluación preliminar: Destinados a determinar las reacciones de estabilización y expansión, que se producen en el suelo producto a la adición de cenizas FBC.
3. Re-evaluación criterios de dosificación: Realizada para encontrar la dosis óptima de cenizas de los suelos utilizados en la investigación. Esto se procedió utilizando una versión mejorada de la propuesta de dosificación propuesta por Vargas (2006).
4. Determinación del tiempo de maduración óptimo de la mezcla: Con el objetivo de permitir la formación de etringita temprana. Las mezclas fueron dejadas al aire libre antes de compactar y bajo estas condiciones se midió la disminución de la expansión y la resistencia de los suelos estabilizados.
5. Ensayos de doble estabilización: Se realizaron pruebas de segundas estabilizaciones, adicionándole más cenizas FBC y también mezclando el material estabilizado con suelo granular.
6. Variaciones de las propiedades físicas: El objetivo fue analizar la variación de las propiedades (Índice de Plasticidad y susceptibilidad al agua) que determinan si varía la trabajabilidad del material al ser mezclado con cenizas FBC.

Para evaluar y comparar el desempeño de las mezclas, en todas las etapas y a cada una de las probetas se realizaron los siguientes ensayos:

- Ensayo de Resistencia a la Compresión: para determinar los cambios en la capacidad de soporte.
- Ensayo de Expansión: para evaluar la estabilidad volumétrica de la mezcla.
- Ensayo de Estabilidad Bajo Agua: para evaluar la estabilidad del material bajo condiciones de saturación.

## **VII.1 Ensayos de Caracterización de Materiales a Utilizar**

### **VII.1.1 Caracterización de Cenizas FBC**

Las cenizas utilizadas en esta investigación se obtuvieron de la planta cogeneradora PETROPOWER, la cual produce energía eléctrica mediante el proceso de Combustión de Lecho Fluido (FBC), localizada en la VIII Región del Bío-Bío en nuestro país.

Cabe destacar que a pesar de existir dos tipos de cenizas FBC, cenizas de fondo y cenizas volantes, en la investigación se utilizó directamente la mezcla de éstas, tal como es entregada por el silo colector. De esta manera, las cenizas utilizada estaban compuestas por un 60% ceniza volante y 40% ceniza de fondo (Vargas, 2006). La razón de esta decisión, teniendo en conocimiento que cada una de las fracciones presentan características disímiles analizadas ya en la investigación de Vargas, fue que se priorizó ocupar el residuo completo y no sólo una parte de este.

Previo al desarrollo de los ensayos de laboratorio fue necesario conocer las características principales de la ceniza FBC, en particular las características físicas y químicas de éste que puedan estar relacionadas con su comportamiento individual o en conjunto con el suelo.

A lo largo de la investigación se utilizaron para los ensayos dos series de cenizas FBC. La primera capturada por ENAP en Abril del 2008 y la segunda capturada en el mes de Octubre del 2008. Durante la investigación los únicos suelos que fueron trabajados con la cenizas de la muestra N°1, fueron los de Arauco.

Para cada muestra se realizaron los siguientes ensayos:

- Caracterización Química Inorgánica: Con el fin de determinar cuáles son los principales compuestos químicos presentes en la ceniza FBC.
- Pérdida en Peso por Calcinación (1000° C): Disminución de peso de la muestra al ser sometida a un proceso de calcinación a 1000° C. Esta disminución de peso

corresponde a presencia de material orgánico, compuestos inorgánicos volátiles a esa temperatura, o bien agua de cristalización.

- **Análisis de Cal Libre:** Para determinar la disponibilidad de cal en la ceniza FBC. Este dato es importante dado que la cal es el principal agente estabilizador presente en estas cenizas.
- **Determinación de especies cristalinas:** Para determinar los minerales presentes en la ceniza FBC. Fue realizada mediante el método de Difracción de Rayos X (XRD).
- **Granulometría:** A través de este ensayo se puede conocer la distribución de partículas de las cenizas y la finura de ésta. Este dato es importante al momento de evaluar la reactividad de las cenizas, ya que mientras más fina es la ceniza, más reactiva será.

Los ensayos para la caracterización de las cenizas FBC se realizaron en el Centro de Estudios de Medición y Certificación de Calidad, CESMEC S.A.

### **VII.1.2 Caracterización de los Suelos Utilizados para la Investigación**

Para poder analizar el comportamiento de la mezcla de suelos potencialmente expansivos con cenizas FBC, se utilizaron suelos que según el sistema USCS son llamados suelos finos tales como: Arcilla de alta y baja plasticidad (CH y CL), Limos de alta y baja plasticidad (MH y ML). De los suelos gruesos sólo se emplearon arenas arcillosas (SC) y arenas limosas (SM). Los demás suelos de la clasificación se descartaron, ya que la bibliografía indica que las gravas no presentan problemas de expansión y los suelos orgánicos no pueden utilizarse como fundación de una vía.

Para cada suelo se realizaron los siguientes ensayos:

- Clasificación de Suelos.
- Límites de Atterberg.
- Ensayo de CBR.
- Ensayo Proctor Modificado.

- Medición de pH.

### VII.1.3 Caracterización de la Mezcla Suelo-Cenizas FBC

Como se mencionó en el Capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** la adición de cenizas a los suelos provoca cambios en sus propiedades índices. Para corroborar esta sentencia se analizaron las propiedades de las mezclas de cada tipo de suelo.

Para cada mezcla suelo-cenizas se realizaron los siguientes ensayos:

- Clasificación de Suelos.
- Límites de Atterberg.
- Ensayo de CBR.
- Ensayo Proctor Modificado.
- Medición de pH.
- Medición cantidad de Alúmina y Sulfatos.

### VII.2 Ensayos de Evaluación Preliminar

El objetivo de los siguientes ensayos fue determinar las reacciones de estabilización y expansión, que se producen en el suelo producto a la adición de cenizas FBC. Los ensayos realizados fueron:

- a) Dosis inicial de cenizas FBC

Durante la revisión bibliográfica se obtuvieron antecedentes sobre el Ensayo *Eades and Grimm*, el cual es utilizado para determinar la dosis mínima de cal que produce reacciones puzolánicas en el suelo. Este ensayo se modificó y se utilizó para medir la dosis inicial de cenizas FBC. En el Anexo B se presenta en protocolo del ensayo.

El ensayo consiste en medir el pH de mezclas de suelos con distintas dosis de cenizas FBC, en un medio acuoso. La mínima dosis de cenizas que eleva el pH de la mezcla a 12,4 se define como la dosis inicial de cenizas FBC. Se sabe que en ambientes con pH



Tabla VII-2: Matriz Experimental Contenido de Sulfatos.

Suelo		Contenido de Sulfatos (ppm)
Minico	PC-1B	
	PC-54A	
	Peñablanca	
Ecobell	0%	

### VII.3 Metodología de Dosificación y Fabricación de Probetas

#### VII.3.1 Dosificación

En la investigación de Vargas (2006), se diseñó la forma en que se determinarían las cantidades de agua y ceniza FBC que se debían adicionar a la cantidad de material que se deseara estabilizar, considerando lo siguiente:

- La cantidad de ceniza FBC adicionada a la mezcla se calculó con respecto a la porción de material que pasa la malla #40, ya que la fracción que reacciona con las cenizas es la parte más fina del material. Por esta razón, los porcentajes de las dosis de cenizas se nombrarán siempre en base al pasante del tamiz #40.
- Para calcular la cantidad de agua que se debe adicionar a la mezcla, se consideró que la parte que reacciona con el agua es la parte volante de las cenizas, y es necesario hidratarlas en un 100% para aprovechar toda su capacidad cementante. Por lo tanto, se adicionó la cantidad de agua correspondiente al peso del 60% de las cenizas, correspondiente a la parte volante de éstas.

A partir de lo mencionado, las cantidades que conformarán la mezcla están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$M_S = \frac{M_{ST}}{(1 + d_{FBC} \times P_{40})} \quad (\text{VII.1})$$

$$M_{FBC} = M_{ST} - M_S = M_{ST} \left[ 1 - \frac{1}{1 + d_{FBC} \times P_{40}} \right] \quad (\text{VII.2})$$

$$M_W = M_S \times w_{opt} + 0.6 \times M_{FBC} = M_{ST} \left[ \frac{0.6 \times P_{40} \times d_{FBC} + w_{opt}}{P_{40} \times d_{FBC} + 1} \right] \quad (\text{VII.3})$$

Donde,

- MS : cantidad de suelo seco (g). Este corresponde a material bajo malla 3/8".
- MFBC : cantidad de ceniza FBC (g).
- MW : cantidad de agua (g).
- MST : cantidad de sólidos para preparar las probetas (normalmente 280 a 300 g).
- w<sub>opt</sub> : humedad óptima de compactación del suelo, de acuerdo al ensayo Proctor Modificado (expresado en forma decimal).
- d<sub>FBC</sub> : dosis de ceniza FBC (porcentaje c/r al suelo bajo malla #40, expresado como fracción decimal).
- P<sub>40</sub> : proporción del material bajo malla 3/8", que pasa la malla #40 (porcentaje expresado en forma decimal).

### VII.3.2 Protocolo para Preparación de Probetas y Ensayos

Una vez determinadas las cantidades que conformaban la mezcla, se procedió a preparar las probetas que posteriormente se ensayarían. Este protocolo fue adaptado de la recomendación realizada por de Vargas (2006). Los cambios que se realizaron fueron en basados en la bibliografía actualizada.

Se prepararon mezclas utilizando 5 dosis de ceniza distintas, partiendo desde 0% hasta el 20%, con intervalos de 5%, sin considerar el porcentaje mínimo de consumo de cenizas entregados por el ensayo realizado con anterioridad. Esta decisión fue tomada para tener la posibilidad de analizar qué es lo que sucedía antes de la dosis mínima. Para las dosificaciones que se hagan en el futuro se recomienda partir con la dosis mínima recomendada por el ensayo de consumo inicial de cenizas.

Las probetas fueron preparadas en moldes cilíndricos de 50 mm. de diámetro por 100 mm. de alto. El procedimiento de construcción de probetas se presenta en detalle en el Anexo C: Protocolo para Preparación de Probetas.

Para cada mezcla se construyeron 8 probetas. Tres de estos especímenes se ensayaron en compresión no confinada (UCS) en condición seca y tres en condición saturada, dos se utilizaron para el ensayo de expansión.

Con los suelos de Arauco, los cuales fueron los primeros ensayados cronológicamente, se realizaron sólo 6 probetas. Tres se sometían a Ensayo de Compresión no Confinada en estado seco, dos probetas se utilizaban para el Ensayo de Expansión y una se sumergía durante 24 horas para realizar el Ensayo de Estabilidad Bajo Agua (EBA). El protocolo antiguo no incluía ensayos en estado saturado, ya que evaluaba la susceptibilidad de las probetas al agua a través del EBA. Después de examinar el protocolo, se decidió que era más importante realizar Ensayos UCS en estado saturado para así poder evaluar el desempeño de las mezclas, por lo tanto el Ensayo EBA fue obviado.

Las probetas preparadas para el ensayo de compresión debían pasar por un período de curado antes de ser ensayadas, mientras que aquellas que se utilizaban en el ensayo de expansión se ensayaban inmediatamente después de extraídas del molde. El detalle de los procedimientos que se deben seguir en cada ensayo se presenta en el Anexo D: Metodología para realización de Ensayos.

Las probetas que debían ser curadas se envolvieron en plástico y se colocaron en una bolsa hermética antes de ingresar a la cámara de curado para así evitar la pérdida de humedad. El período de curado en un comienzo fue de 7 días a 38°C, de acuerdo a lo recomendado por la American Coal Ash Association (2003). Sin embargo, realizar curados de 7 días de duración, implicaba un periodo muy largo de ensayos de laboratorio. Es por esta razón que se realizó un análisis de la variación de resistencia entre diferentes periodos de curado. Los resultados fueron los siguientes:

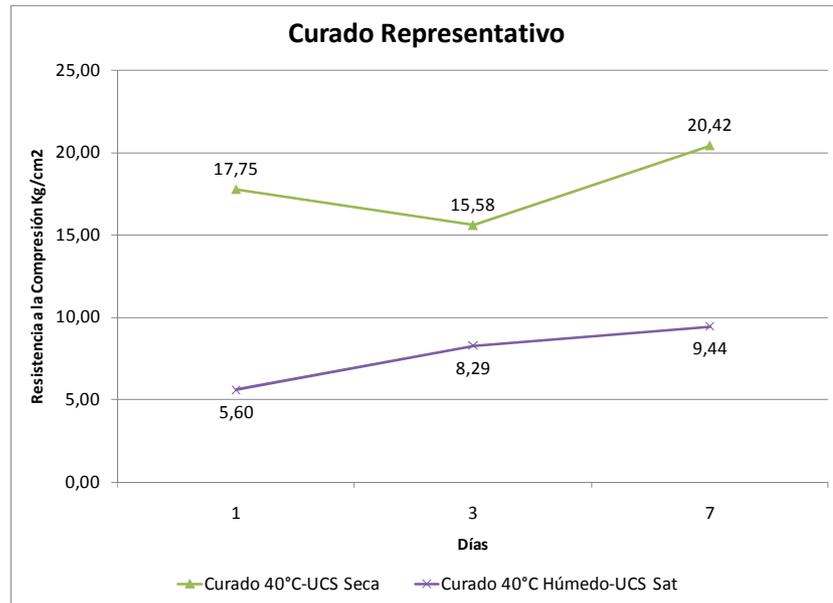


Figura VII-1: Resultados UCS Probetas Curadas a 40°C en Horno.

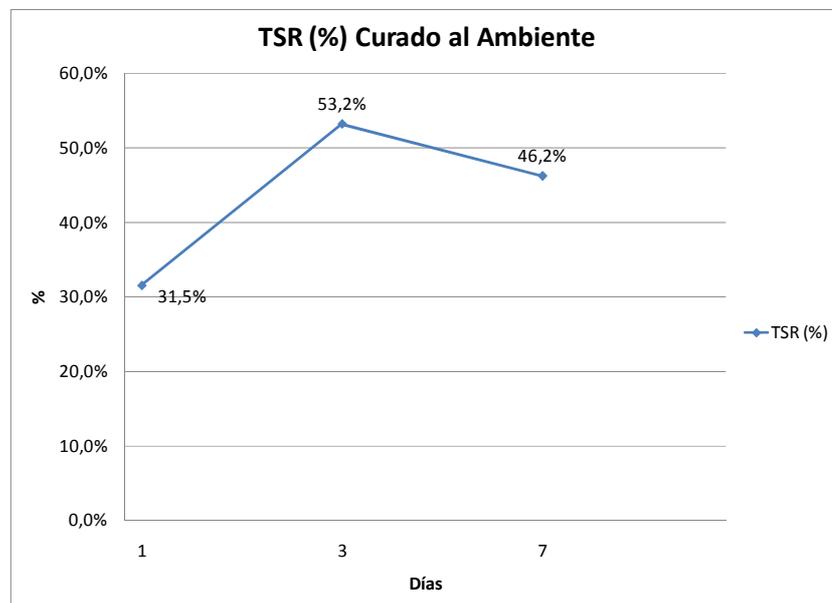


Figura VII-2: Tasa de Resistencia Retenida Probetas Curadas a 40°C en Horno.

Pero después del análisis de curado representativo que se realizó en la investigación, se disminuyó a 3 días dado el poco aumento de resistencia entre estos dos periodos, y obviamente por la reducción que significaría esto en los tiempos de laboratorio.

Por otra parte, la temperatura utilizada cumple con lo expresado en la norma ASTM D 5102 “Standard Test method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures” que plantea que una temperatura cercana a los 40°C es la adecuada para realizar curados acelerados sin producir reacciones puzolánicas que difieran significativamente de lo que podría suceder durante el curado en terreno.

### **VII.3.3 Criterios para la Determinación Óptima de Ceniza**

Se definió la dosis óptima de ceniza como aquella que cumpla con las siguientes características:

- Maximice la resistencia a la Compresión no Confinada (UCS) en condición saturada. Y para asegurar que las cenizas FBC actúen como un estabilizador efectivo, se propuso el uso del concepto “Tasa de Resistencia Retenida” (TRR) para la dosificación. Este factor establece una relación entre la resistencia UCS saturada alcanzada por la mezcla y la resistencia UCS seca, y se recomienda que sea siempre maximizado.

La Tasa de Resistencia Retenida se calcula mediante la siguiente expresión,

$$\text{TRR (\%)} = \frac{\text{UCS Saturada}}{\text{UCS Seca}} * 100 \quad (\text{VII.4})$$

- No provoque expansiones nocivas para la estabilización. La norma ASTM D 4829 – 88 (Standard Test Method for Expansion Index of Soils) realiza la estimación de la expansión de un suelo a través del Índice de Expansión (IE). Y considera que un IE mayor a 50 presenta un alto potencial de expansión, el cual que sería nocivo para la estabilización.

El Índice de Expansión se calcula de la siguiente forma:

$$IE = \frac{(H_f - H_i) * 1000}{H_i} \quad (\text{VII.5})$$

Donde,

IE: Índice de Expansión

Hi: Altura inicial de la probeta

Hf: Altura final de la probeta

- La resistencia saturada alcanzada sea mayor a la resistencia del suelo natural en el mismo estado en 3,5 kg/cm<sup>2</sup>, sólo si es que el suelo natural soporta la

saturación. En caso contrario el incremento de resistencia aceptada puede ser menor<sup>2</sup>.

Si ninguna dosis cumple con los criterios mencionados anteriormente, entonces no se podrá aún determinar el contenido óptimo de cenizas FBC. Es para este tipo de suelos, para los cuales se realizaron diversos tratamientos de forma de manejar las expansiones, y los que serán analizados a continuación.

Por otro lado, y para corroborar la tendencia expansiva de los suelos tratados, se llevó a cabo un ensayo proporcionado por los investigadores de la Purdue University (West Lafayette, USA), quienes desarrollaron un método de medición muy simple basado en las propiedades físicas del principal agente expansivo estudiado, la etringita. La etringita está formada en un 50% por agua (en peso), la que es liberada a temperaturas superiores a 60°C. En ensayo consiste en secar una muestra de suelo estabilizado a 55°C y luego a 110°C. La diferencia de masa corresponde al agua química presente en la etringita, por lo tanto se puede determinar teóricamente la cantidad presente. En realidad la cuantificación de la etringita por este medio no es en un 100% exacta, pues que el yeso hidratado tiene propiedades similares, y por lo tanto también es considerado como etringita. El objetivo de este análisis es poder correlacionar el Índice de Expansión con el ensayo de medición de etringita. En el Anexo E se explica la metodología a seguir para realizar el ensayo.

#### **VII.3.4 Diseño Experimental**

La matriz experimental para determinar la dosificación de los suelos se presenta en la Tabla VII-3.

- 
- <sup>2</sup> Dentro de las recomendaciones generales existentes para evaluar la efectividad de la estabilización, se encuentra la norma D 4609 – 86 (Standard Guide for Screening Chemicals for soil Stabilization), la cual plantea que un estabilizador efectivo debería producir un incremento de resistencia de al menos 50 psi (3.5 kg/cm<sup>2</sup>) con respecto al suelo natural.

Tabla VII-3: Matriz Experimental Dosificación.

Suelo		Dosis de cenizas FBC (%)				
		0	5	10	15	20
Arauco	Calicata 1		X			
	Calicata 3		X			
	Calicata 4		X			
	Calicata 5		X	X		
Minico	PC-1B					
	PC-54A		X			
	Peñablanca		X			
Enap	Pozo 7		X			
	Pozo 21					
Ecobell	0%		X			

Por otra parte, la matriz experimental para determinar la dosis óptima de cenizas FBC se presenta en la Tabla VII-4.

Tabla VII-4: Ensayos Realizados por Porcentaje de Suelo.

FBC	UCS					Expansión	Estabilidad bajo agua
	Seco		Sat				
0%							
5%							
10%							
15%							
20%							

#### VII.4 Determinación del Tiempo de Maduración Óptimo de la Mezcla

Se entiende como maduración al proceso de mantener la mezcla a temperatura y humedad ambiente por un período de tiempo determinado, antes de que se realice el proceso de compactación. De esta forma, según la literatura, es posible permitir la formación de los compuestos expansivos prematuramente, disminuyendo así la posibilidad de que se produzcan expansiones destructivas una vez compactada la mezcla. El objetivo fue encontrar el tiempo de maduración óptimo según la cantidad de

sulfatos del suelo que el suelo presente, ya que es la cantidad de sulfatos la que denota la susceptibilidad del suelo a formar agentes expansivos.

Otra de las recomendaciones rescatadas de la bibliografía, es la de proporcionar agua adicional de la que corresponde al momento de dosificar a la mezcla. De esta manera el agua utilizada para la formación de compuestos expansivos será proporcionada dentro de un “sistema cerrado”, disminuyendo así las expansiones. Sólo se analizó el efecto del agua adicional al suelo con mayor presencia de sulfatos, para así elegir la cantidad óptima adicional de agua y aplicarla al resto de la matriz.

#### VII.4.1 Diseño Experimental

La matriz experimental para determinar el tiempo de maduración óptimo de la mezcla se presenta en la Tabla VII-5 y Tabla VII-6.

Tabla VII-5: Matriz Experimental de Tiempo de Maduración y Agua Adicional Óptima en el Rango Mayor de Contenido Sulfatos.

Cantidad de sulfato	% cenizas	% Adicional de Agua Mezclado	Tiempo de Maduración	
			24 hrs	48 hrs
Rango Mayor	20%	0%		
		3%		
		5%		
	10%	0%		
		3%		
		5%		

Tabla VII-6: Matriz Experimental de Tiempo de Maduración Óptimo.

Cantidad de Sulfatos	% Adicional de Agua	% Cenizas	Tiempo de Curado	
			24 hrs	48 hrs
Rango Menor	3%	20%		
		15%		
Rango Medio		8%		
		5%		

### VII.5 Ensayos de Doble Estabilización

Se estudió la idea de realizar una primera aplicación de cenizas FBC al suelo sin compactar, convirtiéndolo de esta manera en un suelo más trabajable y permitiendo así que los compuestos expansivos se formen, para luego agregar nuevamente un porcentaje de estabilizador y crear los agentes cementantes.

Por otro lado, también se trabajó mezclando el material estabilizado con cenizas FBC con material granular (estabilización mecánica), y así analizar si existían mejoras de resistencia y baja en las expansiones.

#### VII.5.1 Diseño Experimental

La matriz experimental para determinar la efectividad de la doble estabilización se presenta en las Tabla VII-7 y Tabla VII-8.

Tabla VII-7: Matriz Experimental Doble Estabilización.

Suelo		1° Adición de Cenizas FBC	% Adicional de Agua	2° Adición de Cenizas FBC	
				3%	5%
Mininco	PC-54A	10%	0%		
			3%		
			0%		
			3%		
Ecobel	0%	10%	0%		
			3%		
			0%		
			3%		

Tabla VII-8: Matriz Experimental Estabilización con Adición de Material Granular.

Suelo		% Cenizas	20 % Material Granular
Mininco	PC-54A	20%	

### VII.6 Variaciones de las Propiedades Físicas

El objetivo de esta etapa de laboratorio fue analizar la variación de las propiedades físicas que determinan si el material al ser mezclado con cenizas se convierte en un material con mejor comportamiento ingenieril, o sea más trabajable.

Los suelos arcillosos presentan grandes cambios de volumen cuando son expuestos a altas fluctuaciones de humedad. Si éstos no son controlados pueden generar a movimientos en las estructuras e imponer cargas que pueden provocar una falla prematura en el pavimento. Uno de los objetivos de la estabilización con cenizas FBC es disminuir la susceptibilidad al agua que tengan los suelos.

Las propiedades analizadas fueron el Índice de Plasticidad y la capacidad de absorción de las mezclas. La plasticidad de los suelos ha sido cuantificada por el Índice de Plasticidad, según lo determinado por la norma ASTM D 4318. Normalmente las especificaciones limitan el Índice de Plasticidad de un suelo a no más de 10-12 para asegurar la estabilidad del material. En términos generales, cuanto más alto es el Índice de Plasticidad, mayor será el potencial para hincharse según el contenido de humedad al que se esté sometido. Un Índice de Plasticidad más bajo es también favorable a la hora de compactar, alcanzando las densidades requeridas rápidamente.

Para cuantificar la variación de la plasticidad de las mezclas se analizaron los Límites de Atterberg de los suelos de PC 54-A y Ecobell con 1, 3 y 7 días de maduración, con dosis que variaba desde 5% hasta 20% de cenizas FBC.

### VII.6.1 Diseño Experimental

La matriz experimental para determinar la variación de IP y la absorción se presenta en la Tabla VII-9 y Tabla VII-10.

Tabla VII-9: Matriz Experimental Variación de IP.

Suelos / IP	Maduración (días)	Dosis de Cenizas FBC (%)			
		5	10	15	20
PC-54A	1				
	3				
	7				
Ecobell	1				
	3				
	7				

Tabla VII-10: Matriz Experimental % de Absorción.

<b>Suelo/ Absorción (%)</b>	<b>Dosis de cenizas FBC</b>				
	<b>0%</b>	<b>5%</b>	<b>10%</b>	<b>15%</b>	<b>20%</b>
PC 54-A					
PC 1-B					
Peñablanca					
Pozo 21					
Pozo 7					
Ecobel					

## **VIII PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En este capítulo se presenta un resumen de los resultados obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio.

### **VIII.1 Resultados de Ensayos de Caracterización de las Cenizas FBC**

En las tablas presentadas a continuación, se entregan los resultados de laboratorio de los diversos análisis realizados a dos muestras de cenizas FBC.

La nomenclatura utilizada es la siguiente: la muestra N°1 corresponden a las cenizas de abril del 2008 y la muestra N°2 a las de octubre del mismo año.

En la Tabla VIII-1 se presentan los resultados del análisis químico realizado a las diferentes muestras de cenizas FBC. La Tabla VIII-2 muestra la granulometría de cada muestra. En la Tabla VIII-3 se presentan los resultados del análisis que determina la presencia de especies cristalinas en las muestras de cenizas FBC. La Tabla VIII-4 informa sobre los resultados de medición de cal libre de las muestras. Por último, la Tabla VIII-5 muestra los resultados de pérdida de peso por calcinación de las muestras.

Tabla VIII-1: Análisis Químico de Cenizas FBC Utilizadas en el Estudio.

Elemento	Expresado como	M1 % en peso <sup>2</sup>	M2 % en peso
Azufre	SO <sub>3</sub>	52,30	40,60
Calcio	CaO	36,50	28,40
Sodio	Na <sub>2</sub> O	0,20	0,27
Silicio	SiO <sub>2</sub>	1,30	0,41
Vanadio	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,30	0,33
Aluminio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,46	0,26
Niquel	NiO	0,42	0,14
Magnesio	MgO	0,21	0,35
Hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10	0,07
Cloruro	Cl	<0,01	0,07
Titanio	TiO <sub>2</sub>	<0,01	<0,01
Fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0,01	<0,01
Potasio	K <sub>2</sub> O	<0,01	<0,01

Tabla VIII-2: Granulometría las Muestras.

Abertura malla (mm)	% Retenido M1	% Retenido M2
0,15	50,75	5,55
0,075	12,95	5,61
0,045	9,23	15,49
0,038	2,19	6,04
<0,038	24,88	67,31

Tabla VIII-3: Determinación de Especies Cristalinas de las Muestras.

<i>Muestra</i>	<i>Nombre del compuesto</i>	<i>Formula</i>	<i>Presencia (%)</i>
1	Anhidrita	Ca(SO) <sub>4</sub>	66,6
	Cal	CaO	11,8
	Akermanite	Ca <sub>2</sub> MgSi <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	7,6
	Portlandita	Ca(OH) <sub>2</sub>	4,5
	Calcio-Magnesio	CaMg <sub>2</sub>	3,9
	Calcita	CaCO <sub>3</sub>	2,8
	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	2,8
2	Anhidrita	CaSO <sub>4</sub>	44,6
	Cal	CaO	36,7
	Akermanite	Ca <sub>2</sub> MgSi <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	9,7
	Calcita	CaCO <sub>3</sub>	7,1
	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	1,9

Tabla VIII-4: Análisis de Cal Libre.

Ensayo	Unidad	M1	M2
Cal Libre (CaO)	mg/Kg	10,6	27

Tabla VIII-5: Pérdida de Peso por Calcinación.

Elemento	Expresado como	M1 % en peso	M2 % en peso
PPC	1000°C/2 horas	7,1	29

### VIII.1.1 Análisis de Resultados de Ensayos de Caracterización

#### a) Composición de las Cenizas FBC

Como se puede observar en la Tabla VIII-1 y en concordancia con la bibliografía, las muestras cenizas FBC están compuestas en su mayoría por óxido de calcio (CaO) y

sulfatos ( $\text{SO}_3$ ). Los que son responsables de la formación de agentes cementantes (CSH y CAH) y compuestos expansivos, respectivamente.

Cabe destacar la baja presencia de productos contaminantes como lo es el Níquel y el Vanadio, tal como fue demostrado en el estudio de impacto ambiental realizado por la Unidad de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción el año 2000.

En cuanto a la composición cristalina de las muestras ambas presentan formaciones de anhidrita o sulfato de calcio en más del 50% de su peso. Cuando la anhidrita se expone a la acción del agua, la absorbe y se transforma en sulfato de calcio hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), más conocido como yeso. Asimismo, se sabe que la anhidrita es la principal causante de la formación de compuestos expansivos (como la etringita) al combinarse con la alúmina presente en el suelo. Seguido después, se tiene la presencia de óxido de calcio, calcita y cuarzo entre otros.

Los resultados del análisis de cal libre presente en las muestras fueron bastante dispares, sin embargo, sus valores concuerdan con los resultados de resistencia que se obtuvieron en el laboratorio de analizarán en este capítulo, más adelante. Estos datos son importantes, ya que el contenido de cal libre varía en todos los tipos de cenizas y es justamente el responsable de las reacciones de cementación. Sin embargo, y aun considerando el escenario más negativo, el contenido de cal libre de las cenizas FBC será siempre mayor a un 10%, valor que puede ser considerado como propicio para poder cementar.

En cuanto a los resultados de pérdida de peso por calcinación, se observa que la muestra N°2 es la que presenta mayor pérdida, con un 29%. Esto se justifica, ya que lleva menos tiempo almacenada y eventualmente puede haber perdido menos agua en el tiempo transcurrido.

#### b) Distribución de Tamaños

Los resultados de las granulometrías realizadas (Tabla VIII-2) indican que la ceniza FBC es un polvo muy fino, cuyas partículas se encuentran entre los 0,15 mm y los 0,038

mm. La distribución de la curva es continua en ambas muestras. Cabe destacar que la muestra N°1 presenta una granulometría mucho más gruesa, esto se debe al mayor tiempo de almacenaje que tiene esta muestra, el que produce la conglomeración de sus partículas.

### VIII.2 Resultados de Ensayos de Caracterización de Suelos

La Tabla VIII-6 presenta un resumen de las propiedades de los suelos empleados. El detalle de las características de éstos (granulometría y límites de Atterberg) se presenta en el Anexo A: Clasificación de Suelos Utilizados en la Investigación.

Tabla VIII-6: Resumen de Características de los Suelos Ensayados.

Origen del Suelo	Nombre	Clasificación		Índice de Plasticidad	Humedad óptima (%)	Densidad Máxima Seca (kg/l)
		AASHTO	USCS			
Mininco	PC 54-A	A-7-5 (16)	CH	22	20,4	1,7
	PC 1-B	A-2-7 (0)	SM	13	15,9	1,77
	Peñablanca	A-6 (4)	SC	21	9,9	2
Arauco	Calicata 1	A-7-6 (15)	CL	21	22,6	1,63
	Calicata 4	A-4 (4)	ML	7	22,7	1,57
	Calicata 3	A-7-5 (34)	MH	33	29,6	1,45
	Calicata 5	A-7-5(31)	CH	45	23,5	1,51
Enap	Pozo 21	A-2-4 (0)	SM	2	8,5	2,2
	Pozo 7	A-2-6 (1)	SC	15	10,2	2,07
Ecobel	0	A-6 (4)	SC	12	10,9	2,01

Los suelos de Parcelas Cabreras 54-A (PC-54A), Parcelas Cabreras 1-B (PC-1B) y Peñablanca, corresponden a diferentes fundos de la Forestal Mininco ubicados en la VIII Región. Las calicatas 1, 3, 4 y 5 pertenecen al fundo Totoral Grande de la Forestal Arauco en la VIII Región. Los pozos 21 y 7 corresponden a materiales que se encuentran en los caminos internos de ENAP Refinerías Bío-Bío, ubicado en la VIII Región. Por último, Ecobel es un suelo arcilloso correspondiente al camino de acceso al Fundo San Jorge, ubicado en la VIII Región.

Estos suelos incluyen un rango de propiedades diferentes, que eventualmente permitirán obtener conclusiones generales respecto del efecto de la ceniza FBC en la estabilización de suelos con potencial de expansión.

### **VIII.3 Resultados de Ensayos de Caracterización de las Mezclas Suelo-Ceniza FBC**

Se realizaron mezclas con suelos de ENAP y Arauco, con porcentajes de cenizas mayores a los entregados por el Ensayo de Consumo Inicial de Ceniza, descritos en la sección VI.1.2. La Tabla VIII-7 muestra los resultados de estos ensayos para cada una de las mezclas realizadas.

Los resultados demuestran que al incorporar cenizas FBC a los suelos, en general existe una notable disminución del Índice de Plasticidad en todos los tipos de suelos potencialmente expansivos. Esta disminución de IP ocurre tanto por una baja en el Límite Líquido como en el Límite Plástico. Ésta es provocada por disminución del contenido de agua del suelo que es ocupada por las cenizas para poder crear compuestos cementicios y de esta forma estabilizar.

Los resultados del Ensayo Proctor Modificado no presentan un comportamiento claro, pero en general, cuanto más finos tiene un suelo mayor es su humedad óptima y menor es su densidad máxima compactada seca.

La granulometría del suelo estabilizado se engrosa, provocando algunos cambios en la clasificación de éstos.

Tabla VIII-7: Propiedades de la mezclas.

SUELOS		% Cenizas	Clasificación	Límites de Atterberg			Proctor Modificado	
				LL	LP	IP	Densidad Máxima Seca (Kg/lit)	Humedad Óptima(%)
ENAP	Pozo 7	0%	SC	33	18	15	2,07	10,2
		7%	SM	32	26	6	2,04	10,8
		15%	SM	31	27	4	1,99	10,9
	Pozo 21	0%	SM	19	17	2	2,2	8,5
		3%	SM	-	-	NP	2,2	8,5
		10%	SM	-	-	NP	2,2	8,7
ARAUCO	Calicata 1	0%	CL	47	26	21	1,63	22,6
		15%	CL	41	23	18	1,67	20,4
	Calicata 3	0%	MH	66	33	33	1,45	29,6
		15%	ML	48	26	22	1,58	24,5
	Calicata 4	0%	ML	36	29	7	1,59	21,6
		15%	ML	36	26	10	1,64	21,3
	Calicata 5	0%	CH	77	32	45	1,51	23,5
		15%	CH	61	28	33	1,56	25,5

#### VIII.4 Resultados de Ensayos de Evaluación Preliminar

##### VIII.4.1 Dosis Inicial Cenizas FBC

###### a) Suelos Arauco

La Figura VIII-1 muestra los resultados del Ensayo *Eades and Grimm* para los suelos de las calicatas del Fundo el Totoral Grande de Arauco, los cuales presentaron resultados dispares. La primera en reaccionar fue el limo de alta plasticidad de la Calicata 3, el que encontró una dosis inicial de 6% de cenizas FBC, seguido por el limo de baja plasticidad (Calicata 4) quien comenzó a reaccionar con un 8% de cenizas. Las arcillas respondieron con mayor lentitud, superando el pH límite recién con un 9% y 15% de cenizas FBC, para la Calicata 1 y 5 respectivamente.

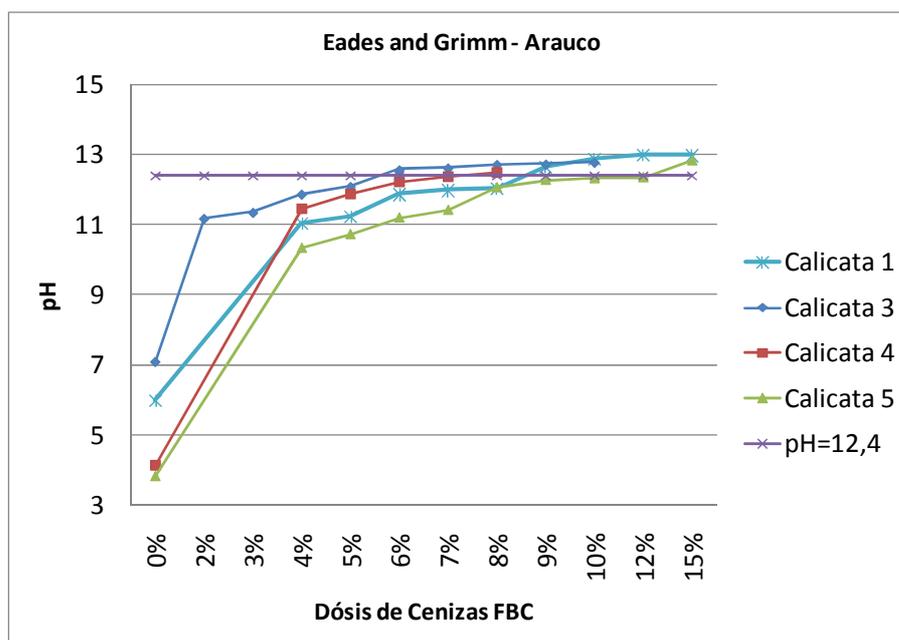


Figura VIII-1: Ensayo *Eades and Grimm* - Suelos Arauco.

b) Suelos Mininco

La Figura VIII-2 muestra los resultados del Ensayo *Eades and Grimm* para los suelos Mininco. El primer suelo en reaccionar con las cenizas fue la arena limosa de Parcelas Cabreras 1-B, la que superó el pH requerido con la adición del 5% de cenizas. La arcilla de alta plasticidad de Parcelas Cabreras 54-A fue el suelo que reaccionó en forma más tardía, superando el pH 12,4 recién con el 8% de dosis de cenizas FBC, seguido por Peñablanca el cual reaccionó al llegar al 7%.

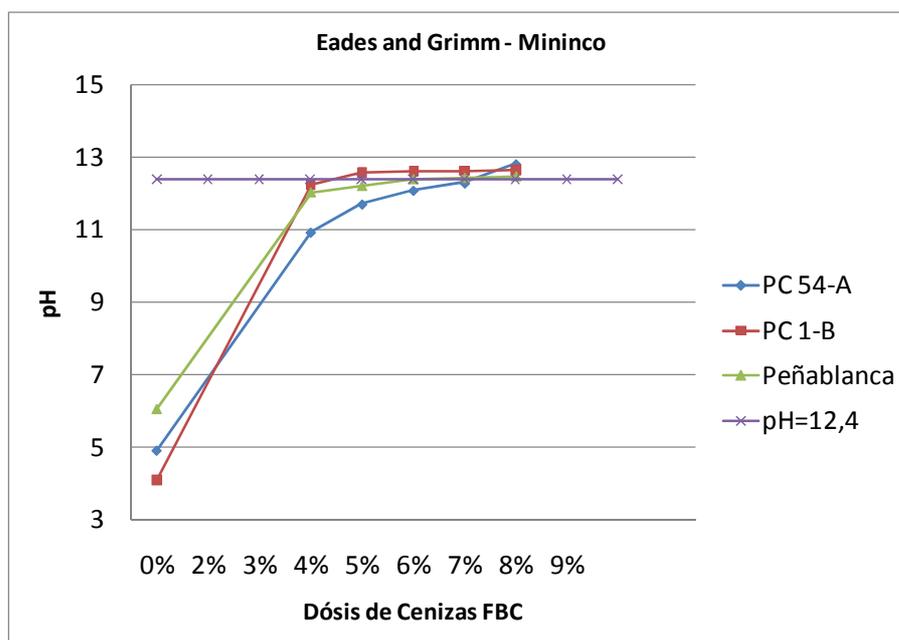


Figura VIII-2: Ensayo *Eades and Grimm* - Suelos Mininco.

c) Suelos ENAP

La Figura VIII-3 muestra los resultados del Ensayo *Eades and Grimm* para los suelos de ENAP. Estos suelos arenosos reaccionaron en forma diferente. El pozo 21 (SM) no tardó en responder a la adición de cenizas FBC, superando el pH limitante, con un 3% de cenizas. En cambio la arena arcillosa demoró un poco más, superando el pH con un 7%.

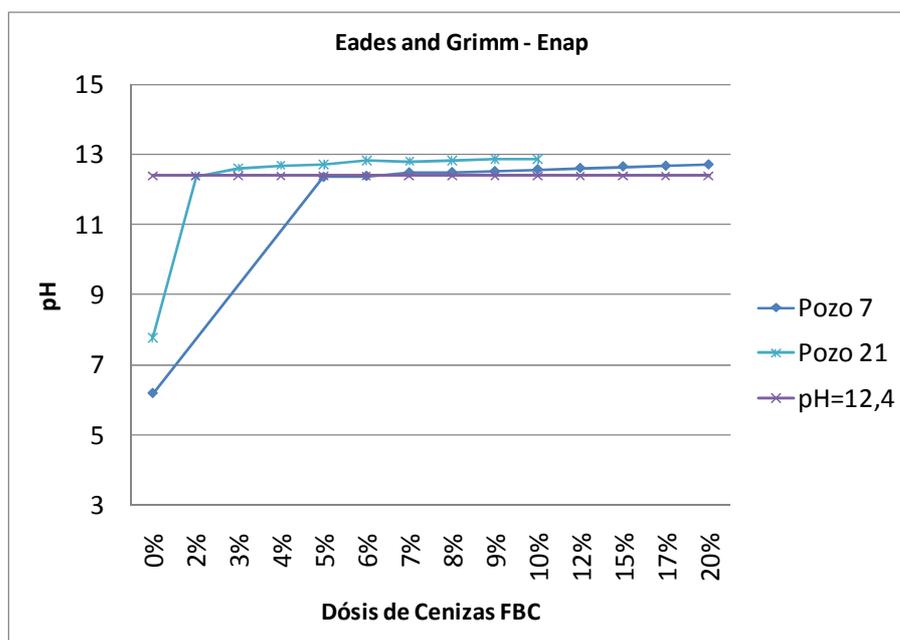


Figura VIII-3: Ensayo *Eades and Grimm* - Suelos ENAP.

d) Ecobel

La Figura VIII-4 muestra los resultados del ensayo *Eades and Grimm* para los suelos de Ecobel. El mínimo de cenizas requerido para superar el pH alcanzó el 6%.

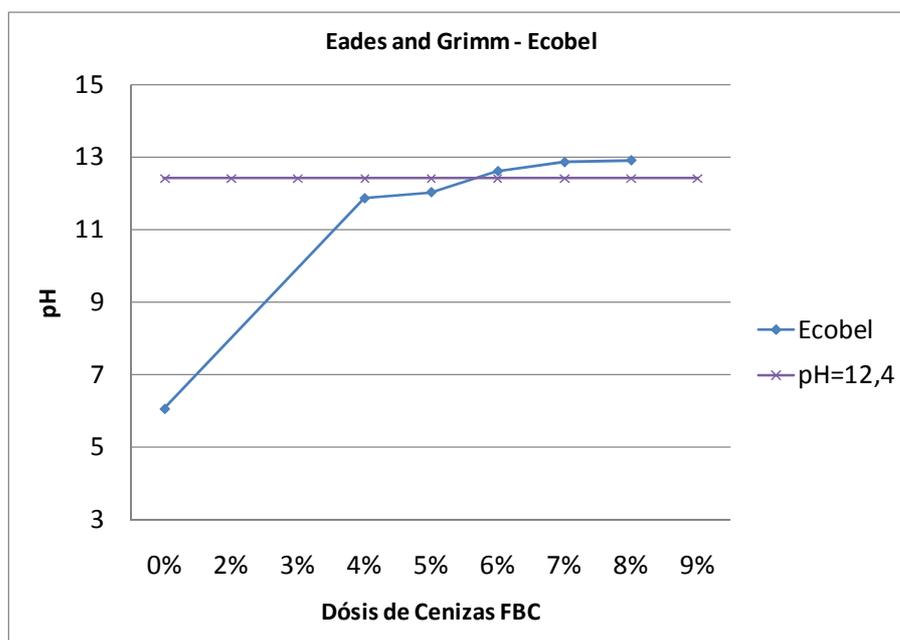


Figura VIII-4: Ensayo *Eades and Grimm* – Ecobel.

Cabe destacar la variedad de los resultados del ensayo, abarcando un rango desde el 3% (Pozo 21) hasta el 15% (Calicata 5) de cenizas FBC con respecto al peso total. Esto nos lleva a concluir que cada suelo reacciona en forma diferente al agregarle cenizas, y esto depende de la composición geológica que estos tengan, ya que el pH aumenta cuando los iones de calcio presentes en la cal reemplazan los iones de hidrógeno y sodio presentes en la arcilla. Esto sucede hasta que las partículas de arcilla quedan saturadas de calcio y el pH del suelo se eleva a 12,4. Es por esta razón que las arcillas son las que presentaron respuestas más tardías, seguidos por las arenas arcillosas para cerrar con limos y arenas limosas.

Estos resultados resultan determinantes a la hora de analizar los rangos recomendados en la literatura en que se mueven las dosificaciones con cal y sus subproductos, los que varían generalmente entre los 3% y 9%. Es fácil observar que existen suelos que en esos rangos aún no comienzan a reaccionar con las cenizas FBC. Por lo tanto, se requiere

realizar este ensayo en forma preliminar para detectar la dosis mínima con la que se puede lograr resultados positivos.

#### VIII.4.2 Contenido de Sulfato y Alúmina

Los resultados muestran la arcilla de alta plasticidad es la que posee mayor cantidad de sulfatos y alúmina, y la arena arcillosa de Ecobel la que menor presencia de ambos compuestos.

Tabla VIII-8: Resultados Contenido de Sulfatos y Alúmina.

Suelos	SO <sub>4</sub> % en peso	Al % en peso
PC 54-A	0,29	14,3
PC1-B	0,21	10,2
Peñablanca	0,26	8
Ecobel	0,21	6,8

### VIII.5 Dosificación

#### VIII.5.1 Suelos Mininco

##### a) Parcelas Cabrerías 54-A

Las Figura VIII-5 a la Figura VIII-6 muestran los resultados obtenidos. Se puede observar que el desempeño de esta arcilla de alta plasticidad concuerda con los resultados del Ensayo del Consumo Inicial de Cenizas, el que entregaba como dosis mínima el 8%, ya que la resistencia saturada no comienza a subir hasta pasada esa dosis de cenizas FBC, encontrando su máximo en el 20%, y satisfaciendo con ambos porcentajes el criterio de aumentar a lo menos en un 3,5 Kg/cm<sup>2</sup> la resistencia con respecto al suelo sin cenizas. Lo mismo sucede con el coeficiente de expansión el que se dispara abruptamente a partir del 10%.

La tasa de resistencia retenida, presenta buenos resultados para 15% y 20% de cenizas, aunque siguiendo los criterios de dosificación antes descritos no podríamos utilizar ninguno de esos dos porcentajes ya que este suelo presenta expansiones muy superiores a 50 dado el alto nivel de sulfatos presente, es más sólo podría utilizarse el 5% si de este criterio dependiera. Es por esta razón, que para este tipo de suelos se realizaron diversos ensayos para manejar las expansiones, los cuales serán analizados más adelante. Por lo tanto, aún no es posible determinar el contenido óptimo de cenizas FBC para estabilizar.

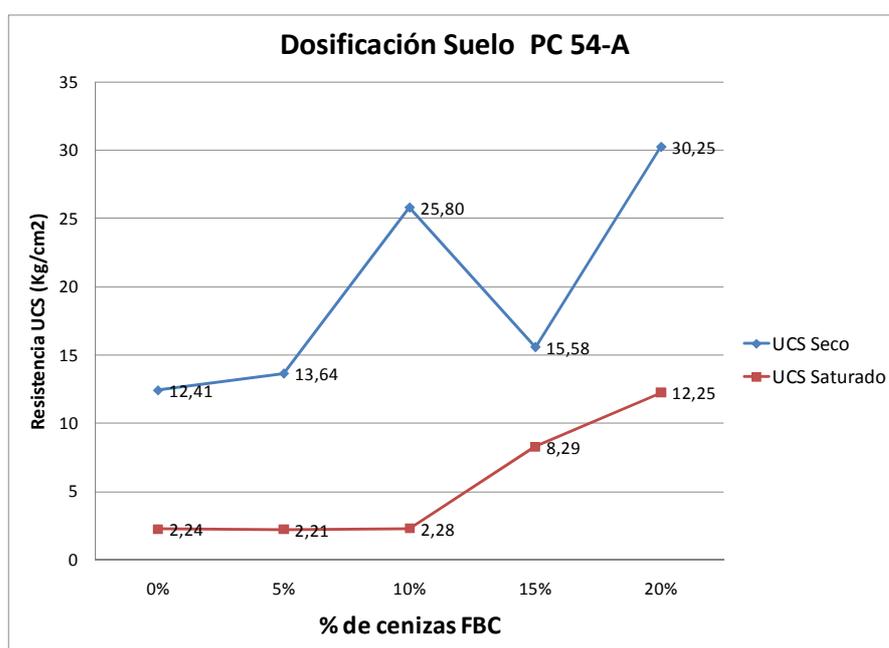


Figura VIII-5: UCS Parcelas Cabrerías 54-A.

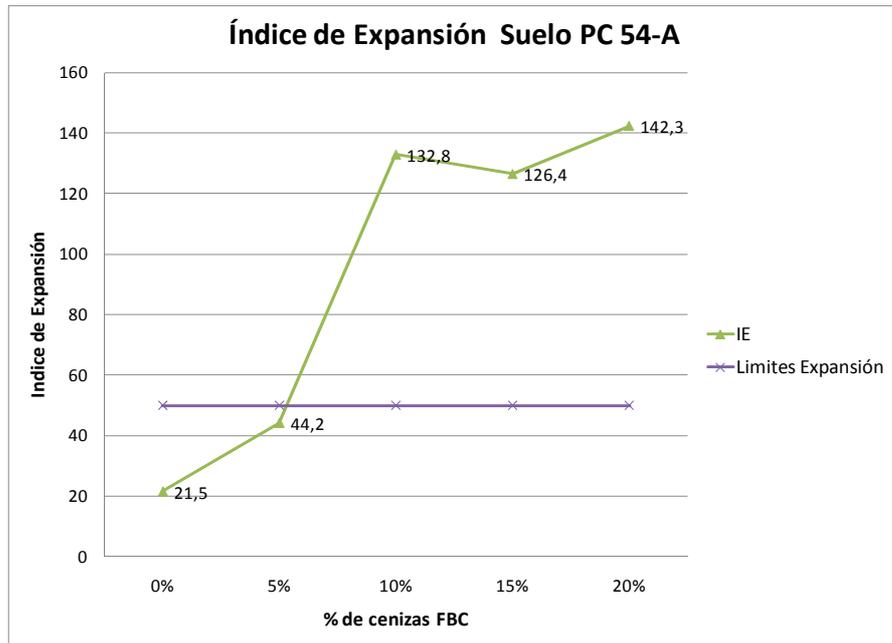


Figura VIII-6: Expansión Parcelas Cabreras 54-A.

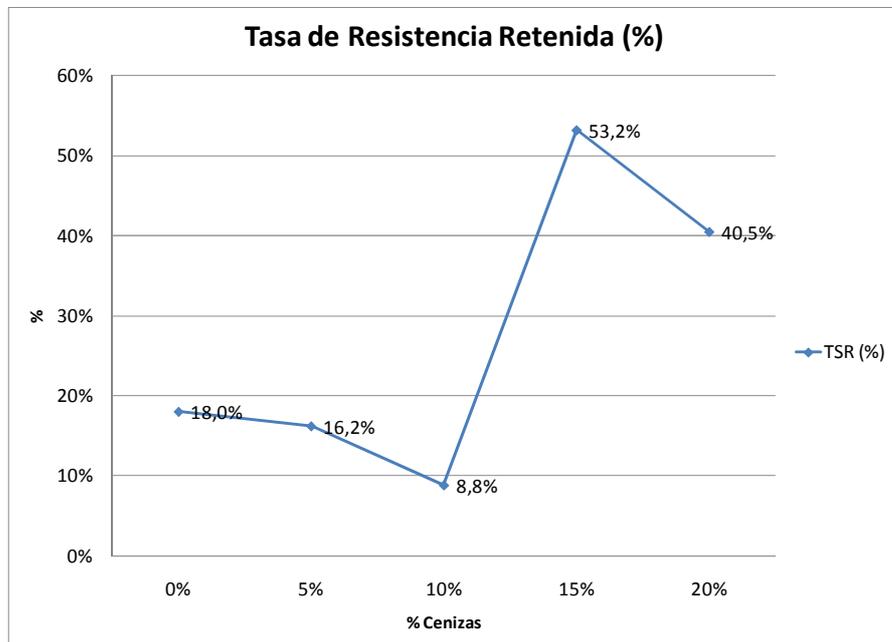


Figura VIII-7: TRR Parcelas Cabreras 54-A.

b) Parcelas Cabrerías 1-B

Los resultados de Parcelas Cabrerías 1-B (SM) también concuerdan con el Ensayo de Dosis Inicial de estabilización, porque recién desde el 10% de adición de cenizas FBC las probetas fueron capaces de soportar el saturado de 24 hrs. (con menos ceniza se deshacían), cumpliendo ampliamente con lo requerido por el criterio de soportar la saturación cuando el suelo natural no es capaz de soportarla, ya que aumentó la resistencia saturada en 5,28 Kg/cm<sup>2</sup>. Con el 0% y el 5% las probetas se deshicieron en el proceso de saturación.

La máxima resistencia saturada fue alcanzada con un 20% de cenizas FBC, y con este porcentaje presenta un TRR igual 34,81%, que está dentro del rango de recomendaciones para un camino ondulado con buen drenaje, sometido a un clima húmedo o un camino plano con mal drenaje, emplazado en algún lugar con clima moderado.

Las expansiones de esta arena limosa son bastante altas (IE > 50), pero no alcanzan las expansiones de PC 54-A. Este tipo de suelo también debe ser tratado antes de realizar la dosificación. Por lo tanto, no es posible aún determinar el contenido óptimo de cenizas FBC para estabilizar.

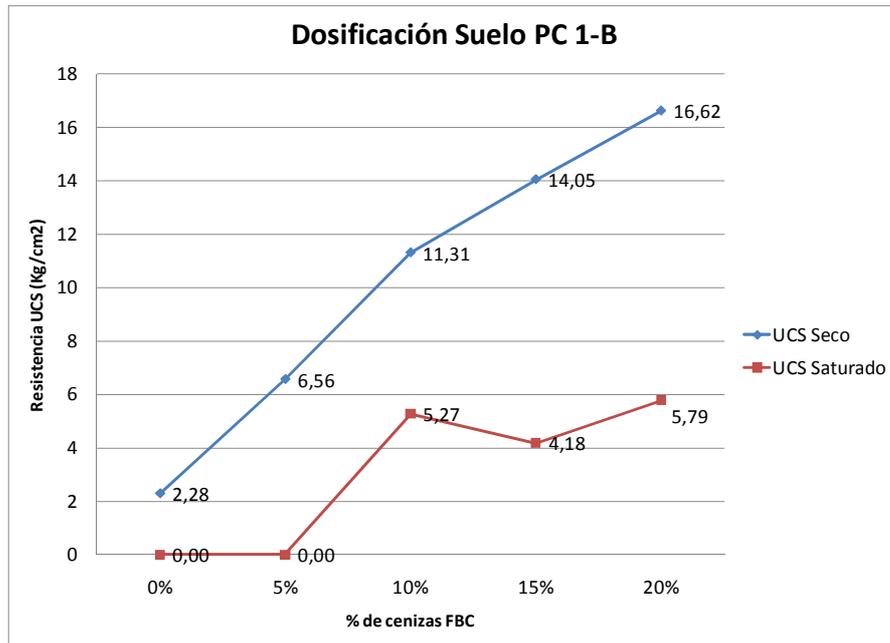


Figura VIII-8: UCS Parcelas Cabreras 1-B.

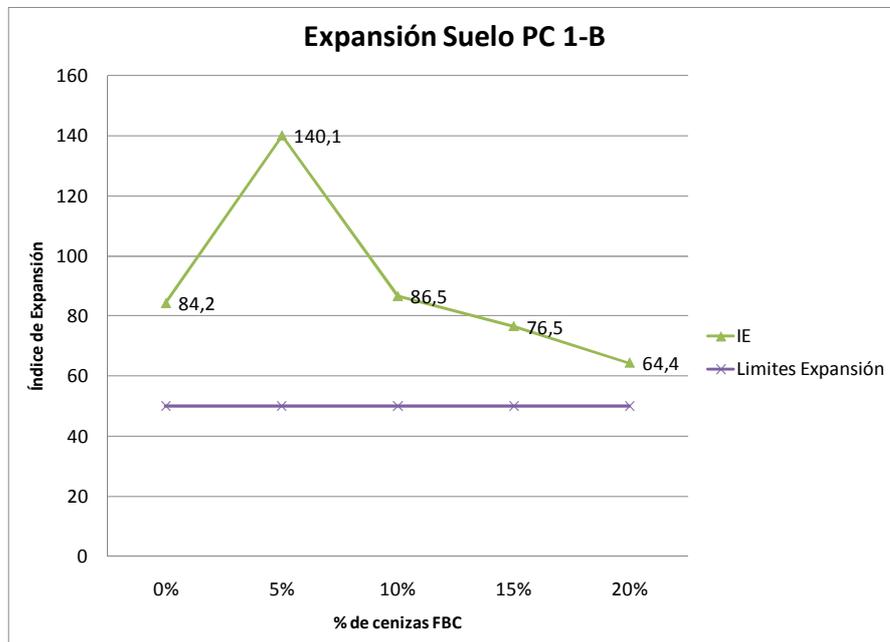


Figura VIII-9: Expansión Parcelas Cabreras 1-B.

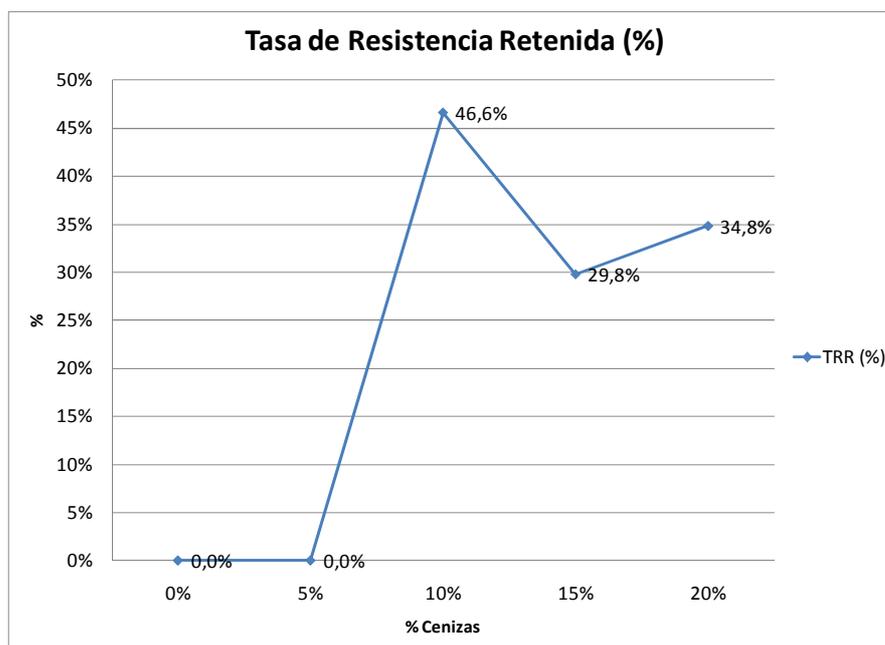


Figura VIII-10: TRR Parcelas Cabrerías 1-B.

c) Peñablanca

Esta arena arcillosa no presenta mayores problemas de expansión, por lo tanto se puede dosificar en forma inmediata, sin requerir un tratamiento previo de la mezcla.

La resistencia máxima saturada se alcanza con un 20% de cenizas, y es con esta misma dosis con el cual se obtiene el mayor TRR (43,38%).

Cabe destacar que el suelo sin cenizas no es capaz de soportar la saturación de 24 hrs. y con una adición de 5% de cenizas, la mezcla ya es capaz de aguantar este periodo, por lo tanto ya es considerada una estabilización conveniente de realizar.

La dosis óptima de este suelo es de 20%.

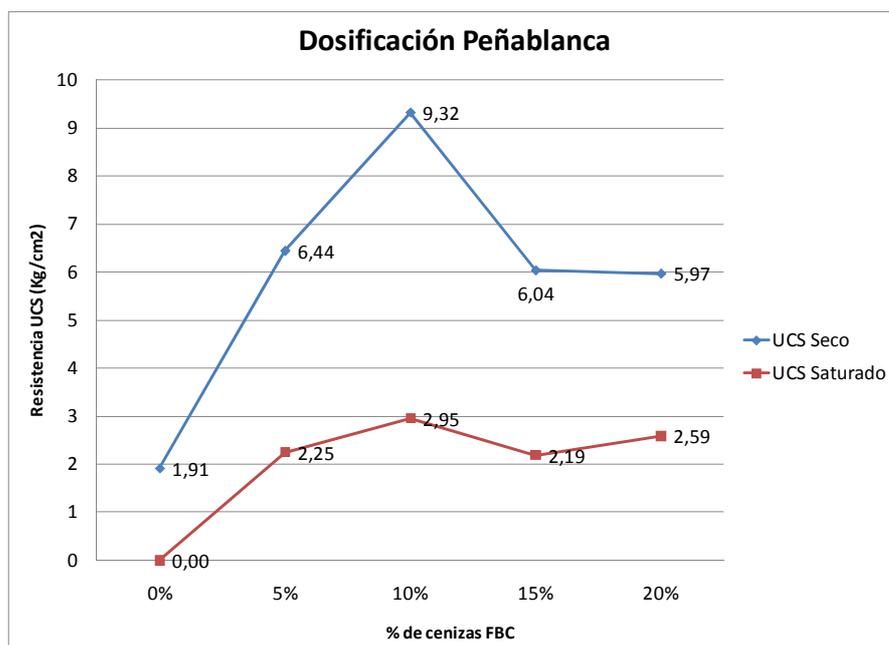


Figura VIII-11: UCS Peñablanca.

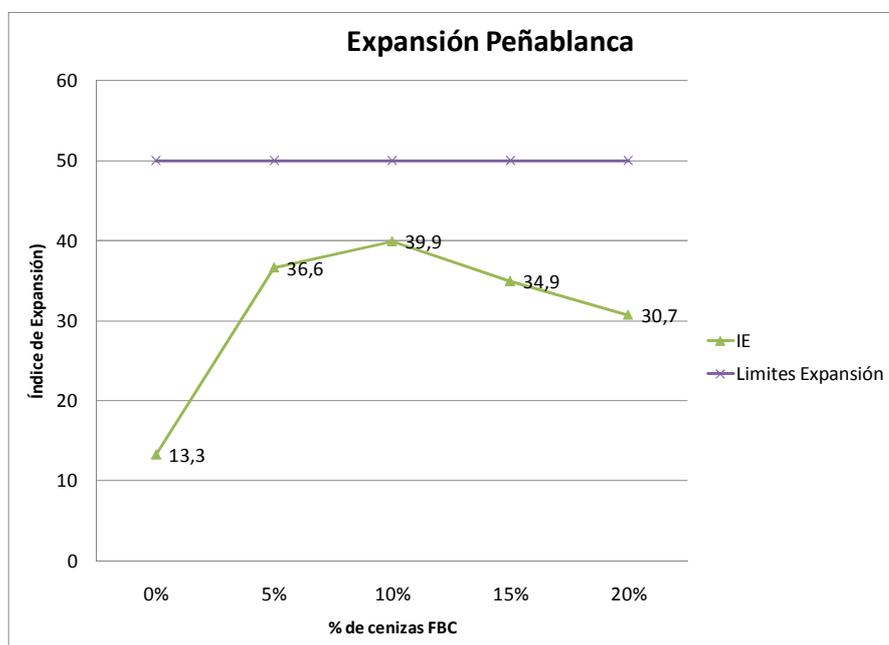


Figura VIII-12: Expansión Peñablanca.

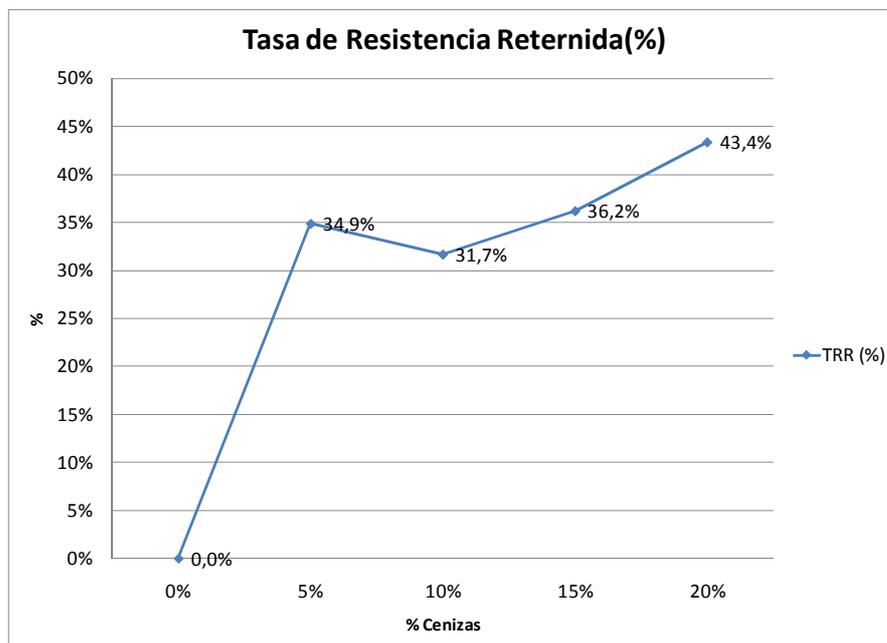


Figura VIII-13: TRR Peñablanca.

### VIII.5.2 Suelos ENAP

#### a) Pozo 7

El pozo 7 de los suelos de ENAP no presenta problemas de expansión, a excepción del mostrado con el 5% de cenizas, por lo tanto tampoco necesitaría un tratamiento previo al compactado.

Sin cenizas, este suelo no soporta la saturación. Sin embargo, con la adición de cenizas la resistencia saturada puede alcanzar hasta  $13,21 \text{ Kg/cm}^2$ , lo que denota que la estabilización es muy favorable para esta arena arcillosa.

Las tasas de resistencia retenida son bastante altas también, superando en promedio el 50%.

Se recomienda la adición de 20% de cenizas FBC.

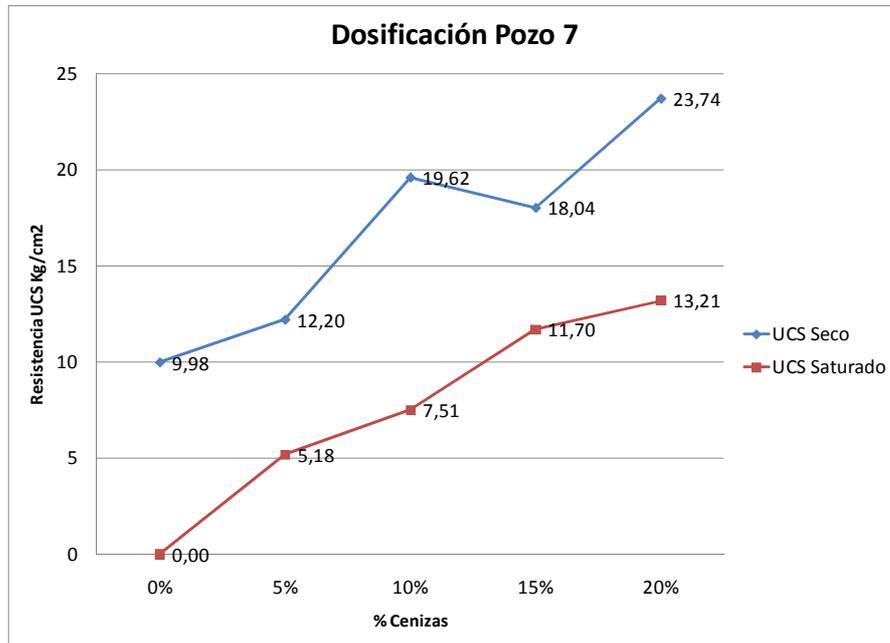


Figura VIII-14: UCS Pozo 7.

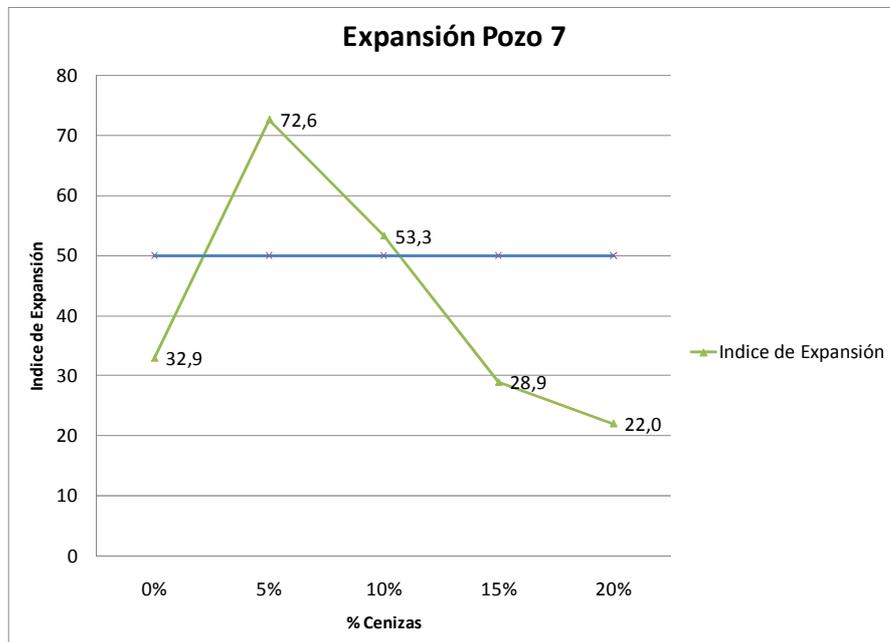


Figura VIII-15: Expansión Pozo 7.

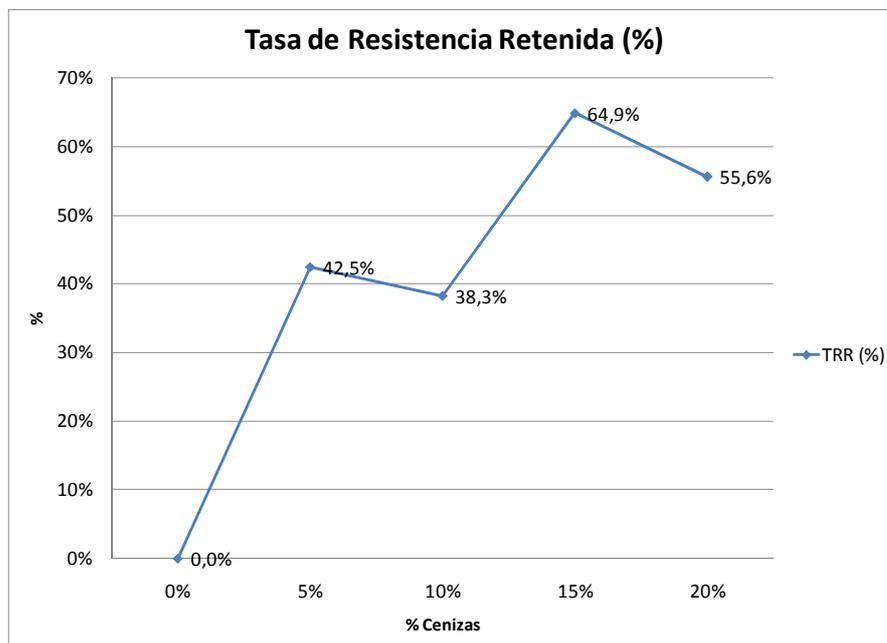


Figura VIII-16: TRR Pozo 7.

b) Pozo 21

En el caso del pozo 21 se puede observar claramente que existe una dosis que maximiza la resistencia de este material (5%), y es justamente con este porcentaje donde alcanza la mínima expansión registrada (6,22).

En general el pozo 21 no presenta problemas de expansión. La máxima expansión registrada es de 26,82 solamente, cuando se utiliza un 20% de cenizas FBC.

La tasa de resistencia retenida se mantiene constantes a medida que aumenta el porcentaje de cenizas, alcanzando aproximadamente el 40%.

Se recomienda la adición de 5% de cenizas FBC.

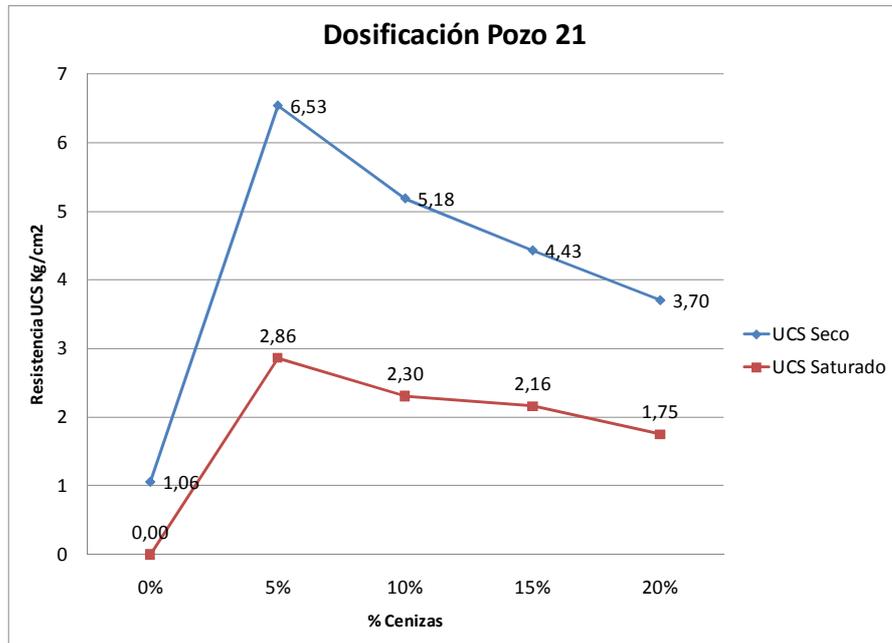


Figura VIII-17: UCS Pozo 21.

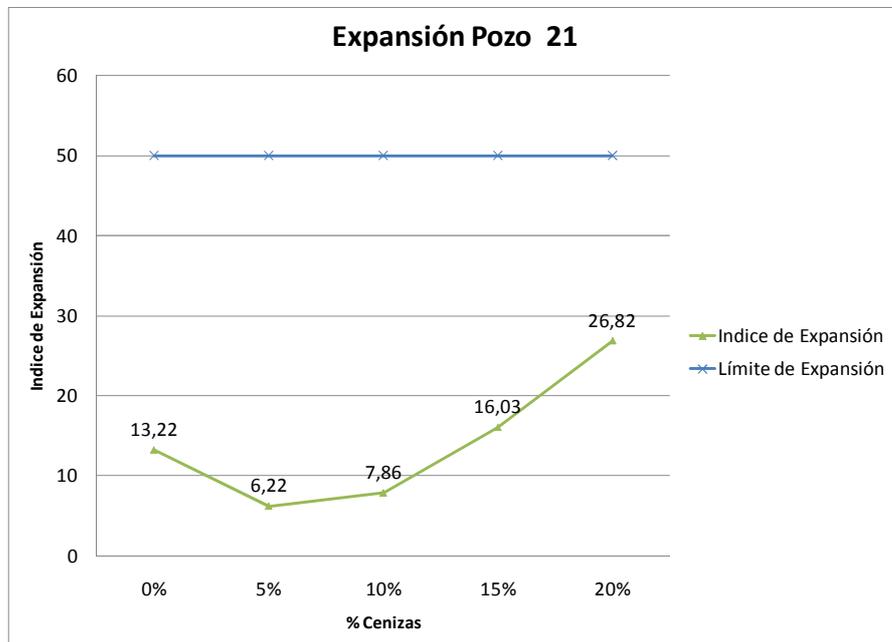


Figura VIII-18: Expansión Pozo 21.

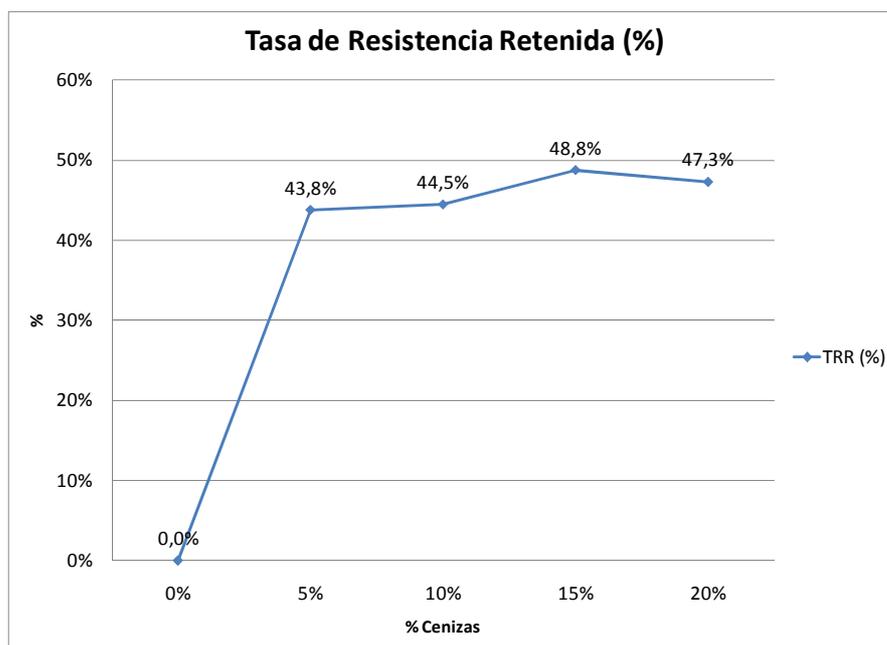


Figura VIII-19: TRR Pozo 21.

### VIII.5.3 Ecobel

El suelo de Ecobel presenta leves problemas de expansión, presentando un IE entre 60 y 80. Por lo tanto, es recomendable realizar un tratamiento previo a la mezcla, ya que con ese nivel de expansión y bajo el criterio de dosificación presentado con anterioridad, este suelo no sería adecuado para ser tratado con cenizas.

La resistencia presenta un máximo con 10% de adición de cenizas, pero presenta una baja resistencia retenida.

No es posible aún determinar el contenido óptimo de cenizas FBC para estabilizar.

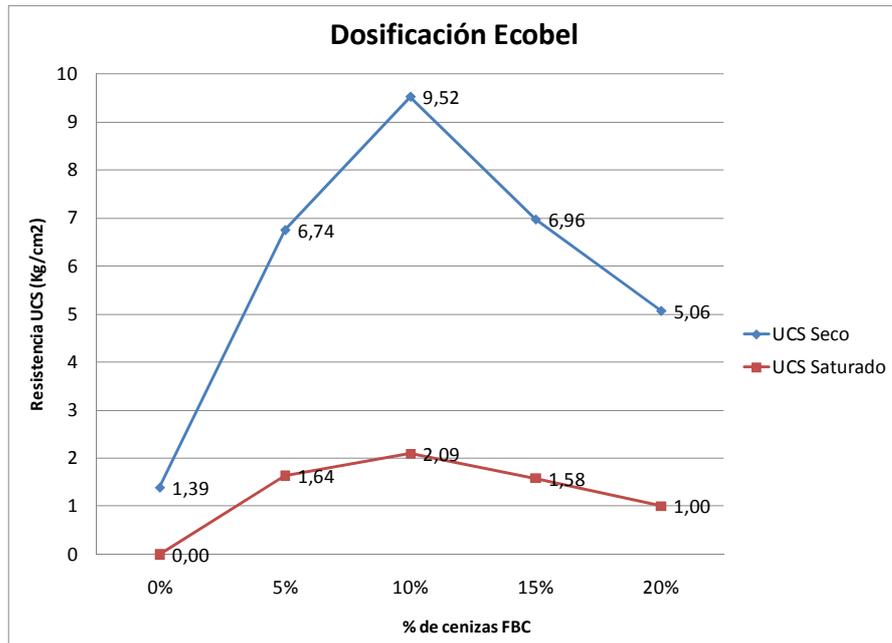


Figura VIII-20: UCS Ecobel.

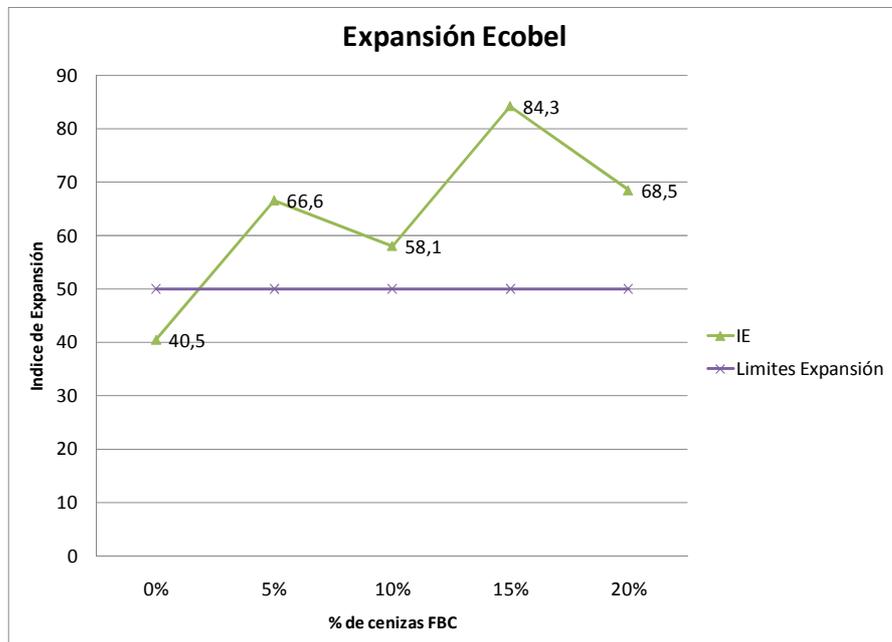


Figura VIII-21: Expansión Ecobel.

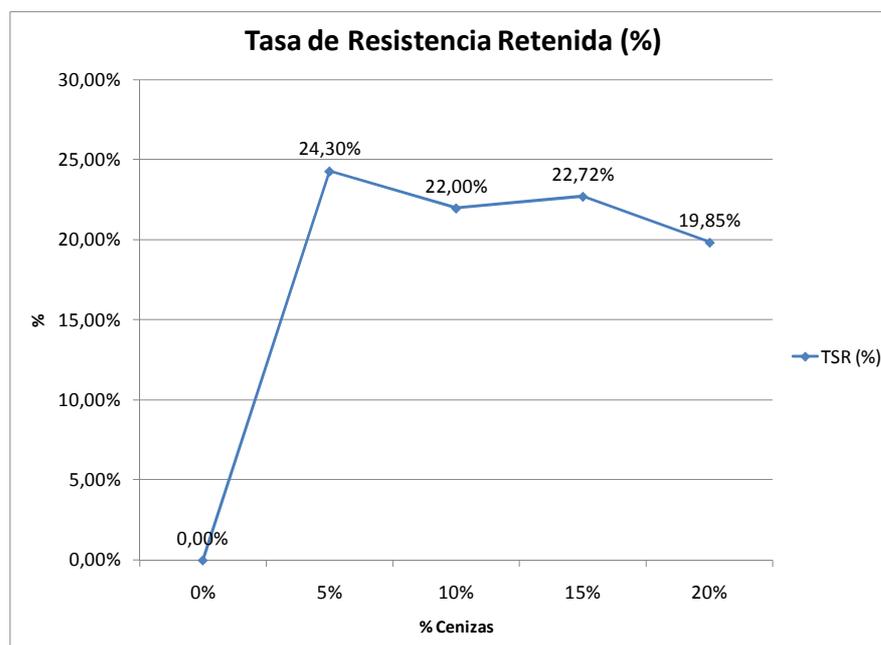


Figura VIII-22: TRR Ecobel.

#### VIII.5.4 Suelos Arauco

Cabe destacar nuevamente que los suelos de Arauco fueron estabilizados con la muestra N°1 de cenizas FBC, mientras que el resto fue tratado con la muestra N°2. Esto afectó en el desempeño de los suelos de Arauco, los cuales presentaron mayores expansiones y menor resistencia, dado que la muestra N°1 de cenizas tenía menos cal libre y más sulfatos.

Los resultados denotan que todos los suelos sufren de grandes expansiones, llegando a presentar una Índice de Expansión cercano a 190 (Calicata 5-20%). Con este tipo de suelos se hace necesario un tratamiento anti-expansión antes de compactar la mezcla, madurándola, si no la estabilización no sería efectiva.

Los resultados de resistencia a compresión no confinada seca por si solos no son capaces de entregarnos resultados representativos, ya que no es la condición más desfavorable a la que se encuentra sometido el suelo. Sin embargo, los resultados de estabilidad bajo el

agua (EBA) muestran una mejora sustancial de la impermeabilización, al agregar cenizas a estos suelos.

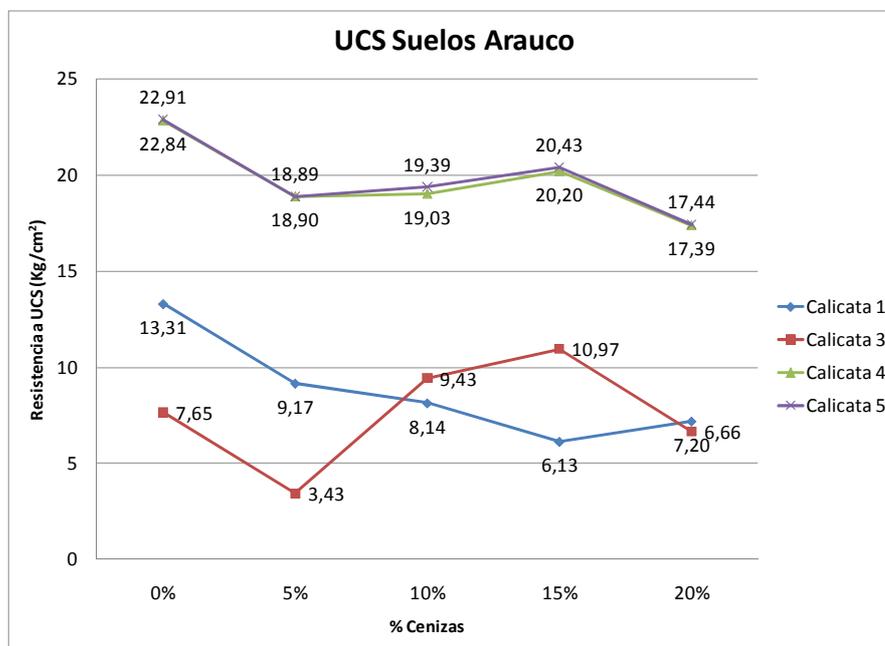


Figura VIII-23: UCS Suelos Arauco.

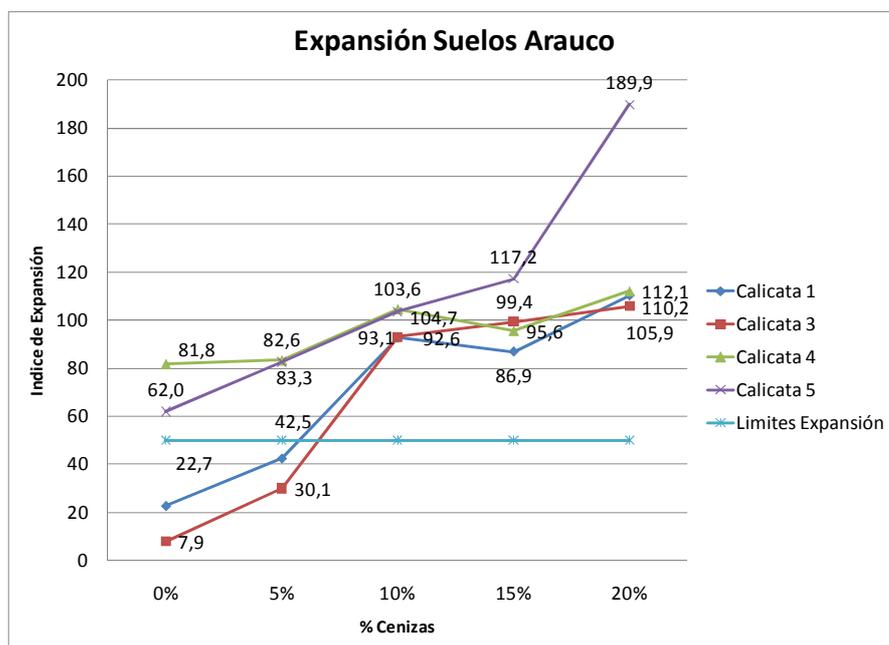


Figura VIII-24: Expansión Suelos Arauco.

### VIII.5.5 Ensayo de Medición de la Cantidad de Etringita

Paralelamente al ensayo de expansión, se realizó el ensayo de medición de etringita, el cual está basado en su composición química.

El objetivo de este análisis poder correlacionar el Índice de Expansión con el Ensayo de Medición de Etringita. Los resultados fueron los siguientes:

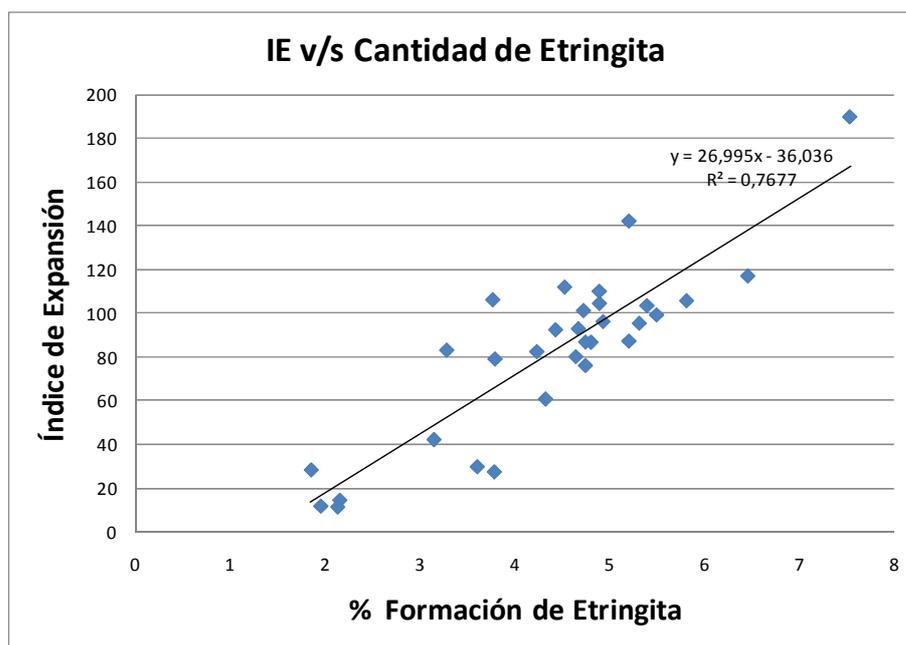


Figura VIII-25: Correlación IE v/s Cantidad de Etringita.

Según la correlación existente, se puede determinar que con un 3% de cantidad de etringita medida en el ensayo, se alcanza el Índice de Expansión máximo recomendado por la norma ASTM D 4829 – 88, que es 50.

Luego, se puede considerar un rango medio de formación de etringita entre un 3% y 5%, esta medida equivale a un Índice de Expansión entre 50 y 100.

Elevándose el Índice de Expansión sobre 100 cuando la formación de etringita es mayor del 5%.

Por lo tanto se puede concluir,

Tabla VIII-9: Conclusión de Correlación.

<b>Conclusión</b>		
% Etringita	Índice de Expansión	Estado
< 3%	IE < 50	Sin mayores problemas de expansión
3%-5%	50 < IE < 100	Problemas de expansión Medios
> 5%	IE > 100	Grandes problemas de expansión

### VIII.6 Determinación del Tiempo de Maduración Óptimo de la Mezcla

El análisis comenzó con el suelo que presenta mayor cantidad de sulfatos: Parcela Cabrerías 54-A. Con este suelo arcilloso se decidió realizar probetas con dos tiempos de madurados diferentes (24 y 48 hrs) y con tres porcentajes de agua adicional de mezclado (0%-3% y 5%). Cada set de probetas fue sometida a Ensayos de Compresión no Confinada y Ensayo de Expansión.

Los resultados fueron los siguientes:

Tabla VIII-10: Resultado UCS e Índice de Expansión Probetas Maduradas 1 día.

<b>Maduración 1 día Parcelas Cabrerías 54-A</b>				
FBC	UCS (Kg/cm <sup>2</sup> )		TRR	Índice de Expansión
	Seco	Sat		
10% + 0% agua	18,1	4,5	24,7%	87,5
10% + 3% agua	28,1	3,1	10,9%	47,8
10% + 5% agua	17,5	3,4	19,6%	80,3
20% + 0% agua	27,8	13,6	49,0%	96,4
20% + 3% agua	57,4	32,2	56,1%	87,0
20% + 5% agua	45,6	24,7	54,2%	101,4
<b>Curado</b>	3 días	40°C	Con ziploc	
<b>Maduración</b>	1 día			
<b>Humedad</b>	Óptima + 0%-3%-5%			

Tabla VIII-11: Resultados UCS e Índice de Expansión Probetas Maduradas 2 días.

<b>Maduración 2 días Parcelas Cabrerías 54-A</b>				
FBC	UCS (Kg/cm <sup>2</sup> )		TRR	Índice de Expansión
	Seco	Sat		
10% + 0% agua	21,0	1,0	4,9%	36,5
10% + 3% agua	7,6	0,7	9,1%	27,7
10% + 5% agua	25,4	1,8	7,0%	61,0
20% + 0% agua	44,8	6,0	13,3%	106,4
20% + 3% agua	57,8	19,8	34,3%	79,3
20% + 5% agua	42,4	14,8	34,8%	87,5
<b>Curado</b>	3 días	40°C	Con ziploc	
<b>Maduración</b>	2 días			
<b>Humedad</b>	Óptima + 0%-3%-5%			

### VIII.6.1 Efecto del Agua Adicional de Mezclado en el Índice de Expansión

Las siguientes figuras (Figura VIII-26 y Figura VIII-27) nos dan a conocer que en ambos casos, con 1 y 2 días de maduración existe una disminución del Índice de Expansión (IE) al agregar 3% de agua adicional a la de mezclado, los resultados en ambos periodos de maduración, demostraron que existe una disminución del IE de aproximadamente un 30% en promedio. Sin embargo, el IE aumentó nuevamente con un 5% de agua adicional. Con estos resultados ahora podría utilizarse el 10% como dosificación óptima (sólo considerando el IE), ya que este disminuyó a menos de 50.

Este comportamiento se debe a que con más agua se solubilizan más sulfatos forzando así la formación de etringita antes de la compactación, pero si se supera el límite de disolución provoca la formación de nuevos cristales.

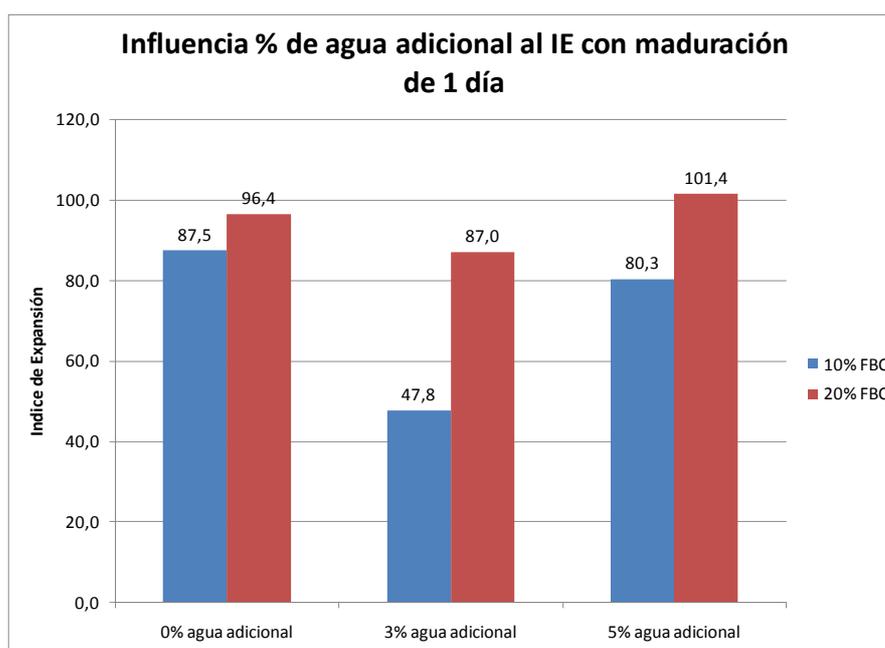


Figura VIII-26: Agua Adicional v/s % Adicional de Agua - 1 Día de Maduración.

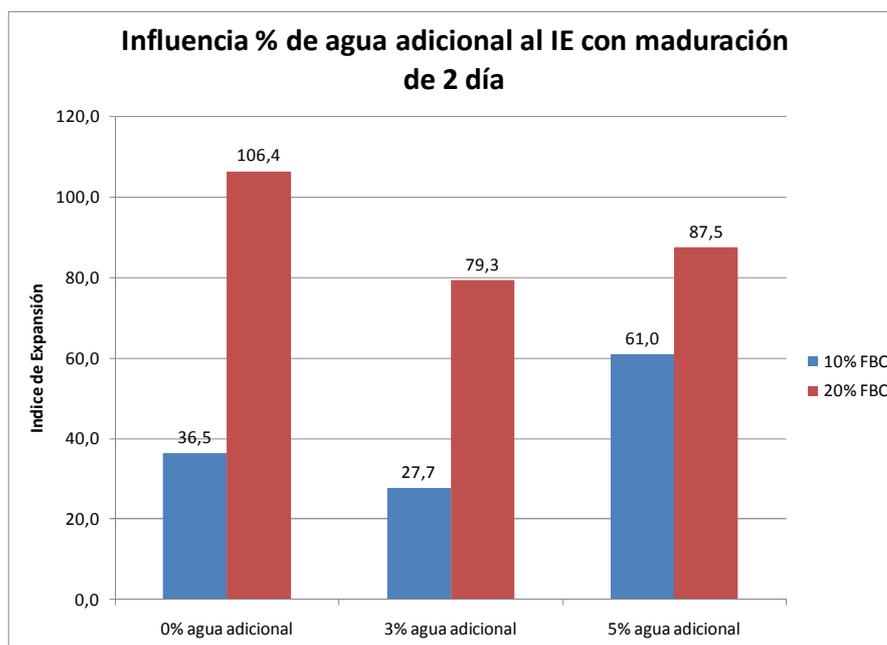


Figura VIII-27: Agua Adicional v/s % Adicional de Agua - 2 Días de Maduración.

### VIII.6.2 Efecto del Agua Adicional de Mezclado en la Resistencia al Compresión No Confinada (UCS)

Los resultados de los Ensayos UCS muestran que con el 3% de agua adicional al óptimo se consiguen mayores resistencias que sin agua adicional y que agregando 5% más de humedad de la entregada por el Proctor, en ambos periodos de maduración.

Las tasas de resistencia retenida aumentan también con la adición del 3% de agua, a excepción con el 10% y un día de maduración, en el que disminuye un 10%. Madurando las mezclas dos días las TRR bajan aproximadamente en un 20%.

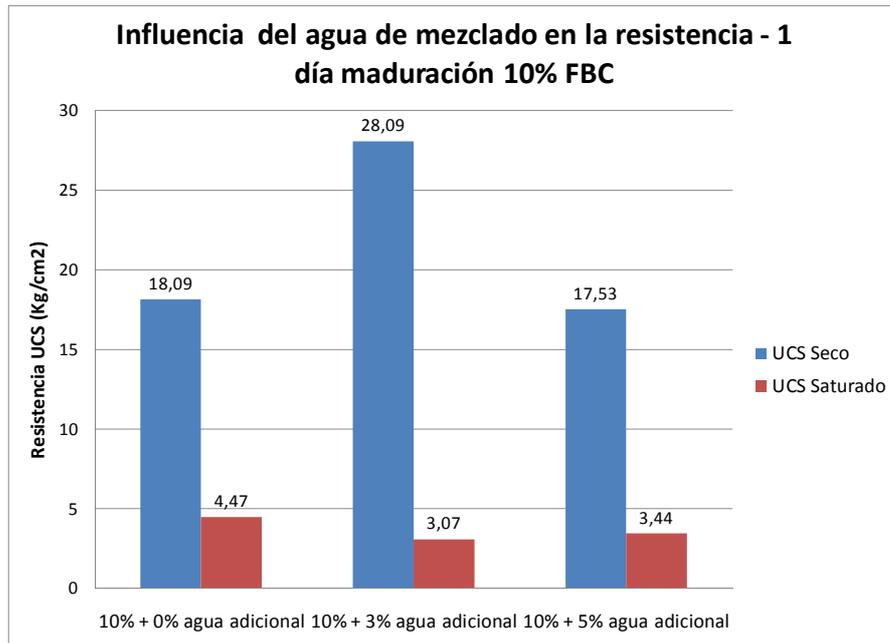


Figura VIII-28 : UCS - 1 día Madurado – 10% FBC - PC 54-A.

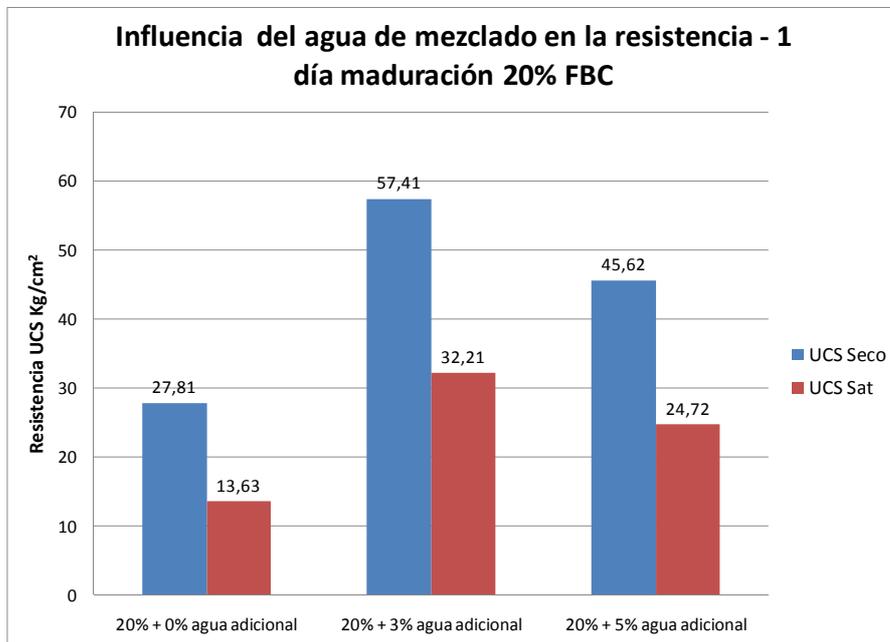


Figura VIII-29: UCS - 1 día Madurado – 20% FBC - PC 54-A.

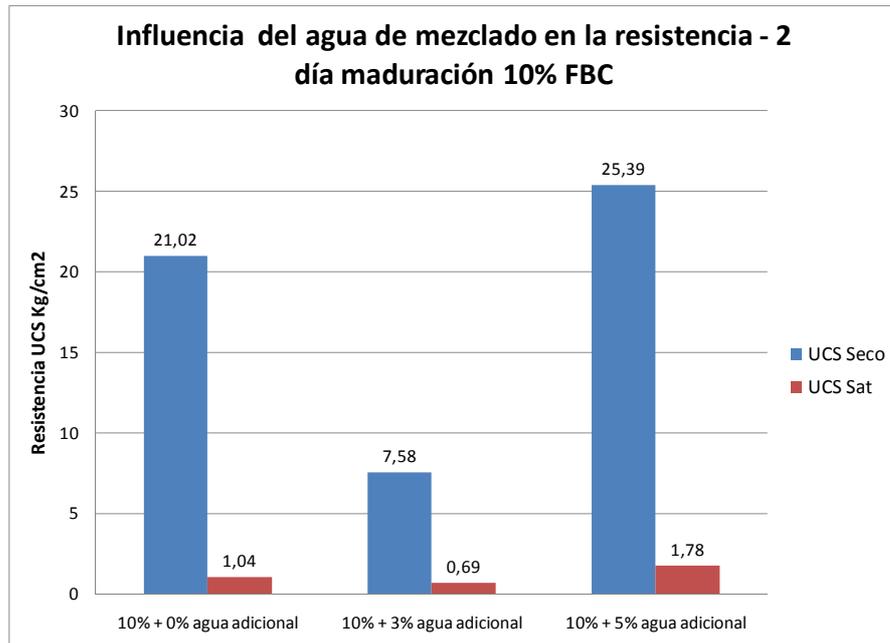


Figura VIII-30: UCS - 2 día Madurado – 10% FBC - PC 54-A.

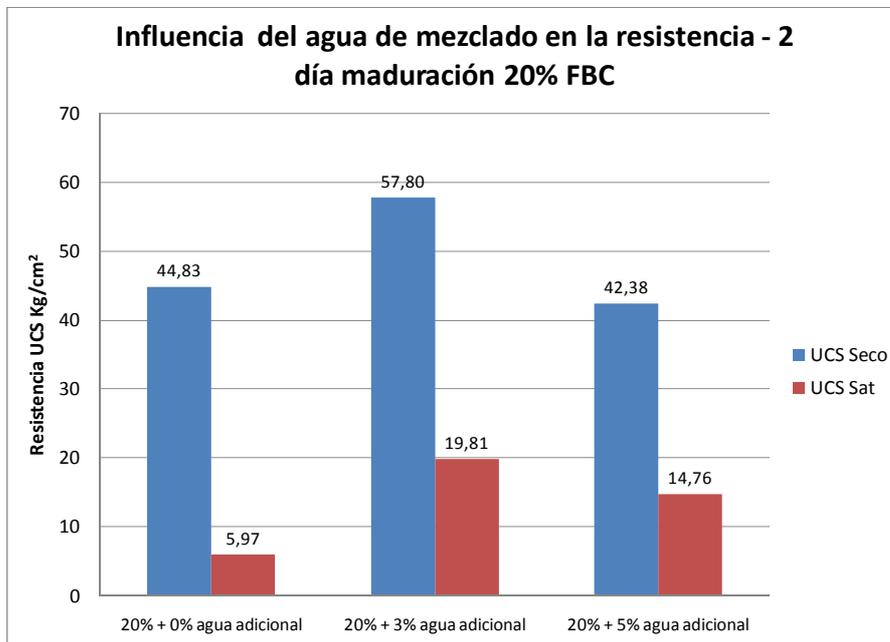


Figura VIII-31: UCS - 1 día Madurado – 20% FBC - PC 54-A.

Luego de observar que las expansiones disminuyen y la resistencia UCS aumenta con la adición de un 3% agua adicional, se decidió dosificar siempre los suelos ricos en sulfatos con un 3% de agua adicional al óptimo entregada por el ensayo Proctor Modificado. Esta solución en terreno puede no resultar muy aplicable, dada la variación de las humedades de la subrasante, las cuales en algunos casos superan el 3%.

### **VIII.6.3 Efecto de la Maduración en el Índice de Expansión**

Considerando los resultados anteriores se analizó el efecto de la maduración en el Índice de Expansión. Se eligieron las dosis en las cuales los suelos presentaron mayores expansiones en la etapa de dosificación.

#### **a) Parcelas Cabrerías 54-A**

Las Figura VIII-32 y Figura VIII-33 nos muestran el IE que poseen las mezclas del suelo con mayor cantidad de sulfatos con 10% y 20% de dosis de cenizas FBC, respectivamente, con un día y dos días de maduración.

Los IE de las mezclas con 10% de cenizas, presentaron disminuciones de 48,6% al primer día de madurado y de 70,2% al segundo día de madurado. Bajando el IE a límites permitidos para la estabilización con cenizas FBC.

Las mezclas con 20% de cenizas presentaron disminuciones menores, del orden del 15% en ambos periodos de maduración.

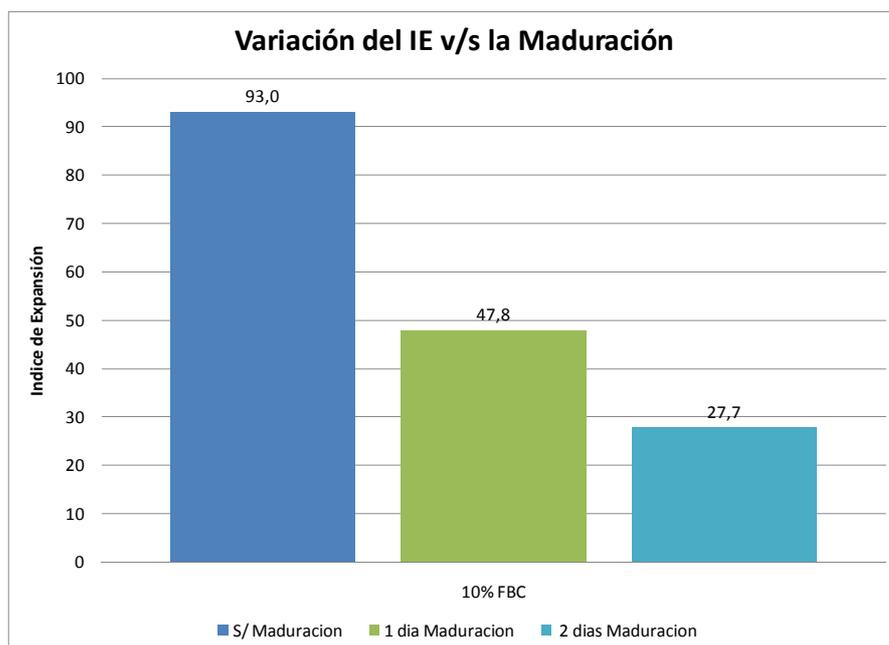


Figura VIII-32: IE v/s Maduración - 10% FBC- PC 54-A.

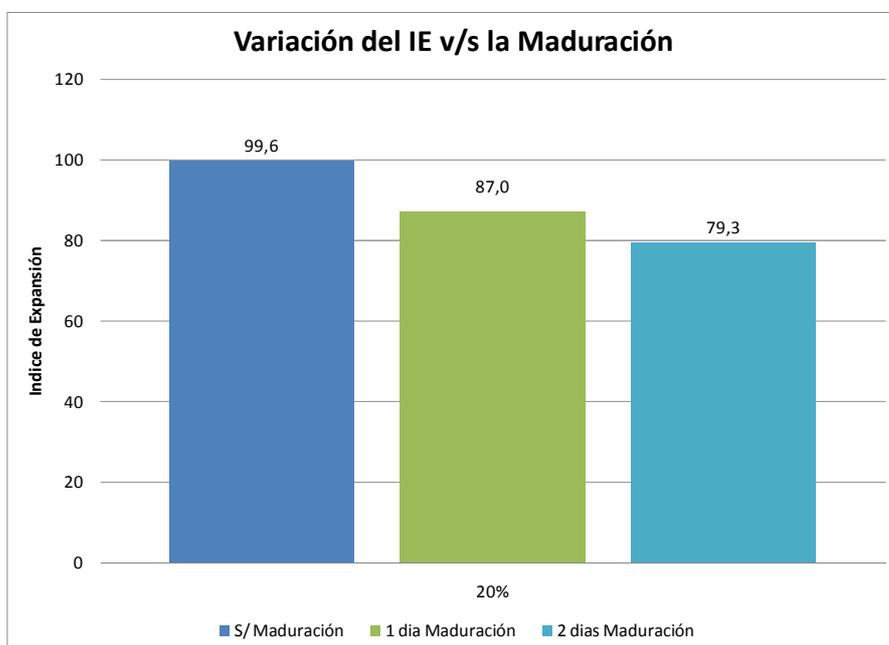


Figura VIII-33: IE v/s Maduración - 20% FBC- PC 54-A.

## b) Parcelas Cabrerías 1-B

Al suelo de Parcelas Cabrerías 1-B se le realizó las mismas mediciones, con 3% de agua adicional de la óptima a la mezcla, los resultados fueron los siguientes:

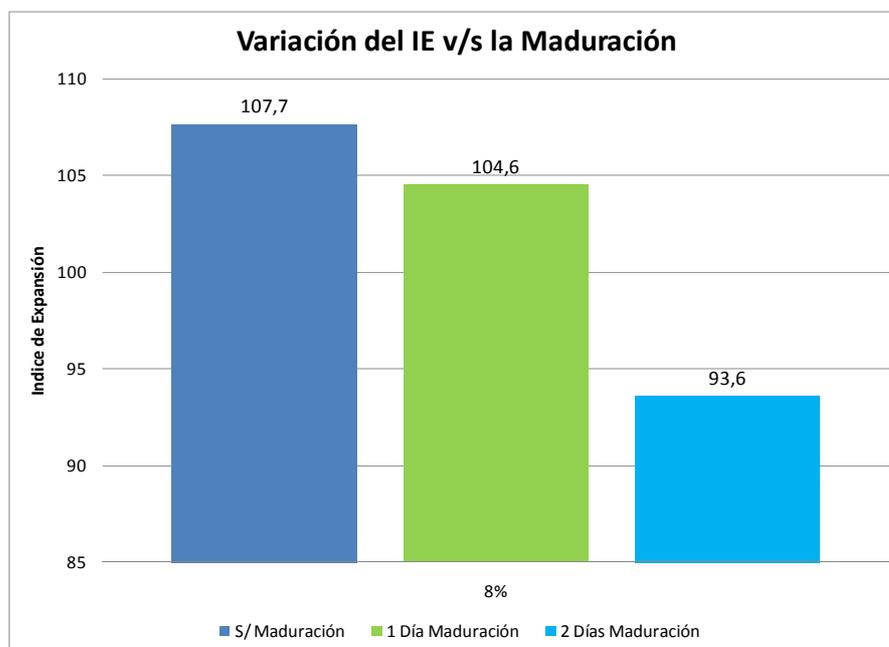


Figura VIII-34: IE v/s Maduración - 8% FBC- PC 1-B.

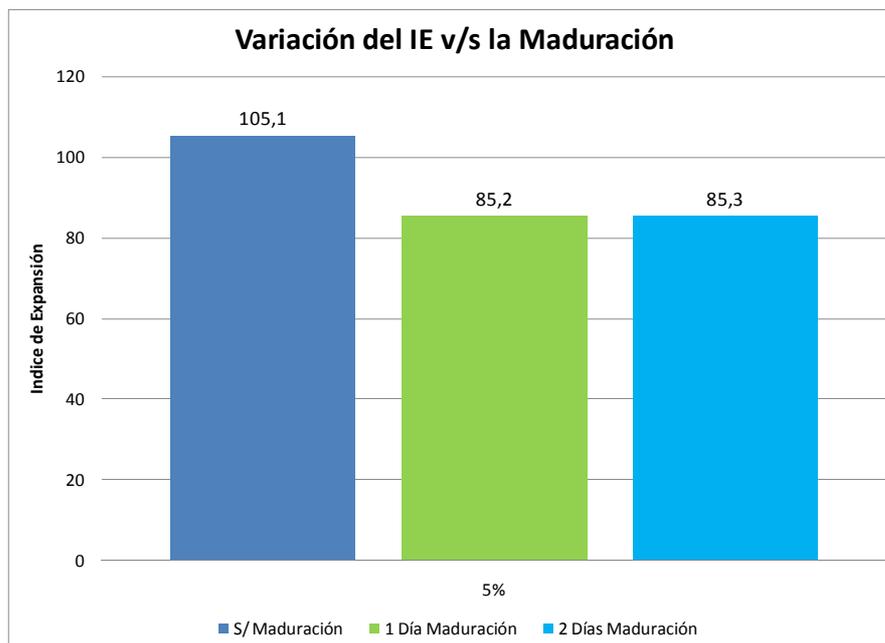


Figura VIII-35: IE v/s Maduración - 5% FBC- PC 1-B.

Los IE de las mezclas con 8% de cenizas, presentaron disminuciones bastante menores al del suelo anterior, 2,9% al primer día de madurado y de 13,5% al segundo día de madurado.

Las mezclas con 5% de cenizas, presentaron disminuciones menores, del orden del 18% en ambos periodos de maduración.

c) Ecobel

Con la arena arcillosa de Ecobel se realizó el mismo análisis, con 3% de agua adicional de la óptima a la mezcla, los resultados fueron los siguientes:

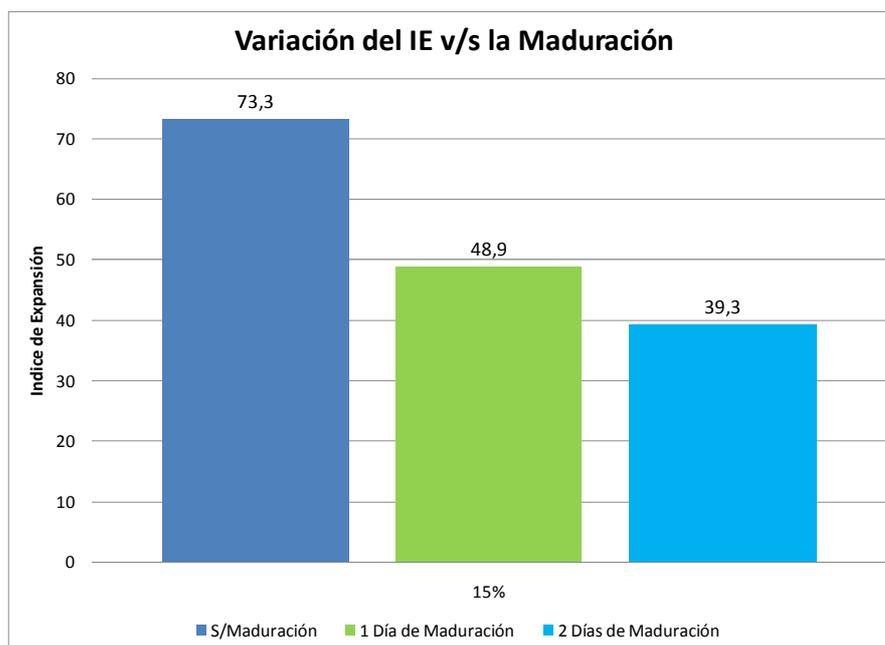


Figura VIII-36: IE v/s Maduración - 15% FBC- Ecobel.

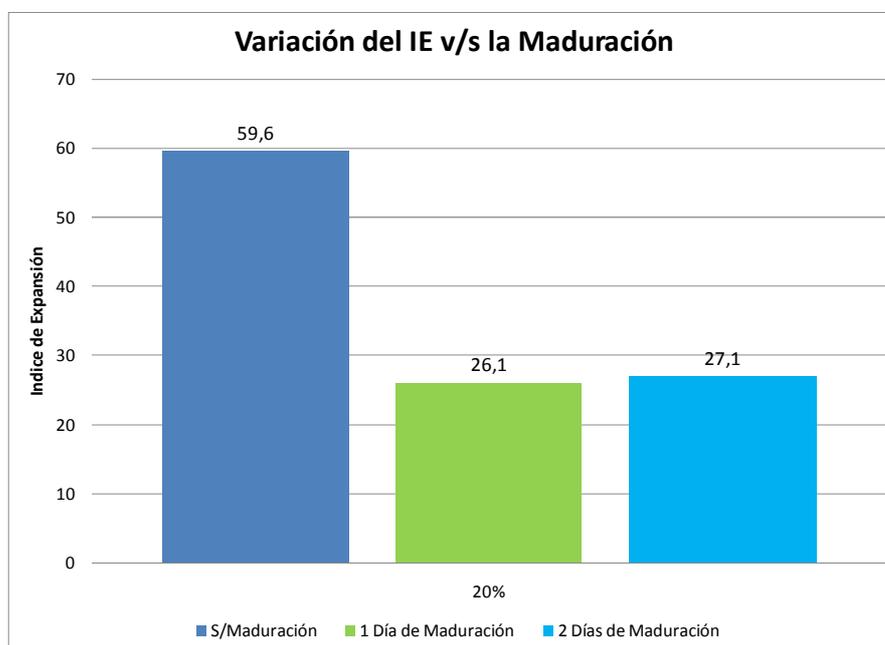


Figura VIII-37: IE v/s Maduración - 20% FBC- Ecobel.

El IE de las mezclas con 15% de cenizas presentó disminuciones del orden del 30% en ambos periodos de maduración. Logrando bajar el IE a límites permitidos para la estabilización con cenizas FBC.

Las mezclas con 20% de cenizas, presentaron disminuciones mayores del orden del 50% en ambos periodos.

Las expansiones disminuyen claramente con el proceso de maduración. La razón es simple, los compuestos expansivos son formados antes de la compactación de la mezcla.

#### **VIII.6.4 Efecto de la Maduración en la Resistencia a la Compresión no Confinada**

La bibliografía asegura que mayores periodos de maduración influyen negativamente en la resistencia alcanzada por las probetas. Se realizó el análisis con los tres tipos de suelo que presentaron mayor cantidad de sulfatos. Los resultados fueron los siguientes.

##### **a) PC 54-A**

El suelo de Parcelas Cabrerías 54-A con 10% de cenizas FBC y con un día de maduración, presentó aumento de resistencia en ambos estados de saturación. Un 14,6% la resistencia seca y en un 100,4% la saturada. Sin embargo, son dos días de maduración la resistencia seca presentó una disminución del 69,1% y saturada de un 54,8%.

Las tasas de resistencia retenida son bastantes bajas sin maduración, para los dos periodos de saturación, llegando hasta valores del 7%. El periodo de maduración provoca el aumento en algunos puntos de esa cifra, llegando a ser más del 10%.

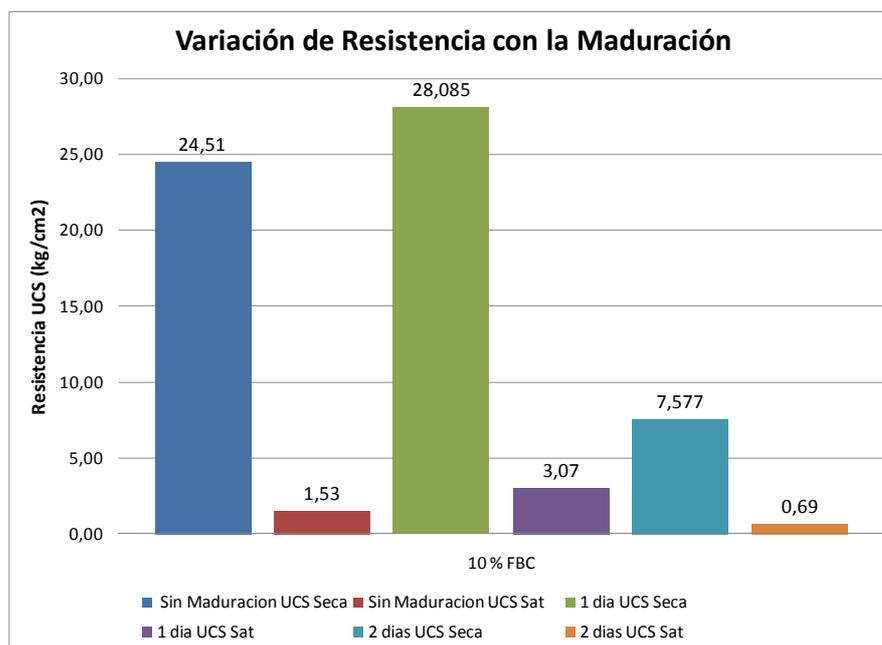


Figura VIII-38: Resistencia UCS v/s Maduración - 10% FBC - PC 54-A.

Cuando la dosis de cenizas FBC es aumentada a 20%, la mezcla presenta alzas en sus resistencias. La resistencia seca aumenta un 13,7% con un día de maduración y la saturada un 14,3%. Con dos días de maduración la resistencia seca aumenta un 14, %, pero la resistencia saturada disminuye en un 29,7%.

Las tasas de resistencia retenida presentan valores bastante recomendables para realizar una estabilización, llegando alcanzar 56,1% con un día de maduración.

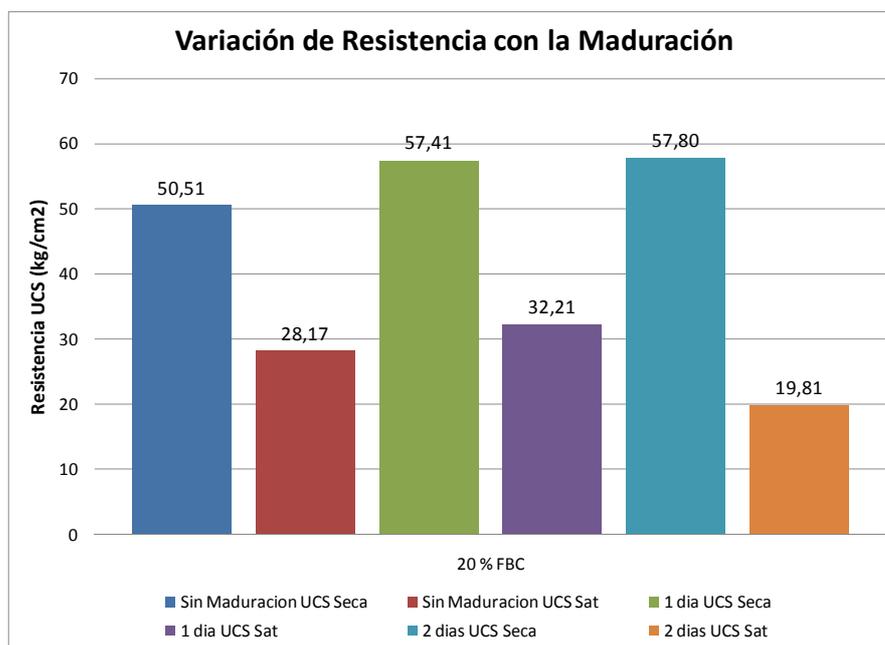


Figura VIII-39: Resistencia UCS v/s Maduración - 20% FBC - PC 54-A.

b) PC 1-B

La arena limosa de Parcelas Cabrerías 1-B presentó un pésimo comportamiento al tiempo de maduración, ya que en ambos periodos sólo se registraron pérdidas de resistencia seca y saturada.

Con un 8% de cenizas FBC y un día de madurado la resistencia seca disminuyó en un 64,81%, mientras que la saturada lo hizo en un 100%.

Con dos días de maduración las resistencias corrieron la misma suerte, la seca disminuyó en un 81,28% y las probetas no fueron capaces de soportar el saturado.

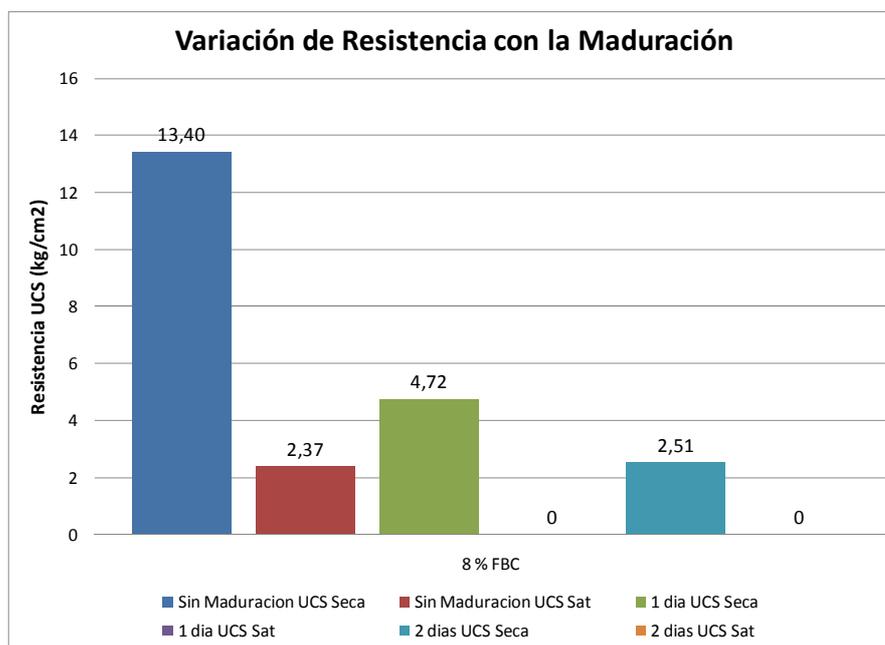


Figura VIII-40: Resistencia UCS v/s Maduración - 8% FBC - PC 1-B.

Utilizando una dosis del 5% de cenizas, las probetas no fueron capaces de soportar el saturado de 24 horas. Por lo tanto sólo se muestran los resultados de la resistencia seca, los cuales muestran una disminución del 74,43% y del 81,42%, con uno y dos días de maduración respectivamente.

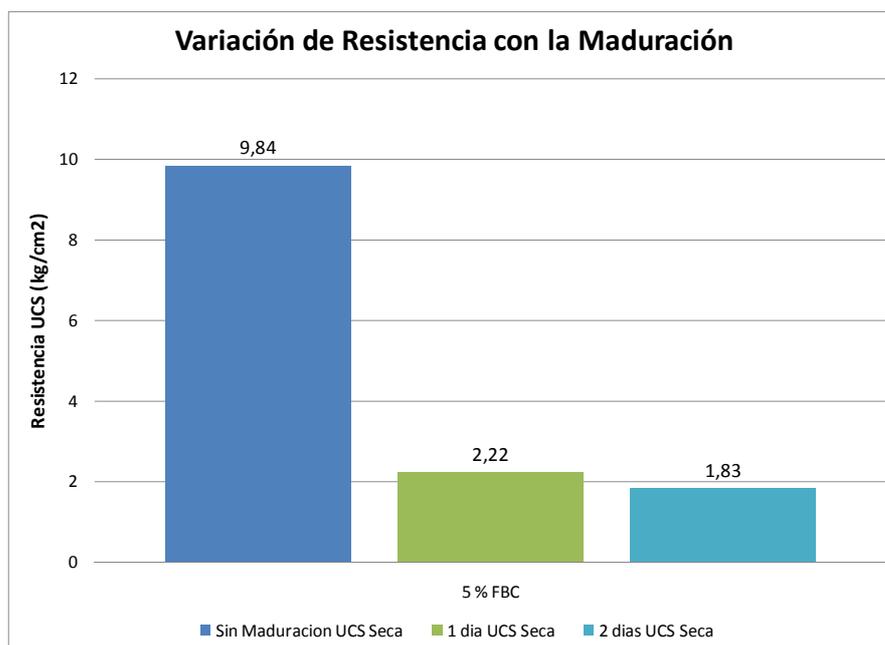


Figura VIII-41: Resistencia UCS v/s Maduración - 5% FBC - PC 1-B.

c) Ecobel

La arena arcillosa de Ecobel, con un 15% de adición de cenizas FBC, presentó una disminución de su resistencia seca de un 71,36% y de 40,99%, con uno y dos días de maduración respectivamente. El comportamiento saturado fue similar, ya que con un día de maduración presentó una disminución del 37,41%, pero con dos días de madurado presentó un aumento de la resistencia saturada del 24,9%.

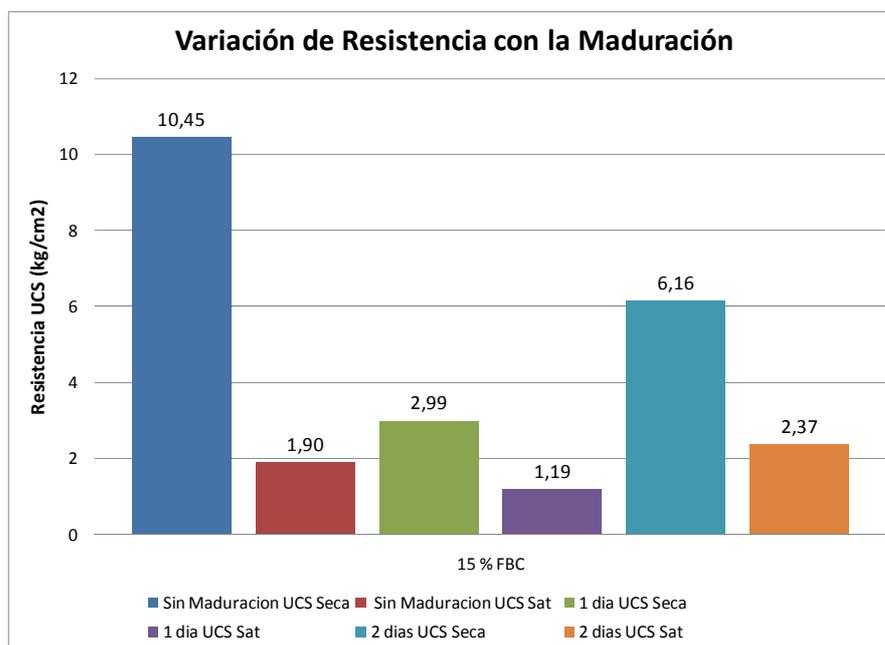


Figura VIII-42: Resistencia UCS v/s Maduración - 15% FBC - Ecobel.

Igual comportamiento presentó con 20% de ceniza FBC. Con un día de maduración la resistencia seca disminuyó un 28,35%, y con dos 56,86%. La resistencia saturada disminuyó un 10,9% con un día de maduración y aumento en un 43,84% con dos días de maduración.

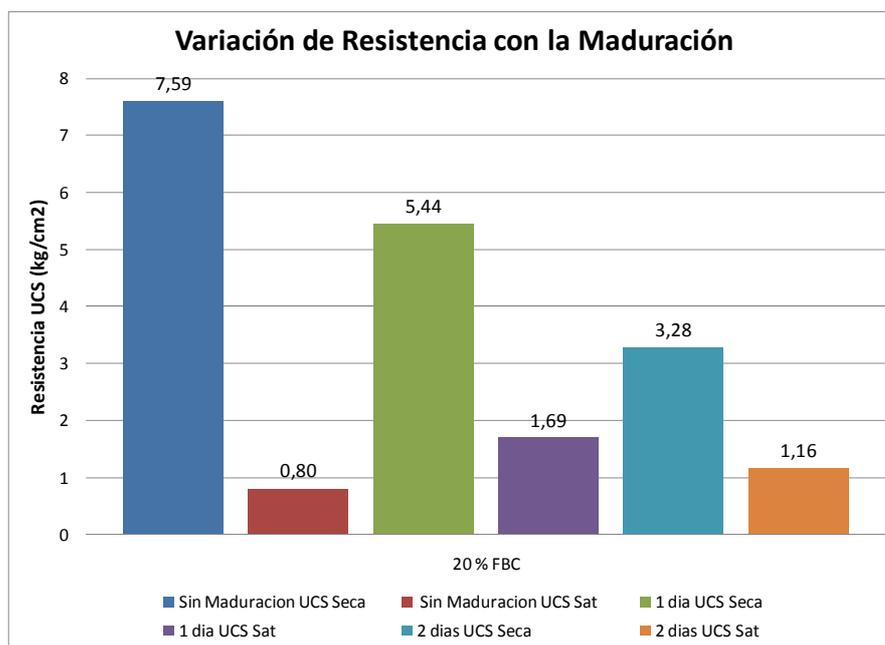


Figura VIII-43: Resistencia UCS v/s Maduración - 20% FBC - Ecobel.

Los resultados del análisis de la influencia de la maduración en el desempeño de la resistencia no presentó un comportamiento tan claro como el declarado en la bibliografía, ya que para una arcilla de alta plasticidad la cual presenta una alta cohesión, no hubo problemas en que siguiera creando enlaces cementantes a pesar del prematuro rompimiento de éstos al momento de compactar. Sin embargo, el resto de los suelos presentó los resultados esperados.

Es importante considerar que el periodo de maduración sirve para disminuir las expansiones hasta un rango aceptable, y la disminución de la resistencia es una variable que se puede manejar a la hora de realizar el diseño estructural.

Se determinó que un día de maduración es un rango de tiempo admisible para preparar la mezcla antes de compactar en laboratorio y en terreno, y así disminuir las expansiones y poder estabilizar todo rango de suelos.

## VIII.7 Ensayos de Doble Estabilización

### VIII.7.1 Doble Estabilización con Cenizas FBC

Se realizaron probetas con el suelo que presenta mayor problema de expansión, Parcelas Cabrerías 54-A y con uno de comportamiento intermedio como lo fue Ecobel.

Primero se realizaron mezclas con 10% de adición de cenizas FBC, los cuales se dejaron madurar un día, para luego mezclarla nuevamente con 3% y 5% de cenizas FBC. El agua adicional de mezclado también fue variada (0% y 3%) para evaluar su influencia.

#### a) Efecto de la Doble Estabilización en el Índice de Expansión

- PC 54-A

La arcilla de Parcelas Cabrerías 54-A con una dosis de 10% de cenizas FBC y sin agua adicional, presentó un aumento del Índice de Expansión de un 45% al adicionar 3% más de cenizas FBC, mientras que al adicionar 5% de cenizas sólo aumento un 21,3%.

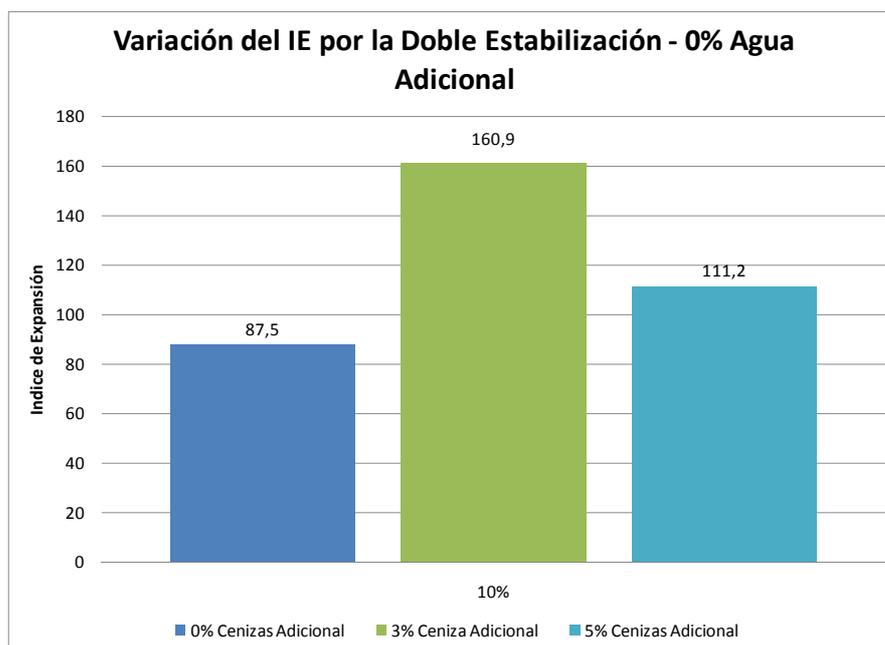


Figura VIII-44: Variación del IE por la Aplicación de Doble Estabilización - 10% cenizas FBC – 0% Agua Adicional - PC 54-A.

Con una dosis de cenizas FBC del 10% y con un 3% adicional de agua las expansiones siguieron aumentando a medida que le agregamos más cenizas FBC. Con un 3% más de cenizas aumentó un 62,2%, mientras que con 5% de cenizas adicionales aumentó un 63,8%.

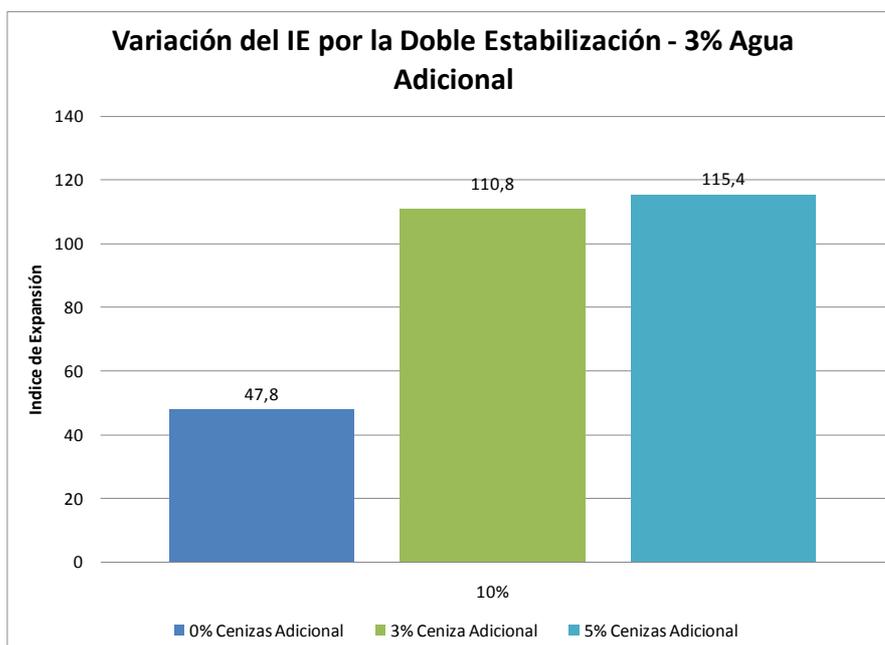


Figura VIII-45: Variación del IE por la Aplicación de Doble Estabilización - 10% cenizas FBC – 3% Agua Adicional - PC 54-A.

- Ecobel

Al contrario de lo ocurrido con la arcilla las expansiones del suelo de Ecobel sufrieron una bajar, incluso llegando más bajo que el límite permitido para dosificar sin realizar tratamientos previos (IE=50).

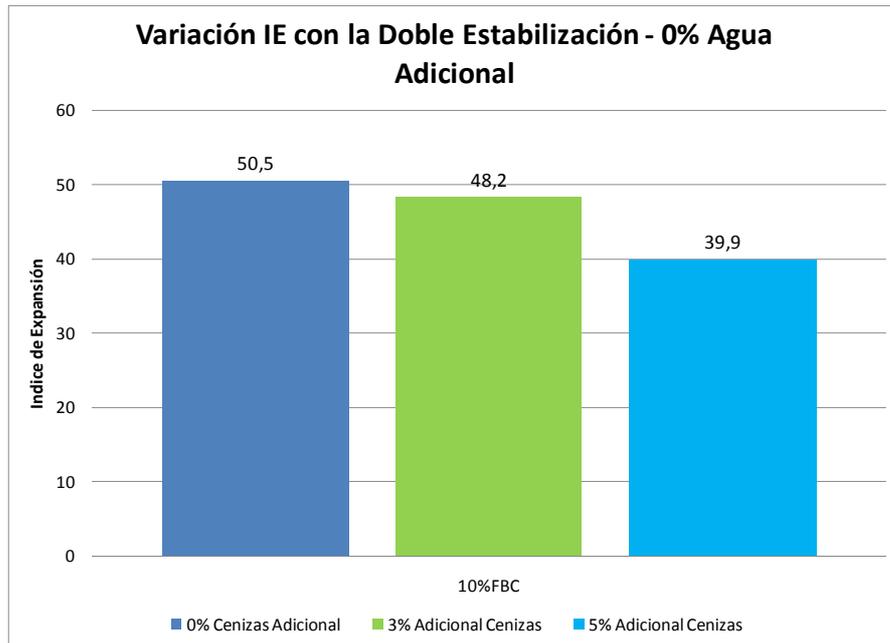


Figura VIII-46: Variación del IE por la Aplicación de Doble Estabilización - 10% cenizas FBC – 0% Agua Adicional - Ecobel.

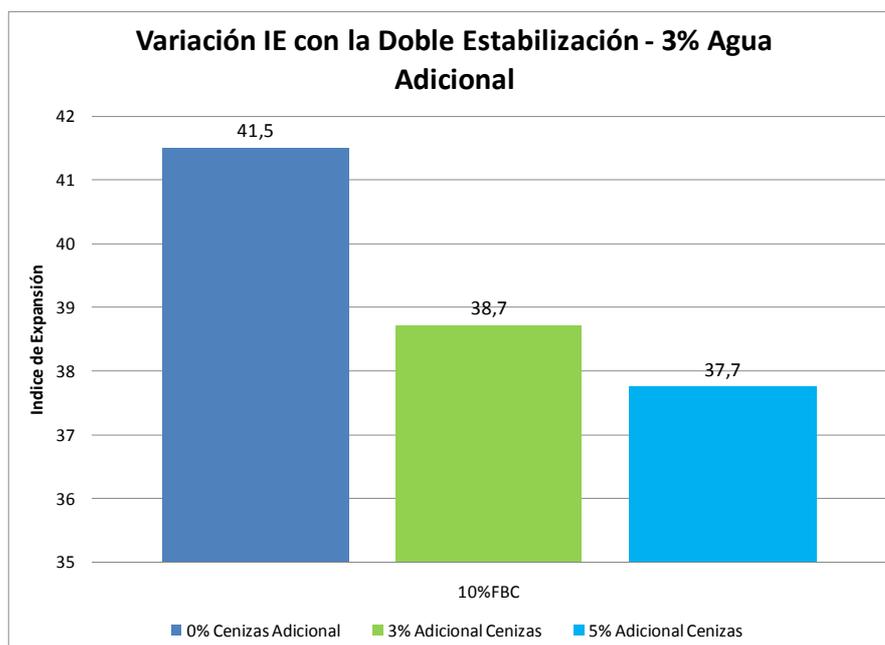


Figura VIII-47: Variación del IE por la Aplicación de Doble Estabilización - 10% cenizas FBC – 3% Agua Adicional - Ecobel.

b) Efecto de la Doble Estabilización en la Resistencia a la Compresión no Confinada

- PC 54-A

La Resistencia a la Compresión no Confinada (UCS) sin incorporar agua adicional, se comportó como era esperado, ya que iba creciendo paralelamente al aumento de la segunda dosis de cenizas, tal como lo muestra el siguiente gráfico (Figura VIII-48). Sin embargo, la resistencia saturada con 3% de cenizas FBC adicionales, sufrió una importante baja de resistencia en comparación con el resto.

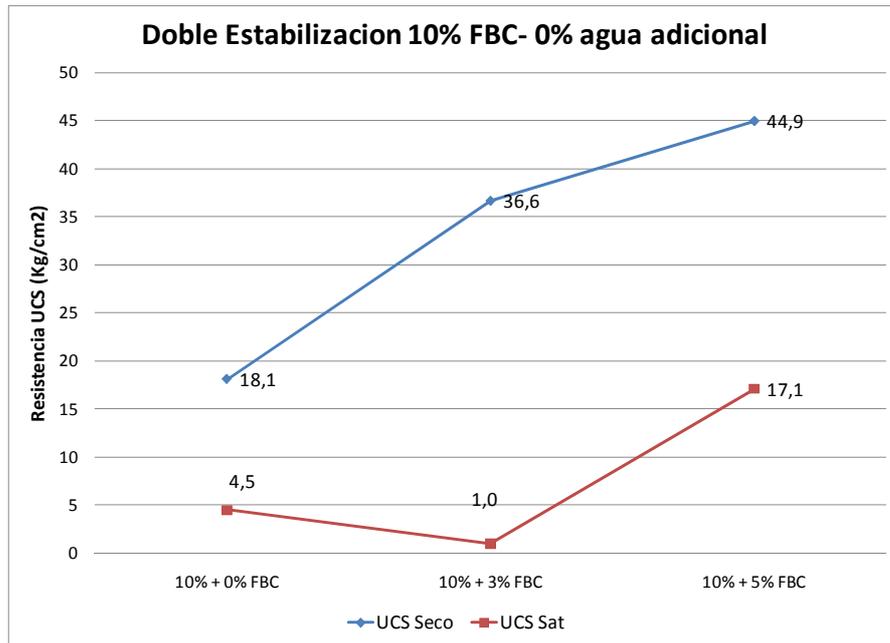


Figura VIII-48: Doble Estabilización -10% FBC - 0% Agua Adicional - PC 54-A.

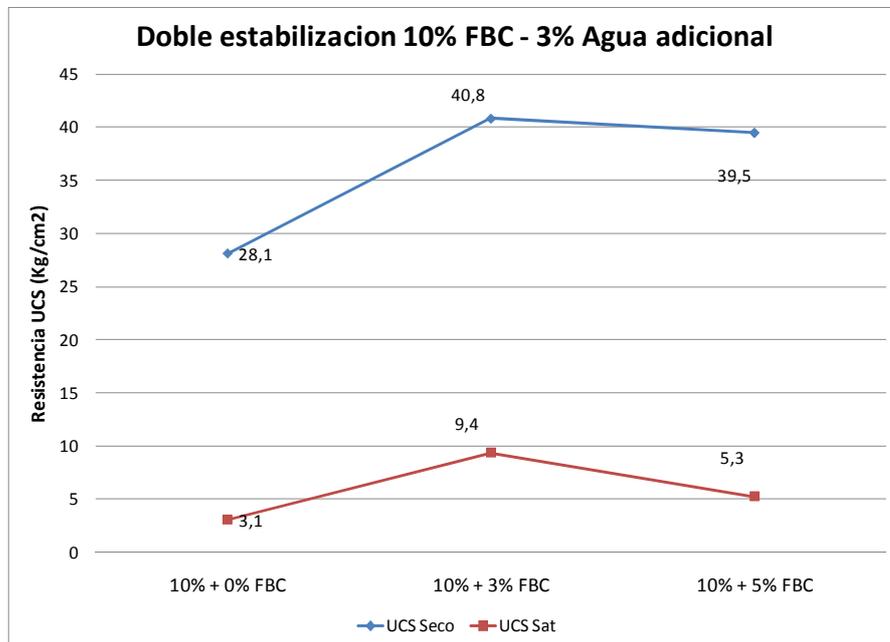


Figura VIII-49: Doble Estabilización -10% FBC - 3% Agua Adicional - PC 54-A.

Las tasas de resistencia retenida sin agua adicional, son de mediano comportamiento, alcanzando sólo el 20% para los estabilizados con el 0% y 5% de cenizas adicionales. Con el 3% de cenizas adicionales sólo se presenta un TRR del 2,67% (Figura VIII-50).

Con 3% adicional de agua la mezcla encontró un peak de resistencia con la adición de 3% de cenizas FBC, llegando a poseer una tasa de resistencia retenida del 22,92%.

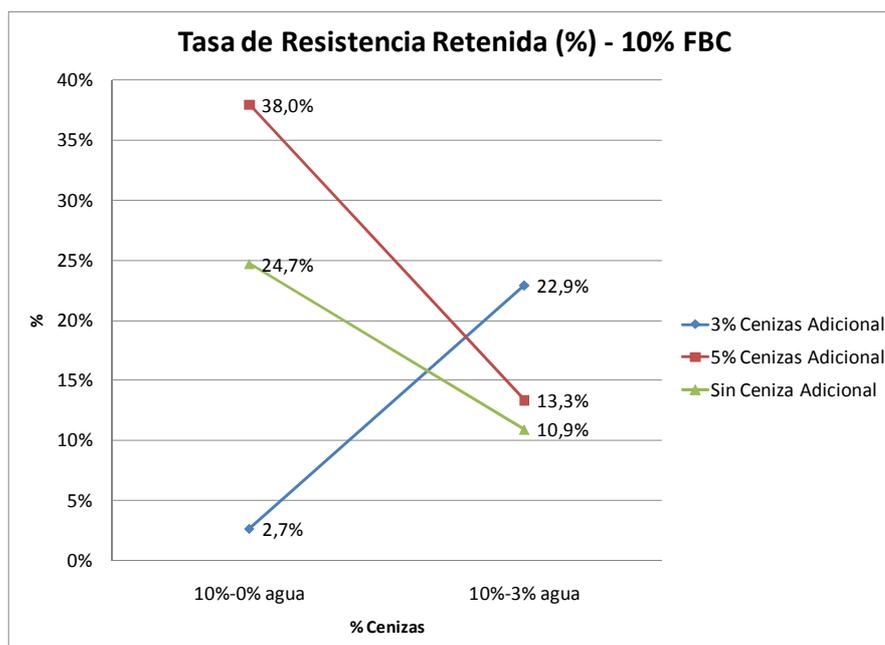


Figura VIII-50: TRR Doble Estabilización PC 54-A.

- Ecobel

El suelo de Ecobel se estabilizó en primera instancia con un 10% de cenizas FBC, para luego agregarle un 3 y 5% adicional. Se evaluó el desempeño de la mezcla añadiendo un 3% más del agua óptima entregada por la dosificación.

Los resultados con la humedad óptima y con el 3% de agua adicional, presentan un buen desempeño al añadirle un 3% más de cenizas FBC.

Las tasas de resistencia retenida con el 3 y 5% adicional de cenizas conseguido son bastantes parejas, alcanzando en ambos casos valores cercanos al 30% (Figura VIII-53).

Presentando así un incremento del 20% en comparación de aquellas mezclas que sólo recibieron una aplicación.

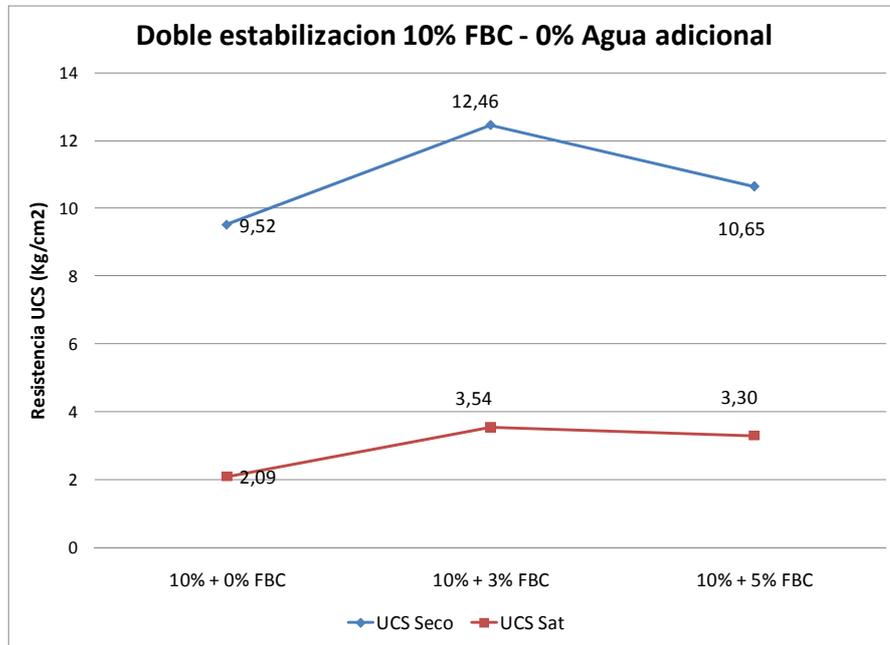


Figura VIII-51: Doble Estabilización -10% FBC - 0% Agua Adicional - Ecobel.

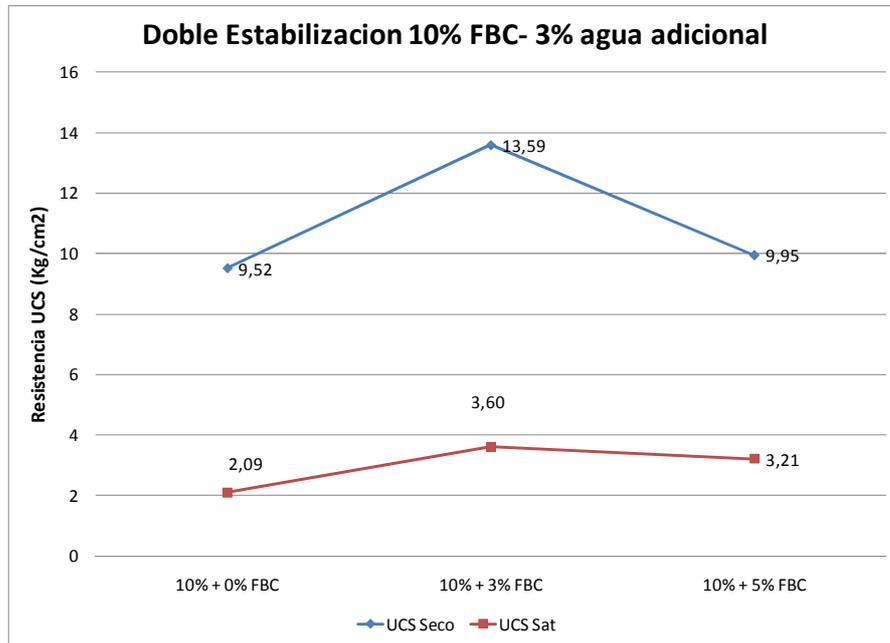


Figura VIII-52: Doble Estabilización -10% FBC - 3% Agua Adicional - Ecobel.

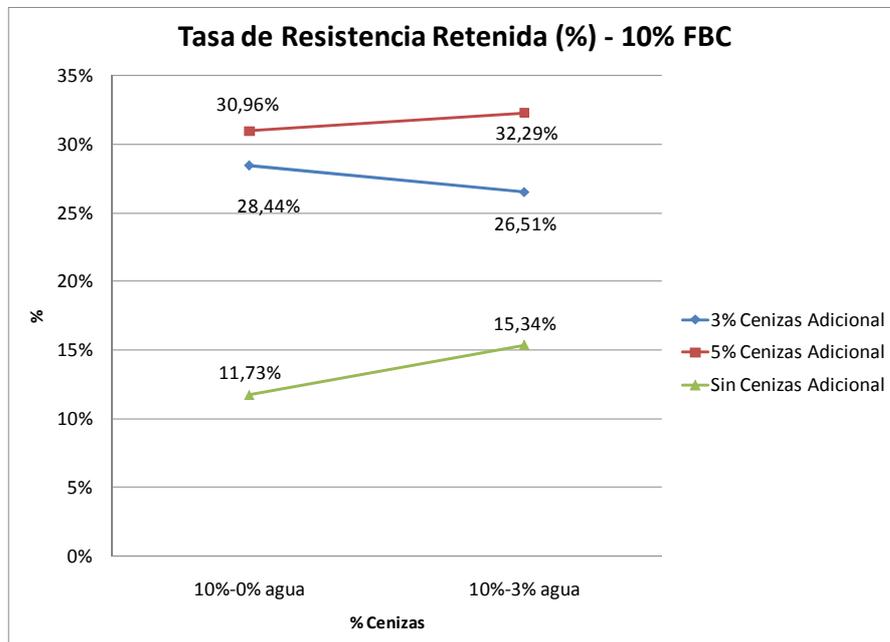


Figura VIII-53: TRR Doble Estabilización Ecobel.

### VIII.7.2 Doble Estabilización con Material Granular

La aplicación de un porcentaje de material granular a la mezcla fue considerado como alternativa para disminuir las expansiones y de paso aumentar la resistencia de la mezcla.

Los resultados dejan al descubierto que la resistencia no aumenta, si no que disminuye (Figura VIII-54), pero la tasa de resistencia retenida sube hasta alcanzar un 50%. La explicación de este comportamiento se basa en que las cenizas FBC trabajan cementando los finos del material, y al agregar un porcentaje de material granular sólo se está engrosando la granulometría del material, y disminuyendo los finos de éste. Se recomienda realizar las mismas experiencias con probetas de mayor tamaño

Las expansiones presentaron disminuciones, pero sólo de un 5%.

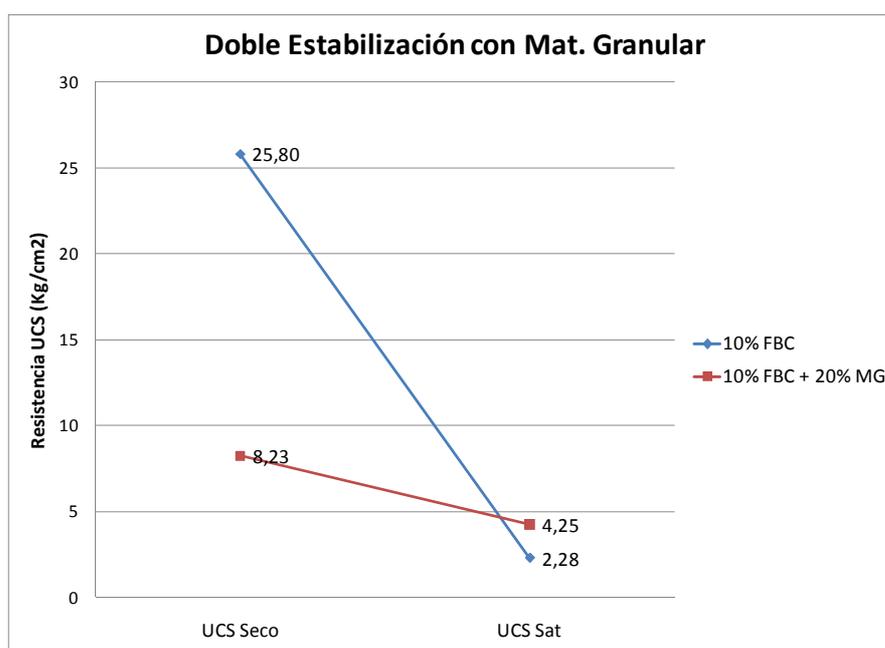


Figura VIII-54: UCS Doble Estabilización con Mat. Granular - 10% FBC + 20%

MG - PC 54-A.

## VIII.8 Variaciones de las Propiedades Físicas

### VIII.8.1 Índice de Plasticidad

La variación que presenta el Índice de Plasticidad con la maduración es importante, ya que a medida que aumentaron los días en que se dejó madurando la mezcla, el Índice de Plasticidad fue disminuyendo notablemente hasta en un 60% para ambos suelos. Cabe destacar, que el Índice de Plasticidad se estabiliza en ambos suelos después de los 7 días de maduración, llegando a ser igual a 7 aproximadamente, siendo que los IP de los suelos sin cenizas que presentan los suelos de PC 54-A y Ecobel, que son de 22 y 12, respectivamente.

A medida que se aumentó la dosis de cenizas FBC en la mezcla, el Índice de Plasticidad fue disminuyendo en el suelo de PC 54-A y aumentando en el suelo de Ecobel. Sin embargo, la sola adición de cenizas FBC provoca una disminución en el Índice de Plasticidad de los suelos sin estabilizar.

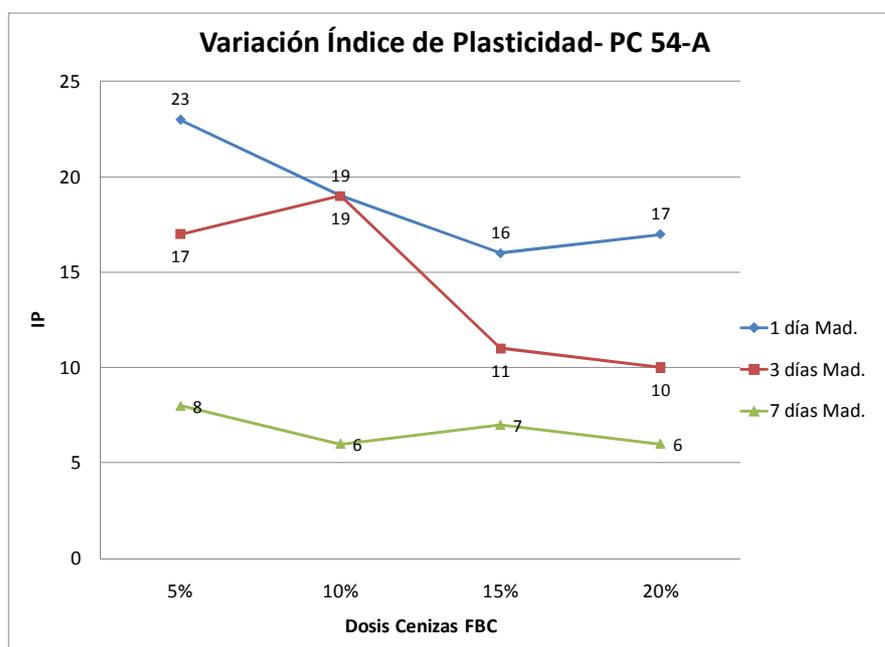


Figura VIII-55: Variación IP - PC 54-A.

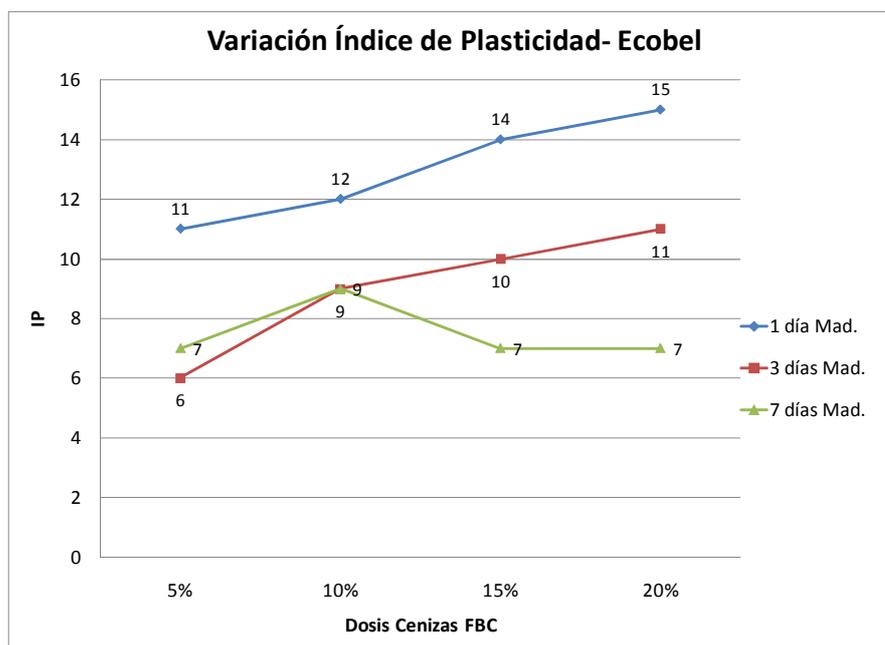


Figura VIII-56: Variación IP - Ecobel.

### VIII.8.2 Absorción

La capacidad de absorción de agua de los suelos estudiados presenta resultados dispares (Tabla VIII-12 y Figura VIII-57). Mientras que en algunos suelos como en la arcilla de alta plasticidad de Parcelas Cabreras 54-A, muestra claramente un porcentaje de ceniza con que maximiza la absorción de agua, existen otros como la arena arcillosa de Ecobel, en que presenta un aumento proporcional al aumento del porcentaje de cenizas FBC.

Las arenas de ENAP, no presentan mayor capacidad de absorción en comparación con las arenas arcillosas y limosas, de Ecobel y PC 1-B respectivamente, las cuales tienen una gran capacidad de absorción. Las diferencias pueden estar basadas en las menores cantidades de finos que presentan las arenas de ENAP en comparación con las de los suelos de Mininco y Ecobel.

Tabla VIII-12: % Absorción de Agua.

Suelo / Absorción (%)		Dosis de cenizas FBC (%)				
		0%	5%	10%	15%	20%
Minico	PC-1B			8,15	10,04	10,16
	PC-54A	3,87	3,98	9,84	8,95	7,92
	Peñablanca		3,32	4,30	5,37	3,65
Enap	Pozo 7		3,33	3,70	3,50	3,64
	Pozo 21		1,97	1,07	1,19	0,87
Ecobell	0%		5,26	6,60	6,98	8,31

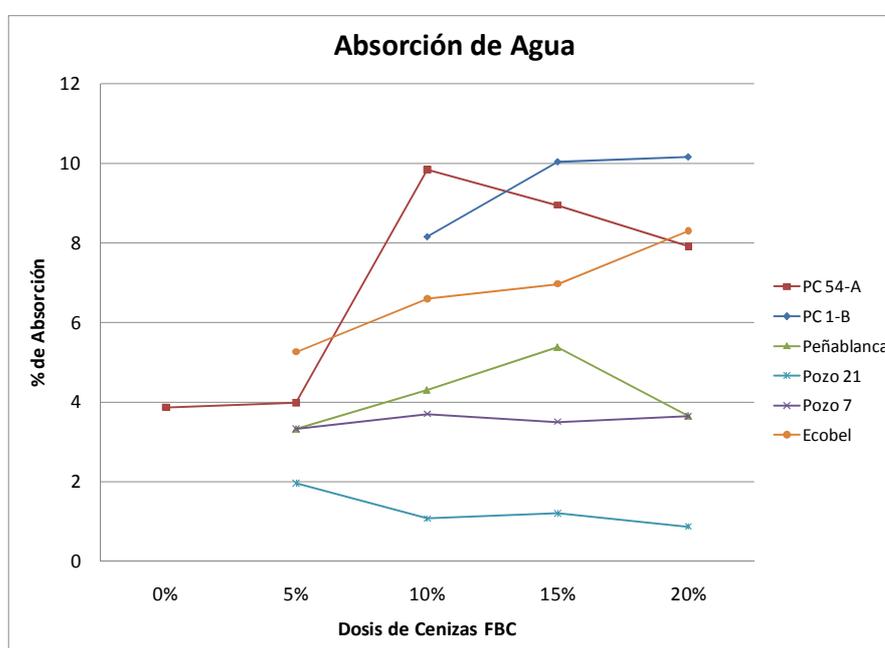


Figura VIII-57: Gráfico de Comparación de los % de Absorción de Agua

Se pudo observar que la capacidad de absorción de agua no está ligada estrechamente con las expansiones que presentan las probetas después del periodo de saturado. Al analizar los índices de expansión después del periodo de curado y saturado en forma separada, podemos concluir que la mayor parte de estringita es creada en el periodo de curado, ya que existe un considerable aumento de volumen y una disminución del peso, provocando

una baja en la densidad de la probeta. Esto se debe a la forma alargada de los cristales de etringita, los cuales dejan espacios intermoleculares los que son llenados por el agua.

Después de estar sumergidas las probetas 24 horas bajo el agua, el aumento de peso de éstas es notable, pero no así del Índice de Expansión. Estas observaciones nos llevan concluir que durante el periodo de saturación sólo existe una absorción de agua de la etringita y muy poca o nula creación de nuevo cristales.

La capacidad de absorción de la mezcla, tampoco presenta ninguna relación con el desempeño en la resistencia mecánica alcanzada. Por lo tanto, la absorción no siempre aumenta en desmedro de la resistencia.

## IX METODOLOGÍA DE DOSIFICACIÓN PROPUESTA

Después de todo el análisis anterior se concluye que para poder estabilizar químicamente suelos potencialmente expansivos con cenizas FBC, se recomienda seguir el siguiente protocolo:

Determinar que tan potencialmente expansivo es el suelo a estabilizar. Para esto se aconseja seguir los siguientes pasos:

- a) Medición contenido de sulfatos del suelo (ppm): Para tener en conocimiento que tan propenso es el suelo a la expansión.
- b) Realizar Ensayo de Límites de Atterberg al suelo: La plasticidad de suelo está directamente relacionada con la posibilidad de expansión. Entre mayor sea el IP, mayor es la tendencia. Se considera un IP superior a 15 como límite, para ser considerado posiblemente expansivo.
- c) Determinar consumo inicial de cenizas: Según el Anexo B.
- d) Medición cantidad de Etringita: Realizar mezclas y medir etringita según protocolo del Anexo E. Comenzando con porcentaje entregado como consumo inicial del ensayo realizado con anterioridad, hasta llegar como máximo al 15% con respecto a la malla #40, en intervalos de 3% a 5%, según criterio del diseñador. Mínimo se recomienda tener 4 medidas. Se toma el máximo porcentaje de etringita entregado del ensayo como referencia para determinar el grado de expansibilidad tendría el suelo. Y se clasifica según la siguiente tabla:

<b>Recomendación</b>	
<b>% Etringita</b>	<b>NIVEL</b>
< 3%	Sin mayores problemas de expansión
3%-5%	Problemas de expansión Medio
> 5%	Grandes problemas de expansión

- I. Si el suelo no presenta mayores problemas de expansión, o sea se encuentra en el primer nivel de la tabla, se recomienda realizar la dosificación de la mezcla sin tratamiento previo y tal como lo estipula el Capítulo VII.3.
- II. Si el suelo se encuentra en el segundo nivel de la tabla, presentando problemas medios de expansión se recomienda realizar la dosificación tal como lo estipula el Capítulo VII.3, pero madurando un día la mezcla a temperatura y humedad ambiente y adicionándole un 3% más de la dosis óptima de agua calculada con anterioridad en el Ensayo Proctor Modificado del suelo.  
Si las tasas de resistencia retenida son bajas se recomienda realizar una doble estabilización agregando un 3% más de cenizas FBC al suelo.
- III. Si el suelo presenta grandes problemas de expansiones, este debe ser madurado un día antes de realizar la dosificación tal como estipula el Capítulo VII.3 y necesariamente agregarle un 3% más de la dosis óptima de agua. No se recomienda realizar dobles estabilizaciones.

## X CONCLUSIONES

Las cenizas FBC presentan características que la convierten en un estabilizador con un alto potencial autocementante, debido a que está compuesto por más de un 20% de cal libre, y tiene componentes puzolánicos, principalmente sílice.

La respuesta que presentan los suelos granulares estabilizados con cenizas FBC, según la experiencia nacional e internacional son satisfactorias, aumentando considerablemente su resistencia y sin presentar mayores problemas de expansión. Son los suelos finos como las arcillas y limos los presentan problemas de expansión volumétrica, dado que contienen mayor cantidad de alúmina y sulfatos provocando la formación de etringita y otros derivados de ésta.

Sin embargo, y a partir del análisis realizado a los suelos con potencial expansión se puede concluir que dependiendo de la cantidad de sulfatos presente en éstos pueden tratarse antes de compactar la mezcla, consiguiendo así una disminución del Índice de Expansión. Junto con disminuir el IE, bajan también las resistencias, pero aún así presentan mejor comportamiento que un suelo natural.

En cuanto a las propiedades, la adición de ceniza FBC disminuye el Índice de Plasticidad de los suelos tratados. A partir de esto es posible afirmar que se mejora la trabajabilidad de los suelos estabilizados, logrando que suelos finos puedan presentar mejores características para ser usados como plataforma de trabajo durante la construcción del camino. La influencia de la maduración en esta disminución de plasticidad es evidente, acrecentándose a medida que los días de maduración también aumentaban, llegando a disminuir en un 60%. Convirtiendo a los suelos potencialmente expansivos, en al menos suelos trabajables.

La capacidad de absorción de agua de la mezcla no está ligada directamente con la expansión que presenten las mezclas, es más se pudo confirmar la teoría que afirma que el aumento de volumen no es necesariamente por la creación de más compuestos

expansivo, si no que por la capacidad que tienen éstos de absorber el agua, llenando así los espacio intermoleculares.

La susceptibilidad de la mezcla al agua mejora notablemente con la adición de cenizas FBC, alcanzando resistencias saturadas de hasta de  $13 \text{ kg/cm}^2$  en suelos que sin cenizas no llegaban a soportar el periodo de saturación.

La maduración es un buen instrumento para controlar la expansión en los suelos. Se recomienda un día como tiempo de maduración óptimo para este tipo de suelo, ya que es factible de respetarlo en terreno, sin elevar los costos de la construcción innecesariamente.

La adición de un 3% de agua superior a la óptima resultó ser un buen incentivo para la reducción de la expansión, ya que provoca una mayor disolución de los sulfatos en el suelo. Luego de observar que las expansiones disminuyen y la Resistencia a la Compresión no Confinada aumenta con la adición de 3% agua adicional, se decidió dosificar siempre los suelos con mayor cantidad de sulfatos con 3% de agua adicional al óptimo entregada por el Proctor. Sin embargo, esta medida en terreno puede que no sea muy factible, dado la variación de humedades que presenta la subrasante.

La experiencia de doble estabilización con cenizas FBC sólo obtuvo buenos resultados para los suelos que contenían menos sulfatos, dentro del rango de los suelos potencialmente expansivos, ya que en las arcillas aún se siguió formando etringita con la segunda adición de cenizas, y obviamente mayor fue la expansión al agregarle agua adicional. En cambio en la arena arcillosa con que se trabajo (Ecobel) el IE disminuyó hasta llegar a rangos aceptables.

En cuanto a las estabilizaciones realizadas con material granular, los resultados de las experiencias realizadas no fueron muy representativos, dado las dimensiones de las probetas con que se trabajaron. Las cenizas actúan con la parte más fina de la mezcla (tamiz pasante bajo la malla 40), por lo tanto al agregar material granular a probetas pequeñas sólo se evidenció un desmedro de la resistencia, dado el reemplazamos los finos. Sin alcanzar a influir el haber agregado material de mayor resistencia per se.

Se recomienda que en las investigaciones futuras se analizaran otro tipo de doble estabilización, tales como cenizas - asfalto espumado, por ejemplo.

También en futuras investigaciones podría utilizarse un colorímetro para medir la cantidad de sulfatos y alúmina de los suelos a utilizar en terrano. La colorimetría es una técnica por la que se pretende establecer el valor de la concentración de una sustancia en disolución mediante la comparación de dicha solución con el de un patrón, fundamentados en el proceso de absorción de la luz por un medio transparente o coloreado.

Para seguir analizando el tema de la expansión en futuras investigaciones se sugiere:

- Compactar a un porcentaje menor al 95% de la DMCS, ojala entre un 90 y 92% máximo, obtenida con el ensayo Proctor Normal (T99), con el fin de dejar vacíos y de esta forma permitir la formación de etringita y evitar así la expansión.
- Utilizar en la mezcla algún agente químico repelente de agua, con el fin de evitar que la mezcla de suelo-cenizas pueda absorber más agua.
- Utilizar en la mezcla algún aditivo incorporador de aire, tal como los que se utilizan en el hormigón, con el fin de crear vacíos para permitir la formación de etringita evitando la expansión.
- Realizar mezclas de suelos con cenizas y algún cloruro (ej. cloruro de calcio, cloruro de magnesio, etc.), porque estas sales absorben agua, de esta forma se podría limitar la cantidad de agua disponible para la formación de la etringita.
- Madurar la mezcla para dejar que la etringita se forme antes de la compactación. Para esto se sugiere mezclar en primera instancia el suelo con la mitad del contenido óptimo de cenizas y mucha agua, dejando reaccionar 7 días y, en segunda instancia volver a mezclar con el resto de cenizas y el agua necesaria para la compactación.
- Agregar a la mezcla de suelo-cenizas algún aditivo que acelere la formación de la etringita en la etapa de mezclado para evitar que se forme cuando el suelo ya esté compactado.

## XI REFERENCIAS

- American Coal Ash Association (1999). *Soil and Pavement Base Stabilization with Self-Cementing Coal Fly Ash*. Virginia, EE.UU.: [s.n]
- American Coal Ash Association. (2003). *Technical Report: Fly Ash Facts for Highway Engineers*. Recuperado el 8 de Septiembre de 2008, de <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/fatoc.cfm>
- Association, A. C. (1999). *Soil and Pavement Base Stabilization with Self-Cementing Coal Fly Ash*. Virginia.
- Avila, A. G. (2004). Estudio de la retracción y agrietamiento de arcillas. Aplicación a la arcilla de Bogotá. En G. Á. Alvarez, *Estudio de la retracción y agrietamiento de arcillas. Aplicación a la arcilla de Bogotá*. (pág. 2). Bogotá.
- Behr-Andres, C., & Hutzler, N. (1994). Characterization and Use of Fluidized Bed Combustion Coal Ash. *ASCE Journal of Environmental Engineering* , Vol. 120 (6), 1488-1506. .
- Botha, F. (2004). Overview of the fluized bed combustion process and material. Carterville, Illinois, E.E.U.U.
- Ouhadi, V. R., & Yong, R. N. (2007). Ettringite formation and behaviour in clayey soils.
- Vargas, A. (2006). Estudio para la utilización de cenizas FBC en la estabilización de suelos para caminos. Santiago, Región Metropolitana, Chile.
- Barra, R. (2005). Características Toxicológicas e Implicancias Ambientales del Uso de Cenizas de Coke de Petróleo. En G. Vidal (Ed.), *Gestión Integral de las Cenizas Generadas por la Utilización del Coke de Petróleo* (pp. 11-18). Concepción, Chile: Universidad de Concepción.
- Benson, C.H., Bin-Shafique, M., Edil, T.B., Senol, A. (2002, Septiembre). Use of Class C Fly Ash for Stabilization of Soft Subgrade. Documento presentado en el 5º Congreso Internacional en Avances en la Ingeniería Civil, Estambul, Turquía.

Bergeson, K. L. y Barnes A. G. (1999, Enero). *Iowa thickness design guide for low volume roads using reclaimed hydrated Class C fly ash bases*. Documento presentado en el 13º Simposio Internacional sobre el Uso y Manejo de Productos de la Combustión del Carbón (CCPs) de la Asociación Americana de Cenizas del Carbón (ACAA). Florida, USA. Recuperado el 12 de Marzo de 2008 de <http://www.ctre.iastate.edu/pubs/crossroads/253iowa.pdf>

Copas, T., Pennock, H. A. (1976). Lime-Fly Ash Stabilized Bases and Subbases. NCHRP Synthesis of Highway Practice 37, TRB, National Research Council, Washington, EE.UU.

Department of Transportation of Indiana (2002). *Design Procedures for Soil Modification or Stabilization*. Recuperado el 20 de Junio de 2008, de <http://www.in.gov/dot/business/design/geotech/smod.pdf>

Deschamps, R.J. (1997). *Geotechnical and Environmental Characteristics of Atmospheric Fluidized Bed Combustion Ash and Stoker Ash*. Transportation Research Record, N°1577, 90-94.

García, E., Suárez, M. (1998), *Las Arcillas: Propiedades y Usos*. Universidad de Complutense y Salamanca.

Ginstling, A.M., Brounshtein, B.I., 1950. Concerning the diffusion kinetics of reactions in spherical particles. *Journal of Applied Chemistry of the USSR* 23, 1327–1338.

Harrington, D., Thomas, Z., White, D.J. (2005). *Fly Ash Soil Stabilization for Non-Uniform Subgrade Soils, Volume I: Engineering Properties and Construction Guidelines*. Recuperado el 2 de Junio de 2008, de [http://www.ctre.iastate.edu/reports/tr461\\_vol1.pdf](http://www.ctre.iastate.edu/reports/tr461_vol1.pdf)

Hopkins, T., Beckham, T., Hunsucker, D.,(1995). Modification of highway soils subgrades. University of Kentucky Research report KTC 94-11, Lexington, Kentucky, EE.UU.

Hopkins, T., Beckham, T.L. (1999). Long-Term Performance of Highway Subgrade Stabilized with an Atmospheric Fluidized Bed Combustion Material. Documento #86 presentado en International Ash Utilization Symposium 1999, Kentucky, EE.UU: University of Kentucky, Center for Applied Energy Research.

Hopkins, T., Beckham, T., Sun, L., Ni, B., Butcher, B., (2002). *Long-Term Benefits of Stabilizing soils subgrades*. Recuperado el 2 de Agosto de 2008, de [http://www.e-archives.ky.gov/Pubs/transportation/tc\\_rpt/ktc\\_02\\_19\\_spr\\_196\\_99\\_1f.pdf](http://www.e-archives.ky.gov/Pubs/transportation/tc_rpt/ktc_02_19_spr_196_99_1f.pdf)

Hopkins, T., Beckham, T., Sun, L., (2006). Characteristics and Engineering Properties of the soft soil layer in highway soil subgrades. University of Kentucky Research report KTC 06-13/SPR 270-03-1F, Lexington, Kentucky, EE.UU.

Institute for Transport and Road Research of South Africa (1986). Cementitious Stabilizers in Road Construction. South Africa: [s.n].

Jander, W., 1927. Solid state reactions at high temperature in German Zeitschrift Für Anorganische Und Allgemeine Chemie 163, 1–30.

Joint Departments of the Army and Air Force (1994). *Soil Stabilization for Pavements*. Recuperado el 21 de Septiembre de 2008, de <http://www.usace.army.mil/usace-docs/armytm/tm5-822-14/entire.pdf>

Knight, S.J. (1961), Some Factors Affecting Moisture Content-Density-Cone Index Relations, Miscellaneous Paper No. 4-457, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.

Little, D. N. (1999). *Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates. Volume 1: Summary of Findings*. Recuperado el 8 de Septiembre de 2008, de <http://www.lime.org/SOIL.PDF>

Little, D., Nair, S. (2007). *Sensitivity of selected colorado soils to form ettringite/thaumasite when treated with calcium-based stabilizers and when soluble sulfates are available*. Colorado Department of Transportation Research Branch.

Recuperado el 8 de Enero 2009 de <http://www.dot.state.co.us/publications/ResearchReports.htm>

Little, D., Nair, S. (2009). *Water: The Key to Expansion of Ettringite in Cementitious Materials*, TRB 88th Annual Meeting Compendium of Papers DVD.

Liu, T.K. and Thornburn, T.H.; (1964), Investigation of Superficial Soils by Field Vane Tests, Special Technical Publication No. 351, ASTM.

Mallela, J., Von Quintus, H., Smith, K. (2004). *Consideration of Lime-Stabilized Layers in Mechanistic-Empirical Pavement Design*. Recuperado el 8 de Septiembre de 2008, de <http://www.lime.org/MechEmpPavement.pdf>

Mitchell, J.K., Dermatas, D., 1992. Clay soil heave caused by lime-sulfate reactions. In: Walker Jr. Jr., D.D., Hardy, T.B., Hoffman, D.C., Stanley, D.D. (Eds.), *Innovations and Uses for Lime*. ASTM STP, 1135, pp. 41-64. Philadelphia.

Moore, A.E., and Taylor, H.F.W, (1970), Crystal structure of ettringite. *Acta Crystallographica Section B: Structural Science*, 26(4): p 386-393.

Mori, H., Minegishi, K., 1968. Supplementary Paper II-73, effect of the temperature on the early hydration of the system  $3\text{CaO}\times\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaSO}_4\times 2\text{H}_2\text{O-Ca(OH)}_2\text{-H}_2\text{O}$ . 5th Int. Sym. Chem. Cem. II, pp. 349-361.

National Lime Association (2000). *Guidelines for stabilization of Soils Containing Sulfates*. Recuperado el 8 de Septiembre de 2008, de <http://www.lime.org/sulfate.pdf>

National Lime Association (2004). *Manual de estabilización de suelo tratado con cal*. Recuperado el 8 de Septiembre de 2008, de <http://www.lime.org/SoilTreatmentConstructionManualSPANISH1106.pdf>

Ouhadi, V., Yong, R., (2007). Ettringite formation and behaviour in clayey soils. *Applied Clay Science*, Volume 42 (1-2), Diciembre 2008, Pag. 258-265, doi:10.1016/j.clay.2008.01.009.

Plowman, C., Cabrera, J.G., 1984. Mechanism and kinetics of hydration of C3A and C4AF extracted from cement. *Cement and Concrete Research* 14, 238–248

Puppala, A.J., Intharasombat, N., Vempati R.K. (2005). Experimental Studies on Ettringite-Induced Heaving in Soils. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131 (3), 325-337.

Romero, E., (1999). *Las arcillas: propiedades y usos*. Universidad Complutense (Madrid).

Romero, P., (2009). *Investigación para la aplicación de asfalto espumado en la estabilización de caminos de redes forestales*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Terrell, R.L.; Epps, J.A.; Barenberg, E.J.; Mitchell, J.K.; and Thompson, M.R.; (1979), *Soil Stabilization in Pavement Structures -- A User's Manual*, FHWAIP- 80-Z, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.

Terzaghi, K.; (1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, Inc., New York.

Thenoux, G. (2006). *Apuntes del curso Diseño Estructural de Pavimentos*, Escuela de Ingeniería, Dpto. de Ingeniería y Gestión de la Construcción Pontificia Universidad Católica de Chile.

Thompson, M. R. (1975) *Soil-Lime Mixture for Construction of Low-Volume Roads*. Proceedings, 2nd International Conference: Low-Volume Roads, Transportation Research Board, Special Report 160, Washington, D.C.

Thompson, M.R.; (October 1988) "Admixture Stabilization of Subgrades," *Proceedings, Nineteenth Annual Ohio River Valley Soils Seminar(OVRSS)*, Lexington, Kentucky.

Thenoux, G. y San Juan, m. (2000). *Estabilización Físico-Química de Suelos para Caminos*. 5º Congreso Internacional – PROVIAL, La Serena.

Tishmack, J.K., Deschamp, R. (1999). Use of Fluidized Bed Combustion Ash in Structural Fill: Chemical, Mineralogical, and Engineering Properties. *Proceedings 13<sup>th</sup> International Symposium on Use and Management of Coal Combustion Products (CCPs)*, Orlando, Florida.

TRRL (1977) A Guide to the Structural Design of Bitumen Surfaced Roads in Tropical and Sub-Tropical Countries. *Transportation and Road Research Laboratory-Road Note 31*, London.

Vargas, M., (2006). *Estudio para la utilización de cenizas FBC en la estabilización de suelos para caminos*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Vera, S. (2001). *Evaluación de la efectividad del cloruro de magnesio hexahidratado como estabilizador químico de carpetas granulares de rodado*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Warren, C.J., Reardon, E.J., 1994. The solubility of ettringite at 25 C. *Cement and Concrete Research* 24 (8), 1515–1524.

Wild, S., Tasong, W. A., and Tilley, R. J. D. (1999). Mechanism by which ground granulated blast furnace slag prevents sulfate attack of lime-stabilized kaolinite. *Cement Concrete Research*, 29, 975-982.

Wirtgen. (2004). *Cold Recycling Manual*. Windhagen, Germany: Wirtgen GmbH.

**ANEXOS**

## ANEXO A: CLASIFICACIÓN DE SUELOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN.

### a) Suelos Mininco

Estos suelos corresponden a fundos de la Forestal Mininco ubicados en la VIII Región, a excepción de Peñablanca situado en la VII Región. Las características de estos materiales se presentan en el siguiente cuadro.

Suelos		Mininco		
		Parcelas Cabrera 54-A	Parcelas Cabrera 1-B	Peñablanca
<b>Granulometría</b>				
Tamiz ASTM	Abertura (mm)			
4"	100			
3"	75			
2 1/2"	63			
2"	50			
1 1/2"	37,5			
1"	25			
3/4"	19			100
3/8"	9,5	100	100	99
#4	4,75	99	99	97
#10	2	96	88	85
#40	0,425	88	56	55
#200	0,075	70	29	42
<b>Clasificación</b>				
USCS		CH	SM	SC
AASHTO		A-7-5 (16)	A-2-7 (0)	A-6 (4)
<b>Límites de Atterberg</b>				
Límite Líquido		54	53	39
Límite Plástico		32	40	18
Índice de Plasticidad		22	13	21
<b>Proctor modificado</b>				
Densidad Seca (kg/lt)		1,7	1,77	2
Humedad Óptima (%)		20,4	15,9	9,9
<b>CBR (%)</b>		46	18	17

A continuación se anexan fotos de los fundos donde fueron sacados los suelos ocupados en esta investigación:

- Peñablanca



- Parcelas Cabrerias 54-A



- Parcelas Cabrerias 1-B



## b) Suelos Arauco

Estos suelos corresponden al fundo Totoral Grande de la Forestal Arauco ubicados en la VIII Región. Las características de estos materiales se presentan en el siguiente cuadro.

Suelos		Arauco			
		Calicata 1	Calicata 4	Calicata 3	Calicata 5
<b>Granulometría</b>					
Tamiz ASTM	Abertura (mm)				
4"	100	-	-	-	-
3"	75	-	-	-	-
2 1/2"	63	-	-	-	-
2"	50	-	-	-	-
1 1/2"	37,5	-	-	-	-
1"	25	-	-	-	-
3/4"	19	-	-	-	-
3/8"	9,5	-	-	-	100
#4	4,75	100	-	-	99
#10	2	98	100	100	99
#40	0,425	94	97	98	91
#200	0,075	73	59	87	68
<b>Clasificación</b>					
USCS		CL	ML	MH	CH
AASHTO		A-7-6 (15)	A-4 (4)	A-7-5 (34)	A-7-5(31)
<b>Límites de Atterberg</b>					
Límite Líquido		47	38	66	77
Límite Plástico		26	31	33	32
Índice de Plasticidad		21	7	33	45
<b>Proctor modificado</b>					
Densidad Seca (kg/lt)		1,63	1,57	1,45	1,51
Humedad Óptima (%)		22,6	22,7	29,6	23,5
<b>CBR (%)</b>		7	25	14	4

A continuación se anexan fotos de las calicatas donde fueron sacados los suelos ocupados en esta investigación:

**Calicata 1**



**Calicata 3**



**Calicata 4**

**Calicata 5**

## c) Suelos ENAP

Este material corresponde al que se encuentra en los caminos internos de ENAP Refinerías Bío-Bío, ubicado en la VIII Región. Sus características se presentan en el siguiente cuadro.

Suelos		ENAP	
		Pozo 7	Pozo 21
<b>Granulometría</b>			
Tamiz ASTM	Abertura (mm)		
4"	100	-	-
3"	75	-	-
2 1/2"	63	-	-
2"	50	100	-
1 1/2"	37,5	97	100
1"	25	95	99
3/4"	19	94	98
3/8"	9,5	93	96
#4	4,75	89	91
#10	2	79	85
#40	0,425	53	56
#200	0,075	30	20
<b>Clasificación</b>			
USCS		SC	SM
AASHTO		A-2-6 (1)	A-2-4 (0)
<b>Límites de Atterberg</b>			
Límite Líquido		33	19
Límite Plástico		18	17
Índice de Plasticidad		15	2
<b>Proctor modificado</b>			
Densidad Seca (kg/lt)		2,07	2,2
Humedad Óptima (%)		10,2	8,5

A continuación se anexan fotos de los pozos donde fueron sacados los suelos ocupados en esta investigación:



**Pozo 7**

**Pozo 21**

## d) Suelos Ecobel

Este suelo corresponde al material arcilloso correspondiente al camino de acceso al Fundo San Jorge, ubicado en la VIII Región. Las características de este material se presentan en el siguiente cuadro.

Suelos		Ecobel
<b>Granulometría</b>		
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	
4"	100	-
3"	75	-
2 1/2"	63	-
2"	50	-
1 1/2"	37,5	-
1"	25	-
3/4"	19	-
3/8"	9,5	100
#4	4,75	99
#10	2	94
#40	0,425	66
#200	0,075	45
<b>Clasificación</b>		
USCS		A-6 (4)
AASHTO		SC
<b>límites de Atterberg</b>		
Límite Líquido		36
Límite Plástico		18
Índice de Plasticidad		18
<b>Proctor modificado</b>		
Densidad Seca (kg/lt)		2.01
Humedad Óptima (%)		10.9

## **ANEXO B: MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONSUMO INICIAL DE CENIZAS FBC**

*El presente procedimiento ha sido utilizado para medir la dosis inicial de cenizas FBC necesaria para estabilizar suelos finos. Basados en el Ensayo de Eades and Grimm.*

### a) Alcance

Este procedimiento se aplica a suelos finos plásticos y cenizas FBC, y permite medir la dosis mínima que eleva el pH del medio acuosa de una mezcla de suelo-cenizas FBC a 12,4.

### b) Materiales y equipos utilizados

- 5 botellas plásticas de 150 ml. como mínimo, con tapa.
- Agua destilada libre de CO<sub>2</sub>.
- Balanza con capacidad mínima de  $200 \pm 0,01$  g.
- Tamiz ASTM #40 (425  $\mu$ m).
- pH-ímetro.

### c) Preparación de las Muestras y Equipos

Se debe tamizar es suelo en malla #40 y se descarta el material retenido. El suelo que pasa la malla indicada se seca a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  a masa constante.

Las cenizas FBC no requieren tratamiento previo al ensayo.

Calibrar el pH-ímetro en el rango 10-12 con una solución estándar.

### d) Procedimiento de Ensayo

Pesar  $20 \pm 0,1$  g. de suelo (bajo tamiz 425  $\mu$ m) en cada una de las 5 botellas plásticas roscadas.

Agregar a cada botella una dosis de ceniza creciente, normalmente se prepara botellas con dosis de entre 6 y 10% (porcentaje en peso referido al suelo bajo malla #40 seco).

Pesar la ceniza con una precisión de  $\pm 0,01$  g. y agregarla al suelo, luego agitar para mezclar los materiales en seco.

Agregar 100 ml. de agua destilada libre de  $\text{CO}_2$  a cada botella. Agitar hasta que no haya evidencia de material seco en el fondo, por un mínimo de 30 seg.

Luego agitar las botellas 30 segundo cada 10 minutos, hasta completar una hora.

Después de una hora, transferir parte de la lechada a un jarro plástico y medir pH. El pH-ímetro debe estar calibrado con una solución estándar de pH 10 o 12.

Registrar el pH para cada una de las mezclas. Si el pH alcanza 12,4, la mínima dosis que alcanza es 12,4 es el porcentaje requerido de cenizas FBC. Si el pH no llega más allá de 12,4 y dos dosis dan esa lectura, entonces la menor dosis es el porcentaje requerido. Si sólo una dosis llega da un pH 12,3, el ensayo debe repetir con dosis mayores de cenizas FBC.

e) Informe

Reportar la siguiente información:

- Tipo de suelo,
- Tipo de ceniza FBC.
- Dosis de cenizas FBC utilizadas.
- pH medido para cada dosis.
- Dosis mínima de cenizas FBC para pH 12,4.

## **ANEXO C: PROTOCOLO PARA LA REALIZACIÓN DE PROBETAS**

### a) Alcance

Este protocolo es para realizar probetas de mezclas suelo-cenizas FBC.

### b) Materiales y Equipos a Utilizar

- Equipo para preparación de probetas, consistente en un molde conformado por dos semi-cilindros, estructura para el montaje del cilindro y el desmolde de la probeta, y martillo para la compactación del material.
- Horno capaz de mantener una temperatura de  $110 \pm 5$  °C.
- Horno o cámara ambiental capaz de mantener una temperatura de  $38 \pm 2$  °C.
- Balanza con capacidad de 5000 g y precisión  $\pm 0.01$  g.
- Accesorios típicos de laboratorios de mecánica de suelos: espátulas, tiestos de porcelana, etc.

### c) Preparación de las Muestras y Equipos

El suelo se corta en malla 3/8" y se descarta el material retenido. Al material pasante se le determina la humedad óptima de compactación y la fracción bajo malla #40. Posteriormente el suelo se seca en horno a  $110 \pm 5$  °C y se deja enfriar a temperatura ambiente.

La ceniza FBC no requiere tratamiento previo al ensayo.

El agua a usar debe ser potable, libre de sólidos e impurezas. Sin embargo, si en un proyecto en particular se considera utilizar una fuente específica de agua (como agua de río, pozo, etc.), es conveniente utilizar una muestra de dicha agua en la fabricación de las probetas.

Las Ecuaciones 1, 2 y 3 permiten determinar las cantidades de materiales necesarias para la fabricación de cada probeta. Normalmente se requiere un total de 280 a 300 g de sólidos para preparar una probeta.

$$M_S = \frac{M_{ST}}{(1 + d_{FBC} \times P_{40})} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$M_{FBC} = M_{ST} - M_S = M_{ST} \left[ 1 - \frac{1}{1 + d_{FBC} \times P_{40}} \right] \quad (\text{Ec. 2})$$

$$M_W = M_S \times w_{opt} + 0.6 \times M_{FBC} = M_{ST} \left[ \frac{0.6 \times P_{40} \times d_{FBC} + w_{opt}}{P_{40} \times d_{FBC} + 1} \right] \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde,  $M_S$  : cantidad de suelo seco (g). Este corresponde a material bajo malla 3/8".

$M_{FBC}$  : cantidad de ceniza FBC (g).

$M_W$  : cantidad de agua (g).

$M_{ST}$  : cantidad de sólidos para preparar las probetas (normalmente 280 a 300 g).

$w_{opt}$  : humedad óptima de compactación del suelo, de acuerdo al ensayo Proctor Modificado (expresado en forma decimal).

$d_{FBC}$  : dosis de ceniza FBC (porcentaje c/r al suelo bajo malla #40, expresado como fracción decimal).

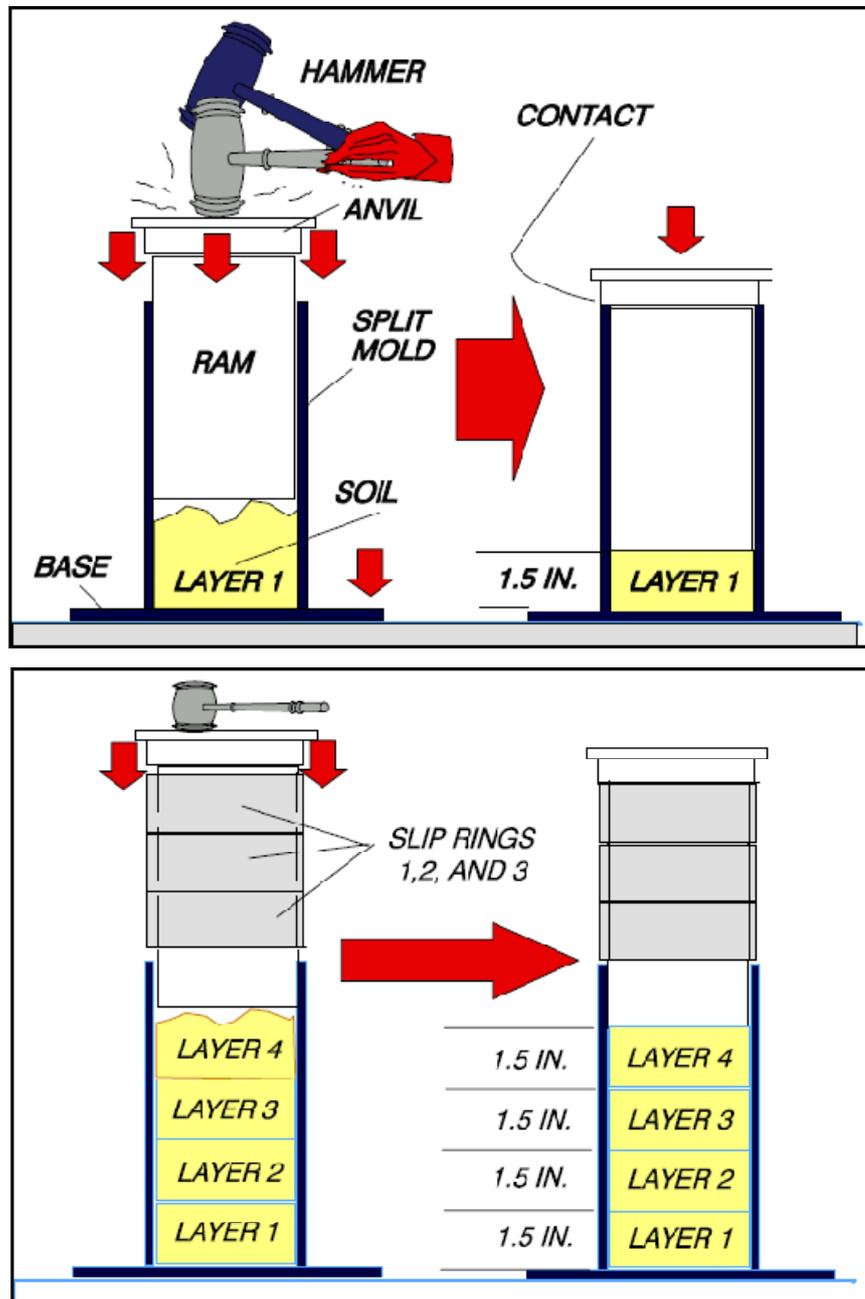
$P_{40}$  : proporción del material bajo malla 3/8", que pasa la malla #40 (porcentaje expresado en forma decimal).

#### d) Procedimiento de Fabricación

Se preparan mezclas para 0%, 5%, 10%, 15% y 20% de ceniza. Para cada dosis se construirán 8 probetas que posteriormente se ensayarán. El procedimiento para preparar las probetas es el siguiente:

1. Se mezclan las cantidades de suelo y ceniza en seco, de acuerdo a las Ecuaciones 1 y 2.
2. Se agrega la cantidad de agua determinada en la Ecuación 3 y se mezcla vigorosamente hasta obtener una mezcla homogénea.

3. Si se mezcla una cantidad suficiente para más de una probeta, es necesario colocar la mezcla hidratada en una bolsa plástica sellada (tipo ziploc) para evitar que pierda humedad mientras se preparan las probetas.
4. Se prepara la probeta, colocando en forma consecutiva 5 capas de mezcla, de una cantidad "X" g. c/u, suficientes para alcanzar el 98% de la densidad compactada seca del suelo entregada por el Proctor, y compactando cada capa con la cantidad de golpes que logre hacer bajar el pisón 2 cm. aproximadamente (se golpea el pisón con el martillo), tal como muestran las siguientes figuras:



**Figura 1 y 2.** Método de Compactación de Probetas.

5. Una vez compactada la última capa, se retira la probeta del molde y se envuelve en un plástico para evitar la pérdida de humedad durante el curado.

Las Figuras 3 a la 6 muestran el proceso de dosificación, mezclado y preparación de las probetas.



**Figuras 3 y 4.** Dosificación y mezclado.



**Figura 5 y 6.** Molde y extracción de la probeta.

e) Curado

Una vez que las probetas han sido preparadas, se colocan dentro de una bolsa tipo ziploc y son llevadas a la cámara ambiental. Las probetas serán curadas en esta cámara por un período de 3 días a una temperatura de 38°C. Las Figuras 7 y 8 muestran el equipo y proceso de curado.



**Figuras 7.** Detalle de probetas en período de curado, en la cámara ambiental.



**Figuras 8.** Cámara ambiental.

## ANEXO D: PROTOCOLO PARA LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS

*El presente protocolo describe el procedimiento utilizado para realizar los Ensayos de Resistencia de Compresión no Confinada (UCS), Expansión y Estabilización Bajo el Agua (EBA).*

### Ensayo de Compresión no Confinada

#### a) Alcance

Los suelos utilizados en este ensayo corresponden a suelos con partículas menores a 3/8", que corresponde al tamiz en el que es cortado éste para realizarse las probetas. Suelos más gruesos deben ser cortados y se debe utilizar sólo la fracción bajo dicho tamiz.

#### b) Materiales y Equipos a Utilizar

- Prensa equipada con dial de carga y deformación.
- Balanza con capacidad de 5000 g y precisión  $\pm 0.01$  g
- Pie de metro para la medición

#### c) Preparación de Muestras y Equipos

Luego de los tres días de curado, las probetas son retiradas de la cámara ambiental y se dejan enfriar alrededor de una hora. Luego se pesan y se miden sus dimensiones (Figuras 1 y 2).



**Figura 1 y 2.** Medición de masa y dimensiones de la probeta.

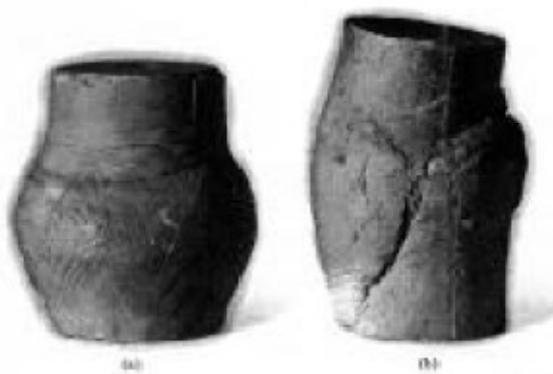


**Figura 3.** Probeta de suelo estabilizado, montada en la prensa de carga.

d) Procedimiento de Ensayo

Para realizar el ensayo, se monta la probeta entre las placas de una prensa, como se muestra en la Figura 3. La velocidad de carga debe ser de 1mm/min. Tomar datos de la carga, deformación y tiempo a intervalos suficientes para definir la curva de tensión-deformación (entre 10 y 15 puntos). Anotar la carga máxima soportada por la probeta. El ensayo finaliza cuando la probeta deja de aceptar carga o cuando se rompe.

Finalmente, se fotografía el tipo de falla observado en la probeta. Una probeta bien ensayada no debería presentar grietas de tracción en los extremos, ni grietas transversales, tal como lo muestran las siguientes figuras,



**Figura 4.** Tipos de fallas de Ensayo a Compresión

## e) Informe

Una vez finalizado el ensayo, se informará lo siguiente:

- Ms: Masa seca de la probeta (g)
- D: Diámetro de la probeta (mm), 2 mediciones y su promedio.
- H: Altura de la probeta (mm), 2 mediciones y su promedio.
- Densidad de la mezcla ( $\text{kg/cm}^3$ ) = 
$$\frac{Ms}{1000 * (H * \pi * D^2 / 4)}$$
- Curva esfuerzo/deformación
- Resistencia a la Compresión no Confinada ( $\text{kgf/cm}^2$ )
- Fotografía o diagrama que muestre la forma de falla de la probeta

**Ensayo de Expansión**

*El siguiente protocolo fue propuesto por la Asociación Nacional de Cal de Estados Unidos en su publicación "Guidelines for Stabilization of Soils Containing Sulfates" en Agosto del 2000.*

## a) Alcance

Este ensayo está dirigido a determinar en forma simple el potencial de expansión de un suelo al ser estabilizado con un material que contenga cal, como es el caso de las cenizas FBC.

## b) Materiales y Equipos Utilizados

- Pie de metro para medir la altura y el diámetro de la probeta
- Piedra Porosa o ladrillo.
- Recipiente para verter agua y colocar la piedra porosa.
- Tela absorbente.
- Horno o cámara ambiental capaz de mantener una temperatura de  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ .

c) Preparación de las Muestras y Equipos

Las probetas preparadas para este ensayo no necesitan pasar por el período de curado. Inmediatamente después de la compactación, poner la probeta en una piedra porosa dentro del recipiente con agua, con el nivel de agua alcanzando la cima de la piedra porosa.

d) Procedimiento de Ensayo

Poner una tela absorbente alrededor de la probeta, con los 25 mm inferiores de la tela bajo la superficie del agua, de manera que la tela pueda llevar agua a la superficie de la probeta. Colocar las probetas en una pieza a 25°C durante 3 días. Al final de cada día se deberá medir la dimensión vertical y horizontal de cada probeta. Se deben hacer seis mediciones diametrales: dos a 25mm bajo la superficie, dos a la mitad de la altura de la probeta y dos a 25mm sobre la base. Las dimensiones diametrales se deben hacer aproximadamente a 90° una de otra. Medir la altura de la probeta en dos puntos aleatorios.

Las Figuras 5 a 7 muestran el proceso de colocación de las probetas y luego la medición de sus dimensiones.



**Figura 5.** Colocación de Probetas en el Ensayo



**Figuras 6 y 7.** Pasos realizados para medir las dimensiones cada día.

e) Informe

Una vez finalizado el ensayo, se informará lo siguiente:

- El promedio de las 6 mediciones diametrales luego de la fabricación de la probeta y el promedio de las mediciones de altura luego de la fabricación de la probeta. Use estos valores como diámetro y altura base.
- El promedio de las mediciones diametrales y verticales al final de cada día. Calcular el porcentaje de variación en la medición diametral como la razón del promedio de la medición diametral dividido por el diámetro base multiplicado por 100%. Calcule el porcentaje de variación en la medición vertical como la razón entre la altura medida dividida por la altura base multiplicada por 100%.

### **Ensayo de Estabilidad Bajo el Agua**

*El siguiente protocolo fue propuesto para esta investigación con el fin de evaluar visualmente el desempeño de los materiales estabilizados frente a la acción del agua.*

a) Alcance

Este protocolo se aplica a suelos y mezclas de suelos con cenizas FBC.

b) Materiales y Equipos a Utilizar

- Pie de metro para medir la altura y el diámetro de la probeta
- Recipiente con agua
- Cronómetro

c) Procedimiento de Ensayo

Inmediatamente después de terminado el período de curado, poner la probeta en un recipiente con agua, con el nivel de agua alcanzando la mitad de la altura de la probeta.

Observar durante los primeros 5 minutos lo que sucede con las probetas ensayadas y tomar nota de los cambios en ellas. En lo posible tratar de obtener un registro fotográfico de esto. Luego volver a observar las condiciones de las probetas a los 10 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas y 24 horas.



**Figuras 8.** Ensayo de Estabilidad Bajo Agua

## ANEXO E: MEDICIÓN DEL CONTENIDO DE ETRINGITA EN SUELOS ESTABILIZADOS CON CENIZAS FBC

### Protocolo de Ensayo

*El presente procedimiento ha sido utilizado para medir el contenido de etringita en las mezclas suelo-cenizas FBC. Se basa en el procedimiento utilizado en investigaciones realizadas en la Universidad Purdue, West Lafayette USA, por Jody Tishmack y Richard Deschamp.*

#### a) Alcance

Este procedimiento se aplica a mezclas de suelos plásticos con cenizas FBC, y permite medir el contenido de etringita en base a la pérdida de agua por sobre los 60°C.

La medición de etringita obtenida mediante este procedimiento es una estimación de la formación de la etringita. El resultado puede verse afectado por la presencia de yeso hidratado.

#### b) Materiales y equipos utilizados

- Cápsulas metálicas, con volumen mínimo de 100 ml.
- Horno capaz de mantener una temperatura de 55°C con una precisión de  $\pm 2^\circ\text{C}$ .
- Horno capaz de mantener una temperatura de 110°C con una precisión de  $\pm 2^\circ\text{C}$ .
- Balanza con capacidad de 1000 g. y precisión de  $\pm 0,001$  g.
- Tamiz ASTM #40 (425  $\mu\text{m}$ ).

#### c) Procedimiento

##### i. Preparación de materiales

El suelo se tamiza en malla #40 y se descarta el material retenido. El suelo que pasa la malla indicada se seca a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  hasta masa constante.

Las cenizas FBC no requieren tratamiento previo al ensayo.

El agua a usar debe ser potable, libre de sólidos e impurezas. Sin embargo, si en un proyecto en particular se utilizará una fuente específica de agua, es conveniente utilizar una muestra de dicha agua en el ensayo.

ii. Mezcla

En la cápsula pesar  $100 \pm 0,01$  g. de la mezcla, realizada con la dosis correspondiente de agua y cenizas según especifique el Anexo C. Registrar la masa de la cápsula con suelo como A y la masa de la cápsula con suelo y cenizas como B.

iii. Determinación de etringita

La cápsula con la mezcla hidratada se deja en el horno a  $55^{\circ}\text{C}$  hasta masa constante, con un mínimo de 24 hrs.

Una vez seca la mezcla, se registra la masa (C) y se introduce en un horno a  $110^{\circ}\text{C}$ , hasta masa constante, con un mínimo de 12 hrs. Una vez seca la mezcla se registra la masa (D).

d) Cálculo e informe

El informe debe incluir lo siguiente:

- Identificación de los materiales: Tipo de suelo, Tipo de cenizas.
- Contenido de Etringita:  $100 * 2 * (D - C) / (100 + B - A)$