

**FORMULACIÓN DE CRITERIOS DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES
COMPUESTOS POR CENIZAS VOLCÁNICAS MEDIANTE EL TRATAMIENTO
QUÍMICO DE LOS SUELOS**

**CRISTIAN CAMILO ABELLO GIRALDO
JHON EDWARD ORTIZ BRAVO
MARIA GREIDY OSPINA ZAPATA
WILDER OSPINA ZAPATA**

**UNIVERSIDAD LIBRE SECCIONAL PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL
PEREIRA, RISARALDA
2014**

**FORMULACIÓN DE CRITERIOS DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES
COMPUESTOS POR CENIZAS VOLCÁNICAS MEDIANTE EL TRATAMIENTO
QUÍMICO DE LOS SUELOS**

**Director de línea de investigación
Geólogo ALEJANDRO ALZATE BUITRAGO**

**Auxiliares de Investigación
CRISTIAN CAMILO ABELLO GIRALDO
JHON EDWARD ORTIZ BRAVO
MARIA GREIDY OSPINA ZAPATA
WILDER OSPINA ZAPATA**

**UNIVERSIDAD LIBRE SECCIONAL PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL
PEREIRA, RISARALDA
2014**

TABLA DE CONTENIDO

LISTADO DE FIGURAS.....	6
LISTADO DE TABLAS.....	8
RESUMEN.....	10
1. INTRODUCCIÓN	12
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
3. REVISIÓN DE ANTECEDENTES	16
3.1. ESTABILIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE SUELOS ARCILLOSOS ELABORADOS CON PRECURSORES NANO-MÉTRICOS.....	16
3.2. ESTUDIO DE COMPORTAMIENTO DE SUELO ESTABILIZADO CON SAL: FRENTE A LA ACCIÓN DEL AGUA, PARA DISTINTAS MEZCLAS.....	17
3.3. FORMULACIÓN Y PRODUCCIÓN DE ESTABILIZADORES QUÍMICOS PARA SUELOS FINOS COLOMBIANOS.....	18
3.4. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS TERRITORIAL GUAJIRA.....	21
3.5. TRATAMIENTO QUÍMICO DE SUELOS ACTIVOS II: LOS CRITERIOS DE DOSIFICACIÓN.....	22
3.6. RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS Y LOS COMPONENTES PUZOLÁNICOS DE LOS SEDIMENTOS PAMPEANOS.....	24
4. JUSTIFICACIÓN.....	27
5. OBJETIVO DEL PROYECTO	28
5.1 OBJETIVO GENERAL.....	28
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
6. PROCESO METODOLÓGICO	29
6.1. TIPOS DE INVESTIGACIÓN.....	30
6.1.1. INVESTIGACIÓN CUANTITATIVA.....	31
6.2. TIPO DE ESTUDIO	32
6.3. METODOLOGÍA ESPECÍFICA AL DESARROLLO DE ACTIVIDADES DE LABORATORIO.....	32
7. MARCO REFERENCIAL.....	41
7.1 MARCO TEÓRICO	41
7.1.1. ESTABILIZACIÓN CON CLORURO DE SODIO	42
7.1.2. ESTABILIZACIÓN CON CLORURO DE CALCIO	44

7.1.3. ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO PORTLAND: SUELO – CEMENTO	46
7.1.4. ESTABILIZACIÓN CON ÓXIDO DE CALCIO (CAL): SUELO – CAL	47
7.1.5. ESTABILIZACIÓN CON ASFALTO: SUELO – ASFALTO.....	48
7.1.6. ESTABILIZACIÓN CON: CON – AID	49
7.2. FORMACIÓN O CONSTITUCIÓN DE CENIZAS VOLCÁNICAS.	50
7.2.1. COMPOSICIÓN DE LA CENIZA VOLCÁNICA	51
7.2.2. FORMACION DE SUELOS DE CENIZAS VOLCANICAS EN COLOMBIA	51
8. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	53
8.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN EL TALUD DEL SECTOR DE CANCELES. .	53
8.2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL MEJORAMIENTO DE SUELOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ADITIVOS QUÍMICOS	64
8.2.1. DOCUMENTOS SOBRE ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS ...	64
ESTABILIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE SUELOS ARCILLOSOS ELABORADOS CON PRECURSORES NANO-MÉTRICOS.....	64
8.2.2. EL TRATAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS MEDIANTE CAL.....	67
8.2.3. ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA DE RESISTENCIA POR REMOLDEO DE SUELOS ARENOSOS DE LA ZONA ESTUARINA DE NAYARIT.	70
8.2.4. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS POR MEDIO DE ARENAS VOLCÁNICAS Y CAL VIVA.	72
8.2.5. RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS Y LOS COMPONENTES PUZOLÁNICOS DE LOS SEDIMENTOS PAMPEANOS ...	75
8.2.6. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CLORURO DE SODIO (NaCl) PARA BASES Y SUB BASES.	80
8.2.7. ESTUDIO DE COMPORTAMIENTO DE SUELO ESTABILIZADO CON SAL: FRENTE A LA ACCIÓN DEL AGUA, PARA DISTINTAS MEZCLAS.	85
8.2.8. ANÁLISIS COMPARATIVO PARA EJECUCIÓN DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS, ENTRE PROCESOS TRADICIONALES Y EL ESTABILIZADOR DE SUELOS SOILTAC.....	91

8.2.9. INFORME ESTABILIZACIÓN TRAMO PILOTO CARRETERA CARACOLI - MAROCAZO (INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS TERRITORIAL GUAJIRA).....	93
8.2.10. BIOMINERALIZACIÓN APLICADA A LA MITIGACIÓN DE PROCESOS EROSIVOS SUPERFICIALES, EN UN SUELO TROPICAL DE LA CIUDAD DE MEDELLÍN.	94
8.2.11. ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS: APLICACIONES EN LA CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS.....	98
8.2.12. POLÍMEROS PARA LA ESTABILIZACIÓN VOLUMÉTRICA DE ARCILLAS EXPANSIVAS.	101
8.2.13. FORMULACIÓN Y PRODUCCIÓN DE ESTABILIZADORES QUÍMICOS PARA SUELOS FINOS COLOMBIANOS.	104
8.2.14. TRATAMIENTO QUÍMICO DE SUELOS ACTIVOS II: LOS CRITERIOS DE DOSIFICACIÓN.....	106
8.2.15. PRUEBAS CON UN PRODUCTO ENZIMÁTICO COMO AGENTE ESTABILIZADOR DE SUELOS PARA CARRETERAS.	107
8.2.16. ENSAYOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON EL ADITIVO RBI- 81.	112
8.2.17. DOCUMENTOS SOBRE INYECCIÓN DE SUELOS CON ADITIVOS QUÍMICOS.	115
8.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYOS FÍSICO- MECÁNICOS REALIZADOS CON DIFERENTES MEZCLAS DE ADITIVOS QUÍMICOS, UTILIZADOS EN SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS.	122
8.3.1. ADITIVO SILICATO DE SODIO	127
8.3.2. ADITIVO CAL	185
9. CONCLUSIONES	195
10. RECOMENDACIONES.....	196
11. BIBLIOGRAFÍA	198

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Localización Talud Canceles	29
Figura 2 Procedimiento de laboratorio para la obtención del Límite Líquido	33
Figura 3 Procedimiento de laboratorio para la obtención del límite Plástico (Límites de Atterberg)	33
Figura 4 Equipos utilizado para ensayo de compresión inconfiada	34
Figura 5 ensayo de compresión inconfiada de cilindros preparados con diferentes aditivos químicos	34
Figura 6 Toma de muestras inalteradas del talud cancelas	35
Figura 7 Preparación de muestras inalteradas para la obtención de resultados mediante pruebas de laboratorio	35
Figura 8 Miniproctor Modificado.....	37
Figura 9 Armado de cilindros para el ensayo de compresión inconfiada mediante miniproctor	38
Figura 10 Recuperación de cilindros del miniproctor modificado.....	39
Figura 11 Preparación de muestras alteradas para toma de resultados mediante pesos unitarios y compresión inconfiada	39
Figura 12 Localización Talud Canceles	54
Figura 13 Detalle acceso Talud Canceles, municipio de Pereira	54
Figura 14 Resultado ensayo proctor modificado densidad vs humedad óptima	63
Figura 15 Esfuerzo vs Deformación unitaria Suelo Natural	124
Figura 16 Esfuerzo Deformación unitaria probeta 2% silicato con 22% agua.....	130
Figura 17 Reproceso probeta 2% silicato y 20% agua	133
Figura 18 Tercera probeta de 2% silicato y 22% agua	136
Figura 19 Probeta 2% silicato con 25% agua	140
Figura 20 Esfuerzo–deformación probeta 1% silicato con 25% de agua	143
Figura 21 Esfuerzo – deformación unitaria 4% silicato con 22% de agua	146
Figura 22 Esfuerzo deformación – deformación unitaria.....	149
Figura 23 Esfuerzo – deformación reproceso 4% silicato con 22% agua	151
Figura 24 Esfuerzo – deformación unitaria 6% silicato con 22% agua	154
Figura 25 Esfuerzo - Deformación unitaria 10% silicato con 22% agua.....	157
Figura 26 Esfuerzo – Deformación unitaria 4% silicato con 25% agua.....	160
Figura 27 Esfuerzo – Deformación unitaria 6% silicato con 25% agua.....	162

Figura 28 Esfuerzo – Deformación unitaria reproceso probeta 6% silicato con 25% agua.....	164
Figura 29 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 8% silicato con 25% agua...	167
Figura 30 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 2% silicato con 18% agua...	170
Figura 31 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 2% silicato con 28% agua...	173
Figura 32 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 2% silicato con 32% agua...	175
Figura 33 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 2% silicato con 20% agua...	178
Figura 34 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 2% silicato con 28% agua..	181
Figura 35 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 1% cal con 25% agua	187
Figura 36 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 2% cal con 25% agua	189
Figura 37 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 4% cal con 25% agua	191
Figura 38 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 6% cal con 25% agua	193

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Recomendación del método de estabilización según el tipo de suelo	36
Tabla 2 Estimación contenidos de humedad natural a diferentes profundidades en Talud Canceles	55
Tabla 3 Parametrización variables físicas y mecánicas cenizas volcánicas talud sector canceledes Probeta 1	56
Tabla 4 Parametrización variables físicas y mecánicas cenizas volcánicas talud sector canceledes Probeta 3	57
Tabla 5 Parametrización variables físicas y mecánicas cenizas volcánicas talud sector canceledes Probeta 5	60
Tabla 6 Parametrización variables físicas y mecánicas cenizas volcánicas talud sector canceledes Probeta 7	61
Tabla 7 Valor de pesos unitarios en cada una de las muestras del talud del sector Canceles	62
Tabla 8 Resultados Límites líquido y plástico suelos Talud Canceles	62
Tabla 9 Resultados proctor modificado Talud Canceles	63
Tabla 10 Parámetros de consistencia del suelo según la resistencia a la compresión inconfiada	123
Tabla 11. Compresión inconfiada suelo natural	124
Tabla 12. Cálculo de esfuerzo y deformación unitaria.	125
Tabla 13 Medidas comparativas proctor modificado y miniproctor modificado ...	126
Tabla 14 Probetas iniciales con aditivo (silicato de sodio)	127
Tabla 15 Carga axial probeta 2% de silicato con 22% de agua	128
Tabla 16 Cálculos de esfuerzo y deformación unitaria probeta 2% silicato y 22% agua	129
Tabla 17 Reproceso probeta 2% silicato y 20% agua	131
Tabla 18 Cálculo de esfuerzo y deformación unitaria reproceso probeta 2% silicato y 20% agua	132
Tabla 19 Tercera probeta 2% silicato y 22% agua	134
Tabla 20 Cálculos esfuerzo deformación unitaria de tercera probeta 2% silicato y 22% agua	135
Tabla 21 Carga axial probeta 2% silicato con 25% agua	137
Tabla 22 Cálculo esfuerzo deformación unitaria probeta 2% silicato con 25% agua	138
Tabla 23 Probeta con 1% silicato y 25% agua	141
Tabla 24 Cálculo esfuerzo- deformación probeta 1% silicato con 25% de agua .	142
Tabla 25 Carga axial probeta 4% silicato con 22% agua	144
Tabla 26 Cálculo esfuerzo – deformación probeta 4% silicato con 22% agua	145
Tabla 27 Carga axial segunda probeta 4% silicato con 22% agua	147
Tabla 28 Cálculo esfuerzo – deformación unitaria probeta 4% silicato con 22% agua	148
Tabla 29 Carga axial reproceso probeta 4% silicato con 22% agua	149
Tabla 30 Cálculo esfuerzo – deformación reproceso 4% silicato con 22% agua .	150

Tabla 31 Carga axial probeta 6% silicato con 22% agua	152
Tabla 32 Cálculo esfuerzo – deformación unitaria 6% silicato con 22% agua	153
Tabla 33 Carga axial probeta 10% silicato 22% agua.....	155
Tabla 34 Cálculo esfuerzo - deformación unitaria 10% silicato con 22% agua...	156
Tabla 35 Carga axial probeta 4% silicato con 25% agua.....	158
Tabla 36 Cálculo esfuerzo - deformación unitaria 4% silicato con 25% agua	159
Tabla 37 Carga axial probeta 6% silicato con 25% agua.....	160
Tabla 38 Cálculo esfuerzo – deformación unitaria 6% silicato con 25% agua	161
Tabla 39 Carga axial reproceso probeta 6% silicato con 25% agua	162
Tabla 40 Cálculo esfuerzo – deformación unitaria reproceso probeta 6% silicato con 25% agua	163
Tabla 41 Carga axial probeta 8% silicato con 25% agua.....	165
Tabla 42 Cálculo esfuerzo – deformación unitaria probeta 8% silicato con 25% agua.....	166
Tabla 43 Carga axial probeta 2% silicato con 18% agua.....	168
Tabla 44 Cálculo esfuerzo – deformación unitaria probeta 2% silicato con 18% agua.....	169
Tabla 45 Carga axial probeta 2% silicato 28% agua.....	171
Tabla 46 Cálculo esfuerzo - deformación unitaria probeta 2% silicato con 28% agua.....	172
Tabla 47 Carga axial probeta 2% silicato 32% agua.....	173
Tabla 48 Cálculo esfuerzo - deformación unitaria probeta 2% silicato con 32% agua.....	174
Tabla 49 Carga axial probeta 2% silicato con 20% de agua.....	176
Tabla 50 Cálculo esfuerzo – deformación unitaria probeta 2% silicato con 20% agua.....	177
Tabla 51 Carga axial probeta 2% silicato con 28% agua.....	179
Tabla 52 Cálculo esfuerzo - deformación unitaria probeta 2% silicato con 28% agua.....	180
Tabla 53 Carga axial probeta 2% silicato con 30% agua.....	181
Tabla 54 Resumen de resultado probetas con los diferentes porcentajes de aditivo (silicato de sodio) y humedad	182
Tabla 55 Carga axial probeta 1% cal con 25% agua	185
Tabla 56 Cálculo esfuerzo - deformación unitaria probeta 1% cal con 25% agua	186
Tabla 57 Carga axial probeta 2% cal con 25% agua	187
Tabla 58 Cálculo esfuerzo - deformación unitaria probeta 2% cal con 25% agua	188
Tabla 59 Carga axial probeta 4% cal con 25% agua	189
Tabla 60 Cálculo esfuerzo deformación unitaria probeta 4% cal con 25% agua	190
Tabla 61 Carga axial probeta 6% cal con 25% agua	191
Tabla 62 Cálculo esfuerzo–deformación unitaria probeta 6% cal con 25% agua.....	192
Tabla 63 Resumen de resultado probetas con los diferentes porcentajes de aditivo (cal) y humedad	194

RESUMEN

El siguiente trabajo de investigación tuvo por objetivo principal determinar el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas de suelos derivados de cenizas volcánicas mediante la aplicación de estabilizantes químicos que posibiliten el mejoramiento de la estabilidad de dichos suelos en superficies inclinadas. Para ello se tomaron muestras iniciales de terreno en un talud localizado en el sector de Canceles, municipio de Pereira (Risaralda). Dichas muestras inalteradas y alteradas fueron llevadas al laboratorio donde se les practicaron ensayos tales como granulometría, límites líquido y plástico, contenidos de humedad y ensayo de compresión confinada.

Luego de este paso se procede a determinar los aditivos que se aplicarían al terreno para observar su reacción y esperar que este superara el esfuerzo del suelo en sus condiciones naturales. Después de una búsqueda de antecedentes y de documentos que brindaran la información apropiada se determina que los químicos a utilizar serían silicato de sodio y cal, por supuesto basados en tablas y escritos que nos dieran claridad en cuanto a porcentajes y cantidades. Se llegó a la conclusión de que se tomaría una muestra de 300 gr a la cual se le mezclaría diversos porcentajes, tanto de aditivo químico como de humedad, esperando que algunas de estas mezclas dieran los resultados esperados.

Se dió inicio al proceso investigativo con porcentajes entre 1% - 6% de aditivo que inicialmente sería silicato de sodio y después se repetiría el proceso con cal, considerando porcentajes de humedad del suelo entre 20% y 25% siendo estos los porcentajes más adecuados para trabajar, pues si eran inferiores a estos, las probetas presentaban fracturas por completo y debían ser descartadas. Después de varios ensayos y de probar con diferentes porcentajes de humedades se definió que sólo se trabajaría con porcentajes de humedad entre 20% y 30% ya que si se superaba este porcentaje la mezcla se volvería demasiado viscosa y tampoco permitiría ser trabajada o armada.

Estos ensayos se repitieron una y otra vez y aunque en algunos casos se notaba que el comportamiento del suelo estaba mejorando en su resistencia en otras parecía lo contrario.

Los hallazgos más relevantes del proceso investigativo referidos al silicato de sodio fueron que con un 14% de aditivo y con un 30% de humedad el resultado del máximo esfuerzo sería de un 1.0292 kg/cm², generando así una consistencia firme al suelo y superando al suelo natural que contaba con una consistencia del suelo mediana y un máximo esfuerzo de 0.622 kg/cm².

En cuanto a la Cal sucedió algo similar pues se pudo comprobar que un mayor porcentaje de este aditivo, en condiciones de humedad similares al máximo esfuerzo obtenido con el silicato de sodio, mejoró las propiedades de resistencia

del suelo. Se obtuvo que para un 12% de cal y un 30% de humedad la consistencia del suelo pasó a ser muy firme con 2.53 kg/cm^2 , superando por completo la resistencia del suelo natural.

Todo esto permite inferir que es probable que entre mayor sea el porcentaje de aditivo a una humedad considerable, como la del 30%, en la cual se presentaron los mejores resultados es probable que se cumpla con el objetivo de esta investigación y que al inyectar aditivos químicos a un suelo de cenizas volcánicas su consistencia y resistencia mejoren.

ABSTRACT

The following research main objective was to determine the improvement of physical and mechanical soil derived from volcanic ash by application of chemical stabilizers that allow the improvement of the stability of these soils on sloping surfaces properties. This initial sample was taken ground in a bank located in the sector Canceles municipality of Pereira (Risaralda). These undisturbed and disturbed samples were taken to the laboratory where they were performed assays such as particle size, liquid and plastic limits, moisture content and unconfined compression test.

After this step is necessary to determine the additives to be applied to the field to observe their reaction and hope that this effort exceeded the soil in its natural condition. After a background search documents and provide the appropriate information is determined that the chemicals would be used sodium silicate and lime, of course based on tables and writings that give us clarity about percentages and numbers. They concluded that a 300 g sample at which various percentages will mingle both chemical additives as moisture would , hoping that some of these mixtures give the expected results.

Start the research process with percentages was between 1% - 6% additive sodium silicate would initially and then repeat the process with lime, whereas soil moisture percentages between 20 % and 25 % of these being the most appropriate percentages for work, as if these were lower than the specimens had completely broken and should be discarded. After several trials and testing with different percentages of moisture was determined that only work with moisture contents between 20 % and 30 % because if this percentage exceeded the mixture is too viscous and would not allow to be worked or navy.

These tests were repeated again and again and although in some cases it showed that soil behavior was improving its strength in other seemed otherwise. The most relevant findings of the research process referred to were that sodium silicate with 14 % additive and 30 % humidity the result of a maximum effort would be 1.0292 kg/cm^2 , generating a firm consistency and beating down the natural soil

that had a consistency of middle ground and a maximum stress of 0622 kg/cm². As for Cal did something similar because it was found that a higher percentage of this additive , moisture conditions similar to the maximum stress obtained with sodium silicate improved the strength properties of the soil . Was obtained for 12% lime and 30 % moisture soil consistency step to be very firm with 2.53 kg/cm² completely overcoming the resistance of the natural soil.

All this allows us to infer that it is likely that the higher the percentage of additive considerable moisture , such as 30% , which were presented the best results are likely to fulfill the objective of this research and that injecting additives chemical to a volcanic ash soil consistency and strength improve.

1. INTRODUCCIÓN

La estabilidad de taludes ha sido históricamente uno de los mayores retos de la Ingeniería, toda vez que en la generalidad de las intervenciones ingenieriles salen a flote problemáticas asociadas a cortes, excavaciones y superficies inclinadas, que en mayor o menor medida requieren de métodos y procesos que garanticen la estabilidad de los terrenos y la seguridad y durabilidad de las medidas ejecutadas.

Tal como lo plantea Suárez (1998), en su tratado de deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales, “el objetivo principal de un estudio de estabilidad de taludes o laderas es el de establecer medidas de prevención y control para reducir los niveles de amenaza y riesgo. Generalmente, los beneficios más importantes desde el punto de vista de reducción de amenazas y riesgos es la prevención”.¹

Schuster y Kockelman² (1996), proponen una serie de principios generales y metodologías para la reducción de amenazas de deslizamiento utilizando sistemas de prevención, los cuales requieren de políticas del Estado y de colaboración y conciencia de las comunidades. Sin embargo, la eliminación total de los problemas no es posible mediante métodos preventivos en todos los casos y se requiere establecer medidas de control para la estabilización de taludes susceptibles a sufrir deslizamientos.

Genéricamente los sistemas de estabilización de taludes y/o laderas se han clasificado en cinco categorías principales a saber: reconfiguración geométrica del talud o ladera; recubrimiento de la superficie; control de aguas superficiales y

¹ SUAREZ D, Jaime. Prevención, Estabilización y Diseño. En: Deslizamientos y estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. 1 ed. Bucaramanga: Ingeniería de Suelos Ltda, 1998. p. 385.

² SCHUSTER. y KOCKELMAN. Introducción: Prevención, Estabilización y Diseño. En: SUAREZ D, Jaime. Deslizamientos y estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. 1 ed. Bucaramanga: Ingeniería de Suelos Ltda, 1998. p. 385.

subterráneas; ejecución de estructuras de contención y mejoramiento de las condiciones del suelo. Este último sistema se ha implementado mediante inyecciones o uso de aditivos químicos; magmificación; congelación y electro-ósmosis.

Para el caso particular de los aditivos químicos, Hoyos Patiño Fabián et al., en el artículo de la revista de la Sociedad Colombiana de Geotecnia, VIII CCG 2000: TRATAMIENTO QUÍMICO DE SUELOS ACTIVOS, “plantea que la mayor debilidad de los tratamientos químicos se encuentra en la definición de los criterios de dosificación de los productos utilizados en ella, que son en gran medida empíricos, o se basan en procedimientos de ensayo y error a partir de las propiedades índice del suelo” (Thompson, 1969, García et al, 1998) o en su pH (Eads & Gimm, 1966, García et al, 1998). “Sugiere el autor que un criterio racional para la implementación de tal método debe soportarse en la dosificación requerida y ésta debe basarse en la capacidad de intercambio catiónico del suelo basado en el índice de plasticidad, a partir de la correlación de éste con la capacidad de intercambio catiónico”.³

También, Quintana Crespo (2005), en su tesis doctoral: Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos, “sugiere que la mineralogía de las cenizas volcánicas en presencia de algunos aditivos químicos puede hacer variar las propiedades índice y mecánicas de los suelos y tornarlos más resistentes o deseables para algunos fines específicos. Materiales cementantes como el cemento y la cal o productos químicos como silicatos, ligninos, resinas, acrilamidas y uretanos, tradicionalmente se han utilizado para mejorar la resistencia o reducir la permeabilidad de los suelos y/o rocas”.⁴

Finalmente, es claro que antes de la utilización de una inyección con productos químicos, debe investigarse que el material realmente pueda penetrar dentro de los vacíos o fisuras del suelo, y debe conocerse la físico-química de los suelos para poder determinar cuál podría ser el aditivo más eficiente.

La presente investigación apunta a determinar las propiedades físico-químicas y mecánicas patrones (referentes) de un talud compuesto por cenizas volcánicas, y la variación de las mismas ante la eventual inyección de aditivos químicos, en diferentes concentraciones y porcentajes de mezcla, que posibiliten el mejoramiento de las condiciones de resistencia de los suelos, y complementariamente garanticen su estabilidad en el tiempo.

³ HOYOS P, Fabián. RAMIRO S, Juan. Tratamiento Químico de Suelos Activos II: Los Criterios de Dosificación. En: revista de la Sociedad Colombiana de Geotecnia. 2000. vol1, p. 1-7.

⁴ QUINTANA C, Enrique. Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos. Tesis doctoral (Ingeniero Geólogo). Córdoba – Argentina. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2005. 283p

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El municipio de Pereira, localizado en la zona central del eje cafetero, con una topografía montañosa derivada de las irregularidades geomorfológicas del abanico aluvial Pereira–Armenia; suprayacido por una espesa capa de suelos producto de la meteorización de materiales pirocásticos (cenizas volcánicas); con una precipitación promedio anual entre los 2200 y 2400 mm/año (según datos del IDEAM)⁵ y localizada en la denominada ZONA DE ALTO RIESGO SÍSMICO (INGEOMINAS, 1998)⁶; es considerado, según estudios de la Corporación Autónoma Regional de Risaralda CARDER⁷ y de la Oficina Municipal para la Prevención y Atención de Desastres de Pereira OMPAD, como un municipio de alta susceptibilidad a la ocurrencia de procesos de remoción en masa.

Tal situación contextual del municipio de Pereira, además de presentar tasas pluviométricas superiores a los 2400 mm/anuales, y con una geología caracterizada por la presencia de suelos residuales derivados de cenizas volcánicas, ha posibilitado que a través del tiempo el municipio de Pereira sea afectado de manera frecuente por eventos tipo deslizamientos, con las consecuencias e impactos sobre los bienes y pobladores del territorio municipal.

Ahora bien, los métodos y/o sistemas para la estabilización de taludes utilizados en el territorio municipal se han abordado desde las metodologías clásicas: perfilados, revegetalización, estructuras de contención y manejo de aguas; dejándose de lado otro tipo de metodologías, como es el caso de la estabilización química de suelos, bien por desconocimiento del tema o simplemente por la ausencia de ejercicios investigativos que brinden suficiente información acerca de los beneficios ambientales, económicos y geotécnicos de tales sistemas.

En conclusión, la ciudad no cuenta con suficiente información técnico-científica en cuanto a los procedimientos, diagnósticos y utilidad de los métodos de estabilización química de suelos en taludes compuestos por cenizas volcánicas, que permita contar con alternativas de estabilización y diversificar las formas clásicas como se ejecutan las medidas de prevención y mitigación de factores generadores de riesgo geotécnico en el territorio municipal.

⁵ IDEAM. Datos Precipitación Promedio Anual.

<https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/018781/CAP2.pdf>

⁶ INGEOMINAS. Mapa de amenaza sísmica en Colombia.

http://aplicaciones1.ingeo Minas.gov.co/Bodega/i_vector/210/03/1000/24431/mapa/pdf/2105244311300001.pdf

⁷ CARDER. Mapas de Zonas de Riesgo (Deslizamientos). www.carder.gov.co/.../diagnostico-de-riesgos-ambientales-Pereira

Se hace necesario entonces emprender ejercicios investigativos tendientes a la búsqueda de alternativas de estabilización de taludes, en particular aquellas con énfasis en la estabilización química de suelos y en donde a partir del conocimiento químico-mineralógico y físico-mecánico de los materiales objeto de estudio (cenizas volcánicas), se pueda definir el mejor y más eficiente aditivo químico, en términos de concentración y categoría de aditivo químico, que garantice la mayor condición de resistencia y estabilidad del (de los) talud (es) a evaluar.

3. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

A continuación se presentan 6 antecedentes extraídos de 6 tesis en diferentes partes de Latinoamérica que se relacionan con el tema tratado en la presente investigación, tres tesis desarrolladas en Colombia, una tesis desarrollada en México, una tesis desarrollada en Chile y una tesis desarrollada en Argentina.

3.1. ESTABILIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE SUELOS ARCILLOSOS ELABORADOS CON PRECURSORES NANO-MÉTRICOS.⁸

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Ingeniería Civil

Tesis. Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería
Presenta. Ing. Erick Oliver Cervantes Gutiérrez

Asesor de Tesis. Dr. José Carlos Rubio Ávalos

Morelia, Michoacán, mayo de 2010

En el desarrollo de la tesis mencionada se probaron cuatro productos nuevos creados a través de precursores nano-métricos donde se pretendió ver qué tipo de mejoría o estabilización realizaban estos dentro de las propiedades físicas y químicas de las arcillas.

Estos productos o también llamados estabilizantes, se aplicaron en la parte experimental basándose en la metodología de la "National Lime Association", utilizando la norma de "Diseño y procedimiento de ensayos de suelos estabilizados con cal".

Para diferenciar un producto de otro durante las pruebas mecánicas, los investigadores de esta tesis tomaron la decisión de nombrarlos Estabilizante 1, Estabilizante 2, Estabilizante 3, Estabilizante 4. Durante el proceso de pruebas observaron diferentes comportamientos de las mezclas donde unas tuvieron mejores resultados que otras. Donde el producto nombrado como estabilizante 1, mostró los mejores resultados mejorando las características volumétricas, de resistencia y de compresibilidad.

⁸ CERVANTES G, Erick Oliver. Estabilización físico-química de suelos arcillosos elaborados con precursores nano-métricos. Tesis para obtener grado de maestro de ingeniería. Morelia, Michoacán. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Ingeniería Civil. Maestría en Infraestructura del Transporte. 2010. 143 p. Ed, pagina tomada de: <http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx>

3.2. ESTUDIO DE COMPORTAMIENTO DE SUELO ESTABILIZADO CON SAL: FRENTE A LA ACCIÓN DEL AGUA, PARA DISTINTAS MEZCLAS.⁹

Tesis. Para optar al título de ingeniero civil en obras civiles.
Profesor patrocinante: Sr. Luis Collarte Concha. Ingeniero Civil Hidráulico.
Presenta. Nicole Natalia Hinrichsen Triviños.
Valdivia, Chile 2005

En esta tesis se expone el uso de la sal como estabilizador químico de suelos, observando los efectos del agua sobre éste. Además, presentan los resultados de distintas formas de adicionar el Cloruro de Sodio y así observar cuál es su comportamiento. También analizan algunos aspectos de este proceso, a través de los resultados obtenidos dentro del laboratorio, para así tener más antecedentes de evaluación de carpetas de rodado en la ciudad de Valdivia, con tamaño máximo 2”.

El principal empleo de los procesos de estabilización de suelos se relaciona con la construcción de caminos, aeropuertos y obras similares. En el caso de los caminos es notorio, en los últimos años, un gran incremento en el número de vehículos, una mayor diversificación de estos y de las acciones que producen sobre las carreteras. Todo esto ha redundado en un aumento de la importancia que presentan los procesos de mejoramiento de las vías. Cada día las bases, sub-bases y carpetas de rodado deben presentar mejores condiciones de soporte y duración, a la vez que menores costos de construcción y mantenimiento. Por esta razón intensificaron el estudio de la estabilización química, la cual permite modificar ciertas características de los suelos mediante la adición de pequeñas cantidades relativas de compuestos químicos. Estos producen reacciones físico-químicas con las fracciones finas de los suelos obteniendo resultados a veces sorprendentes desde el punto de vista técnico y económico. Algunas de las posibilidades de estabilización química la constituyen el agregar cemento Portland, cenizas volcánicas, cal, cloruro de calcio, cloruro de sodio, etc.

La estabilización con sal es una solución que permite proporcionar a los caminos ciertas características que mejoran la serviciabilidad y transitabilidad de estos.

⁹ HINRICHSEN T, Nicole Natalia. Estudio de comportamiento de suelo estabilizado con sal: frente a la acción del agua, para distintas mezclas. Tesis para obtener título de ingeniero civil en obras civiles. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela Ingeniería Civil en Obras Civiles. 2005. 112 p. Ed, pagina tomada de: <http://catalogobiblioteca.uach.cl>

Cómo se aplica esta tecnología.¹⁰

La estabilización con sal, tiene múltiples aplicaciones y no sólo en caminos donde pueden estabilizarse carpetas de rodado, bases, sub – bases, suelos naturales o subrasantes, sino también pistas de aterrizaje en aeródromos, playa de estacionamiento, en centros de consumo, supermercados, colegios, multicanchas, patio de recreación, estadios y otras áreas como bodegas a la intemperie y patios industriales, veredas entre otros. Es en resumen adaptable a otros usos en una gran variedad.

Sobre las superficies estabilizadas con sal se puede imprimir, ejecutar doble tratamiento, asfaltar u hormigonar sin otra limitación de las propias de los productos a utilizar.

En la estabilización con sal como cualquier otro procedimiento, la calidad del trabajo terminado dependerá de los materiales que se usen y de que el constructor se ciña a una buena técnica de construcción y a las recomendaciones generales entregadas por el proveedor.

La maquinaria y su correcto uso, unido a condiciones mínimas en cuanto a saneamiento, pendientes longitudinales y transversales que permitan el escurrimiento de las aguas lluvias, una compactación mínima a un nivel de densidad de 95% y una homogeneización adecuada, permitirá tener una carpeta de rodado.

3.3. FORMULACIÓN Y PRODUCCIÓN DE ESTABILIZADORES QUÍMICOS PARA SUELOS FINOS COLOMBIANOS.¹¹

Tesis. CORASFALTOS

Bogotá, Colombia 2009

¿Por qué se desarrolla esta tecnología?

En Colombia, la investigación científica y/o tecnológica sobre el tema de los estabilizadores de suelos se reduce a la simple aplicación de productos importados o fabricados con materias primas en su mayoría provenientes de otros países, con formulaciones y dosificaciones patentadas. En algunos casos se limita a la utilización de cal, cemento (con o sin aditivos químicos), aceite sulfonado, teniendo en cuenta solamente los parámetros mecánicos

¹⁰ ARAYA D, María Loreto. Análisis comparativo para ejecución de estabilización de suelos, entre procesos tradicionales y el estabilizador de suelos soiltac. Tesis de grado (Ingeniero Constructor). Valdivia – Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela de construcción Civil. 2010. 98 p

¹¹ CORASFALTOS. Formulación y producción de estabilizadores químicos para suelos finos colombianos. <http://www.corasfaltos.com/index>.

sin correlacionarlos con las características químicas de los suelos, de mayor importancia para obtener buenos resultados de resistencia y de estabilización volumétrica.

Para corregir el problema de la inestabilidad de los suelos se requiere estabilizar los suelos en forma permanente, utilizando productos químicos, no tóxicos, que den a estos suelos un mejor comportamiento en servicio, a un menor costo.

Objetivo.

El objetivo de esta tesis está enfocado a brindar una metodología que permita el mejoramiento y mantenimiento duradero y estable, de las vías secundarias y terciarias, no pavimentadas, basado en análisis físico químico de los suelos que las conforman y con esta base realizar su posterior estabilización.

Alcance.

- Caracterización física, química y mecánica del suelo.
- Con base en las características químicas del suelo, seleccionar y evaluar la acción individual de las sales comerciales que pueden reaccionar con ellos y determinar sus concentraciones óptimas.
- Analizar mecanismos físicos químicos que determinan el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos.
- Realizar la estabilización de los suelos en la vía, de acuerdo con las recomendaciones que se den en laboratorio.

Resultados.

La técnica de estabilización de suelos aplicada al mejoramiento vial, se constituye en una de las mejores alternativas desde el punto de vista funcional, ambiental (sus componentes son no tóxicos) y económico, teniendo en cuenta que las regiones deben optimizar sus recursos en actividades que generalmente demandan grandes inversiones. La técnica permite que se emplee en forma intensiva la mano de obra o que se emplee maquinaria normal, que generalmente la posean los municipios.

En los suelos tipo CL, SC y OH, al igual que los OL y SM se ha encontrado que existen productos en el mercado nacional que, al 1% de concentración,

lograron los mejores resultados en el mejoramiento de las propiedades de plasticidad y resistencia.

La mayor parte de ellos redujeron totalmente (100%) la expansión en suelos arcillo-limosos y arenas limosas.

Suelos casi impermeables. Por ejemplo: En arenas limosas con $K=1.28E-5$ cm/s se reduce el coeficiente de permeabilidad a $K=6.03E-7$ cm/s después del proceso de estabilización.

En un intervalo de 7 a 14 días después de adicionados los productos se obtiene un mejoramiento en las propiedades de plasticidad y resistencia.

Los productos son de fácil aplicación.

Para la aplicación y homogenización, se requiere del uso de maquinaria común.

Son productos nacionales de alta disponibilidad en el mercado y de bajo costo.

La dosificación y el diseño de la mezcla se realizan para cada suelo dependiendo del análisis químico y de sus propiedades físicas y mecánicas.

El material estabilizado es reciclable, es decir que si se produce fisuramiento se puede escarificar y recomprimir sin detrimento de sus calidades adoptadas durante el proceso.

Permite una estabilización física de los últimos centímetros de la capa superficial, usando emulsiones asfálticas, crudos pesados y asfaltos naturales con fines de impermeabilización.

La vía se puede abrir al tránsito al día siguiente después de la estabilización.

El costo aproximado por km, de vía estabilizada (Calzada de 6 m de ancho y 0.3m de espesor), es de \$88.850.000. Este costo contempla un doble riego de ligante asfáltico y arena.

Esta técnica permite construir sobre las bases estabilizadas pavimentos económicos, como "slurry seal", pavimentos con crudos pesados, con asfaltos naturales y/o tratamientos superficiales dobles.

Proceso Constructivo.

El procedimiento seguido en el desarrollo de esta investigación se realizó de acuerdo a las siguientes etapas:

- Limpieza o escarificación.
- Nivelación de la subrasante.
- Escarificación de la capa a estabilizar.
- Aplicación de los productos químicos.
- Compactación.

La metodología que propusieron en la tesis, permite producir estabilizadores que actúan sobre el material plástico, impermeabilizando el suelo y controlando la humedad. El proyecto propicia el ahorro del consumo de materiales pétreos y gravas como estabilizadores, en defensa del medio ambiente.

3.4. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS TERRITORIAL GUAJIRA.¹²

Informe Estabilización Tramo Piloto

Carretera Caracoli- Marocazo

Contratista. Ingeniero Yesid Cornejo Ochoa

Personal Presente CON-AID. Ing. Andrés Polleti y Juan Mesa Uribe

Riohacha, Guajira, Julio de 2010

El presente informe corresponde a los resultados de una caracterización geotécnica de un tramo de subrasante del corredor vial Caracoli-Marocazo, perteneciente a la red Terciaria del Instituto Nacional de Vías, dentro de un proceso de estabilización química, con nuevos productos que minimicen los impactos y las intervenciones del medio circundante y que a la vez produzcan una mejora sustancial, medibles en las condiciones de resistencia del suelo de subrasante y reducción de los límites líquidos e índices de plasticidad de esos suelos.

Para el Proceso de estabilización química, se trabajó con aceites sulfonados, producto orgánico de características físicas y químicas singulares. El nombre comercial del producto, importado de Sudáfrica, es CON-AID SUPER, un compuesto aniónico sintético, derivado del ácido sulfónico y de fórmula química R-SO₃H y del cual se encuentra una gran

¹² Investigación (instituto nacional de vías territoriales de la guajira). Riohacha guajira, Colombia 2010. Informe Estabilización tramo piloto carretera Caracoli- Marocazo. Ed, pagina tomada de: www.laguajira.gov.co

experiencia a nivel mundial, como caso de Argentina, Perú, Brasil entre otros, en donde se han obtenido estabilizaciones satisfactorias en suelos de características pobres en cuanto a su resistencia y plasticidad.

Análisis de Resultados

El comportamiento de la estabilización química efectuada en el sector del corredor vial Caracolí–Marocazo, se evidencia en la permanencia del tránsito vehicular muy a pesar de la fuerte ola invernal que azotaba el área de influencia del proyecto y que en épocas anteriores para este mismo tipo de situación ocasionaba intransitabilidad e interrupciones por el mal estado en que quedaba la vía, ante la presencia de las precipitaciones en los períodos invernales.

De los resultados obtenidos en este proyecto se puede observar que en uno de los tramos se obtuvieron los mayores incrementos de resistencia al corte entre el 300% y el 400% y en una zona a pesar de que se presentó una resistencia al corte del 80%, su incremento fue significativo comparado con los ensayos aplicados a la muestra inalterada.

Una conclusión a priori de esta estabilización con aceite sulfonado es la permanencia en el tiempo de la transitabilidad de la vía comparada con la práctica usual de la reposición de afirmado sobre subrasantes no tratadas que presentan altos contenidos de plasticidad, bajos valores de resistencia, altos límites líquidos y las cuales, cuando aparecen las temporadas de lluvias rápidamente pierden el espesor de afirmado, reduciendo su nivel de servicio a situaciones críticas, que en la mayoría de los casos se convierten en vías intransitables.

3.5. TRATAMIENTO QUÍMICO DE SUELOS ACTIVOS II: LOS CRITERIOS DE DOSIFICACIÓN.¹³

Presenta. Fabián Hoyos Patiño et al.
Profesor Asociado. Juan Ramiro Sánchez U. Facultad de Minas.
Universidad Nacional de Colombia, Medellín
VIII CCG 2000 – Sociedad Colombiana de geotecnia
Universidad Nacional de Colombia, Medellín
Medellín, Colombia 2000

Los suelos activos son fácilmente reconocibles en el campo y en el laboratorio. A pesar de ello, no se ha contado con elementos de diagnóstico

¹³ HOYOS P, Fabián. RAMIRO S, Juan. Tratamiento Químico de Suelos Activos II: Los Criterios de Dosificación. En: revista de la Sociedad Colombiana de Geotecnia. 2000. vol1, 7 p.

cuantitativo de uso generalizado para el manejo de su potencial de expansión.

Los criterios corrientemente utilizados en el diagnóstico del potencial de expansión de los suelos activos son apenas semicuantitativos cuando no puramente cualitativos, apoyados principalmente en los valores de los límites de consistencia y del contenido de coloides. Excepcionalmente se utiliza la capacidad de intercambio catiónico (CIC) como uno de los elementos de caracterización del suelo.

El potencial de expansión medido sea como índice de expansión o como presión de expansión presenta una correlación muy significativa con la capacidad de intercambio catiónico al punto en que ésta puede ser utilizada como un estimador cuantitativo confiable del potencial de expansión.

Existe también una estrecha correlación entre el índice de plasticidad y la capacidad de intercambio catiónico de manera que el índice de plasticidad puede llegar a ser utilizado como un estimador cuantitativo del potencial de expansión.

La capacidad de intercambio catiónico como estimador cuantitativo del potencial de expansión puede ser utilizado como criterio de dosificación en los tratamientos químicos de los suelos activos. En caso de no contar con los valores reales de la CIC, es posible estimarlos a partir de los valores del índice de plasticidad. La dosificación definida con este criterio puede diferir sustancialmente de la propuesta en métodos empíricos propuestos en la literatura para la estabilización con cal hidratada.

El criterio de dosificación mencionado anteriormente puede ser planteado de manera más explícita en términos de las magnitudes cuantificables del suelo y del peso molecular de las sustancias que se utilicen en el tratamiento experimental de suelos activos.

Si se parte de la capacidad de intercambio catiónico total del suelo, expresada corrientemente en mili equivalente por 100 gramos de suelo, la cantidad de sustancia necesaria para saturar dicha capacidad estará dada por el producto de la CIC y el equivalente gramo de la sustancia en cuestión. En el trabajo experimental desarrollado hasta ahora en la Facultad de Minas, se ha utilizado hidróxido de calcio (Álvarez & Restrepo, 1999), nitrato de amonio (Castaño & Jiménez, 1999), sulfato de amonio (Restrepo & Saavedra, 1999) y cloruro de potasio (Cano & Restrepo, 2000) y se está investigando una mezcla de sulfato de amonio e hidróxido de calcio (Castañeda & Patiño en preparación).

Los resultados obtenidos, muestran que distintos suelos tratados con sustancias diferentes, pero con el mismo criterio de dosificación, presentan un comportamiento similar: la actividad del suelo y el potencial de expansión disminuye a medida que la saturación de la capacidad de intercambio catiónico aumenta hasta alcanzar la saturación; la eficiencia del tratamiento es función de la saturación de la CIC del suelo y la sobresaturación no tiene efectos positivos en el tratamiento. Con excepción del tratamiento con hidróxido de calcio, no se observó en ningún caso una disminución significativa del potencial de expansión cuando se aplicó una cantidad mayor de sustancia que la necesaria para saturar la capacidad de intercambio catiónico.

3.6. RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS Y LOS COMPONENTES PUZOLÁNICOS DE LOS SEDIMENTOS PAMPEANOS.¹⁴

TESIS DOCTORAL. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
DIRECTOR. Dr. Emilio R. Redolfi
Universidad Nacional de Córdoba
Buenos Aires, Argentina 2005

Esta tesis sugiere que la mineralogía de las cenizas volcánicas en presencia de algunos aditivos químicos puede hacer variar las propiedades índice y mecánicas de los suelos y tornarlos más resistentes o deseables para algunos fines específicos. Materiales cementantes como el cemento y la cal o productos químicos como silicatos, ligninos, resinas, acrilamidas y uretanos, tradicionalmente se han utilizado para mejorar la resistencia o reducir la permeabilidad de los suelos y/o rocas.

Existe una gran cantidad de investigaciones geotécnicas desarrolladas sobre el método de estabilización de suelos con cal. La mayoría de ellas han sido desarrolladas sobre suelos arcillosos, considerando que los procesos físicos y químicos de interacción del suelo con la cal ocurren exclusivamente por la presencia de minerales arcillosos, quienes a través de su superficie específica elevada, la forma laminar de sus partículas, la capacidad de intercambio catiónico, etc., reaccionan adecuadamente con la cal.

Las experiencias de estabilización de suelos loésicos con cal tanto en el país como en el extranjero, han sido efectuadas siguiendo las normativas vigentes que privilegian el análisis granulométrico y los límites de

¹⁴ QUINTANA C, Enrique. Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos. Tesis doctoral (Ingeniero Geólogo). Córdoba – Argentina. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2005. 283p

plasticidad como elementos de selección de suelos, razón por la cual no se ha arribado aún a conclusiones definitivas sobre el particular.

La etapa experimental no ha dado lugar aún, a una etapa científica que desarrolle una teoría general abarcativa de todos los aspectos intervinientes en la estabilización de suelos y que a través de ensayos específicos, permita predecir el comportamiento de estas mezclas.

Existen diversos tipos de cales con características particulares que las hacen más apropiadas para ciertas aplicaciones. En las mezclas suelo - cal resultan de utilidad algunos componentes de la cal que serían indeseables para otros usos como por ejemplo la albañilería.

Las reacciones que ocurren en la estabilización de suelos con cal comprenden un conjunto de procesos físico-químicos que han sido referidos en la literatura con los siguientes términos: Mejoramiento, Cementación y Carbonatación.

Diversos autores han coincidido que dentro de las reacciones inmediatas entre la arcilla y la cal ocurren: adsorción física del hidróxido de calcio, reacción casi instantánea entre las partículas de arcilla y la cal para producir aluminato tetra cálcico hidratado, formación del gel de tobermorita (SCH) y como productos de la reacción a largo plazo aparecen: el gel de tobermorita (SCH), compuestos del tipo SCH (I) y SCH (II) y aluminatos de calcio hidratados.

Los minerales arcillosos tratados con cal registran una disminución del Índice Plástico debido por lo general a un incremento mayor en el Límite Plástico que en el Límite Líquido.

La cal reacciona con los suelos arcillosos, produciendo un intercambio iónico y una saturación del mineral arcilloso con el ión calcio. Esto trae como consecuencia una aglomeración de las partículas de arcillas, en conjuntos de partículas de tamaño limo y arena fina. Por lo tanto la curva granulométrica del material se hace más gruesa.

La reacción entre el suelo y la cal causa una alteración de la relación Densidad Máxima – Humedad Óptima, que es dependiente del suelo, del tiempo de curado y de la cantidad de cal agregada. Mientras mayor es el porcentaje de cal agregado al suelo, mayor es la Humedad Óptima del mismo y menor la Densidad Máxima.

La acción inmediata de la cal trae aparejada incrementos en la resistencia a la compresión no confinada. Diversas experiencias internacionales han mostrado incrementos en la resistencia a la compresión simple no

confinada de 700 KPa o más, sobre la resistencia natural del terreno, tras un período de curado de 28 días a 22° C de temperatura.

Un análisis estadístico de datos recopilados de resistencia a la compresión simple de mezclas de suelos A4 con cal, mostró la existencia de dos picos de frecuencia en el histograma, que se corresponderían con la mayor o menor cantidad de minerales reactivos dentro del suelo.

Cuando se realizan mezclas de suelos puzolánicos con cal existen antecedentes de un fenómeno de auto sellado de fisuras (autogeneous healing) que no es otra cosa que el fenómeno por medio del cual una grieta se re cementa a través de un mecanismo auto generativo.

El tratamiento con cal de los suelos finos de Illinois producen incrementos en el CBR independientemente del tiempo de curado y de la reactividad del suelo.

En suelos que no registran actividad puzolánica la estabilización se logra con el agregado de materiales puzolánicos naturales o artificiales y cal o cemento.

Los estudios llevados a cabo en ensayos triaxiales convencionales, demostraron que el mayor efecto de la cal es producir un incremento sustancial en la cohesión y una baja influencia en la fricción interna. El desarrollo de la fuerza cementante se incrementa cuando la cantidad de cal presente permite el desarrollo de las reacciones puzolánicas entre ella y las fracciones finas reactivas del suelo.

Las mezclas de suelos estabilizados con cal, se caracterizan dinámicamente mediante la determinación del Módulo resiliente, a través de ensayos tales como los de compresión triaxiales con cargas pulsantes.

Las propiedades de los materiales y las características de las capas de suelo - cal han sido divididas en 4 categorías consideradas críticas para el correcto funcionamiento de una estructura vial: resistencia y deformaciones permanentes, propiedades resilientes, fractura y fatiga, y durabilidad.

4. JUSTIFICACIÓN

Uno de los aspectos más importantes para el desarrollo y progreso de un centro poblado es la posibilidad de conectarse comercialmente con otros municipios o departamentos con los cuales se pueda intercambiar productos de primera necesidad, de ahí la importancia y el reto que tienen los gobiernos locales de mantener la red vial de sus municipios y sus alrededores en óptimas condiciones, lo que implica a su vez, poner especial atención en el diseño, construcción y estabilización de los taludes más vulnerables cercanos a la red vial en cuestión, ubicando este aspecto en los planes de desarrollo y planes de ordenamiento en un plano de importancia ingenieril de primer orden. Tanto por el aspecto de inversión como por el de consecuencias derivadas de su falla, los taludes constituyen hoy una de las estructuras ingenieriles que exigen mayor cuidado por parte del proyectista.

Para el diagnóstico de las condiciones de estabilidad de un talud o ladera es imprescindible entender los agentes que causan la inestabilidad. Es importante poder anticipar los cambios que ocurren con el tiempo y las varias condiciones de carga, de humedad y drenaje a las cuales el talud va a estar expuesto durante toda su vida. En el caso de deslizamientos se requiere entender los elementos esenciales de las situaciones que producen las fallas. La experiencia es el mejor referente y especialmente la experiencia de las fallas ocurridas.

Una vez realizado un diagnóstico claro y preciso sobre las características del talud, que permitan determinar las fallas, se pueden tomar decisiones coherentes sobre la manera más adecuada de estabilización.

Existen muchos métodos para estabilizar un talud, los más comunes implican grandes obras estructurales con una gran logística, diseño y planeación previa, lo cual genera costos muy elevados, un gran impacto ambiental y un gran impacto visual, es por esto que es imprescindible desarrollar un tipo de propuesta para estabilizaciones que disminuya costos en beneficio de los municipios, de ahí la importancia de tomar como alternativa la aplicación de aditivos químicos con la intención de mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los taludes.

5. OBJETIVO DEL PROYECTO

5.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas de suelos derivados de cenizas volcánicas mediante la aplicación de estabilizantes químicos y que posibiliten el mejoramiento de la estabilidad de dichos suelos en superficies inclinadas.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar física y mecánicamente los materiales que componen el cuerpo del talud del sector de Canceles, compuesto por cenizas volcánicas, localizado en el perímetro urbano y/o de expansión urbana del municipio de Pereira.

Evaluar el estado del arte teórico del mejoramiento de suelos mediante la aplicación de aditivos químicos

Interpretar los resultados de ensayos físico-mecánicos realizados con diferentes mezclas de aditivos químicos, utilizados en suelos derivados de cenizas volcánicas, a partir de las propiedades físico-mecánicas iniciales diagnosticadas en el Talud de Canceles.

6. PROCESO METODOLÓGICO

Para la presente investigación se propone la caracterización diagnóstica previa de un (1) talud localizado en la vía destapada que se dirige al Cerro Canceles y que comunica la Avenida Circunvalar y el Barrio Villa Santana al sur - oriente del Municipio de Pereira, dicho talud está compuesto por cenizas volcánicas.



Figura 1 Localización Talud Canceles

Fuente: google earth

La caracterización previa del sitio de estudio contempla:

- aspectos geológicos y geomorfológicos
- uso y cobertura actual del suelo
- aspectos físico-geométricos de la superficie inclinada
- características fisiográficas y de ocupación del entorno
- forma de la pendiente
- columna estratigráfica generalizada del área de estudio
- descripción hidro-climatológica del área de estudio
- registro fotográfico

El sitio de trabajo deberá tener las siguientes condiciones mínimas, y deberán reconocerse, para la estimación de parámetros de referencia, las siguientes propiedades físicas y mecánicas a saber:

- talud constituido por cenizas volcánicas

- el sitio debe posibilitar la toma sistemática de muestras y la realización de los siguientes ensayos de laboratorio:
 - ✓ Granulometría con lavado en tamiz 200
 - ✓ Pesos unitarios
 - ✓ Límites de Atterberg
 - ✓ Contenidos de humedad
 - ✓ Compresión inconfiada

Una vez se diagnostiquen y registren los parámetros de referencia del talud objeto de estudio, se procederá a evaluar el comportamiento de los materiales con diferentes aditivos químicos y en diferentes concentraciones.

A medida que se avance en la toma de muestras y se adelanten los ensayos de laboratorio con cada una de las concentraciones y tipos de aditivo químico, se podrá establecer las relaciones del comportamiento mecánico de los suelos y se podrá identificar las correlaciones existentes entre las diferentes variables evaluadas, y poder, de ser posible y viable, finalmente establecer un protocolo y/o procedimiento de estabilización química de suelos en taludes conformados por cenizas volcánicas.

En el sitio de estudio (talud a evaluar) se adelantarán las siguientes actividades:

- 20 m de perforación al momento de inicio del ejercicio investigativo para la caracterización físico-química y mecánica de los materiales que conforman el talud
- Toma de muestras inalteradas y alteradas
- Realización de un (1) kit completo de ensayos de laboratorio

Una vez se obtengan los resultados acumulados de las variables diagnosticadas, a través del tiempo de ejecución del proyecto investigativo, se identificarán las variaciones en el tiempo de cada una de ellas y se evaluará sus posibles relaciones y se podrá formular el modelo procedimental de estabilización de suelos derivados de cenizas volcánicas.

6.1. TIPOS DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo a las fases en que se desarrollará el presente proyecto, es importante mencionar que el mismo se apoya en varios tipos de investigación.

6.1.1. INVESTIGACIÓN CUANTITATIVA

La investigación cuantitativa está presente en el desarrollo del proyecto de investigación en varias fases ya que se desarrollarán algunas actividades que apuntan a recolectar información por medio de modelos numéricos o datos estadísticos, por ejemplo:

Durante la **fase de campo** se desarrollarán todas las actividades de exploración geotécnica, toma de muestras inalteradas y alteradas, levantamiento de columnas estratigráficas y selección y dosificación de concentraciones de los aditivos químicos a ensayar

El producto de esta fase estará constituido por:

- Ejecución y registro sistemático de perforaciones, con la correspondiente caracterización de las columnas estratigráficas.
- Base de datos e interpretación de resultados de la realización de ensayos de laboratorio, en los que se determinará:
 - ✓ Clasificación granulométrica de suelos
 - ✓ Determinación de los pesos unitarios
 - ✓ Contenidos de humedad (natural y con secado al aire libre)
 - ✓ Límites de Atterberg

Los diferentes ensayos de laboratorio se ejecutarán siguiendo las normas y estándares establecidos para cada uno de ellos.

En la **fase de procesamiento de información** se sistematizará la información recolectada en campo y la obtenida en los diferentes ensayos de laboratorio, con el objeto de posibilitar los respectivos análisis en términos de relaciones y comparación de variables y resultados obtenidos.

El producto final de la fase correspondiente al procesamiento de información, consistirá en la redacción de documento síntesis con los análisis de los resultados de los diferentes tipos de ensayos realizados y las posibles relaciones entre las variables evaluadas a lo largo del estudio.

La **fase de sistematización e inferencias** estará determinado por el análisis y evaluación de los resultados (ensayos de laboratorio, resultados mineralógicos y de micro fábrica de arcillas) debidamente sistematizados en bases de datos apropiadas y finalmente, de ser factible a la luz de los resultados obtenidos, establecer un patrón de comportamiento demostrable y el respectivo protocolo de estabilización química de suelos.

Se presentará como documento final o producto asociado al desarrollo de la fase, una base de datos interpretada a la luz de los diferentes ensayos realizados (con las correspondientes concentraciones de estabilizante químico).

6.2. TIPO DE ESTUDIO

El estudio descriptivo está presente en el desarrollo del proyecto de investigación ya que se desarrollarán algunas actividades que apuntan a describir de modo sistemático las características de un área de interés como lo es caracterizar un talud, por ejemplo:

La **fase de diagnóstico** contempla todas las actividades asociadas a la recopilación de información diagnóstica de tipo secundario existente de la zona (talud) objeto de estudio y la caracterización detallada de campo atinente a las condiciones físicas, químicas y mecánicas de los materiales que compone el talud.

El producto final de la actividad será un documento síntesis de las condiciones diagnósticas de los objetos de estudio a evaluar durante el proyecto investigativo y la correspondiente ficha técnica de identificación, parametrización y especialización.

6.3. METODOLOGÍA ESPECÍFICA AL DESARROLLO DE ACTIVIDADES DE LABORATORIO

La estabilización química consiste en alterar las propiedades del suelo usando cierto aditivo, el cual mezclado con el suelo, normalmente produce un cambio en las propiedades moleculares superficiales de las partículas del suelo y en algunos casos, une estas partículas entre sí de modo que se pueda producir un incremento en la resistencia del suelo.

Esta metodología consiste en seleccionar el aditivo más adecuado para el tipo de suelo a tratar, en este caso cenizas volcánicas; debido a que todos los suelos de la región de Risaralda en general pertenecen a esta categoría.

Por tal motivo se realizaron ensayos previos que pudieran identificar que se trataba de un suelo arcilloso proveniente de cenizas volcánicas.

Para determinar tales características se procedió así:

- a) Se elige el talud que cumple con las características físicas y geográficas que se requieren para llevar a cabo la investigación.

- b) Se realizan muestras de perforación con barrenos helicoidales y de esta manera se obtienen muestras inalteradas que permiten determinar las características del suelo.



Figura 2 Procedimiento de laboratorio para la obtención del Límite Líquido



Figura 3 Procedimiento de laboratorio para la obtención del límite Plástico (Límites de Atterberg)

- c) Estas muestras se llevan al laboratorio donde se les realizan ensayos de granulometría, límites de atterberg y compresión inconfiada.



Figura 4 Equipos utilizado para ensayo de compresión inconfiada



Figura 5 ensayo de compresión inconfiada de cilindros preparados con diferentes aditivos químicos



Figura 6 Toma de muestras inalteradas del talud cancelés



Figura 7 Preparación de muestras inalteradas para la obtención de resultados mediante pruebas de laboratorio

- d) Luego de identificar el tipo de suelo se hacen investigaciones de los posibles aditivos a utilizar para este suelo y seguido de ello se procede a seleccionar 2 aditivos tales como cal y silicato de sodio, dicha conclusión se determinó gracias a investigaciones en diferentes investigaciones y antecedentes encontrados.

Ejemplo de ello, estos cuadros de recomendación de estabilización según el tipo de suelo y con el aporte de A. Johnson quien incluye otros estabilizadores químicos y a su vez establece las recomendaciones no sólo con base al tipo de suelo, sino que además de acuerdo al propósito buscado con la estabilización.

Tabla 1 Recomendación del método de estabilización según el tipo de suelo

TIPOS DE SUELO	MÉTODO DE ESTABILIZACIÓN MÁS EFECTIVO
Suelos granulares gruesos	Mezcla mecánica de suelos, asfaltos-Suelo-cemento, ceniza de cal aérea
Suelos granulares finos	Mezcla mecánica, estabilización de cemento portland, ceniza de cal aérea, suelo - asfaltos, cloruros
Las arcillas de baja plasticidad	Compactación, estabilización de cemento Portland, impermeabilizantes químicos, cal
Las arcillas de alta plasticidad	La estabilización con cal

De acuerdo a estos datos se investigó y se identificó que la estabilización con cal permite la reducción de límite líquido y el índice plástico, de tal manera que los cambios volumétricos también se disminuyan, así mismo produce reacciones químicas como intercambio catiónico, reacciones puzolánicas, incrementa la manejabilidad y permeabilidad, mejora las propiedades de resistencia, incrementa el límite de contracción y disminuye el índice plástico al igual que el límite líquido.

Por otra parte, según el artículo **ESTABILIZACION DE SUELOS CON CLORURO DE SODIO PARA SU USO EN LAS VÍAS TERRESTRES** “el silicato de sodio pertenece al grupo de compuestos químicos que poseen un amplio intervalo en sus propiedades físicas y químicas. Se ha empleado como adhesivo, cementante, catalizador etc. Por lo tanto el silicato de sodio se puede utilizar para trabajos de estabilización de suelos cuando se tiene la presencia de sales de calcio diluidas en agua, pues esto origina silicatos gelatinosos de calcio insolubles, los cuales al hidratarse producen un magnífico agente cementante”¹⁵.

¹⁵ GARNICA A, Paul. GÓMEZ L, José Antonio. OBIL V, Edda Yhaaraby. PÉREZ S, Alfonso. Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres. Sanfandila, Queretaro – México, 2002. 55 p. Secretaría de comunicaciones y transportes. Instituto Mexicano del transporte. Publicación Técnica N° 201.

El efecto de la adición de un silicato, a cierto tipo de suelos, ha sido el de incrementar la permanencia del agua de compactación, aumentar la resistencia al disgregado, abatir el índice plástico y la expansión. Algunas evidencias indican que en la reacción del silicato de sodio con el suelo se presenta un intercambio aniónico, dando como resultado la formación de corazas de silicatos insolubles alrededor de las partículas de suelo, aunado a la acción cementante entre las partículas desuelo y el estabilizante.

Los suelos finos, en general pueden ser estabilizados con 3% a 4% de cal u otro químico con base al peso del suelo seco. Estas cantidades mínimas corresponden además a la cantidad de cal necesaria para poder ser esparcida y mezclada uniformemente en suelos cohesivos.

- e) A partir de esta recomendación y utilizando como soporte este tipo de documentos se tomó la decisión de trabajar con diferentes porcentajes de agua y de químico (Cal, Silicato de Sodio).
- f) Previamente se diseñó un miniproctor modificado para realizar todas las probetas necesarias en este proceso, Cabe resaltar y como nota aclaratoria, que todos estos datos, medidas, porcentajes, golpes por capas etc. Fueron obtenidas gracias a la información suministrada por un profesional de Corasfaltos, quien por medio de un programa de propiedad exclusiva de la empresa, adelantaba una investigación con este tipo de aditivos en busca del mejoramiento de la resistencia del suelo.

Generando así una mayor comodidad y capacidad de manipulación de las mismas. Este equipo se calculó y se fabricó con las medidas exactas del proctor modificado pero a una escala menor lo cual reemplazaría el proctor tradicional y permitiría de una manera más fácil y rápida llevar a cabo esta investigación.



Figura 8 Miniproctor Modificado



Figura 9 Armado de cilindros para el ensayo de compresión inconfiada mediante miniproctor

- g) Con el fin de obtener una mejor reacción del aditivo sobre el suelo se decide dejar 7 días de curado en virtud de que el tiempo no podría ser mayor o menor a este, pues la prueba presentaba fisuras o simplemente no se consolidaba para realizar el ensayo de resistencia. Contando con que permanecía completamente envuelta en papel aluminio y llevada a una bolsa hermética para conservar su humedad después de que esta fuera fabricada y antes de ser ensayada o de realizarle la prueba de compresión inconfiada en la que basados en la norma I.N.V. E – 152 – 07 COMPRESIÓN INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS se determinaría que tipo de consistencia generaría al suelo luego de aplicar los aditivos químicos.

Sabiendo que esta investigación sería desarrollada con 2 aditivos químicos (silicato de sodio y cal) se empieza eligiendo uno de los dos para desarrollar las pruebas inicialmente, en caso de que uno de ellos no sirviera, automáticamente se excluiría y se pasaría a trabajar con el siguiente químico. Así que se inició con el silicato de sodio y estos serían los resultados arrojados.

- h) Las primeras muestras se empezaron con diferentes porcentajes de agua y químicos tales como 20% de agua y 2% de silicato, estas fueron mezcladas posteriormente antes de armar la probeta.



Figura 10 Recuperación de cilindros del miniproctor modificado

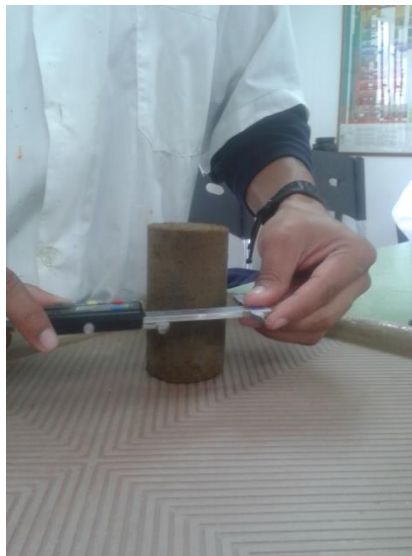


Figura 11 Preparación de muestras alteradas para toma de resultados mediante pesos unitarios y compresión inconfiada

- i) Luego se arma la probeta en el miniproctor, la cual cuenta con 5 capas respectivamente donde se realizan 182 golpes por cada una.

- j) Inmediatamente se extrae la probeta y se prepara para ser ensayada, pero previo a esto se toman las dimensiones y pesos correspondientes.
- k) Después se lleva al equipo de compresión inconfiada para ser ensayada. Se comienza a aplicar carga axial hasta que la probeta se fracture.
- l) Después se retira y se extrae una parte de muestra para tomar pesos húmedos junto con los pesos de las taras respectivas. Por último estas muestras se llevan al horno donde reposan durante un periodo de 24 horas y luego se extraen para tomar su peso seco.
- m) Estos procedimientos de ensayo – error se repiten una y otra vez durante un tiempo determinado, hasta lograr identificar el umbral que permite descartar porcentajes tanto de agua como de químico que sirven para generar los resultados esperados.
- n) A medida que se llevan a cabo estos ensayos, el umbral fue cerrándose de tal manera que sólo quedan porcentajes realmente significativos para la investigación y que arrojan el mejor resultado de resistencia para este tipo de suelo y que están muy próximo al valor real de los parámetros obtenidos de las cenizas volcánicas del talud inicialmente parametrizado.
- o) Por último, todos los datos obtenidos en el laboratorio se registran en libretas de notas y seguido de ello se registran en cuadros de Excel lo que permite por medio de gráficas y cuadros resumen identificar e interpretar todos y cada uno de los resultados obtenidos en el laboratorio de suelos, para de esta manera concluir si es necesario incrementar o disminuir los porcentajes tanto de agua como de químico y dar por finalizada esta labor experimental.

7. MARCO REFERENCIAL

Dentro del marco teórico se pretende mencionar algunos conceptos teóricos que permitirán fortalecer y profundizar el conocimiento acerca de elementos relacionados con estabilización química de taludes y suelos.

7.1 MARCO TEÓRICO

La estabilización de taludes es la teoría que estudia la estabilidad o posible inestabilidad de un talud a la hora de realizar un proyecto, o llevar a cabo una obra de construcción de ingeniería civil, siendo un aspecto directamente relacionado con la geotecnia. La inestabilidad de un talud, se puede producir por un desnivel, que tiene lugar por diversas razones:

- Razones geológicas: laderas posiblemente inestables, orografía acusada, estratificación, meteorización, etc.
- Variación del nivel freático: situaciones estacionales, u obras realizadas por el hombre.
- Obras de ingeniería: rellenos o excavaciones tanto de obra civil, como de minería.

Los taludes además serán estables dependiendo de la resistencia del material del que estén compuestos, los empujes a los que son sometidos o las discontinuidades que presenten. Los taludes pueden ser de roca o de tierras.

La estabilización química de taludes es una tecnología que se basa en la aplicación de un producto químico, genéricamente denominado *estabilizador químico*, el cual se debe mezclarse íntima y homogéneamente con el talud a tratar de acuerdo a especificaciones técnicas propias del producto.

La aplicación de un estabilizador químico tiene como objetivo principal transferir al suelo tratado, en un espesor definido, ciertas propiedades tendientes a mejorar su comportamiento.

De manera genérica, la gran mayoría de autores que han abordado la problemática geotécnica de los suelos alofánicos (suelos derivados de las cenizas volcánicas), han coincidido en las enormes dificultades que su estudio conlleva debido no sólo a sus particularidades físico-mecánicas, sino también a las complejidades que representan sus cambios drásticos e irreversibles en condiciones de secado. Es aceptada la condición plástica de estos materiales en estado húmedo y la condición de suelo arenoso en estado seco.

Ahora bien, J. Suárez (1998), “afirma que la meteorización de rocas y cenizas volcánicas conducen a la formación de montmorillonita, óxidos de hierro y aluminio en las etapas iniciales de la meteorización, y finalmente se pueden formar caolinitas, esmectitas y gibsitas”¹⁶. Tal secuencia de alteración permite inferir, asumiendo lo que J. Suárez (1998) cita de Lohnes y Demirel (1973): “...a medida que el proceso de meteorización continúa los contenidos de caolinita disminuyen y se alteran los demás compuestos a Fe_2O_3 y Al_2O_3 . Existen investigaciones que demuestran la disminución de los contenidos de caolinita, con el aumento del promedio anual de lluvias...”¹⁷, que a medida que se incrementan los contenidos de caolinita en el suelo, se incrementa la resistencia al cortante, y consecuentemente la estabilidad de las superficies inclinadas.

Tal premisa se fundamenta en las propiedades físico-mecánicas de la caolinita, la montmorillonita y la de los sesquióxidos (óxidos de hierro y aluminio), presentes en un suelo, en donde se acepta, según J. Suárez (1998) que la caolinita presenta un comportamiento normal en los ensayos, en términos de baja a media plasticidad y permeabilidad; mientras que la montmorillonita y halloysita disminuyen la resistencia al corte a medida que se incrementa la humedad.

La estabilización química de suelos ha tenido mayor grado de aplicación en vías, debido a la gran utilidad que este método presenta en el mejoramiento de las condiciones de resistencia de los suelos y de las superficies de rodamiento.

Entre algunos aditivos químicos se encuentran:

7.1.1. ESTABILIZACIÓN CON CLORURO DE SODIO

Según M. Araya (2010) “El principal uso de la sal es como matapolvo en bases y superficies de rodamiento para tránsito ligero. También se utiliza en zonas muy secas para evitar la rápida evaporación del agua de compactación”¹⁸.

La sal común es un producto higroscópico; es decir, es capaz de absorber la humedad del aire y de los materiales que le rodean, de ahí que sea un efectivo matapolvo al mantener la capa con un alto contenido de humedad. Se puede utilizar en forma de salmuera o triturada. La dosificación es de 150grs/m² por cada centímetro de espesor de la capa estabilizada contando con un máximo de 8cms.

¹⁶ SUAREZ D, Jaime. Capítulo 6 Suelos residuales, Proceso de Meteorización. En: Deslizamientos y estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. 1 ed. Bucaramanga: Ingeniería de Suelos Ltda, 1998. p.185-229.

¹⁷ LOHNES. y DEMIREL. Capítulo 6 Suelos residuales, Proceso de Meteorización. En: SUAREZ D, Jaime. Deslizamientos y estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. 1 ed. Bucaramanga: Ingeniería de Suelos Ltda, 1998. p.185-229.

¹⁸ ARAYA D, María Loreto. Análisis comparativo para ejecución de estabilización de suelos, entre procesos tradicionales y el estabilizador de suelos soiltac. Tesis de grado (Ingeniero Constructor). Valdivia – Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela de construcción Civil. 2010. 98 p

Para mezclar es más adecuado el uso de rastras con discos rotatorios. La compactación se puede iniciar en cualquier momento luego de perfilada la superficie con el equipo adecuado al tipo de suelo. Cuando se observe que se ha perdido la sal por efecto del tránsito o las lluvias, la superficie debe rociarse con 450grs de sal por cada metro cuadrado.

El cloruro de sodio se produce mediante 3 métodos. El más antiguo consiste en el empleo del calor solar para producir la evaporación del agua salada, con lo que se obtienen los residuos de sal. Otro método consiste en la extracción directa de las minas de sal y el método más reciente consiste en la evaporación del agua de mar mediante el empleo de hornos.

El cloruro de sodio se presenta en forma de cristales, fácilmente solubles en agua, los cuales son higroscópicos y se les consigue en el mercado constituyendo cristales grandes o polvo fino y con diferentes grados de pureza (la ASTM y la AASHTO han fijado especificaciones al respecto).

En lo que respecta a la estabilización de suelos con Cloruro de Sodio se ha discutido mucho en lo concerniente al cambio en el peso volumétrico de una arcilla con la adición de esta sal, pues mientras algunos investigadores aseguran un pequeño incremento, otros no han encontrado tal cosa; pero en lo que si parece existir un común acuerdo, es en que la adición de sal hace que se disminuya la humedad óptima. Se admite teóricamente que el cloruro de sodio ocasiona que la arcilla se estructure en forma dispersa, produciéndose así un acercamiento entre las partículas y en consecuencia un mayor peso volumétrico, pero en la práctica este criterio no se ha verificado en todos los casos, por lo que no se debe generalizar.

Al agregar la sal se considera que se reduce la evaporación del agua debido al incremento en la tensión superficial. Sin embargo, cuando la aportación de agua a la superficie expuesta es menor que la evaporación, la superficie se empieza a secar y el cloruro de sodio se cristaliza en la superficie y en los vacíos, lo que puede ayudar a formar una barrera que impedirá posteriores evaporaciones.

De lo anterior se deduce que es de suma importancia tener conocimiento de la reacción íntima entre la sal y el suelo, así como la permanencia a través del tiempo de la estabilización lograda y sus efectos colaterales que causarían, en algunos elementos de la estructura del camino.

Se tiene que se ha logrado mayor efectividad y durabilidad de los efectos de la sal a medida que el límite líquido es más alto. Según lo manifiestan algunos investigadores, la adición de sal en una arcilla produce un decremento en la contracción volumétrica o lineal y estos cambios físicos, la formación de costra superficial y la reducción de la variación en la humedad, mantienen más unidas las

partículas no arcillosas y cuando estas se encuentran en la superficie, se desprenden con menor facilidad cuando sufren los ataques abrasivos del tránsito. Las técnicas empleadas para la incorporación de sal a un suelo, son generalmente las mismas empleadas en otros tipos de aditivos y varían desde la sofisticada mezcla en plantas con alto grado de control, hasta la simple mezcla en el lugar realizada con el equipo tradicional en la construcción de pavimentos.

7.1.1.1. Comportamiento de suelos estabilizados con cloruro de sodio

Pocos son los trabajos publicados que presentan en detalle el comportamiento esfuerzo-deformación de suelos estabilizados con cloruro de sodio. Existen varios autores que han estudiado el efecto del cloruro de sodio en las propiedades de los suelos, principalmente en las propiedades físicas y entre las principales observaciones podemos citar las siguientes:

El peso volumétrico seco y la resistencia a la compresión se incrementan al adicionar cloruro de sodio hasta en un 3%.

El límite líquido y el índice plástico se reducen al adicionar cloruro de sodio (Ogawa et al, 1963).¹⁹

La cohesión y el ángulo de fricción interna parecen disminuir al adicionar cloruro de sodio y en especímenes en los que no se permita la pérdida de humedad. Parece que si se permite el secado antes de ensayar los especímenes tanto la cohesión como el ángulo de fricción aumentan de manera importante (Ogura & Uto, 1963).

Las partículas de roca caliza parecen ser solubles a soluciones de cloruro de sodio (Wood, 1969).

La capacidad de retención de humedad aumenta en los suelos tratados con cloruro de sodio (Marks et al 1970).

7.1.2. ESTABILIZACIÓN CON CLORURO DE CALCIO

Este producto trabaja de forma similar a la sal común, su costo es mayor, pero se prefiere debido al efecto oxidante del cloruro de sodio. En todo caso, el cloruro de calcio ayuda al proceso de compactación y contribuye con la resistencia del suelo, previene el desmoronamiento de la superficie y reduce el polvo.

¹⁹ GARNICA A, Paul. GÓMEZ L, José Antonio. OBIL V, Edda Yhaaraby. PÉREZ S, Alfonso. Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres. Sanfandila, Queretaro – México, 2002. 55 p. Secretaría de comunicaciones y transportes. Instituto Mexicano del transporte. Publicación Técnica N° 201.

Se puede utilizar de dos formas:

- En granos regulares o Tipo I
- En hojuelas o pelotillas o Tipo II

La dosificación es de 7 a 10 libras del tipo I o de 5.6 a 8 libras del Tipo II por tonelada de suelo. El mezclado, compactación y terminación es similar al de la estabilización con cloruro de sodio.

En la revista Iberoamericana de Polímeros: POLÍMEROS PARA LA ESTABILIZACIÓN VOLUMÉTRICA DE ARCILLAS EXPANSIVAS,²⁰ se hace referencia a que las arcillas expansivas sufren cambios de volumen debido a las variaciones en su humedad, adquirida por capilaridad y/o por infiltración.

Cualquier construcción ligera asentada sobre este tipo de suelos experimentará deformaciones causadas por la expansión de la arcilla, dichos movimientos se traducen en grietas sobre muros y el levantamiento de pisos. Por lo anterior, se han propuesto diferentes soluciones para reducir el cambio volumétrico de las arcillas; algunos métodos modifican las características físico-químicas de las arcillas, agregando diferentes materiales que estabilizan el volumen de las mismas, tal es el caso de la cal, cemento hidráulico, fosfatos, sales de aluminio y recientemente, los polímeros.

Soportan en su investigación que mediante el uso de un poliuretano, que comúnmente se aplica para sellado de grietas en la construcción, se reducen las deformaciones del suelo por aplicación de cargas. Dicho polímero se aplica en la estabilización de cambios volumétricos de suelos expansivos. Consideraron muestras remoldeadas de suelo natural y suelo tratado con polímero; en ambas muestras se determinaron propiedades índices, compactación, resistencia al esfuerzo cortante, expansión y consolidación; pruebas que determinaron si es factible la utilización de dicho polímero. El resultado más significativo en esta investigación es el que se refiere a la expansión. Las pruebas muestran que la mezclas suelo-polímero reducen la expansión en, aproximadamente, el 40%, respecto a la del suelo natural.

El Cloruro de Calcio es un producto químico que durante años se ha utilizado en la estabilización de caminos.

Una de las propiedades que tiene el Cloruro de Calcio es la de absorber agua de la atmosfera y retenerla; al aplicarse sobre el camino, lo mantiene húmedo,

²⁰ CASTAÑO M, Víctor Manuel; CORONADO M, Aleyda; HERNÁNDEZ Z, Juan Bosco; HORTA R, Jaime; LÓPEZ L, Teresa. REVISTA IBEROAMERICANA DE POLÍMEROS. Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. Querétaro – México. Volumen 11(3), Mayo 2010.

aprovechando la humedad y el tránsito de vehículos, se mejoran las condiciones para la compactación, obteniéndose una mayor estabilidad del camino.

La humedad que proporciona el cloruro de Calcio al material fino, actúa como lubricante, haciendo que tenga mejor acomodo durante la acción del tránsito y el camino se va compactando más a medida que el tiempo pasa; de esta forma el material fino conservado por humedad, trabaja como cementante sobre los materiales gruesos.

La dosificación de Cloruro de Calcio sobre un camino dependerá de tres condiciones básicas que son: Las climatológicas, la frecuencia y tipo de vehículos que lo van a transitar y la composición granulométrica del material. La dosificación puede variar desde 0.9 a 1.5 Kg/M² dependiendo de las condiciones anteriores.

Para la aplicación se puede hacer por dos métodos manual o mecánicos. Para el manual, se colocan los sacos sobre un área previamente determinada de acuerdo a la dosificación y esparcirlo con pala sobre la superficie del camino, lo más uniforme posible. Para la forma mecánica puede realizarse por medio de una tolva esparcidora o camión de volteo con tapa de sello.

Se recomienda usarlo: en caminos revestidos, en bases y sub-bases, estacionamientos, desviaciones, etc.

7.1.3. ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO PORTLAND: SUELO – CEMENTO

La estabilización de suelo con cemento portland, es la más ampliamente usada en el mundo. Es muy sencilla de hacer y no se necesita equipo especial de construcción.

Consiste en una mezcla de suelo, cemento y agua, compactada y curada durante el endurecimiento. Generalmente al mezclar entre un 5 y 15% de cemento se obtiene un material endurecido con alta rigidez y resistencia mecánica, prácticamente insensible al agua y durable.

En la mezcla se pueden emplear todos los suelos, excepto: muy plásticos, con contenidos altos de materia orgánica y con sales nocivas para el cemento.

Tiene algunas aplicaciones para pavimentos como: Capa del paquete estructural del pavimento o Capa de rodamiento en caminos rurales.

El procedimiento de construcción consta de las fases siguientes:

- Pulverización o desgrumado.
- Mezclado de cemento y agua.
- Compactación.

- Curado de unos 7 días.

7.1.4. ESTABILIZACIÓN CON ÓXIDO DE CALCIO (CAL): SUELO – CAL

La cal es el único producto capaz de proveer una variedad de beneficios, puede ser utilizada en suelos inestables para secar, modificar y estabilizar.

El uso de cal para mejorar suelos con mayor plasticidad, aparte de conseguir ese fin, aumenta también su resistencia a la compresión con el tiempo, produciendo una textura granular más abierta, la cal es utilizada para estabilizar y fortalecer las sub-bases y bases debajo del pavimento, presenta durabilidad a largo tiempo en muy adversas condiciones, crea una barrera resistente al agua, presenta reducción del índice de plasticidad, reduce las características de expansión y agrietamientos, Cuando se agregan las cantidades adecuadas de cal y agua el pH del suelo rápidamente se incrementa siendo favorable para la formación de silicatos y aluminatos de calcio, incrementa substancialmente la capacidad de carga.

La cantidad de cal es de un 2 a 8% en peso. Para que el óxido de calcio reaccione convenientemente se necesita que el suelo tenga minerales arcillosos, o sea sílice y alúmina.

El suelo-cemento adquiere su resistencia rápidamente, ya que solo se necesita que el cemento se hidrate adecuadamente. En cambio el suelo-cal, necesita la reacción química de los iones de calcio y los minerales arcillosos, que lentamente adquieren resistencia.

Cuando las cantidades de cal y agua son agregadas adecuadamente, el pH del suelo rápidamente incrementa arriba del 10.5, siendo favorable para la formación de hidratos cálcicos de sílice y alúmina. Estos compuestos forman una matriz que contribuye a la resistencia del suelo. A como se forma esta matriz o estructura, el suelo es transformado de su alta expansividad, de un estado natural indesable a más granular, a un material relativamente impermeable que puede ser compactado en una superficie con una capacidad de soporte de carga. La controlada reacción puzolánica crea un material que es permanente, durable, resistente a los agrietamientos y significativamente impermeable. La capa estructural que se forma es fuerte y flexible.

El uso de la cal es esencial para el tratamiento de suelos arcillosos durante la reacción con la sílice y alúmina disponible en los suelos, se forma una estructura de materiales cementantes (El efecto puzolánico).

El éxito de la estabilización con cal, no solo para disminuir plasticidad, sino para adquirir resistencia, es el tipo de suelo o el tipo de mineral arcilloso que contenga.

Por lo general, las arenas no reaccionan favorablemente con la cal y no pueden estabilizarse con ella.

7.1.4.1. Ventajas y Desventajas de usar cal viva.

Ventajas:

- Es más económico su traslado en un 25% por la cantidad disponible de CaO
- La densidad es igual a la unidad por lo tanto su almacenamiento requiere menor volumen para silos.
- Reacción más rápida de secado.
- Extiende las temporadas de construcción (exceso de humedad o lluvia, por temporadas).

Desventajas:

- La hidratación en campo requiere un cuidado especial.
- Problemas de seguridad en su aplicación.

7.1.5. ESTABILIZACIÓN CON ASFALTO: SUELO – ASFALTO

En algunos casos conviene estabilizar un material usando algún producto asfáltico para elaborar capas base o sub-base. A esta base asfáltica también se le conoce como base negra. El uso de productos asfálticos está limitado a suelos granulares o de partículas gruesas. Es muy difícil estabilizar un material arcilloso, por los grumos de esos suelos.

La estabilización con asfalto puede tener dos fines:

Reducir la absorción de agua del material, usando poca cantidad de asfalto

Incrementar la resistencia de un material usando mayor cantidad de asfalto, como en la base asfáltica.

7.1.6. ESTABILIZACIÓN CON: CON – AID

CON-AID es un complejo compuesto químico fabricado específicamente para estabilizar el suelo y mejorar la construcción vial. Se utilizan tanto en caminos naturales como en capas estructurales de cemento o pavimento.

Su rango de utilización abarca todos los suelos arcillosos o los que al menos contengan un 5% de arcilla.

CON-AID cambia la naturaleza de las propiedades de adsorción de agua de los suelos de hidrofílica a hidrofóbica, especialmente de las partículas de mineral de arcilla.

Usos

- Consolidación de caminos naturales
- Estabilización de suelos para sub - rasantes, sub bases y bases de pavimentos
- Rehabilitación de pavimentos con fallas en su estructura
- Terraplenes y rellenos
- Pistas de aeródromos
- Caminos de explotaciones mineras, petroleras y forestales

Beneficios Generales

- Menor costo de construcción y necesidad de materiales
- Mínimo acarreo y manipulado
- Reducción de mantenimiento
- Importante ahorro en movimientos de suelo
- Reduce el desprendimiento de polvo
- Permite su posterior pavimentación
- No tóxico - No afecta las personas ni el medio ambiente

- Reduce el índice plástico del suelo
- Aumento notable en la rapidez de secado luego de las lluvias
- Disminuye el hinchamiento de la vía
- La lluvia no afecta el material en proceso de construcción

7.2. FORMACIÓN O CONSTITUCIÓN DE CENIZAS VOLCÁNICAS.²¹

La ceniza volcánica es una composición de partículas de roca y mineral muy finas (de menos de 2 milímetros de diámetro) eyectadas por una apertura volcánica.

En el contexto de la vulcanología la palabra ceniza está restringida a partículas de roca y minerales de un diámetro menor a 2 mm que son expulsadas de una apertura volcánica. A diferencia de la ceniza se denomina material piro clástico o tefra a cualquier material expulsado de manera explosiva de una apertura volcánica sin importar el tamaño.

Los suelos de ceniza volcánica comprenden el 0,84% de la superficie terrestre sobre el nivel del mar o 124.000 ha. Los suelos de ceniza se distribuyen únicamente en zonas de volcanes activos o recientemente extintos. 60% de los suelos de ceniza se haya en países tropicales. A pesar de cubrir solo una pequeña parte de la superficie terrestre los suelos de ceniza son un importante recurso debido a la gran cantidad de población que vive sobre estos suelos.

La ceniza volcánica se origina a partir de erupciones habiendo tres formas básicas de formación; magmática, freatomagmática/hidrovolcánica y freáticas. Varias de estas maneras de formación de cenizas pueden ocurrir durante una sola erupción. En las erupciones o fases de erupciones magmáticas la liberación de gases en un magma producto de descompresión cuando el magma se aproxima a la superficie terrestre.

En las erupciones freatomagmáticas el magma entra en contacto con agua subterránea o algún otro cuerpo de agua (incluyendo hielo y nieve) produciéndose un enfriamiento y fragmentación explosiva del magma.

Existen tres mecanismos de formación de la ceniza volcánica:

- Liberación súbita de gases atrapados que al descomprimirse provocan erupciones magmáticas.

²¹ HERRERA, M C. LIZCANO, A. SANTAMARINA, J C. REVISTA. INT. DE DESASTRES NATURALES, ACCIDENTES E INFRAESTRUCTURA CIVIL. Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. Bogotá – Colombia. Volumen 6(2), Febrero de 2006.

- Contracción térmica debida a erupciones en agua o hielo.
- Eyección de partículas arrastradas durante las erupciones de vapor causando erupciones freáticas.

La naturaleza violenta de las erupciones volcánicas envueltas en vapor da como resultado que el magma y la roca circundante estallen reduciendo el tamaño del polvo resultante al de micras.

7.2.1. COMPOSICIÓN DE LA CENIZA VOLCÁNICA

La ceniza se genera a partir de la roca cuarteada y separada en partículas diminutas durante un episodio de actividad volcánica explosiva. La naturaleza normalmente violenta de una erupción, incluyendo chorros de vapor de agua (erupción freática), produce como resultado una gran cantidad de magma y tal vez roca sólida que rodea el viento volcánico, torneando las partículas hasta reducirlas al tamaño de granos de arena.

7.2.2. FORMACION DE SUELOS DE CENIZAS VOLCANICAS EN COLOMBIA

De acuerdo a (Lizcano et al. 2006)²² los suelos de cenizas volcánicas representan aproximadamente el 0,84% de los suelos a nivel global y se localizan predominantemente en regiones tropicales (Quantin, 1986; Shoji et al., 1993). Los depósitos de suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia ocupan cerca del 11,6% del territorio y se localizan en regiones de importante crecimiento demográfico y económico. Estos suelos se extienden desde el Eje Cafetero (departamentos de Antioquia, Caldas, Risaralda y Quindío) en el centro del país, hasta los departamentos de Tolima, Cauca y Nariño hacia el sur oeste del mismo. En regiones del oriente de Colombia, como Bogotá y los Llanos Orientales, se han encontrado depósitos de estos suelos, distribuidos aleatoriamente, sin que presenten un patrón definido.

Éste proceso inicia con la generación de una nube de piroclastos durante la erupción volcánica, conformada por partículas de diámetro inferior a 2 mm, conocidas como cenizas volcánicas. En Colombia, las cenizas volcánicas que dieron origen a los suelos emanaron durante las erupciones del complejo de volcanes Ruiz-Tolima en el Holoceno y Pleistoceno (recientes 20.000 años) del período Cuaternario.

Las cenizas volcánicas son generadas a partir de la fragmentación del magma y de materiales en el cono del volcán provenientes de erupciones anteriores

²² HERRERA, M C. LIZCANO, A. SANTAMARINA, J C. REVISTA. INT. DE DESASTRES NATURALES, ACCIDENTES E INFRAESTRUCTURA CIVIL. Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. Bogotá – Colombia. Volumen 6(2), Febrero de 2006.

(Wohletz y Krinsley, 1982; Büttner et al., 1999). Tres mecanismos han sido identificados como los principales generadores de cenizas volcánicas: la ruptura del magma debido a vesiculación, la fragmentación del magma debido a los elevados esfuerzos térmicos y la pulverización de la lava en las paredes de la chimenea del volcán durante la erupción.

La morfología y textura de las cenizas volcánicas varía desde que son emanadas hasta su depositación. Las propiedades superficiales de las partículas depositadas dependen ampliamente de la abrasión que soportan durante su transporte. La distancia de transporte depende de características de las partículas que incluyen forma, esfericidad, rugosidad, superficie específica, composición química y carga electrostática (Riley et al., 2003)²³. Estas propiedades afectan la interacción entre partículas y consecuentemente determinan la separación o agregación de las mismas. La forma y superficie de las partículas afectan la velocidad de depositación y la distancia de viaje; a medida que se incrementa el área superficial se produce una mayor fuerza de dragado y consecuentemente aumenta la distancia al lugar de depositación. Adicionalmente, las partículas más finas (< 20 µm) pueden acercarse debido a la atracción electrostática generada por la presencia de fluidos o gases como el ácido sulfúrico. Este mecanismo explica la ocurrencia de partículas muy finas cerca de los volcanes, depositadas en forma de agregaciones (Gilbert et al., 1991).

²³ HERRERA, M C. LIZCANO, A. SANTAMARINA, J C. REVISTA. INT. DE DESASTRES NATURALES, ACCIDENTES E INFRAESTRUCTURA CIVIL. Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. Bogotá – Colombia. Volumen 6(2), Febrero de 2006.

8. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

El presente capítulo está conformado por la síntesis del proceso investigativo desarrollado, y en él se identifican y caracterizan tres (3) aspectos básicos de la investigación:

- a) La caracterización diagnóstica del talud del sector de Canceles (Pereira), haciendo énfasis en la descripción de los parámetros físico-mecánicos de los suelos derivados (cenizas volcánicas)
- b) La revisión del estado del arte teórico referido a aditivos químicos utilizados como instrumentos de mejoramiento de las propiedades de resistencia de los suelos, independiente de su aplicación. Cabe eso si precisar que la literatura en tal aspecto no diferencia el origen de los suelos y simplemente privilegia la textura de los mismos.
- c) Los resultados de los parámetros físicos y mecánicos obtenidos cuando a suelos derivados de cenizas volcánicas se les aplica dos (2) aditivos químicos en diferentes porcentajes y con niveles de humedad diferenciados

8.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN EL TALUD DEL SECTOR DE CANCELES.

El Talud del sector Canceles, se localiza sobre la zona sur-oriental del territorio municipal sobre la vía destapada que comunica al Cerro Canceles con la Avenida Circunvalar y el Barrio Villa Santana al sur-oriente del Municipio de Pereira. Dicho talud se encuentra en las siguientes coordenadas: 4°47'54.76" N y 75°40'28.73" W. El talud está compuesto de cenizas volcánicas y presenta en la actualidad una cobertura de pastos y rastrojo bajo. Las pendientes de la zona son suaves y el régimen pluviométrico está por encima de los 200 mm mensuales.



Figura 12 Localización Talud Canceles

Fuente: google earth



Figura 13 Detalle acceso Talud Canceles, municipio de Pereira

A continuación se presentan los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas en los suelos del Talud Canceles, a diferentes profundidades, los mismos que servirán de soporte para las comparaciones mediante la aplicación de aditivos químicos.

Tabla 2 Estimación contenidos de humedad natural a diferentes profundidades en Talud Canceles

TALUD CANCELES CONTENIDO DE HUMEDAD NATURALES								
MUEST	PROF	TARA #	PESO TARA (gr)	SUELO HUM + TARA (gr)	PESO SECO + TARA gr	PESO HUMEDO (Wh)	PESO SECO (Ws)	ω %
1	1,2	1	63,4	141,6	110,1	78,2	46,7	167,5
3	3,2	2	56,9	181,5	136,9	124,6	80	155,8
5	5,2	3	62,2	162	128,3	99,8	66,1	151,0
7	7,2	4	58	221,7	166,6	163,7	108,6	150,7

Se pudo comprobar que los contenidos de humedad de los suelos derivados de cenizas volcánicas en el sector de Canceles son altos, decreciendo los mismos a medida que se profundiza en el perfil. Tal característica coincide con los regímenes de lluvia de la zona, que están por encima de otros sitios de la ciudad.

Tabla 3 Parametrización variables físicas y mecánicas cenizas volcánicas talud sector cancelos Probeta 1

PROBETA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm)	Lo (mm)	Lo (cm)
1	48,8	4,88	2,44	18,694	100,8	10,082

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	CALCULO DE ESFUERZO	ECUACION
$\epsilon = \Delta L/L_0$	$A = A_0/1 - \epsilon$	$\delta_c = P/A$	$Y = 0.3337 (X) - 6.8616$

DEFOR C (mm)	CARGA AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/L_0$ (cm)	Ao (cm)	COR AREA $A = A_0/1 - \epsilon$	DEFOR C (mm)	mm	conversión (cm)	ECUACION	P (Kg)	ESFUERZO $\delta_c = P/A$	COHESION $\delta_{cMax}/2$
10	8	1	10,08	0,09919	18,694	18,59	10	0,01	0,001	-4,192	-1,9055	-0,1025	
20	13	2		0,19837		18,50	20	0,02	0,002	-2,5235	-1,1470	-0,0620	
30	20	3		0,29756		18,40	30	0,03	0,003	-0,1876	-0,0853	-0,0046	
40	22	4		0,39675		18,30	40	0,04	0,004	0,4798	0,2181	0,0119	
50	28	5		0,49593		18,20	50	0,05	0,005	2,482	1,1282	0,0620	
60	31	6		0,59512		18,10	60	0,06	0,006	3,4831	1,5832	0,0875	
80	39	8		0,79349		17,90	80	0,08	0,008	6,1527	2,7967	0,1562	
100	49	10		0,99187		17,70	100	0,1	0,010	9,4897	4,3135	0,2437	
120	59	12		1,19024		17,50	120	0,12	0,012	12,8267	5,8303	0,3331	
140	70	14		1,38861		17,31	140	0,14	0,014	16,4974	7,4988	0,4333	
160	83	16		1,58699		17,11	160	0,16	0,016	20,8355	9,4707	0,5536	
180	90	18		1,78536		16,91	180	0,18	0,018	23,1714	10,5325	0,6229	0,3115
200	78	20		1,98373		16,71	200	0,2	0,020	19,167	8,7123	0,5214	
220	54	22		2,18211		16,51	220	0,22	0,022	11,1582	5,0719	0,3072	

Tabla 4 Parametrización variables físicas y mecánicas cenizas volcánicas talud sector cancelés Probeta 3

PROBETA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm)	Lo (mm)	Lo (cm)
3	48,3	4,83	2,415	18,313	98,97	9,897

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	CALCULO DE ESFUERZO	ECUACION
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1-\epsilon$	$\delta c = P/A$	$Y=0.3337 (X)-6.8616$

DEFOR C(mm)	CARG AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEFOR C (mm)	mm	convers (cm)	ECUACIO N	P (Kg)	ESFUERZO $\delta c = P/A$	COHESIO N $\delta c_{Max}/2$
10	4	1	9,90	0,101	18,31	18,21	10	0,01	0,001	-5,5268	-2,5122	-0,1379	
20	8	2		0,202		18,11	20	0,02	0,002	-4,192	-1,9055	-0,1052	
30	13	3		0,303		18,01	30	0,03	0,003	-2,5235	-1,1470	-0,0637	
40	20	4		0,404		17,91	40	0,04	0,004	-0,1876	-0,0853	-0,0048	
50	27	5		0,505		17,81	50	0,05	0,005	2,1483	0,9765	0,0548	
60	33	6		0,606		17,71	60	0,06	0,006	4,1505	1,8866	0,1065	
80	45	8		0,808		17,50	80	0,08	0,008	8,1549	3,7068	0,2118	
100	58	10		1,010		17,30	100	0,1	0,010	12,493	5,6786	0,3282	
120	68	12		1,212		17,10	120	0,12	0,012	15,83	7,1955	0,4208	
140	79	14		1,415		16,90	140	0,14	0,014	19,5007	8,8640	0,5245	
160	88	16		1,617		16,70	160	0,16	0,016	22,504	10,2291	0,6126	
180	97	18		1,819		16,49	180	0,18	0,018	25,5073	11,5942	0,7029	
200	105	20		2,021		16,29	200	0,2	0,020	28,1769	12,8077	0,7861	
220	113	22		2,223		16,09	220	0,22	0,022	30,8465	14,0211	0,8714	
240	118	24		2,425		15,89	240	0,24	0,024	32,515	14,7795	0,9302	
260	124	26		2,627		15,69	260	0,26	0,026	34,5172	15,6896	1,0002	
280	130	28		2,829		15,48	280	0,28	0,028	36,5194	16,5997	1,0721	

Tabla 4 Parametrización variables físicas y mecánicas cenizas volcánicas talud sector cancelos Probeta 3 (Continuación)

DEFOR C(mm)	CARG AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEFOR C (mm)	mm	convers (cm)	ECUACIO N	P (Kg)	ESFUERZO $\delta_c = P/A$	COHESIO N $\delta_{cMax}/2$
300	138	30		3,031		1528	300	0,3	0,030	39,189	17,8132	1,1656	
320	142	32		3,233		15,08	320	0,32	0,032	40,5238	18,4199	1,2215	
340	148	34		3,435		14,88	340	0,34	0,034	42,526	19,3300	1,2993	
360	152	36		3,637		14,68	360	0,36	0,036	43,8608	19,9367	1,3585	
380	157	38		3,840		14,47	380	0,38	0,038	45,5293	20,6951	1,4299	
400	159	40		4,042		14,27	400	0,4	0,040	46,1967	20,9985	1,4714	
420	161	42		4,244		14,07	420	0,42	0,042	46,8641	21,3019	1,5140	
440	168	44		4,446		13,87	440	0,44	0,044	49,2	22,3636	1,6127	
460	172	46		4,648		13,67	460	0,46	0,046	50,5348	22,9704	1,6809	
480	174	48		4,850		13,46	480	0,48	0,048	51,2022	23,2737	1,7287	
500	175	50		5,052		13,26	500	0,5	0,050	51,5359	23,4254	1,7665	
520	180	52		5,254		13,06	520	0,52	0,052	53,2044	24,1838	1,8519	
540	181	54		5,456		12,86	540	0,54	0,054	53,5381	24,3355	1,8928	
560	185	56		5,658		12,65	560	0,56	0,056	54,8729	24,9422	1,9710	
580	188	58		5,860		12,45	580	0,58	0,058	55,874	25,3973	2,0395	
600	190	60		6,062		12,25	600	0,6	0,060	56,5414	25,7006	2,0979	
620	193	62		6,265		12,05	620	0,62	0,062	57,5425	26,1557	2,1708	
640	195	64		6,467		11,85	640	0,64	0,064	58,2099	26,4590	2,2335	
660	198	66		6,669		11,64	660	0,66	0,066	59,211	26,9141	2,3113	
680	200	68		6,871		11,44	680	0,68	0,068	59,8784	27,2175	2,3786	
700	202	70		7,073		11,24	700	0,7	0,070	60,5458	27,5208	2,4484	
720	202	72		7,275		11,04	720	0,72	0,072	60,5458	27,5208	2,4932	
740	205	74		7,477		10,84	740	0,74	0,074	61,5469	27,9759	2,5817	
760	209	76		7,679		10,63	760	0,76	0,076	62,8817	28,5826	2,6878	
780	209	78		7,881		10,43	780	0,78	0,078	62,8817	28,5826	2,7399	
800	210	80		8,083		10,23	800	0,8	0,080	63,2154	28,7343	2,8088	
820	213	82		8,285		10,03	820	0,82	0,082	64,2165	29,1893	2,9108	

Tabla 4 Parametrización variables físicas y mecánicas cenizas volcánicas talud sector cancelés Probeta 3 (Continuación)

DEFOR C(mm)	CARG AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEFOR C (mm)	mm	convers (cm)	ECUACIO N	P (Kg)	ESFUERZO $\delta_c = P/A$	COHESIO N $\delta_{cMax}/2$
840	214	84		8,487		9,83	840	0,84	0,084	64,5502	29,3410	2,9861	
860	213	86		8,690		9,62	860	0,86	0,086	64,2165	29,1893	3,0331	1,5165
880	208	88		8,892		9,42	880	0,88	0,088	62,548	28,4309	3,0176	

Tabla 5 Parametrización variables físicas y mecánicas cenizas volcánicas talud sector cancelés Probeta 5

PROBETA	ϕ (mm)	ϕ (cm)	r (cm)	A (cm)	Lo (mm)	Lo (cm)
5	48,6	4,861	2,4305	18,558	101,55	10,155

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	CALCULO DE ESFUERZO	ECUACION
$\epsilon = \Delta L / L_0$	$A = A_0 / (1 - \epsilon)$	$\delta c = P / A$	$Y = 0.3337 (X) - 6.8616$

DEFOR C (mm)	CARGA AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L / L_0$ (cm)	Ao (cm)	COR AREA $A = A_0 / (1 - \epsilon)$	DEFOR C (mm)	Mm	convers (cm)	ECUACION	P (Kg)	ESFUERZ O $\delta c = P / A$	COHESION $\delta c_{Max} / 2$
10	4	1	10,16	0,098	18,558	18,46	10	0,01	0,001	-5,5268	-2,5122	-0,1361	
20	10	2		0,197		18,36	20	0,02	0,002	-3,5246	-1,6021	-0,0873	
30	16	3		0,295		18,26	30	0,03	0,003	-1,5224	-0,6920	-0,0379	
40	23	4		0,394		18,16	40	0,04	0,004	0,8135	0,3698	0,0204	
50	29	5		0,492		18,07	50	0,05	0,005	2,8157	1,2799	0,0708	
60	35	6		0,591		17,97	60	0,06	0,006	4,8179	2,1900	0,1219	
80	45	8		0,788		17,77	80	0,08	0,008	8,1549	3,7068	0,2086	
100	58	10		0,985		17,57	100	0,1	0,010	12,493	5,6786	0,3231	
120	70	12		1,182		17,38	120	0,12	0,012	16,4974	7,4988	0,4315	
140	82	14		1,379		17,18	140	0,14	0,014	20,5018	9,3190	0,5424	
160	90	16		1,576		16,98	160	0,16	0,016	23,1714	10,5325	0,6202	
180	99	18		1,773		16,79	180	0,18	0,018	26,1747	11,8976	0,7088	
200	103	20		1,969		16,59	200	0,2	0,020	27,5095	12,5043	0,7538	
220	105	22		2,166		16,39	220	0,22	0,022	28,1769	12,8077	0,7813	
240	100	24		2,363		16,20	240	0,24	0,024	26,5084	12,0493	0,7440	0,3720
260	88	26		2,560		16,00	260	0,26	0,026	22,504	10,2291	0,6394	

Tabla 6 Parametrización variables físicas y mecánicas cenizas volcánicas talud sector cancelés Probeta 7

PROBETA	ϕ (mm)	ϕ (cm)	r (cm)	A (cm)	Lo (mm)	Lo (cm)
7	48,46	4,846	2,423	18,444	101,3	10,13

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	CALCULO DE ESFUERZO	ECUACION
$\epsilon = \Delta L / L_0$	$A = A_0 / (1 - \epsilon)$	$\delta_c = P / A$	$Y = 0.3337 (X) - 6.8616$

DEFOR C (mm)	CARGA AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L / L_0$ (cm)	Ao (cm)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEFOR C (mm)	Mm	convers (cm)	ECUACION	P (Kg)	ESFUERZO $\delta_c = P/A$	COHESION $\delta_{cMax}/2$
10	7	1	10,13	0,099	18,444	18,35	10	0,01	0,001	-4,5257	-2,0571	-0,1121	
20	16	2		0,197		18,25	20	0,02	0,002	-1,5224	-0,6920	-0,0379	
30	20	3		0,296		18,15	30	0,03	0,003	-0,1876	-0,0853	-0,0047	
40	28	4		0,395		18,05	40	0,04	0,004	2,482	1,1282	0,0625	
50	39	5		0,494		17,95	50	0,05	0,005	6,1527	2,7967	0,1558	
60	49	6		0,592		17,85	60	0,06	0,006	9,4897	4,3135	0,2416	
80	59	8		0,790		17,65	80	0,08	0,008	12,8267	5,8303	0,3302	
100	68	10		0,987		17,46	100	0,1	0,010	15,83	7,1955	0,4122	
120	76	12		1,185		17,26	120	0,12	0,012	18,4996	8,4089	0,4872	
140	82	14		1,382		17,06	140	0,14	0,014	20,5018	9,3190	0,5462	
160	89	16		1,579		16,86	160	0,16	0,016	22,8377	10,3808	0,6155	
180	94	18		1,777		16,67	180	0,18	0,018	24,5062	11,1392	0,6683	
200	100	20		1,974		16,47	200	0,2	0,020	26,5084	12,0493	0,7316	
220	101	22		2,172		16,27	220	0,22	0,022	26,8421	12,2010	0,7498	0,3749
240	98	24		2,369		16,07	240	0,24	0,024	25,841	11,7459	0,7307	
260	87	26		2,567		15,88	260	0,26	0,026	22,1703	10,0774	0,6347	

A partir de los resultados mostrados en las anteriores tablas, se pudo confirmar que a medida que el perfil se profundiza, la resistencia de los suelos es mayor, en virtud a la disminución de los contenidos de humedad y al perfil de meteorización de los mismos.

Tabla 7 Valor de pesos unitarios en cada una de las muestras del talud del sector Canceles

PESOS UNITARIOS		
MUESTRA	MASA UNIT HUM gr/cm ³ (MUH)	MASA UNIT SECA gr/cm ³ (MUS)
1	1,736	1,037
3	1,758	1,129
5	1,661	1,100
7	1,711	1,135

Es posible inferir que los pesos unitarios de las muestras de cenizas volcánicas en el Talud de Canceles coinciden con suelos de buena densificación, razón por la cual su resistencia es buena, tanto en condiciones húmedas como secas.

Tabla 8 Resultados Límites líquido y plástico suelos Talud Canceles

Limite liquido Probeta 1	67,8
IP: 13,11	
Limite liquido Probeta 3	65,0
IP: 17,98	
Limite liquido Probeta 5	60,0
IP: 30,11	
Limite liquido Probeta 7	54,0
IP: 12,55	

Tabla 9 Resultados proctor modificado Talud Canceles

MOLDES	1,2,3,4
DIAMET	15,2
ALTURA	11,6
VOL	2104,92

TESTIGO DE HUMEDAD							
MOLDE	TARA	TARA + MUESTRA	PESO SECO + TARA	PESO SECO	PESO HÚMEDO	Ww	ω (%)
1	61,7	172,1	151,7	90	110,4	20,4	22,667
2	59,4	160,8	137,9	78,5	101,4	22,9	29,172
3	59,8	163,8	134,3	74,5	104	29,5	39,597
4	59,9	172,7	131,2	71,3	112,8	41,5	58,205

N° MOLDE	PESO MOLDE (gr)	MOLDE + SUELO (gr)	PESO HUMEDO (Wh)	PESO SECO	γ_d
1	6179	8509	2330	1899,46	0,90
2	6072	8702	2630	2036,05	0,97
3	6179	9016	2837	2032,27	0,97
4	6072	9021	2949	1864,04	0,89

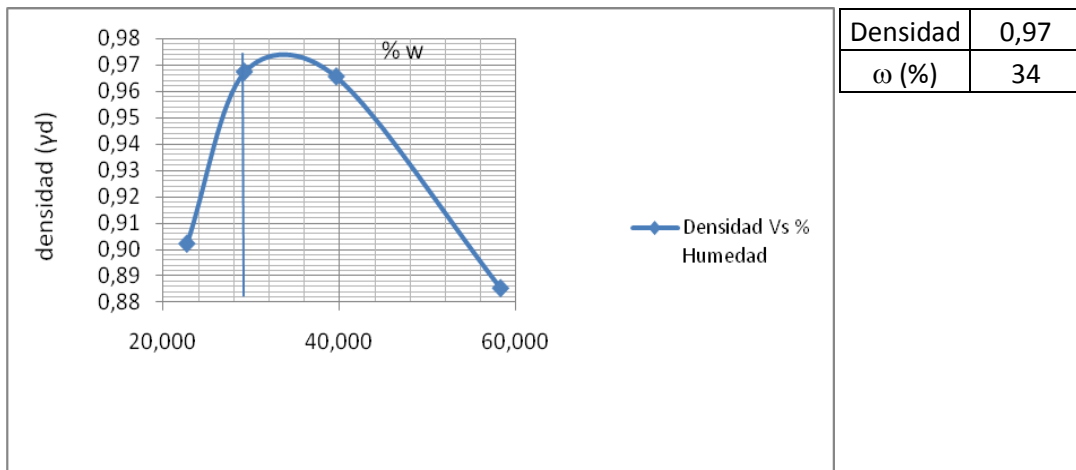


Figura 14 Resultado ensayo proctor modificado densidad vs humedad óptima

Fuente: Proyecto de Investigación

Es importante notar que la humedad óptima según la prueba Proctor modificado de los suelos del Talud Canceles alcanzó el 34%, con una densidad de 0,97 gr/cm³, cifras estas que servirán de soporte y comparación para los resultados de las diferentes pruebas realizadas con los aditivos químicos seleccionados y determinar de esta manera si la inyección de aditivos mejora o no las condiciones de resistencia de los suelos.

8.2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL MEJORAMIENTO DE SUELOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ADITIVOS QUÍMICOS

En el proceso de revisión del estado del arte del mejoramiento de suelos mediante la aplicación de aditivos químicos, se pretende mencionar algunos trabajos desarrollados con anterioridad y que tienen una relación importante con el tema tratado en la presente investigación. Además es importante mencionar en este capítulo, algunos elementos teóricos que permitirán fortalecer y profundizar el conocimiento acerca de elementos relacionados con estabilización química e inyección de aditivos químicos en taludes y suelos.

A continuación se presentan 19 antecedentes, extraídos de 19 documentos, desarrollados en Latinoamérica y Europa, que presentan relación directa con el tema tratado, aplicando distintos tipos de aditivos químicos a los suelos. De los 19 documentos mencionados, presentados como tesis, investigaciones, informes, estudios y artículos en general, cuatro fueron desarrollados en Colombia, tres fueron desarrollados en México, tres fueron desarrollados en Chile, uno desarrollado en Argentina, tres desarrollados en Guatemala, dos desarrollados en Perú y tres desarrollados en España.

8.2.1. DOCUMENTOS SOBRE ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS

ESTABILIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE SUELOS ARCILLOSOS ELABORADOS CON PRECURSORES NANO-MÉTRICOS.²⁴

En el desarrollo de la tesis mencionada se probaron cuatro productos nuevos creados a través de precursores nano-métricos donde se pretendió ver qué tipo de mejoría o estabilización realizaban estos dentro de las propiedades físicas y químicas de las arcillas.

²⁴ CERVANTES G, Erick Oliver. Estabilización físico-química de suelos arcillosos elaborados con precursores nano-métricos. Tesis para obtener grado de maestro de ingeniería. Morelia, Michoacán. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Ingeniería Civil. Maestría en Infraestructura del Transporte. 2010. 143 p. Ed, pagina tomada de: <http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx>

Estos productos o también llamados estabilizantes, se aplicaron en la parte experimental basándose en la metodología de la "National Lime Association", utilizando la norma de "Diseño y procedimiento de ensayos de suelos estabilizados con cal".

Esta tesis desarrollada en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, fue presentada por el Ing. Erick Oliver Cervantes Gutiérrez, asesorado por el Dr. José Carlos Rubio Ávalos para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en la Ciudad de Morelia, Michoacán en el mes de Mayo 2010. En esta se pretende desarrollar los siguientes objetivos principales:

- Implementar nueva tecnología en materiales a base de nanotecnología, modificando la estructura molecular de las arcillas para tener un mejoramiento en su comportamiento.
- Observar si estos nuevos materiales pueden funcionar como estabilizantes en suelos arcillosos de alta plasticidad ya que su composición química está hecha en base a productos alcalinos.
- Realizar una comparación cualitativa y cuantitativa de las propiedades índices y mecánicas de un suelo arcilloso estabilizado con cuatro productos diferentes.
- Definir un procedimiento de estabilización en base a la cantidad necesaria a emplear, es decir, los porcentajes a usar de cada uno de los estabilizantes.
- Concluir en cuales propiedades mecánicas se tiene un mejoramiento y cuál de los cuatro productos es el mejor para utilizar en cualquier tipo de obra civil por construirse.

Para el desarrollo juicioso de los objetivos mencionados se implementa la siguiente metodología en donde se describe paso a paso el proceso para el desarrollo completo de la investigación:

Se realiza el muestreo que consiste en obtener una porción representativa del material con el que se pretende construir una terracería o bien del material que ya forma parte de la misma. El muestreo incluye además las operaciones de embase, identificación y transporte de las muestras.

Consideraciones: Un análisis del suelo en forma inalterada obtiene resultados más apegados a la realidad; sin embargo en esta investigación los ensayos serán con material remoldeado ya que sólo así se puede incorporar de manera homogénea el aditivo que se usará como estabilizante en cada una de las pruebas.

- Una vez esté el material en el laboratorio se realizan los procesos de secado, disgregado y cuarteado de muestras, estos procedimientos permiten la separación de las muestras representativas de materiales para terracerías, con el propósito de obtener las porciones representativas para efectuar las pruebas de laboratorio necesarias.
- Posteriormente se realiza la prueba de contenido de humedad donde se determina el contenido de agua en los materiales para terracería, con el fin de obtener una idea cualitativa de su consistencia o de su probable comportamiento.
- Luego se realiza la prueba de gravedad específica la cual permite determinar las masas volumétricas de los materiales para terracerías, es decir, las relaciones masa volumen en diferentes estados o condiciones de acomodo
- Luego se aplica el método del pH para estimar la proporción suelo-cal necesaria para la estabilización del suelo, en este método se preparan una serie de muestras, variando los porcentajes de contenido de cal en el suelo. Las mediciones de pH son realizadas en las muestras de lodos para determinar el mínimo contenido de cal de la mezcla, para obtener un pH de 12.4 por lo menos.
- Posteriormente se realiza el diseño de la mezcla a estabilizar donde se evalúa si un suelo puede ser estabilizado con cal, en caso afirmativo, se determina la cantidad mínima necesaria de cal. Algunas de las propiedades del suelo a estabilizar serán la resistencia, durabilidad, compresibilidad etc. Esto se logra basándose en la evaluación inicial del suelo, determinación de la demanda aproximada de cal, determinación del contenido de humedad óptimo y el peso específico seco máximo de la mezcla suelo cal, elaboración de los especímenes para la prueba de resistencia a la compresión no confinada, curado y preparación de los especímenes para la resistencia a la compresión no confinada, determinación del cambio en las características de expansión para suelos expansivos.
- Se realiza la prueba de peso volumétrico seco máximo para determinar la curva de compactación de los materiales para terracerías y a partir de esta inferir su peso volumétrico seco máximo y su contenido de agua óptimo.
- Se realizan pruebas de límites de consistencia (límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad) para la identificación de los suelos.
- Finalmente se realizan una serie de pruebas: determinación de la contracción lineal, determinación de la contracción volumétrica, prueba de

consolidación, prueba de presión de expansión, prueba de compresión simple y prueba triaxial rápida.

Para diferenciar un producto de otro durante las pruebas mecánicas, los investigadores de esta tesis tomaron la decisión de nombrarlos Estabilizante 1, Estabilizante 2, Estabilizante 3, Estabilizante 4. Durante el proceso de pruebas se observaron diferentes comportamientos de las mezclas donde unas tuvieron mejores resultados que otras. Donde el producto nombrado como estabilizante 1, mostró los mejores resultados mejorando las características volumétricas, de resistencia y de compresibilidad, de acuerdo al proceso que se llevó a cabo se obtuvieron las siguientes conclusiones generales:

- Se debe concluir de manera general que el mejor comportamiento que se tiene de las mezclas suelo-estabilizante es con el estabilizante 1, ya que mejoró de un 70 a 95% todas las propiedades índice y mecánicas del suelo.
- El empleo del estabilizante 1 se puede usar desde el mejoramiento del suelo para una cimentación, una plataforma o hasta para las capas de un pavimento, teniendo siempre en cuenta que la proporción del estabilizante dependerá de los volúmenes a utilizar.
- Los demás estabilizantes abren un gran campo de estudio para continuar con estas investigaciones ya que se puede seguir modificando la composición química de estos para tener mejores resultados y seguir perfeccionando el estabilizante 1 para mejorar su comportamiento.

8.2.2. EL TRATAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS MEDIANTE CAL.²⁵

Dentro de las múltiples posibilidades de esta técnica, el presente documento desarrollado y estudiado por Juan Diego Bauzá Castelló, se centra en el empleo de la cal en las grandes obras de infraestructura, aunque no con carácter excluyente, sino más bien referencial. El desarrollo de la investigación, de la maquinaria de ejecución, el estudio de la patología y la publicación de normativas en este campo suele ser más frecuente en este subsector de la construcción y, por tanto, quizás sea aquí donde hay que situar los primeros documentos o referencias que, como ya se ha dicho, son fácilmente extensibles a otros subsectores como lo han sido otros estudios precedentes en áreas dispares.

En el desarrollo del documento propuesto se pretende, recopilar, ordenar e ilustrar los conocimientos precisos para el diseño de una mejora de suelos arcillosos mediante la aplicación de cal en el entorno normativo y productivo español.

²⁵ Bauza C, J. tratamiento de suelos arcillosos mediante cal. Madrid, España 2002. Ed, pagina tomada de: http://www.elabora.es/files/ap_articulos

Enfocar la aplicación de la cal para la mejora de suelos predominantemente arcillosos, sin entrar a considerar otros usos y posibilidades de dicho tratamiento que deben ser objeto de estudios particulares.

En el proceso metodológico de la investigación plasmada en este documento se define que la ejecución de los tratamientos de suelos con cal, al igual que la mayoría de las mezclas que suelen ejecutar en la obra civil, requiere usualmente el empleo de maquinaria muy diversa según el volumen, ubicación, alcance y precisión que se requiera para el tratamiento.

No es lo mismo plantear la mejora de una capa de asiento de una losa de cimentación que la estabilización de la capa de base de una autopista o pista aeronáutica o que mejorar en profundidad un sustrato en el que se apoya una estructura.

Técnicas de ejecución de los tratamientos de suelos con cal

Si bien los requisitos de mezcla y compactación son casi universales, en función del tipo de tratamiento, la realidad es que las posibilidades de amasado en la obra o en central, de humectación y aplicación de la cal por fases o por ejemplo, la necesidad o no de escarificado previo e incluso la forma de presentación de la cal hacen que se multipliquen los posibles esquemas y métodos de ejecución en torno a una serie de variables a combinar. En principio las técnicas de ejecución de los tratamientos de suelos con cal pueden clasificarse atendiendo a varios criterios según:

La profundidad a que se aplica el tratamiento:

- Por inyección profunda
- Mediante tratamiento superficial

La presentación de la cal:

- En polvo, pudiendo ésta a su vez aplicarse:
- En sacos
- A granel
- En lechada

Por el tipo de cal empleada, según sea:

- Cal viva
- Cal apagada

Fases del proceso constructivo

Salvando las diferencias lógicas que intervienen en cada uno de las técnicas de aplicación enumeradas en el apartado anterior, el proceso constructivo que supone la aplicación de la cal a un suelo conlleva una serie de operaciones casi generalmente aplicadas a todas ellas. La diferencia en la mecanización, los materiales empleados, el lugar de empleo o los plazos y secuencias de ejecución son las que definen cada una de las técnicas específicas.

La secuencia típica más general de operaciones que compone la ejecución de un tratamiento de suelos con cal comprende así las siguientes:

- Escarificado del suelo
- Disgregación
- Suministro de la cal
- Aplicación de la cal
- Humectación
- Mezclado
- Nivelación
- Compactación
- Curado

Las inyecciones de cal en profundidad

Por la peculiaridad y especificidad del tratamiento, se aborda en el presente de manera somera la estabilización en profundidad mediante inyección en el terreno, proceso típico de aplicación para recalce de construcciones o tratamientos en profundidad de problemas geotécnicos muy diferentes al que usualmente se plantea en las estructuras de tierra convencionales, tales como los de hinchamiento o riesgo de lixiviado.

En estos casos el mecanismo operativo se basa en la inyección en taladros hasta profundidades del orden de 3 metros ubicados en una malla de 2 a 3 metros de separación entre taladros.

Los efectos de esta mejora han sido descritos por algunos autores, si bien su empleo específico en obras puntuales no aporta mayor información a los efectos de este documento.

8.2.3. ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA DE RESISTENCIA POR REMOLDEO DE SUELOS ARENOSOS DE LA ZONA ESTUARINA DE NAYARIT.²⁶

Esta investigación desarrollada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. División de Estudios de Posgrado. C. U. Cerro de las Campanas, México. Fue propuesta por los siguientes investigadores J. C. Romero Cervantes, M. L. Pérez Rea.

En esta investigación se pretende estudiar la pérdida de las propiedades mecánicas del suelo en la zona estuarina de Nayarit con el remoldeo durante procesos constructivos y la posible recuperación que pueda proporcionarle la fracción de arcilla contenida en el suelo. Además se propone estabilización química para mejorar la recuperación de las propiedades mecánicas con el paso del tiempo. Para el desarrollo del proceso metodológico de la presente investigación es necesario trabajar en algunos ensayos de laboratorio:

Preparación de especímenes para evaluar las propiedades mecánicas

Para la elaboración de los especímenes inalterados se labraron probetas a partir de las muestras inalteradas obtenidas de la zona de estudio, siguiendo los procedimientos establecidos en las normas correspondientes por cada prueba a realizar. Posterior al labrado se realizaron los ensayos a los especímenes.

Los especímenes remoldeados fueron contruidos con material de muestras alteradas secado al aire en recipientes de vidrio, para evitar alteraciones químicas en el suelo. El material seco se disgregó en un mortero de porcelana, después fue tamizada por la malla # 4 (4.74 mm), para eliminar los granos gruesos, y conservado en bolsas de plástico selladas para evitar una hidratación en las muestras. Se calculó la cantidad de suelo y agua necesarios para reproducir el peso volumétrico y el contenido de humedad del suelo en estado inalterado. La mezcla se compactó con una prensa hidráulica de fabricación en el laboratorio constituida por un gato hidráulico, un marco de carga y un anillo calibrado (aplicando carga estática); en tres capas dentro de un recipiente de PVC de 36.6

²⁶ Romero C, J; Pérez R, M. Universidad Autónoma de Querétaro, México. análisis de la pérdida de resistencia por remoldeo de suelos arenosos de la zona estuarina de Nayarit. División de estudios de posgrados. Ed, pagina tomada de: <http://quimica.ugto.mx/revista/12/remoldeo.htm>

mm de diámetro y 108.6 mm de altura, hasta obtener el peso volumétrico del suelo en su estado original. La altura final de la probeta fue de 8.5 cm, \pm 0.15 cm, las muestras naturales fueron ensayadas a 1, 3, 5, 7, 10 y 14 días para estudiar la evolución de la recuperación de la resistencia con el tiempo.

Ensayes triaxiales rápidos (UU)

Para obtener la resistencia al esfuerzo cortante del suelo en su estado natural inalterado y remoldeado fueron realizados ensayos triaxiales rápidos UU (No consolidados, no drenados), siguiendo el procedimiento establecido por la norma ASTM D-2850-03.- Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. Estos ensayos triaxiales se realizaron con dos niveles de esfuerzo confinante (σ_3): 29.42 kPa y 58.84 KPa a una velocidad de deformación de 0.50 mm/min. Esta velocidad fue la que presentó un mejor desempeño para evaluar la resistencia según ensayos previos de calibración. Primeramente se ensayaron las probetas inalteradas y después se ensayaron las probetas remoldeadas a 1, 3, 5, 7, 10 y 14 días. El equipo utilizado fue una prensa triaxial ELE DigitalTritest modelo T-1325A con velocidades de deformación de 0.1 a 2 mm/min y un anillo de carga de 5 kN con el fin de registrar pequeñas variaciones de carga.

Teniendo en cuenta el análisis de los ensayos de laboratorio realizados, se obtuvieron los siguientes resultados y conclusiones:

Debido a que en el suelo en estudio predomina un tamaño de partículas entre el 0.2 y 0.074 mm (alrededor de un 60% del suelo se encuentra en este tamaño) es considerado por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como una arena limosa. Con base a un cálculo similar al de "sensibilidad" en arcillas, se busca una relación entre la pérdida de la resistencia en su estado inalterado con respecto al remoldeado en este suelo arenoso (RPR) y la mejora que le pueda brindar con el paso del tiempo la fracción de arcilla contenida en el suelo (10.6%). Los resultados obtenidos se muestran a través del esfuerzo final de falla (UU), el cual resultó ser de 70 KPa, utilizando una presión confinante de 29.42 KPa. El ángulo de fricción interna (ϕ) del suelo, medida en la pruebas UU fue de 27. 83%, muy adecuado para las arenas finas. La estructura se pierde con el remoldeo y en suelos granulares no puede recuperarse. Simplemente se tiene un acomodo nuevo de los granos. Sin embargo la estructura de los minerales arcillosos si se recupera internamente brindando nuevamente cohesión a los macrogranos, recuperando en parte la cohesión.

Para mejorar el proceso de recuperación de la resistencia del suelo, se decidió modificar químicamente al suelo agregando cal hidratada (Ca(OH₂)). El porcentaje óptimo de cal fue determinado en un trabajo previo (Romero, 2008), y su valor oscila entre el 4 y el 5% del peso seco del suelo.

8.2.4. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS POR MEDIO DE ARENAS VOLCÁNICAS Y CAL VIVA.²⁷

Este Trabajo de graduación presentado a la junta directiva de la facultad de ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala para obtener título de ingeniería civil, fue presentado por Denis Robin Ruano López, Asesorado Por el Ingeniero. Omar Enrique Medrano Méndez, Guatemala, Septiembre de 2012.

En esta tesis se requiere evaluar el comportamiento de las arenas de origen volcánico en la estabilización de suelos cohesivos, estas arenas son muy comunes en diferentes áreas de la construcción y existen en gran cantidad dentro del departamento de Guatemala como en otras áreas del país. Los materiales de origen volcánico son muy fáciles de encontrar en Guatemala, la mayoría de su territorio tiene influencia en sus suelos procedentes por eventos y actividad volcánica.

El aprovechar al máximo los materiales de origen volcánico en las diferentes áreas de la construcción como también en estabilizaciones de suelos cohesivos entre otros.

La utilización de la cal viva es otro recurso que se tiene a la mano y a un bajo costo y se le puede dar un uso de aprovechamiento correcto para conseguir resultados satisfactorios.

Las estabilizaciones de suelos en Guatemala son muy comunes, ya que se necesita ejecutar diferentes proyectos como lo son carreteras, áreas industriales, complejos habitacionales etc., por lo que es importante estudiar nuevas opciones para realizar esta actividad, proponiendo diferentes materiales, métodos y proporciones de mezclas de agregados para lograr estabilizaciones de suelos logrando obtener valores de CBR adecuados según sea su aplicación en el campo de la construcción.

El desarrollo satisfactorio de la tesis requiere de la propuesta de un objetivo general y cuatro objetivos específicos:

Realizar de manera precisa y mecánica el estudio de investigación de estabilización de suelos cohesivos con arenas volcánicas y cal viva, con muestras y ensayos en el laboratorio de suelos y la obtención y comprobación de resultados.

²⁷ Ruano L, Denis Robin. estabilización de suelos cohesivos por medio de arenas volcánicas y cal viva. trabajo de grado para optar el título como ingeniero civil. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 2012. 111 p. Ed, pagina tomada de: www.biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3447_C.pdf

Los cuatro objetivos específicos son:

Contribuir de manera sistemática al cálculo de la estabilización de suelos cohesivos con arenas volcánicas y cal viva, a un proceso sencillo y confiable para poder ser usado fácilmente

Extraer los materiales a utilizar de bancos adecuados y analizar las propiedades y características físicas de cada una de ellas por medio de ensayos y estudio de laboratorio.

Definir proporciones en porcentajes de los materiales estabilizantes a usar y con los resultados de laboratorio obtener una estabilización mejorada en suelos cohesivos.

Contribuir a complementar por medio del trabajo de graduación el estudio de estabilización de suelos cohesivos, a los alumnos de pregrado de Ingeniería Civil, en especial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Para lograr los objetivos esperados se plantearon una serie de procedimientos en el laboratorio, lo cual hace parte del proceso metodológico de la investigación.

Ensayo de mezclas con arenas volcánicas para la estabilización de suelos cohesivos

El procedimiento de las mezclas realizadas las cuales consisten en estabilizar 2 muestras de suelos cohesivos con arena sílice, y también con arena azul y las cuales también tendrán agregadas un 10 por ciento de cal viva a cada una de las muestras.

Descripción de las muestras a utilizar

Las muestras a estabilizar son suelos arcillosos de los municipios de Palencia y San José Pínula del departamento de Guatemala, los cuales presentan en la mayoría de sus suelos características arcillosas. A estas muestras se les realizaron los ensayos respectivos para conocer sus características.

Descripción de las proporciones de las mezclas a utilizar para la estabilización de los suelos cohesivos

Las dos muestras de arcilla se estabilizaran con 2 tipos de arena de origen volcánico.

Los materiales empleados para las mezclas son:

- Muestra de arcilla 1
- Muestra de arcilla 2
- Arena sílice
- Arena azul
- Cal viva, tamizada previamente

Lo que se pretende con estas proporciones de mezclas es evaluar el comportamiento de cada una de ellas y analizar el resultado de las mismas con el fin de llegar a una estabilización.

Ensayos de laboratorio realizados a las mezclas

A todas mezclas con las proporciones ya definidas anteriormente se les realizó los siguientes ensayos de laboratorio:

- Ensayo de granulometría
- Ensayo de compactación
- Ensayo de CBR

Lo anterior permitió determinar las siguientes conclusiones:

Las características de las de arenas de origen volcánico usadas en la investigación presentan cualidades positivas para la estabilización de suelos cohesivos, las minas ya se usan de forma exitosa en la construcción para diferentes áreas como fundición de concretos y la fabricación de tejas de concreto prefabricadas.

La cal viva tiene un bajo costo en el mercado comparada con la cal hidratada y se pudo comprobar que su uso es muy eficaz en la estabilización de suelos cohesivos, ya que se pueden lograr una estabilización de bajo costo mezclándola con la arena sílice y arena azul.

Los bancos donde se encuentran las arenas utilizadas para las estabilizaciones poseen una ubicación privilegiada, ya que de la ciudad de Guatemala están tan solo a 26 kilómetros del banco de arena sílice y a 22 kilómetros el de arena azul, y

ambos están a unos cuantos kilómetros de la autopista que conduce de la capital a Agua Caliente sobre la ruta al atlántico.

Los bancos de arena sílice y arena azul son de un volumen considerado para una extracción a gran escala para realizar estabilizaciones masivas de suelos para la construcción de obras de ingeniería civil que se requieran esto da un alto nivel de confianza para usarlas de forma constante en diferentes proyectos del área metropolitana.

Las mezclas propuestas van del 10 por ciento, 25 por ciento y 50 por ciento de arena sobre el material a estabilizar logrando obtener desde un valor de CBR de 52,6 por ciento a 91,5 por ciento, lo que da un amplio margen de valores que podemos seleccionar según sea la utilidad que necesitemos aplicar.

Se determinó que utilizando cualquiera de las dos arenas tanto la sílice como la azul, ambas obtienen valores muy similares de CBR, sin embargo su mayor valor de densidad específica y la composición mineralógica de la arena azul, logra que alcance valores un poco más altos que la arena sílice, los cuales se observan en las gráficas de resultados de cada una de ellas usadas en los dos tipos de suelos cohesivos trabajados.

En la investigación se utilizaron dos tipos de muestras de suelos los cuales se extrajeron del norte del departamento de Guatemala, estos suelos poseen características cohesivas y se pueden tomar como referencia para poder estabilizar otros tipos de suelos que presentan características iguales o similares en otras partes del departamento o del país, teniendo en cuenta el transporte de las arenas hacia el lugar donde se quiere realizar la estabilización.

Las diferentes estabilizaciones que se realizaron en el centro de investigaciones de la Universidad de San Carlos demuestran que se puede utilizar estas arenas de origen volcánicas combinadas con un 10 por ciento de cal viva para poder lograr estabilizaciones de varios valores según las necesidades que requiera el constructor tomando como referencias las curvas realizadas con los resultados.

8.2.5. RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS Y LOS COMPONENTES PUZOLÁNICOS DE LOS SEDIMENTOS PAMPEANOS²⁸

Esta tesis fue presentada por el Ingeniero Geólogo Enrique Quintana Crespo para optar el título de Doctor en Ingeniería Geológica , cuyo director fue el Dr. Emilio R.

²⁸ QUINTANA C, Enrique. Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos. Tesis doctoral (Ingeniero Geólogo). Córdoba – Argentina. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2005. 283p

Redolfi en la Universidad Nacional de Córdoba, en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales en Buenos Aires, Argentina en el año 2005. En esta se desarrollaron los siguientes objetivos principales:

- Comprobar la existencia de la reacción puzolánica en los sedimentos loésicos pampeanos, mediante el uso de técnicas tradicionales, propias de la industria del cemento. Estas consisten en la realización de análisis químicos, físicos y mecánicos que permiten verificar la presencia de cantidades importantes de sílice y alúmina y la consiguiente formación de compuestos cementicios mediante reacciones con el hidróxido de calcio.
- Demostrar que en los sedimentos loésicos pampeanos las reacciones puzolánicas ocurren naturalmente, cuando se dan las condiciones apropiadas para ello, constituyendo una forma de origen de las capas cementadas denominadas localmente "toscas" y donde juega un rol fundamental la mineralogía no arcillosa de estos sedimentos.
- Interpretar los resultados de ensayos geotécnicos tradicionales realizados sobre mezclas de suelo-cal, tales como la resistencia a la compresión simple, triaxial, de valor soporte y ensayos dinámicos, a la luz de la actividad puzolánica que presentan los sedimentos loésicos pampeanos.
- Comprobar que la actividad puzolánica de los sedimentos loésicos pampeanos tiene una relación más directa con la mineralogía, que con la granulometría y plasticidad de los mismos, propiedades en que se basan la mayoría de los protocolos de diseño de mezclas estabilizadas con cal para predecir su comportamiento resistente.
- Desarrollar un protocolo de ensayos específico para estabilizados de suelos puzolánicos-cal para uso vial.

Para el desarrollo de los objetivos mencionados se implementa la siguiente metodología aplicada a los ensayos de laboratorio en donde se describe paso a paso el proceso para el desarrollo completo de la investigación:

Sedimentos investigados

La campaña de muestreo abarcó gran parte de la unidad geográfica denominada Llanura Pampeana de la Provincia de Córdoba. Las muestras se agruparon en tres conjuntos en base a los criterios que se exponen a continuación:

- Un primer conjunto se obtuvo mediante un muestreo de tipo general de capas de sedimentos loésicos con contenido variable de cenizas volcánicas y capas de cenizas volcánicas puras. Este conjunto de muestras fue

tomado con el objetivo general de caracterizarlas desde el punto de vista geotécnico, para luego determinar la actividad puzolánica mediante los ensayos tradicionales y verificar la aptitud de estos ensayos para el logro de los objetivos generales de la investigación.

- A la luz de los resultados obtenidos sobre los ensayos realizados sobre el primer conjunto de muestras, se observó la necesidad de efectuar un muestreo detallado de una columna estratigráfica, obteniéndose un segundo conjunto de muestras. Estas fueron consideradas homogéneas desde el punto de vista de su historia geológica, granulometría y plasticidad y en ellas se determinó la actividad puzolánica mediante una técnica de medición de la conductividad eléctrica. El perfil analizado mostró una gran homogeneidad en cuanto a la clasificación geotécnica de las diversas capas que lo componen, no obstante, se observaron durante el muestreo grados de cementación muy variables, de posible origen puzolánico, razón por la cual se realizaron determinaciones de la mineralogía de las muestras tomadas a fin de determinar la presencia de minerales reactivos (vidrio volcánico, carbonatos, etc.).
- El avance de la investigación reveló que todas las muestras de sedimentos loésicos pampeanos analizadas corresponden a una misma clase geotécnica, razón por la cual se tomó un tercer conjunto de muestras formado por sedimentos cuyas características de plasticidad y granulometría los ubican en clases geotécnicas diferentes, de manera de relacionar estas con la actividad puzolánica determinada mediante medición de conductividad eléctrica.

Ensayos de Laboratorio

El primer conjunto de muestras se identificó y clasificó desde el punto de vista geotécnico, para posteriormente realizar los ensayos químicos, físicos y mecánicos necesarios para definir la actividad puzolánica mediante las técnicas tradicionales de uso en la industria cementera.

El segundo conjunto de muestras fue igualmente identificado geotécnicamente para luego ser sometido a análisis mineralógicos a fin de determinar la composición de la fracción puzolánica de los mismos y relacionarla con la actividad puzolánica determinada mediante técnicas de medición de conductividad eléctrica.

En el tercer conjunto de muestras se llevó a cabo la clasificación geotécnica de las mismas y la determinación de su actividad puzolánica obteniéndose la relación entre esta y las propiedades índices. Posteriormente, sobre una selección de muestras características, se realizó la determinación de la resistencia a la

compresión simple, triaxial, compactación y valor soporte, obteniéndose la influencia de la actividad puzolánica en las características geotécnicas de los sedimentos.

La mayoría de los ensayos fueron realizados siguiendo normas nacionales o internacionales.

Las características estudiadas se listan a continuación:

- Composición Granulométrica
- Límites de Atterberg
- Actividad
- Superficie Específica
- Peso Específico
- Composición Química
- Actividad puzolánica con cemento portland
- Composición Mineralógica
- Determinaciones indirectas basadas en mediciones de conductividad
- Análisis químicos de cales
- Requerimiento de cal
- Compactación de mezclas suelo – cal
- Resistencia a la compresión simple de mezclas suelo – cal
- Resistencia a la compresión triaxial de mezclas suelo – cal
- Ensayos de compactación de mezclas suelo-cal
- Valor Soporte de mezclas suelo – cal
- Solicitaciones dinámicas de mezclas suelo – cal

De acuerdo al proceso que se llevó a cabo en el área de estudio se obtuvieron las siguientes conclusiones generales:

Con este primer conjunto de muestras se pudo cumplimentar uno de los objetivos de esta investigación que consistía en comprobar la existencia de la reacción puzolánica en los sedimentos loésicos pampeanos, mediante el uso de análisis químicos, determinación de superficie específica, actividad puzolánica con cemento portland, etc., es decir técnicas utilizadas en la industria del cemento portland para definir la posibilidad de uso de un material para la fabricación de cemento portland puzolánico. También pudo apreciarse que el índice de puzolanidad es variable, en un todo de acuerdo con la investigación bibliográfica de la composición mineralógica, que demuestra la existencia de cenizas volcánicas, constituidas por vidrios de composición ácida, es decir alto contenido de sílice, ya sea en estado amorfo o débilmente cristalizado, siendo este el principal factor de la reactividad de estos materiales con la cal.

La gran diversidad de factores naturales que afectan la formación de los sedimentos se encuentra reflejada en sus propiedades geológicas y geotécnicas. A diferencia de cualquier material fabricado por el hombre la variabilidad de las capas sedimentarias hace que cualquier conclusión deba ser verificada detalladamente. Es por ello que se tomó un segundo conjunto de muestras, consistente en un muestreo detallado de una columna estratigráfica, donde pueden suponerse acotados los acontecimientos geológicos que la originaron, al igual que las variables que afectan su composición mineralógica, tales como las rocas de origen y los procesos eólicos. La importancia de este conjunto de muestras consistió en que sedimentos de características muy similares en cuanto al tamaño de grano, la plasticidad, etc., manifestaban diferentes grados de cementación natural de origen puzolánico.

El tercer conjunto de muestras se conformó con materiales de los siguientes sitios: Sitios 3 y 4 que presentan loess primarios, cuyas características granulométricas medias se asemejan a las del Sitio 1. El Sitio 5 es característico de los limos arcillosos del este provincial, conformado en más de un 90% por limo y arcilla. Los Sitios 6 y 7 representan claramente la zona de médanos del sur provincial. El Sitio 8 está caracterizado por la presencia de cenizas volcánicas verdes. El Sitio 9 corresponde a un cuerpo de tosca, con grado de cementación variable.

Mediante ensayos de resistencia a la compresión simple se demostró la existencia de dos grupos de sedimentos con comportamientos diferentes. Un grupo que responde a las previsiones que determinan los criterios tradicionales de diseño de capas estabilizadas con cal e incluye a sedimentos con fracciones arcillosas importantes y a aquellos mayoritariamente inertes, obteniéndose una alta y baja reacción puzolánica respectivamente. El otro grupo está constituido por sedimentos sin plasticidad, donde la reactividad con la cal es producida por la presencia en distintos porcentajes de minerales puzolánicos, los valores de incrementos de la resistencia logrados superan a las expectativas de acuerdo a las especificaciones basadas en granulometría y plasticidad.

De este modo queda efectivamente demostrado que en los sedimentos loésicos pampeanos, existe una marcada influencia de la fracción mineralógica reactiva básicamente no arcillosa implicando que la reactividad con la cal debe ser determinada en forma previa en el proyecto de estabilización, ya que puede arribarse a resultados muy diferentes partiendo de materiales con similar granulometría y plasticidad.

8.2.6. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CLORURO DE SODIO (NaCl) PARA BASES Y SUB BASES.²⁹

Esta tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil fue desarrollada por el Sr. Jairon Roldán de Paz, Asesorada por el Ingeniero Omar Enrique Medrano Méndez, en la Universidad de San Carlos de Guatemala en la Facultad de Ingeniería en la Ciudad de Guatemala, en julio de 2010, en esta tesis se planteó un objetivo general y cinco objetivos específicos:

Como objetivo general se va a desarrollar un método confiable y económico para evitar la pérdida rápida de humedad en los suelos utilizados en bases y sub-bases, que permita una estabilización adecuada, con el fin de obtener suelos que no varíen sus propiedades físicas y mecánicas al perder humedad.

Como objetivos específicos se plantearon:

- Formular una dosificación de suelo-cloruro de sodio, para estabilizar suelos utilizados en bases y sub-bases.
- Establecer la diferencia de pérdida de humedad en suelos estabilizados con cloruro de sodio y suelos sin estabilizar.
- Analizar el comportamiento físico y mecánico de suelos empleados en bases y sub-bases estabilizados con cloruro de sodio.
- Establecer un porcentaje apropiado de cloruro de sodio que se deba agregar a muestras de suelo arenosos, para obtener resultados aceptables.
- Definir la forma adecuada y factible de agregar el cloruro de sodio a la muestra de suelo, para una estabilización óptima.

De acuerdo con el origen de sus elementos, los suelos se analizan en dos grupos: los suelos cuyo origen se debe a la descomposición física y/o química de las rocas, o sea los suelos inorgánicos, y suelos cuyo origen es principalmente orgánico.

²⁹ Roldan P, Jairon. estabilización de suelos con cloruro de sodio (NaCl) para bases y sub bases. Tesis de grado para optar por el título de ingeniero civil. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2010. 139 p. Ed, página tomada de: [www. biblioteca.usac.edu](http://www.biblioteca.usac.edu)

Los depósitos naturales que forman todo tipo de suelo son tan variados que ningún método de exploración es ideal para todos los casos; esto significa que cada suelo requerirá, probablemente, de un procedimiento para investigarlo muy diferente del que necesitará otro subsuelo. Antes de proceder a explorar, es conveniente un análisis y observación preliminar de la zona para tener información que, en muchos casos, evitará investigaciones costosas e innecesarias. También es necesario realizar una serie de ensayos de laboratorio descritos en la metodología de esta investigación

Ensayos de laboratorio

Ensayo proctor modificado

En general, es conveniente compactar un suelo para:

- Aumentar la resistencia al corte y por consiguiente, mejorar la estabilidad y la capacidad de carga de pavimentos.
- Disminuir la compresibilidad y así reducir los asentamientos.
- Disminuir la relación de vacíos y por consiguiente, reducir la permeabilidad.
- Reducir el potencial de expansión, contracción o expansión por congelamiento.

Influencia de la energía de compactación

Se toma un mismo suelo y se estudia la relación humedad-densidad para distintas energías de compactación, se observará que el punto de humedad óptima varía en función de la energía que se haya aplicado a la muestra.

Influencia del tipo de suelo

La tipología del suelo, concretamente su composición granulométrica, determina la forma de la curva de compactación. Se podría decir que “no hay dos suelos iguales”, pero si pueden englobarse en dos grupos de comportamiento.

Ensayo capacidad soporte California

La finalidad de este ensayo es determinar la capacidad de soporte (*CBR*, *California Bearing Ratio*) de suelos y agregados compactados en laboratorio, con una humedad óptima y niveles de compactación variables.

Ensayo granulométrico

La función de este ensayo es determinar las proporciones de los distintos tamaños de granos existentes en el suelo.

Ensayo límites de Atterberg

El comportamiento de un suelo está muy influenciado por la presencia de agua. Este hecho se acentúa cuanto menor es el tamaño de las partículas que componen dicho suelo. Especialmente, es relevante en aquellos donde predomina el componente arcilloso, ya que en ellos los fenómenos de interacción superficial se imponen a los de tipo gravitatorio.

Límite líquido

El límite líquido está definido como la humedad en la cual una masa de suelo se encuentra entre el estado plástico y el estado líquido.

Límite plástico

El límite plástico está definido como el contenido de humedad, en el cual una masa de suelo se encuentra entre el estado semisólido y el estado plástico.

Estados de consistencia

Los estados de consistencia que pueden darse en los suelos coherentes en función de su grado de humedad: líquido, plástico, semisólido, sólido.

Ensayo triaxial

En carreteras se emplean dos ensayos destinados a este fin: el triaxial y el ensayo de corte directo. Ambos procedimientos determinan la llamada recta de resistencia intrínseca del suelo, definida como la envolvente de los círculos de Mohr obtenidos para distintas tensiones axiales, y que relaciona las características mecánicas del suelo con dos de sus propiedades físicas: la cohesión y el ángulo de rozamiento interno.

Dosificación del cloruro de sodio

Una buena dosificación implica establecer proporciones apropiadas de los materiales, para obtener una trabajabilidad y valor soporte esperados en una estabilización adecuada.

La estabilización de suelos con cloruro de sodio depende de una buena dosificación. Esto ayudará a que las propiedades del cloruro de sodio se aprovechen de una manera óptima.

El cloruro de sodio se dosificará en la muestra de suelos en porcentajes consecutivos a partir de 2% de cloruro de sodio, hasta llegar a un porcentaje adecuado en el cual la estabilización sea apropiada y el cloruro de sodio no afecte las condiciones mecánicas del suelo.

La variación en los parámetros utilizados de cloruro de calcio dependen de:

- La temperatura y la humedad dominante.
- La topografía de la zona, en relación al drenaje natural.
- El porcentaje de finos en el suelo.
- Los límites de consistencia.

Sin embargo, algunos estudios previos concluyen que el máximo porcentaje de cloruro de sodio no debe ser muy alto y que las dosificaciones dependen del tipo de cloruro de sodio utilizado.

De acuerdo a lo anterior y a los ensayos de laboratorio realizados se determinaron las siguientes conclusiones:

- Debe evitarse el uso de NaCl en un terreno de capilaridad alta, donde haya una fuente de agua a poca profundidad (nivel freático) o en un lugar con infiltración lateral; a menos que se tomen las precauciones adecuadas para interceptar este flujo de agua y drenarlo de la base o sub-base estabilizada, ya que el cloruro de sodio es soluble en agua y se le debe proteger contra la cantidad excesiva de humedad.
- El cloruro de sodio se debe dosificar acorde a la cantidad de material a utilizar, los porcentajes de NaCl deben estar correctamente calculados para obtener resultados esperados en la estabilización de los suelos. Si se dosifica en función a la cantidad de agua a utilizar, pueden ocurrir variaciones en los resultados.
- La adición de cloruro de sodio es un método para reducir la evaporación en los suelos, ya que atrapa la humedad que la rodea, y crea una capa en la parte superior de las capas compactadas con sal, lo cual impide que la humedad se evapore con facilidad y ayuda a obtener un mejoramiento en la densificación.

- El tiempo en el que la humedad se evapora en suelos con cloruro de sodio, es significativamente mayor en comparación al tiempo de evaporación de humedad en suelos sin NaCl.
- Se observa que en las características de compactación de los suelos, la densidad seca máxima aumenta y la humedad óptima de compactación disminuyen con cada incremento en porcentaje de cloruro de sodio (NaCl). Las modificaciones en la densidad seca máxima y la humedad óptima se deben al incremento de los cristales de NaCl que se suman a los minerales de los suelos. También se debe a la lubricación que se logra con el cloruro de sodio, reduciendo la fricción intergranular que presentan los suelos.
- La resistencia a la compresión tiende a disminuir con el incremento de NaCl. Sin embargo, la resistencia muestra un leve aumento en la arena caliza con porcentajes de NaCl inferiores al 2%, por tal motivo, el porcentaje máximo aceptable de NaCl para los materiales arena limosa y arena caliza no debe exceder del 2% respecto al peso del material.
- El porcentaje de compactación para los materiales arena limosa y arena caliza tienen un aumento con la adiciones de NaCl en porcentajes no mayores al 2%, sin embargo el porcentaje de CBR no se comporta de la misma manera. Para el material arena limosa el porcentaje de CBR disminuye, mientras que para el material arena caliza el porcentaje de CBR aumenta para la probeta compactada a 65 golpes.
- Al agregar NaCl a probetas de 2.5" de ancho y 5" de altura para ensayos de tres esfuerzos, compactadas con la densidad máxima obtenida del ensayo de proctor, se observa que el ángulo de fricción interna y la cohesión son inversamente proporcionales con cloruro de sodio. Para el material arena limosa, la adición de NaCl produce una reducción considerable en el ángulo de fricción interna lo que representaría una disminución de la capacidad de carga en el suelo. Sin embargo, aumenta la cohesión del suelo y causa un incremento en la deformación de la probeta. Para el material arena caliza, el comportamiento es distinto, ya que con cada incremento de porcentaje de NaCl, el ángulo de fricción interna aumenta y la cohesión disminuye.
- La estabilización con cloruro de sodio produce diferentes comportamientos en las características de los suelos, causa en algunos casos propiedades más desfavorables cuando el contenido de NaCl en la muestra de suelo es demasiado alto. Sin embargo, en porcentajes pequeños de cloruro de sodio los resultados pueden ser favorables, ya que mejora las propiedades mecánicas en los suelos.

- La forma adecuada de adicionar cloruro de sodio a los suelos es emplearla en grano, ya que de esta manera se evita problemas de corrosión en la maquinaria empleada. Con el método de disolución en agua. La sal no se disolvería adecuadamente, cuando se tienen humedades óptimas bajas se crea una mala homogenización.
- Al adicionar cloruro de sodio con un alto contenido de humedad, casi al punto de saturación, y dejar secar el material, se observa que la sal crea una cementación entre partículas dándole una mayor resistencia a la compresión y crea una capa blanquecina en la parte superior de la muestra.
- El conocimiento adecuado de las principales características físicas y mecánicas de los suelos es fundamental para saber cómo se comportará un suelo estabilizado con sal bajo cargas, cuando tenga diferentes tipos de humedad.

8.2.7. ESTUDIO DE COMPORTAMIENTO DE SUELO ESTABILIZADO CON SAL: FRENTE A LA ACCIÓN DEL AGUA, PARA DISTINTAS MEZCLAS.³⁰

En el presente trabajo se expone el uso de la sal como estabilizador químico de suelos, observando los efectos del agua sobre éste. Además, se presentan los resultados de distintas formas de adicionar el Cloruro de Sodio y así observar cuál es su comportamiento. También se analizan algunos aspectos de este proceso, a través de los resultados obtenidos dentro del laboratorio, para así tener más antecedentes de evaluación de carpetas de rodado en la ciudad de Valdivia, con tamaño máximo 2”.

Para esto los investigadores estimaron conveniente que el análisis fuese hecho a través de un suelo entregado por Vialidad, cuyo pozo se encuentra ubicado en la comuna de La Unión, al cual se le agregó Cloruro de Sodio en distintas formas.

La tesis fue desarrollada por Nicole Natalia Hinrichsen Triviños, Para optar al título de ingeniero civil en obras civiles en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Austral de Chile, dicha tesis fue asesorada por el Ing. Luis Collarte Concha. Ingeniero Civil Hidráulico, en la Ciudad de Valdivia – Chile en 2005, para el desarrollo de la misma se plantearon los siguientes objetivos principales:

- El objetivo de este trabajo de memoria es estudiar la estabilización de caminos con sal y ver su comportamiento con distintas formas de adicionar la sal.

³⁰ HINRICHSEN T, Nicole Natalia. Estudio de comportamiento de suelo estabilizado con sal: frente a la acción del agua, para distintas mezclas. Tesis para obtener título de ingeniero civil en obras civiles. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela Ingeniería Civil en Obras Civiles. 2005. 112 p. Ed, pagina tomada de: <http://catalogobiblioteca.uach.cl>

- Específicamente se persigue en este trabajo experimentar en la Región de Valdivia con carpetas granulares dosificadas tamaño máximo 2” para contar con más antecedentes de evaluación en la estabilización de suelos con sal.
- El suelo utilizado fue obtenido de un pozo de Vialidad llamado San Javier ubicado en La Unión Comuna de Río bueno, su clasificación por el método AASHTO es A – 1a y por el Unificado GP – GM.
- Además de ver el comportamiento y cuál es la mejor forma de adicionar la sal, ya sea en forma de: salmuera, granel y mitad granel mitad salmuera. (50% - 50%), contrastando el comportamiento de cada una de las muestras bajo las mismas condiciones; mismo tipo de suelo e igual dosificación de sal.
- Este trabajo se llevará a cabo con la finalidad de buscar una alternativa más eficiente y económica para el mejoramiento de los caminos sin pavimentar.
- Esto va vinculado directamente con analizar los datos de los ensayos de laboratorio realizados en las dependencias de la Universidad Austral de Chile LEMCO para ver si es o no factible llevarlo a la práctica.
- Con esto analizaremos sus propiedades mecánicas y los costos que implica la utilización de sal en la estabilización y ver cómo se comporta la sal con distintas formas de adicionarla.
- Será necesario ver granulometría, Límites de Consistencia, Proctor, CBR y compresión no confinada ya que son los factores primordiales para comparar los resultados en relación al suelo patrón.

Con la intención de socializar la metodología aplicada a esta tesis es necesario describir algunos aspectos que permitirán al lector ampliar los conocimientos de la aplicación de esta tecnología.

La estabilización con sal, tiene múltiples aplicaciones y no sólo en caminos donde pueden estabilizarse carpetas de rodado, bases, sub – bases, suelos naturales o subrasante, sino también pistas de aterrizaje en aeródromos, playa de estacionamiento, en centros de consumo, supermercados, colegios, multicanchas, patio de recreación, estadios y otras áreas como bodegas a la intemperie y patios industriales, veredas entre otros. Es en resumen adaptable a otros usos en una gran variedad.

Sobre las superficies estabilizadas con sal se puede imprimir, ejecutar doble tratamiento, asfaltar u hormigonar sin otra limitación de las propias de los productos a utilizar.

En la estabilización con sal como cualquier otro procedimiento, la calidad del trabajo terminado dependerá de los materiales que se usen y de que el constructor se ciña a una buena técnica de construcción y a las recomendaciones generales entregadas por el proveedor.

La maquinaria y su correcto uso, unido a condiciones mínimas en cuanto a saneamiento, pendientes longitudinales y transversales que permitan el escurrimiento de las aguas lluvias, una compactación mínima a un nivel de densidad de 95% y una homogeneización adecuada, permitirá tener una carpeta de rodado.

Secuencia tipo de trabajo para un camino estabilizado con sal.

Zanjado

Para proveer un drenaje adecuado se precederá a la construcción de zanjas que den flujo libre al agua de la sub base, dejándola escurrir de debajo de la superficie del camino por ambos lados y bajo del camino mismo. En lo que respecta a la sección del camino, es preferible un perfil tipo "A" con una pendiente de aproximadamente 2% para la zona Sur.

Escarificado

La reconstrucción de caminos existentes requiere un escarificado a una profundidad tal que permita a la hoja (motoniveladora) o revolvedor rotatorio trabajar completamente el material. Si se requiere material extra, será suministrado para obtener con el agregado total el espesor, granulometría y plasticidad especificada.

Aplicación de la sal

Esta debe efectuarse en forma uniforme en el ancho total del camino, la proporción exacta debe ser proporcionarse por el proyecto. La sal conviene agregarla tan pronto sea posible para aprovechar todas las revolturas del material, ya sea después del escarificado, sobre el cordón o directamente en las plantas de agregado según sea el caso.

Si la sal se agrega en solución, deben mantenerse las mismas cantidades de sal seca (sal seca es sal con humedad ambiente, lo que implica un contenido de humedad del orden de 1% a 3%).

Incorporación de la sal.

El agua debe ser agregada en el mezclado para obtener una adecuada mezcla y posterior compactación.

Mezcla.

Los materiales pueden ser mezclados “in situ” con una mezcladora rotatoria o con motoniveladora. La otra alternativa la constituye las plantas mezcladoras rotativas son muy eficaces para romper los terrones de arcilla, mezclando el fino con el agregado grueso. El mezclado con hoja (motoniveladora es, en general, más lento que el obtenido con las mezcladoras rotatorias, pero con un mínimo de 3 o 4 pasadas puede lograrse una adecuada mezcla. El amasado es otro buen método de mezclado. Para una buena revoltura es necesario que el material ruede sobre la hoja de la motoniveladora (si se usa este método), de modo de hacer más íntima la mezcla de los elementos (sal, agua, arcilla y materiales gruesos). El amasado consiste en apretar un material contra otro con la hoja de la motoniveladora a fin de moler los terrones de arcilla y mezclar homogéneamente los materiales constituyentes. Durante el mezclado deberá agregarse agua para mantener la humedad óptima.

Nivelado.

Después que el material ha sido completamente mezclado, este deberá ser acordonado en la berma. El material se extenderá sobre la base humedecida, alternado desde una berma a la otra para obtener un espesor mínimo, después de compactado, son necesarios humedecimientos y rodillado después de extender cada capa hasta que todo el material acordonado es colocado.

Continuas perfiladuras y rodillados son necesarios hasta que todo el agregado sea compactado hasta obtener en la superficie una apariencia de estar seco.

Compactado.

Mediante rodillo para obtener las densidades requeridas, desde los costados hacia adentro y hasta que todo el exceso de humedad desaparezca y la superficie tome una apariencia de vidriado. Para lograr la compactación es más efectivo un rodillo vibrador y con el fin de obtener una superficie mejor terminada se recomienda el empleo de rodillo neumático, en las últimas pasadas. El rodillo no debe ser pasado por el eje, sino siempre a ambos lados de él, para dejar claramente marcado el perfil transversal con el respectivo bombeo, de lo contrario se pueden producir deterioros por la acumulación de agua en el centro de la calzada.

Pasos constructivos recomendados para el caso de estabilizar el suelo existente.

- Humedecer la superficie del suelo existente, si es necesario.
- Escarificar en la profundidad indicada, acordonando el material.
- Humedecer y compactar la sub rasante al 95% DMCS.
- Extender el material acordonado.
- Agregar el 50% de la humedad optima
- Agregar la sal a la razón especificada
- Homogeneización del suelo con la sal mediante sucesivas pasadas de motoniveladora
- Agregar agua si es necesario para alcanzar humedad optima
- Extender y compactar a la densidad requerida
- Al momento de perfilar, no olvidar de dar las pendientes longitudinales y transversales adecuadas, que permitan un libre escurrimientos de las aguas lluvias
- La compactación deberá efectuarse, con un rodillo neumático, procediéndose desde el borde hacia el centro, evitando pasar el rodillo en el eje.
- La primera pasada de rodillo deberá efectuarse sin vibrar, y deberá procederse al recebo del material, en los puntos bajos de tal forma que la superficie quede lo más lisa y homogénea posible.
- Una vez terminada la compactación si fuere necesario se procederá a dar un riego superficial, con la finalidad de mantener la humedad de la superficie constante.
- Si se dispone de rodillo neumático terminar la compactación con él.
- El proceso de fragüe es de 10 a 15 días dependiendo del clima.
- Esto no es impedimento para que el camino pueda ser transitado, lo que debe efectuarse tomando algunas precauciones (no frenar bruscamente, ni acelerar los vehículos de forma que estos patinen)

- Si el clima es muy seco deberá rociarse la superficie con agua los primeros días hasta que complete el fragüe.

El proceso desarrollado permitió al investigador principal de esta tesis obtener las siguientes conclusiones generales:

- La estabilización con sal es un excelente matapolvo, su aplicación en la ciudad de Valdivia en la temporada de verano con un suelo granular de 2" de diámetro como máximo tendría un excelente resultado según los resultados de laboratorio, pero con el comienzo de las primeras lluvias tendríamos problemas. Por lo cual las mantenciones del camino serian periódicas, aumentando con esto el costo de construcción, volviéndose más económica la alternativa de estabilizar con un tratamiento Superficial simple en vez de estabilizar con sal, si el plazo de previsión de funcionamiento es superior a 10 años.
- El estudio económico indica que a mayor cantidad de años más nos conviene la estabilización con un Tratamiento Superficial Simple. En caso que se necesite por un período corto de tiempo, ya sea, por motivos de construcciones futuras en el camino u otros casos, sería económico estabilizar con sal, y en caso de necesitar un estabilizado a largo plazo, es más económico un Tratamiento Simple. Es decir, la elección de la solución para el camino dependerá del uso que se le quiera dar al camino en cuestión.
- Sin embargo, el número de mantenciones citadas en el punto 5.3 fueron supuestas para la región, colocándose en el peor escenario, debido a las constantes lluvias que elevan el costo de mantenimiento. Además es bueno mencionar que el costo de mantención por corrosión en los vehículos que transitan por este camino (no determinado en el presente trabajo) igual encarecen el costo de construcción.
- Los ensayos de laboratorio demuestran una notable disminución del índice de plasticidad con la adición del cloruro de sodio, disminuyendo el IP de un 6 del suelo patrón a un IP de 1 con la adición de sal en forma de salmuera y granel, manteniéndose semejantes ambos, y con la adición de 50% granel - 50% salmuera la muestra se volvió NP, lo cual es indudablemente beneficioso para su uso como estabilizador de suelos.
- La variación en la granulometría de la fracción fina aumento de un 6.9% del suelo patrón a un 12% con la adición del Cloruro de Sodio. Como la sal actúa fundamentalmente con las partículas finas de un estabilizado, este juega un papel más relevante que la fracción gruesa, esto implica que para esta fracción se acepta una variación granulométrica.

- Además, el cloruro de sodio produce un efecto positivo sobre la relación humedad – densidad de los suelos. Estos efectos se ven representados bajo dos cambios: una disminución de la humedad óptima y un aumento de la densidad compactada. Ambas de gran utilidad en estabilización. Apreciándose que la DMCS aumenta más con la adición de sal en forma a granel que las restantes dos formas de adicionar la sal, la DMCS del suelo patrón es 2.160 kg/m³ aumentando a 2.270 kg/m³ en forma granel ya que esta se mantiene en forma de grano en la muestra, formándose más predominante en la muestra.
- Los ensayos de C.B.R. del suelo patrón y de las distintas formas de adicionar la sal, efectuados en este estudio, no permitieron dar un juicio definitivo respecto de la influencia del cloruro de sodio.
- Sin embargo, con los ensayos de resistencia al corte de los suelos, medida a través de la resistencia a la compresión no confinada, permiten dar un juicio definitivo respecto de la influencia del cloruro de sodio. Aumentando su resistencia de 1.32 kg/cm² del suelo patrón, sin adición de sal, a un 1.48 kg/cm² con adición de sal a la muestra en forma de salmuera.

8.2.8. ANÁLISIS COMPARATIVO PARA EJECUCIÓN DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS, ENTRE PROCESOS TRADICIONALES Y EL ESTABILIZADOR DE SUELOS SOILTAC.³¹

Esta tesis para optar al título de: Ingeniero Constructor, fue desarrollada por María Loreto Araya Díaz, asesorada por el Ingeniero Constructor Magíster en Administración de Empresas Sr. Jorge Alvial Pantoja, para la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Construcción Civil de la Universidad Austral de Chile, en Valdivia – Chile 2010

El presente trabajo de titulación desarrollará una investigación respecto a las propiedades y usos de un producto innovador en nuestro país, presentando sus ventajas y desventajas para dar a conocer las diferentes propiedades y características de Soiltac frente a productos estabilizadores de suelos convencionales como el cloruro de sodio y cloruro de magnesio.

En el desarrollo de esta investigación se plantearon los siguientes objetivos dos generales y dos específicos:

- Contrastar los atributos técnicos del compuesto estabilizador Soiltac, y evaluar su aplicación en terminación de pavimentos de tránsito urbano.

³¹ ARAYA D, María Loreto. Análisis comparativo para ejecución de estabilización de suelos, entre procesos tradicionales y el estabilizador de suelos soiltac. Tesis de grado (Ingeniero Constructor). Valdivia – Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela de construcción Civil. 2010. 98 p

- Realizar un análisis comparativo mediante procedimientos de ejecución y costos entre estabilizadores de suelos convencionales y Soiltac.

Los dos objetivos específicos planteados son los siguientes:

- A través de un análisis cualitativo y cuantitativo de los estabilizadores convencionales y el nuevo producto, se pretende resolver técnicamente un proyecto, utilizando el producto de análisis.
- Realizar un análisis competitivo de Soiltac, mediante el análisis interno y externo del producto.

Lo que trata el presente proyecto en su proceso metodológico es un estudio de garantías que presenta Soiltac frente a sus competidores directos, como son los pavimentos estabilizados con sales, lo cual pretende entregar herramientas necesarias para la mayor captación de consumidores con mayores beneficios que los ya existentes en elementos tradicionales, tanto de tiempo como manejabilidad de los materiales.

Por otro lado en esta tesis se realizará un estudio comparativo sobre las ventajas cuantitativas y cualitativas de los productos convencionales de estabilización y el producto en cuestión.

También se realizará un análisis comparativo en relación a su aplicación y sus costos aplicándolo a un proyecto de pavimentación de tipo urbano de pocas exigencias, como es el acceso a “Villa El Palqui”, ubicado en la comuna de Monte Patria, ciudad El Palqui, Cuarta Región.

De acuerdo al análisis comparativo para la ejecución de estabilización de suelos entre procesos tradicionales y el estabilizador de suelos soiltac y la experiencia obtenida en los ensayos realizados en esta investigación se pudieron determinar las siguientes conclusiones:

- El producto analizado (Soiltac), si lo medimos frente a los convencionalmente utilizados (cloruro de sodio y cloruro de magnesio) en caminos poco transitados, como las ciudades que constan de un menor tráfico vehicular que las grandes urbes, podemos decir que en un futuro resultará bastante más económico debido a que los costos de implementación y mantenimiento resultan ser más baratos. Esto lleva a que la sociedad pueda acceder a productos de similar calidad a los tradicionalmente utilizados.
- La aplicación del producto es más rápida que los cloruros ya que su duración es alrededor de 15 días mientras que Soiltac es casi la mitad del

tiempo, debido a que no necesita tantos materiales ya que el compuesto es líquido y su curado resulta en menor tiempo, además, el terreno no necesita gran preparación, sólo remover el espesor necesario para su aplicación.

- Una de las principales desventajas que son consideradas al momento de estabilizar un suelo con cloruros es su costo de transporte ya que sus distribuidores se encuentran localizados en la zona norte, vale decir, primera y segunda región de nuestro país lo que puede incrementar hasta un 50 % en el costo del material en sí.
- En sus aplicaciones están la tópica y amasado, la primera tiene menos ventajas debido a que requiere una mantención más periódica; en cambio la segunda se encuentra más elaborada lo que hace que se adhiera con mayor facilidad a la tierra y esta no requiere de una mantención tan continua como la aplicación tópica que es utilizada convencionalmente como supresor de polvo.
- Para el estudio de proyecto realizado para la Comuna de Monte Patria, lo más adecuado es utilizar Soiltac, ya que a lo largo de los años su economía sería mayor, siendo adecuados los requisitos esperados para el tipo de tráfico que tiene este, ya que su durabilidad se notará al pasar el tiempo en comparación con los cloruros.

8.2.9. INFORME ESTABILIZACIÓN TRAMO PILOTO CARRETERA CARACOLI - MAROCAZO (INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS TERRITORIAL GUAJIRA).³²

El presente informe corresponde a los resultados de una caracterización geotécnica de un tramo de subrasante del corredor vial Caracoli-Marocazo, perteneciente a la red Terciaria del Instituto Nacional de Vías Territorial, Guajira, dentro de un proceso de estabilización química, con nuevos productos que minimicen los impactos y las intervenciones del medio circundante y que a la vez produzcan una mejora sustancial, medibles en las condiciones de resistencia del suelo de subrasante y reducción de los límites líquidos e índices de plasticidad de esos suelos, El proyecto fue ejecutado por el Ingeniero Contratista Yesid Cornejo Ochoa en el Municipio de Riohacha, Guajira en Julio de 2010.

Para el Proceso de estabilización química, se trabajó con aceites sulfonados, producto orgánico de características físicas y químicas singulares. El nombre comercial del producto, importado de Sudáfrica, es CON-AID SUPER, un compuesto aniónico sintético, derivado del ácido sulfónico y de fórmula química

³² Investigación (instituto nacional de vías territoriales de la guajira. Riohacha guajira, Colombia 2010. Informe Estabilización tramo piloto carretera Caracoli- Marocazo. Ed, pagina tomada de: www.laguajira.gov.co

R-SO₃H y del cual se encuentra una gran experiencia a nivel mundial, como caso de Argentina, Perú, Brasil entre otros, en donde se han obtenido estabilizaciones satisfactorias en suelos de características pobres en cuanto a su resistencia y plasticidad.

De acuerdo a la experiencia obtenida en la aplicación del químico se alcanzaron los siguientes resultados:

- El comportamiento de la estabilización química efectuada en el sector del corredor vial Caracolí – Marocazo, se evidencia en la permanencia del tránsito vehicular muy a pesar de la fuerte ola invernal que azotaba el área de influencia del proyecto y que en épocas anteriores para este mismo tipo de situación ocasionaba intransitabilidad e interrupciones por el mal estado en que quedaba la vía, ante la presencia de las precipitaciones en los períodos invernales.
- De los resultados obtenidos en este proyecto se puede observar que en uno de los tramos se obtuvieron los mayores incrementos de resistencia al corte entre el 300% y el 400% y en una zona a pesar de que se presentó una resistencia al corte del 80%, su incremento fue significativo comparado con los ensayos aplicados a la muestra inalterada.
- Una conclusión a priori de esta estabilización con aceite sulfonado es la permanencia en el tiempo de la transitabilidad de la vía comparada con la práctica usual de la reposición de afirmado sobre subrasantes no tratadas que presentan altos contenidos de plasticidad, bajos valores de resistencia, altos límites líquidos y las cuales, cuando aparecen las temporadas de lluvias rápidamente pierden el espesor de afirmado, reduciendo su nivel de servicio a situaciones críticas, que en la mayoría de los casos se convierten en vías intransitables. Esta situación cíclica en un análisis de costo demostraría otra de las ventajas de la estabilización química con los mencionados aceites.

8.2.10. BIOMINERALIZACIÓN APLICADA A LA MITIGACIÓN DE PROCESOS EROSIVOS SUPERFICIALES, EN UN SUELO TROPICAL DE LA CIUDAD DE MEDELLÍN.³³

Esta tesis de grado fue desarrollada por el Ingeniero Marco Tulio Arrieta Rodríguez y dirigida por la Doctora Yamile Valencia González para optar al título

³³ Arrieta R, Marco Tulio. Biom mineralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales, en un suelo tropical de la ciudad de Medellín. Tesis de grado para optar el título de magister en ingeniería en geotecnia. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. 2011. 88 p. Ed, pagina tomada de: www.bdigital.unal.edu.co

de magister en ingeniería en el Área – Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia, en la Facultad de Minas, en la Ciudad de Medellín en el año 2011, en esta tesis se planteó el siguiente objetivo general:

Mitigar un proceso erosivo superficial que afecte un suelo tropical del Valle de Aburrá, mediante la aplicación de un nutriente que genere condiciones propicias para la precipitación de carbonato de calcio por la micro flora nativa del suelo.

Además se plantearon tres objetivos específicos:

- Determinar el potencial que tiene la micro flora existente en un suelo tropical afectado por procesos erosivos superficiales para generar carbonato de calcio al agregar un medio nutriente.
- Caracterizar física, química, mineralógica y mecánicamente un suelo tropical afectado por procesos erosivos superficiales sin tratamiento y con tratamiento (Proceso de biomineralización).
- Comprobar la eficiencia del tratamiento en la mitigación del proceso erosivo superficial del suelo natural.

Lo siguiente fue realizar una descripción de la metodología y normas utilizadas para la recolección de muestras en campo y ejecución de ensayos de laboratorio realizados en esta investigación.

Recolección de muestras en campo

Las muestras fueron tomadas en tres puntos diferentes del Cerro Nutibara, en la ciudad de Medellín. Las muestras se tomaron en dos estados: Muestras alteradas (bolsas) y muestras Inalteradas (muestras de cajón).

Caracterización física del perfil

Para la caracterización física del perfil del suelo del Cerro Nutibara, se realizaron básicamente los siguientes ensayos:

- Humedad.
- Peso específico de los sólidos.
- Límites de Atterberg.
- Miniatura Compactada Tropical (MCT) expedita.

- Análisis granulométrico por método de tamizado mecánico e hidrómetro.

De las muestras de suelo inalteradas se determinó también la relación de vacíos y la saturación. Estas pruebas se ejecutaron en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, de acuerdo con las metodologías propuestas por la American Society for Testing Material (ASTM). Es importante destacar que el objetivo primordial de la presente investigación es analizar la mejora de las propiedades mecánicas del suelo con la adición del nutriente, las pruebas deben realizarse en el suelo natural (sin adición de nutriente) y en el suelo tratado (con la adición del nutriente).

Una vez desarrollado el objetivo principal de la presente investigación se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos en las pruebas índices, mostraron una reducción de la plasticidad del suelo y del índice de vacíos, probablemente debido a las agregaciones entre partículas causada por el tratamiento o a la precipitación de los carbonatos de calcio.
- El tratamiento generó una disminución en la contracción del suelo. Este resultado puede, desde el punto de vista geotécnico considerarse positivo, dado que se minimiza el riesgo de degeneración de grietas, contribuyendo a la estabilidad del suelo.
- Los cambios producidos por la adición del nutriente en la clasificación del perfil, donde se observa que a pesar de no haberse evidenciado ningún cambio en la clasificación por el método S.U.C.S, se tiene una reducción en la plasticidad. Es de anotar que aunque no se evidencia cambio alguno en la clasificación no necesariamente significa que el tratamiento no influyó en el comportamiento del suelo, más bien refleja la baja sensibilidad de los métodos utilizados para evaluar los niveles de cambio en las muestras. Por otra parte, la agregación que se genera con la adición del nutriente genera que el tamaño aparente de partícula aumente considerablemente, pasando de NG' (Suelos saprolíticos arcillosos) a NA' (arenas cuarzosas).
- Del ensayo de clasificación MCT rápida se analizó, la variación de la contracción en función del contenido de finos del suelo tratado y no tratado, mostrando que la adición del nutriente provoca disminución de la contracción, debido a la estabilización del suelo. Aspecto que desde el punto de vista geotécnico se considera como una mejora en la respuesta del suelo, ya que se puede minimizar el riesgo de retracción lo que contribuye a la estabilidad del suelo.

- Al adicionarle el nutriente las muestras pasan de tener pH ácido (pH menor a 7.0) a pH básico (pH mayor a 7.0). Este aumento en el pH proporciona un ambiente alcalino el cual es propicio para que las bacterias generen la precipitación de carbonato de calcio. Así mismo existe una estrecha relación entre el aumento del pH en la muestra y el contenido de carbonato de calcio, dado que al estar las muestras en un ambiente más básico, se tiene una mayor cantidad de Ca, por lo que se tiene que el nutriente propicia la formación de estos o en su defecto crea las condiciones necesarias y suficientes para la precipitación de carbonatos.
- En los suelos con tratamiento mediante la técnica de MEB, se observó que en todas las muestras se generaron precipitados en forma de fibras, que al analizarlas químicamente indican la presencia de calcio asociada a la precipitación de carbonato de calcio; adicionalmente el tratamiento aglomeró las partículas de suelo, aspectos que generan una reducción en sus vacíos, lo cual que se ve reflejado en una mejoría de las propiedades mecánicas del suelo tratado.
- En lo que se refiere a la resistencia al corte de la muestra, se presentó una mejora de hasta un 41% en los parámetros geomecánicos, mejora debida a la adición del nutriente, tanto para las muestras saturadas como no saturadas. Esta mejora se asocia a la cementación generada por el tratamiento.
- El tratamiento tiende a aumentar la succión total y matricial. Este cambio indica una reducción de la macroporosidad y microporosidad del suelo, debida en gran parte a la formación de concreciones entre granos de suelo provocadas por la precipitación de carbonatos y/o a la agregación generada por el nutriente, lo que reduce de manera considerable el tamaño de poros en las muestras.
- A partir de los ensayos de consolidación realizados se observa una menor deformación en los suelos tratados (disminución de los índices de colapso), reflejando una mejoría en el comportamiento de los materiales por el tratamiento.
- Con relación a los resultados de los ensayos del “*Pinhlote test*” y de desagregación, se verificó claramente que el tratamiento consiguió disminuir la erodibilidad de los suelos estudiados, indicando así la eficiencia de la técnica en la mitigación de los procesos erosivos.

8.2.11. ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS: APLICACIONES EN LA CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS.³⁴

En este artículo propuesto por los profesores del Departamento de Ingeniería de Construcción, de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Hernán de Solminihac T, Gerardo Echeverría G y Guillermo Thenoux Z, se presenta una primera visión de la estabilización de suelos, en base a una recopilación bibliográfica. Se describe la selección, dosificación y aspectos constructivos, relaciones con los tres estabilizantes químicos más utilizados en la práctica mundial: Cal, Cemento y Asfalto.

El objetivo principal de este trabajo es Presentar algunos conceptos sobre estabilización química de suelos para la construcción del pavimento, de modo de estudiar su aplicabilidad a nuestro país.

Es importante tener presente que existen dos objetivos globales para la estabilización de suelos. El primero, ya mencionado, es mejorar la calidad de la base, sub-base o suelo de sub-rasante de un pavimento y de este modo mejorar la estabilidad de la estructura completa del pavimento. El segundo objetivo, el cual podría tener aplicaciones y ventajas más inmediatas en Chile, es mejorar la superficie de rodado así como la estabilidad estructural de caminos no pavimentados.

Este artículo comienza con una metodología para seleccionar el aditivo más adecuado para cada tipo del suelo; después describe las características principales de los tres aditivos más comunes: cal, cemento y asfalto, señalando además algunos métodos de dosificación, las principales especificaciones que deben cumplir los materiales y agregados y presentando algunas indicaciones sobre los procesos constructivos.

Selección del tipo de estabilizante

En rigor se debieran realizar ensayos de terreno para definir las características de los suelos a estabilizar, ensayos de laboratorio sobre mezclas de prueba para determinar las propiedades del suelo estabilizado y finalmente, con un análisis de costo y energía, determinar el método más conveniente. Excepto para proyectos muy grandes, este sistema no es normalmente aplicado y por lo tanto, se han desarrollado guías simplificadas para la selección del tipo de estabilización. Este capítulo presenta algunos criterios para elegir el estabilizante químico más adecuado.

³⁴ Solminihac T. H; Echeverría G, G; Thenoux Z, G. Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile. estabilización química de suelos: aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos. Ed, pagina tomada de: www.ricuc.cl/index.php/ric/article/download/323/267

Estabilización con Cal

Generalidades

Como el efecto beneficioso de la estabilización con cal es el resultado de varias reacciones entre la parte fina del suelo y la cal, los suelos granulares finos responden más favorablemente al uso de la cal como estabilizante. Se recomienda que la fracción bajo malla N°200 del suelo sea mayor de 10% y que el Índice de Plasticidad sea mayor de 10.

Selección del porcentaje de contenido de cal

A partir de esta recomendación, existen diferentes métodos detallados para determinar el contenido de cal apropiado. Los componentes básicos (2) de este proceso son generalmente los siguientes:

- preparación de la mezcla
- preparación de la probeta
- condiciones de curado
- criterio para el diseño de una mezcla suelo-cal

Aspectos constructivos en los suelos estabilizados con cal

Básicamente existen tres métodos constructivos reconocidos para estabilizar con cal. Mezcla en sitio, mezcla en planta e inyección a presión. Independientemente del tipo la aplicación requerida, el proceso constructivo involucra las siguientes etapas: preparación del suelo, esparcimiento de la cal, mezclado y adición de agua, compactación, terminación y curado.

Estabilización con Cemento

Generalidades

La estabilización de suelos con cemento consiste en agregar cemento Portland a un suelo previamente pulverizado y permitir que esta mezcla se endurezca por la hidratación del cemento. Los principales factores que afectan las propiedades físicas de un suelo cemento son: tipo de suelo, cantidad de cemento, grado de mezclado, tiempo de curado y densidad seca de la mezcla compactada.

Selección del contenido de cemento

Dependiendo de las características del proyecto, se pueden utilizar métodos aproximados o más detallados para determinar el contenido de cemento requerido en la estabilización.

- Cantidades aproximadas.
- Método detallado.

Aspectos constructivos del suelo-cemento

Los procedimientos constructivos desarrollados para estabilización con cemento, han utilizado desde equipos simples de agricultura, hasta sofisticadas plantas dosificadoras mezcladoras. Independiente del equipo de construcción utilizado, se deben seguir algunos pasos básicos para materializar un suelo cemento:

- Escarificación y pulverización:
- Mezclado
- Adición de agua:
- Compactación:
- Compactación final

Estabilización con Asfalto

Generalidades

La estabilización de suelos con asfalto cumple principalmente con los siguientes objetivos:

- impermeabilización de suelos planos de sub-rasante
- mejoramiento de materiales poco aptos
- aporte estructural, lo que permite una reducción en el espesor de las capas superiores
- provisión de capas de rodadura para uso temporal
- reducción de polvo.

Selección del tipo y contenido de asfalto

La selección del tipo y cantidad de asfalto está influenciada por diversos aspectos; entre los principales cabe destacar: métodos y equipos de construcción, tipo de capa, condiciones de carga y ambientales, y propiedades de los agregados.

- Métodos y equipo de construcción.
- Tipo de capa.
- Condiciones de carga y ambientales.
- Propiedades de los agregados.
- El trabajo presentado corresponde a una recopilación bibliográfica y tiene por objeto servir de introducción al tema para aquellos lectores que no hayan tenido alguna experiencia previa en este campo.

8.2.12. POLÍMEROS PARA LA ESTABILIZACIÓN VOLUMÉTRICA DE ARCILLAS EXPANSIVAS.³⁵

Esta investigación fue desarrollada por: Teresa López Lara, Juan Bosco Hernández Zaragoza, Jaime Horta Rangel, Aleyda Coronado Márquez, Víctor Manuel Castaño Meneses, para la División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería; Universidad Autónoma de Querétaro, Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada; Universidad Nacional Autónoma de México, recibida en Junio 2009, y Aceptada en Enero de 2010.

Las arcillas expansivas sufren cambios de volumen debido a las variaciones en su humedad, adquirida por capilaridad y/o por infiltración. Cualquier construcción ligera asentada sobre este tipo de suelos experimentará deformaciones causadas por la expansión de la arcilla, dichos movimientos se traducen en grietas sobre muros y el levantamiento de pisos. Por lo anterior, se han propuesto diferentes soluciones para reducir el cambio volumétrico de las arcillas; algunos métodos modifican las características físico-químicas de las arcillas, agregando diferentes materiales que estabilizan el volumen de las mismas, tal es el caso de la cal, cemento hidráulico, fosfatos, sales de aluminio y recientemente, los polímeros. Esta investigación utiliza un poliuretano, que comúnmente se aplica para sellado

³⁵ López L, T; Hernández Z, J; Horta R, J; Coronado M, A; Castaño M, V. Universidad Autónoma de Querétaro, Universidad Nacional Autónoma de México, 2010. estabilización química de suelos: aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos. Ed, pagina tomada de: <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/MAY10/lopez.pdf>

de grietas en la construcción. Dicho polímero se aplica en la estabilización de cambios volumétricos de suelos expansivos. Se consideraron muestras remoldeadas de suelo natural y suelo tratado con polímero; en ambas muestras se determinaron propiedades índices, compactación, resistencia al esfuerzo cortante, expansión y consolidación; pruebas que determinaron si es factible la utilización de dicho polímero. El resultado más significativo en esta investigación es el que se refiere a la expansión. Las pruebas muestran que la mezclas suelo-polímero reducen la expansión en, aproximadamente, el 40%, respecto a la del suelo natural.

Con el fin de obtener resultados satisfactorios en esta investigación se propusieron los siguientes objetivos:

- Proponer diferentes soluciones para reducir el cambio volumétrico de las arcillas; por medio de métodos que modifican las características físico-químicas de las arcillas, agregando diferentes materiales que estabilizan el volumen de las mismas, tal es el caso de la cal, cemento hidráulico, fosfatos, sales de aluminio y recientemente, los polímeros.
- Utilizar poliuretano, que comúnmente se aplica para sellado de grietas en la construcción y en la estabilización de cambios volumétricos de suelos expansivos.

Esta investigación consistió en estudiar la adición de un polímero al suelo expansivo para determinar su efectividad en la disminución del cambio volumétrico, problema que estos suelos presentan cuando se hidratan; para lo cual, se realizaron varios ensayos que se detallan a continuación y que hacen parte del proceso metodológico de la investigación.

Propiedades índices. El suelo utilizado en esta investigación es del fraccionamiento Jacarandas, Querétaro, Qro (México), zona considerada con suelo altamente expansivo. Tanto al suelo natural como al suelo-polímero se les realizaron las pruebas para determinar los Límites Líquido, Plástico y de Contracción, así como el índice plástico. Estas pruebas permitieron clasificarlos, tomando como base el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

El polímero utilizado es un Poliuretano que se usa comúnmente en la industria de la construcción para el sellado de grietas, reparación de malecones y en el refuerzo de suelos granulares. Su humedad y viscosidad son bajas y su color es ámbar. Las mezclas suelo-polímero se realizaron al 2, 4, 6, 8 y 10%, respecto al peso seco del suelo. De los resultados obtenidos de estas pruebas, se decidió utilizar la mezcla suelo-polímero al 5%, combinación que mejor logra los objetivos de este estudio; además de que un mayor porcentaje, no mostró cambios significativos.

Peso específico seco máximo. Se realizó la prueba de compactación AASHTO Modificada Variante A, por medio de la cual se obtuvieron datos fundamentales como la humedad óptima y el peso específico seco para el suelo natural y suelo-polímero al 5%.

Resistencia a la compresión simple. Para dicha propiedad se utilizó la prueba de compresión simple. Se ensayaron probetas de suelo natural remoldeado y suelo-polímero al 5%, con humedad óptima y peso volumétrico seco máximo.

Expansión. Al igual que para la prueba de compresión simple, se elaboraron probetas de suelo natural y suelo-polímero, con humedad óptima y peso específico seco máximo. Luego las probetas se saturaron en el consolidómetro sin carga y se registró su expansión máxima (proceso que tardó aproximadamente tres semanas).

Consolidación. Después de la saturación de las probetas (expansión), se aplican cargas a éstas (0,5, 1,0, 2,0, 4,0, 8,0 y 16,0 kg). Por último, se procede a realizar la descarga de igual forma en que se fue aplicando la carga, pero ahora en sentido inverso.

Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio permitieron establecer las siguientes conclusiones:

- El suelo natural es un CH (suelo arcilloso de alta compresibilidad) y el suelo-polímero al 5% ubican a la mezcla en ML (limo de baja compresibilidad), de acuerdo a la clasificación del SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), lo que significa que esta mezcla reduce su potencial de expansión de alto a bajo.
- La mezcla suelo-polímero no mejora las propiedades de resistencia, aspecto que no es primordial en un suelo expansivo por presentar frecuentemente altas resistencias.
- Uno de los resultados más significativos dentro de esta investigación, es el que se refiere a la expansión. Las pruebas muestran que la mezcla suelo-polímero tiene una reducción en la expansión de alrededor del 40% respecto a la expansión del suelo natural.
- De las pruebas de consolidación, se obtuvo que el coeficiente de permeabilidad se reduce con polímero; lo que impide la entrada de agua, disminuyendo los cambios volumétricos del suelo expansivo. Además, el suelo con polímero es menos compresible que el natural, reduciendo significativamente posibles asentamientos.

8.2.13. FORMULACIÓN Y PRODUCCIÓN DE ESTABILIZADORES QUÍMICOS PARA SUELOS FINOS COLOMBIANOS.³⁶

La Corporación para la Investigación y Desarrollo en Asfaltos en el Sector Transporte e Industrial - **CORASFALTOS** es una corporación de carácter mixto, sin ánimo de lucro, cuyo objetivo se resume en contribuir al desarrollo del país, mediante la promoción de estrategias que consoliden una cultura de investigación y desarrollo en el área de los asfaltos y demás materiales de construcción de vías y usos industriales.

Precisamente la presente investigación desarrollada por esta corporación en la ciudad de Bogotá, Colombia, en el año 2009, tiene como objetivo principal brindar una metodología que permita el mejoramiento y mantenimiento duradero y estable, de las vías secundarias y terciarias, no pavimentadas, basado en análisis físico químico de los suelos que las conforman y con esta base realizar su posterior estabilización.

En Colombia, la investigación científica y/o tecnológica sobre el tema de los estabilizadores de suelos se reduce a la simple aplicación de productos importados o fabricados con materias primas en su mayoría provenientes de otros países, con formulaciones y dosificaciones patentadas. En algunos casos se limita a la utilización de cal, cemento (con o sin aditivos químicos), aceite sulfonado, teniendo en cuenta solamente los parámetros mecánicos sin correlacionarlos con las características químicas de los suelos, de mayor importancia para obtener buenos resultados de resistencia y de estabilización volumétrica.

Para corregir el problema de la inestabilidad de los suelos se requiere estabilizar los suelos en forma permanente, utilizando productos químicos, no tóxicos, que den a estos suelos un mejor comportamiento en servicio, a un menor costo.

Alcance.

- Caracterización física, química y mecánica del suelo.
- Con base en las características químicas del suelo, seleccionar y evaluar la acción individual de las sales comerciales que pueden reaccionar con ellos y determinar sus concentraciones óptimas.
- Analizar mecanismos físicos químicos que determinan el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos.

³⁶ Corasfaltos. Bogotá, Colombia 2009. formulación y producción de estabilizadores químicos para suelos finos colombianos. tesis enfocada a brindar una metodología que permita el mejoramiento y mantenimiento duradero y estable, de las vías secundarias y terciarias. Ed, pagina tomada de <http://www.corasfaltos.com/index>.

- Realizar la estabilización de los suelos en la vía, de acuerdo con las recomendaciones que se den en laboratorio.

El procedimiento seguido en el desarrollo de esta investigación se realizó de acuerdo a las siguientes etapas:

- Limpieza o escarificación.
- Nivelación de la subrasante.
- Escarificación de la capa a estabilizar.
- Aplicación de los productos químicos.
- Compactación.

La metodología que propusieron en la investigación, permite producir estabilizadores que actúan sobre el material plástico, impermeabilizando el suelo y controlando la humedad. El proyecto propicia el ahorro del consumo de materiales pétreos y gravas como estabilizadores, en defensa del medio ambiente.

Los resultados obtenidos de la investigación permitieron establecer que la técnica de estabilización de suelos aplicada al mejoramiento vial, se constituye en una de las mejores alternativas desde el punto de vista funcional, ambiental (sus componentes son no tóxicos) y económico, teniendo en cuenta que las regiones deben optimizar sus recursos en actividades que generalmente demandan grandes inversiones. La técnica permite que se emplee en forma intensiva la mano de obra o que se emplee maquinaria normal, que generalmente la posean los municipios.

En los suelos tipo CL, SC y OH, al igual que los OL y SM se ha encontrado que existen productos en el mercado nacional que, al 1% de concentración, lograron los mejores resultados en el mejoramiento de las propiedades de plasticidad y resistencia.

- La mayor parte de ellos redujeron totalmente (100%) la expansión en suelos arcillo-limosos y arenas limosas.
- Suelos casi impermeables. Por ejemplo: En arenas limosas con $K=1.28E-5$ cm/s se reduce el coeficiente de permeabilidad a $K=6.03E-7$ cm/s después del proceso de estabilización.
- En un intervalo de 7 a 14 días después de adicionados los productos se obtiene un mejoramiento en las propiedades de plasticidad y resistencia.

- Los productos son de fácil aplicación.
- Para la aplicación y homogenización, se requiere del uso de maquinaria común.
- Son productos nacionales de alta disponibilidad en el mercado y de bajo costo.
- La dosificación y el diseño de la mezcla se realiza para cada suelo dependiendo del análisis químico y de sus propiedades físicas y mecánicas.
- El material estabilizado es reciclable, es decir que si se produce fisuramiento se puede escarificar y recompactar sin detrimento de sus calidades adoptadas durante el proceso.
- Permite una estabilización física de los últimos centímetros de la capa superficial, usando emulsiones asfálticas, crudos pesados y asfaltos naturales con fines de impermeabilización.
- La vía se puede abrir al tránsito al día siguiente después de la estabilización.
- El costo aproximado por km, de vía estabilizada (Calzada de 6 m de ancho y 0.3m de espesor), es de \$88.850.000. Este costo contempla un doble riego de ligante asfáltico y arena.
- Esta técnica permite construir sobre las bases estabilizadas pavimentos económicos, como “slurry seal”, pavimentos con crudos pesados, con asfaltos naturales y/o tratamientos superficiales dobles.

8.2.14. TRATAMIENTO QUÍMICO DE SUELOS ACTIVOS II: LOS CRITERIOS DE DOSIFICACIÓN.³⁷

La presente investigación fue desarrollada por el ingeniero Fabián Hoyos Patiño, asociado con el profesor Juan Ramiro Sánchez U. de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín en el año 2000, con el aval de la Sociedad Colombiana de geotecnia.

En esta investigación parten del concepto de que los suelos activos son fácilmente reconocibles en el campo y en el laboratorio. A pesar de ello, no se ha contado

³⁷ HOYOS P, Fabián. RAMIRO S, Juan. Tratamiento Químico de Suelos Activos II: Los Criterios de Dosificación. En: revista de la Sociedad Colombiana de Geotecnia. 2000. vol1, p. 1-7.

con elementos de diagnóstico cuantitativo de uso generalizado para el manejo de su potencial de expansión.

Los criterios corrientemente utilizados en el diagnóstico del potencial de expansión de los suelos activos son apenas semicuantitativos cuando no puramente cualitativos, apoyados principalmente en los valores de los límites de consistencia y del contenido de coloides. Excepcionalmente se utiliza la capacidad de intercambio catiónico (CIC) como uno de los elementos de caracterización del suelo.

El potencial de expansión medido sea como índice de expansión o como presión de expansión presenta una correlación muy significativa con la capacidad de intercambio catiónico al punto en que ésta puede ser utilizada como un estimador cuantitativo confiable del potencial de expansión.

Existe también una estrecha correlación entre el índice de plasticidad y la capacidad de intercambio catiónico de manera que el índice de plasticidad puede llegar a ser utilizado como un estimador cuantitativo del potencial de expansión.

La capacidad de intercambio catiónico como estimador cuantitativo del potencial de expansión puede ser utilizado como criterio de dosificación en los tratamientos químicos de los suelos activos. En caso de no contar con los valores reales de la CIC, es posible estimarlos a partir de los valores del índice de plasticidad. La dosificación definida con este criterio puede diferir sustancialmente de la propuesta en métodos empíricos propuestos en la literatura para la estabilización con cal hidratada.

Los resultados obtenidos, muestran que distintos suelos tratados con sustancias diferentes, pero con el mismo criterio de dosificación, presentan un comportamiento similar: la actividad del suelo y el potencial de expansión disminuye a medida que la saturación de la capacidad de intercambio catiónico aumenta hasta alcanzar la saturación; la eficiencia del tratamiento es función de la saturación de la CIC del suelo y la sobresaturación no tiene efectos positivos en el tratamiento. Con excepción del tratamiento con hidróxido de calcio, no se observó en ningún caso una disminución significativa del potencial de expansión cuando se aplicó una cantidad mayor de sustancia que la necesaria para saturar la capacidad de intercambio catiónico.

8.2.15. PRUEBAS CON UN PRODUCTO ENZIMÁTICO COMO AGENTE ESTABILIZADOR DE SUELOS PARA CARRETERAS.³⁸

³⁸ RAVINES M, María Alejandra. pruebas con un producto enzimático como agente estabilizador de suelos para carreteras. Tesis para obtener el título como ingeniero civil. Piura, Perú. Universidad de Piura, 2010. 231 p. Ed, página tomada de: pirhua.udep.edu.pe

La presente tesis fue desarrollada por María Alejandra Ravines Merino para optar el Título de Ingeniero Civil en la Facultad de Ingeniería, en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Piura el 23 de Agosto de 2010, la tesis fue asesorada por el Ingeniero Jorge Timaná Rojas.

Esta tesis evalúa un producto relativamente nuevo en el mercado: *Perma-Zyme 22X*. Este es un aditivo a base de enzimas orgánicas que se vende como posible mejorador de la estabilidad de suelos y permitiría incrementar la resistencia de suelos finos plásticos - arcillosos.

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Suelos de la Universidad de Piura con base en la Norma Técnica Peruana adecuada para cada ensayo realizado. El estudio se centra en un solo tipo de suelo y las variaciones sufridas en sus propiedades mecánicas después del uso del aditivo químico.

En el diseño metodológico del experimento se consideró realizar diversas recopilaciones de información para la obtención de un análisis objetivo con respecto al problema planteado.

Número de pruebas a realizar y confiabilidad del experimento.

Para calcular el número de pruebas y su nivel de confiabilidad se tomaron los siguientes criterios:

- El número de pruebas a realizar se planteó sin un análisis estadístico pues el tipo de pruebas a realizarse como el CBR, límites de Atterberg, absorción por capilaridad, no son constantes para un suelo dado, sino que se aplican al estado en el cual se encuentra el suelo durante el ensayo, son pruebas que tienen base empírica y dependen entre otras cosas, de la experiencia del operador que las realiza. Por tanto el número de pruebas a realizar dependerán de los resultados que se vayan obteniendo y de la coherencia y precisión entre ellas; que nos permitan deducir un resultado objetivo.
- Este tipo de investigación requirió de diferentes tipos de muestras, que fueron necesarias de estudiar, razón por la cual se trató de abarcar todas las situaciones posibles dentro de un rango aceptable de pruebas. Por ejemplo: Primero se obtuvo una muestra general (que fue obtenida a partir de la mezcla de dos suelos obtenidos en canteras) del tipo de suelo CL; de esta muestra general se extrajeron todas las muestras que a continuación detallamos:
- Fracción gruesa y fracción fina; que fue la primera clasificación (más adelante describimos cada una de ellas, para un mayor entendimiento), en

cada una de estas muestras se hizo una investigación de cómo reaccionaba el suelo con aditivo y sin aditivo.

- Tanto la fracción fina como la fracción gruesa se dividieron en las siguientes muestras:
 - Muestra sin aditivo.
 - Muestra equivalente a 1 L de aditivo por 30 m^3 de material.
 - Muestra equivalente a 0,9 L de aditivo por 30 m^3 de material.
 - Muestra equivalente a 1,1 L de aditivo por 30 m^3 de material.
 - Muestra equivalente a 1,5 L de aditivo por 30 m^3 de material.
- Posteriormente, cada una de las muestras con aditivo fueron divididas según criterio de la tesista, según el ensayo CBR a realizar y según las características de la acción del aditivo en:
 - Muestras cuya prueba CBR fue según la norma NTP 339.145.
 - Muestras con 1 día de secado antes de colocarlas en la poza de agua durante la prueba CBR.
 - Muestras con 3 días de secado antes de colocarlas en la poza de agua durante la prueba CBR.
 - Por la forma en que fueron clasificadas las muestras se puede decir que aportan garantías suficientes para realizar inferencias fiables a partir de ellas. Además, todas las situaciones descritas eran necesarias de estudiar, pues abarcaban situaciones posibles.
- Una razón muy importante para conseguir un resultado coherente a través de un número mínimo pero necesario y suficiente de pruebas, es el costo tanto en tiempo como en recursos que se necesita. Por tanto se desarrolla una organización óptima que contemple este menor número de pruebas que lleve a los resultados buscados.

El proceso para realizar esta tesis ha sido largo; las primeras pruebas que se realizaron fueron en el semestre II del año 2008; los resultados obtenidos en esas pruebas que duraron 5 meses (agosto-diciembre) fueron desechados finalmente por errores producidos en el laboratorio. A raíz de esta situación se retomó el trabajo y las pruebas de laboratorio al siguiente

año (2009); en este siguiente período de pruebas (agosto – diciembre) se logró organizar las pruebas de tal modo que abarcaran un número mayor de ellas para las distintas situaciones planteadas (como se verificará más adelante); a la vez también se logró realizar otros tipos de ensayos que no se habían tomado en cuenta en el estudio anterior (absorción por capilaridad y límites de consistencia). Para organizar este nuevo período de pruebas dentro de un plazo de tiempo aceptable y dentro de un presupuesto ajustado, se requirió la ayuda de un técnico ajeno a la universidad que trabajara únicamente con la tesista y en el trabajo encomendado; con el permiso adecuado del jefe de laboratorio. En los días que se trabajaba, se realizaban distintas pruebas de forma paralela, dependiendo del progreso de cada etapa de una prueba, y trabajando hasta 12 horas seguidas en varias ocasiones. Las pruebas mecánicas y químicas se hicieron paralelamente, por cuestiones de tiempo.

La confiabilidad de los resultados será producto de considerar:

- A partir del resultado general de las pruebas, cuyo número se considerará el necesario para obtener una conclusión general coherente y verdadera. Este número depende del costo en tiempo y en recursos como se explica en el párrafo anterior y teniendo en cuenta además las diferentes situaciones a considerar para el uso del aditivo, también explicado en párrafos anteriores.

El número de ensayos realizados toma como referencia el número de frecuencia dada en las especificaciones técnicas para los diferentes tipos de ensayo. El número fue de 3 muestras para comparar en cada situación de muestreo.

Cabe señalar que las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras (EG-2000), siguen el mismo criterio de costo y tiempo; consideran un número de ensayos razonable, según el material y la característica a medir, (Capítulo 3, Sección 308, tabla N° 308-1: Ensayos y frecuencias).

- Los ensayos se realizaron siguiendo las normas técnicas peruanas correspondientes.
- Los ensayos realizados se hacen con la ayuda de técnicos con años de experiencia en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción (LEMAC).

De acuerdo a los ensayos realizados se determinaron las siguientes conclusiones:

Las pruebas mecánicas demuestran que existe una tendencia a mejorar ciertas propiedades:

Aumento del valor soporte relativo y de la resistencia. Se confirma una mejoría en los resultados de las pruebas CBR, con un aumento en los resultados de las pruebas de hasta el 200% en el material con aditivo con respecto al material sin aditivo.

Los mejores resultados se dieron en aquellas probetas en la cuales se trabajó con la mayor concentración de aditivo y con la condición de 72 horas de secado antes de colocarlas en la poza de curado.

Los resultados de CBR coinciden con los resultados de las pruebas hechas por el MTC, lo que confiere una mayor credibilidad a la investigación.

Existe la tendencia a la disminución de absorción de agua. El aditivo provoca la acción aglutinante sobre los materiales finos plásticos-arcillosos, por la cual en las probetas con mayor porcentaje de finos la absorción de agua (aunque no muy notoria) es menor.

Existe la tendencia a la disminución del hinchamiento. Mayor reducción en aquellas probetas a las cuales se dejó el aditivo actuar 72 horas antes de ponerlas en la cámara de curado.

La mayor reducción del hinchamiento lograda fue de un 50% con respecto a las probetas sin aditivo.

Desde el punto de vista físico-químico los parámetros medidos: sales solubles totales y conductividad eléctrica muestran los cambios producidos en el sistema suelo – aditivo. La diferencia sutil en la cantidad de sales solubles (en la muestra sin aditivo es mayor que en la muestra con aditivo) así como las mediciones de la conductividad eléctrica (en la muestra 1 es mayor que en la muestra 2); arrojan una posible tendencia de un efecto cementante (por la reducción de la cantidad de las sales y conductividad eléctrica) el que es originado por el aditivo.

8.2.16. ENSAYOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON EL ADITIVO RBI-81.³⁹

En el XIII Congreso Nacional de Ingeniería Civil cuya sede fue en la Ciudad de Puno - Perú, en Noviembre del 2001, se presenta un artículo desarrollado por Roxana M. Ugaz Palomino, Carlos Tupia Córdova, Jorge E. Alva Hurtado, En este artículo se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio realizados con una amplia gama de suelos peruanos y un aditivo estabilizador de suelos, el RBI-grado 81 de Road Building International. El aditivo fue proporcionado por Corporación Económica S.A. distribuidor del producto en el Perú.

Se han realizado ensayos estándar de clasificación de suelos, contenido de humedad y ensayos especiales de compactación Proctor Modificado, CBR y compresión no confinada para el material natural y con distintos porcentajes del estabilizador de suelos utilizado. Los ensayos se realizaron en los laboratorios de Hidroenergía Consultores en Ingeniería y de la Universidad Nacional de Ingeniería.

La evaluación de resultados indica que para una amplia gama de suelos ensayados puede lograrse sustantivos incrementos en la capacidad de soporte de los suelos con la adición del aditivo. El incremento en los valores de CBR es variable, en función de la naturaleza de los suelos y el porcentaje del aditivo, por lo que se recomienda realizar ensayos de laboratorio previo a su utilización, para determinar el porcentaje óptimo del aditivo a ser usado en la estabilización.

La estabilización de suelos para el diseño y construcción de pavimentos se define como un mejoramiento de los materiales de subrasante, subbase y base, incrementando de manera notoria su resistencia y capacidad de carga y disminuyendo su sensibilidad al agua y a los cambios volumétricos durante el ciclo de humedecimiento y secado.

Existen diversas formas de estabilización de suelos, desde las mecánicas que utilizan la combinación de diferentes materiales hasta las químicas que utilizan diversos aditivos, tales como cemento, cal, asfalto y estabilizadores líquidos. En este estudio se presentan los resultados preliminares de ensayos de estabilización de suelos peruanos con el aditivo RBI-81 desarrollado en Sudáfrica. Este material está compuesto por una mezcla de componentes inorgánicos y se presenta en forma de polvo.

³⁹ Ugaz P, R; Tupia C, C; Alva H, J. Puno, Perú 2001. ensayos de estabilización de suelos con el aditivo RBI-81. XIII congreso nacional de ingeniería civil. Ed, pagina tomada de: www.cismid.uni.edu.pe/descargas

Se han ejecutado ensayos de laboratorio con diferentes tipos de suelos, que se pueden clasificar en gravas limosas y arcillosas, arenas, arenas limosas y arcillosas, arcilla arenosa y limo arenoso. Se realizaron ensayos de granulometría y límites de consistencia, para la clasificación de suelos compactación con el ensayo Proctor Modificado y ensayos de Capacidad de Soporte de California (CBR).

La adición del aditivo al suelo se realizó inmediatamente antes de preparar los especímenes para los ensayos Proctor y CBR. Después de preparados los especímenes para el ensayo CBR se le dejó reposar por siete (7) días en recipiente hermético antes de sumergirlos en agua de acuerdo a las normas. Esta recomendación de curado por siete días previo a la inmersión en agua, está dada por el fabricante.

Evaluación de resultados

Se ensayaron muestras de gravas limosas, gravas arcillosas y gravas mal gradadas arcillosas, con porcentaje de aditivo de 0%, 2% y 4% en peso. Todas las gravas tuvieron un porcentaje de finos superior al 5% y hasta un valor máximo de 26%. Se notó un ligero incremento del límite líquido con el incremento del porcentaje del aditivo y una ligera disminución del índice plástico con el aumento del porcentaje de aditivo. En relación a los valores de compactación Proctor Modificado, se notó una ligera disminución en los valores de máxima densidad seca y un ligero aumento en el óptimo contenido de humedad. El incremento del valor del CBR es grande, con 2% del aditivo el valor de CBR se incrementa de 2.3 a 6 veces y con 4% del aditivo los valores aumentan de 6 a 25 veces para el CBR al 100% de la máxima densidad del ensayo Proctor Modificado.

También se ensayaron muestras de arenas mal gradadas y arenas limosas y arcillosas, con porcentajes de aditivo de 0% a 4% en peso. Las arenas tenían distintos porcentajes de gravas. Se pudo apreciar ligeras variaciones en los límites líquidos, límites plásticos y límites de contracción de las partículas finas de las arenas. El óptimo contenido de humedad de las arenas arcillosas aumenta ligeramente y disminuye ligeramente para las arenas limosas; sin embargo, se nota una reducción de 2% a 6% en la máxima densidad seca del ensayo Proctor Modificado. El aumento del CBR es bastante grande, con 2% de aditivo el CBR se incrementa de 2 a 5.9 veces y con 4% de aditivo el incremento es de 2.5 a 9.1 veces para el 100% de la máxima densidad del ensayo Proctor Modificado.

Se ensayó una muestra de arcilla limosa con 20% de arena. Los resultados de los límites de consistencia arrojaron 27% del límite líquido y 12% de índice plástico. Se utilizó aditivo en 2% y 4% en peso. Los valores de límite líquido e índice plástico disminuyen ligeramente. Casi no existe variación en los valores de máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad. Los valores de CBR aumentan hasta 4.25 veces para el 100% de la máxima densidad del ensayo

Proctor Modificado. El porcentaje de 2% produce valores ligeramente mayores que los de 4%, lo cual resultó sorprendente, pudiéndose haber sido producto de errores en los ensayos.

Finalmente se ensayó una muestra de limo con 26% de arena y 19% de grava. Se utilizó aditivo en 2% y 4% en peso. Los valores de CBR aumentan en 2 y 2.2 veces para el 100% de la máxima densidad del ensayo Proctor Modificado.

Según la evaluación de resultados realizada en esta investigación se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La utilización del aditivo ensayado determinó un incremento considerable de la capacidad de soporte en una amplia gama de suelos (Gravas, Arenas, Arcillas y Limos) brindándonos una solución al problema de la subrasante que se presenta al momento de la construcción de una carretera, donde muchas veces se emplea una estabilización mecánica para aumentar el valor del CBR.
- La determinación del óptimo contenido de aditivo deberá de garantizar, además de la capacidad de soporte (CBR) requerida, una adecuada resistencia a la durabilidad y desgaste (producidos por lluvias, congelamiento y el tráfico).
- El agente estabilizador presentó un comportamiento favorable en materiales gravosos arcillosos, gravosos limosos, arenosos arcillosos, arenosos limosos, limosos arenosos así como arcillosos arenosos. Para el caso de materiales finos como arcillas y limos a ser utilizados con el aditivo, el porcentaje de aditivo a utilizar podría ser mayor. Se recomienda un mayor número de ensayos en materiales finos.
- Para determinar un óptimo contenido del aditivo se deben realizar ensayos de laboratorio con los suelos naturales y diferentes porcentajes de aditivo.
- Se recomienda continuar con las investigaciones sobre el uso del aditivo RBI-Grado 81 en diferentes suelos ya que presenta un gran potencial en el aumento de capacidad de soporte de subrasante, subbases y bases.

8.2.17. DOCUMENTOS SOBRE INYECCIÓN DE SUELOS CON ADITIVOS QUÍMICOS.

8.2.17.1. INYECCIÓN DE RESINA DE POLIURETANO.⁴⁰

El presente estudio realizado por GEOSEC, compañía española que soluciona problemas de asentamiento de terrenos de cimentación de las construcciones y en la cual comparten tecnologías y experiencias en la consolidación de terrenos con inyecciones de eco-resinas expansivas para la seguridad y la estabilidad de las edificaciones.

En este estudio se pretende utilizar el método de inyección de resinas con poliuretano para consolidar y mejorar la resistencia físico-química del terreno reduciendo de esta forma los vacíos que el suelo posee.

Las resinas expansivas más comunes para la consolidación del terreno de rápida reacción pertenecen generalmente a la familia de los poliuretanos. El poliuretano es uno de los productos químicos industriales modernos más compatible con el hombre y su entorno gracias a la eficaz inercia físico-química de la espuma. En el campo de la consolidación del terreno con inyección expansiva de libre difusión se utiliza poliuretano de célula cerrada para garantizar la mayor resistencia mecánica y química una vez que es depositado bajo la cimentación del edificio.

Este tipo innovador de inyección de resina no puede ser considerada como una estructura de soporte en sí misma en el terreno ni tampoco puede ser interpretada como un sustitutivo del terreno mismo de cimentación. La resina de poliuretano es ante todo un instrumento eficaz de consolidación no invasivo y útil para planificar y alcanzar efectos químicos y físicos particulares en el terreno de cimentación gracias a su técnica específica de reacción química.

Originalmente, las primeras experiencias prácticas con inyecciones de consolidación se limitaban a terrenos permeables tales como los de grava, arena o rocas fracturadas. Con los avances en investigación se han desarrollado mezclas con una capacidad de penetración en el terreno mucho más elevada incluso, que por ejemplo, con el perfeccionamiento de microcementos y aditivos químicos que cada vez son más penetrantes.

A los métodos de inyección más conocidos tradicionalmente, que persiguen las mezclas del terreno con productos de diversa naturaleza, jet grouting, se unen las nuevas técnicas de inyección y nuevas mezclas de consolidación gracias a las cuales hoy en día es posible tratar también los terrenos de permeabilidad más

⁴⁰ Estudio Compañía GEOSEC. Madrid, España. Inyección de resina de poliuretano. Ed, pagina tomada de: <http://www.geosec.es/inyeccion-resina.html>

baja. Se trata de una nueva tecnología que explota la fluidez inicial y la sucesiva fuerza expansiva del producto químico inyectado definido comercialmente como resina de libre difusión, en el terreno. Este nuevo producto de inyección aprovecha instintivamente los puntos de menor energía que están presentes en el terreno ocupando y reduciendo vacíos y porosidades durante todo el avance en estado líquido que se produce en la primera fase de la inyección reduciendo vacíos, desplazando el agua intersticial en la sucesiva fase de expansión mecánica del compuesto en el terreno y endurecimiento in-situ (polimerización) que se completa, en el caso de la resina Geosec, después de aproximadamente 2 minutos de la inyección.

De acuerdo a la experiencia obtenida en la aplicación de este método de inyección de resina expansiva se lograron obtener las siguientes conclusiones:

- La mayoría de los terrenos de cimentación son compatibles con esta metodología, desde los de turba a los de arcilla, desde los arenosos a los de gravas, siendo también adecuado en casos donde es frecuente que el constructor del edificio haya reservado una capa de restos y escombros de demolición para apoyar la cimentación. En consecuencia, la eficacia de una intervención de consolidación a través de una inyección de resina expansiva depende tanto del conocimiento del terreno (clasificación y propiedades) como de las características del rendimiento del producto a inyectar, siendo estos factores condicionantes durante todo el proceso de aplicación.
- Si los principales requisitos de las mezclas de cemento armado son la fluidez necesaria para penetrar en los vacíos intersticiales, la capacidad para afianzarse, la flexibilidad y el relativo impacto ambiental, los de la resina polimérica expansiva son reconocibles por la densidad, la velocidad de reacción, la fuerza de expansión generada por la reacción química, la compatibilidad con el ambiente y la capacidad de conservación en el estado endurecido durante un tiempo mínimo relacionado con la duración de la obra y las propiedades específicas deseadas por el proyectista en condiciones ambientales conocidas.

8.2.17.2. INYECCIÓN DE SUELO POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE JET GROUTING.⁴¹

Este trabajo de graduación fue presentado por Héctor Andrés Ovando Pineda y asesorado por la Ingeniera Dilma Yanet mejicano Jol a la junta directiva de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en Julio de 2011, para optar el título de Ingeniero Civil.

La técnica del *Jet Grouting* como un método de mejoramiento de las propiedades del terreno fue creada y desarrollada en Japón alrededor de los años 70 y actualmente se encuentra bajo constante innovación. Esta técnica se clasifica como un método de inyección de una lechada de agente cementante que mejora las características del suelo, y que no depende de la granulometría del terreno para su aplicación. La diferencia, entre el *Jet Grouting* y los otros métodos de inyección, es que utiliza un chorro de alta velocidad como energía de erosión para romper la estructura del suelo, al mismo tiempo que inyecta y mezcla una lechada con el suelo, a fin de crear una nueva masa con mejores propiedades físicas.

Actualmente existen tres tipos de *Jet Grouting*, agrupados en: un sistema de fluido único, en el que se utiliza únicamente un líquido para corte y relleno del suelo y cuando involucra más de un fluido en su proceso, están el doble fluido y el triple fluido.

Para su ejecución, independientemente de los tipos de *Jet Grouting*, se requiere de una máquina perforadora, tubería de perforación especial, equipada en su punta con toberas de inyección y bombas de alta presión que deben ser suministradas constantemente con grandes volúmenes de lechada de agente cementante.

El resultado que se obtiene de la aplicación del *Jet Grouting* es un mejoramiento de la capacidad del suelo para soportar carga, así mismo, disminuye o elimina problemas de asentamiento por consolidación del terreno.

También se utiliza para transferir las cargas de la cimentación de una edificación a estratos de suelo más profundos o competentes.

En la presente tesis se plantearon los siguientes objetivos:

⁴¹ Ovando P, H. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, Julio 2011. Inyección de suelo por medio de la técnica de jet grouting, Ed, pagina tomada de: biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3278_C.pdf

Considerar los aspectos de inyección de suelo por medio de la técnica de *Jet Grouting*, a efecto de formular una propuesta que se puede adaptar a las condiciones y realidad de Guatemala.

Seis objetivos específicos:

- Establecer por qué se produce la inestabilidad en los taludes.
- Conocer el procedimiento de inyección de suelo.
- Proponer los beneficios de la técnica del *Jet Grouting*, como una buena técnica para la inyección de suelos.
- Describir los tipos de *Jet Grouting* que existen.
- Presentar el proceso constructivo y mostrar las respectivas aplicaciones, ventajas y desventajas de las técnicas de construcción expuestas.
- Fomentar el conocimiento y utilización de estas nuevas técnicas de construcción en las obras civiles realizadas dentro del territorio nacional.

El procedimiento que sigue la construcción del *Jet Grouting*, no varía mucho con respecto al comúnmente utilizado en la perforación para la construcción de anclajes, micro pilotes o en campañas de sondeos geotécnicos sin recuperación de núcleos de suelo. Este procedimiento está compuesto por tres pasos esenciales y uno opcional, que suele llevarse a cabo cuando el terreno no es fácil de erosionar. A continuación se expone cada uno de estos pasos que constituyen el método.

Instalación de maquinaria

Sobre el punto identificado topográficamente con anterioridad, se instala la perforadora, se nivela sobre una plataforma de trabajo, se recomienda que esta plataforma este lo más plana posible, para que el ángulo de inclinación no varíe, se acondiciona su mástil a fin de darle la inclinación requerida por el diseño a la perforación que se efectuará.

Ejecución de la perforación

La perforación se lleva a cabo a rotación hasta la cota deseada utilizando un tricono o tiraleta como elemento de corte que permite aportar un fluido de perforación acorde a las condiciones y tipo de suelo en el que se efectúa el taladro.

En el 90% de proyectos se utiliza agua como fluido de perforación; en el 10% restante se usa lechada de cemento, una mezcla de bentonita-cemento o espumas de productos químicos, como bicarbonato sódico y sulfato de aluminio. Se usa lechada de cemento, cuando se tiene la complicación de desprendimiento de las paredes del taladro; se usa la mezcla de bentonita cemento cuando hay peligro de que la tubería de perforación quede aprisionada cuando se perfora hasta profundidades considerablemente grandes; las espumas de productos químicos se usan en los casos en los que el terreno es muy abierto o al aire libre.

Inyección del chorro a alta velocidad

Consiste en la habilitación de las toberas para la inyección con chorro de alta velocidad, y en la cancelación de la o las aberturas utilizadas para la evacuación del fluido de perforación. En seguida se inicia el proceso de inyección de la lechada del agente cementante, desde el fondo de la perforación hacia arriba, extrayendo, a velocidades controladas, la tubería de perforación y rotándola 360 grados a una revolución constante o variable, o bien, sin darle rotación a los tramos de tubo o con rotaciones restringidas a ciertos ángulos nada más. La forma de rotación depende de la geometría de la masa de suelo tratado que se desea obtener, la cual será cilíndrica si se permite rotar la tubería sin restricciones (a 360 grados); secciones semi-circulares si se rota menos de 360 grados o paneles planos si no hay movimiento de la tubería salvo el de ascensión.

De acuerdo al procedimiento planteado en el desarrollo de esta tesis se desarrollaron seis conclusiones:

- La inestabilidad del suelo se da por la diferencia de niveles topográficos, entre los dos planos unidos por un talud, existe una tendencia natural de las masas a equilibrar sus potenciales energéticos.
- Las inyecciones, son procedimientos que se aplican al subsuelo, mediante los cuales se introduce en los poros o fisuras del medio a tratar una lechada, que se solidifica adquiriendo una resistencia determinada a través del tiempo.
- El *Jet Grouting* es un proceso que consiste en la desagregación del suelo, mezclándolo y parcialmente sustituyéndolo, por un agente cementante, normalmente cemento hidráulico.
- Actualmente existen tres tipos de *Jet Grouting*, agrupados en un sistema de fluido simple, en el que se utiliza únicamente un líquido para corte y relleno del suelo y un sistema de múltiples fluidos, que involucra más de un fluido en su proceso.

- Con el resultado de la aplicación del *Jet Grouting*, se obtiene un mejoramiento de la capacidad del suelo para soportar carga, disminuye o elimina problemas de asentamiento por consolidación del terreno.
- El *Jet Grouting* puede aplicarse prácticamente a casi todo tipo de suelo, lo que hace este método una solución técnica muy atractiva, además de brindar muchas otras ventajas.

8.2.17.3. INYECCIONES DE COMPACTACIÓN.⁴²

La compañía española Kellertera, especialista en la Ingeniería del terreno, propone un método de inyección de productos con el fin de compactar o estabilizar el suelo con un mortero de baja movilidad de forma que la mezcla inyectada no fluya por el terreno si no que quede concentrada alrededor del punto de inyección confiriendo resistencia y dureza en dicha perforación.

La metodología aplicada para implementar el proceso inicia en realizar la perforación hasta la profundidad requerida, definida previamente en la fase de diseño.

Una vez alcanzada la profundidad requerida, se procede a la inyección del mortero, controlando la presión y el volumen inyectados en el terreno. Después de haber inyectado el volumen definido en el proyecto para cada fase, o aquél compatible con todos los criterios de inyección, se procede a la extracción del varillaje entre 30 y 50 cm, dando comienzo a la siguiente fase de inyección.

En determinadas ocasiones puede ser aconsejable realizar la perforación en sentido inverso, de arriba a abajo.

El mortero empleado está compuesto por arena, cemento y aditivos plastificantes, el proceso completo consta de las siguientes fases:

Instalación de la tubería de inyección

- Perforación.
- Es importante el posicionamiento.
- Registro de la información del terreno obtenida de la perforación.

⁴² Kellerterra. Madrid, España. Inyecciones de compactación. Empresa especialista en la ingeniería del terreno. Ed, pagina tomada de.
www.kellerterra.com/pdf/catalogoinyeccionesdecompactacion.pdf

Comienzo de la inyección

- Normalmente de abajo a arriba aunque puede ejecutarse a la inversa.
- El control y calidad del mortero es importante.
- Normalmente la presión y/o el volumen están limitados.

Continuación de la inyección

- Se controla la presión, el volumen y el cono del mortero.
- La planificación de la secuencia de puntos de tratamiento es muy importante.

Criterio de inyección:

El desplazamiento del terreno circundante al punto de aplicación de la inyección provoca movimientos en el terreno. Los criterios para finalizar una fase de inyección y pasar a la siguiente son los que se enumeran a continuación:

- Cuando se alcance el volumen de mortero inyectado definido para cada fase.
- Cuando se alcance la máxima presión indicada en las especificaciones de proyecto.
- Cuando se produzca reflujos de mortero a través del taladro de la perforación.
- Cuando se produzcan movimientos en la estructura o en la plataforma de trabajo, fuera del rango admisible establecido por cálculo.

Hay una serie de requisitos que deben cumplirse para propiciar un correcto funcionamiento de las inyecciones de compactación y son la base para determinar las siguientes conclusiones:

- La tensión vertical en el estrato a tratar debe ser suficiente para permitir que la inyección desplace horizontalmente el terreno. Una elevación excesiva de la superficie evitará una correcta densificación.
- En suelos saturados, la velocidad de inyección deberá ser lo suficientemente lenta como para permitir disipar la presión intersticial. La secuencia de inyecciones es muy importante.

- Deberán evitarse los suelos con arcillas saturadas o expansivas.
- En los estratos más compresibles se producirá un mayor desplazamiento. Las inyecciones de compactación focalizan la mejora en las zonas más necesitadas.
- Interpretar los resultados de ensayos geotécnicos clásicos realizados con diferentes mezclas de aditivos químicos convencionalmente utilizados, a partir de la mineralogía de los materiales.
- Desarrollar un protocolo de ensayos específico para estabilizados de suelos derivados de cenizas volcánicas para aplicaciones geotécnicas.
- Determinar los beneficios, efectividad y protocolos de estabilización a partir del uso de aditivos químicos como método de estabilización.

8.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYOS FÍSICO-MECÁNICOS REALIZADOS CON DIFERENTES MEZCLAS DE ADITIVOS QUÍMICOS, UTILIZADOS EN SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS.

Con fundamento en las investigaciones documentadas y sabiendo que la estabilización química consiste en alterar las propiedades del suelo usando un aditivo químico, el cual mezclado con el terreno produce un cambio en las propiedades del mismo, de tal manera que se genere un incremento en la resistencia del suelo. Ello implicó entonces la selección de los aditivos químicos a adicionar, la metodología de trabajo, el armado de las probetas y la realización de los respectivos ensayos de laboratorio.

Inicialmente se realizaron pruebas piloto al suelo natural extrayendo muestras inalteradas del terreno a las que se les practicaron diversos ensayos como límites, granulometría y compresión inconfínada, todo esto con el fin de tomar los resultados como punto de referencia para determinar las variaciones que los aditivos causarían al ser aplicados a este tipo de suelo, y basados en la norma I.N.V. E – 152 – 07 COMPRESIÓN INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS se determinaría que tipo de consistencia tendría este suelo natural y las diferentes mezclas obtenidas con los aditivos químicos.

Tabla 10 Parámetros de consistencia del suelo según la resistencia a la compresión inconfiada

Consistencia del Suelo	Resistencia a la Compresión Inconfiada	
	Kg/cm ²	(kPa)
Muy blanda	< 0.25	(< 25)
Blanda	0.25-0.50	(25 - 50)
Mediana	0.50-1.00	(50 - 100)
Firme	1.00-2.00	(100 - 200)
Muy firme	2.00-4.00	(200 - 400)
Dura	>4.00	(> 400)

Fuente: norma I.N.V. E – 152 – 07 COMPRESIÓN INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS

Al llevarse a cabo estos ensayos se observó que los resultados arrojados de la compresión inconfiada para el suelo natural a una profundidad de 1.2 metros pertenecían a una consistencia mediana de suelo según la Tabla 10.

Tabla 11. Compresión inconfinaada suelo natural

MUEST	SONDEO	PROFUN	∅ (mm)	ALT (h) (mm)	PESO PROB (gr)
1	1	1.2	48.8	100.82	327.37

COMPR INCONF MUESTRA # 1	
DEFOR CONTR	CARGA AXIAL
10	8
20	13
30	20
40	22
50	28
60	31
80	39
100	49
120	59
140	70
160	83
180	90
200	78
220	54

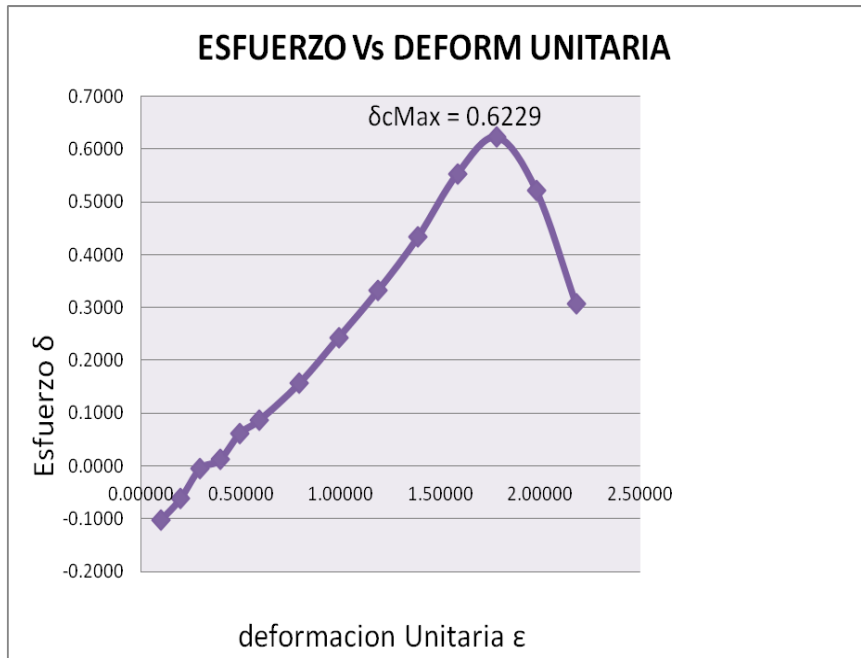


Figura 15 Esfuerzo vs Deformación unitaria Suelo Natural
Fuente: Proyecto de Investigación

Se observó que la muestra arrojó una carga axial de 90 donde se esperaría un buen esfuerzo máximo del suelo el cual sería determinado con los siguientes cálculos y como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Cálculo de esfuerzo y deformación unitaria.

PROB	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm)	Lo (mm)	Lo (cm)
1	48.8	4.88	2.44	18.69 4	100.8	10.08 2

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION AREA	DE	CALCULO ESFUERZO	DE	ECUACION
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1-\epsilon$		$\bar{\sigma}_c = P/A$		$Y=0.3337$ $(X)-6.8616$

DEF C (mm)	CAR AXIAL	DEF (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm)	COR AREA $A = A_0/1-\epsilon$	DEF C (mm)	Factor	mm	conv (cm)	ECUAC	P (Kg)	EFZO $\bar{\sigma}_c = P/A$	COHE $\bar{\sigma}_{cMax}/2$
10	8	1	10.082	0.09919	18.694	18.59	10	0.001	0.01	0.001	-4.192	-1.9055	-	
20	13	2		0.19837		18.50	20	0.001	0.02	0.002	-2.5235	-1.1470	-	
30	20	3		0.29756		18.40	30	0.001	0.03	0.003	-0.1876	-0.0853	-	
40	22	4		0.39675		18.30	40	0.001	0.04	0.004	0.4798	0.2181	0.0119	
50	28	5		0.49593		18.20	50	0.001	0.05	0.005	2.482	1.1282	0.0620	
60	31	6		0.59512		18.10	60	0.001	0.06	0.006	3.4831	1.5832	0.0875	
80	39	8		0.79349		17.90	80	0.001	0.08	0.008	6.1527	2.7967	0.1562	
100	49	10		0.99187		17.70	100	0.001	0.1	0.010	9.4897	4.3135	0.2437	
120	59	12		1.19024		17.50	120	0.001	0.12	0.012	12.8267	5.8303	0.3331	
140	70	14		1.38861		17.31	140	0.001	0.14	0.014	16.4974	7.4988	0.4333	
160	83	16		1.58699		17.11	160	0.001	0.16	0.016	20.8355	9.4707	0.5536	
180	90	18		1.78536		16.91	180	0.001	0.18	0.018	23.1714	10.5325	0.6229	0.3115

El máximo esfuerzo logrado por la muestra de suelo fue de 0.6229 kg/cm² por lo tanto esto indica que la consistencia del suelo sería mediana. (Ver tabla norma I.N.V. E – 152 – 07 COMPRESIÓN INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS). Por lo tanto basados en estos resultados y tomando estos datos como indicadores de la resistencia se empiezan a desarrollar pruebas ensayo – error con diferentes porcentajes de aditivo químico y humedades para llegar a un resultado que lograra el objetivo principal de esta investigación, el cual sería generar una mayor resistencia al suelo aplicando aditivos químicos.

Ahora bien, para las primeras pruebas se determinó que a una muestra de 300gr de suelo se le agregaría 2% de silicato de sodio que convertidos a la misma unidad sería 0.006kg o 6 gr y al mismo tiempo el agua aplicada sería del 20% donde su conversión sería 60 ml y que los golpes de la probeta serian 182 por capa debido a que se trabajó con un miniproctor que constaba de menores medidas.

Tabla 13 Medidas comparativas proctor modificado y miniproctor modificado

PROCTOR MODIFICADO		MINIPROCTOR MODIFICADO	
ALTURA (cm)	25	ALTURA (cm)	10
DIAMETRO (cm)	15.2	DIAMETRO (cm)	5
PIZON (Lb)	10	PIZON (Lb)	1.07

Cabe resaltar y como nota aclaratoria que todos estos datos, medidas, porcentajes, golpes por capas etc. Fueron obtenidas gracias a la información suministrada por un profesional de Corasfaltos quien por medio de un programa de propiedad exclusiva de la empresa quien adelantaba una investigación con este tipo de aditivos en busca del mejoramiento de la resistencia del suelo.

Con el fin de obtener una mejor reacción del aditivo sobre el suelo se decide dejar 7 días de curado en virtud de que el tiempo no podría ser mayor o menor a este, pues la prueba presentaba fisuras o simplemente no se consolidaba para realizar el ensayo de resistencia. Contando con que permanecía completamente envuelta en papel aluminio y llevada a una bolsa hermética para conservar su humedad después de que esta fuera fabricada y antes de ser ensayada o de realizarle la prueba de compresión inconfiada en la que basados en la norma I.N.V. E – 152– 07 COMPRESIÓN INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS se determinaría que tipo de consistencia generaría al suelo luego de aplicar los aditivo químico.

8.3.1. ADITIVO SILICATO DE SODIO

Sabiendo que esta investigación se desarrolló con 2 aditivos químicos (silicato de sodio y cal) se empezó eligiendo uno de los dos para desarrollar las pruebas inicialmente, en caso de que uno de ellos no sirviera, automáticamente se excluiría y se pasaría a trabajar con el siguiente químico. Así que se inició con el silicato de sodio y estos serían los resultados arrojados.

Tabla 14 Probetas iniciales con aditivo (silicato de sodio)

# PRUEBA	% SILICATO	% AGUA	CONCLUSIONES
1	2%	20%	Después de 4 días de aplicación del químico la probeta presenta fractura por completo.
2	2%	2%	La probeta no funciona no permite compactación.
3	2%	10%	Se determina que no se puede trabajar con humedades inferiores a 10%

Después de los 3 primeros intentos fallidos se decidió hacer una variación de agua considerable de 10% a 22% pero siempre conservando el porcentaje de aditivo (2%). Luego de 144 horas o 6 días de reacción la probeta tiene una apariencia normal y conserva la humedad, a pesar de que solo presenta unas pequeñas fisuras esta lista para ser ensayad

Posterior a ello en el séptimo día se saca la probeta se toman sus dimensiones pesos y Se realiza el ensayo de compresión inconfinaada arrojando los siguientes resultados:

Tabla 15 Carga axial probeta 2% de silicato con 22% de agua

PROB	OBSERV	SILICATO	AGUA	ELAB	HORA	ENSAYADA
1		2%	22%	14/05/2013		21/05/2013

PROB # 1	PESO (gr)	266.9
	DIAM (mm)	53.57
	ALTURA (mm)	78.74
	PESO TARA	57.4
	PESO H + T (gr)	84.1
	PESO S +T (gr)	74.6

DEF CONT	CARG AXIAL		
10	7	140	123
20	12	160	153
30	19	180	179
40	29	200	198
50	33	220	209
60	42	240	186
80	59		
100	75		
120	95		

Se observó en esta primera prueba que la carga axial dio muy alta (209), lo que representa un buen esfuerzo y se puede deducir del siguiente cuadro el cual consta principalmente de una deformación controlada, carga axial, deformación unitaria, corrección de área, esfuerzo, y cohesión si realmente los porcentajes de humedad y de aditivo funcionaron.

Tabla 16 Cálculos de esfuerzo y deformación unitaria probeta 2% silicato y 22% agua

PROBETA	% SILICA	% AGUA	\varnothing (mm)	\varnothing (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)
1	2	22	53.57	5.357	2.6785	22.539	101.6

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	CALCULO DE ESFUERZO
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1-\epsilon$	$\delta c = P/A$

DEF C (mm)	C AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	mm	conv (cm)	ECUAC	P (Kg)	$\delta c = P/A$ (kg/cm ²)	COHE $\delta c_{Max}/2$
10	7	1	10.160	0.098	22.539	22.44	10	0.01	0.001	-4.5257	-2.0571	-0.0917	
20	12	2		0.197		22.34	20	0.02	0.002	-2.857	-1.2987	-0.0581	
30	19	3		0.295		22.24	30	0.03	0.003	-0.521	-0.2370	-0.0107	
40	29	4		0.394		22.15	40	0.04	0.004	2.816	1.2799	0.0578	
50	33	5		0.492		22.05	50	0.05	0.005	4.151	1.8866	0.0856	
60	42	6		0.591		21.95	60	0.06	0.006	7.154	3.2517	0.1482	
80	59	8		0.787		21.75	80	0.08	0.008	12.827	5.8303	0.2680	
100	75	10		0.984		21.55	100	0.1	0.010	18.166	8.2572	0.3831	
120	95	12		1.181		21.36	120	0.12	0.012	24.840	11.2909	0.5287	
140	123	14		1.378		21.16	140	0.14	0.014	34.184	15.5380	0.7343	
	153	16		1.575		20.96	160	0.16	0.016	44.195	20.0884	0.9582	
180	179	18		1.772		20.77	180	0.18	0.018	52.871	24.0321	1.1572	
200	198	20		1.969		20.57	200	0.2	0.020	59.211	26.9141	1.3084	
220	209	22		2.165		20.37	220	0.22	0.022	62.882	28.5826	1.4029	0.7015

Sabiendo esto, se comienza a analizar el respectivo cuadro donde se muestra como una carga axial de 209 genera una deformación unitaria de 2.165 cm, una corrección área de 20.37 cm y al mismo tiempo un esfuerzo máximo de 1.4029 kg/cm² sin olvidar una cohesión de 0.7015 kg/cm² todos estos datos reflejan que el suelo tuvo una muy buena resistencia, lo que sería importante para esta investigación pues realmente lo que se busca es mejorar las condiciones físicas que presenta este tipo de suelo. Además se toman los datos del cuadro anterior para visualizar de una manera gráfica el máximo esfuerzo arrojado por la probeta así como su deformación unitaria:

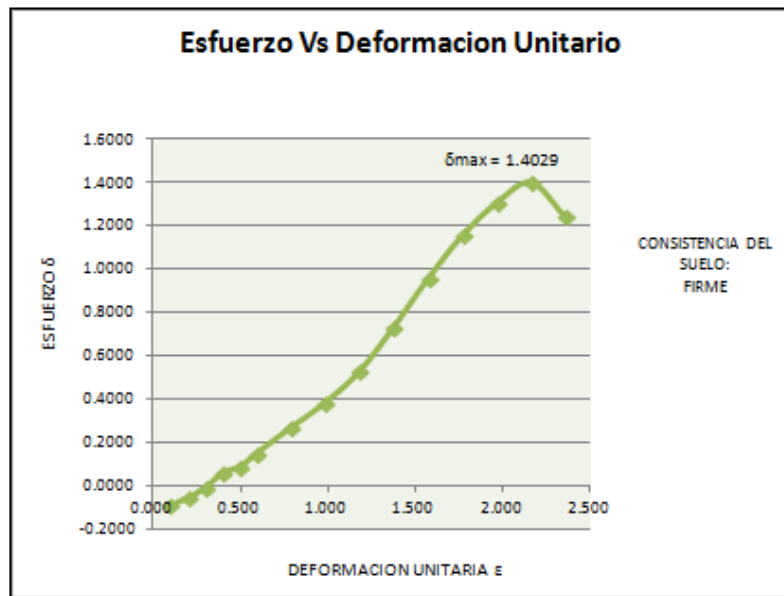


Figura 16 Esfuerzo Deformación unitaria probeta 2% silicato con 22% agua
Fuente: Proyecto de Investigación

Este 1.4029 (kg/cm²) que se muestra en la figura ($\delta_c = P/A$ (kg/cm²)) está indicando el esfuerzo máximo que generó la probeta, lo que demuestra que la consistencia del suelo paso de ser mediana a ser firme según el cuadro que presenta la norma I.N.V. E – 152 – 07. Pero a pesar de esto fue necesaria repetirla debido a que en el momento de armar la probeta esta no cumplió con la altura requerida para realizar el ensayo de compresión inconfiada probablemente por errores de procedimiento, de modo que no cumpliría con la relación esbeltez o relación 2-1 donde ($h = 2\phi$).

Teniendo en cuenta que los datos anteriores fueron erróneos por un mal procedimiento se opta por hacer un Reproceso de la muestra con 22% de agua y 2% de aditivo pero al repetirla esta vez estos fueron los resultados que arrojó:

Tabla 17 Reproceso probeta 2% silicato y 20% agua

PROB	OBSERV	SILIC	AGUA	ELAB	HORA	ENSAYADA
2		2%	22%	21/05/2013		28/05/2013

PROB # 2	PESO (gr)	335	DEFOR	CARG
	DIAM (mm)	54.12	CONT	AXIAL
	ALTURA (mm)	101.43	10	15
	PESO TARA	58.1	20	30
	PESO H + T (gr)	132.8	30	45
	PESO S +T (gr)	108.8	40	58
			50	78
			60	92
			80	122
			100	159
			120	169
			140	158

Esta vez disminuyó la carga axial pasó de 209 a 169 pero a un sigue siendo un buen dato para que el resultado del esfuerzo sea positivo.

Tabla 18 Cálculo de esfuerzo y deformación unitaria reproceso probeta 2% silicato y 20% agua

PROBET A	% SIL	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)
2	2	22	54.12	5.412	2.706	23.004	101.43

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	CALCULO DE ESFUERZO
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1-\epsilon$	$\delta c = P/A$

DEF C (mm)	C AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	mm	conv (cm)	ECUA	P (Kg)	$\delta c = P/A$ (kg/cm ²)	COHE $\delta c_{Max}/2$
10	15	1	10.143	0.099	23.004	22.91	10	0.01	0.001	-1.8561	-0.8437	-0.0368	
20	30	2		0.197		22.81	20	0.02	0.002	3.149	1.4315	0.0628	
30	45	3		0.296		22.71	30	0.03	0.003	8.155	3.7068	0.1632	
40	58	4		0.394		22.61	40	0.04	0.004	12.493	5.6786	0.2512	
50	78	5		0.493		22.51	50	0.05	0.005	19.167	8.7123	0.3870	
60	92	6		0.592		22.41	60	0.06	0.006	23.839	10.8358	0.4835	
80	122	8		0.789		22.22	80	0.08	0.008	33.850	15.3863	0.6926	
100	159	10		0.986		22.02	100	0.1	0.010	46.197	20.9985	0.9537	
120	169	12		1.183		21.82	120	0.12	0.012	49.534	22.5153	1.0318	0.5159
140	158	14		1.380		21.62	140	0.14	0.014	45.863	20.8468	0.9641	

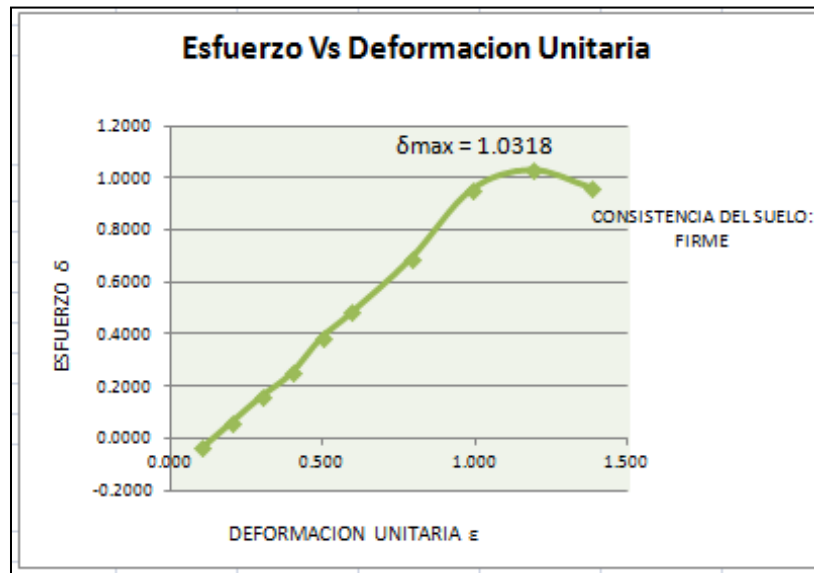


Figura 17 Reproceso probeta 2% silicato y 20% agua
Fuente: Proyecto de Investigación

Analizando el cuadro anterior y la gráfica nos damos cuenta que aunque varió el esfuerzo, realmente se mantuvo sobre 1 lo que significa que el suelo pasó de tener una consistencia mediana, que es la del suelo natural, a una consistencia firme por estar por encima de 1 según la tabla de la norma I.N.V. E – 152 – 07 esto realmente es un excelente resultado para las proporciones tan bajas que se manejaron en dicha prueba.

Gracias a este resultado se realizó por tercera vez este mismo procedimiento con iguales porcentajes tanto de agua como de aditivo químico y ahora el resultado fue el siguiente:

Tabla 19 Tercera probeta 2% silicato y 22% agua

PROB	OBSERV	SILICATO	AGUA	ELAB	HORA	ENSAYADA
3		2%	22%	27/06/2013		15/07/2013

PROBET # 3	PESO (gr)	296.7		DEFOR CONT	CARG AXIAL
	DIAM (mm)	54.00		10	0
	ALTURA (mm)	101.78		20	19
	PESO TARA	57.2		30	39
	PESO H + T (gr)	125.4		40	68.5
	PESO S +T (gr)	108.2		50	89.5
				60	111.5
				80	141
				100	148.5

Tabla 20 Cálculos esfuerzo deformación unitaria de tercera probeta 2% silicato y 22% agua

PROBET A	% SIL	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)
3	2	22	54.0	5.4	2.7	22.90	101.78

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	CALCULO DE ESFUERZO
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1-\epsilon$	$\delta_c = P/A$

DEF C (mm)	C AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	mm	conv (cm)	ECUAC	P (Kg)	$\delta_c = P/A$ (kg/cm ²)	COHE $\delta_{cMax}/2$
10	0	1	10.178	0.098	22.90	22.80	10	0.01	0.001	-6.8616	-3.1189	-0.1368	
20	19	2		0.197		22.71	20	0.02	0.002	-0.521	-0.2370	-0.0104	
30	39	3		0.295		22.61	30	0.03	0.003	6.153	2.7967	0.1237	
40	68.5	4		0.393		22.51	40	0.04	0.004	15.997	7.2713	0.3230	
50	89.5	5		0.491		22.41	50	0.05	0.005	23.005	10.4566	0.4666	
60	111.5	6		0.590		22.31	60	0.06	0.006	30.346	13.7936	0.6182	
80	141	8		0.786		22.12	80	0.08	0.008	40.190	18.2682	0.8260	
100	148.5	10		0.983		21.92	100	0.1	0.010	42.693	19.4058	0.8853	0.4427
120	130	12		1.179		21.72	120	0.12	0.012	36.519	16.5997	0.7641	

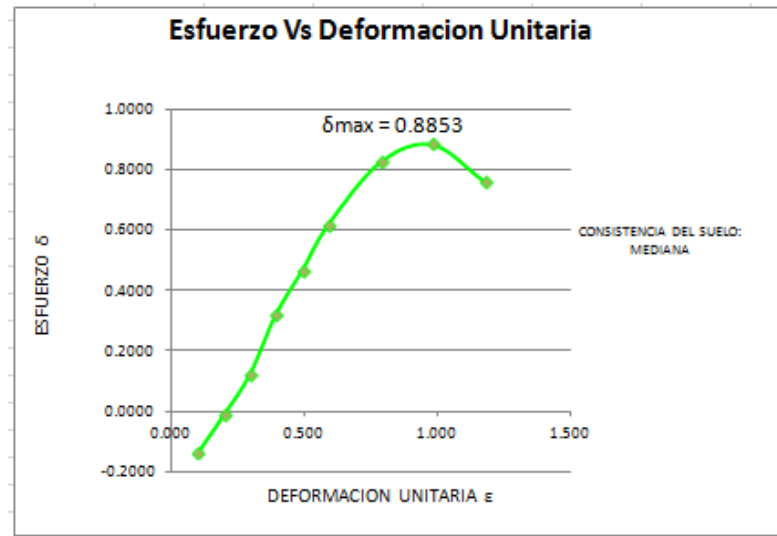


Figura 18 Tercera probeta de 2% silicato y 22% agua
 Fuente: Proyecto de Investigación

Curiosamente para este caso se pudo notar que tanto la carga axial como el esfuerzo cambiaron probablemente por una mala manipulación en el proceso lo que llevaría a un cambio en la consistencia del suelo o simplemente no tendría ninguna alteración, pues seguiría siendo la misma consistencia mediana del suelo natural. Por lo tanto se promediaron estos tres resultados para obtener un mejor resultado.

Ahora se continuó trabajando con nuevos porcentajes para este caso se elaboraron probetas con el 25% de agua y el mismo porcentaje de aditivo (2%).

Tabla 21 Carga axial probeta 2% silicato con 25% agua

PROB	OBSERV	SIL	AGUA	ELAB	HORA	ENSAYO
1		2%	25%	14/05/13		21/05/13

PROBE T # 1	PESO (gr)	336.4
	DIAM (mm)	53.41
	ALTURA (mm)	98.5
	PESO TARA	61.0
	PESO H + T (gr)	91.1
	PESO S +T (gr)	79.9

DEFOR C	C AXIAL				
10	7	140	55	320	159
20	10	160	67	340	165
30	12	180	74	360	170
40	14	200	89	380	165
50	19	220	98		
60	22	240	110		
80	30	260	123		
100	35	280	134		
120	44	300	149		

Tabla 22 Cálculo esfuerzo deformación unitaria probeta 2% silicato con 25% agua

PROBETA	% SIL	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)
1	2	25	53.41	5.341	2.6705	22.405	98.5

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	CALCULO DE ESFUERZO
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1-\epsilon$	$\delta c = P/A$

DEF C (mm)	C AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	mm	conv (cm)	ECUAC	P (Kg)	$\delta c = P/A$ (kg/cm ²)	COHE $\delta c_{Max}/2$
10	7	1	9.850	0.102	22.405	22.30	10	0.01	0.001	-4.5257	-2.0571	-0.0922	
20	10	2		0.203		22.20	20	0.02	0.002	-3.525	-1.6021	-0.0722	
30	12	3		0.305		22.10	30	0.03	0.003	-2.857	-1.2987	-0.0588	
40	14	4		0.406		22.00	40	0.04	0.004	-2.190	-0.9954	-0.0452	
50	19	5		0.508		21.90	50	0.05	0.005	-0.521	-0.2370	-0.0108	
60	22	6		0.609		21.80	60	0.06	0.006	0.480	0.2181	0.0100	
80	30	8		0.812		21.59	80	0.08	0.008	3.149	1.4315	0.0663	
100	35	10		1.015		21.39	100	0.1	0.010	4.818	2.1900	0.1024	
120	44	12		1.218		21.19	120	0.12	0.012	7.821	3.5551	0.1678	
140	55	14		1.421		20.98	140	0.14	0.014	11.492	5.2236	0.2489	
160	67	16		1.624		20.78	160	0.16	0.016	15.496	7.0438	0.3390	
180	74	18		1.827		20.58	180	0.18	0.018	17.832	8.1055	0.3939	
200	89	20		2.030		20.37	200	0.2	0.020	22.838	10.380	0.5095	

Tabla 23 Cálculo esfuerzo deformación unitaria probeta 2% silicato con 25% agua (Continuación)

DEF C (mm)	C AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	mm	conv (cm)	ECUAC	P (Kg)	$\delta_c = P/A$ (kg/cm ²)	COHE $\delta_{cMax}/2$
220	98	22		2.234		20.17	220	0.22	0.022	25.841	11.745	0.5823	
240	110	24		2.437		19.97	240	0.24	0.024	29.845	13.566	0.6794	
260	123	26		2.640		19.76	260	0.26	0.026	34.184	15.538	0.7861	
280	134	28		2.843		19.56	280	0.28	0.028	37.854	17.2065	0.8796	
300	149	30		3.046		19.36	300	0.3	0.030	42.860	19.4817	1.0063	
320	159	32		3.249		19.16	320	0.32	0.032	46.197	20.9985	1.0962	
340	165	34		3.452		18.95	340	0.34	0.034	48.199	21.9086	1.1560	
360	170	36		3.655		18.75	360	0.36	0.036	49.867	22.6670	1.2089	0.6045
380	165	38		3.858		18.55	380	0.38	0.038	48.199	21.9086	1.1813	

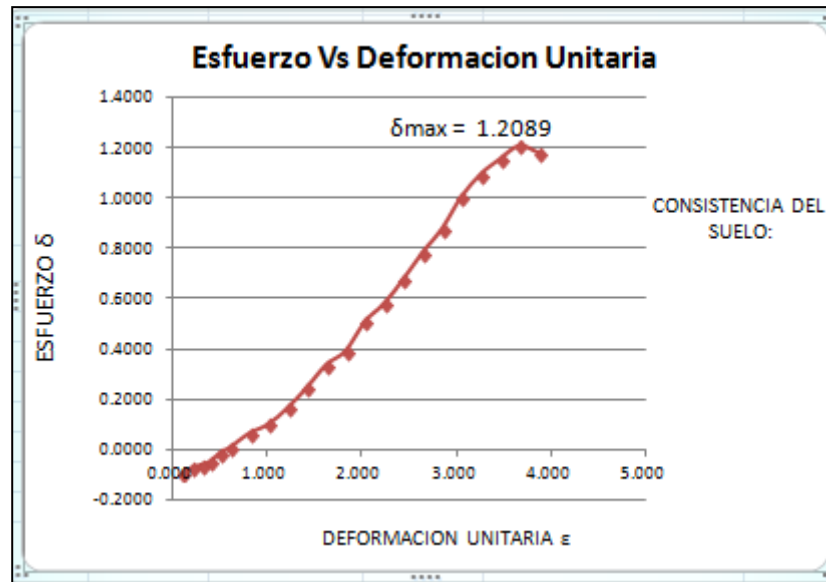


Figura 19 Probeta 2% silicato con 25% agua
 Fuente: proyecto de investigación

En esta nueva probeta se encontró que a pesar del aumento en el porcentaje de humedad la resistencia del suelo sigue dando por encima de 1 esto indica que la consistencia del suelo con esta humedad mejoró.

Luego de ello se decide bajar el porcentaje de aditivo al 1% con un aumento de humedad de 25% humedad esperando que esta vez aumentara el esfuerzo del suelo más que el porcentaje anterior, así que esta vez el resultado fue:

Tabla 24 Probeta con 1% silicato y 25% agua

PROB	OBSERV	SILICATO	AGUA	ELAB	HORA	ENSAYADA
1		1%	25%	22/05/2013		28/05/2013

PROBET # 1	PESO (gr)	340.1
	DIAM (mm)	54.40
	ALTURA (mm)	100.9
	PESO TARA	59.0
	PESO H + T (gr)	98.7
	PESO S +T (gr)	68.3

DEFOR CONT	CARG AXIAL		
10	8	140	85
20	8.5	160	112
30	18.5	180	144
40	35	200	165
50	43.5	220	189
60	56	240	166
80	63		
100	84		
120	84		

Se encontró que este porcentaje tanto de humedad como de aditivo generó una carga axial de 189 este es un tipo de resultado muy bueno, por lo tanto el esfuerzo que se esperaba superaría al esfuerzo del suelo natural.

Tabla 25 Cálculo esfuerzo- deformación probeta 1% silicato con 25% de agua

PROB	% SILICA	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)
1	1	25	54.40	5.44	2.72	23.243	100.9

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	DE	CALCULO DE ESFUERZO
$\epsilon = \Delta L / L_0$	$A = A_0 / (1 - \epsilon)$		$\delta_c = P / A$

DEF C (mm)	C AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L / L_0$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	mm	conv (cm)	ECUA	P (Kg)	$\delta_c = P/A$ (kg/cm ²)	COHE $\delta_{cMax}/2$
10	8	1	10.090	0.099	23.243	23.14	10	0.01	0.001	-4.19	-1.91	-0.0823	
20	8.5	2		0.198		23.04	20	0.02	0.002	-4.03	-1.83	-0.0794	
30	18.5	3		0.297		22.95	30	0.03	0.003	-0.69	-0.31	-0.0136	
40	35	4		0.396		22.85	40	0.04	0.004	4.82	2.19	0.0959	
50	43.5	5		0.496		22.75	50	0.05	0.005	7.65	3.48	0.1530	
60	56	6		0.595		22.65	60	0.06	0.006	11.83	5.38	0.2373	
80	63	8		0.793		22.45	80	0.08	0.008	14.16	6.44	0.2867	
100	84	10		0.991		22.25	100	0.1	0.010	21.17	9.62	0.4324	
120	84	12		1.189		22.05	120	0.12	0.012	21.17	9.62	0.4363	
140	85	14		1.388		21.86	140	0.14	0.014	21.50	9.77	0.4472	
160	112	16		1.586		21.66	160	0.16	0.016	30.51	13.87	0.6404	
180	144	18		1.784		21.46	180	0.18	0.018	41.19	18.72	0.8725	
200	165	20		1.982		21.26	200	0.2	0.020	48.20	21.91	1.0305	
220	189	22		2.180		21.06	220	0.22	0.022	56.21	25.55	1.2130	0.6065
240	166	24		2.379		20.86 ¹⁴²	240	0.24	0.024	48.53	22.06	1.0573	

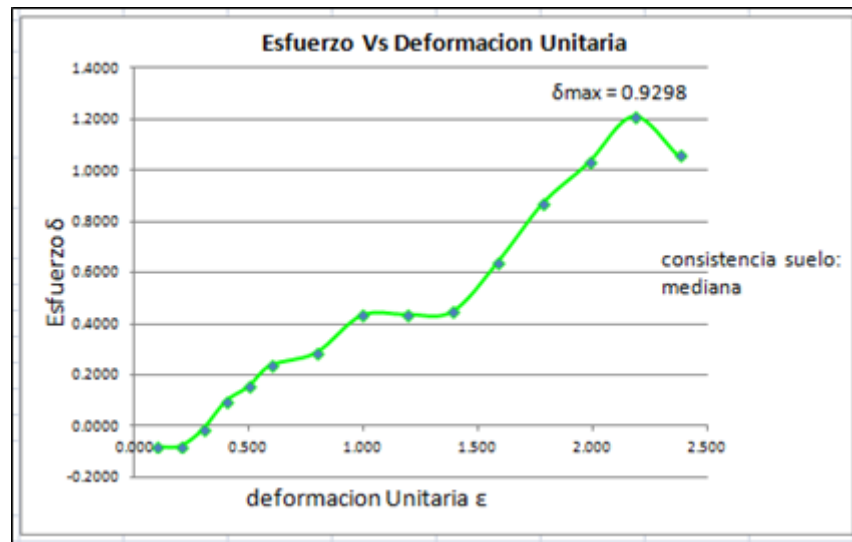


Figura 20 Esfuerzo–deformación probeta 1% silicato con 25% de agua
Fuente: Proyecto de Investigación

En esta ocasión se disminuyó el porcentaje del aditivo a un 1% esperando una reacción similar a las probetas del 2% el resultado fue menor del que se esperaba.

En la gráfica se puede notar que el máximo esfuerzo fue menor que 1 por lo tanto la consistencia del suelo es mediana lo que no reflejaría ningún cambio en la resistencia del suelo.

Luego de ello se decidió aumentar por primera vez el porcentaje del aditivo de 1% a un 4% esperando que la resistencia del suelo fuera superada por las anteriores. Por lo tanto se procedió a realizar la siguiente muestra que estaba compuesta por un 4% de silicato con un 22% de humedad y los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 26 Carga axial probeta 4% silicato con 22% agua

PROB	OBSERV	SILICATO	AGUA	ELAB	HORA	ENSAYADA
1		4%	22%	22/05/2013		28/05/2013

PROBET # 1	PESO (gr)	343.2
	DIAM (mm)	54.00
	ALTURA (mm)	100.93
	PESO TARA	62.2
	PESO H + T (gr)	96.1
	PESO S +T (gr)	85.5

DEFOR CONT	CARG AXIAL		
10	12.5	140	155
20	26.5	160	181
30	38	180	211
40	45	200	233
50	59	220	226
60	71	240	220
80	91.5	260	
100	114.5	280	
120	132.5	300	

Generando esta vez una carga axial de 233 superior a lo observado en las pruebas anteriores y lo que implicaría que el esfuerzo aumentaría de forma exponencial como se muestra en el siguiente cuadro:

Tabla 27 Cálculo esfuerzo – deformación probeta 4% silicato con 22% agua

PROBETA	% SIL	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)
1	4	22	54	5.4	2.7	22.902	100.93

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	CALCULO DE ESFUERZO
$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$	$A = \frac{A_0}{1-\epsilon}$	$\delta c = \frac{P}{A}$
		$Y=0.3337$ $(X)-6.8616$

DEF C (mm)	CARGA AXIAL	DEF C (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	mm	conv (cm)	ECUA C	P (Kg)	$\delta c = P/A$ (kg/cm ²)	COHE $\delta c_{Max}/2$
10	12.5	1	10.093	0.099	22.902	22.80	10	0.01	0.001	-2.6904	-1.2229	-0.0536	
20	26.5	2		0.198		22.70	20	0.02	0.002	1.981	0.9007	0.0397	
30	38	3		0.297		22.61	30	0.03	0.003	5.819	2.6450	0.1170	
40	45	4		0.396		22.51	40	0.04	0.004	8.155	3.7068	0.1647	
50	59	5		0.495		22.41	50	0.05	0.005	12.827	5.8303	0.2602	
60	71	6		0.594		22.31	60	0.06	0.006	16.831	7.6505	0.3430	
80	91.5	8		0.793		22.11	80	0.08	0.008	23.672	10.7600	0.4867	
100	114.5	10		0.991		21.91	100	0.1	0.010	31.347	14.2487	0.6503	
120	132.5	12		1.189		21.71	120	0.12	0.012	37.354	16.9789	0.7820	
140	155	14		1.387		21.52	140	0.14	0.014	44.862	20.3918	0.9478	
160	181	16		1.585		21.32	160	0.16	0.016	53.538	24.3355	1.1416	
180	211	18		1.783		21.12	180	0.18	0.018	63.549	28.8860	1.3678	
200	233	20		1.982		20.92	200	0.2	0.020	70.891	32.2230	1.5402	0.7701
220	226	22		2.180		20.72	220	0.22	0.022	68.555	31.1612	1.5037	

Se notó para este caso que el esfuerzo fue de 1.5402 (kg/cm²). En la siguiente grafica muestra mejor el esfuerzo máximo alcanzado, lo que generó expectativa pues el suelo paso de tener una consistencia media a una consistencia muy firme así que se tomó la decisión de realizar esta prueba nuevamente para estar seguros de que el aumento en el esfuerzo se debido al aditivo, y no a un mal procedimiento de elaboración o de manipulación en la probeta.

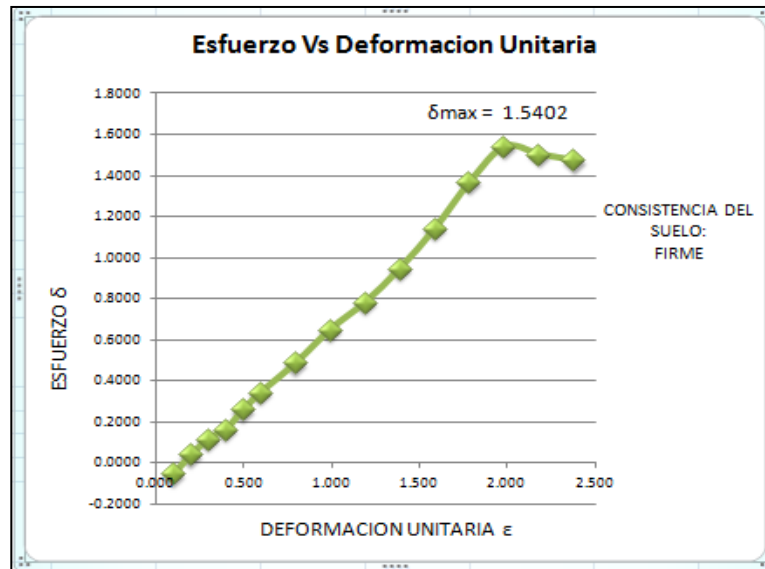


Figura 21 Esfuerzo – deformación unitaria 4% silicato con 22% de agua
Fuente: Proyecto de Investigación

Se realizó una prueba más con el 4% de silicato y 22% de humedad la cual arroja datos muy diferentes tales como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 28 Carga axial segunda probeta 4% silicato con 22% agua

PROB	OBSERV	SILICATO	AGUA	ELAB	HORA	ENSAYADA
2		4%	22%	08/09/2013		17/09/2013

PROB # 2	PESO (gr)	294.9
	DIAM (mm)	53.07
	ALTURA (mm)	103.46
	PESO TARA	59.9
	PESO H + T (gr)	132.4
	PESO S +T (gr)	109.3

DEFOR CONT	CARG AXIAL
10	5
20	14
30	23
40	40
50	52
60	69
80	80
100	75
120	70

Ahora se observa como después de un reproceso de esta prueba la carga axial disminuye considerablemente pasa de 233 a 80 por lo tanto el esfuerzo cambio según la tabla:

Tabla 29 Cálculo esfuerzo – deformación unitaria probeta 4% silicato con 22% agua

PROBETA	% SILI	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)
2	4	22	53.07	5.307	2.6535	22.12	103.46

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	CALCULO ESFUERZO	DE
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1 - \epsilon$	$\delta_c = P/A$	

DEFOR C (mm)	CARGA AXIAL	DEF C (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	mm	conv (cm)	ECUAC	P (Kg)	$\delta_c = P/A$ (kg/cm ²)	COHE $\delta_{cMax}/2$
10	5	1	10.346	0.097	22.120	22.02	10	0.01	0.001	-5.1931	-2.3605	-0.1072	
20	14	2		0.193		21.93	20	0.02	0.002	-2.190	-0.9954	-0.0454	
30	23	3		0.290		21.83	30	0.03	0.003	0.813	0.3698	0.0169	
40	40	4		0.387		21.73	40	0.04	0.004	6.486	2.9484	0.1357	
50	52	5		0.483		21.64	50	0.05	0.005	10.491	4.7685	0.2204	
60	69	6		0.580		21.54	60	0.06	0.006	16.164	7.3471	0.3411	
80	80	8		0.773		21.35	80	0.08	0.008	19.834	9.0156	0.4223	0.2112
100	75	10		0.967		21.15	100	0.1	0.010	18.166	8.2572	0.3903	
120	70	12		1.160		20.96	120	0.12	0.012	16.497	7.4988	0.3578	

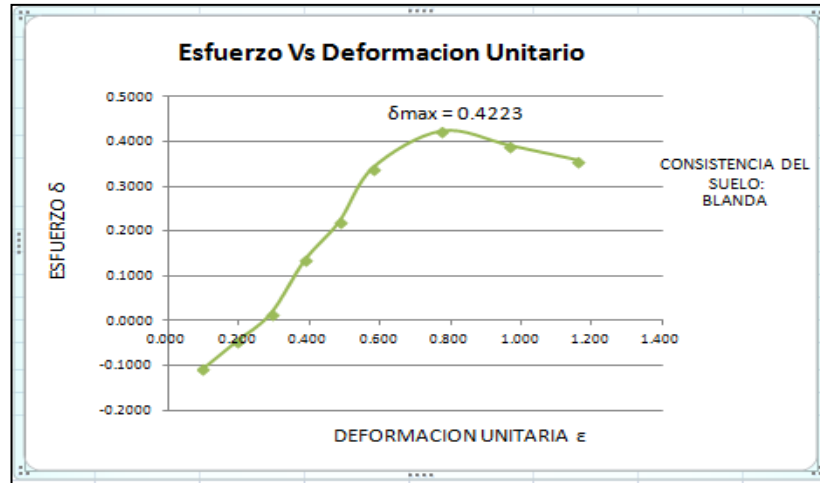


Figura 22 Esfuerzo deformación – deformación unitaria
Fuente: Proyecto de Investigación

En este nuevo proceso el esfuerzo tuvo una gran variación pues pasó de ser de 1.5 a ser de 0.4223 de manera que la consistencia del suelo se tornó blanda por lo tanto los valores cambiaron a diferencia de la prueba anterior, esto genera una nueva duda y fue necesario realizar una vez más este ensayo pues se pudo presentar un error en el procedimiento de esta prueba. Esta vez la prueba arrojó los siguientes resultados:

Tabla 30 Carga axial reproceso probeta 4% silicato con 22% agua

PROB	OBSERV	SILIC	AGUA	ELAB	HORA	ENSAYADA
3		4%	22%	08/09/2013		17/09/2013

PROBET # 3	PESO (gr)	290.1
	DIAM (mm)	52.62
	ALTURA (mm)	103.31
	PESO TARA	63.5
	PESO H + T (gr)	125.7
	PESO S +T (gr)	105.9

DEFOR CONT	CARG AXIAL
10	7
20	20
30	31
40	45
50	53
60	72
80	78
100	60
120	55

Tabla 31 Cálculo esfuerzo – deformación reproceso 4% silicato con 22% agua

PROB	% SILICA	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)	Lo (cm)
3	4	22	52.62	5.262	2.631	21.747	103.31	10.331

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	CALCULO DE ESFUERZO	ECUACION
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1-\epsilon$	$\delta_c = P/A$	$Y=0.3337 (X)-6.8616$

DEFORC (mm)	CARGA AXIAL	DEF C (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	mm	conv (cm)	ECUAC	P (Kg)	$\delta_c = P/A$ (kg/cm ²)	COHE $\delta_{cMax}/2$
10	7	1	10.331	0.097	21.747	21.65	10	0.01	0.001	-4.5257	2.0571	-0.0950	
20	20	2		0.194		21.55	20	0.02	0.002	-0.188	0.0853	-0.0040	
30	31	3		0.290		21.46	30	0.03	0.003	3.483	1.5832	0.0738	
40	45	4		0.387		21.36	40	0.04	0.004	8.155	3.7068	0.1735	
50	53	5		0.484		21.26	50	0.05	0.005	10.825	4.9202	0.2314	
60	72	6		0.581		21.17	60	0.06	0.006	17.165	7.8022	0.3686	
80	78	8		0.774		20.97	80	0.08	0.008	19.167	8.7123	0.4154	0.2077
100	60	10		0.968		20.78	100	0.1	0.010	13.160	5.9820	0.2879	
120	55	12		1.162		20.59	120	0.12	0.012	11.492	5.2236	0.2538	

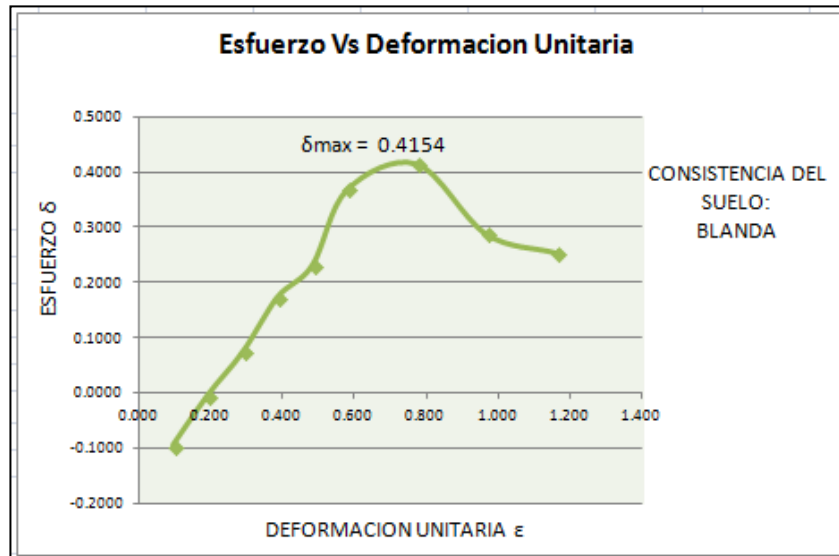


Figura 23 Esfuerzo – deformación reproceso 4% silicato con 22% agua
 Fuente: Proyecto de Investigación

Con esta última prueba se confirmó que realmente estos porcentajes de aditivo y de humedad no sirven pues disminuyen la resistencia del suelo en la gráfica se puede observar mejor como es que definitivamente estos porcentajes no son adecuados para este tipo de suelo.

Gracias a este tipo de resultados se tomó la decisión de aumentar el porcentaje de silicato nuevamente, esta vez sería de 6% con el mismo porcentaje de agua (22%).

Tabla 32 Carga axial probeta 6% silicato con 22% agua

PROB	OBSERV	SILIC	AGUA	ELAB	HORA	ENSAY
1		6%	22%	17/06/2013		24/06/2013

PROB # 1	PESO (gr)	320.8
	DIAM (mm)	54.04
	ALTURA (mm)	99.72
	PESO TARA (gr)	57.5
	PESO H + T (gr)	102.6
	PESO S +T (gr)	88.7

DEF CONTR	CARGA AXIAL
10	10
20	22.5
30	31.5
40	48.5
50	61
60	76.5
80	105.5
100	113.5
120	109.5
140	10

La carga axial sufrió un incremento en este ensayo como se muestra en el cuadro anterior así que se esperaba que el esfuerzo variara un poco con respecto a los demás ensayos.

Tabla 33 Cálculo esfuerzo – deformación unitaria 6% silicato con 22% agua

PROB	% SILIC	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)	Lo (cm)
1	6	22	54.04	5.404	2.702	22.936	99.72	9.972

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION AREA	DE	CALCULO DE ESFUERZO	ECUACION
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1-\epsilon$		$\delta_c = P/A$	$Y=0.3337$ $(X)-6.8616$

DEFOR C (mm)	CARGA AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	mm	convers (cm)	ECUAC	P (Kg)	$\delta_c = P/A$ (kg/cm ²)	COHE S $\delta_{cMax}/2$
10	10	1	9.97	0.100	22.936	22.84	10	0.01	0.001	-3.5246	-1.6021	-0.0702	
20	22.5	2		0.201		22.74	20	0.02	0.002	0.647	0.2939	0.0129	
30	31.5	3		0.301		22.64	30	0.03	0.003	3.650	1.6591	0.0733	
40	48.5	4		0.401		22.54	40	0.04	0.004	9.323	4.2377	0.1880	
50	61	5		0.501		22.43	50	0.05	0.005	13.494	6.1337	0.2734	
60	76.5	6		0.602		22.33	60	0.06	0.006	18.666	8.4848	0.3799	
80	105.5	8		0.802		22.13	80	0.08	0.008	28.344	12.8835	0.5821	
100	113.5	10		1.003		21.93	100	0.1	0.010	31.013	14.0970	0.6427	0.3214
120	109.5	12		1.203		21.73	120	0.12	0.012	29.679	13.4903	0.6207	
140	10	14		1.404		21.53	140	0.14	0.014	-3.525	-1.6021	-0.0744	

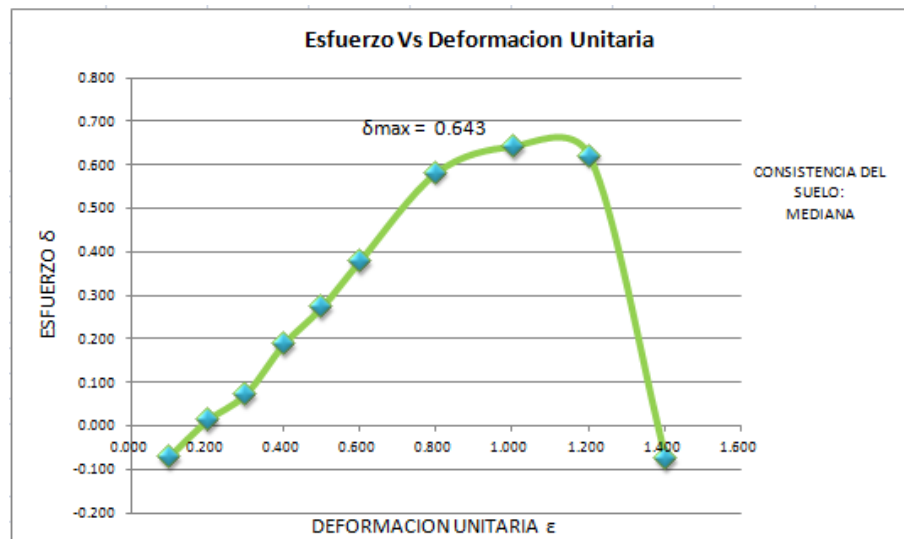


Figura 24 Esfuerzo – deformación unitaria 6% silicato con 22% agua
Fuente: Proyecto de Investigación

Por lo que se observa en la gráfica el suelo no generó un mayor esfuerzo comparado con el suelo natural pues no superó los valores de este por lo tanto la consistencia del suelo permaneció mediana, por tal motivo se realizaron 2 muestras más con el 6% de silicato y 22% de agua pero se llegó a los mismos resultados.

Tratando de mejorar cada vez más la resistencia del suelo se decide incrementar el porcentaje de silicato a un 8% con el mismo porcentaje de humedad (22%) pero a diferencia del resultado anterior esta probeta presento fractura total después de ser armada.

Así que por descartar toda posibilidad de buena reacción que tendría en caso de aumentar la dosificación del aditivo se incrementa otro poco el porcentaje de este a un 10% conservando el 22% humedad, con este definiríamos el lumbral o rango de porcentajes que podríamos manejar, pues aunque en muchas ocasiones las probetas se dejaban armar en otras ocasiones era casi imposible hacerlo.

Ahora este fue el resultado luego de ser armada y de tener su tiempo adecuado de reacción.

Se observó que la carga axial para este caso aumento de nuevo paso de 133 a 140 esto deba la posibilidad de que el esfuerzo aumentara como se ve reflejado en el siguiente cuadro.

Tabla 34 Carga axial probeta 10% silicato 22% agua

PROB	OBSERV	SIL	AGUA	ELABO	HORA	ENSAYADA
1		10%	22%	18/06/2013	10:10 p.m.	24/06/2013

PROB # 1	PESO (gr)	328.8
	DIAM (mm)	54.18
	ALTURA (mm)	101.31
	PESO TARA (gr)	59.4
	PESO H + T (gr)	96.9
	PESO S+T (gr)	84.7

DEF CONTR	CARGA AXIAL
10	7
20	18
30	25
40	39
50	52
60	59
80	91.5
100	122
120	140
140	137

Tabla 35 Cálculo esfuerzo - deformación unitaria 10% silicato con 22% agua

PROB	% SILIC	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm)	Lo (mm)	Lo (cm)
1	10%	22%	54.18	5.418	2.709	23.055	101.31	10.131

DEF UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	DE	CALCULO DE ESFZO	ECUACION
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1-\epsilon$		$\delta_c = P/A$	$Y=0.3337 (X)-6.8616$

DEF C (mm)	CARGA AXIAL	DEF C (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	mm	conv (cm)	ECUA	P (Kg)	$\delta_c = P/A$ (kg/cm ²)	COHES $\delta_c Max/2$
10	7	1	10.13	0.099	23.055	22.96	10	0.01	0.001	-	-2.0571	-0.0896	
20	18	2		0.197		22.86	20	0.02	0.002	-0.855	-0.3886	-0.0170	
30	25	3		0.296		22.76	30	0.03	0.003	1.481	0.6731	0.0296	
40	39	4		0.395		22.66	40	0.04	0.004	6.153	2.7967	0.1234	
50	52	5		0.494		22.56	50	0.05	0.005	10.491	4.7685	0.2114	
60	59	6		0.592		22.46	60	0.06	0.006	12.827	5.8303	0.2596	
80	91.5	8		0.790		22.27	80	0.08	0.008	23.672	10.7600	0.4833	
100	122	10		0.987		22.07	100	0.1	0.010	33.850	15.3863	0.6972	
120	140	12		1.184		21.87	120	0.12	0.012	39.856	18.1165	0.8283	0.4142
140	137	14		1.382		21.67	140	0.14	0.014	38.855	17.6615	0.8149	

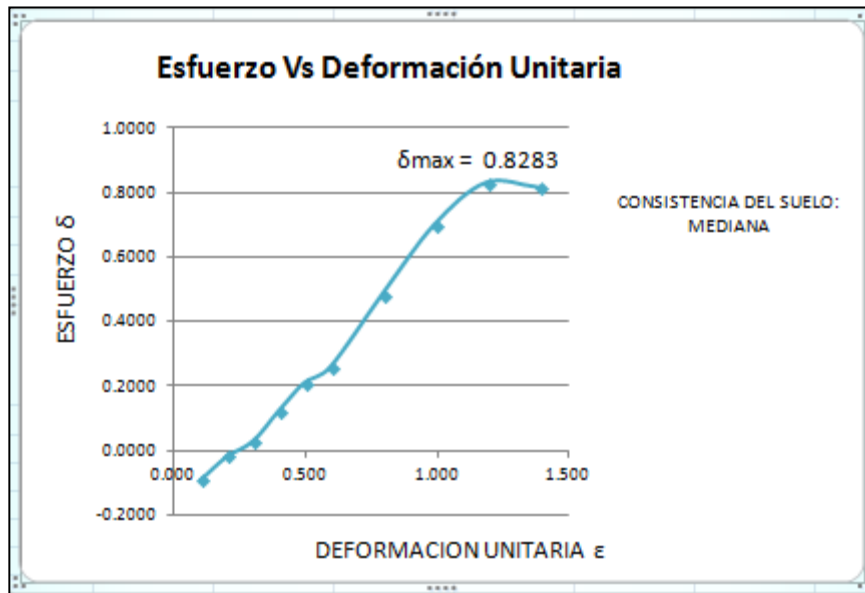


Figura 25 Esfuerzo - Deformación unitaria 10% silicato con 22% agua
 Fuente: Proyecto de Investigación

Para este caso vemos como incrementa la resistencia del suelo ya su esfuerzo máximo está muy cerca de 1 lo que significaría que el silicato a este porcentaje si está generando un cambio, no obstante los porcentajes de aditivo para que funcionen o genere una mejor consistencia en este suelo deberá de ser altos.

Luego de todos estos resultados y sabiendo que el proceso de investigación estaba reflejado en el ensayo-error se tomó la decisión esta vez de incrementar el porcentaje de humedad, pasar de un 22% a un 25% para saber que reacción tendría el suelo en este caso, pero se decidió mantener un porcentaje de 4% para saber que tan pertinente era trabajar con dicho porcentaje pero ahora con un poco más de humedad.

Los resultados encontrados ahora fueron:

Tabla 36 Carga axial probeta 4% silicato con 25% agua

PROB	OBSERV	SILICATO	AGUA	ELAB	HORA	ENSAYADA
1		4%	25%			

PROBET # 1	PESO (gr)	326.9
	DIAM (mm)	53.12
	ALTURA (mm)	103.33
	PESO TARA	60.9
	PESO H + T (gr)	106.1
	PESO S +T (gr)	91.1

DEFOR CONT	CARG AXIAL		
10	5	140	97
20	11		
30	15		
40	26		
50	32		
60	54		
80	81		
100	101		
120	105		

En esta prueba la carga axial fue buena pues subió a 105 así que se esperaba que estos datos arrojaran un buen esfuerzo según el siguiente cuadro:

Tabla 37 Cálculo esfuerzo–deformación unitaria 4% silicato con 25% agua

PROBETA	% SIL	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)
1	4	25	53.12	5.312	2.656	22.16	103.33

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	CALCULO ESFUERZO	DE
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1-\epsilon$	$\delta c = P/A$	

DEFOR C (mm)	CARGA AXIAL	DEF C (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/L_0$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	mm	conv (cm)	ECUAC	P (Kg)	$\delta c = P/A$ (kg/cm ²)	COHE $\delta c_{Max}/2$
10	5	1	10.333	0.097	22.16	22.07	10	0.01	0.001	-5.1931	-2.3605	-0.1070	
20	11	2		0.194		21.97	20	0.02	0.002	-3.191	-1.4504	-0.0660	
30	15	3		0.290		21.87	30	0.03	0.003	-1.856	-0.8437	-0.0386	
40	26	4		0.387		21.77	40	0.04	0.004	1.815	0.8248	0.0379	
50	32	5		0.484		21.68	50	0.05	0.005	3.817	1.7349	0.0800	
60	54	6		0.581		21.58	60	0.06	0.006	11.158	5.0719	0.2350	
80	81	8		0.774		21.39	80	0.08	0.008	20.168	9.1673	0.4286	
100	101	10		0.968		21.19	100	0.1	0.010	26.842	12.2010	0.5757	
120	105	12		1.161		21.00	120	0.12	0.012	28.177	12.8077	0.6099	0.3049
140	97	14		1.355		20.81	140	0.14	0.014	25.507	11.5942	0.5572	

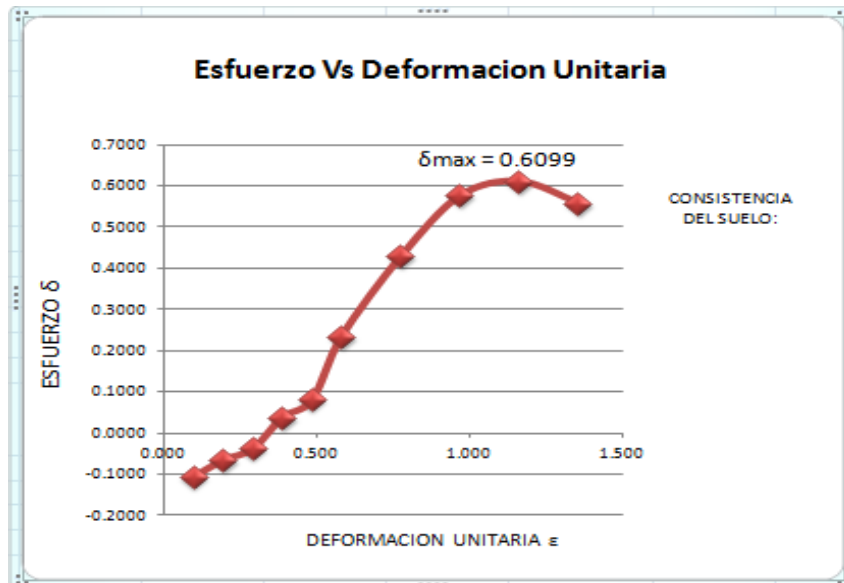


Figura 26 Esfuerzo – Deformación unitaria 4% silicato con 25% agua
Fuente: Proyecto de Investigación

Esta vez el resultado no fue nada diferente comparado con los anteriores, el suelo siguió conservando su consistencia casi natural por lo que se determinó aumentar una vez más el porcentaje de aditivo de un 4% a un 6% pero con el mismo porcentaje de humedad (25%).

Tabla 38 Carga axial probeta 6% silicato con 25% agua

PROB	OBSERV	SIL	AGUA	ELAB	HORA
1		6%	25%		

PROBETA # 1	PESO (gr)	320
	DIAM (mm)	53.50
	ALTURA (mm)	103.25
	PESO TARA (gr)	68.1
	PESO H + T (gr)	133
	PESO S+T (gr)	111.4

DEF CONTR	CARGA AXIAL
10	7.5
20	19
30	26
40	41
50	46
60	57.8
80	73
100	68.5

La carga axial no fue mucha (73) como se muestra en el cuadro anterior pues conservó los promedios de las anteriores.

Tabla 39 Cálculo esfuerzo – deformación unitaria 6% silicato con 25% agua

PROB	% SILIC	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)
1	6	25	53.50	5.35	2.675	22.480	103.3

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	DE	CALCULO DE ESFUERZO
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1-\epsilon$		$\delta_c = P/A$

DEFOR C (mm)	CARGA AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	mm	convers (cm)	ECUAC	P (Kg)	$\delta_c = P/A$ (kg/cm ²)	COHE S $\delta_c Max/2$
10	7.5	1	10.33	0.097	22.480	22.38	10	0.01	0.001	-4.3589	-1.9813	-0.0885	
20	19	2		0.194		22.29	20	0.02	0.002	-0.521	-0.2370	-0.0106	
30	26	3		0.291		22.19	30	0.03	0.003	1.815	0.8248	0.0372	
40	41	4		0.387		22.09	40	0.04	0.004	6.820	3.1000	0.1403	
50	46	5		0.484		22.00	50	0.05	0.005	8.489	3.8585	0.1754	
60	57.8	6		0.581		21.90	60	0.06	0.006	12.426	5.6483	0.2579	
80	73	8		0.775		21.71	80	0.08	0.008	17.499	7.9539	0.3664	0.1832
100	68.5	10		0.969		21.51	100	0.1	0.010	15.997	7.2713	0.3380	
120	66	12		1.162		21.32	120	0.12	0.012	15.163	6.8921	0.3233	
140	58	14		1.356		21.12	140	0.14	0.014	12.493	5.6786	0.2688	

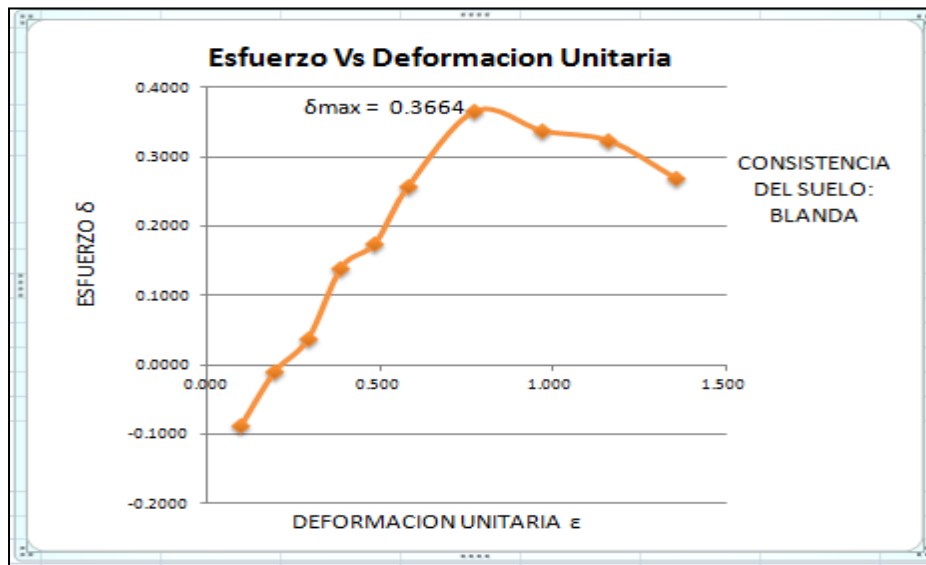


Figura 27 Esfuerzo – Deformación unitaria 6% silicato con 25% agua
 Fuente: proyecto de investigación

Curiosamente esta vez el esfuerzo máximo dió por debajo de lo esperado como se muestra en la figura, lo que implicó que el suelo se volviera de consistencia blanda y por tal motivo se decide hacer reproceso de esta muestra para verificar estos resultados.

Tabla 40 Carga axial reproceso probeta 6% silicato con 25% agua

PROB	OBSERV	SILICATO	AGUA	ELAB	HORA	ENSAYADA	
2		6%	25%	29/08/2013		05/09/2013	
PROB # 2	PESO (gr)	290.1		DEF CONTR	CARGA AXIAL		
	DIAM (mm)	53.83		10	4	100	68
	ALTURA (mm)	96.03		20	12	120	82
	PESO TARA (gr)	68.1		30	16	140	63
	PESO H+ T (gr)	136.4		40	25	160	42
	PESO S +T (gr)	114.5		50	33		
				60	42		
				80	55		

En esta ocasión la carga axial varió un poco con respecto a la anterior ahora se espera que el esfuerzo también varíe.

Tabla 41 Cálculo esfuerzo – deformación unitaria reproceso probeta 6% silicato con 25% agua

PROB	% SIL	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm)	Lo (mm)
2	6	25	53.83	5.383	2.6915	22.758	96.03

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	CALCULO DE ESFUERZO
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1-\epsilon$	$\delta c = P/A$

DEFOR C (mm)	CARGA AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	mm	conver (cm)	ECUAC	P (Kg)	$\delta c = P/A$ (kg/cm ²)	COH ES $\delta c Ma x/2$
10	4	1	9.60	0.104	22.758	22.65	10	0.01	0.001	-5.5268	-2.5122	-0.1109	
20	12	2		0.208		22.55	20	0.02	0.002	-2.857	-1.2987	-0.0576	
30	16	3		0.312		22.45	30	0.03	0.003	-1.522	-0.6920	-0.0308	
40	25	4		0.417		22.34	40	0.04	0.004	1.481	0.6731	0.0301	
50	33	5		0.521		22.24	50	0.05	0.005	4.151	1.8866	0.0848	
60	42	6		0.625		22.13	60	0.06	0.006	7.154	3.2517	0.1469	
80	55	8		0.833		21.93	80	0.08	0.008	11.492	5.2236	0.2382	
100	68	10		1.041		21.72	100	0.1	0.010	15.830	7.1955	0.3313	
120	82	12		1.250		21.51	120	0.12	0.012	20.502	9.3190	0.4333	0.216
140	63	14		1.458		21.30	140	0.14	0.014	14.162	6.4370	0.3022	

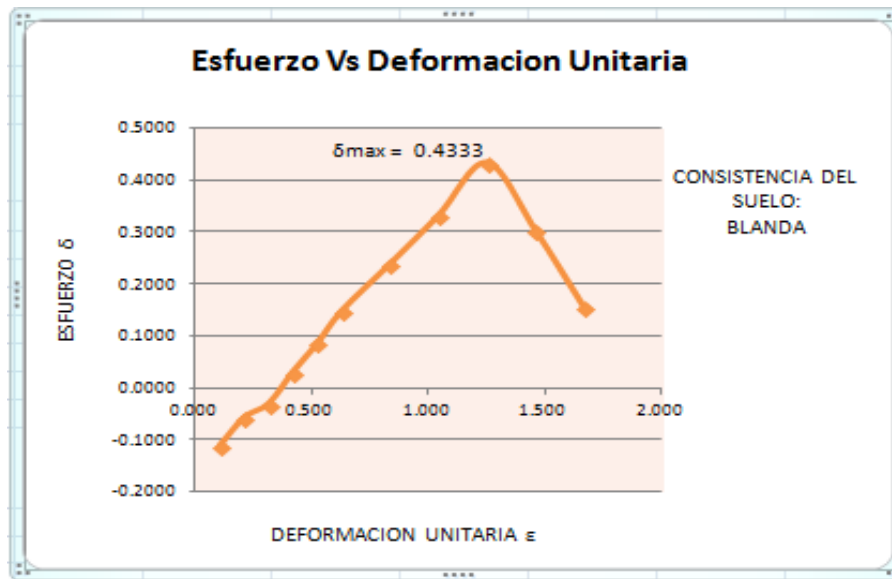


Figura 28 Esfuerzo – Deformación unitaria reproceso probeta 6% silicato con 25% agua.

Fuente: Proyecto de Investigación

Esta vez se pudo constatar que el porcentaje de silicato aplicado en el suelo con este porcentaje de humedad, genera una consistencia del suelo menor y esto hace que se presente en forma blanda como se observa en la gráfica, por lo tanto el máximo esfuerzo disminuye.

Pero como parte del ejercicio de investigación se siguió incrementando el porcentaje de aditivo para determinar hasta donde podría el suelo combinarse con este aditivo, y que reacción causaría o si definitivamente no se permitiría armar probetas y quizás la resistencia nunca iba a ser superior a la del suelo natural.

Luego de esto se realiza una nueva muestra e incrementa el porcentaje de silicato de 6% a 8% conservando el mismo porcentaje de humedad.

Tabla 42 Carga axial probeta 8% silicato con 25% agua

PROB	OBSERV	SIL	AGUA	ELABORADA	HORA	ENSAYADA
1		8%	25%	19/06/2013		26/06/2013

PROB # 1	PESO (gr)	304.4
	DIAM (mm)	53.04
	ALTURA (mm)	102.42
	PESO TARA (gr)	57.5
	PESO H + T (gr)	112.6
	PESO S+T (gr)	94.6

DEF CONTR	CARGA AXIAL
10	8
20	18
30	27
40	44
50	52
60	63
80	72
100	60

Se puede notar que la carga axial que sufrió esta probeta no supera las que hasta ahora han sido ensayadas.

Tabla 43 Cálculo esfuerzo – deformación unitaria probeta 8% silicato con 25% agua

PROB	% SILIC	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm)	Lo (mm)	Lo (cm)
1	8	25%	53.04	5.304	2.652	22.095	102.42	10.242

DEF UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	DE	CALCULO DE ESFZO	ECUACION
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1-\epsilon$		$\delta_c = P/A$	$Y = 0.3337 (X) - 6.8616$

DEF C (mm)	CARGA AXIAL	DEF C (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm)	COR AREA A = $A_0/1-\epsilon$	DEF C (mm)	mm	conv (cm)	ECUA	P (Kg)	$\delta_c = P/A$ (kg/cm ²)	COHES $\delta_{cMax}/2$
10	8	1	10.24	0.098	22.095	22.00	10	0.01	0.001	-4.192	-1.9055	-0.0866	
20	18	2		0.195		21.90	20	0.02	0.002	-0.855	-0.3886	-0.0177	
30	27	3		0.293		21.80	30	0.03	0.003	2.148	0.9765	0.0448	
40	44	4		0.391		21.70	40	0.04	0.004	7.821	3.5551	0.1638	
50	52	5		0.488		21.61	50	0.05	0.005	10.491	4.7685	0.2207	
60	63	6		0.586		21.51	60	0.06	0.006	14.162	6.4370	0.2993	
80	72	8		0.781		21.31	80	0.08	0.008	17.165	7.8022	0.3661	0.1830
100	60	10		0.976		21.12	100	0.1	0.010	13.160	5.9820	0.2833	

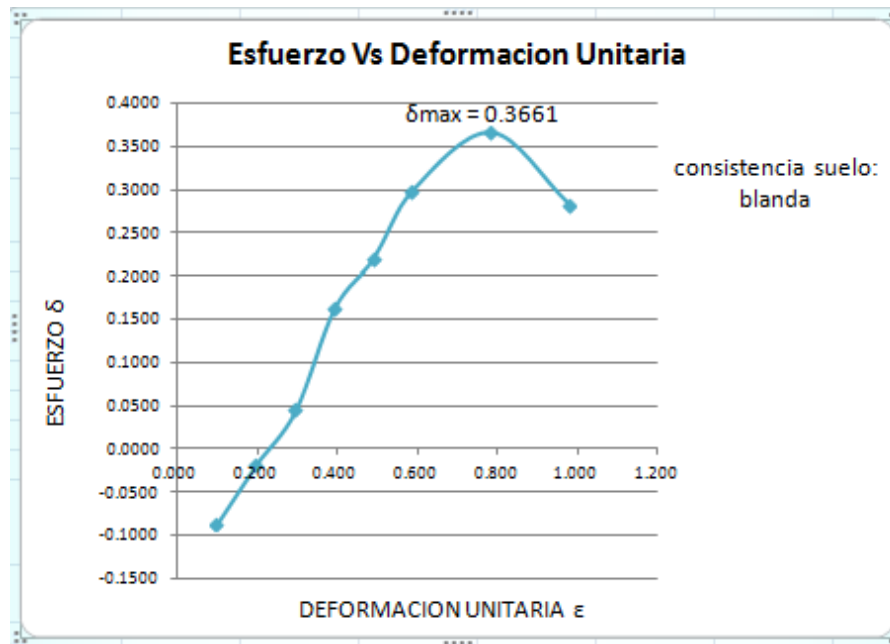


Figura 29 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 8% silicato con 25% agua
Fuente: Proyecto de Investigación

Al igual que la probeta anterior el resultado de esfuerzo máximo fue menor, esto se ve reflejado tanto en el cuadro como en la gráfica por lo tanto la consistencia del suelo no mejoró, por el contrario disminuyó.

Este tipo de resultados sirvieron para empezar a cambiar tanto el porcentaje de aditivo como de humedad y determinar el umbral que nos ayudaría a identificar los rangos de porcentajes en humedades y de aditivo necesarios para trabajar, o cuales darían los mejores resultados, gracias a que muchas muestras dieron esfuerzos altos y otras no tanto, así que se iniciaron nuevas muestras con nuevos porcentajes de estas dos sustancias.

Ahora estas serán las nuevas muestras con los diversos porcentajes.

Primera probeta fue de 2% de silicato con 18% de agua, aquí se redujo el porcentaje de agua para saber si era posible armar la probeta con tan poca humedad.

Tabla 44 Carga axial probeta 2% silicato con 18% agua

PROB	OBSERV	SILIC	AGUA	ELAB	HORA	ENSAYADA
1		2%	18	27/06/2013		15/07/2013

PROBET # 1	PESO (gr)	273.04	DEFOR	CARGA
	DIAM (mm)	52.75	CONTR	AXIAL
	ALTURA (mm)	101.6	10	8.5
	PESO TARA	59.8	20	21
	PESO H + T (gr)	119.2	30	29
	PESO S +T (gr)	105.7	40	48.5
			50	42
			60	67.5
			80	66
			100	50

Como se nota en el cuadro, la carga axial para este caso disminuye por lo tanto el esfuerzo no será el esperado, esto se verá reflejado en el siguiente cuadro donde se determina el esfuerzo y la deformación unitaria.

Tabla 45 Cálculo esfuerzo – deformación unitaria probeta 2% silicato con 18% agua

PROB	% SILICA	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)	Lo (cm)
1	2	18	52.75	5.275	2.6375	21.854	101.6	10.16

DEF UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	CALCULO ESFZO	ECUACION
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1-\epsilon$	$\delta c = P/A$	$Y=0.3337$ $(X)-6.8616$

DEF C (mm)	C AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	A ₀ (cm ²)	COR AREA A= A ₀ /1- ϵ	DEF C (mm)	mm	conv (cm)	ECUAC	P (Kg)	$\delta c = P/A$ (kg/cm ²)	COHE $\delta c_{Max}/2$
10	8.5	1	10.160	0.098	21.854	21.76	10	0.01	0.001	-4.02515	-1.8296	-0.0841	
20	21	2		0.197		21.66	20	0.02	0.002	0.146	0.0664	0.0031	
30	29	3		0.295		21.56	30	0.03	0.003	2.816	1.2799	0.0594	
40	48.5	4		0.394		21.46	40	0.04	0.004	9.323	4.2377	0.1975	
50	52	5		0.492		21.36	50	0.05	0.005	10.491	4.7685	0.2232	
60	67.5	6		0.591		21.26	60	0.06	0.006	15.663	7.1196	0.33482	0.16741
70	66	7		0.689		21.17	80	0.08	0.008	15.163	6.8921	0.3256	
80	50	8		0.787		21.07	100	0.1	0.010	9.823	4.4652	0.2120	

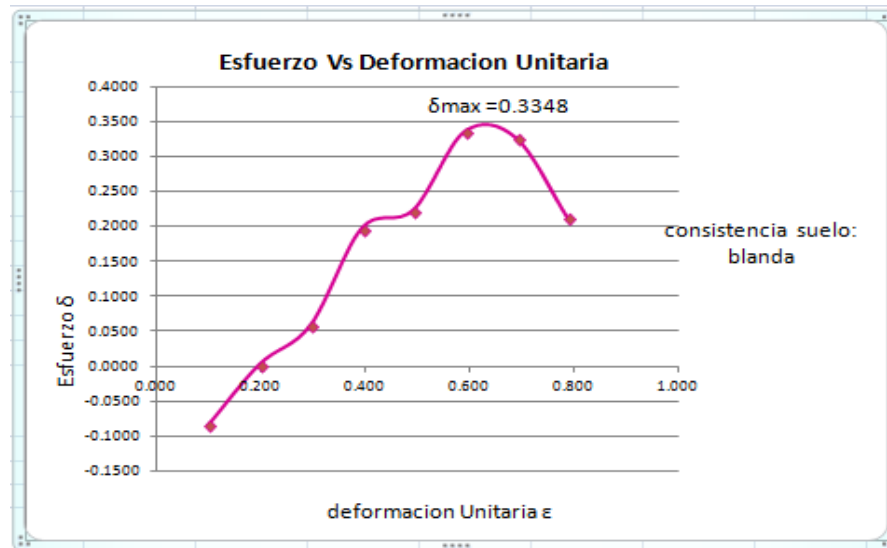


Figura 30 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 2% silicato con 18% agua
Fuente: Proyecto de Investigación

Aunque con mucho esfuerzo se armó esta probeta a la hora de ensayar definitivamente no sirvió, su esfuerzo fue muy bajo y empeoró la consistencia del suelo, así que se descartaron porcentajes de humedad y aditivo por debajo de este.

Ahora aumentaríamos los porcentajes de humedad de 18% a 28% con el mismo porcentaje de aditivo o sea 2%.

Los resultados para este caso fueron los siguientes.

Tabla 46 Carga axial probeta 2% silicato 28% agua

PROB	OBSERV	SILIC	AGUA	ELAB	HORA	ENSA
1		2%	28%			

PROBETA # 1	PESO (gr)	306.4	DEFOR	CARGA
	DIAM (mm)	52.75	CONTR	AXIAL
	ALTURA (mm)	102.75	10	3.5
	PESO TARA	63.4	20	12
	PESO H + T (gr)	147.2	30	22
	PESO S +T (gr)	121.2	40	39
			50	46.5
			60	65
			80	88.5
			100	90
			120	20

Se observó que la muestra conservó un buen rango de carga axial al parecer cuando aumentó la humedad y cuando disminuyó el porcentaje de aditivo.

Tabla 47 Cálculo esfuerzo–deformación unitaria probeta 2% silicato con 28% agua

PROB	% SIL	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)	Lo (cm)
1	2%	28%	52.65	5.26	2.6325	21.77	102.21	10.221
DEF UNITARIA ϵ		CORRECCION DE AREA			CALCULO DE ESFUZO		ECUACION	
$\epsilon = \Delta L/LO$		$A = A_0/1-\epsilon$			$\delta_c = P/A$		$Y=0.3337 (X)-6.8616$	

DEF C (mm)	C AXIAL	DEF (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	Factor	mm	conv (cm)	ECUAC	P (Kg)	$\delta_c = P/A$ kg/cm ²	COH E $\delta_c Ma x/2$
10	3.5	1	10.22	0.098	21.77	21.67	10	0.001	0.01	0.001	-5.693	-2.5880	-0.1194	
20	12	2		0.196		21.58	20	0.001	0.02	0.002	-2.857	-1.2987	-0.0602	
30	22	3		0.294		21.48	30	0.001	0.03	0.003	0.480	0.2181	0.0102	
40	39	4		0.391		21.38	40	0.001	0.04	0.004	6.153	2.7967	0.1308	
50	46.5	5		0.489		21.28	50	0.001	0.05	0.005	8.655	3.9343	0.1849	
60	65	6		0.587		21.18	60	0.001	0.06	0.006	14.829	6.7404	0.3182	
80	88.5	8		0.783		20.99	80	0.001	0.08	0.008	22.671	10.304	0.4910	
100	90	10		0.978		20.79	100	0.001	0.1	0.010	23.171	10.532	0.5065	0.253
120	20	12		1.174		20.60	120	0.001	0.12	0.012	-0.188	-0.0853	-0.0041	

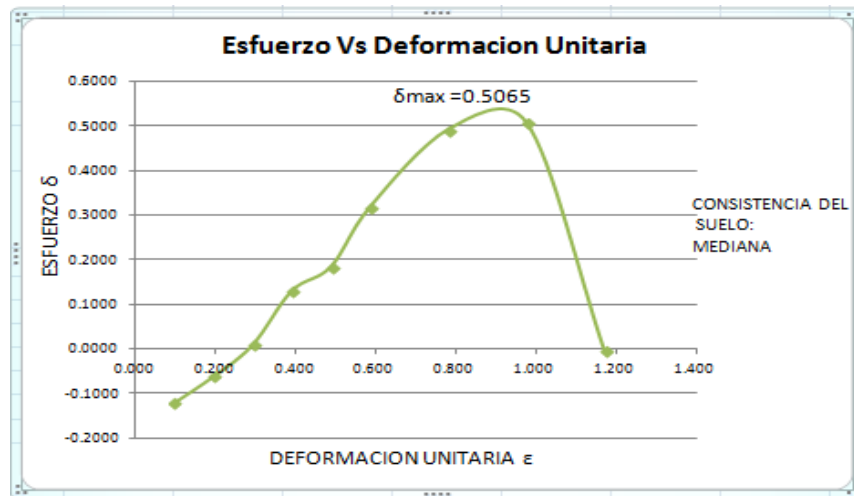


Figura 31 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 2% silicato con 28% agua

Fuente: Proyecto de Investigación

Al parecer con esta humedad y este porcentaje de aditivo se logró que por lo menos el suelo conservara su consistencia natural aunque no superó el esfuerzo máximo de suelo natural.

Así que se agregó más humedad a ver que reacción tendría el suelo y hasta donde permitiría una buena manipulación la probeta.

Tabla 48 Carga axial probeta 2% silicato 32% agua

PROB	OBSERV	SILIC	AGUA	ELAB	HORA	ENSA
5		2%	32%	10/07/2013		18/07/2013
PROBET # 5	PESO (gr)	328.4		DEFOR CONTR	CARGA AXIAL	
	DIAM (mm)	52.65		10	3.5	
	ALTURA (mm)	102.21		20	12	
	PESO TARA	60.9		30	22	
	PESO H + T (gr)	129.3		40	39	
	PESO S +T (gr)	106.3		50	46.5	
				60	65	
				80	88.5	
			100	90		
			120	20		

La carga axial se mantuvo en el rango de la muestra anterior, así que no se esperaba un incremento en el esfuerzo.

Tabla 49 Cálculo esfuerzo–deformación unitaria probeta 2% silicato con 32% agua

PROB	% SILICA	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)
5	2	32	52.65	5.265	2.6325	21.771	102.21

DEF UNITARIA ϵ	CORRECCION AREA	DE	CALCULO DE ESFZO
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1-\epsilon$		$\delta_c = P/A$

DEF C (mm)	C AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	mm	conv (cm)	ECUAC	P (Kg)	$\delta_c = P/A$ (kg/cm ²)	COHE $\delta_{cMax}/2$
10	3.5	1	10.221	0.098	21.771	21.67	10	0.01	0.001	-	-2.5880	-0.1194	
20	12	2		0.196		21.58	20	0.02	0.002	-2.857	-1.2987	-0.0602	
30	22	3		0.294		21.48	30	0.03	0.003	0.480	0.2181	0.0102	
40	39	4		0.391		21.38	40	0.04	0.004	6.153	2.7967	0.1308	
50	46.5	5		0.489		21.28	50	0.05	0.005	8.655	3.9343	0.1849	
60	65	6		0.587		21.18	60	0.06	0.006	14.829	6.7404	0.3182	
70	88.5	7		0.685		21.09	80	0.08	0.008	22.671	10.3049	0.4887	
80	90	8		0.783		20.99	100	0.1	0.010	23.171	10.5325	0.5018	0.2509
90	20	9		0.881		20.89	120	0.12	0.012	-0.188	-0.0853	-0.0041	

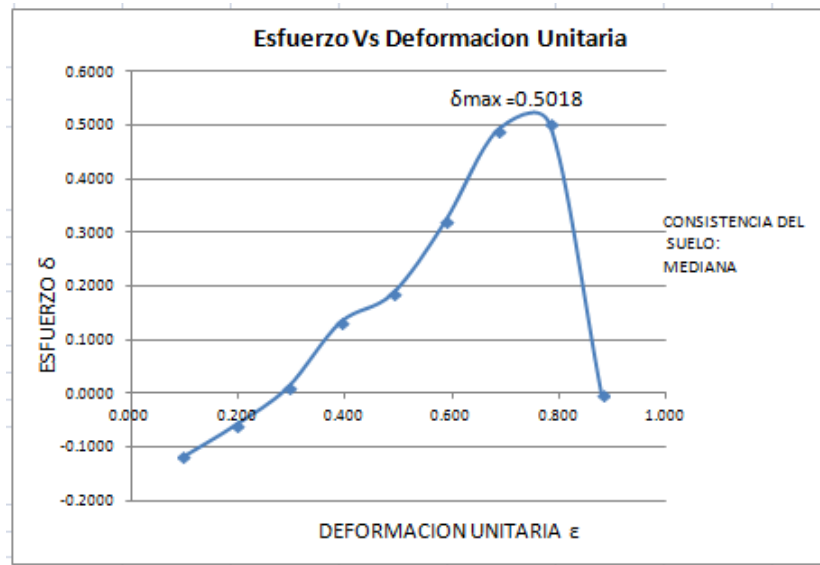


Figura 32 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 2% silicato con 32% agua
Fuente: Proyecto de Investigación

Realmente no hubo mucho cambio en el esfuerzo con respecto a la probeta anterior, aunque ya para este porcentaje de humedad es casi imposible armar la muestra pues está demasiado húmedo y la manipulación se hace muy complicada, esto significa que porcentajes mayores de humedad son imposibles de trabajar pues esta se volvería demasiado viscosa.

Después de todas estas muestras se pudo determinar el rango de porcentajes de humedad y de aditivo en los que se puede trabajar este suelo de ceniza volcánica, esto implica que a porcentajes menores de 18 en humedad y mayores de 32 es imposible trabajar.

Sabiendo esto se regresó al inicio de este ejercicio y de manera ordenada se empezaron a realizar probetas que faltaban para ensayar con los porcentajes definidos por esta investigación.

A cada dato se le realizaron 3 muestras para constatar sus resultados y luego fueron promediados, así que se decidió que los porcentajes se tomarían en números pares por que teniendo los resultados anteriores se analizó que los resultados no variaban mucho de una unidad a otra por lo tanto se inició con los siguientes datos.

La primera muestra se trabajó con 2% silicato de sodio y 20% de humedad.

Tabla 50 Carga axial probeta 2% silicato con 20% de agua

PROB	OBSERV	SIL	AGUA	ELAB	HORA	ENSAYADA
1		2%	20%	12/07/2013		19/07/2013

PROBET # 1	PESO (gr)	284.6
	DIAM (mm)	53.41
	ALTURA (mm)	101.85
	PESO TARA	59.4
	PESO H + T (gr)	130.9
	PESO S +T (gr)	124.1

DEFOR CONT	CARG AXIAL
10	10
20	38
30	55
40	85
50	114
60	125
80	142
100	120
120	10

Se observa para esta muestra que la carga axial incrementó al parecer al disminuir el porcentaje de humedad así que se espera que esta vez el máximo esfuerzo mejore o supere el esfuerzo del suelo natural.

Tabla 51 Cálculo esfuerzo – deformación unitaria probeta 2% silicato con 20% agua

PROB	% SIL	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)	Lo (cm)
1	2	20	53.41	5.34	2.6705	22.405	101.85	10.18

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	CALCULO DE ESFUERZO	DE ECUACION
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1-\epsilon$	$\delta c = P/A$	$Y=0.3337 (X)-6.8616$

DEFOR C (mm)	C AXIAL	DEF (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	Factor	mm	conv (cm)	ECUA	P (Kg)	$\delta c = P/A$ kg/cm ²	COH δ cMax/2
10	10	1	10.185	0.098	22.405	22.31	10	0.001	0.01	0.001	-3.5246	-1.6021	-0.0718	
20	38	2		0.196		22.21	20	0.001	0.02	0.002	5.819	2.6450	0.1191	
30	55	3		0.295		22.11	30	0.001	0.03	0.003	11.492	5.2236	0.2363	
40	85	4		0.393		22.01	40	0.001	0.04	0.004	21.503	9.7740	0.4440	
50	114	5		0.491		21.91	50	0.001	0.05	0.005	31.180	14.1728	0.6468	
60	125	6		0.589		21.82	60	0.001	0.06	0.006	34.851	15.8413	0.7262	
80	142	8		0.785		21.62	80	0.001	0.08	0.008	40.524	18.4199	0.8520	0.426
100	120	10		0.982		21.42	100	0.001	0.1	0.010	33.182	15.0829	0.7041	
120	110	12		1.178		21.23	101	0.001	0.1	0.010	29.85	13.5660	0.6391	

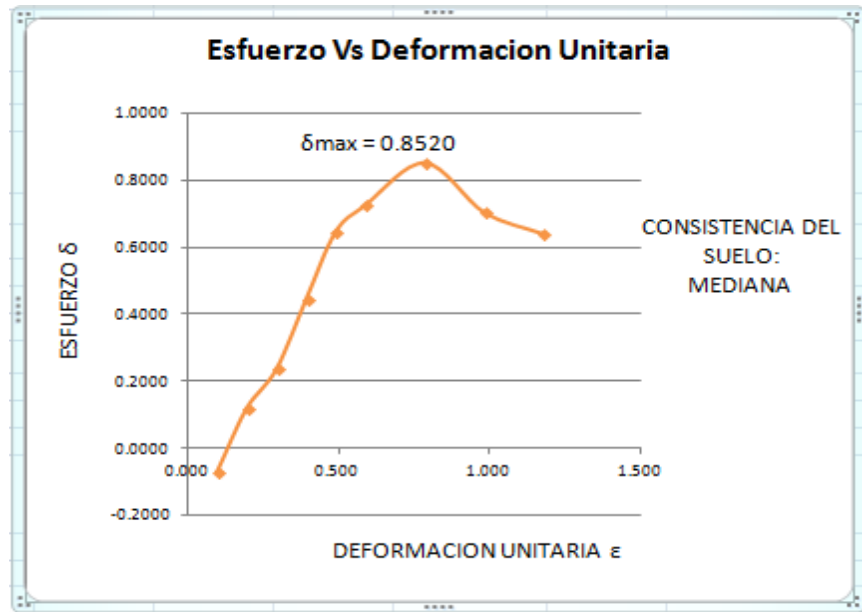


Figura 33 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 2% silicato con 20% agua
Fuente: Proyecto de Investigación

Es curioso ver cómo al disminuir el porcentaje de humedad y de aditivo la carga axial es alta, por lo tanto esto implicó un aumento en el esfuerzo máximo de la probeta.

El resultado definitivamente es muy bueno para el porcentaje de agua y de aditivo que se manejó, comparado con el esfuerzo del suelo natural, esta nueva probeta logró superarlo como se nota en la gráfica.

Nota: los porcentajes de 22% y 25% de agua con el 2% de aditivo (silicato de sodio) ya se realizaron en las primeras pruebas.

Ahora pasaremos a un porcentaje de agua un poco más alto esto quiere decir de 20% a 28% con el mismo porcentaje de aditivo (2% silicato). Los resultados de este fueron los siguientes:

Tabla 52 Carga axial probeta 2% silicato con 28% agua

PROB	OBSERV	SILIC	AGUA	ELAB	HORA	ENSA
1		2%	28%	08/09/2013		17/09/2013

PROBET # 1	PESO (gr)	309.2	DEFOR CONT	CARG AXIAL		
	DIAM (mm)	53.45	10	3	140	100
	ALTURA (mm)	102.41	20	10	160	90
	PESO TARA	60.9	30	14		
	PESO H + T (gr)	141.7	40	22		
	PESO S +T (gr)	113.8	50	31		
			60	43		
			80	70		
			100	96		
			120	115		

Para este caso la carga axial aumentó un poco más de lo esperado, así que el esfuerzo debería variar con respecto a los anteriores.

Tabla 53 Cálculo esfuerzo–deformación unitaria probeta 2% silicato con 28% agua

PROB	% SIL	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)	Lo (cm)
1	2	28	53.45	5.34	2.6725	22.438	102.41	10.241

DEFORMACION UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	CALCULO DE ESFUERZO	DE ECUACION
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1 - \epsilon$	$\delta c = P/A$	$Y = 0.3337 (X) - 6.8616$

DEF C (mm)	C AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A = Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	Factor	mm	conv (cm)	ECUAC	P (Kg)	$\delta c = P/A$ (kg/cm ²)	COHE $\delta c_{Max}/2$
10	3	1	10.241	0.098	22.438	22.34	10	0.001	0.01	0.001	-5.8605	-2.6639	-0.1192	
20	10	2		0.195		22.24	20	0.001	0.02	0.002	-3.525	-1.6021	-0.0720	
30	14	3		0.293		22.15	30	0.001	0.03	0.003	-2.190	-0.9954	-0.0449	
40	22	4		0.391		22.05	40	0.001	0.04	0.004	0.480	0.2181	0.0099	
50	31	5		0.488		21.95	50	0.001	0.05	0.005	3.483	1.5832	0.0721	
60	43	6		0.586		21.85	60	0.001	0.06	0.006	7.488	3.4034	0.1557	
80	70	8		0.781		21.66	80	0.001	0.08	0.008	16.497	7.4988	0.3463	
100	96	10		0.976		21.46	100	0.001	0.1	0.010	25.174	11.4425	0.5332	
120	115	12		1.172		21.27	120	0.001	0.12	0.012	31.514	14.3245	0.6736	0.3368
140	100	14		1.367		21.07	140	0.001	0.14	0.014	26.508	12.0493	0.5718	
160	90	16		1.562		20.88	160	0.001	0.16	0.016	23.171	10.5325	0.5045	

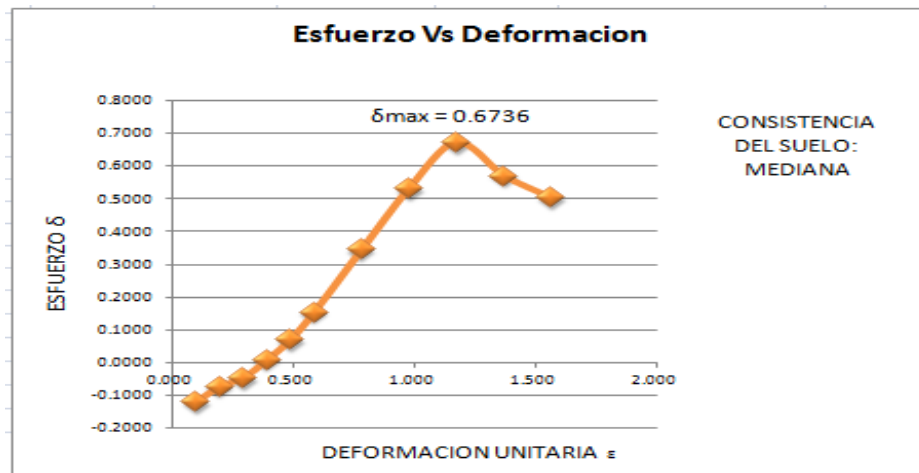


Figura 34 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 2% silicato con 28% agua
Fuente: Proyecto de Investigación

Después de realizar las 3 probetas para promediar los valores, resultó que este porcentaje seguía manteniendo la consistencia del suelo natural, o sea una consistencia mediana lo que significa que el esfuerzo máximo está en el mismo rango del suelo natural.

Luego de esto se incrementa nuevamente la humedad así que para este caso será de 30% conservando el porcentaje de aditivo inicial (2%).

Tabla 54 Carga axial probeta 2% silicato con 30% agua

PROB	OBSERV	SILIC	AGUA	ELAB	HORA	ENSAY
1		2%	30%	11/07/2013		18/07/2013

PROBET # 1	PESO (gr)	311.6	DEFOR CONT	CARG AXIAL
	DIAM (mm)	54.00	10	4
	ALTURA (mm)	101.31	20	14
	PESO TARA	69.1	30	36
	PESO H + T (gr)	150.4	40	42.5
	PESO S +T (gr)	124.1	50	68
			60	73
			80	100
			100	126
			120	90

El incremento en la carga axial fue muy notable por lo tanto se esperaba un buen esfuerzo para esta muestra.

A continuación se resumen las diferentes combinaciones porcentuales de silicato de sodio y agua mezclados para la obtención de los mejores resultados (ver Tabla 54).

Tabla 55 Resumen de resultado probetas con los diferentes porcentajes de aditivo (silicato de sodio) y humedad.

# PROB	% SIL	% AGUA	CARGA AXIAL	ESFZO (kg/cm ²)	PROM	CONSISTENCIA DEL SUELO	PESOS UNITARIOS SILICATO	
							MUH gr/cm ³	MUS gr/cm ³
1	1	25%	189	1.21301		FIRME	1.450	0.340
1	2	20	142	0.8520		MEDIANA	1.247	1.129
2	2	20	130	0.7943	0.7315	MEDIANA	1.308	0.917
3	2	20	100	0.5482		MEDIANA	1.187	0.852
1	2	22	148.5	0.8853		MEDIANA	1.273	0.952
2	2	22	169	1.0318	1.1067	FIRME	1.436	0.974
3	2	22	209	1.4029		FIRME	1.504	0.969
1	2	25	170	1.2089		FIRME	1.524	0.957
2	2	25	89	0.4905	0.7844	BLANDA	1.312	0.875
3	2	25	110	0.6537		MEDIANA	1.346	0.934
1	2	28	90	0.5045		MEDIANA	1.367	0.943
2	2	28	133	0.8058	0.6613	MEDIANA	1.360	0.899
3	2	28	115	0.6736		MEDIANA	1.346	0.881
1	2	30	126	0.7298		MEDIANA	1.343	0.909
2	2	30	83	0.4487	0.5800	BLANDA	1.350	0.909
3	2	30	100	0.5615		MEDIANA	1.340	0.906
1	4	20	35	0.1019		MUY BLANDA	1.230	0.877
2	4	20	71	0.3590	0.2223	MEDIANA	1.249	0.887
3	4	20	50	0.2061		MUY BLANDA	1.248	0.892
1	4	22	80	0.4223		BLANDA	1.289	0.878
2	4	22	78	0.4154	0.7926	BLANDA	1.291	0.880

Tabla 56 Resumen de resultado probetas con los diferentes porcentajes de aditivo (silicato de sodio) y humedad (Continuación).

# PROB	% SIL	% AGUA	CARGA AXIAL	ESFZO (kg/cm ²)	PROM	CONSISTENCIA DEL SUELO	PESOS UNITARIOS SILICATO	
							MUH gr/cm ³	MUS gr/cm ³
3	4	22	233	1.5402		FIRME	1.485	1.020
1	4	25	70	0.3461		BLANDA	1.319	0.879
2	4	25	86	0.4717	0.4759	BLANDA	1.347	0.896
3	4	25	105	0.6099		MEDIANA	1.428	0.954
1	4	28	90	0.4892		MUY BLANDA	1.358	0.885
2	4	28	92	0.5115	0.5068	BLANDA	1.356	0.888
3	4	28	95	0.5196		BLANDA	1.324	0.980
1	4	30	75	0.3800		BLANDA	1.360	1.013
2	4	30	105	0.6039	0.5022	MEDIANA	1.392	1.038
3	4	30	93	0.5227		MEDIANA	1.397	1.049
1	6	20	95	0.5227		MEDIANA	1.247	0.891
2	6	20	135	0.7818	0.6612	MEDIANA	1.222	0.881
3	6	20	117	0.6791		MEDIANA	1.237	0.885
1	6	22	113.5	0.6427		MEDIANA	1.403	0.970
2	6	22	145	0.8597	0.7627	MEDIANA	1.262	0.904
3	6	22	145	0.7858		MEDIANA	1.130	0.788
1	6	25	73	0.3664		BLANDA	1.379	0.920
2	6	25	82	0.4333	0.4527	BLANDA	1.327	0.902
3	6	25	100	0.5583		MEDIANA	1.298	0.880
1	6	28	128	0.7444		MEDIANA	1.338	0.901
2	6	28	97	0.5405	0.7362	MEDIANA	1.358	0.916
3	6	28	150	0.9236		MEDIANA	1.382	0.926
1	6	30	102	0.5638		MEDIANA	1.335	0.884
2	6	30	108	0.6001	0.5903	MEDIANA	1.470	0.947
3	6	30	105	0.6069		MEDIANA	1.377	0.916
1	8	20	150	0.9115	0.7727	MEDIANA	1.253	0.885
2	8	20	110	0.6339		MEDIANA	1.285	0.906
1	8	22	110	0.6321	0.6620		0.077	0.053

Tabla 57 Resumen de resultado probetas con los diferentes porcentajes de aditivo (silicato de sodio) y humedad (Continuación).

# PROB	% SIL	% AGUA	CARGA AXIAL	ESFZO (kg/cm ²)	PROM	CONSISTENCIA DEL SUELO	PESOS UNITARIOS SILICATO	
							MUH gr/cm ³	MUS gr/cm ³
2	8	22	118	0.6919			1.353	0.939
1	8	25	72	0.3661		MEDIANA	1.345	0.906
2	8	25	150	0.9174	0.6275	MEDIANA	1.348	0.950
3	8	25	105	0.5991		MEDIANA	1.342	0.914
1	8	28	145	0.8820		MEDIANA	1.404	0.918
2	8	28	90	0.5070	0.7031	MEDIANA	1.425	0.931
3	8	28	123	0.7204		MEDIANA	1.388	0.910
1	8	30	125	0.7523		MEDIANA	1.467	0.962
2	8	30	153	0.9866	0.8645	MEDIANA	1.509	0.993
3	8	30	137	0.8547		MEDIANA	1.489	0.970
1	10	22	140	0.8283	0.8283	MEDIANA	1.408	0.950
1	10	30	85	0.4674	0.4674	BLANDA	1.471	1.045
1	12	30	155	0.9941	0.8413	MEDIANA	1.515	0.950
2	12	30	119	0.6885		MEDIANA	1.439	0.945
1	14	30	142	0.9444	1.0292	MEDIANA	1.559	1.059
2	14	30	175	1.1140		FIRME	1.493	1.002

En la Tabla 54 se observan los porcentajes de humedad que son indicados con barras rosado claro, así como los porcentajes de aditivo barras fucsia y por último las barras amarillas que son los esfuerzos generados por la mezcla de estos dos. Para este aditivo se observó como la mejor reacción se generó cuando se combina un 2% de silicato con un 22% de agua pues supero la resistencia del suelo natural pasando de un 0.6 kg/cm² a un 1.1 kg/cm². Del mismo modo se observó este tipo de reacción cuando se incrementa la humedad de un 22% a un 30% con un mayor porcentaje de aditivo (14%) lo que genera también un esfuerzo máximo de 1.02kg/cm² siendo estos dos datos los resultados más representativos para la resistencia del suelo con este aditivo.

8.3.2. ADITIVO CAL

Gracias a todos los ensayos realizados anteriormente y después de un arduo trabajo de investigación, a partir de este momento se comenzó a trabajar con el siguiente aditivo (CAL) para este se desarrollaron las mismas pruebas con los mismos porcentajes tanto de humedad como de aditivo, aunque esta vez fue menor cantidad de pruebas pues ya estaba definido el rango de porcentajes en los que se iba a trabajar.

Para estas pruebas inicialmente se hicieron muestras con porcentajes tales como 1%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14% de esta manera se cumplirían con los porcentajes anteriores y servirían para comparar contra el silicato y el suelo natural.

Se empezó con el mínimo porcentaje de aditivo para este caso 1% y estos fueron los resultados arrojados por este nuevo químico.

Tabla 58 Carga axial probeta 1% cal con 25% agua

PRUEBA	OBSERV	CAL	AGUA	ELAB	HORA	ENSAYADA
1		1%	25%	20/06/2013		27/06/2013

PROBET # 1	PESO (gr)	300.3	DEFOR CONT	CARG AXIAL	
	DIAM (mm)	53.08		10	5
	ALTURA (mm)	102.96		20	11.5
	PESO TARA	58.9		30	19
	PESO H + T (gr)	109.1		40	24
	PESO S +T (gr)	94.6		50	26
				60	36
		80	59		
		100	81		
		120	95		
		140	73		

Para esta nueva prueba se notó que la carga axial no fue muy representativa para lo que se venía observando en las anteriores pruebas esto nos llevó a pensar que el esfuerzo máximo iba a ser bajo a comparado de las probetas anteriores.

Tabla 59 Cálculo esfuerzo–deformación unitaria probeta 1% cal con 25% agua

PROB	% CAL	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)	Lo (cm)
1	1%	25	53.08	5.308	2.654	22.129	102.96	10.29

DEF UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	DE CALCULO DE ESFZO	ECUACION
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1-\epsilon$	$\delta_c = P/A$	$Y=0.3337$ $(X)-6.8616$

DEF C (mm)	C AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	Factor	mm	conv (cm)	ECUAC	P (Kg)	$\delta_c = P/A$ (kg/cm ²)	COHE $\delta_{cMax}/2$
10	5	1	10.30	0.097	22.129	22.03	10	0.001	0.01	0.001	-5.1931	-2.3605	-0.1071	
20	11.5	2		0.194		21.93	20	0.001	0.02	0.002	-3.024	-1.3746	-0.0627	
30	19	3		0.291		21.84	30	0.001	0.03	0.003	-0.521	-0.2370	-0.0109	
40	24	4		0.389		21.74	40	0.001	0.04	0.004	1.147	0.5215	0.0240	
50	26	5		0.486		21.64	50	0.001	0.05	0.005	1.815	0.8248	0.0381	
60	36	6		0.583		21.55	60	0.001	0.06	0.006	5.152	2.3416	0.1087	
80	59	8		0.777		21.35	80	0.001	0.08	0.008	12.827	5.8303	0.2731	
100	81	10		0.971		21.16	100	0.001	0.1	0.010	20.168	9.1673	0.4333	
120	95	12		1.166		20.96	120	0.001	0.12	0.012	24.840	11.2909	0.5386	0.2693
140	73	14		1.360		20.77	140	0.001	0.14	0.014	17.499	7.9539	0.3830	

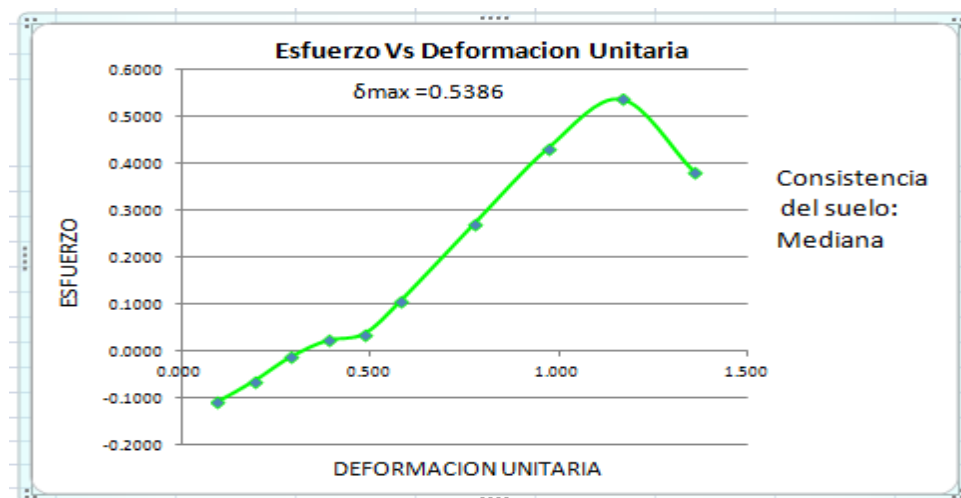


Figura 35 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 1% cal con 25% agua
 Fuente: Proyecto de Investigación

Para esta probeta se observó como disminuyó el esfuerzo máximo del suelo, esto nos dio a entender que con este porcentaje no se podía trabajar por que disminuiría la consistencia del suelo.

Luego de esto se aumentó el porcentaje de aditivo de un 1% a un 2% conservando el mismo porcentaje de humedad (25%).

Tabla 60 Carga axial probeta 2% cal con 25% agua

PROB	OBSERV	CAL	AGUA	ELAB	HORA	ENSAYADA
2		2%	25%	20/06/2013		27/06/2013

PROB # 2	PESO (gr)	305.5	DEFOR	CARG
	DIAM (mm)	53.56	CONT	AXIAL
	ALTURA (mm)	102.55	10	5
	PESO TARA	69.2	20	10.5
	PESO H + T (gr)	134.9	30	20
	PESO S +T (gr)	113.4	40	33.5
			50	44.5
			60	62
			80	79
			100	76

Para esta prueba vemos como la carga axial fue un poco menor que la anterior (79) por lo que se esperaba que el esfuerzo disminuyera.

Tabla 61 Cálculo esfuerzo–deformación unitaria probeta 2% cal con 25% agua

PROBET	% CAL	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)	Lo (cm)
2	2	25	53.56	5.35	2.678	22.53	102.55	10.25

DEF UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	DE	CALCULO DE ESFZO	ECUACION
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1-\epsilon$		$\delta c = P/A$	$Y=0.3337 (X)-6.8616$

DEF C (mm)	C AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF C (mm)	Factor	mm	conv (cm)	ECUAC	P (Kg)	$\delta c = P/A$ (kg/cm ²)	COHE $\delta c_{Max}/2$
10	5	1	10.255	0.098	22.531	22.43	10	0.001	0.01	0.001	-5.1931	-2.36	-0.1052	
20	10.5	2		0.195		22.34	20	0.001	0.02	0.002	-3.358	-1.53	-0.0683	
30	20	3		0.293		22.24	30	0.001	0.03	0.003	-0.188	-0.09	-0.0038	
40	33.5	4		0.390		22.14	40	0.001	0.04	0.004	4.317	1.96	0.0886	
50	44.5	5		0.488		22.04	50	0.001	0.05	0.005	7.988	3.63	0.1647	
60	62	6		0.585		21.95	60	0.001	0.06	0.006	13.828	6.29	0.2864	
80	79	8		0.780		21.75	80	0.001	0.08	0.008	19.501	8.86	0.4075	0.2038
100	76	10		0.975		21.56	100	0.001	0.1	0.010	18.500	8.41	0.3901	
120	60	12		1.170		21.36	120	0.001	0.12	0.012	13.160	5.98	0.2801	

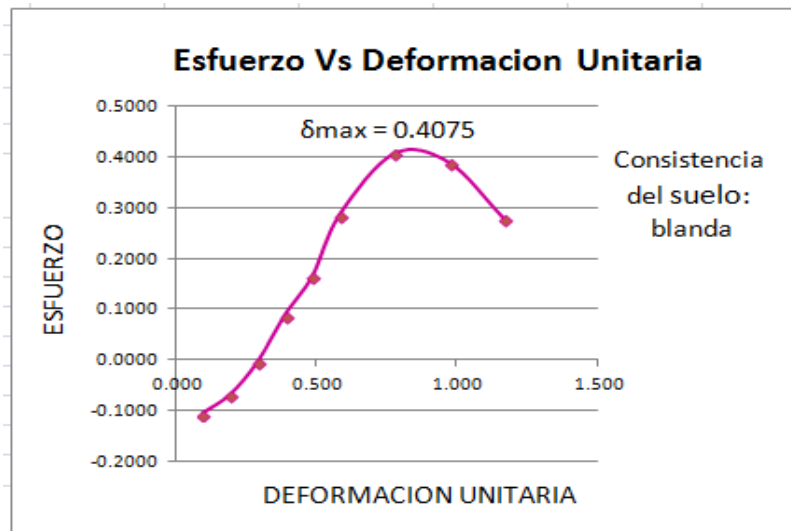


Figura 36 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 2% cal con 25% agua
Fuente: Proyecto de Investigación

Para este caso el esfuerzo disminuyó convirtiendo la consistencia del suelo en blanda, resultado que permite identificar que no es posible trabajar con este tipo de porcentajes.

Ahora se decide aumentar el porcentaje de aditivo y pasar de 2% a 4% con el mismo porcentaje de humedad.

Tabla 62 Carga axial probeta 4% cal con 25% agua

PROB	OBSERV	CAL	AGUA	ELABORADA	HORA	ENSAYADA
1		4%	25%			

PROB # 1	PESO (gr)	298.9
	DIAM (mm)	52.83
	ALTURA (mm)	101.44
	PESO TARA	62.2
	PESO H + T (gr)	134.6
	PESO S +T (gr)	111.5

DEF CONT	CARG AXIAL
10	4
20	15
30	19
40	33
50	43
60	60
80	69
100	50

Tabla 63 Cálculo esfuerzo deformación unitaria probeta 4% cal con 25% agua

PROBET	% CAL	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)
2	4	25	52.83	5.283	2.6415	21.92	101.44

DEF UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	CALCULO DE ESFZO
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_0/1 - \epsilon$	$\bar{\sigma}_c = P/A$

DEF C (mm)	C AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA $A = A_0/1 - \epsilon$	DEF C (mm)	mm	conv (cm)	ECUAC	P (Kg)	$\bar{\sigma}_c = P/A$ (kg/cm ²)	COHE $\bar{\sigma}_{cMax}/2$
10	4	1	10.144	0.099	21.92	21.82	10	0.01	0.001	-5.5268	-2.512	-0.115	
20	15	2		0.197		21.72	20	0.02	0.002	-1.856	-0.844	-0.039	
30	19	3		0.296		21.62	30	0.03	0.003	-0.521	-0.237	-0.011	
40	33	4		0.394		21.53	40	0.04	0.004	4.151	1.887	0.088	
50	43	5		0.493		21.43	50	0.05	0.005	7.488	3.403	0.159	
60	60	6		0.591		21.33	60	0.06	0.006	13.160	5.982	0.280	
80	69	8		0.789		21.13	80	0.08	0.008	16.164	7.347	0.348	0.1738
100	50	10		0.986		20.93	100	0.1	0.010	9.823	4.465	0.213	
120	10	12		1.183		20.74	120	0.12	0.012	-3.525	-1.602	-0.077	

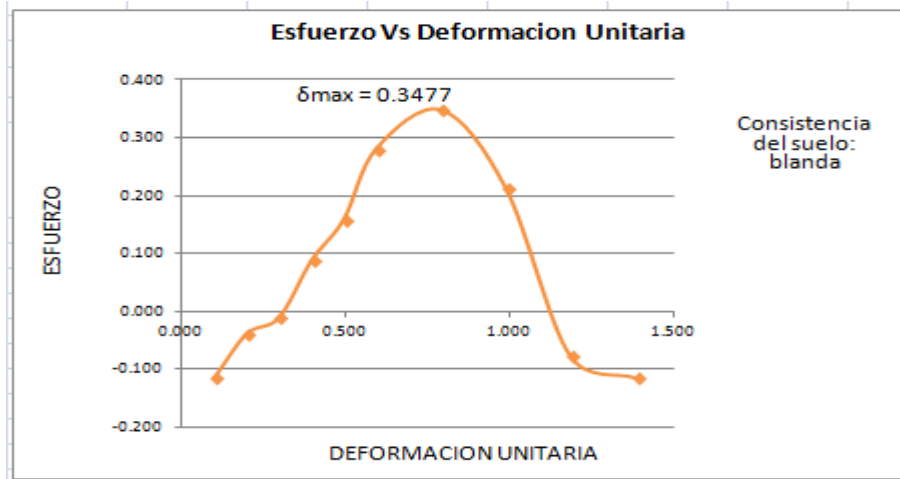


Figura 37 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 4% cal con 25% agua
Fuente: Proyecto de Investigación

Esta prueba presenta una gran disminución en la consistencia del suelo convirtiéndola de mediana a blanda por lo tanto tampoco es recomendable este porcentaje para combinar.

Ahora se incrementa el porcentaje de aditivo y pasa de 4% a 6% aunque se conservó el mismo porcentaje de humedad, esperando una mejor reacción así que los resultados para esta nueva probeta fueron:

Tabla 64 Carga axial probeta 6% cal con 25% agua

PRUEBA	OBSERV	CAL	AGUA	ELABO	HORA	ENSA
1		6%	25%	21/06/2013		02/07/2013

PROBET # 1	PESO (gr)	291.6	DEFOR	CARG
	DIAM (mm)	53.42	CONT	AXIAL
	ALTURA (mm)	101.03	10	6
	PESO TARA	61.0	20	13
	PESO H + T (gr)	132.3	30	18
	PESO S +T (gr)	108.7	40	27
			50	34
			60	41.5
			80	51
			100	49
			120	10

Se observó que la carga axial para esta prueba disminuyó a 51 por lo que se espera que el esfuerzo disminuya.

Tabla 65 Cálculo esfuerzo–deformación unitaria probeta 6% cal con 25% agua

Fuente: Proyecto de Investigación

PROBET	% CAL	% AGUA	∅ (mm)	∅ (cm)	r (cm)	A (cm ²)	Lo (mm)	Lo (cm)
1	6	25	53.42	5.342	2.671	22.413	101.03	10.103

DEF UNITARIA ϵ	CORRECCION DE AREA	DE	CALCULO DE ESFZO	ECUACION
$\epsilon = \Delta L/LO$	$A = A_o/1-\epsilon$		$\delta c = P/A$	$Y=0.3337 (X)-6.8616$

DEF (mm)	C	C AXIAL	DEFOR (cm) ΔL	Lo (cm)	$\epsilon = \Delta L/LO$ (cm)	Ao (cm ²)	COR AREA A= Ao/1- ϵ	DEF (mm)	C	Factor	mm	conv (cm)	ECUAC	P (Kg)	$\delta c = P/A$ kg/cm ²	COHE $\delta c Ma x/2$
10	6	1	10.103	0.099	22.413	22.31	10	0.001	0.01	0.001	-4.8594	-2.21	-0.099			
20	13	2		0.198		22.21	20	0.001	0.02	0.002	-2.524	-1.15	-0.052			
30	18	3		0.297		22.12	30	0.001	0.03	0.003	-0.855	-0.39	-0.018			
40	27	4		0.396		22.02	40	0.001	0.04	0.004	2.148	0.98	0.044			
50	34	5		0.495		21.92	50	0.001	0.05	0.005	4.484	2.04	0.093			
60	41.5	6		0.594		21.82	60	0.001	0.06	0.006	6.987	3.18	0.146			
80	51	8		0.792		21.62	80	0.001	0.08	0.008	10.157	4.62	0.214	0.106		
100	49	10		0.990		21.42	100	0.001	0.1	0.010	9.490	4.31	0.201			
120	10	12		1.188		21.23	120	0.001	0.12	0.012	-3.525	-1.60	-0.075			

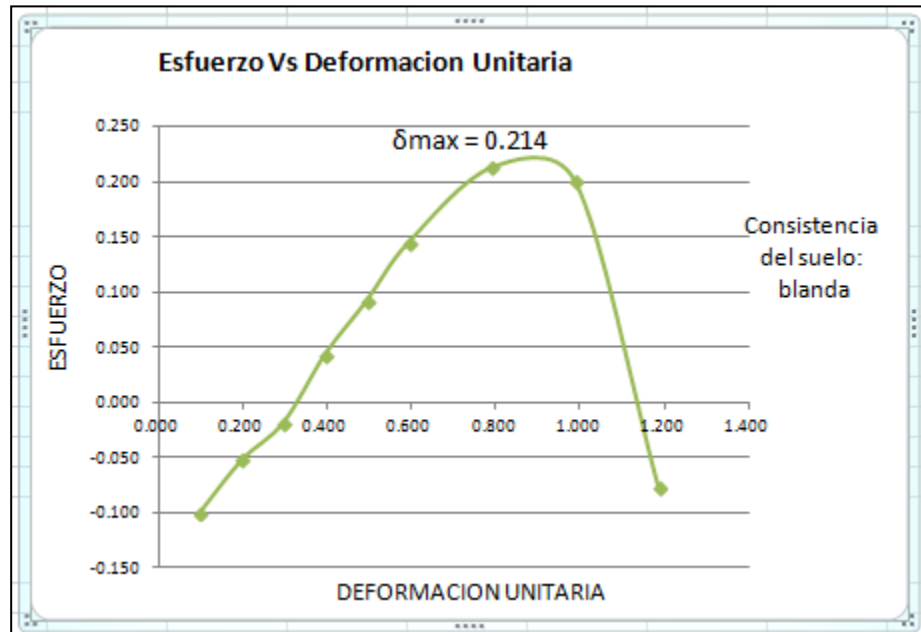


Figura 38 Esfuerzo – Deformación unitaria probeta 6% cal con 25% agua
 Fuente: Proyecto de Investigación

Para este caso se notó la disminución del esfuerzo de manera particular. La consistencia de este se vio afectada de tal manera que dejó de ser mediana y se convirtió en blanda esto significa que definitivamente es imposible trabajar con estos porcentajes.

Con el fin de cumplir con todos los porcentajes del aditivo anterior se procedió a aumentar el porcentaje de cal de 6% a 8% con el mismo porcentaje de humedad (25%).

La Tabla 63 muestra el resumen de porcentajes de cal y porcentajes de agua utilizados en las diferentes probetas y sus respectivos resultados:

Tabla 66 Resumen de resultado probetas con los diferentes porcentajes de aditivo (cal) y humedad

# PROBETA	% CAL	% AGUA	CARG AXIAL	ESFZO (kg/cm ²)	PROM	CONSIST DEL SUELO	PESOS UNITARIOS CAL	
							MUH gr/cm ³	MUS gr/cm ³
1	2	20	110	0.6341	0.4658	baja	1.305	0.937
2	2	20	65	0.2974			1.146	0.837
1	2	25	95	0.5386	0.4731	baja	1.318	0.937
2	2	25	79	0.4075			1.322	0.890
1	2	30	120	0.7179	0.5833	medio	1.354	0.928
2	2	30	83	0.4487			1.350	0.909
1	4	20	71	0.3583	0.3819	baja	1.202	0.885
2	4	20	80	0.4055			1.265	0.916
1	4	25	69	0.3477	0.3477	baja	1.344	0.915
1	4	30	99	0.5577	0.3537	baja	1.443	0.906
2	4	30	42	0.1497			1.348	0.933
1	6	20	65	0.3108	0.4176		1.170	0.874
2	6	20	94	0.5244			1.301	0.953
1	6	25	51	0.2154	0.2154		1.288	0.862
1	6	30	59	0.2688	0.4109		1.322	0.919
2	6	30	98	0.5530			1.402	0.887
1	8	20	82	0.4215			1.148	0.867
2	8	20	190	1.2241	0.7598		1.306	0.966
3	8	20	110	0.6339			1.285	0.906
1	8	25	97	0.5317	0.5317		1.268	0.665
1	8	30	125	0.7276	0.5502		1.305	0.914
2	8	30	73	0.3728			1.318	0.743
1	10	30	224	1.4716	1.6760		1.404	0.966
2	10	30	285	1.8804			1.401	0.966
1	12	30	369	2.5327	2.5327		1.432	1.121
1	14	30	295	1.9027	1.8765		1.235	0.705
2	14	30	285	1.8502			1.299	1.064

Nótese que para las diferentes mezclas de cal sólo cuando ésta superaba el 8% y las humedades estaban por encima de 20%, se alcanzaban valores por encima de los definidos para las condiciones reales del terreno. En conclusión, a mayores valores porcentuales de aditivo con humedades cercanas al 30%, se obtuvieron los mayores valores de resistencia a la compresión.

9. CONCLUSIONES

Inicialmente y gracias a diferentes pruebas realizadas, se pudo determinar que el tiempo de curado de las probetas sería 7 días, ya que a menor o mayor tiempo estas no podían ser ensayadas, y a la hora de desempacarlas presentaban fisuras por completo o no se consolidaban para realizar el ensayo de resistencia.

Después de los tres primeros ensayos realizados en este proceso investigativo se pudo observar que no se puede trabajar con humedades inferiores al 10% pues la probeta no se deja armar, ya que el suelo se encuentra demasiado seco y probablemente el aditivo genere mayor resequedad para este porcentaje de humedad.

Tomando en cuenta los resultados arrojados por la probeta de suelo natural en la cual el esfuerzo máximo fue de 0.6229 kg/cm^2 y sabiendo que el objetivo de la investigación era superar este valor, se pudo notar que sólo las probetas a las cuales se le aplicaron el mayor porcentaje de aditivo con mayor porcentaje de humedad eran las que mejor reaccionaban superando el esfuerzo máximo de este suelo natural, como se observó en el caso del silicato de sodio donde se encontró el resultado de 1.0292 kg/cm^2 de la mezcla entre el 14% de silicato y el 30% de agua, y pasa exactamente lo mismo con la cal los mismos porcentajes de aditivo y de humedad pero para este caso el esfuerzo subió a 1.8765 kg/cm^2 más de lo esperado y superando definitivamente el máximo esfuerzo del suelo natural.

Como se pudo notar en los resultados, los aditivos no alteraron la resistencia del suelo en los primeros porcentajes manteniendo un esfuerzo parecido al esfuerzo obtenido por el suelo natural.

Se concluyó que entre más alto sea el porcentaje de aditivo el comportamiento de estos químicos varía de uno a otro de una forma muy notable, dando como resultado que la cal mezclada con el suelo tenga mejor resistencia que la mezcla de silicato de sodio con suelo.

Se notó que al momento de preparar la mezcla con los químicos, el silicato tuvo una reacción con el agua muy diferente que el que tuvo la cal, dando a notar que al mezclar el suelo con silicato este produjo una mezcla más densa que impedía que el agua fluyera normalmente.

10. RECOMENDACIONES

Debido a resultados arrojados por la investigación y después de varios ensayos realizados a diversas muestras con diferentes porcentajes, tanto de humedad como de aditivo, se recomienda no trabajar con humedades inferiores al 10% pues el terreno no permite compactación ni con humedades mayores a 30% porque el terreno se torna muy viscoso y es imposible su manipulación.

A pesar de que los mejores resultados se presentaron en las pruebas que tuvieron mayor cantidad de aditivo y de humedad no se sabe con certeza que tanto daño o beneficio se le está generando al terreno utilizando dichas cantidades de químico, así que se recomienda que esta información pueda ser utilizada para formular una nueva investigación que posibilite determinar qué tan efectiva o dañina podría resultar trabajar con porcentajes de aditivos superiores a los trabajados en esta investigación.

Debido a los procedimientos y resultados hallados en el estudio realizado, al suelo conformado por cenizas volcánicas, se recomienda implementar este procedimiento investigativo con otro tipo de suelo para saber que reacción tienen los aditivos al momento de mezclarse con un suelo de características físicas distintas a las del estudio realizado.

Se recomienda que para estas cenizas volcánicas se hagan otros ensayos con otro tipo de aditivos para ver qué resultados se pueden obtener y se puedan comparar con los resultados ya obtenidos en esta investigación.

Al inicio del proceso experimental realizado en el laboratorio, se recomienda elaborar una serie de cilindros (alrededor de 7 cilindros) con la misma muestra de suelo y aplicando los mismos porcentajes de humedad y de aditivo químico, con la intención de realizar el ensayo de compresión inconfiada a un sólo cilindro diariamente y así al final de la semana establecer por medio del equipo de trabajo correspondiente, una comparación entre las resistencias a través de una gráfica (resistencia vs tiempo) para conocer el día exacto donde uno de los siete cilindros tienen su máxima resistencia; lo anterior con la pretensión de establecer los días que deben estar almacenadas las probetas antes de ser ensayadas.

En próximas investigaciones, si se desea utilizar cal como aditivo químico para la estabilización de suelos, se recomienda elaborar varios cilindros con distintos grados de pureza pero aplicando la misma cantidad de sustancia a la muestra de suelo, para por medio del ensayo de compresión inconfiada determinar que probeta con cierto grado de pureza obtuvo la mayor resistencia y así seguir trabajando todas las probetas a realizar con el mismo producto.

En este proceso experimental se recomienda conservar los cilindros en un lugar fresco, preferiblemente en un recipiente hermético para que las muestras no pierdan humedad y las propiedades de las muestras alteradas no sufran cambios drásticos con el paso del tiempo estimado en que se da la reacción química y así obtener resultados de compresión inconfiada más confiables.

Se recomienda tener bastante cuidado con la manipulación de los cilindros recién armados y comprimidos, sobre todo cuando se están extrayendo de la probeta metálica ya que cualquier manejo inadecuado puede provocar grietas irreparables a la muestra realizada, lo cual produce que no puedan ser ensayadas en la prueba de compresión inconfiada y ocasione que se deba repetir el proceso de armado del cilindro.

Se recomienda ser muy estricto en los días en que se deben realizar las pruebas de compresión inconfiada a los cilindros ya que de esto depende la obtención de resultados satisfactorios.

11. BIBLIOGRAFÍA

ARAYA D, María Loreto. Análisis comparativo para ejecución de estabilización de suelos, entre procesos tradicionales y el estabilizador de suelos soiltac. Tesis de grado (Ingeniero Constructor). Valdivia – Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela de construcción Civil. 2010. 98p.

ARRIETA R, Marco Tulio. Biomineralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales, en un suelo tropical de la ciudad de Medellín. Tesis de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Área – Geotecnia. Medellín – Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Ingeniería. Maestría en Ingeniería - Geotecnia. 2011. 88p.

BAUZÁ C, Juan Diego. El tratamiento de suelos arcillosos mediante cal. www.elabora.es/files/ap_articulos/DIR_Q6Q3A6G11V5JEN3O3QII/EL%20TRATAMIENTO%20DE%20SUELOS%20ARCILLOSOS%20MEDIANTE%20CAL.pdf

CASTAÑO M, Víctor Manuel; CORONADO M, Aleyda; HERNÁNDEZ Z, Juan Bosco; HORTA R, Jaime; LÓPEZ L, Teresa. REVISTA IBEROAMERICANA DE POLÍMEROS. Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. Querétaro – México. Volumen 11(3), Mayo 2010.

CERVANTES G, Erick Oliver. Estabilización físico-química de suelos arcillosos elaborados con precursores nano-métricos. Trabajo de Grado Maestría en Infraestructura del Transporte (Ingeniería Civil). Morelia – Michoacán. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Ingeniería Civil. 2010. 143p

CORASFALTOS. Formulación y producción de estabilizadores químicos para suelos finos colombianos. <http://www.corasfaltos.com/index>.

ECHEVERRÍA, G. SOLMINIHAC, T H. THENOUX, Z G. Estabilización química de suelos: aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos. www.ricuc.cl/index.php/ric/article/download/323/267.

GARNICA ANGUAS, Paul. GÓMEZ LÓPEZ, José Antonio. OBIL VEIZA, Edda Yhaaraby. PÉREZ SALAZAR, Alfonso. Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres. Sanfandila, Queretaro – México, 2002. 55p. Secretaría de comunicaciones y transportes. Instituto Mexicano del transporte.

GEOSEC. Inyección de resina de poliuretano. Madrid, España. <http://www.geosec.es/inyeccion-resina.html>.

HERRERA, M C. LIZCANO, A. SANTAMARINA, J C. REVISTA. INT. DE DESASTRES NATURALES, ACCIDENTES E INFRAESTRUCTURA CIVIL. Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. Bogotá – Colombia. Volumen 6(2), Febrero de 2006.

HINRICHSEN T, Nicole Natalia. Estudio de comportamiento de suelo estabilizado con sal: frente a la acción del agua, para distintas mezclas. Trabajo de graduación (Ingeniero Civil en Obras Civiles). Valdivia – Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela Ingeniería Civil en Obras Civiles. 2005. 112p.

HOYOS P, Fabián, Tratamiento Químico de Suelos Activos II: Los Criterios de Dosificación. Medellín.
[www.academia.edu/1219670/Tratamiento de Suelos Activos II. Criterios de Dosificación](http://www.academia.edu/1219670/Tratamiento_de_Suelos_Activos_II._Criterios_de_Dosificacion).

KELLERTERRA, Empresa especialista en la ingeniería del terreno. Madrid, España. Inyecciones de compactación.
www.kellerterra.com/pdf/catalogoinyeccionesdecompactacion.pdf.

OVANDO P, Héctor Andrés. Inyección de suelo por medio de la técnica de Jet Grouting. Trabajo de graduación (Ingeniero Civil). Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 2011. 99p.

PÉREZ R, M L. ROMERO C, J C. Análisis de la pérdida de resistencia por remoldeo de suelos arenosos de la zona estuarina de Nayarit.
<http://quimica.uqto.mx/revista/12/remoldeo.htm>.

QUINTANA C, Enrique. Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos. Tesis doctoral (Ingeniero Geólogo). Córdoba – Argentina. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2005. 283p.

RAVINES M, María Alejandra. Pruebas con un producto enzimático como agente estabilizador de suelos para carreteras. Trabajo de graduación (Ingeniero Civil). Piura - Perú. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. 2010. 231p.

ROLDÁN de P, Jairon. Estabilización de suelos con cloruro de sodio (NaCl) para bases y sub bases. Trabajo de graduación (Ingeniero Civil). Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 2010. 139p.

RUANO L, Denis Robin. Estabilización de suelos cohesivos por medio de arenas volcánicas y cal viva. Trabajo de graduación (Ingeniero Civil). Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 2012. 111p.

SUAREZ D, Jaime. Deslizamientos y estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Bucaramanga: Ingeniería de Suelos Ltda, 1998. 541p.