



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**“ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS MEDIANTE
PROCESOS QUÍMICOS Y MECÁNICOS”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

AUTOR: STHEFANY CAROLINA ORDOÑEZ ARMIJOS

DIRECTOR: Ing. MSc. LUIS MARIO ALMACHE

CUENCA - ECUADOR

2022

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**“ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS MEDIANTE
PROCESOS QUÍMICOS Y MECÁNICOS”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR: STHEFANY CAROLINA ORDÓÑEZ ARMIJOS

DIRECTOR: Ing. MSc. LUIS MARIO ALMACHE

CUENCA - ECUADOR

2022

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

Sthefany Carolina Ordóñez Armijos portadora de la cédula de ciudadanía Ne 0106543853. Declaro ser el autor de la obra: "Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos", sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 29 de agosto de 2022

F: 

Sthefany Carolina Ordóñez Armijos
0106543853

Certificación

Yo, Ing. M. Sc Luis Mario Almache Sánchez certifico la presente investigación “Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos” realizado por la señorita Sthefany Carolina Ordóñez Armijos egresada de la facultad de ingeniería civil perteneciente a la Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción, se desarrolló bajo mi supervisión y tutoría, siendo un trabajo elaborado de manera personal e inédita.

Cuenca, 11 de agosto de 2022



Firmado electrónicamente por:
**LUIS MARIO
ALMACHE
SANCHEZ**

F:

Ing. MSc Luis Mario Almache

0103401451

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme acompañado a lo largo de mi carrera, le doy gracias a mis padres María y Pedro por brindarme su apoyo incondicional en todo momento de mi vida.

Expreso mi más sincero agradecimiento al Ing. Luis Mario Almaché por guiarme y brindar su apoyo en la elaboración del presente trabajo.

Al Ing. Marcos González, quien aportó de una manera fundamental en la ejecución de los ensayos de laboratorio en base a su experiencia.

DEDICATORIA

El presente trabajo se la dedico a mis padres porque siempre han estado presentes en mi vida guiándome, aconsejándome y dándome la fuerza suficiente para seguir adelante.

También va dedicado a todos los profesionales y estudiantes de la ingeniería, para que les sirva de aporte para futuras investigaciones.

RESUMEN

Los suelos expansivos provocan pérdidas humanas y económicas, poseen cambios volumétricos provocados por ausencia o presencia de agua que causan daños estructurales en construcciones.

Es por esto que, se propone métodos químicos y mecánicos de estabilización de arcillas expansivas, que mitigue estos problemas que se dan en la zona de Nulti – Cuenca. Para mejorar las propiedades del suelo, se estableció cal y cemento como agentes estabilizantes que se agrega al suelo por sustitución en función de su peso seco en porcentajes.

Mediante el proceso químico se obtuvo que en el caso de la cal el 3% es el porcentaje óptimo para el suelo estudiado, y en el caso del cemento se obtuvo un porcentaje óptimo del 11%. Se realizaron ensayos de laboratorio que permitieron analizar el comportamiento del suelo. En los dos casos se obtuvieron resultados favorables, se mejoraron las propiedades geomecánicas y se controla un 100% la expansibilidad del suelo.

En el método mecánico se utiliza el ensayo de Proctor estándar, se obtuvo que la densidad seca de suelo remoldeada aumenta entre el 10% al 15% con respecto a la del suelo natural; las propiedades geotécnicas se mantienen igual. No se logra controlar la expansibilidad del suelo, ya que, obtuvimos un índice de expansión del 12%.

Haciendo un análisis económico es más barato estabilizar con cal que con cemento, ya que, el porcentaje de cal es menor que el de cemento. Los resultados obtenidos son muy exitosos en ambos casos, pero, se recomienda la mezcla de suelo – cal.

Palabras clave: arcillas expansivas, estabilización, expansibilidad, cal, cemento

ABSTRACT

Expansive soils cause human and economic losses; they have volumetric changes caused by the absence or presence of water that causes structural damages in constructions.

For this reason, chemical and mechanical methods of stabilizing expansive clays are proposed to mitigate these problems in Nulti - Cuenca. To improve the properties of the soil, lime and cement were established as stabilizing agents added to the soil by substitution according to their dry weight in percentages.

Using the chemical process, it was obtained that in the case of lime, 3% is the optimum percentage for the soil studied, and in the case of cement, an optimum rate of 11% was obtained. Laboratory tests were carried out to analyze the behavior of the soil. In both cases, favorable results were obtained, the geomechanical properties were improved, and the soil's expansibility was 100% controlled.

In the mechanical method, the standard Proctor test was used. The dry density of the remolded soil increased between 10% to 15% concerning that of the natural soil; the geotechnical properties remained the same. The expansibility of the soil cannot be controlled since we obtained an expansion index of 12%.

Making an economic analysis, it is cheaper to stabilize with lime than with cement since the percentage of lime is lower than cement. Both cases' results are very successful, but the soil-lime mixture is recommended.

Keywords: expansive clays, stabilization, expansibility, lime, cement

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE FIGURAS	12
ÍNDICE DE REGISTRO FOTOGRÁFICO	13
ÍNDICE DE INFORMES	15
INTRODUCCIÓN	15
161. CAPITULO I – ASPECTOS GENERALES	17
1 1. ANTECEDENTES	17
1 2. GEOLOGÍA DE LA ZONA	17
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
1 4. OBJETIVOS	20
1.4 1. OBJETIVO GENERAL	20
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1 5. JUSTIFICACIÓN	21
16. ZONA DE ESTUDIO	21
2. CAPÍTULO II – MARCO TEÓRICO	24
21. ESTADO DEL ARTE	24
2 2. SUELOS	25
2.3. AGENTES GENERADORES DE SUELOS	25
2 4. MINERALES ARCILLOSOS	26
2.4 1. SUELOS ARCILLOSOS	28
2 5. SUELOS EXPANSIVOS	28
2.5.1. ¿COMO IDENTIFICAR UN SUELO EXPANSIVO?	28
2.5.1.1. IDENTIFICACIÓN MINERALÓGICA	28
2.6. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES BÁSICAS DE LOS SUELOS	29
2.6.1. MÉTODOS INDIRECTOS DE DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL EXPANSIVO DEL SUELO	30
2.6.2. MEDIDAS DIRECTAS DE LA EXPANSIÓN DEL SUELO	30
2.6.3. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL FENÓMENO DE LA EXPANSIÓN	31
27. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	32
2.7 1. MODIFICACIÓN	33
2.7.2. ESTABILIZACIÓN	33
2.7.3. PROPIEDADES DE LOS SUELOS A ESTABILIZAR	33
2.8. TIPOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	35
2.8 1. PROCESOS QUÍMICOS	35
2.8.1 1. ESTABILIZACIÓN CON CAL	35
2.8.1.2. ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO	41
2.8.2. PROCESOS MECÁNICOS	51
2.8.2.1. ESTABILIZACIÓN MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR ESTÁNDAR	51

2.9.	ENSAYOS DE LABORATORIO	53
2.9.1.	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD	53
2.9.2.	LÍMITES LÍQUIDO Y PLÁSTICO	54
2.9.3.	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	57
2.9.4.	CLASIFICACIÓN DE SUELOS	59
2.9.4.1.	SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS DE LA AASHTO	60
2.9.4.2.	SISTEMA DE CLASIFICACIÓN UNIFICADA DE SUELOS (SUCS)	61
2.9.5.	MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA EL ÍNDICE DE EXPANSIÓN LIBRE DE SUELOS MEDIANTE EL CONSOLIDÓMETRO	63
2.9.6.	DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIVIDAD DE LOS SUELOS MEDIANTE EL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO Y EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD	65
2.9.7.	ENSAYO DE CORTE DIRECTO	66
2.9.8.	ENSAYO TRIAXIAL – CONSOLIDADO NO DRENADO (CU)	67
3.	CAPITULO III - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	69
3.1.	PROPIEDADES DEL SUELO NATURAL	69
3.2.	PROPIEDADES DEL SUELO ESTABILIZADO CON CAL	73
3.4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	77
3.5.	TABLA RESUMEN	82
4.	CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
4.1.	CONCLUSIONES	83
4.2.	RECOMENDACIONES	84
	BIBLIOGRAFÍA	86
	ANEXO I: REGISTRO FOTOGRÁFICO	87
	ANEXO II: ENSAYOS DE LABORATORIO	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ubicación del material extraído. Elaborado por autor	22
Tabla 2: Grado de potencial expansivo - índice plástico. (Patrone & Prefumo, 2005)	29
Tabla 3: Límites para la resistencia de suelo - cemento a la compresión. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)	44
Tabla 4: Contenido de cemento para diseño de mezcla suelo - cemento. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)	46
Tabla 5: Peso recomendado para el ensayo de contenido de humedad. (Bowles, 1981)	54
Tabla 6: Abertura de tamices. (Bowles, 1981)	58
Tabla 7: Clasificación de un suelo según el potencial de expansión. (ASTM - D-4829, 2016)	64
Tabla 8: Predicción de la expansividad a partir del límite líquido tomado de (INV E -132 -13, 2011) ----	65
Tabla 9: Predicción de la expansividad a partir del índice de plasticidad tomado de (INV E -132 -13, 2011)	65
Tabla 10: Identificación de Suelos Expansivos tomado de (Patrone & Prefumo, 2005)	66
Tabla 11: Información sobre la muestra de suelo natural para la granulometría	69
Tabla 12: Límites de Atterberg del suelo natural.	70
Tabla 13: Clasificación del suelo natural de Nulti	70
Tabla 14: Proctor Estándar del Suelo Natural.	72
Tabla 15: Ensayo de Corte Directo del Suelo Natural	72
Tabla 16: Expansividad del Suelo Natural	72
Tabla 17: Límites de Atterberg del suelo mezclado con Cal	73
Tabla 18: Clasificación del suelo mezclado con cal	73
Tabla 19: Proctor Estándar del Suelo mezclado con Cal	74
Tabla 20: Ensayo de Corte Directo del Suelo mezclado con Cal	74
Tabla 21: Expansividad del suelo mezclado con Cal	75
Tabla 22: Límites de Atterberg del suelo mezclado con cemento	75
Tabla 23: Clasificación del suelo mezclado con cemento	75
Tabla 24: Proctor Estándar del Suelo mezclado con Cemento	76
Tabla 25: Ensayo de Corte Directo del Suelo mezclado con Cemento	76
Tabla 26: Expansividad del Suelo mezclado con Cemento	76
Tabla 27: Clasificación del Suelo	79
Tabla 28: Tabla resumen	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: Estratigrafía de las formaciones de la cuenca de Cuenca, tomado de (Vélez, 2012) -----	18
Ilustración 2: Ubicación zona de estudio Nulti. Elaborado por autor -----	23
Ilustración 3: Suelo extraído. Elaborado por autor -----	23
Ilustración 4: Esquema de la estructura de la lámina silícica (Juárez & Rico, 2001) -----	26
Ilustración 5: Esquema de la estructura de la lámina alumínica (Juárez & Rico, 2001)-----	27
Ilustración 6: Elección del porcentaje óptimo de cal. Método McDowell -----	40
Ilustración 7: Cuadros para utilizar en el sistema de clasificación AASHTO -----	60
Ilustración 8: Rangos de límite líquido e índice de plasticidad para los grupos de suelos A-4, A-5, A-6 Y A-7.	60
Ilustración 9: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos -----	62
Ilustración 10: Máquina de Corte Directo.	66
Ilustración 11: Granulometría del Suelo Natural por cribado. Elaborado por autor -----	70
Ilustración 12: Carta de plasticidad para clasificar el suelos por el método SUCS -----	71
Ilustración 13: Límite Líquido. Elaborado por autor -----	77
Ilustración 14: Límite Plástico. Elaborado por autor -----	78
Ilustración 15: Índice Plástico. Elaborado por autor -----	78
Ilustración 16: Densidad Seca Máxima. Elaborado por autor -----	79
Ilustración 17: Humedad Óptima. Elaborado por autor -----	80
Ilustración 18: Cohesión. Elaborado por autor.	80
Ilustración 19: Ángulo de Fricción Interna. Elaborado por autor -----	81
Ilustración 20: Índice de Expansión. Elaborado por autor -----	81

ÍNDICE DE REGISTRO FOTOGRÁFICO

Anexo 1: Lugar de la extracción de muestras. Elaborado por autor -----	87
Anexo 2: Extracción de muestras. Elaborado por autor -----	88
Anexo 3: Extracción de muestras. Elaborado por autor -----	89
Anexo 4: Muestra de suelo natural en el laboratorio. Elaborado por autor -----	89
Anexo 5: Muestra de suelo para análisis granulométrico. Elaborado por autor-----	90
Anexo 6: Muestra tamizada para análisis granulométrico. Elaborado por autor-----	90
Anexo 7: Análisis granulométrico. Elaborado por autor-----	91
Anexo 8: Cuchara de Casa Grande para límites de Atterberg. Elaborado por autor -----	91
Anexo 9: Muestra de suelo - cemento para límites de Atterberg. Elaborado por autor-----	92
Anexo 10: Muestra de suelo - cemento para límites de Atterberg. Elaborado por autor -----	92
Anexo 11: Límites de Atterberg suelo - cemento. Elaborado por autor-----	93
Anexo 12: Límites de Atterberg suelo - cal. Elaborado por autor-----	93
Anexo 13: Muestra de suelo natural para ensayo de Proctor estándar. Elaborado por autor -----	94
Anexo 14: Molde para ensayo de Proctor estándar. Elaborado por autor-----	94
Anexo 15: Cilindro de suelo natural en el ensayo de Proctor estándar. Elaborado por autor-----	95
Anexo 16: Muestra de suelo - cal para ensayo de Proctor estándar. Elaborado por autor-----	95
Anexo 17: Cilindro de suelo - cal en el ensayo de Proctor estándar. Elaborado por autor-----	96
Anexo 18: Muestra de suelo - cemento para el ensayo de Proctor estándar. Elaborado por autor-----	96
Anexo 19: Cilindro de suelo - cemento en el ensayo de Proctor estándar. Elaborado por autor -----	97
Anexo 20: Cilindros de suelo natural en el ensayo de Proctor estándar-----	97
Anexo 21: Cilindros de suelo - cal en el ensayo de Proctor estándar. Elaborado por autor-----	98
Anexo 22: Cilindros de suelo - cemento en el ensayo de Proctor estándar. Elaborado por autor-----	98
Anexo 23: Muestra remoldeada de suelo natural para ensayo de corte directo. Elaborado por autor -----	99
Anexo 24: Muestra remoldeada de suelo - cemento para ensayo de corte directo. Elaborado por autor.-	99
Anexo 25: Curado de muestra de suelo - cal para ensayo de corte directo. Elaborado por autor -----	100
Anexo 26: Curado de muestra de suelo - cemento para ensayo de corte directo. Elaborado por autor.-	100
Anexo 27: Saturación de muestra de suelo - cemento para ensayo de corte directo .Elaborado por autor. -----	101
Anexo 28: Máquina de corte directo. Elaborado por autor-----	101
Anexo 29: Corte directo del suelo natural. Elaborado por autor -----	102
Anexo 30: Corte directo del suelo - cal. Elaborado por autor -----	102
Anexo 31: Corte - directo del suelo - cemento. Elaborado por autor-----	103
Anexo 32: Muestras de suelo en el ensayo de corte directo. Elaborado por autor -----	103
Anexo 33: Muestra de suelo natural remoldeada para la expansión libre. Elaborado por autor -----	104
Anexo 34: Muestra de suelo - cemento remoldeada para la expansión libre. Elaborado por autor-----	104
Anexo 35: Muestra de suelo - cal remoldeada para la expansión libre. Elaborado por autor -----	105
Anexo 36: Maquina para la expansión libre por el método edométrico. Elaborado por autor -----	105
Anexo 37: Partes del equipo de expansión libre. Elaborado por autor -----	106
Anexo 38: Muestra de suelo natural para la expansión libre. Elaborado por autor -----	106

Anexo 39: Muestra del suelo - cal para la expansión libre. Elaborado por autor-----	107
Anexo 40: Muestra de suelo - cemento para la expansión libre. Elaborado por autor-----	107
Anexo 41: Marcación de expansión libre del suelo natural. Elaborado por autor-----	108

ÍNDICE DE INFORMES

Informe 1: Análisis granulométrico del suelo natural. Elaborado por autor-----	109
Informe 2: Límites de Atterberg del suelo natural. Elaborado por autor-----	110
Informe 3: Límites de Atterberg suelo - cal 3%. Elaborado por autor -----	111
Informe 4: Límites de Atterberg suelo - cemento 11%. Elaborado por autor-----	112
Informe 5: Proctor estándar suelo natural. Elaborado por autor-----	113
Informe 6: Proctor estándar suelo - cal 3%. Elaborado por autor-----	114
Informe 7: Proctor estándar suelo - cemento 11%. Elaborado por autor -----	115
Informe 8: Corte directo suelo natural. Elaborado por autor-----	116
Informe 9: Corte directo suelo - cal 3%. Elaborado por autor-----	117
Informe 10: Corte directo del suelo - cemento 11%. Elaborado por autor -----	118
Informe 11: Expansión libre del suelo natural. Elaborado por autor -----	119
Informe 12: Expansión libre del suelo - cal 3%. Elaborado por autor-----	120
Informe 13: Expansión libre del suelo - cemento 11%. Elaborado por autor -----	121
Informe 14: Informe de la máquina de corte directo con carga de 10 KN del suelo natural. Elaborado por autor. -----	122
Informe 15:Informe de la máquina de corte directo con carga de 20 KN del suelo natural. Elaborado por autor. -----	123
Informe 16:Informe de la máquina de corte directo con carga de 40 KN del suelo natural. Elaborado por autor. -----	124
Informe 17: Informe de la máquina de corte directo con carga de 10 KN del suelo - cal 3%. Elaborado por autor. -----	125
Informe 18: Informe de la máquina de corte directo con carga de 20 KN del suelo - cal 3%. Elaborado por autor. -----	126
Informe 19:Informe de la máquina de corte directo con carga de 40 KN del suelo - cal 3%. Elaborado por autor. -----	127
Informe 20: Informe de la máquina de corte directo con carga de 10 KN del suelo - cemento 11%. Elaborado por autor,.....	128
Informe 21: Informe de la máquina de corte directo con carga de 20 KN del suelo - cemento 11%. Elaborado por autor,.....	129
Informe 22: Informe de la máquina de corte directo con carga de 40 KN del suelo - cemento 11%. Elaborado por autor,.....	130
Informe 23: Triaxial #1 del suelo natural. Elaborado por autor -----	131
Informe 24:Triaxial #2 del suelo natural. Elaborado por autor-----	132
Informe 25: Triaxial #3 del suelo natural. Elaborado por autor -----	133

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto experimental previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, tiene como objetivo principal **estabilizar la expansibilidad de los suelos mediante procesos químicos y mecánicos**. En los procesos químicos se pretende establecer el porcentaje óptimo de la mezcla de suelo con un material estabilizante como es la cal y el cemento; se usará el diseño de mezcla suelo-cal el diseño recomendado por McDowell y para el diseño de mezcla suelo-cemento el diseño recomendado por Alfonso Montejó Fonseca que su diseño se basa en la normativa AASHTO para controlar la expansibilidad de los suelos de la zona de Nulti. Las fuentes bibliográficas se obtienen de libros y publicaciones dedicadas a la mecánica de suelos y normas que establecen los procedimientos de los ensayos de laboratorio correspondientes al tema de investigación. Para esto se realizó ensayos de laboratorio del suelo natural y del suelo mezclado con cal y cemento para determinar su granulometría, plasticidad, compactación estándar; también se realizó ensayos de compresión simple, corte directo, triaxial que permitirán determinar parámetros geomecánicos y compararlos en condiciones originales y mejoras. Ensayos de expansión también están considerados para determinar el potencial expansivo de la muestra motivo de la investigación.

Para la compactación se realizó el ensayo de laboratorio estándar sabiendo que los suelos poseen características y propiedades únicas, es por esto, que es indispensable realizar los procesos en campo para determinar un apropiado desarrollo de la densificación. En cambio, los procesos que se realizan en el laboratorio se obtienen con las siguientes condiciones: resistencia al corte, cambios volumétricos, densidad relativa, permeabilidad baja, alta densidad, es decir, todas estas propiedades se pueden controlar en laboratorio mediante el ensayo de Proctor estándar. (Montejó Fonseca, Montejó Piratova, & Montejó Piratova, 2018)

La zona de donde se va a extraer el material es la zona de **Nulti** parroquia de la ciudad de Cuenca, con el fin de cumplir el objetivo de la investigación, ya que, este material tiene presente el fenómeno de expansibilidad del suelo arcilloso a causa de los minerales expansivos. Es por esto, que ha afectado de una manera considerable a la sociedad que se desarrolla dentro y a las afueras de Nulti; por esta razón se pretende estabilizar el suelo mediante la aplicación de cal en el porcentaje óptimo, para que de esta manera en futuras construcciones se tome en cuenta dicha estabilización.

El propósito de esta investigación es mejorar las características físico – mecánicas, de los suelos de la subrasante mediante el uso de cal y cemento, prometiendo una base estabilizada la cual formará parte de la estructura de cimentación. Las fuentes bibliográficas se obtienen de libros y publicaciones dedicadas a la mecánica de suelos y normas que establecen los procedimientos de los ensayos de laboratorio correspondientes al tema de investigación.

1. CAPITULO I – ASPECTOS GENERALES

1.1. ANTECEDENTES

En el Ecuador, por su ubicación geográfica y geológica, tiene algunos fenómenos naturales que son devastadores en el desarrollo, y más en la planificación y utilización del territorio.

Geológicamente la provincia del Azuay tiene las siguientes características:

- Las formaciones se encuentran de forma ininterrumpida, estas empiezan desde el paleozoico hasta las formaciones contemporáneas (Vélez, 2012).
- Los efectos volcánicos desde el punto de vista histórico se han perdido hace mucho tiempo, pero, varias formaciones geológicas aún se caracterizan por ser frágiles e incompetentes, siendo todavía inestables (Vélez, 2012).
- La historia de las glaciaciones en el Azuay se puede analizar cuidadosamente ya que sus huellas son recientes y claras (Vélez, 2012).
- La cuenca del río Paute en especial cuenta con un gran problema: los terrenos inestables que se consideran como peligros naturales. Esto se demostró mediante el desastre natural de “La Josefina” (Vélez, 2012).

1.2. GEOLOGÍA DE LA ZONA

La zona de estudio, Nulti, está dentro de las formaciones geológicas Loyola y Azogues con depósitos coluviales. A continuación, se detalla algunas características importantes sobre estas. Principalmente la cuenca aflora en el valle de Cuenca y en el valle del río Burgay, tiene una forma elongada N – NE, se pueden observar los principales rasgos tectónicos y estructurales en esa dirección.

La cuenca de Cuenca está en el grupo de las cuencas terciarias de la zona austral del Ecuador, está consta de formaciones sedimentarias miocénicas. A continuación, se presenta una interpretación gráfica de la estratigrafía de la cuenca de Cuenca.

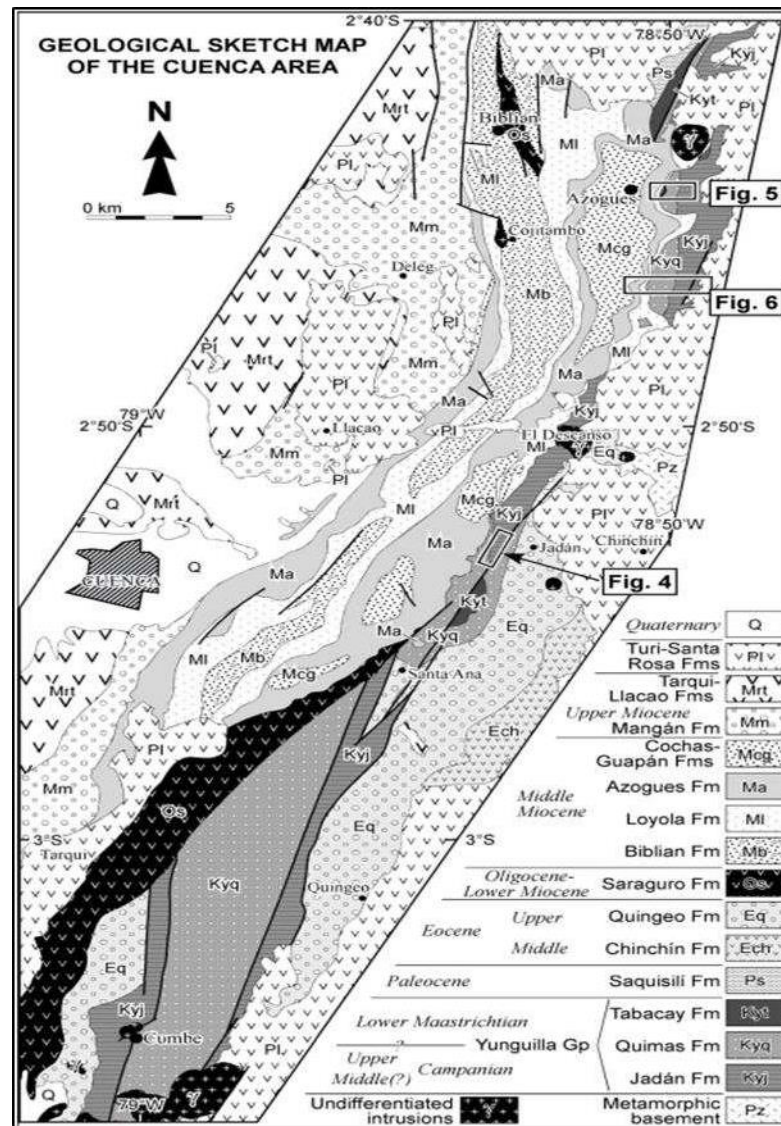


Ilustración 1: Estratigrafía de las formaciones de la cuenca de Cuenca, tomado de (Vélez, 2012)

La formación Loyola aflora en el anticlinal de Cuenca y en el flanco oriental de Gualaceo. En la actualidad se tiene afloramientos en el tramo medio entre el Descanso y Challuabamba por la apertura de la autopista Cuenca – Azogues (Vélez, 2012). La formación consiste básicamente de lutitas de color gris oscuro a negro, recubiertas con limonita y abundante yeso, contiene lentes de caliza localmente. El azufre está expuesto frecuentemente y tiene numerosa fauna y flora (Bristow & Parodiz, 1982). Según las últimas dataciones de trazas de fisión su edad se remonta al periodo Mioceno Medio. Dentro de las condiciones hidrogeológicas se tiene una permeabilidad baja por fracturación, da paso a la infiltración de aguas freáticas, pero no a la transmisibilidad. En zonas mal drenadas hay un importante desarrollo de presión de poros y en el pie de colinas cerca o bajo de los niveles freáticos.

Poseen una susceptibilidad a terrenos inestables de moderada a alta, los suelos residuales de esta formación propician reptaciones en secuencias temporales: desecación – infiltración – deformación – desecación. La formación Loyola tiene

el mayor número de deslizamientos y de las mayores intensidades, un caso para ejemplifica es el deslizamiento de Paccha, es el más grande de la región que ha sido estudiado, este cubre un área de daño de 17 millones de metros cuadrados (Vélez, 2012).

La formación Azogues tiene el afloramiento en los flancos del anticlinal de Cuenca, sinclinal de Azogues y de Cruz Loma, contiene grandes cortes en areniscas que se logran apreciar en la autopista Cuenca – Azogues (Vélez, 2012). Dentro de su litología contiene una secuencia sedimentaria básicamente clástica, areniscas tobáceas de grano medio a grueso de color café amarillentas con capas de lutitas, limolitas y pocas intercalaciones de conglomerados. Se puede encontrar fauna de moluscos y restos de plantas (Steinmann & Hungerbuehler, 1996). Tiene un espesor aproximadamente de 600 m, esta formación está afectada por deformaciones post sedimentarias. Las ultimas dataciones de trazas de fisión determinan la edad del Mioceno Medio – Tardío, según estudios palimnológicos determinan un ambiente de agua dulce (Steinmann & Hungerbuehler, 1996). La permeabilidad de esta zona es de media a alta por fracturación, con macizos poco húmedos a secos. Los macizos pertenecientes están calificados como rocas, estables con pendientes superiores a 30°, con caídas de bloques en pronunciadas pendientes o taludes de corte. Varios niveles lutíticos tienen comportamiento poco competente y se puede reducir su resistencia al corte en condiciones húmedas a través de planos de debilidad preferenciales. La susceptibilidad a terrenos inestables es de moderada a baja, los macizos heterogéneos de baja a mediana en fuertes pendientes, son expuestos a desprendimientos y caídas de bloques (Vélez, 2012).

(Vélez, 2012) define a los depósitos coluviales como “depósitos de ladera y de pie de talud con materiales que han experimentado poco transporte, con heterogéneos, dependiendo de la zona y el fenómeno inestable que les dio origen, que pueden ser: deslizamientos, derrumbes, flujos, etc.” Generalmente están constituidos de mezclas heterogéneas y de bloques y fragmentos angulares y subangulares en matriz limo arcillosa.

Los depósitos coluviales actuales son zonas principalmente inestables, sin sistema de drenaje constituido, susceptibles a la erosión hídrica, deslizamientos y flujos. Los depósitos antiguos poseen una permeabilidad de media a baja que va en función de la compacidad, los niveles freáticos son profundos o colgados, mientras que, en los depósitos recientes la porosidad es de media a alta, pero su transmisibilidad varia. En estos dos casos existen zonas húmedas y mal drenadas (Vélez, 2012). En general el comportamiento de los depósitos coluviales es de permeabilidad variable, desde permeables a impermeables. Los depósitos más antiguos, compactados y en pendientes bajas, pueden ser aptos para la construcción, sin embargo, los depósitos recientes son peligrosos (Vélez, 2012).

Estas formaciones están expuestas al fenómeno de la expansibilidad (cambio de volumen del suelo en presencia de agua), es por esto que se realiza un análisis de procesos mecánicos y químicos para la estabilización y mejoramiento de estos suelos.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El fenómeno de la expansibilidad de los suelos arcillosos ha causado grandes daños económicos y constructivos por mucho tiempo; actualmente un suelo arcilloso, que contiene montmorillonita en su composición química se lo conoce por su alto grado de expansibilidad el cual provoca el colapso de cimentaciones, edificaciones y otras construcciones. Las causas que intervienen para que un suelo arcilloso sea altamente expansivo se da por su composición mineralógica, granulométrica, límites líquidos, límites plásticos, etc., pero, esto solo es una parte del problema, para que cause ese hinchamiento o cambio volumétrico de suelo, están involucrados otros factores, tanto naturales como a la actividad humana. Los daños se originan debido a los cambios volumétricos por la presencia de agua, la cual modifica el contenido de humedad del suelo y ocasionan fenómenos de hinchamiento en tiempos de invierno y contracción o asentamientos en épocas de verano; todos estos están involucrados en mayor o menor proporción y de esta manera intervienen en el equilibrio de la humedad del suelo, del que en decisiva están sujetos a los cambios de volumen (LLorca, 2012).

Como propuesta de trabajo se plantea estabilizar las arcillas expansivas mediante procesos químicos como es la adición de cal y cemento y también mediante un proceso mecánico como es el caso del ensayo Proctor Estándar. Para lograr el cumplimiento satisfactorio de la propuesta de trabajo de titulación se revisó varias fuentes bibliográficas, las cuales permitirán recolectar la información teórica necesaria, para justificar la investigación que se ejecuta. Luego se realizó un análisis mediante estudios de suelos que consisten en la extracción de muestras inalteradas de la zona de estudio con el fin de determinar las características físicas y geo mecánicas de los suelos de la zona. Se establece el contenido óptimo de cal y cemento para el tipo de suelo que se estudia, de esta manera se hará que el suelo pierda expansibilidad y logre estabilizarse frente al potencial de expansión. Finalmente, con los resultados obtenidos se realizó un análisis y procesamiento de los datos para verificar que el método de estabilización aplicado ayuda a reducirla expansibilidad del suelo.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

- Estabilizar arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer el porcentaje óptimo de la mezcla de suelo con un material estabilizante como es la cal mediante un proceso químico para controlar la expansibilidad de los suelos de la zona de Nulti.
- Establecer el porcentaje óptimo de la mezcla de suelo con un material estabilizante como es el cemento mediante un proceso

químico para controlar la expansibilidad de los suelos de la zona de Nulti.

- Determinar las características del suelo después de haber realizado la compactación mediante ensayos de laboratorio para controlar la expansibilidad de los suelos de la zona de Nulti.
- Determinar las características del suelo mediante ensayos de laboratorio para definir su grado de expansibilidad.
- Verificar si la estabilización del suelo con los métodos químicos y mecánico propuestos funciona para evitar la expansibilidad de los suelos en estudio.

1.5. JUSTIFICACIÓN

En los últimos tiempos han surgido bastantes investigaciones experimentales en las cuales ingenieros se han dedicado a investigar el comportamiento de los suelos expansivos debido a las grandes pérdidas económicas, humanas y materiales alrededor del mundo. El estudio de los diferentes minerales con la finalidad de aumentar las capacidades portantes de los suelos, ha alcanzado un auge en los países desarrollados en los últimos años, debido al crecimiento registrado de la población, el comercio y vialidad. Los suelos arcillosos, debido a su baja capacidad de soporte y mala calidad no siempre cumplen con los requerimientos necesarios para ser empleados en proyectos constructivos. Una alternativa de solución con la finalidad de mejorar las características mecánicas propios del material es estabilizándolo con productos que puedan mejorar sus propiedades naturales, una de ellas es la incorporación de cal y cemento ya que son granos finos compuestos básicamente por silicatos y aluminios que permiten una reacción cohesiva con el suelo arcilloso que al igual que otras sustancias reduce el límite líquido, índice plástico e índice de plasticidad (LLorca, 2012).

En la parroquia de Nulti – Cuenca se cuenta con la presencia de estos suelos arcillosos expansivos, teniendo los problemas mencionados a los cuales no se ha dado una solución útil mediante investigaciones de suelos que permitan resolver o disminuir el deterioro de edificaciones para viviendas, actualmente esta zona se está convirtiendo en zonas de expansión territorial ubicadas en la zona sur de la ciudad de Cuenca. Por medio de esta investigación se pretende establecer un método de estabilización del suelo a través de un proceso químico mediante la adición de cal que permita disminuir el porcentaje de expansibilidad del suelo de la zona de estudio.

1.6. ZONA DE ESTUDIO

Cuenca por su geología es una ciudad que esta litológicamente conformada por suelos arcillosos expansivos, puntualmente la parroquia de Nulti se ve afectada por estos movimientos causando grandes problemas; por lo cual, se eligió esta zona para la extracción de muestras de suelo.

Nulti, es una antigua población azuaya cuyos orígenes se remontan a épocas anteriores a la conquista española e incluso la conquista incásica. Su Cabecera Parroquial se ubica en las faldas de la colina de Jalzhi y es pequeña comparando

con otras parroquias, sin embargo se ha tomado la decisión de gestionar ante la Municipalidad de Cuenca para que el concejo cantonal decida agrandar o incrementar el área parroquial de acuerdo a una propuesta enviada, sobre todo debido a la afección por los deslizamientos y hundimientos, sin posibilidad de crecer en infraestructura y servicios básicos; se propone que la cabecera parroquial tenga sus linderos con la cumbre de Jalzhi, Hierba Buena, hasta Zhulloguarango, Allpayacu y con los límites de la parroquia urbana de Machángara. La parroquia esta incrustada en la altura pétrea de Nulti, cuenta con pocos terrenos fértiles y una creciente erosión de sus suelos. Nulti es una parroquia rural ubicada al noroeste del cantón Cuenca, provincia del Azuay, tiene una extensión de 2.802,19 hectáreas; ocupa el 1% del territorio cantonal. Localizada a una distancia de 8 km desde la ciudad de Cuenca, con una altitud de 2577 msnm, con una temperatura media de 15,6 grados centígrados, precipitación anual de 766.4 milímetros y velocidad del viento 2,2 metros por segundo, media anual. La parroquia Nulti, según el último censo del año 2010, tiene una población de 4324 personas (GAD Parroquial de Nulti, 2019).

La tabla 1 muestra las coordenadas de donde fue extraído el material de la zona de Nulti para los ensayos de laboratorio.

ZONA	ELEVACIÓN	COORDENADA X	COORDENADA Y
NULTI	2442 m	760636	9683091

Tabla 1: Ubicación del material extraído. Elaborado por autor.

El material extraído del suelo de la zona de Nulti para los ensayos de laboratorio se tomaron de las siguientes coordenadas: E730636;N9683091. A continuación, la figura 2 expone la zona de donde fue extraído el material:

A continuación, la ilustración #2 expone la zona de donde fue extraído el material:

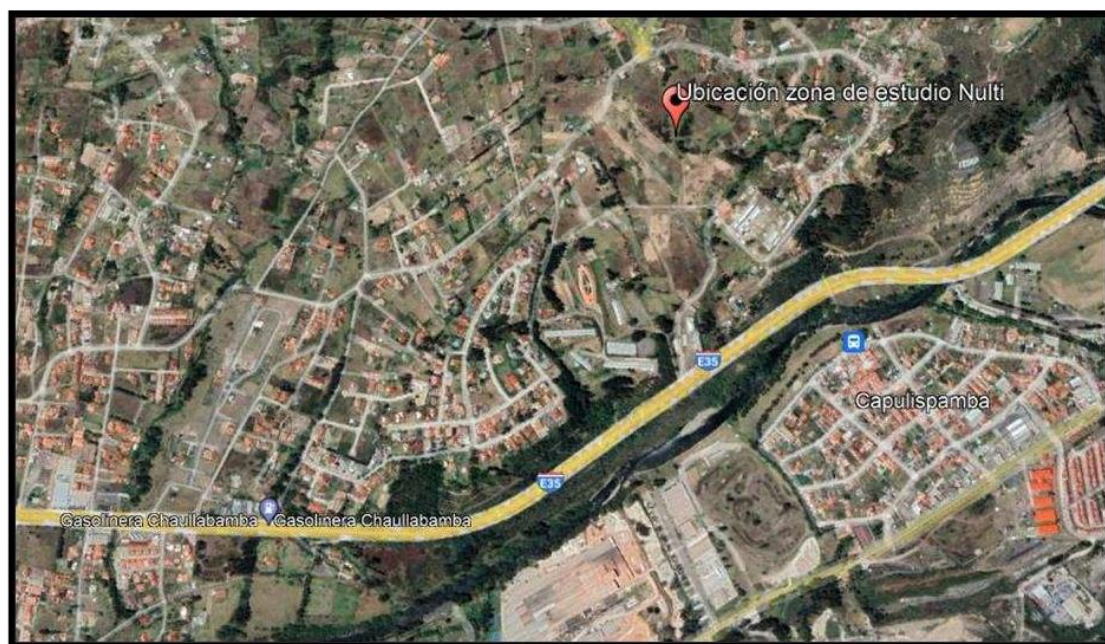


Ilustración 2: Ubicación zona de estudio Nulti. Elaborado por autor.



Ilustración 3: Suelo extraído. Elaborado por autor.

2. CAPÍTULO II – MARCO TEÓRICO

2.1. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se detallan las investigaciones y consultas bibliográficas previas que se han realizado sobre la estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos.

(González, 2021) corrobora que el uso óptimo del 3% de cal mejora las características físicas y geomecánicas del suelo, ya que, a partir de este porcentaje recomendado por el ábaco de McDowell, el material se comporta como un limo en los sistemas de clasificación SUCS y AASHTO, debido a la disminución de su plasticidad por los intercambios iónicos ocurridos en las reacciones químicas, además se mejoran los parámetros de cohesión en los ensayos de compresión simple y corte directo. La combinación de la mezcla suelo – cal generan nuevos silicatos y aluminatos de calcio haciendo que el suelo se vuelva más resistente. Además, demuestra que el método de estabilización aplicado fue exitoso debido a que el suelo mejoró su expansibilidad pasando de poseer un 11% en estado natural, a una expansibilidad nula (0%) mediante la adición del 3% de cal, es decir se consigue una estabilidad del 100%.

(Sánchez, 2014) afirma que el material estabilizado con el 7% de cal se ha logrado obtener una reducción del 8.5 % en el límite líquido, un aumento en el límite plástico de 10% y en el índice de plasticidad se ha alcanzado una disminución del 11.5%, siendo este porcentaje el que muestra la mayor reducción en el índice de plasticidad y a partir del cual ya no se presentan cambios significativos en este indicador. Con el 9 % de cemento se ha obtenido el menor valor en el índice de plasticidad; este se ha reducido en un 36% respecto al estado natural. El límite líquido aumenta en un 8% y el Límite de plasticidad crece en un 61%. Utilizando la cal viva como agente estabilizador se logra reducir el porcentaje de hinchamiento de los suelos, con un 3% esta reducción es del 20%, con 5% de cal el porcentaje de hinchamiento se reduce en un 40% y con el uso del 7% de estabilizante se alcanza reducciones de 57%.

(Bravo & Daza, 2019) indican que La cal es el mejor estabilizante para el suelo expansivo de Miraflores; ya que en las muestras remoldeadas a los 3 y 7 días de curado, para las dos densidades ensayadas, los resultados obtenidos fueron los más favorables, dando como resultado una estabilización hasta el 98.23% en relación al hinchamiento de la muestra inalterada extraída en campo. La comparación costo-beneficio da como resultado que los mejores estabilizantes para el suelo de Miraflores son la cal y el cemento, teniendo como valores de reducción de expansión de 98.23% y 81.5% respectivamente y un costo por metro cúbico estabilizado de \$28.86 para la cal y \$26.61 para el cemento. Aunque el costo de la estabilización con cemento sea menor, no se considera como el estabilizante óptimo para el suelo, por tener una variación notable en la reducción de expansión con respecto a la cal y a al ser el estabilizante que tiene el grado de contaminación más elevado entre todos los aditivos. Los estabilizantes con mayor contenido de calcio es su composición, son más beneficiosos al momento de estabilizar un suelo expansivo, ya que el intercambio catiónico se realiza con

mayor facilidad, lo que genera una reducción en el potencial expansivo y contribuye a la estabilización del suelo

2.2. SUELOS

El “término suelo” ha sido definido de diferentes puntos de vista, ya sea que dicho significado venga de un ingeniero, geólogo, agrónomo, etc.

A continuación, se menciona algunas definiciones de “suelo” de autores destacados dentro de la mecánica de suelos.

Según (Juárez & Rico, 2001) para el geólogo el suelo “es todo material intemperizado en el lugar en que ahora se encuentra y con contenido de materia orgánica cerca de la superficie”.

Para fines prácticos en mecánica de suelos el termino suelo representa “todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas” (Juárez & Rico, 2001).

Para los ingenieros civiles el suelo se define como “el conjunto de partículas minerales, producto de la desintegración mecánica o de descomposición química de rocas preexistentes” (Crespo Villalaz , 2004).

El geólogo determina al suelo como “el material resultante de la descomposición y desintegración de la roca por el ataque de agentes atmosféricos” (Crespo Villalaz , 2004).

Según Crespo la definición de suelo más completa es que “el suelo es una delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ella se asientan” (Crespo Villalaz , 2004).

2.3. AGENTES GENERADORES DE SUELOS

Los mecanismos generadores de suelo se definen en dos grupos: desintegración mecánica y descomposición química. El término “desintegración mecánica” hace referencia al intemperismo de las rocas por agentes físicos, como por ejemplo cambios de temperatura, efecto de la congelación del agua en grietas y juntas de las rocas, acciones de organismos, plantas, etc. A causa de estos agentes las rocas se desintegran y llegan a crear arenas, limos y en casos especiales arcillas (Juárez & Rico, 2001).

Por otra parte, la descomposición química se da por la acción de agentes que agreden a las rocas alterando la complexión mineralógica o química. El principal agente es el agua y sus mecanismos más destacados son la oxidación, la hidratación y la carbonatación. Estos mecanismos principalmente generan arcillas como última fase de su descomposición (Juárez & Rico, 2001).

Es importante mencionar que todos los efectos mencionados suelen destacar con los cambios de temperatura, es muy usual hallar formaciones arcillosas en zonas húmedas y cálidas, mientras que las formaciones arenosas o limosas se encuentran en zonas más frías.

2.4. MINERALES ARCILLOSOS

Los minerales constitutivos de las arcillas principalmente son los silicatos que se encuentran en las rocas ígneas y metamórficas, los agentes de la descomposición química llegan a un producto final que es la arcilla. Los estudios de las propiedades mineralógicas de estos sedimentos son esenciales para la ingeniería ya que, el comportamiento mecánico de las arcillas se ve involucrado por su estructura en general y constitución mineralógica en particular (Juárez & Rico, 2001).

Las arcillas están formadas principalmente por silicatos de aluminio hidratados, además se puede encontrar hierro, silicatos de magnesio, entre otros metales hidratados. Dichos minerales poseen una estructura cristalina, cuyos átomos se acomodan en láminas (Juárez & Rico, 2001).

Existen dos tipos de láminas: la silícica y la aluminica. La primera lámina está conformada por un átomo de silicio, rodeado de cuatro átomos de oxígeno, disponiéndose el conjunto en forma de tetraedro, tal como se muestra en la ilustración 4. Estos tetraedros se agrupan en unidades hexagonales, sirviendo un átomo de oxígeno de nexo entre cada dos tetraedros. Las unidades hexagonales repitiéndose indefinidamente, conforman una red lamelar (Juárez & Rico, 2001).

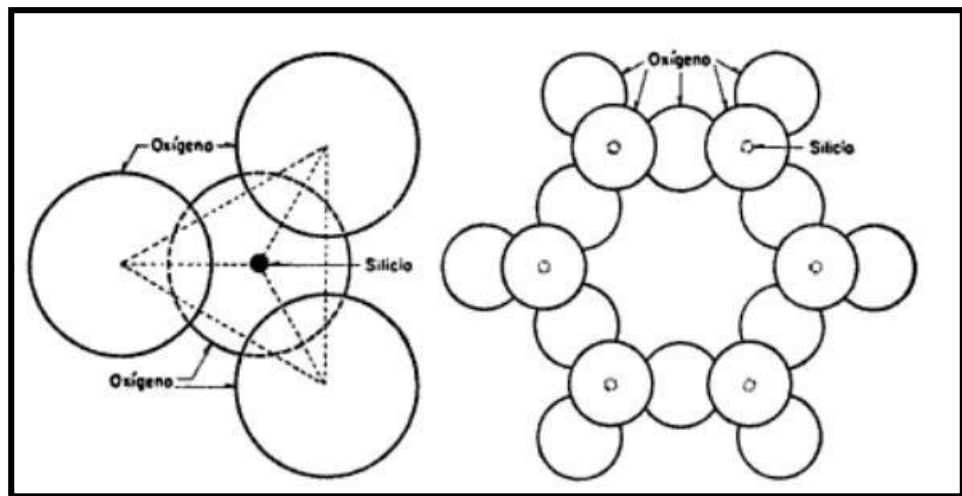


Ilustración 4: Esquema de la estructura de la lámina silícica (Juárez & Rico, 2001).

Las láminas aluminicas están formadas por retículas de octaedros, dispuestos con un átomo de aluminio al centro y seis de oxígeno alrededor, tal como se muestra en la ilustración 5, también, el oxígeno es el nexo entre cada dos octaedros vecinos, para constituir la red (Juárez & Rico, 2001).

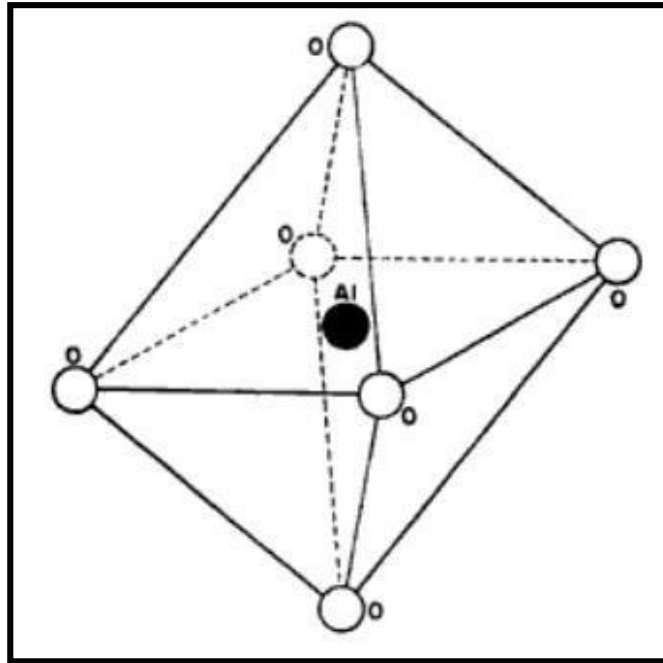


Ilustración 5: Esquema de la estructura de la lámina aluminica (Juárez & Rico, 2001).

Según su estructura reticular, los minerales de arcilla se clasifican en tres grandes grupos: caolinitas, montmorillonitas e ilitas.

Las caolinitas están formadas por una lámina silícica y otra aluminica, que se superponen infinitamente. La unión entre todas las retículas es lo bastante firme para no permitir la penetración de moléculas de agua, por lo tanto, las arcillas caoliniticas son estables en presencia del agua (Juárez & Rico, 2001).

Las montmorillonitas están formadas por una lámina aluminica entre dos laminas silícicas, superponiéndose indefinidamente, en este caso la unión entre las retículas del mineral es débil, por lo tanto, las moléculas de agua pueden entrar en la estructura con facilidad, a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar (Juárez & Rico, 2001).

Por último, las ilitas, están formadas análogamente que las montmorillonitas, pero su constitución interna tiende a formar grumos de materia, que reducen el área expuesta al agua por unidad de volumen; por ella, su expansibilidad es menor que la de las montmorillonitas, generalmente las arcillas iliticas se comportan de manera más favorable para el ingeniero (Juárez & Rico, 2001).

Las arcillas que tienen en su composición química la montmorillonita se les conocen por ser arcillas expansivas, esto es un gran problema desde el punto de vista geotécnico, ya que estas producen un cambio de volumen al entrar o perder contacto con el agua. Dentro de la construcción se producen muchas pérdidas humanas, materiales, etc., es por esto, que se utilizarán procesos químicos y mecánicos para lograr una estabilización del suelo de la zona de estudio, para que en un futuro se pueda construir con seguridad.

2.4.1. SUELOS ARCILLOSOS

Se define como suelo arcilloso al “conjunto de partículas sólidas con diámetro menor de 0.005 mm y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua” (Crespo Villalaz , 2004). Químicamente es un silicato de alúmina hidratado, muy rara vez se puede encontrar silicatos de hierro o de magnesio hidratados. Estos minerales se les encuentra de forma cristalina ya que, sus átomos se encuentran en forma laminar. Generalmente las arcillas se contraen al secarse, son plásticas, presentan cohesión según su humedad, son compresibles, al aplicar una carga en su superficie se comprimen lentamente (Crespo Villalaz , 2004).

Las arcillas se generan por la descomposición de rocas que tienen feldespato, como por ejemplo el granito. Se puede presentar de varios colores, esto depende de las impurezas que tienen, los colores van desde el rojo anaranjado hasta el color blanco cuando es una arcilla pura (Arauz, 2018).

2.5. SUELOS EXPANSIVOS

Se consideran suelos expansivos a los suelos arcillosos que son inestables en presencia de humedad, ya que, su principal característica es el cambio de volumen, es decir, se expande cuando varía su contenido de agua. Mientras que, cuando el agua abandona el espacio entre las láminas mediante la evaporación, el volumen de la masa se contrae. También se les considera impermeables a las arcillas expansivas (Buitrón & Enríquez, 2018)

2.5.1. ¿COMO IDENTIFICAR UN SUELO EXPANSIVO?

Las principales formas de identificar un suelo expansivo son las siguientes:

- Identificación mineralógica.
- Determinación de propiedades básicas de los suelos.
- Métodos indirectos de determinación del potencial expansivo del suelo.
- Medidas directas de la expansión del suelo.
- Valoración por medios de laboratorio.
- Valoración por análisis cualitativo de los límites de plasticidad.

2.5.1.1. IDENTIFICACIÓN MINERALÓGICA

- Difracción por rayos X.
- Análisis térmico diferencial.
- Análisis de absorción de colorantes.
- Análisis químicos.
- Análisis por microscopio electrónico.

Los tres grupos en que se clasifican los minerales arcillosos son: illita, caolinita y montmorillonita, compuestos por hidro aluminosilicatos. Los

ensayos mineralógicos tienden a detectar la presencia de montmorillonita, que es el mineral preponderantemente expansivo (Patrone & Prefumo, 2005).

La presencia de cargas eléctricas negativas en la superficie de los minerales arcillosos, así como la capacidad de intercambio catiónico resultan fundamentales para la magnitud de la expansión (Patrone & Prefumo, 2005).

2.6.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES BÁSICAS DE LOS SUELOS

Mediante ciertas propiedades de los suelos se establece el potencial expansivo de un suelo, las propiedades a determinar son las siguientes: límite líquido, límite plástico, límite de contracción, contenido de coloides y expansión libre del suelo (Patrone & Prefumo, 2005).

- **Límite líquido y límite plástico**

Algunos investigadores como Seed, Woodward y Lundgren expusieron que las características plásticas de los suelos son indicadores de las características expansivas de las arcillas, esto se cree ya que las características plásticas dependen en la cantidad de agua que una arcilla absorbe (Patrone & Prefumo, 2005).

La relación entre las características plásticas y el hinchamiento de los suelos se establecen en la siguiente tabla:

Grado de potencial expansivo	Índice Plástico
Bajo	0 – 15
Medio	10 – 35
Alto	20 – 55
Muy alto	> 35

Tabla 2: Grado de potencial expansivo - índice plástico. (Patrone & Prefumo, 2005)

Es importante destacar que todos los suelos con una expansividad alta poseen plasticidades altas, sin embargo, los suelos con plasticidad alta no necesariamente son expansivos.

- **Contenido de coloides**

De acuerdo al tamaño se considera arcillas a aquellos materiales que tienen un tamaño inferior a 5 micras (0.005 mm), siendo necesario para su determinación la ejecución de un ensayo hidrométrico. El tamaño de la expansión que experimenta una arcilla está relacionado con la cantidad de partículas de tamaño arcilla presente en el suelo (Patrone & Prefumo, 2005).

La cantidad de partículas de arcilla presentes en un suelo se determina mediante la siguiente fórmula:

$$S = kC^x$$

De esta fórmula se despeja la variable C:

$$C = \frac{\sqrt[x]{S}}{k} \quad (1)$$

Donde:

S: Hinchamiento potencial, expresado como % del hinchamiento de una muestra compactada a la humedad óptima según Proctor Estándar.

C: Porcentaje de fracción arcilla

x: exponente que depende del tipo de arcilla

k: Coeficiente que depende del tipo de arcilla.

x y k, que indican el tipo de partículas coloidales presentes se determinan a través de ensayos difracción por rayos X.

- **Determinación de la expansión libre**

Este método se basa en poner en una probeta normalmente cilíndrica un volumen conocido de suelo “seco” y sumergirlo en agua sin aplicación de sobrecarga alguna, mientras se mide la expansión. La diferencia entre el volumen final e inicial, expresado como un porcentaje del volumen inicial es la expansión libre. Esta medida de la expansión se realiza en condiciones muy desfavorables, ya que se hace en condiciones de ninguna sobrecarga.

Experimentos realizados por Holtz indican que una arcilla como la bentonita comercial puede tener en este ensayo expansión del orden de 1200 a 2000 %. Holtz propone que las expansiones calculadas mediante este ensayo por encima del 100 % causan daños significativos a la estructura, mientras que suelos que logran una expansión por debajo del 50 %, rara vez tienen cambios de volúmenes apreciable bajo la aplicación de cargas estructurales, aun cuando estas sean provocadas por estructuras livianas (Patrone & Prefumo, 2005).

2.6.1. MÉTODOS INDIRECTOS DE DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL EXPANSIVO DEL SUELO

Estos métodos se basan en pronosticar el potencial expansivo del suelo de una forma cualitativa, en base a medidas directas de la expansión del suelo sobre muestras remoldeadas compactadas en condiciones óptimas de humedad y densidad. Los métodos más utilizados son el de “Ladd y Lambe” auspiciado por la Federal Housing Administration y el método de “PVC” o método de la medida del cambio volumétrico (Patrone & Prefumo, 2005).

2.6.2. MEDIDAS DIRECTAS DE LA EXPANSIÓN DEL SUELO.

Estas medidas consisten en calcular la expansión del suelo al saturarlo bajo diferentes condiciones de carga, graficándose las variaciones de hinchamiento para diferentes presiones aplicadas (Patrone & Prefumo, 2005).

En base a diferentes investigaciones se ha determinado que los siguientes dos parámetros definen el potencial de hinchamiento:

- **Presión de hinchamiento (Ps)**

Se define como “la presión aplicada en laboratorio sobre una muestra de suelo expansivo para que, una vez en contacto con agua, la probeta mantenga constante su volumen inicial, es decir que la variación de volumen sea nula” (Patrone & Prefumo, 2005).

- **Hinchamiento libre (Hc)**

Se define como el “porcentaje (%) de la elevación máxima para presión nula en relación a la longitud inicial de la probeta (Patrone & Prefumo, 2005).

Las medidas de estos parámetros se realizan mediante pruebas edométricas o en técnicas basadas en la succión, tendiendo a simular los factores relevantes que sigue el fenómeno cuando se desarrolla in situ (Patrone & Prefumo, 2005).

2.6.3. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL FENÓMENO DE LA EXPANSIÓN

Los factores que intervienen en el potencial expansivo de un suelo son los siguientes:

- **Naturaleza y tipo de arcilla**

La estructura mineralógica de la arcilla (porcentajes de illita, caolinita y montmorillonita) que está compuesto la arcilla resultan fundamentales en cuanto al potencial expansivo del suelo. Los suelos expansivos generalmente son aquellos que tienen altos porcentajes de montmorillonita (Patrone & Prefumo, 2005).

- **Humedad inicial**

Por más montmorillonita que esté compuesta una arcilla, si no hay variación en el contenido de humedad del suelo, no habrá cambios volumétricos. El contenido de humedad inicial del suelo controla la magnitud del asentamiento. Una arcilla “seca”, con contenido de humedad por debajo del 15 % indican un riesgo de expansión alto, pues fácilmente pueden llegar absorber contenidos de humedad de 35 % con los consecuentes daños estructurales. Por el contrario, arcillas cuyo contenido de humedad está por encima del 30 % indica

que la mayoría de la expansión ya ha tenido lugar y sólo es esperable algún leve hinchamiento remanente (Patrone & Prefumo, 2005).

- **Peso específico seco del suelo**

La densidad seca de una arcilla se determina en valores altos en los resultados en el ensayo de penetración estándar. Valores de "N" inferiores a 15 indican densidades secas bajas y riesgo expansivo bajo, aumentando significativamente estos a medida que aumenta el valor de "N" (Patrone & Prefumo, 2005).

- **Potencia del estrato activo**

Mediante ensayos de laboratorio sobre muestras de un mismo suelo, compactadas al mismo grado densidad y humedad inicial, se ha estudiado el efecto del espesor del estrato en la magnitud total del hinchamiento. Los resultados mostraron que la magnitud del cambio volumétrico experimentado es proporcional al espesor del estrato, mientras que la presión de expansión se mantiene constante (Patrone & Prefumo, 2005).

- **Fatiga de la expansión**

Mediante muestras sometidas en laboratorio a ciclos de saturación y disecado mostraron señales de fatiga después de varios ciclos. Este fenómeno no ha sido suficientemente investigado, sin embargo, se ha observado en pavimentos sometidos a variaciones estacionales en el contenido de humedad del mismo que tienden a un cierto punto de estabilización luego de un cierto número de años (Patrone & Prefumo, 2005).

2.7. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

(Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018) definen que “estabilizar un suelo significa mejorar sus propiedades tales como resistencia, durabilidad, plasticidad, permeabilidad, densidad, etc., por medio de cualquier sistema, que generalmente consiste en unos de los siguientes: mezclas de agregados (estabilización mecánica), mezclas de aditivos (cemento, cal viva o apagada, cloruro de calcio o de sodio, cenizas del alto horno anilina furfural, acrilato de calcio, etc.), compactación apropiada (la cual se puede emplear sola o en combinación con cualquiera de los otros métodos mencionados).”

Es importante mencionar que el suelo estabilizado debe conservar persistentemente sus nuevas propiedades. Además, no se considera estabilizantes las bases formadas con materiales que naturalmente se consideran estables como por ejemplo el concreto, la piedra triturada, entre otros, pero, son aceptables aquellos métodos que permitan mejorar la resistencia de un suelo mediante la reducción de su susceptibilidad a la acción del agua y de las cargas (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Al tratar suelos arcillosos (suelos finos) es necesario distinguir los términos de “modificación” y “estabilización”, especialmente cuando se trata de aditivos como la cal.

2.7.1. MODIFICACIÓN

Se define como modificación al “tratamiento que se le da a la arcilla mezclándole porcentajes relativamente pequeños de un aditivo para producir, por lo menos, los siguientes beneficios:”

1. Disminuir la plasticidad.
2. Disminuir los cambios potenciales de volumen.
3. Aumentar sustancialmente la trabajabilidad.

2.7.2. ESTABILIZACIÓN

La estabilización básicamente es el proceso de mezclar al suelo cohesivo con una cantidad determinada de aditivo para que de esta manera se produzca una reacción química que cementa las partículas de suelo, de esta manera la resistencia del suelo aumenta de forma significativa. Es normal que en la estabilización se requiera más porcentaje de aditivo que la modificación (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Se considera un suelo estable cuando muestra un estado seco o húmedo una resistencia marcada y sostenida a la deformación bajo la aplicación de cargas repetidas o continuas. Actualmente la estabilización se ha ligado con valores cuantitativos de resistencia y durabilidad, los cuales están relacionados con su funcionamiento, según (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018) estos valores cuantitativos “se muestran en función de la resistencia a la compresión o al esfuerzo cortante o de algunas medidas de capacidad de soporte o de flexión bajo carga y en función de la absorción, ablandamiento y reducción de resistencia directa al humedecimiento y secado, para indicar la durabilidad de una construcción estabilizada” (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

2.7.3. PROPIEDADES DE LOS SUELOS A ESTABILIZAR

Las propiedades de los suelos que generalmente se estudian en problemas de estabilización son: estabilidad volumétrica, resistencia, permeabilidad, compresibilidad y durabilidad.

Es probable utilizar tratamientos que mejoren simultáneamente varias de las propiedades mencionadas, sin embargo, se debe estar preparado para encontrar algunas contradicciones, de manera que el mejoramiento de una propiedad signifique el deterioro de otra u otras. No debe verse a la estabilización solo como una medida correctiva; algunos de los mejores usos de estas técnicas presentan,

más bien, medidas preventivas contra condiciones adversas susceptibles (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

➤ **Estabilidad volumétrica**

Esta propiedad hace referencia a los problemas relacionados con los suelos expansivos por cambio de la humedad, relacionado con variaciones del clima o con la actividad del ingeniero. Se trata de transformar la masa de arcilla expansiva bien sea en una masa rígida o en una granulada, con sus partículas unidas por lazos suficientemente fuertes como para resistir las presiones internas de expansión. Esto se logra por tratamientos químicos o térmicos. La experiencia, orientada por factores económicos, ha demostrado que los tratamientos químicos son útiles sobre todo para arcillas ubicadas cerca de la superficie del terreno, en tanto que los tratamientos térmicos se han aplicado más bien a arcillas más profundas (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

➤ **Resistencia**

La compactación es de hecho una forma de estabilización mecánica a la que se recurre para incrementar la resistencia de los suelos como uno de sus objetivos más comunes. El empleo de mayores intensidades de compactación no siempre conduce a valores más altos de la resistencia (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018). Algunas de las formas de estabilización más usadas para elevar la resistencia son las siguientes:

- Compactación
- Vibro flotación
- Precarga
- Drenaje
- Estabilización mecánica con mezclas de otros suelos
- Estabilización química con cemento, cal o aditivos líquidos

➤ **Permeabilidad**

Comúnmente no es difícil modificar la permeabilidad de formaciones de suelo por métodos tales como compactación, la inyección, etc. En materiales arcillosos, el uso de floculantes (por ejemplo, polifosfatos) puede reducir la permeabilidad también significativamente. Actualmente se va introduciendo algunas sustancias en el suelo en forma de emulsión, estas pueden reducir mucho su permeabilidad, el uso de estas sustancias debe ser de una manera cuidadosa y analizada, ya que se puede dar efectos desfavorables en la resistencia del efecto cortante de los suelos (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

➤ **Compresibilidad**

La compresibilidad de los suelos se puede modificar mediante la compactación, sin embargo, la compactación no es la única forma de estabilización que influye en la compresibilidad, muchos de los métodos mencionados anteriormente

aportan en gran magnitud para estabilizar esta propiedad (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

➤ **Durabilidad**

En esta propiedad se implican factores que hacen referencia a la resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico, de esta manera, los problemas de durabilidad en las vías terrestres suelen estar asociados a suelos situados relativamente cerca de la superficie de rodamiento, estos problemas afectan a suelos naturales y estabilizados. Actualmente se necesitan criterios de campo o laboratorio que permitan establecer con seguridad cual va a ser la durabilidad de un suelo estabilizado y este es un motivo por el cual la propiedad de la durabilidad sea hoy de los más difíciles de analizar, por lo menos cuantitativamente (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

2.8. TIPOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Los suelos se mejoran a través de medios mecánicos, químicos, eléctricos y térmicos. El grado de estabilización obtenido demuestra diferencias entre un método y otro, ya que, existen diferentes tipos de suelos que se diferencian por sus propiedades y estos reaccionan de diferente manera a los distintos métodos.

2.8.1. PROCESOS QUÍMICOS

2.8.1.1. ESTABILIZACIÓN CON CAL

El uso de la cal como estabilizante en suelos arcillosos causa una significativa reducción de la plasticidad, una mejor trabajabilidad en procesos constructivos. A diferencia de otros métodos estabilizantes el uso de la cal es el más factible económicamente y los resultados obtenidos según prácticas han sido altamente satisfactorios.

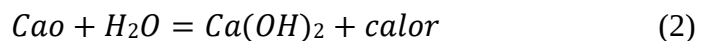
- **VENTAJAS Y CARACTERÍSTICAS DEL USO DE LA CAL COMO ESTABILIZANTE**
- En su gran mayoría los suelos naturales se pueden estabilizar mediante el uso de la cal obteniendo buenos resultados en suelos plásticos o medianamente plásticos, que son aquellos que más problemas provocan.
- Los porcentajes de cal necesaria para estabilizar significativamente las propiedades son relativamente pequeñas variando entre el 1% y el 10%, este porcentaje varía en función del tipo de suelo .
- Se han obtenidos buenos resultados en la estabilización con cal cuando las mezclas se compactan a altos grados de densificación, siendo esta de gran importancia. Para completar la reacción del suelo con la cal es necesario someter las mezclas a un período de curado antes de llegar al fin de su compactación.

- Las mezclas de suelo con cal tienen una buena impermeabilidad las cuales brindan excelentes superficies de trabajo, esto afecta significativamente a la economía del proceso constructivo al aumentar el número de días útiles de trabajo y al permitir que se trabaje de una manera inmediata después de lluvias.
- La cal como estabilizante tiene una lenta pero significativa ganancia de resistencia, que se ve favorecida en los climas templados.
- Los cambios e interacciones entre las mezclas de suelo y cal no son reversibles y la índole de los compuestos minerales que se forman permiten aseverar que la estabilización es de carácter permanente (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

• TIPOS DE CAL UTILIZADAS

Cal Viva

El óxido de calcio comúnmente conocido como cal viva es un sólido de color blanco, aparentemente amorfo que contiene un peso específico que varía entre 3,18 y 3,40. Se considera un producto inestable ya que contiene gran avidez de agua (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018), el cual reacciona de la siguiente manera:



De esta manera se produce hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ que comúnmente se le conoce como cal apagada, con separación de calor. El hidróxido de cal es un producto sólido, amorfo, blanco, soluble parcialmente con agua, pulverulento (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Cal Grasa

La cal grasa es producto de calcinar piedras calizas con un contenido de arcilla inferior al 5% y a apagarse produce una pasta fina blanca, untuosa, la cual crece su volumen durando continuamente blanda en sitios húmedos, sin tener contacto con el aire (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Cal Magra

La cal magra se obtiene de piedras calizas que con menos del 5% de arcilla contiene magnesio en proporción al 10% (dolomitas). Al incorporar agua produce una pasta gris, poco trabada y desprende más calor que la cal grasa. Esta cal al secarse en el aire se reduce a polvo y en el agua se disuelve (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Cal Hidráulica

Esta cal se produce a partir de la calcinación de rocas calizas con más del 5% de arcilla, da como resultado un producto que contiene propiedades de la cal grasa y además la de fraguar en sitios húmedos y debajo del agua (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

En la estabilización de suelos con cal, la cal más utilizada es la cal hidráulica, cuya presentación comercial es en forma de polvo de fácil manipulación y transporte. El uso de cal viva se está limitando por los riesgos que provoca su manipuleo (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

- **REQUISITOS TÉCNICOS DE LOS MATERIALES PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS**

Existen diversas reacciones químicas que se dan en las mezclas de suelo – cal en presencia de humedad.

Una de ellas consiste en el intercambio de bases por el cual los iones de calcio causan una reducción de plasticidad en los suelos cohesivos, de tal manera, se transforman y adquieren apariencias y características de friables o sueltos y así haciéndose más trabajables. El mecanismo puede ser un intercambio de cationes o una reunión de cationes sobre la arcilla. Estos mecanismos cambian la densidad de la carga eléctrica alrededor de las partículas de arcillas, de esta manera se atraen entre sí y provocan floculación o agregación. Estas funcionan como agregados de limos, que tienen baja plasticidad o cohesión (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Una segunda reacción se produce al compactar el suelo, consiste básicamente en la reacción del calcio con la sílica y la alúminica de tamaño coloidales, formándose complejos compuestos de silicatos y alúminico - silicatos monocálcicos. Esta es una acción cementante, más conocido como reacción puzolánica, es de manera lenta y la resistencia de la mezcla continúa creciendo durante un periodo largo de tiempo. El engrandecimiento de cementación que se obtiene varía mucho con el tipo de suelo a estabilizar y con las condiciones climáticas. Las reacciones puzolánicas se aceleran notoriamente con calor o por el agregado de ciertos aditivos químicos (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

La tercera reacción es la que se produce de la forma más lenta y comprende la absorción del bióxido de carbono del aire, que químicamente reacciona con la cal formándose carbonatos de cal o magnesio. Estos cementantes se consideran como débiles, de ahí que la carbonatación debe ser evitada si se quiere obtener altas resistencias: la cal debe protegerse antes de su uso, la compactación de las mezclas debe realizarse con demoras y la superficie debe estar sellada contra la acción del aire o de aguas de lluvias cargadas de dióxido de carbono (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

La verdadera naturaleza de las reacciones que tienen lugar en las mezclas suelo – cal debe ser perfectamente comprendida cuando se quiere investigar que tipos de suelos reaccionan con cal de forma satisfactoria. De estas aclaraciones es importante destacar que como el desarrollo de la resistencia va de la mano de los cambios estructurales de un suelo arcilloso, los cambios son permanentes (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

El fenómeno más importante que se produce en las mezclas de suelo – cal consiste en que, una vez compactadas, el calcio reacciona con la sílice y la alúminica del suelo, formando silicatos y alúminico –silicatos de calcio hidratados. Esta reacción de efecto puzolánico es la que causa gran parte de la cementación de las partículas del suelo, esta es lenta y continua por mucho tiempo (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

- **EFEECTO PUZOLÁNICO**

No todos los suelos reaccionan con la cal de manera favorable, esto es porque los suelos tienen insuficientes cantidades de sustancias capaces de producir las reacciones mencionadas anteriormente, esta deficiencia puede corregirse agregando productos conocidos como puzolánicos (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Las puzolanas son materiales directos silíceos o alúminico silíceos que poseen poca o nula propiedad cementante, pero que, delicadamente subdivididos y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente, creando productos con capacidad cementante. Los productos más utilizados son los artificiales, siendo el más conocido el “fly – ash”, que es el producto de la combustión del carbón finamente pulverizado (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

- **DISEÑO DE MEZCLAS SUELO – CAL**

El diseño completo de una mezcla de suelo – cal se basa en los siguientes pasos:

Caracterización del suelo a tratar

Previamente a estabilizar un suelo con cal, es indispensable determinar sus características geotécnicas, tales como:

- Granulometría del material
- Limite líquido, limite plástico e índice de plasticidad
- Peso específico
- Densidad
- Humedad

Si se cuenta con el equipo necesario y los recursos es importante realizar el ensayo de composición química del suelo, este ensayo nos provee información importante ya que, permite estudiar los compuestos químicos del suelo y del agente estabilizante y deducir su afinidad y la formación de nuevos compuestos que favorecen el proceso de estabilización (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Selección del porcentaje de cal optimo

Tipos de estabilización con cal

El primer tipo consiste en el tratamiento de materiales granulares, es decir, materiales de capacidad portante para bases, estos materiales comúnmente contienen menor del 50% de material que pasa el tamiz No. 40, son tratados con porcentajes que varían del 2% al 4% de cal útil en relación al peso seco.

La otra forma básicamente es mejorar subrasantes de apoyo a materiales a servir como subrasantes mejoradas o sub – bases. Los suelos arcillosos se tratan con porcentajes de cal que varían ente 4% y el 9%.

Selección del porcentaje de cal recomendado para la estabilización de suelo

Se utiliza el ábaco propuesto por C. McDowell para seleccionar el porcentaje de cal óptimo, el cual se muestra en la ilustración 6. El ábaco indica diferentes curvas con un número dentro de círculos que representan porcentajes de cal en peso de suelo seco.

La forma en la que se usa el ábaco es de la siguiente manera:

Se parte con el índice de plasticidad del suelo en las abscisas superiores; en el caso específico del ejemplo, se parte con un índice de plasticidad del 39%, se baja en forma paralela o proporcional a la curva más cercana de la izquierda, es decir, la de menos porcentaje, hasta cortar con una horizontal que proviene del porcentaje “pasa tamiz 40” del suelo y en el punto de intersección, se levanta una vertical hacia arriba, donde se lee el porcentaje de cal requerido para la estabilización, en este caso $4 \frac{1}{4}$ se extrapola entre ambas curvas (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

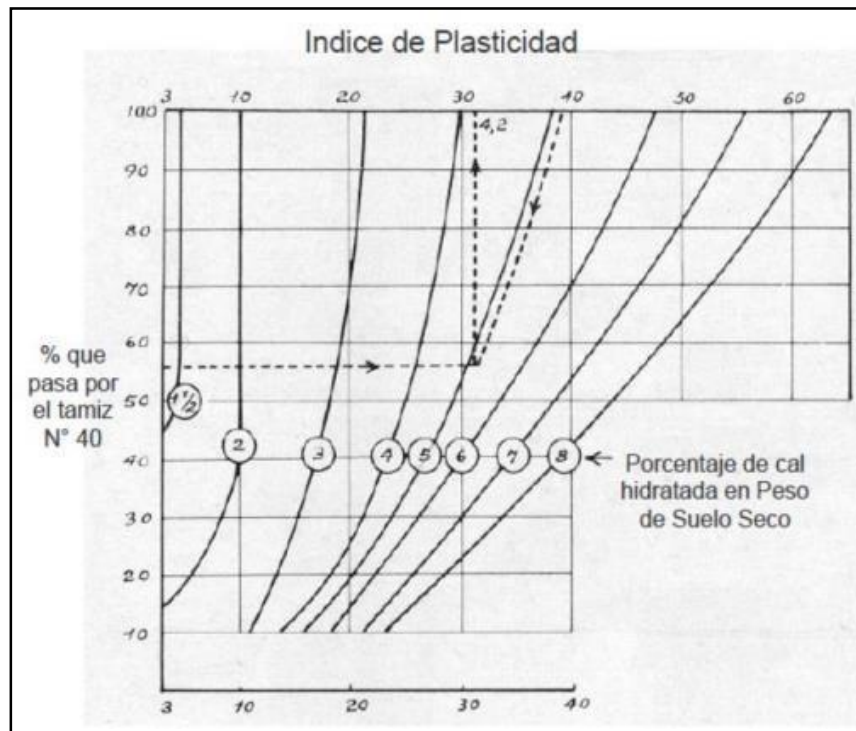


Ilustración 6: Elección del porcentaje óptimo de cal. Método McDowell. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

Preparación de la mezcla y de probetas en laboratorio

Se procede de la siguiente manera para la elaboración de las probetas de diseño suelo – cal en el laboratorio:

- Se realizan los ensayos previstos para determinar las características geomecánicas del suelo a tratar.
- Se selecciona el porcentaje de cal de acuerdo al ábaco de McDowell.
- Se determina la humedad natural de suelo.
- Se determina el peso del suelo seco.
- Se calcula la cantidad de cal en función del peso seco del suelo.
- Se determina la cantidad de agua adicional.
- Se mezcla el suelo con la cal y posteriormente se le adiciona el agua.
- Se compactan las probetas con la energía especificada.

Curado de las probetas

El tiempo, temperatura y humedad durante el periodo de curado de las probetas debe ser cuidadosamente controlado por siete días en una cámara húmeda.

Ensayo de las probetas de la mezcla de suelo – cal estabilizada

Se realizan los ensayos de laboratorio con el fin de cuantificar el aporte en el mejoramiento de las características del suelo estabilizado.

2.8.1.2. ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

La mezcla de suelo – cemento consiste en la unión de suelo pulverizado, cemento Portland y agua que, compactada a una humedad óptima y densidad máxima, produce luego de la hidratación del cemento (se logra protegiéndole contra la pérdida de humedad durante el periodo de curado) un material duro, durable y de bajo costo que tiene muchos usos en la ingeniería (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

- **TIPOS DE MEZCLAS DE SUELO TRATADAS CON CEMENTO**

La elección de la mezcla apropiada depende del uso para el cual quiera destinarse suelo – cemento. La cantidad de producto estabilizador se determina por medio de ensayos arbitrarios de laboratorio que tratan de simular las condiciones a que va a estar sometido el material en el campo en relación con esfuerzos y otros procesos que afectan a su durabilidad y que es posible que ocurran cuando el suelo estabilizado se usa para sub – bases (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Las principales variables que controlan la estabilización con cemento son las siguientes:

- La naturaleza del suelo.
- La proporción de cemento en la mezcla.
- El contenido de humedad en el momento de compactarla.
- La densidad obtenida en la compactación.
- El método de curado de la mezcla compactada.

La probabilidad de controlar las propiedades de la mezcla de forma correcta durante la construcción y de controlar el grado de estabilización de manera tal que cumplan los requisitos de resistencia y durabilidad ha dado como resultado el desarrollo de cinco tipos principales de mezclas de suelo – cemento, las cuales detallamos a continuación:

Suelo – cemento

El diseño de esta mezcla debe cumplir los criterios establecidos por ensayos normales de la AASHTO, ASTM D420, D422, D423, D424, D698, INV u otras entidades. Estos criterios se fundamentan en la resistencia la comprensión de la mezcla al cabo de un tiempo determinado o perdidas en el ensayo de meteorización acelerada (humedecimiento y secado), también se consideran los factores como

el incremento en la humedad y el cambio de volumen (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Las mezclas de suelo – cemento que cumplen estos criterios su suelen aplicar en las siguientes situaciones:

- Bases y sub – bases para pavimentos rígido y flexibles de calles, carreteras y aeropuertos.
- Bermas con capa superficial de rodadura para carreteras y aeropuertos.
- Zonas de estacionamiento, con capa superficial de rodadura.
- Áreas de almacenamiento para agregados, materiales varios o equipo con capa superficial de desgaste.
- Jarillones contruidos con capas horizontales superpuestas, sin protección superficial, sometidas a oleaje.
- Núcleo central en presas de tierra.
- Mantos de revestimiento para tanques, sin tratamiento superficial.
- Fundaciones para algunos tipos de estructuras.
- Reconstrucción y parcheo de bases granulares.
- Construcciones varias, incluyendo drenajes superficiales, alcantarillas, puentes de arco pequeños, unidades pequeñas de construcción, aceras y pasarelas, etc.

Suelos granulares modificados con cemento

Algunos de los suelos arenosos y gravosos no cumplen las especificaciones como materiales para base, sub – bases y subrasante de pavimentos rígidos y flexibles. Estos suelos contienen cantidades de fracciones finas o finos muy plásticos, por lo que si se añade una cierta cantidad de cemento que modifique las propiedades plásticas, dando como resultado una calidad inferior al del suelo – cemento (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Podemos resumir y decir que el cemento se usa en estos casos para reducir las características de plasticidad y expansividad del material, aumentando su capacidad de soporte hasta que sea apto para la construcción de bases o sub – bases para pavimentos rígidos o flexibles que se ajusten a la norma (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Los suelos granulares modificados con cemento se aplican en los siguientes casos:

- Bases y sub – bases de pavimentos flexibles para calles, carreteras y aeropuertos, donde el tipo de material, el tráfico y las condiciones climáticas lo permitan.
- Tratamientos en sub – bases y subrasantes en pavimentos rígidos, para evitar la erosión causada por la acción de bombeo en las losas.

- Parcheo y reconstrucción de bases granulares falladas.
- Fortalecimiento de subrasantes y bases durante las operaciones de mantenimiento.

Mezclas de suelos fino granulares modificados con cemento

En este tipo de mezcla el cemento se aplica para controlar las características de expansión y contracción del suelo, este tipo de estabilización puede usarse también para aumentar la resistencia de suelos débiles o áreas de suelos húmedos (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Este tipo de mezcla se aplica en los siguientes casos:

- Como tratamiento para controlar encogimiento y expansión en subrasantes con suelo de alto cambio de volumen.
- Para aumentar la resistencia de subrasantes.

Suelo – cemento plástico

Este tipo de mezcla se coloca en estado plástico (consistencia de mortero), se endurecen hasta formar un material que llena los requisitos de resistencia y durabilidad fijados para el suelo – cemento, esta mezcla requiere contenido de cemento superiores en más de un 4%, se usan generalmente con suelos de textura liviana como es el caso de los suelos arenosos (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Este tipo de mezcla se aplica en los siguientes casos:

- Revestimiento superficial para canales de drenaje.
- Cubierta superficial para canales de irrigación.
- Capa para proteger de la erosión los enrocados.
- Revestimiento de taludes.

Lodos y materiales para inyección tratados con cemento

Este tipo de mezcla se usa principalmente en trabajos de mantenimiento, para levantar pavimentos que se han hundido por erosión de la subrasante o por asentamiento de terraplenes. También en túneles para evitar el flujo de agua y para estabilizar balasto de ferrocarriles (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

• PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS DE SUELOS TRATADOS CON CEMENTO

Las propiedades de las mezclas de suelo y cemento varían de acuerdo con lo siguiente:

- La naturaleza del suelo, cemento, agua y las proporciones en que estos se encuentran en la mezcla compactada.
- Las condiciones que existen durante el periodo de hidratación del cemento.
- La edad de la mezcla.

No es posible dar una lista de valores específicos para dichas propiedades ya que, existe una gran cantidad de variaciones por dichos factores. Pero, dado que el contenido de humedad, la densidad y las condiciones de curado son estrictamente controlables, es posible determinar valores de laboratorio típicos para las propiedades de los diferentes tipos de suelos (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es la característica más usada del suelo – cemento, que sirve como indicador tanto del grado de reacción de la mezcla como también del tiempo de fraguado; en los suelos granulares que reaccionan normalmente, sirve como criterio indispensable para determinar la cantidad de cemento requerido para construcciones (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Los límites normales para valores de la resistencia a compresión simple establecidos mediante ensayos de laboratorio de muestras húmedas de suelo – cemento se especifican en la siguiente tabla:

Los límites propuestos en la tabla 3 satisfacen el criterio aceptado para el contenido mínimo de cemento que necesita el suelo según su clasificación.

Tipo de suelo	Resistencia a la compresión kg/cm²	
	7 días	28 días
Suelos arenosos y cascajosos:	21.0 – 42.0	28.0 – 70.0
Clasificación unificada: GW, GC, SW, SC, SP, SM, GP.		
Suelos limosos:	17.5 – 35.0	21.0 – 63.0
Clasificación unificada: ML, CL.		
Suelos arcillosos:	14.0 – 28.0	17.5 – 42.0
Clasificación unificada: MH, CH.		

Tabla 3: Límites para la resistencia de suelo - cemento a la compresión. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

La resistencia incrementa al aumentar el contenido de cemento en los diferentes tipos de suelos ensayados, esta resistencia también incrementa al alargar el periodo de envejecimiento de la mezcla, esto se da en condiciones de la humedad óptima.

El porcentaje de cemento que debe incrementarse a la mezcla para conseguir una adecuada resistencia es mayor para los suelos plásticos, es decir, para los arcillosos y limosos.

- **Resistencia a la flexión**

El módulo de rotura o la resistencia a flexión son valores iguales que la tabla 3 varía en la misma forma que la resistencia a la compresión con las mismas condiciones.

- **Módulo de elasticidad**

Esta propiedad aumenta con el mayor contenido de cemento y si la cantidad de cemento y si la cantidad de cemento se mantiene constante, este módulo es mayor para los suelos menos plásticos; esto se da con el módulo de elasticidad estático y a flexión (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

- **Índice de plasticidad**

Al hablar de la plasticidad del suelo se hace referencia a la capacidad de deformarse rápidamente sin llegar a la rotura, sin que se provoque rebote y sin que exista cambio de volumen, esta propiedad se presenta en las fracciones finas (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

- **Cambio de volumen**

Generalmente las arcillas compactadas en condiciones de humedad óptima y densidad máxima se contraen cuando pierden agua y se expanden cuando ganan agua, si las arcillas se compactan con una humedad por encima de la óptima, la expansión es menor y la contracción es mayor; y cuando se compactan por debajo de la humedad óptima, ocurre lo contrario. Al combinar los suelos arcillosos con cemento, se afectan sus propiedades de expansividad y compresibilidad, la forma en que el cemento afecta estas propiedades es compleja y depende de la naturaleza de los suelos, de los cambios de la humedad, del contenido de cemento y de la temperatura (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

- **FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS DE SUELO – CEMENTO**

Tienen influencia sobre la mezcla de suelo – cemento los siguientes factores: los materiales, las proporciones de la mezcla, las condiciones

ambientales, naturales o artificiales, es indispensable el estudio de la naturaleza de estos factores para tener un buen conocimiento sobre el comportamiento del suelo – cemento.

Los factores que más destacan se tratan con más detalle a continuación:

- **El Suelo**

La naturaleza interna de los suelos, su composición física y química, su textura (expresada en función de la granulometría), su reacción con el agua y su manejabilidad son factores que presentes en el suelo que impiden una reacción uniforme con el cemento y con el agua para que la mezcla resulte de buena resistencia. Este factor no ha sido completamente explorado, sin embargo, se tienen algunos datos que nos ayudan para el diseño de mezcla (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018), a continuación, se detalla:

a. Grupos de clasificación de suelos

La importancia de la naturaleza de los suelos se ha determinado por los límites de variación en la cantidad de cemento requerido para estabilizar con cemento los varios grupos de suelo según la clasificación AASHO o la universal.

Los contenidos de cemento que se recomiendan como aproximación para el diseño de una mezcla varían como se indica en la siguiente tabla:

Grupo AASHTO	% de cemento por peso
A-1-a	3 a 5
A-1-b	5 a 8
A-2	5 a 9
A-3	7 a 11
A-4	7 a 12
A-5	8 a 13
A-6	9 a 15
A-7	10 a 16

Tabla 4: Contenido de cemento para diseño de mezcla suelo - cemento. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

b. Agregado retenido en la malla No. 4

La adición de agregado grueso a suelos finos granulares aumenta el contenido necesario de cemento en los suelos finos granulares, y por consecuencia su resistencia. Si el contenido de cemento por peso se mantiene constante para los finos granulares, la resistencia

a la compresión no afecta apreciablemente por la proporción de material grueso granular, siempre que ella no sea mayor del 50% del total (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

c. Contenido de arcilla

Esta influencia se puede demostrar solamente en mezclas de arena y arcilla preparadas artificialmente o en yacimientos de arcilla en donde el contenido de esta cambia de forma gradual, de los ensayos elaborados en laboratorio se ha podido demostrar que el contenido de cemento necesario es mayor al aumentar el porcentaje de arcilla (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

d. Limite liquido e índice de plasticidad

La plasticidad de un suelo tiene gran importancia sobre la mezcla de suelo – cemento, sin embargo, esta influencia no siempre es notable pues otras propiedades de los suelos naturales pueden ser más dominantes. La relación para la cual se ha encontrado más clara dependencia funcional es la que existe entre la plasticidad y la cantidad mínima de cemento necesarias para satisfacer los requisitos de un suelo – cemento (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Generalmente para los suelos de los grupos A2 y A3, no se ha encontrado relación entre la plasticidad y contenido de cemento, para los suelos del grupo A4 existe un aumento notorio del contenido de cemento cuando aumento el límite líquido, esta relación es más dominante en los grupos del suelo A6 y A7, sin embargo, los límites en los cuales varia el contenido del cemento para una plasticidad dada son demasiados extensos para poder definir esta cantidad con la seguridad deseada para aplicaciones prácticas basándose solamente en la plasticidad (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

La plasticidad de una mezcla de suelo – cemento disminuye con el tiempo, esto se ha podido comprobar mediante ensayos de laboratorio.

e. Propiedades químicas del suelo

Los componentes del suelo incluyen sustancias que reaccionan en grado diferente con el cemento, el hecho de que un suelo no reaccione en forma normal con el cemento puede ser por la presencia de materia orgánica que retarda el fraguado o a la presencia de sulfatos que causan expansión o reducción de la resistencia cuando hay agua presente (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

- **Materia orgánica**

La materia orgánica se deriva en vegetación descompuesta, compuestos de carbón y otros compuestos insolubles derivados de la vegetación tienen una reacción desfavorable con el cemento. Por experimentación, se ha demostrado que los compuestos orgánicos de alto peso molecular, como son las celulosas, el lignito, etc., no afectan la resistencia del suelo – cemento, mientras que los de peso molecular bajo, como la dextrosa y el ácido nucleico, actúan como retardadores de fraguado y producen resistencias finales más bajas (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

- **Contenido de sulfatos**

Los experimentos han determinado que, en las mezclas de suelo – cementos elaborados a partir de suelos que contienen sulfatos, el movimiento capilar puede causar la depositación de sales y producir efectos dañinos debido a la expansión de la zona donde cristalizan las sales. En las investigaciones elaborados con el propósito de buscar la influencia del sulfato de magnesio sobre las propiedades de varios tipos de suelos, se ha visto que este no produce expansión volumétrica por hidratación y no tienen efectos dañinos sobre las propiedades del suelo, aunque se muestren en proporciones altas (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

f. Estado de suelos

La cualidad de las mezclas de suelo – cemento se basan en gran parte del estado del suelo durante el mezclado y la compactación, el grado de pulverización limita la capacidad de crear una buena mezcla, el contenido de humedad interviene de forma primordial no solo sobre la densidad, sino también sobre la manera de como la masa se enlaza entre sí. Aunque la humedad y la densidad tienen una estrecha relación entre sí, se recomienda analizar de manera separada estos parámetros (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

- **Grado de pulverización**

Se analiza el efecto del grado de pulverización sobre pérdidas en el ensayo de humedecimiento y secado, en segundo lugar, se estudia su efecto sobre la resistencia a la compresión de mezclas curadas en agua, esto se analiza a partir de ensayos y se debe tener en cuenta que este factor es más importante en el proceso de campo que en el laboratorio (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

- **Contenido de humedad en el momento de la compactación**

En base a ensayos de curado en varios tipos de suelos y en diferentes mezclas, se ha concluido de la siguiente manera:

- En suelos arenosos y limosos, la resistencia a la compresión tiene un valor máximo para una humedad ligeramente menor que la óptima. En suelos arcillosos, el valor máximo se encuentra para humedades mayores que la óptima.
- Los resultados de los ensayos de humedecimiento y secado demuestran que los suelos arcillosos compactados a contenidos de humedad por debajo de la óptima tienen menor resistencia, en suelos arenoso la humedad no es crítica en este ensayo.
- La relación entre resistencias para muestras secas y húmedas es que el contenido de humedad en el momento de ejecutar el ensayo de compresión tiene gran importancia para la resistencia de las mezclas de suelo – cemento.
- De acuerdo a los resultados obtenidos se puede decir que la resistencia de muestras húmedas es menos que la de muestras secas, lo que es obvio, pues fuera de la acción aglutinante del cemento se tiene el efecto de la cohesión del suelo.
- Desde el punto de vista práctico las bases de suelo – cemento se encuentran en la carretera en estado húmedo, los valores obtenidos a partir de muestras húmedas son los más acertados a la realidad.

- **Densidad**

Mediante los resultados de algunos ensayos, se ha demostrado que el aumentar la densidad se producen los siguientes fenómenos:

- Disminuye las pérdidas en el ensayo de humedecimiento y secado, siendo más notable este efecto en los suelos arcillosos. Las pérdidas disminuyen entre un 1% y un 3,5% por cada 0.02 gr/cm³ de aumento en la densidad.
- Aumenta de forma significativa la resistencia a la compresión de todas las mezclas de suelo – cemento, generalmente un aumento en la densidad de 0.02 gr/cm³, en la zona de densidades más bajas que la normal, aumenta la resistencia a la compresión entre 1 y 2 kg/cm², la calidad de las mezclas de suelo – cemento es mejor cuando la densidad aumenta, la mezcla suelo – cemento debe compactarse con el contenido de humedad óptimo para obtener la densidad más alta posible.

- **Cemento**

La cantidad de este elemento se determina mediante la clasificación natural de los suelos, la proporción en la que se usa el cemento altera la

plasticidad, el cambio de volumen, propiedades, la resistencia bajo ciclos de humedecimiento y secado, entre otras propiedades. Los diferentes tipos de cemento no muestran cambios importantes en la calidad de la mezcla de suelo – cemento, de esta manera, se puede utilizar diferentes marcas o tipos sin ningún riesgo (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

- **Agua**

Las diferencias que existen en el agua potable normal no producen cambios importantes en las mezclas de suelo – cemento.

- **Duración del período de mezcla**

Cuando se aumenta el período de la mezcla o se retrasa la iniciación de la compactación, se aumenta por lo general el contenido óptimo de humedad, disminuye la densidad máxima y la resistencia a la compresión, mientras que las pérdidas en el ensayo de humedecimiento y secado aumentan (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Un mezclado prologando de hasta seis horas tiene un doble efecto sobre la mezcla a estabilizar:

- Crece el contenido de humedad necesario para obtener densidad máxima.
- Aumenta el contenido de humedad óptimo para conseguir máxima resistencia a la compresión.

- **Curado**

Las propiedades de la mezcla, los factores que intervienen sobre estas propiedades y la ejecución de la mezcla se basan en la consideración de que el contenido de humedad adecuado se mantendrá en la mezcla durante un periodo de curado de 7 días o durante un periodo más largo, para el curado de laboratorio la humedad y temperatura cumplen los requisitos normales y la evaporación debe reducirse al mínimo (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Según investigaciones realizadas en laboratorio la influencia de la temperatura sobre mezclas de suelo – cemento muestran lo siguiente:

- La resistencia a la compresión a los 7 días aumenta entre el 2% y el 2.5% por grado de aumento de temperatura cuando este cerca de 25°C.
- Si tomamos como único criterio a la resistencia a la compresión para analizar sobre la calidad de suelo – cemento, es necesario

utilizar menor cantidad de cemento en climas cálidos que en climas fríos.

- Las construcciones de suelo – cemento elaboradas en climas cálidos son entre un 50% y 100% más fuertes que las que se construyen en climas fríos, esto sucede durante los tres primeros meses de vida de la construcción.

2.8.2. PROCESOS MECÁNICOS

2.8.2.1. ESTABILIZACIÓN MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR ESTÁNDAR

Según la ASTM D-968 el ensayo Proctor Estándar es uno de los procedimientos más importantes para el análisis y control de calidad de la compactación de un suelo. Mediante este ensayo se determina la densidad seca máxima de un suelo en relación con su grado de humedad, a una energía de compactación determinada.

Este ensayo se basa en que un suelo con contenido de humedad determinado se coloca en tres capas dentro de un molde cilíndrico de ciertas dimensiones, cada una de las capas es compactada en 25 golpes con un pisón de 5,5 lbf desde una altura de caída de 12 pulgadas (305 mm), sometiendo al suelo a un esfuerzo de compactación total de aproximadamente de 12 400 pie-lbf/pie³ (600 kN-m/m³). Se determina el peso unitario seco resultante. El procedimiento se repite con un número suficiente de contenidos de agua para establecer una relación entre el peso unitario seco y el contenido de agua del suelo (ASTM D-968, 2016).

Estos datos se interpretan con una relación curvilínea llamada curva de compactación. El punto máximo de la gráfica de la curva pertenece a la densidad seca máxima en ordenadas y a la humedad óptima en abscisas (ASTM D-968, 2016).

La humedad es el parámetro fundamental para este ensayo, pues si aumenta o disminuye su contenido en el suelo se logran mayores o menores densidades de este, esto se debe a que el agua llena los espacios de los suelos ocupados por el aire, de esta manera se acomodan adecuadamente las partículas, lo que a vez aumenta la compacidad, pero, un exceso de agua provoca lo contrario, separa las partículas y disminuye su compacidad (ASTM D-968, 2016).

La compactación del suelo consiste en el mejoramiento de las propiedades del suelo por medio de energía mecánica, esto se da prensando el suelo en un volumen más pequeño y de esta manera se eleva el valor del peso específico. Ralph Proctor realizó una serie de investigaciones sobre los principios de la compactación en 1933, en su honor llevan ese nombre el ensayo de laboratorio. En uno de sus

descubrimientos Proctor determino que la compactación se da en función de las siguientes variables: densidad del material, contenido de humedad, esfuerzo de compactación y tipo de suelo (granulometría, presencia de minerales de arcilla, etc.) (ASTM D-968, 2016).

El esfuerzo de compactación se define como “una medida de la energía mecánica aplicada a la masa del suelo”: en campo el esfuerzo de compactación se determina con el número de pasadas de un rodillo especificado y peso de un volumen de suelo dado. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso específico seco (ASTM D-968, 2016).

Al agregar agua al suelo a lo largo de la compactación, este ejerce como un agente lubricante en las partículas del suelo, de esta manera, las partículas del suelo se resbalan una sobre cada otra y pasan a una composición más densa, es por esto, que el peso específico seco al finalizar la compactación aumenta con el aumento del contenido de humedad (ASTM D-968, 2016).

En el campo la compactación se da con varios tipos de maquinarias, de esta manera se pretende reproducir los valores de la compactación que se determinan en laboratorio. Para obtener esto es indispensable intentar representar todas las condiciones que se tienen en campo. La compactadora que se utiliza tiene un papel fundamental en la compactación, cada tipo de maquinaria tiene un proceso diferente de compactar el suelo, los procesos pueden ser de varios tipos. Como, por ejemplo: vibratorios, de manipuleo, presión estática o presión dinámica. Para ejemplificar tenemos la compactación por manipuleo en laboratorio da muy buenos resultados con la compactación de una patada de cabra, la compactación por impactos en laboratorio da muy buenos resultados con los rodillos neumáticos, de esta manera cada método de compactación en laboratorio tiene un mayor resultado con un tipo específico de equipo de compactación en la vida real (ASTM D-968, 2016).

Los métodos de compactación empezaron a desenvolverse en campo como sistemas de construcción, se intentó analizar de una manera más técnica los efectos de dichos sistemas y de determinar procesos de control de calidad y comprobación de resultados en campo, de esta manera surgen las pruebas de compactación en laboratorio. Se realizó una serie de pruebas, con diferencias que se desarrollaron con el fin de lograr en laboratorio una mejor aproximación a los procesos de campo, juntamente con una variedad de equipos con tecnología más innovadora (ASTM D-968, 2016).

Proctor determina una correlación entre los resultados de un proceso de compactación y el aumento del peso específico seco del material compactado y determino que los resultados se analicen con base a la variación del peso específico seco que se alcance, también se estableció que el contenido de humedad del suelo en la compactación cumple un

papel fundamental. En base a estos dos criterios se determinó una forma gráfica de representar un proceso de compactación, en la que se demuestra el cambio del peso específico seco al compactar el suelo con diferentes contenidos de agua, en varias muestras de suelo (ASTM - D-4829, 2016).

Los diferentes procesos de compactación producen a la misma muestra de suelo compactaciones diferentes, de esta manera un mismo suelo puede tener varias curvas de compactación que corresponden a los modos de compactación que se usan, ya sea en campo o en laboratorio.

2.9. ENSAYOS DE LABORATORIO

2.9.1. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

La determinación de contenido de humedad es un ensayo indispensable de laboratorio para encontrar la porción de agua existente en una cantidad de suelo en términos de su peso específico (Bowles, 1981).

De manera general se puede encontrar el contenido de humedad de la siguiente manera:

$$\%W = \frac{(MH + T) - (MS + T)}{(MS + T) - (T)} * 100$$

(3)

Donde:

- %W = contenido de humedad en porcentaje.
- MH + T = muestra húmeda más el recipiente en gramos.
- MS + T = muestra seca más el recipiente en gramos.
- T = peso del recipiente en gramos.

Equipo:

- Recipiente para humedad de aluminio o latón.
- Horno con control de temperatura.

Procedimiento:

1. Pesar un recipiente de aluminio o latón, identificar con un código el recipiente. Los recipientes de humedad pueden ser de varios tamaños, los más usados son los de 5cm de diámetro por 3cm de altura y los de 6.4cm de diámetro por 4.4cm de altura.
2. Colocar una muestra significativa de suelo húmedo en el recipiente y determinar el peso del recipiente más el de la muestra húmeda.
3. Colocar la muestra en el horno, se recomienda por un periodo de 24 horas.
4. Cuando la muestra se haya secado hasta tener un peso constante, determine el peso del recipiente más la muestra seca. Es

recomendable usar la misma balanza para todas las medidas de peso.

5. Calcule el contenido de humedad mediante la formula 3.

El suelo debe secarse en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta tener un peso constante, mientras exista agua presente para evaporar, el peso continuara disminuyendo cada vez que pesemos en la balanza. No es practico medir varias veces el peso para determinar si existe un peso constante, lo que generalmente se realiza es que después de un periodo de horneado de 12 a 18 horas, la muestra se encuentra en estado de peso constante y dicho peso se identifica como el del suelo seco más el del recipiente (Bowles, 1981). Para obtener un valor verídico del contenido de humedad de un suelo se recomienda utilizar la siguiente cantidad mínimo de muestra húmeda:

Tamaño máximo de las partículas de muestra para el tamiz dado	Peso mínimo recomendado de la muestra en gramos
No. 4 (4.75mm)	100
No. 40 (0.420mm)	10 a 50
12.5mm	300
50mm	1.000

Tabla 5: Peso recomendado para el ensayo de contenido de humedad. (Bowles, 1981)

Para algunos suelos orgánicos como las turbas, suelos con alto contenido calcáreo o de otro mineral, ciertas arcillas y suelos tropicales la ASTM sugiere secar estos suelos a una temperatura de 60°C , ya que la temperatura de 110°C es muy alta, los suelos mencionados contienen agua de hidratación levemente adherida o agua molecular que puede perderse a niveles de temperatura muy altos y se puede dar un cambio en las características del suelo (Bowles, 1981).

2.9.2. LÍMITES LÍQUIDO Y PLÁSTICO

Los límites líquido y plástico son utilizados en todo el mundo con el principal objetivo de identificar y clasificar el tipo de suelo. El límite líquido se puede utilizarse para estimar asentamientos en problemas de consolidación y ambos límites son útiles para predecir la máxima densidad en estudios de compactación (Bowles, 1981).

El límite líquido se conoce como el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico, a este nivel de contenido de humedad el suelo está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso (Bowles, 1981).

Para determinar valores definidos y reproducibles de estos límites, se definió arbitrariamente como el contenido de humedad al cual una masa de suelo

húmedo colocada en un recipiente en forma de cuchara de bronce, separada es dos por una herramienta para hacer un patrón en forma de ranura y dejada caer desde una altura de 1cm, sufra después de dejarla caer 25 veces una falla o cierre de la ranura en una longitud de 12.7mm (Bowles, 1981).

Equipo:

- Cuchara de Casagrande
- Acanalador
- Recipientes para contenido de humedad
- Mortero
- Gotero
- Espátula

Procedimiento:

1. Triturar una cantidad de suelo secado al aire para lograr una muestra característica del material que pasa a través del tamiz No. 40 de alrededor de 250 ± 10 gramos. Es necesario asegurar el uso de un mortero o algún aparato para la destrucción total de todos los grumos presentes en la muestra. No se recomienda secar el suelo al horno para pasarlo a través del tamiz No. 40 pues esta actividad disminuye el valor real de los límites líquido y plástico del suelo (Bowles, 1981).
2. Comprobar que la altura de la máquina de Casagrande que se va a utilizar sea de $1\text{cm} \pm 0.1\text{mm}$. Para esto se puede utilizar la cabeza en forma de dado de 1cm en el extremo superior del ranurador, hacer la calibración con respecto a la marca de desgaste que se nota en la parte inferior de la cuchara (Bowles, 1981).
3. Colocar los 250 gramos de suelo en un recipiente de porcelana, añadir una cantidad de agua pequeña con el gotero y mezclar con mucho cuidado al suelo hasta conseguir un color uniforme, cuando el color es uniforme en toda la mezcla y logre una apariencia cremosa su estado es el adecuado. Se debe seguir agregando pequeñas cantidades de agua en forma de gotas y mezclando cada vez hasta obtener una mezcla homogénea. Cuando el suelo este con una consistencia pegajosa tal que se pueda estimar o hacer un ensayo de prueba que tomara alrededor de 50 golpes para cerrar en una longitud de 12.7mm la ranura, remover alrededor de 20 gramos de esta muestra mezclada de la cuchara que se está trabajando para posteriormente determinar el límite plástico. Después se debe añadir un poco más de agua de tal manera que la mezcla permita un número de golpes para la falla en el rango de 30 a 40 golpes (Bowles, 1981).
4. Remover de la cuchara de bronce la muestra anterior y colocar una pequeña cantidad de suelo hasta la profundidad conveniente para el trabajo de la herramienta ranuradora, debe estar bien centrada y se debe igualar la superficie de la pasta de suelo suavemente con una espátula, y a través del uso de la ranuradora se procede a trazar una ranura que sea clara, recta, que se separe completamente la masa del

suelo en dos partes iguales. Después de hacer la ranura se debe hacer rápidamente el conteo de golpes hasta que la ranura se cierre completamente (Bowles, 1981).

5. Se debe tomar una muestra para el contenido de humedad de la zona del cierre de la ranura, se recomienda una muestra de aproximadamente 40 gramos y colocarla en un recipiente para humedad cuyo peso se determina con anterioridad. Remover los restos de suelo de la cuchara y volverlos al recipiente donde está el resto de mezcla, lavar y limpiar perfectamente la cuchara (Bowles, 1981).
6. Repetir el proceso para dos ensayos más con número de golpes entre 20 y 25 y entre 15 y 20, respectivamente para un total de cuatro ensayos. Es importante que la diferencia entre el número de golpes en cada ensayo individual sea preferiblemente de tres para obtener una dispersión correcta en el gráfico y ojalá una medición en la cual de número de golpes sea de 25 golpes o muy cercano a este valor. Es indispensable limpiar adecuadamente la cuchara de bronce después de cada ensayo y secarla con cuidado (Bowles, 1981).
7. Pesar las cuatro muestras de humedad obtenidas en los diferentes ensayos y colocar los recipientes en un horno a 110°C para que se seque durante toda la noche (Bowles, 1981).

El límite plástico se define “como el contenido de humedad por debajo del cual se puede considerar el suelo como material no plástico” (Bowles, 1981).

Equipo:

- Placo de vidrio o papel
- Recipientes para contenido de humedad
- Regla

Procedimiento:

1. Dividir en algunos pedazos o porciones pequeñas la muestra de suelo que se había apartado con anterioridad durante la elaboración de la muestra para el límite líquido.
2. Enrollar las porciones de suelo con la mano extendida sobre una placa de vidrio o sobre un pedazo de papel colocado en una superficie lisa, con presión suficiente para modelarlo en forma cilíndrica o en forma de hilo con un diámetro uniforme por la acción de 80 a 90 movimientos de mano por minuto, cuando el diámetro del hilo o del cilindro de la muestra de suelo llegue a 3mm se debe dividir en pequeñas piezas y colocar en recipientes de humedad previamente pesados.
3. Este proceso debe hacerse el número de veces que se requiera para producir suficientes pedazos de cilindros para llenar los recipientes de humedad.
4. Pesar las muestras de humedad obtenidas en los diferentes ensayos y colocar los recipientes en un horno a 110°C para que se seque durante toda la noche.

Cálculo del índice de plasticidad:

1. Calcular el valor del límite líquido mediante la gráfica semilogarítmica, la cual en las abscisas se grafica el número de golpes y en las ordenadas el porcentaje de humedad obtenido; se debe trazar una línea recta que pase por la mayoría de los puntos graficados y posterior a esto ver qué porcentaje de humedad se obtiene a los 25 golpes, este valor del contenido de humedad a los 25 golpes es nuestro valor del límite líquido (Bowles, 1981).
2. Calcular el valor del límite plástico, este valor se obtiene haciendo un promedio de todas las muestras de humedad obtenidas por los cilindros realizados (Bowles, 1981).
3. Al obtener estos valores podemos determinar el valor de índice de plasticidad mediante la siguiente formula:

$$I_{P=LL-LP} \quad (4)$$

Donde:

- IP = índice de plasticidad.
- LL = límite líquido.
- LP = límite plástico.

El límite líquido se define como el contenido de humedad, que se expresa en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra, este define la frontera entre los estados de semilíquido y plástico. El límite plástico es el contenido de humedad, expresado en porcentaje, que establece la frontera entre los estados de plástico y semisólido. El índice plástico se define como el rango de contenido de humedad sobre el cual el suelo se comporta plásticamente (Shuan & Basurto , 2019).

Se considera un suelo de baja plasticidad cuan el límite líquido es menor al 35%, un suelo de plasticidad intermedia cuando el límite líquido está en un rango del 35% al 50%, de plasticidad alta cuando el límite líquido está dentro de un rango del 50% al 70%, de plasticidad muy alta entre un 70% al 90% y un suelo de plasticidad extremadamente alta cuando el límite líquido es superior al 90% (Shuan & Basurto , 2019).

2.9.3. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Para la clasificación de los suelos para usos de ingeniería comúnmente se utiliza algún tipo de análisis granulométrico. El análisis granulométrico es un intento de determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de grano presentes en una masa de suelos dada. Físicamente no es posible determinar el tamaño real de cada partícula independiente del suelo, es por esto que, la practica agrupa el suelo por rangos de tamaño. Para obtener esto se toma la cantidad de material que pasa a través de un tamiz con una malla dada pero que es retenido en un siguiente tamiz cuya malla tiene diámetros

ligeramente menores a la anterior y se relaciona esta cantidad retenida con el total de la muestra pasada a través de los tamices. Los tamices son hechos de malla de alambre forjado con aberturas rectangular que varían en su tamaño, la siguiente tabla muestra una lista de los tamices que se usan comúnmente, designados oficialmente por la ASTM, (Bowles, 1981):

Tamiz No	Abertura en mm
3"	76.2
2 ½"	63.5
2"	50.8
1 ½"	38.1
1"	25.4
¾"	19.1
½"	12.7
3/8"	9.52
No. 4	4.76
No. 10	2
No. 40	0.42
No. 200	0.074

Tabla 6: Abertura de tamices. (Bowles, 1981)

Equipo:

- Juego de tamices
- Mortero
- Balanza de sensibilidad 0.1g

Procedimiento:

1. Obtener 500 gramos de suelo secado al horno tomado de una bolsa de muestra obtenida en el terreno a estudiar, es necesario asegurarse de que la muestra sea representativa para lo cual es posible utilizar un cuarteador mecánico si es que hay disponible, tener cuidado de tomar la muestra de diferentes sitios dentro del recipiente mientras se remueve constantemente su contenido hasta lograr la cantidad necesaria (Bowles, 1981).
2. Si la muestra tiene considerable cantidad de gravas y muy poco finos, el lavado se puede omitir y en este caso seguir al paso 4.

Colocar la muestra sobre el tamiz No. 200 y lavar el material cuidadosamente a través del tamiz utilizando agua común, hasta cuando el agua que pasa a través del tamiz sea transparente. Es esencial ser muy cuidadoso en este paso para evitar pérdidas del suelo que comúnmente puede salpicar fuera del tamiz (Bowles, 1981).

3. Verter con cuidado el residuo de suelo lavado con ayuda de un poco de agua, en un gran recipiente desecador, y permitirle sedimentar por un periodo de tiempo suficiente hasta lograr que el agua en la parte superficial de la suspensión se vuelva transparente. Botar tanto como sea posible de esta agua transparente sin regar suelo y colocar el recipiente con la suspensión de suelo y agua en el horno para el secado (Bowles, 1981).
4. Regresar al laboratorio al día siguiente y pesar el residuo secado al horno (si no se realizó el lavado omitir este paso obviamente) (Bowles, 1981).
5. Colocar la serie de tamices en un agitador eléctrico automático y tamizar aproximadamente de 5 a 10 minutos, en caso de que la serie de tamices no de físicamente dentro del agitador automático o no haya disponible un agitador automático se debe hacer de manera manual alrededor de 10 minutos (Bowles, 1981).
6. Quitar la serie de tamices del agitador mecánico y obtener el peso del material que quedo retenido en cada tamiz. Sumar estos pesos y comparar el total con el peso total obtenido en el paso 4, esta comparación nos permite ver cualquier perdido de suelo durante el proceso de tamizado, si la pérdida del suelo es superior al 2% con respecto al peso original del paso 4 se debe volver a repetir al ensayo ya que no es satisfactorio (Bowles, 1981).
7. Calcular el porcentaje en cada tamiz dividiendo el peso retenido en cada uno de ellos por el peso de la muestra original utilizado en el paso 2, esto es correcto ya que el material que haya pasado a través del tamiz No. 200 pasaría cualquier otro tamiz por encima del tamiz No. 200 en la serie (Bowles, 1981).
8. Calcular el porcentaje que pasa comenzando por el 100% y sustraer el porcentaje retenido en cada tamiz como un proceso acumulativo (Bowles, 1981).

2.9.4. CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Existen varios métodos de clasificación de suelos, los más usados son del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el de la Asociación Americana de Agencias Oficiales de Carreteras y Transportes (AASHTO). Todos los sistemas de clasificación más usados por el ingeniero geotécnico utilizan los límites de Atterberg (límites líquido y plástico) con un análisis de granulometría (Bowles, 1981).

2.9.4.1. SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS DE LA AASHTO

Clasificación General	Materiales Granulares (35 % o menos del total pasa el tamiz No. 200)							Materiales limo-arcillosos (más del 35 % del total pasa el tamiz No. 200)			
Clasificación de Grupo	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 ^a A-7-6
Porcentaje de material que pasa el tamiz No. 10	50 max										
No. 40	30 max	50 max	51 min								
No. 200	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
Características de la fracción que pasa el tamiz No. 40											
Límite líquido, w_L				40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
Índice Plástico, I_p	6 max		NP	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min
Índice de Grupo ^b	0		0	0		4 max		8 max	12 max	16 max	20 max

Ilustración 7: Cuadros para utilizar en el sistema de clasificación AASHTO.

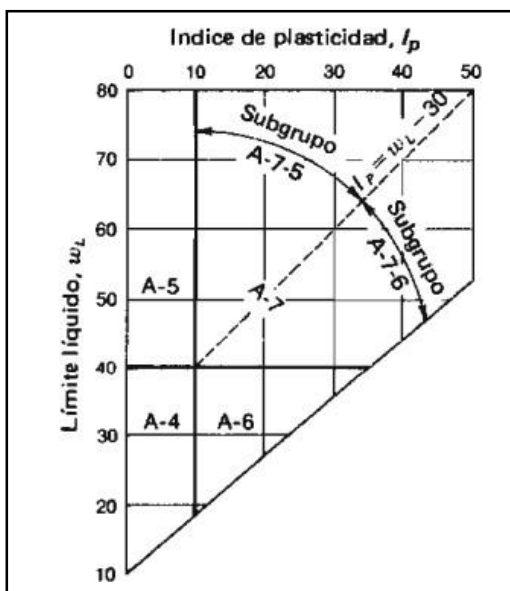


Ilustración 8: Rangos de límite líquido e índice de plasticidad para los grupos de suelos A-4, A-5, A-6 Y A-7.

En la ilustración 7 se muestra el sistema de clasificación de la AASHTO, la ilustración 8 provee una forma de utilizar los límites líquido y plástico para obtener la clasificación de los suelos entre los grupos A-4 y A-7, para los cuales el hecho de tener más de un 35% de material más fino que el tamiz No. 200, es un factor esencial de clasificación. El sistema de clasificación AASHTO además maneja un índice de grupo para comparar diferentes suelos dentro de un mismo grupo. El índice de grupo se determina mediante la siguiente ecuación:

$$GI: 0.2a + 0.005ac + 0.01bd \quad (5)$$

Donde:

- a = % de material más fino que el tamiz No. 200 mayor que el 35% pero menor que el 75%, expresado como un numero entero positivo (Bowles, 1981) .
- b = % de material más fino que el tamiz No. 200 mayor que el 15% pero menor que el 55%, expresado como un numero entero positivo (Bowles, 1981).
- c = fracción del límite liquido mayor que 40 pero no mayor que 60, expresada como un numero positivo entero (Bowles, 1981).
- d = fracción del índice de plasticidad mayor que 10 pero no excedente a 30, expresado como un numero positivo entero (Bowles, 1981).

El índice encontrado de esa forma se redondea al entero siguiente y se reemplaza entre paréntesis después del número de clasificación correspondiente. El índice de grupo es una modificación de la AASHTO a la clasificación original BPR, para establecer una categoría dentro de la clasificación de grupo. Si dos suelos de un mismo grupo tienen diferente índice de grupo, tendrá mejor comportamiento como material de carretera aquel cuyo índice de grupo sea menor (Bowles, 1981).

2.9.4.2. SISTEMA DE CLASIFICACIÓN UNIFICADA DE SUELOS (SUCS)

El siguiente gráfico presenta los factores que se consideran en la clasificación de un suelo de acuerdo con el SUCS. El material de un suelo se considera grueso si se retiene más del 50% en el tamiz No. 200, dentro de este material si más del 50% de la fracción gruesa queda retenida en el tamiz No. 4 es grava y si el más del 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz No. 4 es arena; el material de un suelo se considera fino si pasa más del 50% el tamiz No. 200, dentro del material fino podemos clasificar en limos, arcillas y suelos orgánicos (Bowles, 1981).

Divisiones mayores		Símbolo de grupo	Nombres típicos		Criterios de clasificación para suelos granulares	
Suelos de grano grueso (más del 50% del material es mayor en tamaño que el tamiz No. 200)	Gravas (Más de la mitad de la fracción gruesa es mayor que el tamiz No. 4)	GW	Gravas bien gradadas, mezclas gravosas, pocos o ningún fino		$C_u = D_{60}/D_{10} > 4$ $C_c = 1 < D_{30}/D_{10} \times D_{60} < 3$	
		GP	Gravas pobremente gradadas, mezclas grava-arena, pocos o ningún fino		No cumplir todos los requisitos de gradación para GW	
		GM	$\frac{A}{a}$	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo	Límites de Atterberg por debajo de la línea A ó $I_p < 4$	A los materiales sobre la línea A con $4 < I_p < 7$ se considera de frontera y se les asigna doble símbolo
		GC	Gravas arcillosas, mezclas gravo-arena-arcillosas		Límites de Atterberg por encima de la línea A ó $I_p > 7$	
	Arenas (Más del 50% de la fracción gruesa es menor que el tamiz No. 4)	SW	Arenas bien gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino		$C_u = D_{60}/D_{10} > 5$ $C_c = 1 < D_{30}/D_{10} \times D_{60} < 3$	
		SP	Arenas pobremente gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino		No cumplir todos los requisitos de gradación para SW	
		SM	$\frac{A}{a}$	Arenas limosas, mezclas arena-limo	Límites de Atterberg por debajo de la línea A ó $I_p < 4$	Si el material está en la zona sombreada con $4 < I_p < 7$ se considera de frontera y se le asigna doble símbolo
		SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla		Límites de Atterberg por encima de la línea A ó $I_p > 7$	
Suelos de grano fino (más del 50% del material pasa el tamiz No. 200)	Limos y arcillas (límite líquido $W_L < 50$)	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas, o limos arcillosos con poca plasticidad.		1. Determinar el porcentaje de arenas y gravas de la curva de granulometría. 2. Dependiendo del porcentaje de fino (fracción menor que el tamiz No. 200) los suelos gruesos se clasifican como sigue: Menos del 5% — GW, GP, SW, SP Más del 12% — GM, GC, SM, SC de 5 a 12% — Casos de frontera que requieren doble símbolo	
		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras.			
		OL	Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad			
	Limo y arcillas (límite líquido $W_L > 50$)	MH	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos, <u>suelos elásticos</u>			
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas			
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos			
	Suelos altamente orgánicos	Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos			

Ilustración 9: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

En esta clasificación las arenas y gravas pueden ser bien gradadas y pobremente gradadas, la designación de bien o pobremente gradada depende de los valores de C_u y C_c definidos en la ilustración 9. También las gravas y arenas pueden ser limosas o arcillosas, la designación de limo o arcilla se determina después de tener los valores de los límites líquido y plástico de la fracción menor al tamiz No. 40.

Las gravas y arenas se pueden clasificar de la siguiente manera si entre el 5% y 12% del material pasa a través del tamiz No. 200:

- GW – GC
- GW – GM
- SW – SC
- SW – SM
- GP – GC
- GP – GM
- SP – SC
- SP – SM

Donde:

- G = gravas
- S = arenas
- W = bien gradadas
- P = pobremente gradadas
- M = limo
- C = arcillas

Los suelos de grano fino son los siguientes: MH, OH o CH, si los límites líquidos son superiores al 50%, donde H = mayor que 50%.

2.9.5. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA EL ÍNDICE DE EXPANSIÓN LIBRE DE SUELOS MEDIANTE EL CONSOLIDÓMETRO

Este ensayo de laboratorio determina un índice del potencial de expansión de los suelos compactados cuando se saturan. El índice de expansión se define como “1000 veces la diferencia entre la altura final e inicial de la muestra dividida por la altura inicial” (ASTM - D-4829, 2016). Este ensayo básicamente consiste en compactar una muestra en un anillo de metal para que el grado de saturación sea entre 40% y 60%, la muestra dentro del anillo se coloca en un Consolidómetro y se aplica una presión de confinamiento vertical de 6.9 kPa a la muestra, se le satura con agua destilada, la deformación de la muestra se registra durando 24 horas o hasta que la velocidad de la deformación sea menor a 0.005mm/h (ASTM - D-4829, 2016). El índice de expansión nos indica una propiedad muy importante del suelo, la clasificación de un suelo según el potencial de expansión se muestra en la siguiente tabla:

Índice de expansión (EI)	Expansión Potencial
0 -- 20	Muy bajo
21 -- 50	Bajo
51 -- 90	Medio
91 -- 130	Alto
> 130	Muy alto

Tabla 7: Clasificación de un suelo según el potencial de expansión. (ASTM - D-4829, 2016)

Equipo:

- Molde, debe ser de forma cilíndrica y de metal, tendrá un collar desmontable con una marca de 50.8mm por encima de la base, la sección inferior del molde está diseñada para poner un anillo de acero inoxidable que se extrae de 25.4mm de altura, 101.9 mm de diámetro interno y de al menos 3.10mm de espesor (ASTM - D-4829, 2016).
- Apisonador metálico con una cara circular de 50.8mm de diámetro.
- Balanza de 1000 gramos de capacidad.
- Horno de secado que se pueda controlar, que pueda mantener una temperatura de 110 ± 6.5 °C.
- Tamiz No. 4.
- Herramientas varias como bandejas, recipientes para humedad, espátula, bailejo, machete, martillo, etc.
- Deformímetro de caratula con lectura de alta precisión.
- Discos porosos.

Procedimiento:

1. Preparar la muestra:
 - 1.1. Tamizar el suelo mediante el tamiz No. 4.
 - 1.2. Obtener la humedad de esta muestra de suelo.
 - 1.3. Tomar una muestra representativa de 2500 gramos de este suelo, ajustar con agua hasta llegar a su humedad optima obtenida anteriormente.
 - 1.4. Realizar una probeta compactada.
2. Recortar con mucha precisión la muestra compactada para que quede al ras con la parte inferior y superior del anillo.
3. Determinar la altura inicial y el diámetro del anillo.
4. Colocar la muestra de suelo que se ha compactado y que está dentro del anillo, en un Consolidómetro con discos porosos secos.
5. Colocar sobre la muestra una presión total de 6.9 kPa.
6. Saturar con agua el molde con la muestra.
7. Hacer lecturas periódicas en el deformímetro en un periodo de 24 horas.
8. Retirar la muestra de la máquina y determinar el cambio en la altura.
9. Calcular el índice de expansión mediante la siguiente formula:

$$EI = \frac{\Delta H}{H_1} * 1000 \quad (6)$$

Donde:

- ΔH = cambio de altura, $D2 - D1$ en mm.
- H_1 = altura inicial en mm.
- $D1$ = lectura inicial del dial en mm.
- $D2$ = lectura final del dial en mm.

10. Redondear el índice de expansión al número entero más cercano. Si la altura inicial de la muestra es mayor que la altura final de la muestra se coloca como cero al índice de expansión.

2.9.6. DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIVIDAD DE LOS SUELOS MEDIANTE EL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO Y EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD

Existen varios factores para determinar el potencial expansivo de un suelo a partir de los límites líquido y plástico. A continuación, mostramos unas tablas que estable la Norma INV E – 132 – 13.

Grado de Expansión	Límite Líquido	
	CHEN	Norma IS 1498
Bajo	<30	20 -35
Medio	30 – 40	35 – 50
Alto	40 – 60	50 – 70
Muy Alto	> 60	70 - 90

Tabla 8: Predicción de la expansividad a partir del límite líquido tomado de (INV E - 132 -13, 2011)

Grado de Expansión	Índice de Plasticidad		
	Holtz y Gibbs	CHEN	Norma IS 1498
Bajo	<20	0 -15	<12
Medio	12 - 34	10 -35	12 -23
Alto	23 - 45	20 -55	23 – 32
Muy Alto	>32	>35	>32

Tabla 9: Predicción de la expansividad a partir del índice de plasticidad tomado de (INV E -132 -13, 2011)

Basados en investigaciones de Holtz propone el siguiente criterio para la identificación de suelos expansivos:

Contenido de coloide en %	Índice Plástico	Límite de Contracción	Grado de Expansión
>28	>35	<11	Muy Alto
20-13	21-41	7-12	Alto
13-23	15-21	10-16	Medio
>15	<15	>15	Bajo

Tabla 10: Identificación de Suelos Expansivos tomado de (Patrone & Prefumo, 2005)

2.9.7. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Este ensayo consiste en imponer sobre un suelo las condiciones idealizadas de la máquina de corte directo, es decir, se provoca la ocurrencia de una falla a través de un plano localizado predeterminado, sobre este plano actúan dos esfuerzos o fuerzas, un esfuerzo normal debido a una carga vertical P_v aplicada externamente y un esfuerzo cortante debido a la aplicación de una carga horizontal P_h , estos esfuerzos se calculan dividiendo para el área nominal de la muestra o el área de la caja de corte individualmente (Bowles, 1981).

Equipo:

- Máquina de corte directo que incluya cajas de corte y todos sus accesorios.
- Calibrador
- Recipientes para la humedad.
- Horno
- Espátula

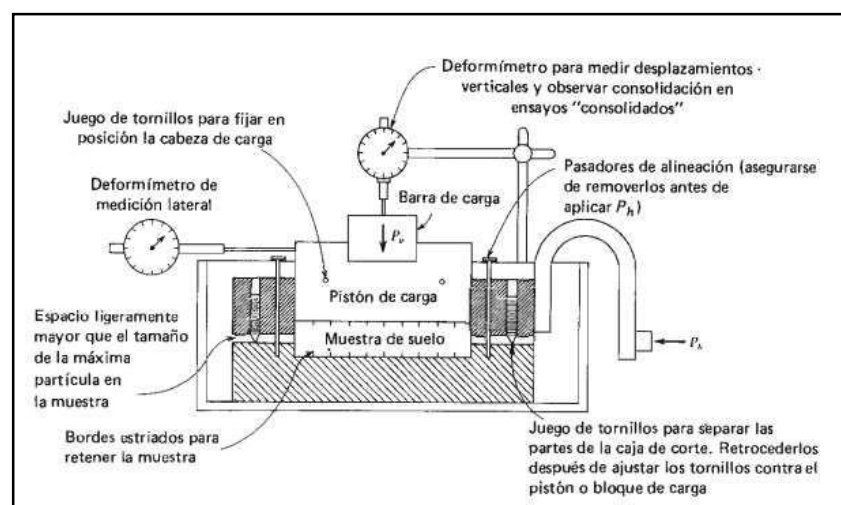


Ilustración 10: Máquina de Corte Directo.

Procedimiento:

1. Moldear con mucha precaución tres o cuatro muestras del mismo tamaño que hayan sido compactadas debidamente. Utilizar el anillo de forma cuadrada de manera que el tamaño pueda ser controlado y se aproxime lo más posible. Es importante mantener las muestras con una humedad controlada a lo largo del moldeo, la preparación de la máquina de corte y el resto del ensayo (Bowles, 1981).
2. Volver la separación y el enganche de los tornillos guía en la parte superior de la caja de corte y acoplar las dos partes. Revisar que las piedras porosas estén saturadas (Bowles, 1981).
3. Colocar con mucho cuidado la muestra en la caja de corte, la muestra se debe ajustar con precisión en la caja y colmarla hasta 5mm de la parte superior de la caja de corte (Bowles, 1981).
4. Poner el pistón de carga o bloque en su sitio en el suelo y la carga normal P_v (Bowles, 1981).
5. Separar las mitades de la caja de corte dejando una separación pequeña que sea más grande que el tamaño de la partícula más grande que se encuentre en el suelo, retirar los tornillos de separación y ensamblar la cabeza de carga en su sitio utilizando los tornillos fijos para el ensayo. Tener mucho cuidado al separar la caja de corte cuando se ensaya una arcilla blanda porque parte del material puede ser extruido fuera de la caja (Bowles, 1981).
6. Anotar lecturas del deformímetro de carga, desplazamiento de corte y desplazamientos verticales. En aparatos nuevos y más avanzado el propio sistema nos da lecturas más precisas (Bowles, 1981).

2.9.8. ENSAYO TRIAXIAL – CONSOLIDADO NO DRENADO (CU)

El ensayo básicamente consiste en medir la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, una de sus principales ventajas es el poder controlar las tensiones principales, el drenaje y la presión intersticial, de esta manera podemos conocer el comportamiento básico del suelo y de sus características que se utilizan posteriormente para diseños (Bowles, 1981).

El ensayo consolidado no drenado se hace después de que la muestra se ha consolidado con la válvula de drenaje abierta bajo una presión de cámara constante. Cuando se completa la consolidación, se cierran las válvulas de drenaje, y se le aplica el esfuerzo desviador a la muestra hasta la falla (Bowles, 1981).

Equipo:

- Máquina de compresión
- Cámara triaxial
- Molde para muestra
- Membrana de caucho, bandas de caucho y expansor de membrana
- Piedras porosas
- Bomba de vacío

- Fuente de presión de aire
- Calibradores
- Equipo para moldear la muestra a partir de muestras remoldeadas

Procedimiento:

1. Preparar dos o tres muestras cilíndricas, tener en cuenta si se va a realizar con el suelo inalterado o muestras remoldeadas (Bowles, 1981).
2. Tomar cuatro medidas de la altura separadas aproximadamente a 90° y se utiliza el valor promedio de las cuatro medidas (Bowles, 1981).
3. Tomar dos lecturas del diámetro en la parte superior, a la mitad y en la base separadas 90° utilizando un par de calibradores (Bowles, 1981).
4. Dependiendo de la muestra, lubricar cuidadosamente la membrana con vaselina de petróleo, empolverarla con polvo teflón para que de esta manera sea más fácil insertar la muestra en la membrana (Bowles, 1981).
5. Insertar la muestra en la membrana y ajustar la placa inferior de la piedra porosa utilizando las bandas de caucho o sellos de anillo (Bowles, 1981).
6. Remover la muestra del expansor de membrana y conectar la parte inferior a la base la cámara triaxial (Bowles, 1981).
7. Conectar la línea de vacío entre el cabezote superior y la línea de vacío, pero no aplicar vacío, si se va hacer un ensayo consolidado - no drenado, es necesario inundar las tuberías hacia adentro y hacia afuera de la muestra (Bowles, 1981).
8. Cerrar la válvula y colocar la capsula de lucita en la cámara sobre la máquina de compresión. Traer la barra de carga en contacto con el pistón de carga hasta que se registre ligeramente algo de movimiento en el deformímetro de la carga (Bowles, 1981).

3. CAPITULO III - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. PROPIEDADES DEL SUELO NATURAL

3.1.1. Cuadro de resumen del ensayo para la granulometría de los suelos

Muestra	Coordenadas UTM	Ubicación	Humedad Natural
1	17S – 730636; 9683091	Nulti – Cuenca- Azuay	29.86%

Tabla 11: Información sobre la muestra de suelo natural para la granulometría.

Nota. Fuente: (Elaborado por autor)

En la ilustración 11 podemos observar el ensayo de granulometría por cribado, es considerado como un suelo de grano fino, ya que más del 50% de la muestra de suelo pasa por el tamiz #200.

TAMIZ Nº	ABERTURA	PESO RET.	RET. ACUM.	%	%
	MM.	GM.	GM.	RETENIDO	PASA
3"	76.2	--	--	--	--
2 1/2"	63.5	--	--	--	--
2"	50.8	--	--	--	--
1 1/2"	38.1	--	--	--	--
1"	25.4	--	--	--	--
3/4"	19.1	--	--	--	--
1/2"	12.7	--	--	--	--
3/8"	9.52	--	--	--	--
Nº4	4.76	--	--	--	--
PASA Nº4	---	--	--	--	--
10	2	1.3	1.3	0.34%	99.66%
40	0.42	8.3	9.6	2.49%	97.51%
200	0.074	41.5	51.1	13.27%	86.73%
FONDO	---	1.5	52.6	--	--

Ilustración 11: Granulometría del Suelo Natural por cribado. Elaborado por autor

3.1.2. Cuadro de resumen del ensayo para los Límites de Atterberg.

Muestra	Tipo de Suelo (SUCS)	Límites de Atterberg		
		Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
1	CH (arcilla de alta plasticidad)	67%	45.09%	21.91%

Tabla 12: Límites de Atterberg del suelo natural.

Nota. Fuente: (Elaborado por autor)

Para este ensayo se trabajó con el suelo de la muestra 1, que básicamente es el suelo natural, en la tabla 11 se puede observar los resultados del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

3.1.3. Cuadro de resumen de la clasificación de los suelos.

Muestra	Ubicación	Tipo de Suelo según SUCS	Tipo de Suelo según AASHTO
1	Nulti – Cuenca-Azuay	CH (Arcilla de alta plasticidad)	A-7-6 (26) (arcilla, material que pasa más del 35% por la malla #200)

Tabla 13: Clasificación del suelo natural de Nulti.

Nota. Fuente: (Elaborado por autor)

Según el sistema de clasificación AASHTO que se usa actualmente, los suelos de grano fino son aquellos que más del 35% pasan por el tamiz #200, la mayoría de estos suelos son de tipo arcillosos y limosos. Dentro de esta clasificación se determina un numero llamado índice de grupo, este número se escribe en paréntesis después del grupo y subgrupo del suelo. Este valor se determina con la siguiente ecuación:

$$GI = (F - 35) * (0.2 + 0.005(LL - 40)) + 0.01 * (F - 15) * (PI - 10) \quad (7)$$

Donde:

- F = % que pasa la malla #200.
- LL = limite líquido.
- PI = índice de plasticidad.

Aplicando la ecuación para nuestro caso obtenemos el siguiente resultado:

$$GI = (86.73 - 35) * (0.2 + 0.005(67 - 40)) + 0.01 * (86.73 - 15) * (21.91 - 10)$$

$$GI = 26$$

Dentro de la clasificación según el método SUCS se tiene un suelo arcilloso de alta plasticidad que se denomina como CH, este suelo cumple con las siguientes características:

- Su límite líquido es mayor o igual que 50.
- El índice de plasticidad se grafica sobre la línea A de la siguiente gráfica:

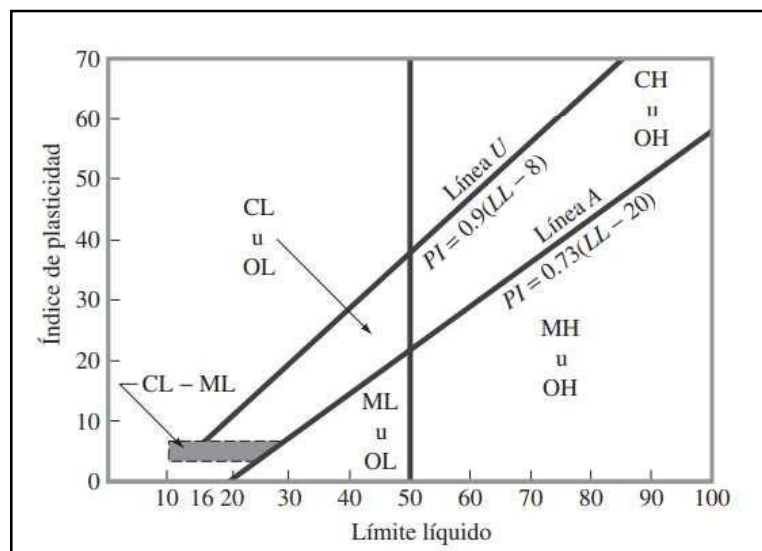


Ilustración 12: Carta de plasticidad para clasificar el suelos por el método SUCS.

3.1.4. Cuadro de resumen del ensayo Proctor estándar.

Muestra	Densidad Seca Máxima (kg/m ³)	Humedad Óptima (%)
1	1300	32.7

Tabla 14: Proctor Estándar del Suelo Natural.

Nota. Fuente: (Elaborado por autor)

En la tabla 13 se exponen los valores de la densidad seca máxima con su respectivo porcentaje de humedad óptima del suelo natural, estos valores se obtuvieron mediante el ensayo de Proctor estándar.

3.1.5. Cuadro de resumen del ensayo de corte directo.

Muestra	Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de Fricción Interna
1	1.04	34.38°

Tabla 15: Ensayo de Corte Directo del Suelo Natural.

Nota. Fuente: (Elaborado por autor)

3.1.6. Cuadro de resumen de la expansividad del suelo.

Muestra	Índice de Expansión – Método Edométrico
1	12

Tabla 16: Expansividad del Suelo Natural.

Nota. Fuente: (Elaborado por autor)

- El índice de expansión EI= 12, método edométrico.
- Límite líquido = 67%, expansividad muy alta. (Ver tablo 8)
- Índice de Plasticidad = 21.91%, expansividad alta. (Ver tabla 9 y tabla 10)

Aplicando el método edométrico, se realizó el primer ensayo de suelo natural inalterado que tenía un contenido de humedad natural del 11.54%, se realizó un cilindro con las condiciones de densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo, este ensayo dio un índice de expansión de 2.45, se consideró un valor muy bajo de esta característica del suelo. Se decidió realizar un segundo ensayo con la muestra de suelo natural remoldeada, esta fue secada en un horno por un periodo de 24 horas con la intención de que el material desarrolle todo el potencial expansivo que posee al momento de realizar el ensayo.

La magnitud del potencial de expansión en un suelo depende de las condiciones mineralógicas del mismo: cantidad de montmorillonita, illita o caolinita, y éstas a la vez depende de las condiciones en las cuales se formó la arcilla; ambientes marinos o lacustres y de las condiciones ambientales a las que se encuentra expuesta, etc. Por tal motivo, resulta de gran dificultad encontrar una expresión para determinar la presión de expansión que tome en cuenta todas estas condiciones, para diferentes lugares del planeta. Es por esto, que se excluye el criterio de la ASTM para analizar el grado de expansión del suelo. Se consideran los criterios de la Norma INV E y de algunos autores que más se asemejan al entorno del suelo de estudio.

El valor del índice de expansión del suelo natural que se obtuvo mediante el ensayo del edómetro fue de 12, se considera un suelo de expansividad alta en el entorno que se desarrolla el suelo de estudio, también se toma en cuenta los criterios de expansividad que se obtienen con el límite líquido y el índice de plasticidad. Según INV E 132 -13, mediante la tabla 8 y 9 se considera un suelo de alta a muy alta expansividad. Según los autores (Patrone & Prefumo, 2005) mediante la tabla 10 se tiene una expansividad alta, tomando estos criterios como válidos para este caso de estudio.

3.2. PROPIEDADES DEL SUELO ESTABILIZADO CON CAL

3.2.1. Cuadro de resumen del ensayo para los Límites de Atterberg.

Muestra	Tipo de Suelo (SUCS)	Límites de Atterberg		
		Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
1	CH (arcilla de alta plasticidad)	64.21%	49.07%	15.14%

Tabla 17: Límites de Atterberg del suelo mezclado con Cal.

Nota. Fuente: (Elaborado por autor)

Para este ensayo se trabajó con una muestra de suelo mezclado con el 3% de cal, según la bibliografía este es el porcentaje óptimo de cal para este tipo de suelo, en la tabla 16 se puede observar los resultados del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

3.2.2. Cuadro de resumen de la clasificación de los suelos

Muestra	Ubicación	Tipo de Suelo según SUCS	Tipo de Suelo según AASHTO
1	Nulti – Cuenca-Azuay	CH (Arcilla de alta plasticidad)	A-7-6 (20) (arcilla, material que pasa más del 35% por la malla #200)

Tabla 18: Clasificación del suelo mezclado con cal.

Nota. Fuente: (Elaborado por autor)

Según el sistema de clasificación AASHTO que se usa actualmente, los suelos de grano fino son aquellos que más del 35% pasan por el tamiz #200, la mayoría de estos suelos son de tipo arcillosos y limosos. Dentro de esta clasificación se determina un número llamado índice de grupo, este número se escribe en paréntesis después del grupo y subgrupo del suelo. El índice de grupo se calcula con la fórmula número siete mencionada y desarrollada anteriormente. En este caso el $GI = 20$, en este caso al mezclar el suelo con el porcentaje de cal óptimo podemos notar que el índice de grupo disminuye.

Dentro de la clasificación según el método SUCS se mantiene como un suelo arcilloso de alta plasticidad que se denomina como CH.

3.2.3. Cuadro de resumen del ensayo Proctor estándar.

Muestra	Densidad Seca Máxima (kg/m ³)	Humedad Óptima (%)
1	1364	28.78

Tabla 19: Proctor Estándar del Suelo mezclado con Cal.

Nota. Fuente: (Elaborado por autor)

En la tabla 18 se muestran los valores de la densidad seca máxima del suelo mezclado con cal, lo cual podemos observar que su valor aumento, mientras que el valor de la humedad optima disminuyo.

3.2.4. Cuadro de resumen del ensayo de corte directo.

Muestra	Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de Fricción Interna
1	0	67.55°

Tabla 20: Ensayo de Corte Directo del Suelo mezclado con Cal.

Nota. Fuente: (Elaborado por autor)

En la tabla 19 podemos observar los valores obtenidos del ensayo de corte directo del suelo mezclado con cal, podemos notar que el valor de la cohesión es igual a cero y el ángulo de fricción interna aumento, estos valores son característicos de los suelos friables o más conocidos como suelos granulares, lo cual significa que nuestra arcilla mejora notoriamente con sus propiedades mecánicas.

3.2.5. Cuadro de resumen de la expansividad del suelo.

Muestra	Índice de Expansión – Método Edométrico
---------	--

1	0
---	---

Tabla 21: Expansividad del suelo mezclado con Cal.

Nota. Fuente: (Elaborado por autor)

Aplicando el método edométrico, se realizó en el ensayo de suelo mezclado con cal, este material como primera instancia se lo compacto con el contenido de humedad optimo hasta llegar a su máxima densidad seca, se le dejo curando como nos recomienda la bibliografía durante un periodo de siete días dentro de un horno. En la tabla 20 podemos notar y asegurar que el suelo tiene un índice de expansión cero lo que significa que la expansividad es nula, es decir, el suelo se estabilizo mediante este método.

3.3.

PROPIEDADES DEL SUELO ESTABILIZADO CON CEMENTO

3.3.1. Cuadro de resumen del ensayo para los Límites de Atterberg.

Muestra	Tipo de Suelo (SUCS)	Límites de Atterberg		
		Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
1	CH (arcilla de alta plasticidad)	62.50%	48.63%	13.87%

Tabla 22: Límites de Atterberg del suelo mezclado con cemento.

Nota. Fuente: (Elaborado por autor)

En este ensayo se trabajó con una muestra de suelo mezclado con el 11% de cemento, según la bibliografía este es el porcentaje óptimo para este tipo de suelo, en la tabla 21 se puede observar los resultados obtenidos del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

3.3.2. Cuadro de resumen de la clasificación de los suelos.

Muestra	Ubicación	Tipo de Suelo según SUCS	Tipo de Suelo según AASHTO
1	Nulti – Cuenca-Azuay	CH (Arcilla de alta plasticidad)	A-7-6 (19) (arcilla, material que pasa más del 35% por la malla #200)

Tabla 23: Clasificación del suelo mezclado con cemento.

Nota. Fuente: (Elaborado por autor)

Según el sistema de clasificación AASHTO que se usa actualmente, los suelos de grano fino son aquellos que más del 35% pasan por el tamiz #200, la mayoría de estos suelos son de tipo arcillosos y limosos. Dentro de esta clasificación se determina un numero llamado índice de grupo, este número se escribe en paréntesis después del grupo y subgrupo del suelo. El índice de grupo se calcula con la formula número siete mencionada y desarrollada

anteriormente. En este caso el $GI = 19$, en este caso al mezclar el suelo con el porcentaje de cemento óptimo podemos notar que el índice de grupo disminuye.

Dentro de la clasificación según el método SUCS se mantiene como un suelo arcilloso de alta plasticidad cuya nomenclatura es CH.

3.3.3. Cuadro de resumen del ensayo Proctor estándar.

Muestra	Densidad Seca Máxima (kg/m ³)	Humedad Óptima (%)
1	1385	23.14

Tabla 24: Proctor Estándar del Suelo mezclado con Cemento.

Nota. Fuente: (Elaborado por autor)

En la tabla 23 se exponen los valores de la densidad seca máxima del suelo mezclado con cemento, lo cual podemos observar que su valor aumento con respecto al suelo natural y al suelo mezclado con cal, mientras que el valor de la humedad optima disminuyo.

3.3.4. Cuadro de resumen del ensayo de corte directo.

Muestra	Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de Fricción Interna
1	0.2	63.58°

Tabla 25: Ensayo de Corte Directo del Suelo mezclado con Cemento.

Nota. Fuente: (Elaborado por autor)

En la tabla 24 podemos observar los valores obtenidos del ensayo de corte directo del suelo mezclado con cemento, podemos notar que el valor de la cohesión es igual a 0.2 y el ángulo de fricción interna aumento con respecto al suelo natural, estos valores son característicos de los suelos friables o más conocidos como suelos granulares, lo cual significa que nuestra arcilla mejora notoriamente con sus propiedades mecánicas.

3.3.5. Cuadro de resumen de la expansividad del suelo.

Muestra	Índice de Expansión – Método Edométrico
1	0

Tabla 26: Expansividad del Suelo mezclado con Cemento.

Nota. Fuente: (Elaborado por autor)

Aplicando el método edométrico, se realizó en el ensayo de suelo mezclado con cemento, este material como primera instancia se lo compacto con el

contenido de humedad óptimo hasta llegar a su máxima densidad seca, se le dejó curando como nos recomienda la bibliografía durante un periodo de siete días dentro una funda plástica y sobre una cama de arena húmeda. En la tabla 23 podemos notar y asegurar que el suelo tiene un índice de expansión cero lo que significa que la expansividad es nula, es decir, el suelo se estabilizó mediante este método.

3.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Existe una gran variedad de suelos finos como es el caso de las arcillas dentro de la ciudad de Cuenca y sus alrededores, en este caso de estudio específicamente dentro de la zona de Nulti conformado por las formaciones de Loyola y Azogues. Se determinó por la granulometría por cribado que el suelo de estudio es un suelo de grano fino, ya que más del 50% de la muestra pasa por el tamiz #200, este material pertenece al grupo de limos y arcillas.

Mediante el ensayo de los límites de Atterberg se puede ver que el límite líquido del suelo – cal y el suelo – cemento disminuye con respecto al suelo en estado natural, en la ilustración 12 se puede observar este análisis gráficamente. En la ilustración 13 podemos observar que el límite plástico del suelo – cal y del suelo – cemento también aumenta con respecto al del suelo en estado natural. Los índices de plasticidad del suelo – cal y del suelo – cemento disminuyen notoriamente, lo cual este parámetro es muy favorable para el mejoramiento de las características del suelo, en la ilustración 14 se puede observar el comportamiento de estos índices.

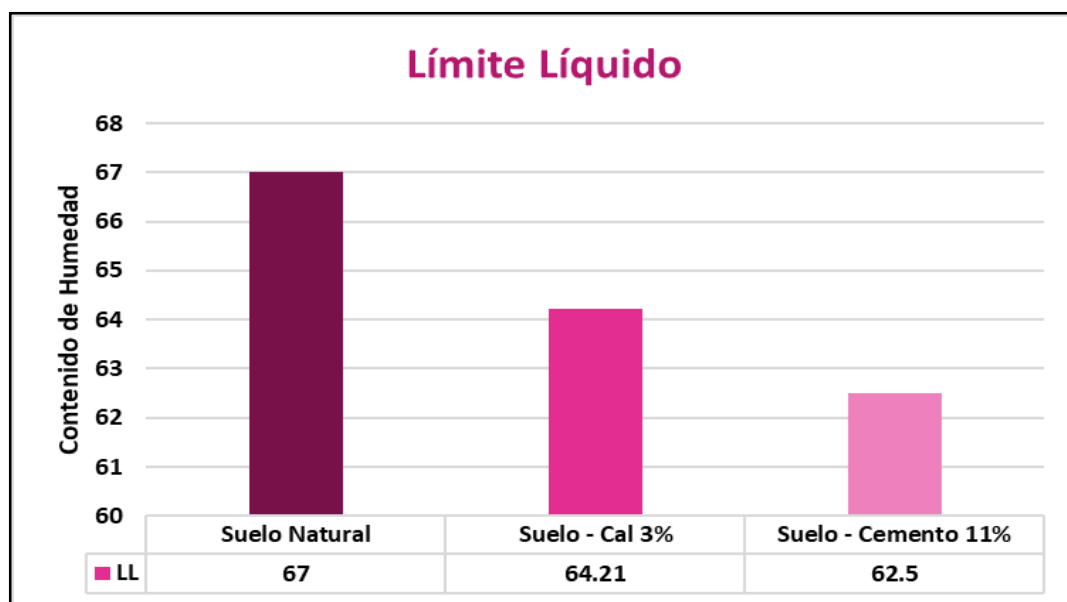


Ilustración 13: Límite Líquido. Elaborado por autor.

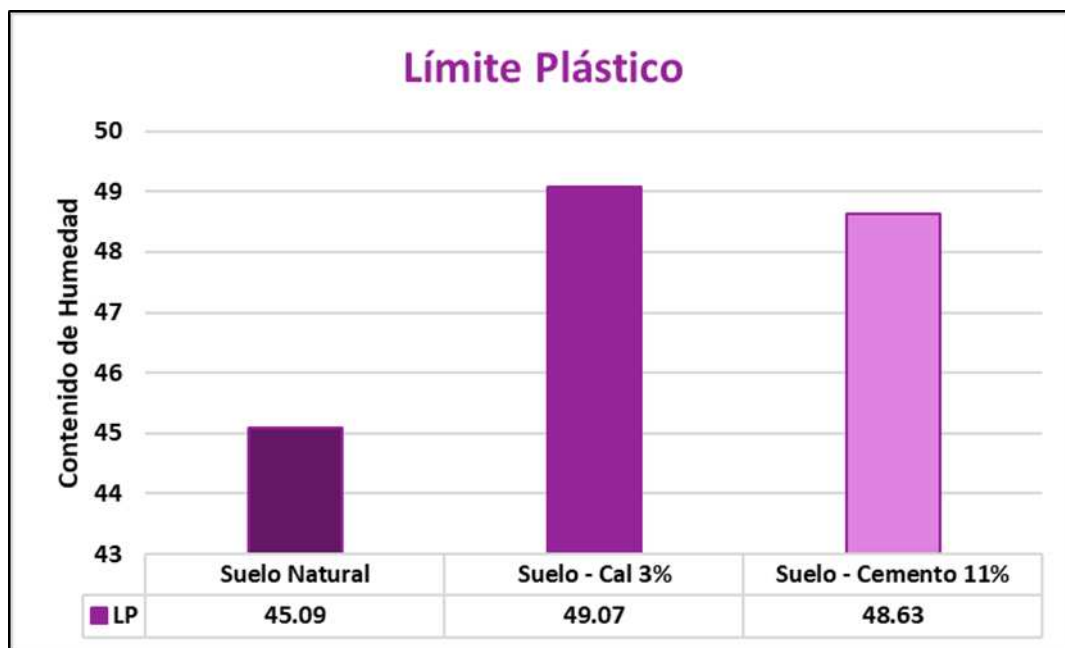


Ilustración 14: Límite Plástico. Elaborado por autor

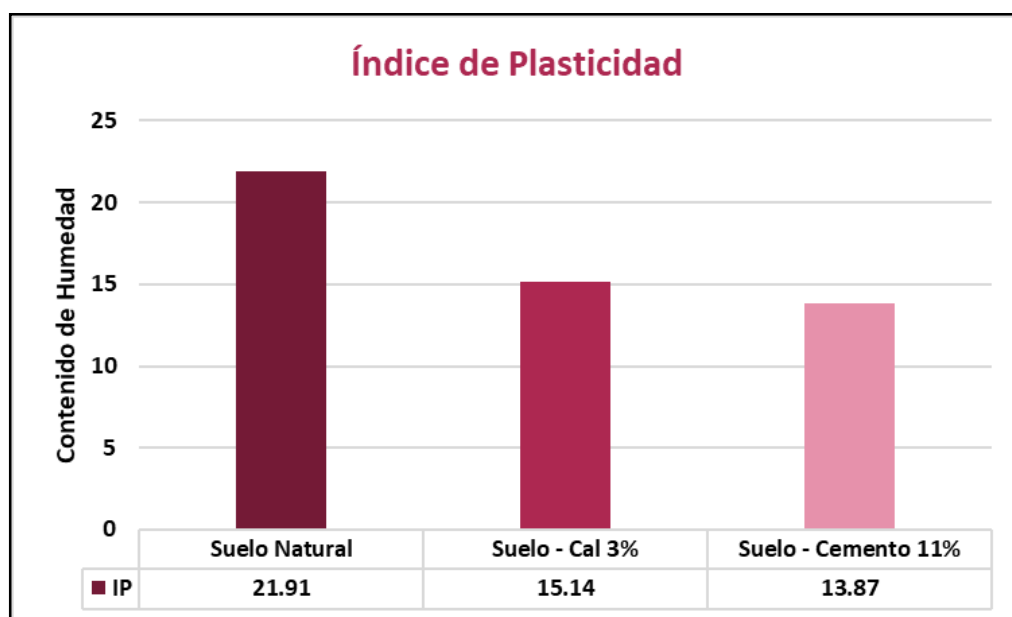


Ilustración 15: Índice Plástico. Elaborado por autor.

Mediante los datos obtenidos del análisis granulométrico y los Límites de Atterberg, se procedió a la clasificación del suelo por los métodos de clasificación SUCS y AASHTO, en la tabla 24 se muestra los resultados obtenidos de este ensayo.

En el método de clasificación SUCS el suelo se mantiene como una arcilla de alta plasticidad con la añadidura de cal y cemento, esto se da a que el límite líquido de todas las muestras supera al valor de 50 y cumple con las características ya mencionadas anteriormente. Mientras que, en el método de clasificación AASHTO se mantiene como un suelo arcilloso A-7-5, sin embargo, su índice de

grupo disminuye, esto se debe a que este valor depende de variables como el límite líquido y el índice de plasticidad, esto es muy favorable.

Muestra	Tipo de Suelo según SUCS	Tipo de Suelo según AASHTO
Suelo Natural	CH (Arcilla de alta plasticidad)	A-7-6 (26)
Suelo – Cal 3%	CH (Arcilla de alta plasticidad)	A-7-6 (20)
Suelo – Cemento 11%	CH (Arcilla de alta plasticidad)	A-7-6 (19)

Tabla 27: Clasificación del Suelo.

Nota. Fuente (Elaborado por autor)

En el ensayo Proctor estándar se obtuvo valores muy favorables, como es el caso de la densidad seca máxima, las densidades del suelo – cal y suelo – cemento aumentaron favorablemente, aunque con un rango de valores pequeños, sin embargo, para nuestro caso de estudio es muy favorable, siendo el valor mas alto el de la cal. También tenemos los valores de la humedad óptima presentado en porcentaje respectivamente con sus densidades secas máximas, en este parámetro disminuye los valores al agregar la cal y el cemento, esto es muy favorable ya que esas mezclas de suelo necesitan menos contenido de humedad y esto reduce la cohesión y de esta manera se evita que las partículas sean mas densas fácilmente. En las siguientes ilustraciones podemos observar los resultados de este ensayo.

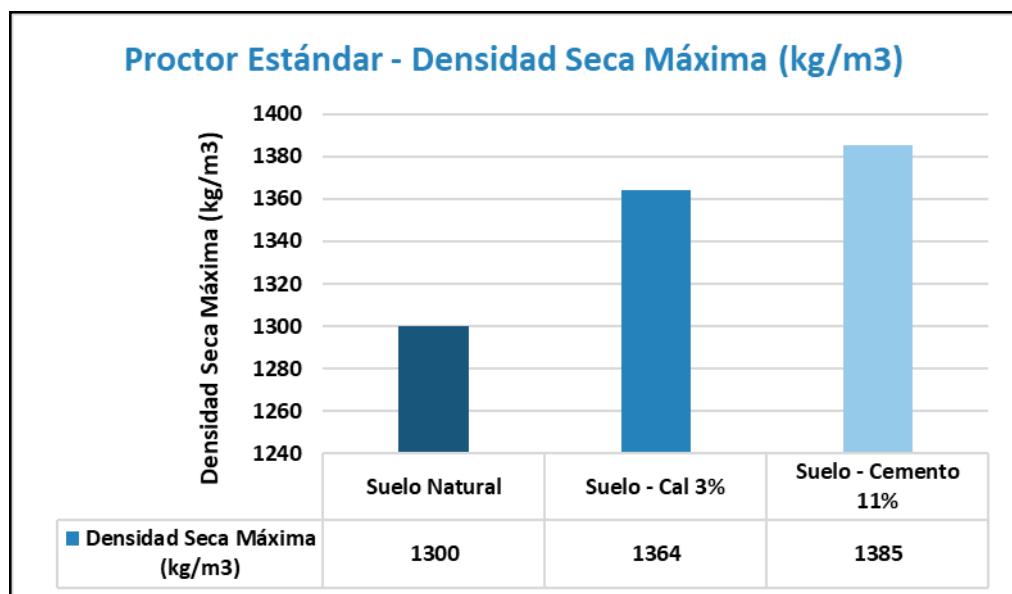


Ilustración 16: Densidad Seca Máxima. Elaborado por autor.

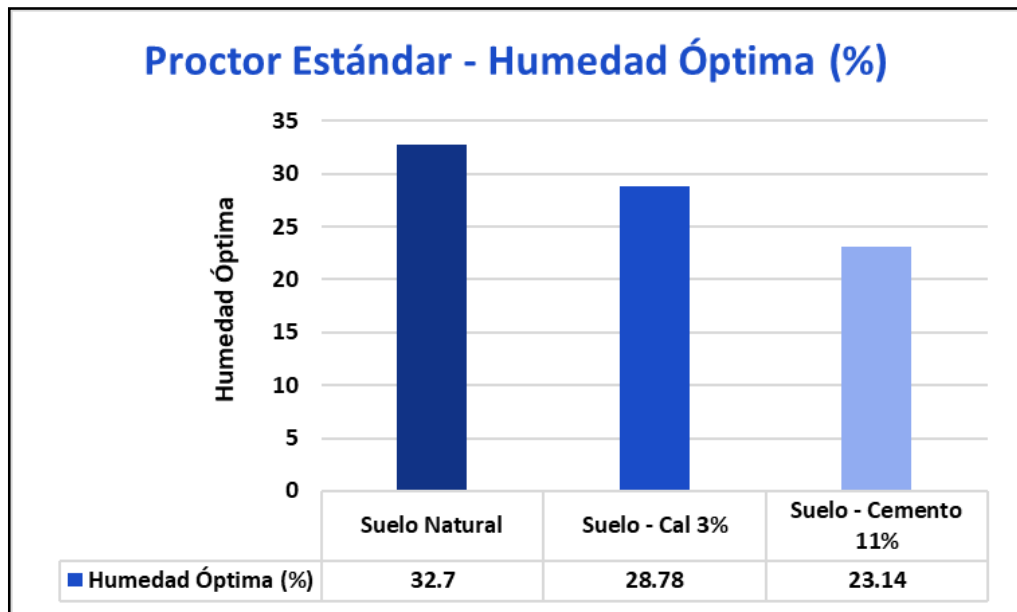


Ilustración 17: Humedad Óptima. Elaborado por autor.

Mediante el ensayo de corte directo podemos observar una mejora en los valores de la cohesión al disminuir el del suelo – cal y suelo – cemento con respecto al del suelo en estado natural, al ser cero la cohesión de suelo – cal se vuelve un suelo no cohesivo, esto nos indica características de suelos granulares y de manera obvia se vuelve en un parametro favorable, al igual que los resultados del ángulo de fricción interna, los valores aumentan significativamente de las mezclas de suelo – cal y suelo – cemento. Los resultados obtenidos en este ensayo indica un aumento de la resistencia al corte, ya que al disminuir la cohesión y aumentar su ángulo de fricción interna nos muestrasn características de suelos granulares.

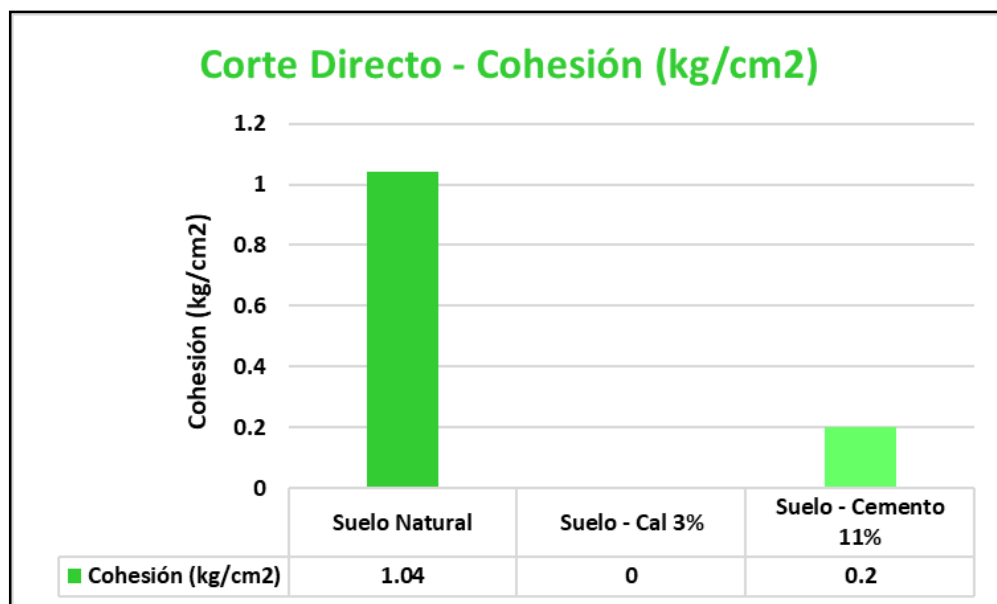


Ilustración 18: Cohesión. Elaborado por autor.

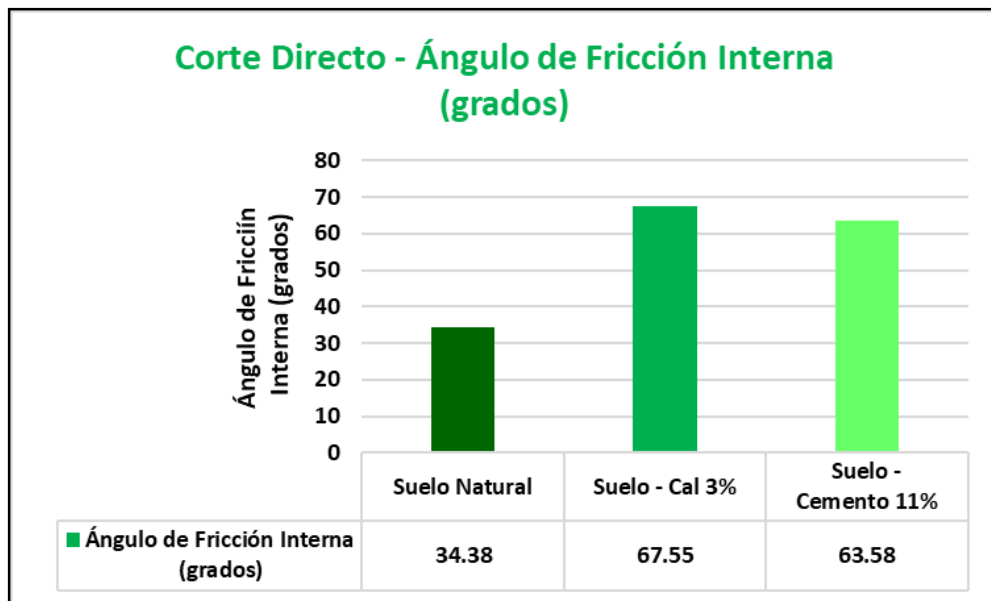


Ilustración 19: Ángulo de Fricción Interna. Elaborado por autor.

Aplicando el ensayo de expansión libre por el método edométrico se obtuvo los resultados que se observan en la ilustración 19, al haber realizado las estabilizaciones con cal y cemento se observa que el material no se expande, se puede afirmar que mediante estos procesos químicos la muestra de suelo se estabilizó.

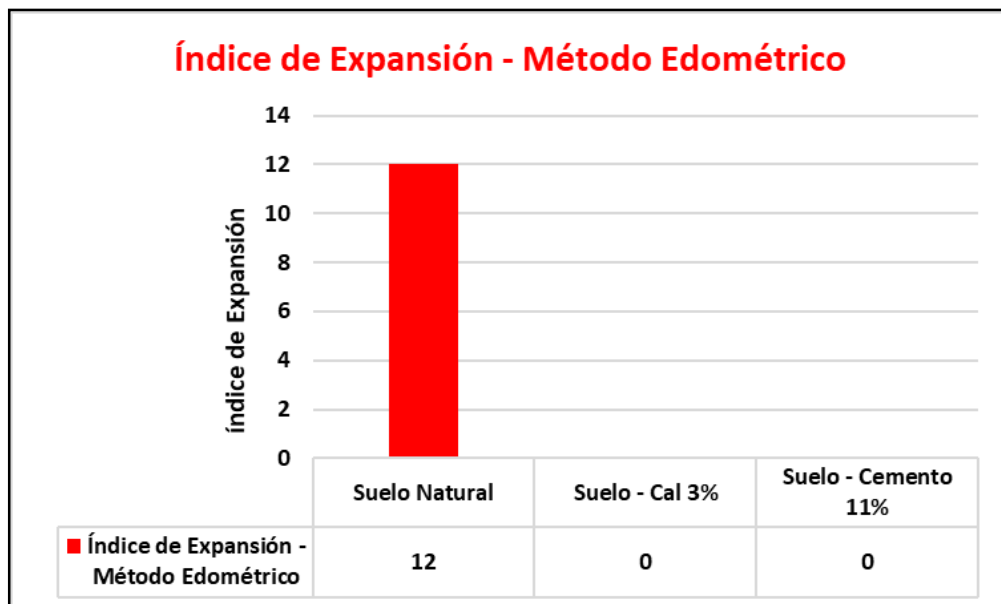


Ilustración 20: Índice de Expansión. Elaborado por autor.

3.5. TABLA RESUMEN

Muestra	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de plasticidad	Tipo de Suelo según SUCS	Tipo de Suelo según AASHTO	Densidad seca máxima (kg/m3)	Humedad Óptima (%)	Cohesión (kg/cm2)	Ángulo de fricción interna (grados)	Índice de
Suelo Natural	67	45.1	22	CH (Arcilla de alta plasticidad)	A-7-6 (26)	1300	32.7	1	34.38	12
Suelo – Cal 3%	64.2	49.1	15.1	CH (Arcilla de alta plasticidad)	A-7-6 (20)	1364	28.8	0	67.55	0
Suelo – Cemento 11%	62.5	48.6	13.9	CH (Arcilla de alta plasticidad)	A-7-6 (19)	1385	23.1	0.2	63.58	0

Tabla 28:Tabla resumen.

Nota. Fuente (Elaborado por autor)

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- a. Mediante la bibliografía analizada se comprobó que la cal y el cemento son muy buenos agentes estabilizantes porque al agregarlos con los porcentajes óptimos se mejoró la cohesión, la resistencia al corte y lo más destacado de esta investigación la expansividad del suelo. En este trabajo se demuestra que el uso óptimo de cal para este tipo de suelo es el 3% y el porcentaje óptimo de cemento es el 11%.
- b. El material de estudio disminuye su índice de plasticidad debido a los intercambios iónicos ocurridos en las reacciones químicas, se tiene un índice de plasticidad del suelo natural del 21,91%, en el caso de la cal disminuye al 15,14% y en el caso del cemento disminuye al 13,87%. Además, se mejoran las características mecánicas como son: la densidad seca máxima, porcentaje de humedad óptimo, la cohesión, el ángulo de fricción interna y el índice de expansión.
- c. La mezcla del suelo con la cal y el cemento, originan nuevos silicatos y aluminatos de calcio, haciendo de esta manera que el suelo se vuelva más resistente, se puede decir que se cumple con los objetivos planteados de mejorar las características de expansividad del suelo de estudio.
- d. Se puede concluir de una manera exitosa que los métodos de estabilización químicos sirven para controlar la expansividad del suelo de la zona de estudio. Es importante recalcar que el porcentaje de cal óptimo que se debe añadir al suelo se determinó a través del ábaco de McDowell, siendo este el 3% para el suelo de estudio, mientras, que el porcentaje óptimo de cemento se determinó mediante la clasificación de suelo AASHTO, lo cual recomienda un porcentaje para cada tipo de suelo, siendo el caso del 11%.
- e. Mediante esta tesis se demostró que el método químico de estabilización aplicado fue exitoso, ya que, el suelo mejoró su expansividad pasando de poseer un 12% del suelo en estado natural, a una expansividad nula, es decir, 0% mediante la mezcla de suelo – cal y suelo – cemento, de esta manera se consigue una estabilidad del 100%.
- f. Haciendo un análisis económico es mucho más barato estabilizar con cal que con cemento, ya que, el porcentaje de cal es casi cuatro veces menor que el de cemento, de esta manera se tiene un ahorro muy significativo, los resultados obtenidos con la mezcla de suelo – cal son muy exitosos al igual que con la de suelo – cemento.

- g. El proceso mecánico se realizó mediante el ensayo Proctor estándar, en este proceso no se obtuvo buenos resultados, ya que no se pudo controlar la expansividad del suelo. Se obtuvo un valor del índice de expansión de 12, sin embargo, es importante recalcar que mediante el ensayo Proctor estándar aumenta la densidad seca máxima de una muestra de suelo remoldeada a comparación con una muestra de suelo inalterada, este aumento varía entre el 10% al 15%.
- h. Para finalizar se concluye que la estabilización mediante la mezcla con cal y cemento permite mejorar de manera general otras características físicas y geomecánicas del suelo como es el caso del índice de plasticidad, la cohesión y al ángulo de fricción interna.

4.2. RECOMENDACIONES

- a) Durante la toma de muestras a cielo abierto se recomienda poner el material en elementos herméticos o para mayor facilidad fundas plásticas, ya que estas mantienen el contenido de humedad natural que posee el suelo de estudio.
- b) Es importante que los ensayos que involucren el uso de muestras inalteradas sean realizados de manera inmediata o lo más pronto posible en el laboratorio para evitar que se pierda contenido de humedad natural, ya que este parámetro puede modificar los resultados que se pretenden obtener.
- c) Es recomendable establecer el número de ensayos que se van a realizar en el laboratorio, para estimar la cantidad necesaria de material que se va a utilizar en cada uno de los ensayos.
- d) En el campo se recomienda aplicar la técnica del Jet Grouting, el cual básicamente es un método para mejorar el terreno que consiste en inyectar un fluido usando mucha energía la cual rompe la estructura del suelo para mezclarse con el mismo y mejorar este suelo. Existen varios tipos de Jet Grouting, pero se recomienda uno de fluido sencillo o doble para suelos arcillosos. Principalmente se inyectan lechadas de cemento, el diseño de estas está dosificada por la relación de agua/cemento (en peso), este valor varió entre 0,5 a 1,5. La resistencia a la compresión simple del Jet Grouting varía de 2 a 25 MPa, estos valores son obtenidos de ensayos experimentales y varían dependiendo de la cantidad de cemento. Se puede aproximar la resistencia a la tracción, ya que es el 10% de la resistencia a la compresión simple y la resistencia al corte como un 8%. El contenido de cemento puede variar entre 250 – 400 kg/m para un fluido simple y 500 – 1400 kg/m para un fluido doble. Las densidades de la lecha es necesario hacerlas en el sitio (Behak, 2021).

- e) Para futuros proyectos se recomienda hacer investigaciones experimentales del Jet Grouting con la cal, para que de esta manera se tenga un rango de valores como el del cemento para que pueda ser aplicada.
- f) Como recomendación final se propone tener en cuenta este tipo de investigaciones experimentales al momento de construir, ya que esta información puede servir de mucha ayuda para construcciones futuras y que estas sean seguras y evitar futuros desastres o pérdidas materiales, económicas o hasta humanas.

BIBLIOGRAFÍA

- Arauz, C. (2018). *Arcillas*. Nicaragua: Universidad Nacional de Ingeniería Recinto Universitario Pedro Arauz Palacios Departamento de Construcción.
- ASTM - D-4829. (2016). Método de prueba estándar para el índice de expansión de suelos. En ASTM, *NORMAS ASTM*.
- ASTM D-968. (2016). Ensayo de Compactación Proctor Estándar. En ASTM, *NORMAS ASTM*.
- Behak, L. (2021). Estabilización de suelo mediante Jet Grouting. 18.
- Bowles, J. (1981). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. México.
- Bravo , P., & Daza, P. (2019). *Métodos para controlar el potencial expansivo en suelos arcillosos de la ciudad de Cuenca*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Bristow, C., & Parodiz, J. (1982). The stratigraphical paleontology of the tertiary non - marine sediments of Ecuador. *Carnegie Museum of Natural History Bulletin*, 53.
- Buitrón, K., & Enríquez, A. (2018). Estudio de la Estabilización de Arcillas Expansivas de Manabí con ceniza del volcán Tungurahua. *Escuela Politécnica Nacional*, 180.
- Crespo Villalaz , C. (2004). Mecánica de Suelos y Cimentaciones. *LIMUSA*, 652.
- GAD Parroquial de Nulti. (2019). *Datos Generales de Nulti*. Cuenca.
- González, M. (2021). *Estabilización de Arcillas Expansivas en el Sector de la Autopista Azogues - El Descanso Mediante Procesos Químicos*. Loja: UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA .
- INV E -132 -13. (2011). Determinación de Suelos Expansivos. En *Normas INV E - 132 -13* (pág. 6). Instituto Nacional de Vías.
- Juárez, E., & Rico, A. (2001). Mecánica de Suelos: Fundamentos de la Mecánica de Suelos. *LIMUSA*, 33.
- LLorca, A. (2012). Sobre la edificación en arcillas expansivas. *Consejo Superior de Investigaciones Científicas*, 12.
- Montejo Fonseca, A., Montejó Piratova, A., & Montejó Piratova, A. (2018). *Estabilización de suelos*. Bogotá: Ediciones de la U.
- Patrone, J., & Prefumo, E. (2005). LA ACCION DE LOS SUELOS EXPANSIVOS SOBRE LAS CIMENTACIONES - MÉTODOS DE PREVENCIÓN Y CONTROL. *Facultad de Ingeniería de la Universidad de Montevideo*, 23.
- Sánchez, M. (2014). *Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Calcical del cantón Tosagua provincia de Manabí*. Quito: Pontifica Universidad Católica del Ecuador.
- Shuan, L., & Basurto , D. (2019). *Guía de Laboratorio*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería Perú.
- Steinmann, M., & Hungerbuehler, D. (1996). *Geología de cuencas sedimentarias (Mioceno, Sur del Ecuador)*. Cuenca - Ecuador: ETH - Zurich.

Vélez, P. (2012). *COMPROBACIÓN DE LAS CORRELACIONES DE LA PRESIÓN DE EXPANSIÓN CON LAS PROPIEDADES ÍNDICES EN SUELOS DEL SECTOR CHALLUABAMBA, CUENCA, RECOMENDACIONES PARA LA CONTRUCCION DE CIMENTACIONES*. Cuenca: Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca.

ANEXO I: REGISTRO FOTOGRÁFICO



Anexo 1: Lugar de la extracción de muestras. Elaborado por autor.



Anexo 2: Extracción de muestras. Elaborado por autor.



Anexo 3: Extracción de muestras. Elaborado por autor.



Anexo 4: Muestra de suelo natural en el laboratorio. Elaborado por autor.



Anexo 5: Muestra de suelo para análisis granulométrico. Elaborado por autor.



Anexo 6: Muestra tamizada para análisis granulométrico. Elaborado por autor.



Anexo 7: Análisis granulométrico. Elaborado por autor.



Anexo 8: Cuchara de Casa Grande para límites de Atterberg. Elaborado por autor.



Anexo 9: Muestra de suelo - cemento para límites de Atterberg. Elaborado por autor.



Anexo 10: Muestra de suelo - cemento para límites de Atterberg. Elaborado por autor.



Anexo 11: Límites de Atterberg suelo - cemento. Elaborado por autor.



Anexo 12: Límites de Atterberg suelo - cal. Elaborado por autor.



Anexo 13: Muestra de suelo natural para ensayo de Proctor estándar. Elaborado por autor.



Anexo 14: Molde para ensayo de Proctor estándar. Elaborado por autor.



Anexo 15: Cilindro de suelo natural en el ensayo de Proctor estándar. Elaborado por autor.



Anexo 16: Muestra de suelo - cal para ensayo de Proctor estándar. Elaborado por autor.



Anexo 17: Cilindro de suelo - cal en el ensayo de Proctor estándar. Elaborado por autor.



Anexo 18: Muestra de suelo - cemento para el ensayo de Proctor estándar. Elaborado por autor.



Anexo 19: Cilindro de suelo - cemento en el ensayo de Proctor estándar. Elaborado por autor.



Anexo 20: Cilindros de suelo natural en el ensayo de Proctor estándar.



Anexo 21: Cilindros de suelo - cal en el ensayo de Proctor estándar. Elaborado por autor.



Anexo 22: Cilindros de suelo - cemento en el ensayo de Proctor estándar. Elaborado por autor.



Anexo 23: Muestra remoldeada de suelo natural para ensayo de corte directo. Elaborado por autor.



Anexo 24: Muestra remoldeada de suelo - cemento para ensayo de corte directo. Elaborado por autor.



Anexo 25: Curado de muestra de suelo - cal para ensayo de corte directo. Elaborado por autor.



Anexo 26: Curado de muestra de suelo - cemento para ensayo de corte directo. Elaborado por autor.



Anexo 27: Saturación de muestra de suelo - cemento para ensayo de corte directo .Elaborado por autor.



Anexo 28: Máquina de corte directo. Elaborado por autor.



Anexo 29: Corte directo del suelo natural. Elaborado por autor.



Anexo 30: Corte directo del suelo - cal. Elaborado por autor.



Anexo 31: Corte - directo del suelo - cemento. Elaborado por autor.



Anexo 32: Muestras de suelo en el ensayo de corte directo. Elaborado por autor.



Anexo 33: Muestra de suelo natural remoldeada para la expansión libre. Elaborado por autor.



Anexo 34: Muestra de suelo - cemento remoldeada para la expansión libre. Elaborado por autor.



Anexo 35: Muestra de suelo - cal remoldeada para la expansión libre. Elaborado por autor.



Anexo 36: Maquina para la expansión libre por el método edométrico. Elaborado por autor.



Anexo 37: Partes del equipo de expansión libre. Elaborado por autor.



Anexo 38: Muestra de suelo natural para la expansión libre. Elaborado por autor.



Anexo 39: Muestra del suelo - cal para la expansión libre. Elaborado por autor.



Anexo 40: Muestra de suelo - cemento para la expansión libre. Elaborado por autor.



Anexo 41: Marcación de expansión libre del suelo natural. Elaborado por autor.

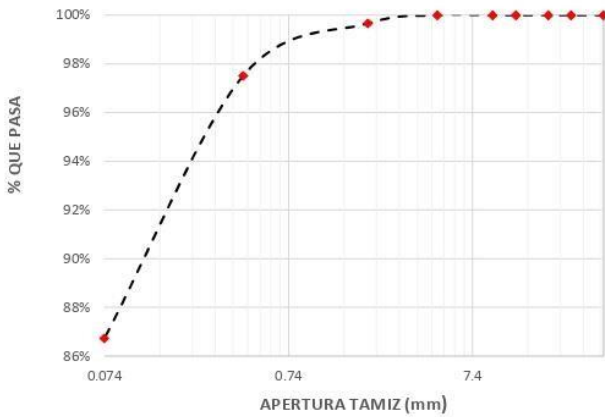
ANEXO II: ENSAYOS DE LABORATORIO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN						
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL SUELO						
PROYECTO	Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos					
MUESTRA	Muestra de suelo la zona de Nulti					
SOLICITADO POR :						
FECHA	9 de noviembre del 2021					

TAMIZ Nº	ABERTURA	PESO RET.	RET. ACUM.	%	%	%
	MM.	GM.	GM.	RETENIDO	PASA	ESPECIF.
3"	76.2	--	--	--	--	
2 1/2"	63.5	--	--	--	--	
2"	50.8	--	--	--	--	
1 1/2"	38.1	--	--	--	--	
1"	25.4	--	--	--	--	
3/4"	19.1	--	--	--	--	
1/2"	12.7	--	--	--	--	
3/8"	9.52	--	--	--	--	
Nº4	4.76	--	--	--	--	
PASA Nº4	--	--	--	--	--	
10	2	1.3	1.3	0.34%	99.66%	
40	0.42	8.3	9.6	2.49%	97.51%	
200	0.074	41.5	51.1	13.27%	86.73%	
FONDO	--	1.5	52.6	--	--	
TOTAL		52.6				

PESO ANTES DEL ENSAYO =	52.4	PESO HUMEDO ANTES DEL LAVADO =	500
PESO DESPUES DEL ENSAYO =	52.6	PESO SECO ANTES DEL LAVADO =	385.03
% DE HUMEDAD =	29.86	PESO SECO DESPUES DEL LAVADO =	52.4

CURVA GRANULOMÉTRICA



Ing. Luis Mario Almache
Jefe de Laboratorio

Ing. Marcos González
Laboratorista

Informe 1: Análisis granulométrico del suelo natural. Elaborado por autor

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



LIMITES DE ATTERBERG

PROYECTO: Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos

MUESTRA: Muestra de suelo de Nulti

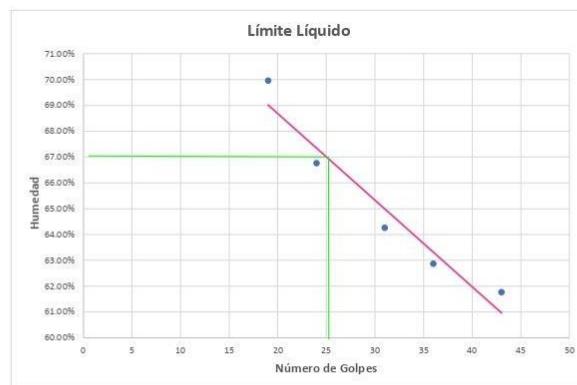
SOLICITADO POR:
FECHA: 9 de noviembre del 2021

Número de Tarro	Número de Golpes	W. Tarro	Peso (gramos)		%W
			Muestra Húmeda + Tarro	Muestra Seca + Tarro	
32	43	21.08	41.22	33.53	61.77%
12A	36	22.05	44.20	35.65	62.87%
20	31	22.00	41.30	33.75	64.26%
7	24	24.85	48.18	38.84	66.76%
C	19	21.87	42.01	33.72	69.96%

Limite Líquido
67.00%

Número de Tarro	W. Tarro	Peso (gramos)		%W
		Muestra Húmeda + Tarro	Muestra Seca + Tarro	
15	21.73	25.32	24.19	45.93%
6	21.93	25.18	24.15	46.40%
13	21.06	24.13	23.19	44.13%
1	21.26	24.57	23.56	43.91%

Limite Plástico
45.09%



Índice de Plasticidad
21.91%

Ing. Luis Mario Almache
Jefe de Laboratorio

Ing. Marcos González
Laboratista

Informe 2: Límites de Atterberg del suelo natural. Elaborado por autor.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



LÍMITES DE ATTERBERG

PROYECTO: Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos

MUESTRA: Muestra de suelo - 3%cal

SOLICITADO POR:

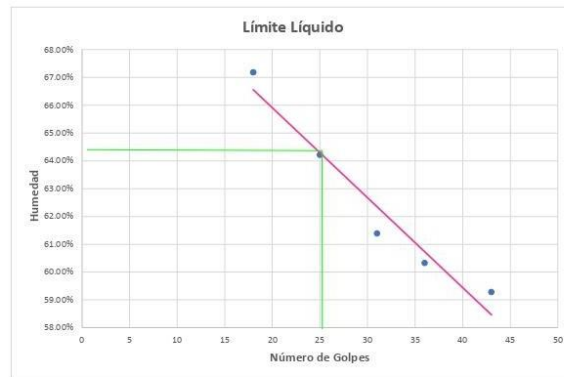
FECHA: 15 de noviembre del 2021

LÍMITE LÍQUIDO			Peso (gramos)		
Número de Tarro	Número de Golpes	W.Tarro	Muestra Húmeda + Tarro	Muestra Seca + Tarro	%W
69	43	6.60	26.51	19.10	59.28%
5	36	6.63	21.30	15.78	60.33%
2	31	6.50	24.14	17.43	61.39%
7B	25	4.12	25.55	17.17	64.21%
1	18	4.31	23.62	15.86	67.19%

Limite Liquido
64.21%

LÍMITE PLÁSTICO			Peso (gramos)		
Número de Tarro	W.Tarro	Muestra Húmeda + Tarro	Muestra Seca + Tarro	%W	
72	6.71	9.15	8.32	51.55%	
11	10.32	12.78	11.95	50.92%	
104	10.14	12.30	11.61	46.94%	
45	10.23	13.52	12.47	46.88%	

Limite Plástico
49.07%



Índice de Plasticidad
15.14%

Ing. Luis Mario Almache
Jefe de Laboratorio

Ing. Marcos González
Laboratista

Informe 3: Límites de Atterberg suelo - cal 3%. Elaborado por autor.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



LIMITES DE ATTERBERG

PROYECTO: Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos

MUESTRA: Muestra de suelo - 11% cemento

SOLICITADO POR:

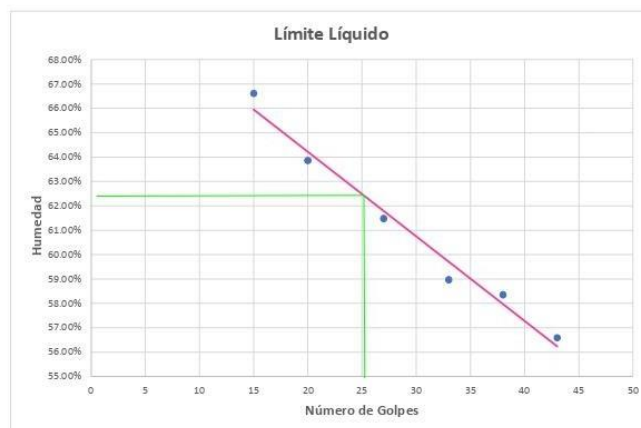
FECHA: 16 de noviembre del 2021

LÍMITE LÍQUIDO			Peso (gramos)		
Número de Tarro	Número de Golpes	W. Tarro	Muestra Húmeda + Tarro	Muestra Seca + Tarro	%W
69	43	6.60	26.55	19.34	56.59%
5	38	6.62	27.38	19.73	58.35%
2	33	6.50	26.88	19.32	58.97%
78	27	4.12	25.71	17.49	61.48%
1	20	4.31	25.94	17.51	63.86%
72	15	6.71	26.62	18.66	66.61%

Límite Líquido
62.50%

LÍMITE PLÁSTICO		Peso (gramos)		
Número de Tarro	W. Tarro	Muestra Húmeda + Tarro	Muestra Seca + Tarro	%W
11	10.32	14.60	13.19	49.13%
104	10.14	12.99	12.07	47.67%
45	10.23	12.97	12.07	48.91%
90	8.38	12.16	10.92	48.82%

Límite Plástico
48.63%



Índice de Plasticidad
13.87%

Ing. Luis Mario Almache
Jefe de Laboratorio

Ing. Marcos González
Laboratista

Informe 4: Límites de Atterberg suelo - cemento 11%. Elaborado por autor.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
 FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



PRÓCTOR ESTÁNDAR

PROYECTO

MUESTRA

SOLICITADO POR :

FECHA

Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos

Muestra del suelo de Multi

10 de noviembre del 2021

Molde #: 25243

Peso del Molde sin collarin: 4262 gr

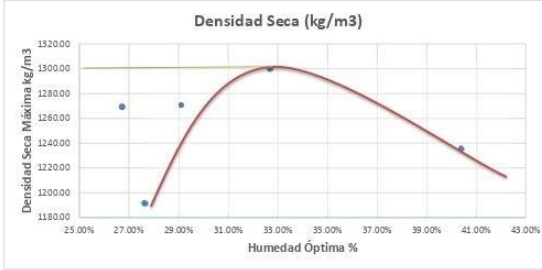
Diámetro del Molde: 10.12 cm

Altura del Molde: 11.65 cm

Volumen del molde: 937.0 cm³

Número de Tarro	CC de Agua agregado	Peso (gramos)			%W	Promedio %W
		W. Tarro	Muestra Húmeda + Tarro	Muestra Seca + Tarro		
A	0	52.89	122.97	106.97	29.59%	27.64%
A1	0	53.03	131.54	115.49	25.70%	
85	40	54.32	140.24	122.26	26.46%	26.72%
8	40	52.65	146.94	126.91	26.97%	
52	80	43.27	116.29	100.31	28.02%	29.08%
2	80	43.68	113.28	97.16	30.14%	
2	160	52.29	124.89	106.97	32.77%	32.66%
17	160	53.69	130.45	111.60	32.55%	
X	320	43.79	114.13	93.73	40.85%	40.36%
2	320	52.27	129.14	107.23	39.87%	

Cantidad de agua agregada		%W Promedio	Peso Muestra + Molde Sin Collarin	Peso de Muestra Húmeda (gr)	Densidad Húmeda (gr/cm ³)	Densidad Seca (gr/cm ³)
cc	%					
0	29.22	27.64%	5687	1425	1.52	1.19
40	31.22	26.72%	5769	1507	1.61	1.27
80	33.22	29.08%	5799	1537	1.64	1.27
160	37.22	32.66%	5878	1616	1.72	1.30
320	45.22	40.36%	5887	1625	1.73	1.24



DENSIDAD SECA MÁXIMA kg/m ³	HÚMEDAD ÓPTIMA %
1300	32.7

%W Promedio	Densidad Seca (kg/m ³)
27.64%	1191.47
26.72%	1269.20
29.08%	1270.79
32.66%	1300.06
40.36%	1235.58

Ing. Luis Mario Almache

Jefe de Laboratorio



Ing. Marcos González

Laboratorista

Informe 5: Proctor estándar suelo natural. Elaborado por autor.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
 FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



PRÓCTOR ESTÁNDAR

PROYECTO
 MUESTRA
 SOLICITADO POR :
 FECHA

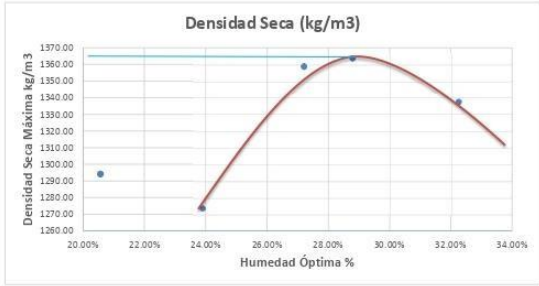
Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos
 Muestra del suelo - 3%cal
 10 de noviembre del 2021

Molde #:
 Peso del Molde sin collarín:
 Diámetro del Molde:
 Altura del Molde:
 Volumen del molde:

25243
 4262 gr
 10.12 cm
 11.65 cm
 937.0 cm³

Peso (gramos)						
Número de Tarro	CC de Agua agregado	W. Tarro	Muestra Húmeda + Tarro	Muestra Seca + Tarro	%W	Promedio %W
5	180	43.21	102.91	90.12	27.26%	27.20%
0	180	43.02	121.79	104.98	27.13%	
S3	240	53.04	131.38	113.84	28.85%	28.78%
X	240	43.79	119.01	102.23	28.71%	
2'	300	43.68	116.88	98.90	32.56%	32.23%
S2	300	43.27	123.55	104.13	31.91%	
A1	120	53.03	126.12	111.93	24.09%	23.90%
A	120	52.89	134.03	118.48	23.71%	
8	60	52.65	155.39	137.96	20.43%	20.56%
85	60	54.32	147.20	131.28	20.69%	

Cantidad de agua agregada		%W Promedio	Peso Muestra + Molde Sin Collarín	Peso de Muestra Humeda (gr)	Densidad Humeda (gr/cm ³)	Densidad Seca (gr/cm ³)
cc	%					
180	31.14	27.20%	5882	1620	1.73	1.36
240	34.14	28.78%	5908	1646	1.76	1.36
300	37.14	32.23%	5919	1657	1.77	1.34
120	28.14	23.90%	5741	1479	1.58	1.27
60	25.14	20.56%	5724	1462	1.56	1.29



DENSIDAD SECA MÁXIMA kg/m ³	HÚMEDAD ÓPTIMA %
1364	28.78

%W Promedio	Densidad Seca (kg/m ³)
27.20%	1359.24
28.78%	1364.09
32.23%	1337.37
23.90%	1273.96
20.56%	1294.21

Ing. Luis Mario Almache
 Jefe de Laboratorio


 Ing. Marcos González
 Laboratorista

Informe 6: Proctor estándar suelo - cal 3%. Elaborado por autor.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



PRÓCTOR ESTÁNDAR

PROYECTO: Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos

MUESTRA: Muestra del suelo - 11% cemento

SOLICITADO POR: _____

FECHA: 11 de noviembre del 2021

Molde #: 25243

Peso del Molde sin collarín: 4262 gr

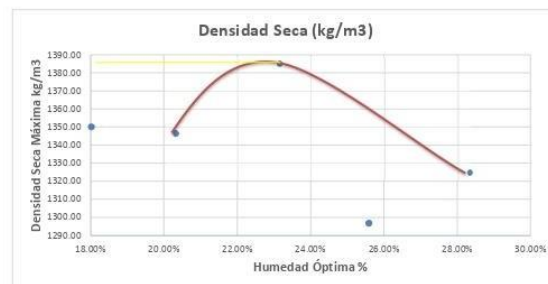
Dímetro del Molde: 10.12 cm

Altura del Molde: 11.65 cm

Volumen del molde: 937.0 cm³

Número de Tarro	CC de Agua agregado	Peso (gramos)			%W	Promedio %W
		W. Tarro	Muestra Húmeda + Tarro	Muestra Seca + Tarro		
17	180	53.69	146.74	129.16	23.29%	23.14%
S1	180	49.98	125.88	110.57	22.99%	
2	240	52.30	129.10	113.44	25.61%	25.59%
L3	240	53.05	128.79	113.37	25.56%	
A	120	52.90	150.78	134.26	20.30%	20.32%
A1	120	53.03	147.65	131.66	20.34%	
8	60	52.65	131.60	119.57	17.98%	18.02%
S3	60	53.04	125.27	114.22	18.06%	
S2	300	43.27	128.67	109.99	28.00%	28.33%
5	300	43.21	128.96	109.86	28.66%	

Cantidad de agua agregada		%W Promedio	Peso Muestra + Molde Sin Collarín	Peso de Muestra Húmeda (gr)	Densidad Húmeda (gr/cm ³)	Densidad Seca (gr/cm ³)
cc	%					
180	30.3	23.14%	5860	1598	1.71	1.38
240	33.3	25.59%	5788	1526	1.63	1.30
120	27.3	20.32%	5780	1518	1.62	1.35
60	24.3	18.02%	5755	1493	1.59	1.35
300	36.3	28.33%	5855	1593	1.70	1.32



DENSIDAD SECA MÁXIMA kg/m ³	HÚMEDAD ÓPTIMA %
1385	23.14

%W Promedio	Densidad Seca (kg/m ³)
23.14%	1384.93
25.59%	1296.76
20.32%	1346.46
18.02%	1350.10
28.33%	1324.79

Ing. Luis Mario Almache
Jefe de Laboratorio

Ing. Marcos González
Laboratorista

Informe 7: Proctor estándar suelo - cemento 11%. Elaborado por autor.

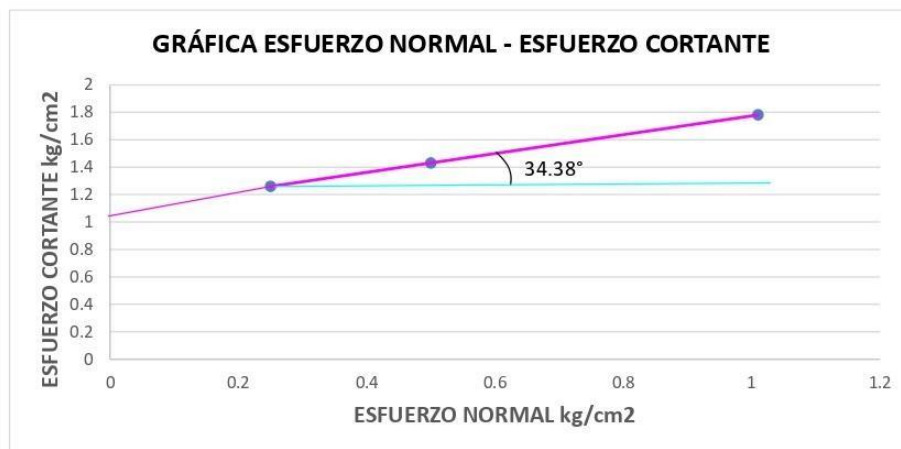
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



RESULTADOS CORTE DIRECTO

PROYECTO	Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos
MUESTRA	Suelo natural - Energía Próctor Estándar
SOLICITADO POR :	
FECHA	29 de noviembre del 2021

Esfuerzo Normal kg/cm ²	Esfuerzo Cortante kg/cm ²
0.25	1.26
0.5	1.43
1.01	1.78
Cohesión	1.05
Ángulo de fricción	34.38



Ing. Luis Mario Almache
Jefe de Laboratorio

Ing. Marcos González
Laboratorista

Informe 8: Corte directo suelo natural. Elaborado por autor.

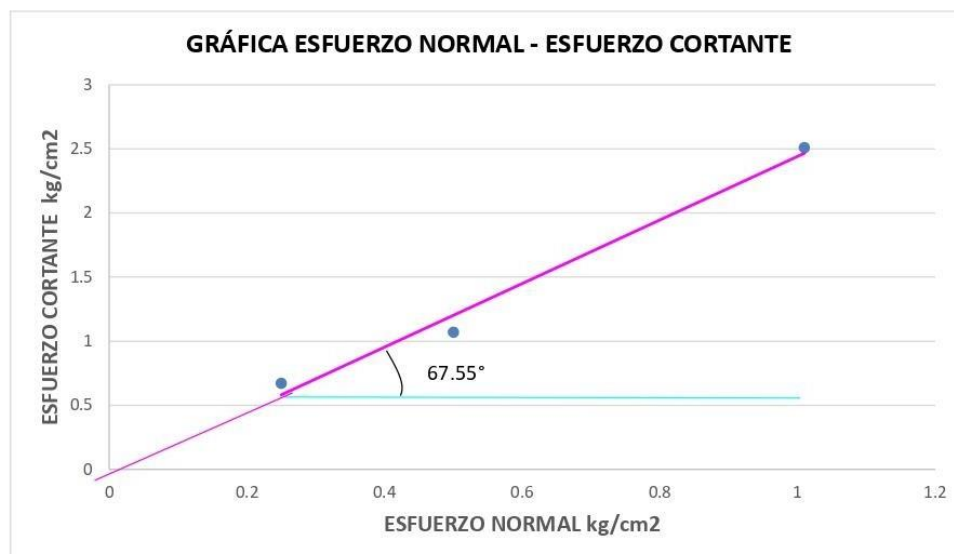
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



RESULTADOS CORTE DIRECTO

PROYECTO	Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos
MUESTRA	Suelo - 3% Cal - Energía Próctor Estándar
SOLICITADO POR :	
FECHA	26 de noviembre del 2021

Esfuerzo Normal kg/cm ²	Esfuerzo Cortante kg/cm ²
0.25	0.67
0.5	1.07
1.01	2.51
Cohesión	0
Ángulo de fricción	67.55



Ing. Luis Mario Almache
Jefe de Laboratorio

Ing. Marcos González
Laboratorista

Informe 9: Corte directo suelo - cal 3%. Elaborado por autor.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



RESULTADOS CORTE DIRECTO

PROYECTO

Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos
químicos y mecánicos

MUESTRA

Suelo - 11% Cemento - Energía Próctor Estándar

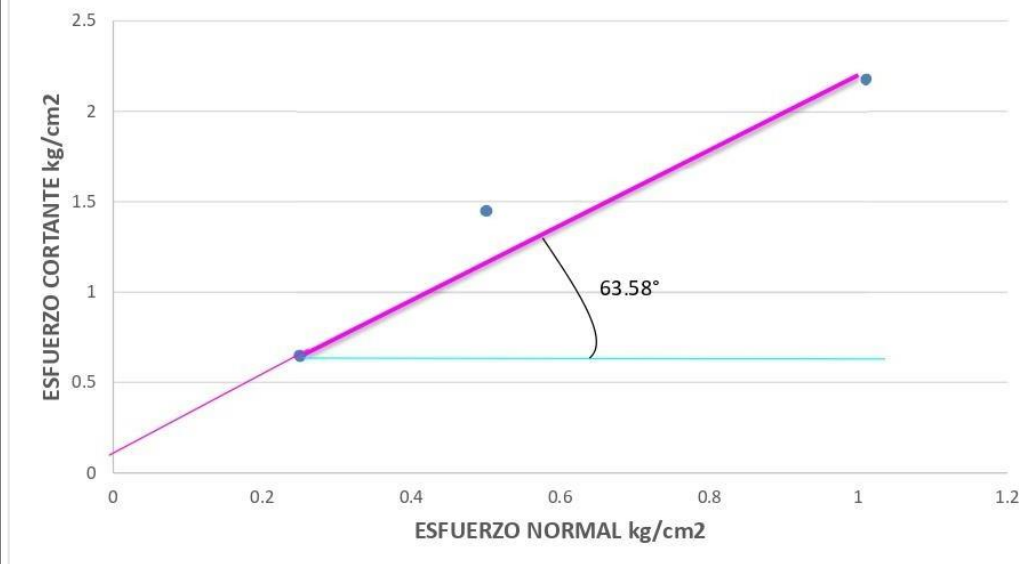
SOLICITADO POR :

FECHA

29 de noviembre del 2021

Esfuerzo Normal kg/cm ²	Esfuerzo Cortante kg/cm ²
0.25	0.65
0.5	1.45
1.01	2.18
Cohesion	0.2
Angulo de friccion	63.58

GRÁFICA ESFUERZO NORMAL - ESFUERZO CORTANTE



Ing. Luis Mario Almache
Jefe de Laboratorio

Ing. Marcos González
Laboratorista

Expansión Libre Edométrica

PROYECTO: Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos
MUESTRA: Muestra de suelo natural remoldeado
SOLICITADO POR:
FECHA: 5 de abril del 2022

ANILLO+MUESTRA (ANTES DE LA INMERSIÓN) (gr) :	203.88
PESO DEL ANILLO (gr) :	119.86
ALTURA DEL ANILLO (mm) :	21.60
PESO DE LA MUESTRA HÚMEDA (gr) :	84.02
CONTENIDO DE HUMEDAD (%) :	31.17
DENSIDAD SECA (kg/m ³) :	1300
LECTURA DE EXPANSIÓN INICIAL (mm) :	0.00
LECTURA DE EXPANSIÓN FINAL (mm) :	0.26
EXPANSIÓN DEL SUELO (%) :	11.99074074

Ing. Luis Mario Almache
Jefe de Laboratorio



Ing. Marcos González
Laboratista

Informe 11: Expansión libre del suelo natural. Elaborado por autor.

Expansión Libre Edométrica

PROYECTO: Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos
MUESTRA: Muestra de suelo remoldeado con 3% de cal
SOLICITADO POR:
FECHA: 18 de abril del 2022

ANILLO+MUESTRA (ANTES DE LA INMERSIÓN) (gr) :	187.53
PESO DEL ANILLO (gr) :	119.86
ALTURA DEL ANILLO (mm) :	21.60
PESO DE LA MUESTRA HÚMEDA (gr) :	67.67
CONTENIDO DE HUMEDAD (%) :	27.85
DENSIDAD SECA (kg/m ³) :	1364
LECTURA DE EXPANSIÓN INICIAL (mm) :	0.00
LECTURA DE EXPANSIÓN FINAL (mm) :	0.00
EXPANSIÓN DEL SUELO (%) :	0

Ing. Luis Mario Almache
Jefe de Laboratorio



Ing. Marcos González
Laboratista

Informe 12: Expansión libre del suelo - cal 3%. Elaborado por autor.

Expansión Libre Edométrica

PROYECTO: Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos
MUESTRA: Muestra de suelo remoldeado con 11% de cemento
SOLICITADO POR:
FECHA: 20 de abril del 2022

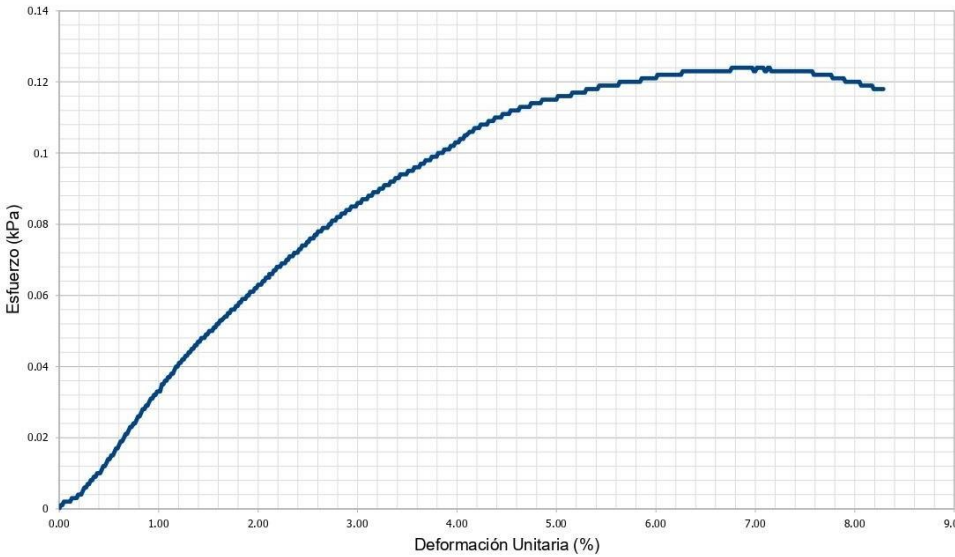
ANILLO+MUESTRA (ANTES DE LA INMERSIÓN) (gr) :	203.67
PESO DEL ANILLO (gr) :	119.86
ALTURA DEL ANILLO (mm) :	21.60
PESO DE LA MUESTRA HÚMEDA (gr) :	83.81
CONTENIDO DE HUMEDAD (%) :	23.10
DENSIDAD SECA (kg/m ³) :	1385
LECTURA DE EXPANSIÓN INICIAL (mm) :	0.00
LECTURA DE EXPANSIÓN FINAL (mm) :	0.00
EXPANSIÓN DEL SUELO (%) :	0

Ing. Luis Mario Almache
Jefe de Laboratorio

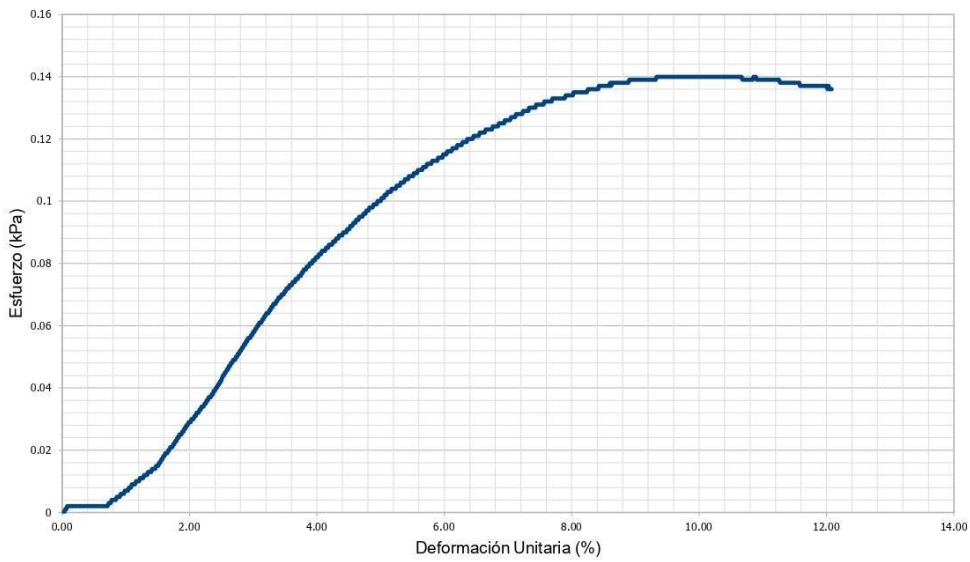


Ing. Marcos González
Laboratista

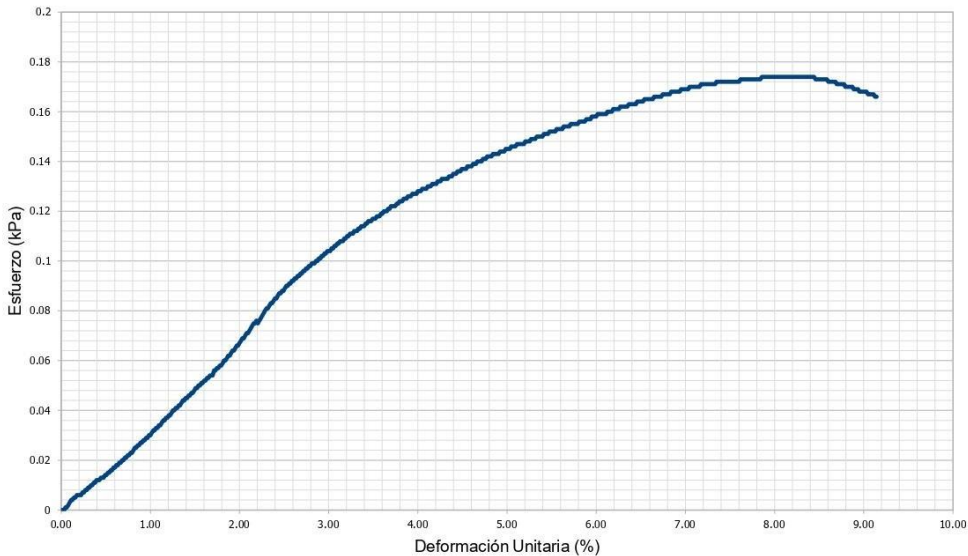
Informe 13: Expansión libre del suelo - cemento 11%. Elaborado por autor.

 Universidad Católica de Cuenca	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES			
	CÓDIGO	00-10	REVISIÓN No.	3
			FECHA REVISIÓN	10/05/2022
ENSAYO DE CORTE DIRECTO - ANILLO RECTÁNGULAR				
FECHA DE IMPRESIÓN	2022-05-20	CARGA (KN)	MATERIAL	PROFUNDIDAD
FECHA DE ENSAYO	2021-11-29	10	Suelo natural remoldeado	5m
INFORMACIÓN GENERAL				
ID. MUESTRA	Suelo natural compactado con energía Proctor estándar			
CLIENTE	Sthefany Ordoñez			
PROYECTO	Trabajo de titulación "Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos"			
ASPECTOS DIMENSIONALES DEL ENSAYO				
Lado (mm)	Desplazamiento horizontal (mm)	Deformación unitaria (mm)	Deformación vertical (mm)	
63	5.22	8.286	0	
Área (mm ²)	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (kPa)	Peso del anillo (gr)	
3969	491	0.124	97.86	
Peso volumétrico kg/m ³		Humedad Óptima (%)		
1300		32.7		
GRÁFICA ESFUERZO (kPa) vs. DEFORMACIÓN UNITARIA (%)				
				
OBSERVACIONES:				
LABORATORISTA	Administrador del sistema	DIRECTOR LABORATORIO		

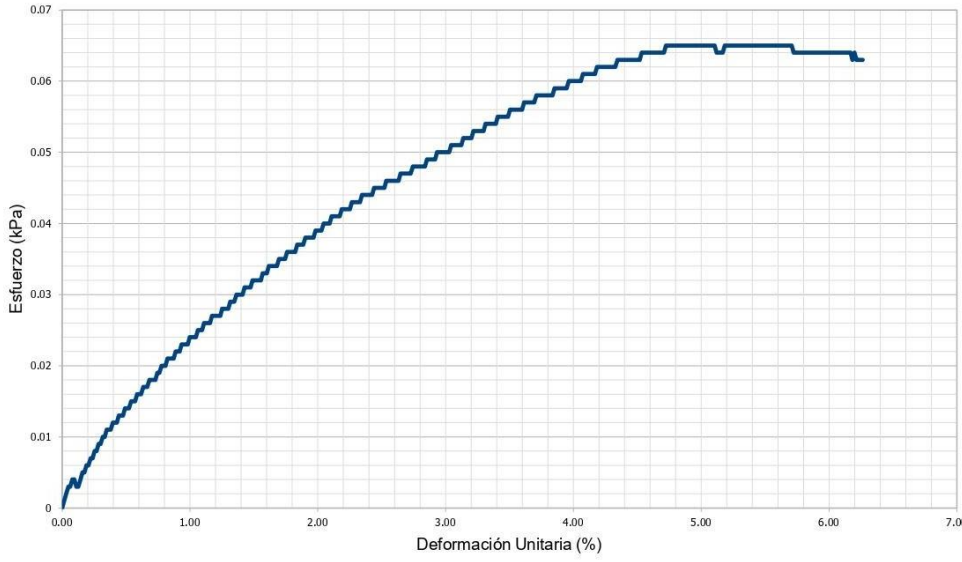
Informe 14: Informe de la máquina de corte directo con carga de 10 KN del suelo natural. Elaborado por autor.

 Universidad Católica de Cuenca	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES			
	CÓDIGO	00-11	REVISIÓN No.	3
			FECHA REVISIÓN	10/05/2022
ENSAYO DE CORTE DIRECTO - ANILLO RECTÁNGULAR				
FECHA DE IMPRESIÓN	2022-05-20	CARGA (KN)	MATERIAL	PROFUNDIDAD
FECHA DE ENSAYO	2021-11-29	20	Suelo inalterado	5m
INFORMACIÓN GENERAL				
ID. MUESTRA	Suelo natural compactado con energía Proctor estándar			
CLIENTE	Sthefany Ordoñez			
PROYECTO	Trabajo de titulación "Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos"			
ASPECTOS DIMENSIONALES DEL ENSAYO				
Lado (mm)	Desplazamiento horizontal (mm)	Deformación unitaria (mm)	Deformación vertical (mm)	
63	7.61	12.079	0	
Área (mm ²)	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (kPa)	Peso del anillo (gr)	
3969	557.6	0.14	88.44	
Peso volumétrico kg/m ³		Humedad Óptima (%)		
1300		32.7		
GRÁFICA ESFUERZO (kPa) vs. DEFORMACIÓN UNITARIA (%)				
 The graph plots Effort (kPa) on the y-axis (0 to 0.16) against Unitary Deformation (%) on the x-axis (0.00 to 14.00). The curve starts at (0,0), rises steeply until about 4% deformation, then continues to rise more gradually, reaching a peak effort of 0.14 kPa at 12.079% unitary deformation, after which it slightly declines.				
OBSERVACIONES:				
LABORATORISTA	Administrador del sistema	DIRECTOR LABORATORIO		

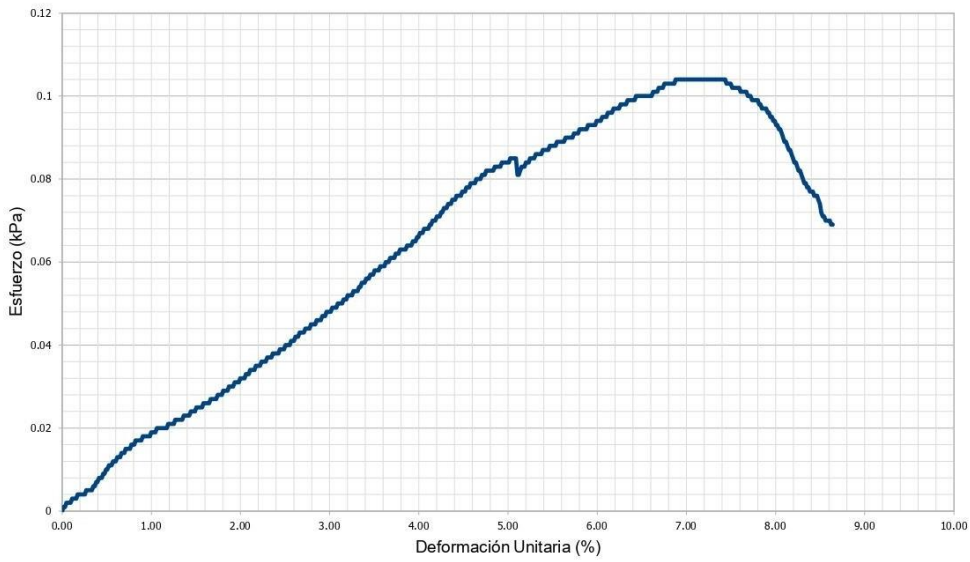
Informe 15: Informe de la máquina de corte directo con carga de 20 KN del suelo natural. Elaborado por autor.

 Universidad Católica de Cuenca	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES			
	CÓDIGO	00-12	REVISIÓN No.	3
			FECHA REVISIÓN	10/05/2022
ENSAYO DE CORTE DIRECTO - ANILLO RECTÁNGULAR				
FECHA DE IMPRESIÓN	2022-05-20	CARGA (kN)	MATERIAL	PROFUNDIDAD
FECHA DE ENSAYO	2021-11-29	40	Suelo Inalterado	5m
INFORMACIÓN GENERAL				
ID. MUESTRA	Suelo natural compactado con energía Proctor estándar			
CLIENTE	Sthefany Ordoñez			
PROYECTO	Trabajo de titulación "Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos"			
ASPECTOS DIMENSIONALES DEL ENSAYO				
Lado (mm)	Desplazamiento horizontal (mm)	Deformación unitaria (mm)	Deformación vertical (mm)	
63	5.77	9.159	0	
Área (mm ²)	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (kPa)	Peso del anillo (gr)	
3969	691.4	0.174	103.29	
Peso volumétrico kg/m ³		Humedad Óptima (%)		
1300		32.7		
GRÁFICA ESFUERZO (kPa) vs. DEFORMACIÓN UNITARIA (%)				
				
OBSERVACIONES:				
LABORATORISTA	Administrador del sistema	DIRECTOR LABORATORIO		

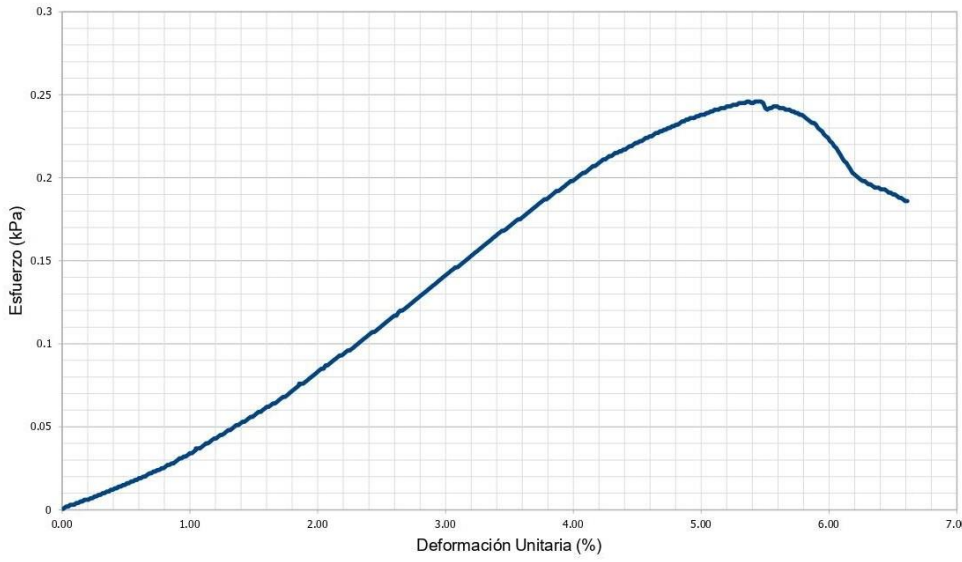
Informe 16: Informe de la máquina de corte directo con carga de 40 KN del suelo natural. Elaborado por autor.

 Universidad Católica de Cuenca	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES			
	CÓDIGO	00-4	REVISIÓN No.	3
			FECHA REVISIÓN	10/05/2022
ENSAYO DE CORTE DIRECTO - ANILLO RECTÁNGULAR				
FECHA DE IMPRESIÓN	2022-05-20	CARGA (KN)	MATERIAL	PRPFUNDIDAD
FECHA DE ENSAYO	2022-04-13	10	Suelo remoldeado con 3% de cal	5m
INFORMACIÓN GENERAL				
ID. MUESTRA	Suelo remoldeado con 3% de cal			
CLIENTE	Sthefany Ordoñez			
PROYECTO	Trabajo de titulación "Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos"			
ASPECTOS DIMENSIONALES DEL ENSAYO				
Lado (mm)	Desplazamiento horizontal (mm)	Deformación unitaria (mm)	Deformación vertical (mm)	
63.08	3.95	6.262	0	
Área (mm ²)	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (kPa)	Peso del anillo (gr)	
3979.086	260.2	0.065		
Peso volumétrico kg/m ³		Humedad Óptima (%)		
1364		28.78		
GRÁFICA ESFUERZO (kPa) vs. DEFORMACIÓN UNITARIA (%)				
				
OBSERVACIONES:				
LABORATORISTA	Administrador del sistema	DIRECTOR LABORATORIO		

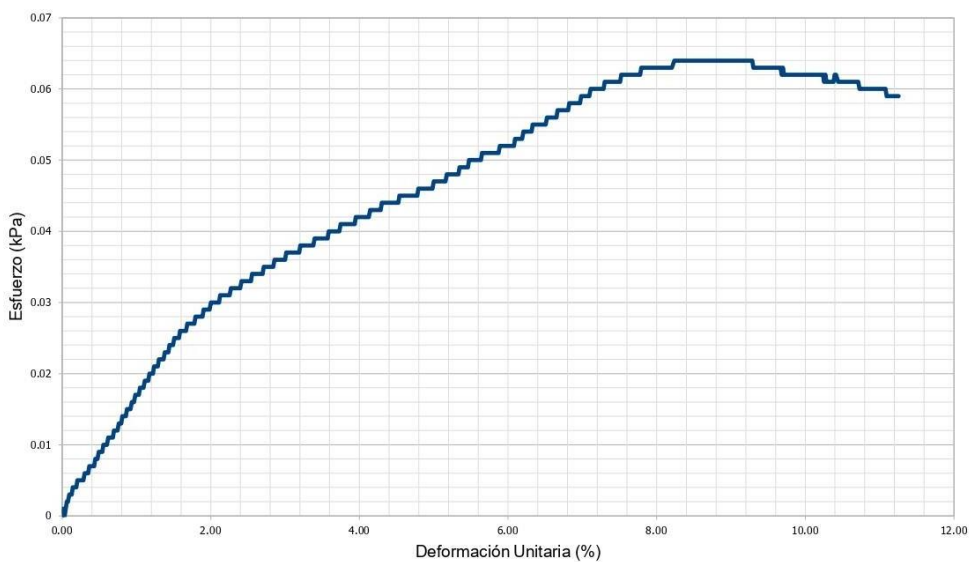
Informe 17: Informe de la máquina de corte directo con carga de 10 KN del suelo - cal 3%. Elaborado por autor.

 Universidad Católica de Cuenca	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES			
	CÓDIGO	00-5	REVISIÓN No.	3
			FECHA REVISIÓN	10/05/2022
ENSAYO DE CORTE DIRECTO - ANILLO RECTÁNGULAR				
FECHA DE IMPRESIÓN	2022-05-20	CARGA (KN)	MATERIAL	PROFUNDIDAD
FECHA DE ENSAYO	2022-04-13	20	Suelo remoldeado con 3% de cal	5m
INFORMACIÓN GENERAL				
ID. MUESTRA	Suelo remoldeado con 3% de cal			
CLIENTE	Sthefany Ordoñez			
PROYECTO	Trabajo de titulación "Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos"			
ASPECTOS DIMENSIONALES DEL ENSAYO				
Lado (mm)	Desplazamiento horizontal (mm)	Deformación unitaria (mm)	Deformación vertical (mm)	
63.08	5.45	8.64	0	
Área (mm ²)	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (kPa)	Peso del anillo (gr)	
3979.086	415.8	0.104	103.29	
Peso volumétrico kg/m ³		Humedad Óptima (%)		
1364		28.78		
GRÁFICA ESFUERZO (kPa) vs. DEFORMACIÓN UNITARIA (%)				
				
OBSERVACIONES:				
LABORATORISTA	Administrador del sistema	DIRECTOR LABORATORIO		

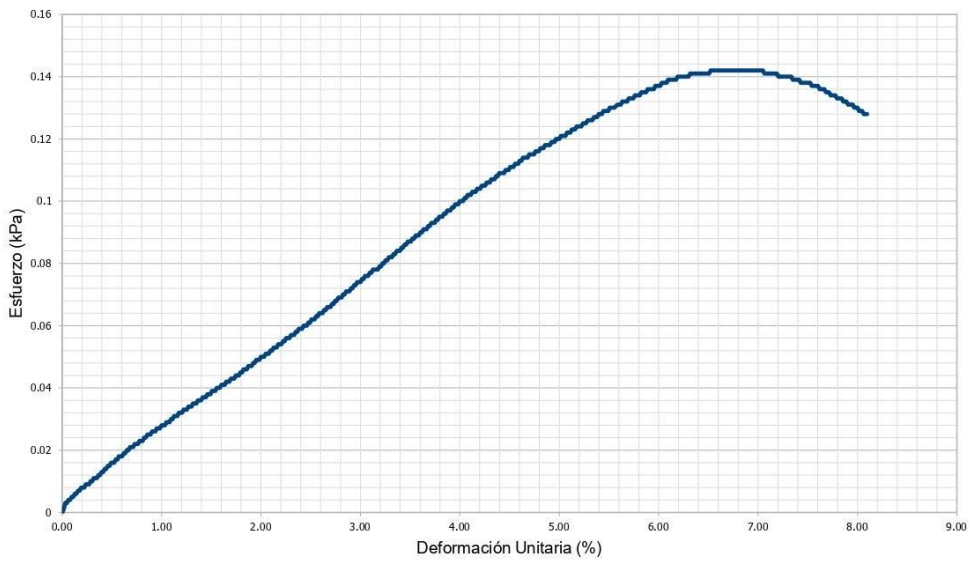
Informe 18: Informe de la máquina de corte directo con carga de 20 KN del suelo - cal 3%. Elaborado por autor.

 Universidad Católica de Cuenca	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES			
	CÓDIGO	00-6	REVISIÓN No.	3
			FECHA REVISIÓN	010/05/2022
ENSAYO DE CORTE DIRECTO - ANILLO RECTÁNGULAR				
FECHA DE IMPRESIÓN	2022-05-20	CARGA (KN)	MATERIAL	PROFUNDIDAD
FECHA DE ENSAYO	2022-04-13	40	Suelo remoldeado con 3% de cal	5m
INFORMACIÓN GENERAL				
ID. MUESTRA	Suelo remoldeado con 3% de cal			
CLIENTE	Sthefany Ordoñez			
PROYECTO	Trabajo de titulación "Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos"			
ASPECTOS DIMENSIONALES DEL ENSAYO				
Lado (mm)	Desplazamiento horizontal (mm)	Deformación unitaria (mm)	Deformación vertical (mm)	
63.08	4.17	6.611	0	
Área (mm ²)	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (kPa)	Peso del anillo (gr)	
3979.086	977.8	0.246	97.86	
Peso volumétrico kg/m ³		Humedad Óptima (%)		
1364		28.78		
GRÁFICA ESFUERZO (kPa) vs. DEFORMACIÓN UNITARIA (%)				
				
OBSERVACIONES:				
LABORATORISTA	Administrador del sistema	DIRECTOR LABORATORIO		

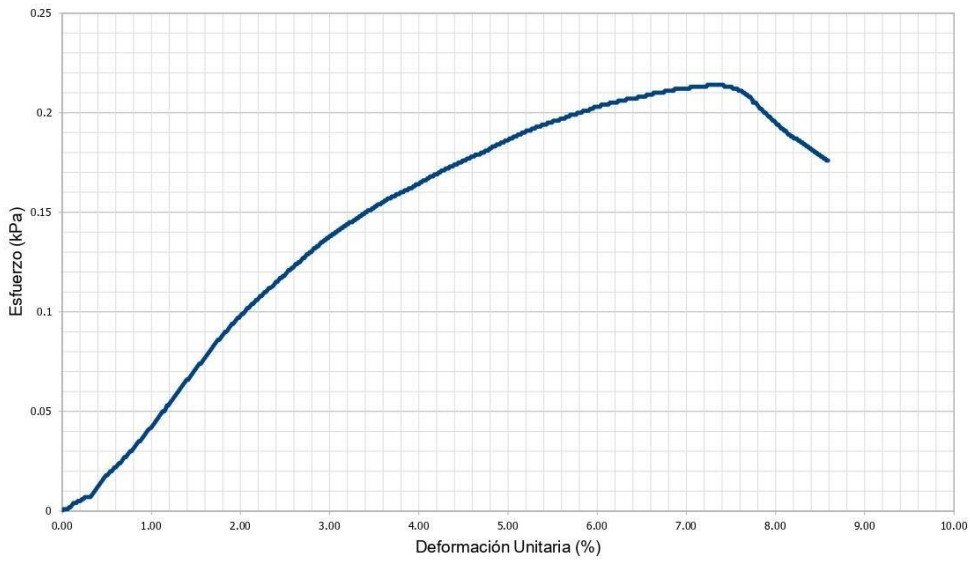
Informe 19: Informe de la máquina de corte directo con carga de 40 KN del suelo - cal 3%. Elaborado por autor.

 Universidad Católica de Cuenca	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES			
	CÓDIGO	00-7	REVISIÓN No.	3
			FECHA REVISIÓN	10/05/2022
ENSAYO DE CORTE DIRECTO - ANILLO RECTÁNGULAR				
FECHA DE IMPRESIÓN	2022-05-20	CARGA (KN)	MATERIAL	PROFUNDIDAD
FECHA DE ENSAYO	2021-11-29	10	Suelo remoldeado con 11% de cemento	5m
INFORMACIÓN GENERAL				
ID. MUESTRA	Suelo remoldeado con 11% de cemento			
CLIENTE	Sthefany Ordoñez			
PROYECTO	Trabajo de titulación "Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos"			
ASPECTOS DIMENSIONALES DEL ENSAYO				
Lado (mm)	Desplazamiento horizontal (mm)	Deformación unitaria (mm)	Deformación vertical (mm)	
63	7.09	11.254	0	
Área (mm ²)	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (kPa)	Peso del anillo (gr)	
3969	254.4	0.064	97.86	
Peso volumétrico kg/m ³		Humedad Óptima (%)		
1385		23.14		
GRÁFICA ESFUERZO (kPa) vs. DEFORMACIÓN UNITARIA (%)				
				
OBSERVACIONES:				
LABORATORISTA	Administrador del sistema	DIRECTOR LABORATORIO		

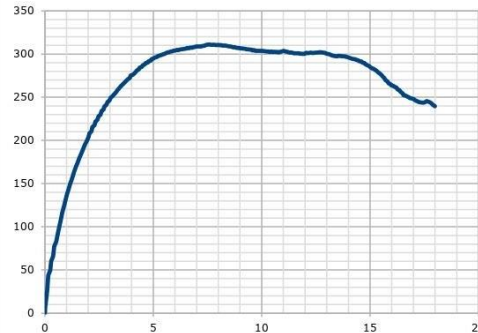
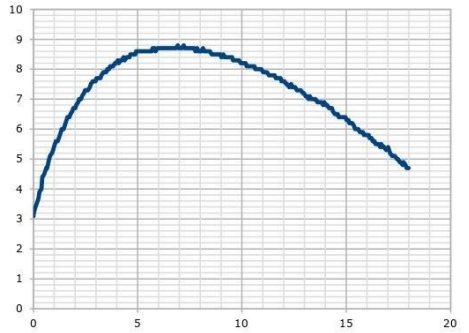
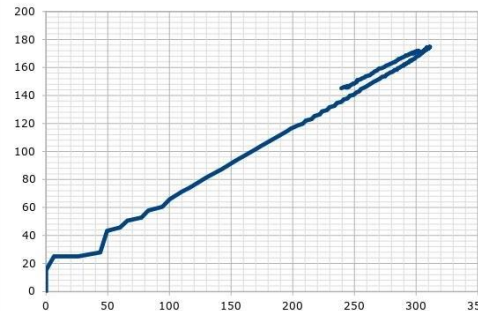
*Informe 20: Informe de la máquina de corte directo con carga de 10 KN del suelo - cemento 11%.
Elaborado por autor.*

 Universidad Católica de Cuenca	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES			
	CÓDIGO	00-8	REVISIÓN No.	3
			FECHA REVISIÓN	10/05/2022
ENSAYO DE CORTE DIRECTO - ANILLO RECTÁNGULAR				
FECHA DE IMPRESIÓN	2022-05-20	CARGA (KN)	MATERIAL	PROFUNDIDAD
FECHA DE ENSAYO	2021-11-29	20	Suelo remoldeado con 11% de cal	5m
INFORMACIÓN GENERAL				
ID. MUESTRA	Suelo remoldeado con 11% de cemento			
CLIENTE	Sthefany Ordoñez			
PROYECTO	Trabajo de titulación "Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos"			
ASPECTOS DIMENSIONALES DEL ENSAYO				
Lado (mm)	Desplazamiento horizontal (mm)	Deformación unitaria (mm)	Deformación vertical (mm)	
63	5.11	8.111	0	
Área (mm ²)	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (kPa)	Peso del anillo (gr)	
3969	564	0.142	103.29	
Peso volumétrico kg/m3		Humedad Óptima (%)		
1385		23.14		
GRÁFICA ESFUERZO (kPa) vs. DEFORMACIÓN UNITARIA (%)				
				
OBSERVACIONES:				
LABORATORISTA	Administrador del sistema	DIRECTOR LABORATORIO		

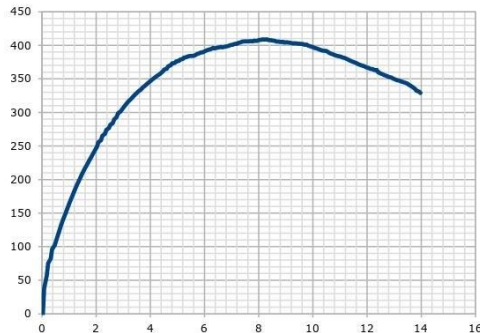
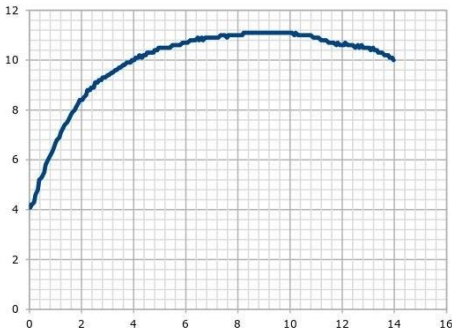
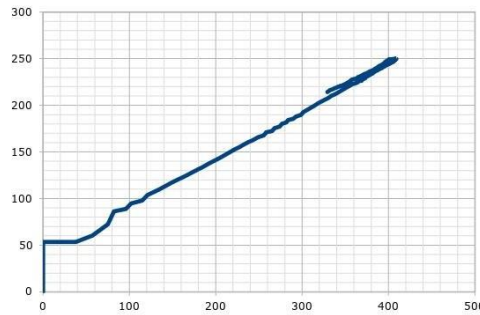
*Informe 21: Informe de la máquina de corte directo con carga de 20 KN del suelo - cemento 11%.
Elaborado por autor.*

 Universidad Católica de Cuenca	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES			
	CÓDIGO	00-9	REVISIÓN No.	3
			FECHA REVISIÓN	10/05/2022
ENSAYO DE CORTE DIRECTO - ANILLO RECTÁNGULAR				
FECHA DE IMPRESIÓN	2022-05-20	CARGA (KN)	MATERIAL	PROFUNDIDAD
FECHA DE ENSAYO	2021-11-29	40	Suelo remoldeado 11% de cal	5m
INFORMACIÓN GENERAL				
ID. MUESTRA	Suelo remoldeado con 11% de cemento			
CLIENTE	Sthefany Ordoñez			
PROYECTO	Trabajo de titulación "Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos"			
ASPECTOS DIMENSIONALES DEL ENSAYO				
Lado (mm)	Desplazamiento horizontal (mm)	Deformación unitaria (mm)	Deformación vertical (mm)	
63	5.41	8.587	0	
Área (mm ²)	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (kPa)	Peso del anillo (gr)	
3969	847.8	0.214	97.86	
Peso volumétrico kg/m ³		Humedad Óptima (%)		
1385		23.14		
GRÁFICA ESFUERZO (kPa) vs. DEFORMACIÓN UNITARIA (%)				
				
OBSERVACIONES:				
LABORATORISTA	Administrador del sistema	DIRECTOR LABORATORIO		

*Informe 22: Informe de la máquina de corte directo con carga de 40 KN del suelo - cemento 11%.
Elaborado por autor.*

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES																			
Código	001	Revisión No.	3	Fecha Revisión	2022-05-10														
Ensayo Base																			
FECHA IMPRESIÓN	2022-05-20	No. ENSAYO	MATERIAL																
FECHA ENSAYO	2021-11-17	1	Suelo natural remoldeado																
INFORMACIÓN GENERAL																			
ID. MUESTRA	Suelo natural remoldeado		INFORME No.	Triaxial #1															
CLIENTE	Sthefany Ordoñez		SONDEO																
PROYECTO	Trabajo de titulación "Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos"		PROFUNDIDAD	5m															
GRÁFICA ESFUERZO DESVIADOR (kPa) vs DEFORMACIÓN UNITARIA (%)			GRÁFICA PRESIÓN DE POROS (kPa) vs DEFORMACIÓN UNITARIA (%)																
																			
GRÁFICA p' vs q			VARIABLES DEL ENSAYO																
			<table><tr><td>Diámetro (mm)</td><td>50.4</td></tr><tr><td>Altura (mm)</td><td>117.8</td></tr><tr><td>Área (mm²)</td><td>1995.035</td></tr><tr><td>Área corregida (mm²)</td><td>2432.533</td></tr><tr><td>Carga Axial</td><td>0.69</td></tr><tr><td>Esfuerzo principal menor efectivo</td><td>16.9</td></tr><tr><td>Esfuerzo principal mayor efectivo</td><td>323.959</td></tr></table>			Diámetro (mm)	50.4	Altura (mm)	117.8	Área (mm²)	1995.035	Área corregida (mm²)	2432.533	Carga Axial	0.69	Esfuerzo principal menor efectivo	16.9	Esfuerzo principal mayor efectivo	323.959
Diámetro (mm)	50.4																		
Altura (mm)	117.8																		
Área (mm²)	1995.035																		
Área corregida (mm²)	2432.533																		
Carga Axial	0.69																		
Esfuerzo principal menor efectivo	16.9																		
Esfuerzo principal mayor efectivo	323.959																		
OBSERVACIONES:																			
LABORATORISTA	Administrador del sistema		DIRECTOR LABORATORIO																

Informe 23: Triaxial #1 del suelo natural. Elaborado por autor.

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES																			
Código		Revisión No.		Fecha Revisión															
				2022-05-03															
Ensayo Base																			
FECHA IMPRESIÓN		2022-05-10		No. ENSAYO															
FECHA ENSAYO		2021-11-17		2															
		MATERIAL																	
		Suelo inalterado																	
INFORMACIÓN GENERAL																			
ID. MUESTRA	Suelo inalterado			INFORME No.	Triaxial #2														
CLIENTE	Sthefany Ordoñez			SONDEO															
PROYECTO	Trabajo de titulación "Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos"			PROFUNDIDAD	5m														
GRÁFICA ESFUERZO DESVIADOR (kPa) vs DEFORMACIÓN UNITARIA (%)			GRÁFICA PRESIÓN DE POROS (kPa) vs DEFORMACIÓN UNITARIA (%)																
																			
GRÁFICA p' vs q			VARIABLES DEL ENSAYO																
			<table><tr><td>Diámetro (mm)</td><td>49.7</td></tr><tr><td>Altura (mm)</td><td>112.3</td></tr><tr><td>Área (mm²)</td><td>1940.003</td></tr><tr><td>Área corregida (mm²)</td><td>2254.934</td></tr><tr><td>Carga Axial</td><td>0.864</td></tr><tr><td>Esfuerzo principal menor efectivo</td><td>39.9</td></tr><tr><td>Esfuerzo principal mayor efectivo</td><td>439.169</td></tr></table>			Diámetro (mm)	49.7	Altura (mm)	112.3	Área (mm²)	1940.003	Área corregida (mm²)	2254.934	Carga Axial	0.864	Esfuerzo principal menor efectivo	39.9	Esfuerzo principal mayor efectivo	439.169
Diámetro (mm)	49.7																		
Altura (mm)	112.3																		
Área (mm²)	1940.003																		
Área corregida (mm²)	2254.934																		
Carga Axial	0.864																		
Esfuerzo principal menor efectivo	39.9																		
Esfuerzo principal mayor efectivo	439.169																		
OBSERVACIONES:																			
LABORATORISTA		Administrador del sistema		DIRECTOR LABORATORIO															

Informe 24: Triaxial #2 del suelo natural. Elaborado por autor.

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES																			
Código	003	Revisión No.	3	Fecha Revisión	2022-05-10														
Ensayo Base																			
FECHA IMPRESIÓN	2022-05-20	No. ENSAYO	MATERIAL																
FECHA ENSAYO	2021-11-17	3	Suelo natrual remoldeado																
INFORMACIÓN GENERAL																			
ID. MUESTRA	Suelo natural remoldeado		INFORME No.	Triaxial #3															
CLIENTE	Sthefany Ordoñez		SONDEO																
PROYECTO	Trabajo de titulación "Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos"		PROFUNDIDAD	5m															
GRÁFICA ESFUERZO DESVIADOR (kPa) vs DEFORMACIÓN UNITARIA (%)			GRÁFICA PRESIÓN DE POROS (kPa) vs DEFORMACIÓN UNITARIA (%)																
GRÁFICA p' vs q			VARIABLES DEL ENSAYO																
			<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Diámetro (mm)</td> <td>50.1</td> </tr> <tr> <td>Altura (mm)</td> <td>116.4</td> </tr> <tr> <td>Área (mm²)</td> <td>1971.356</td> </tr> <tr> <td>Área corregida (mm²)</td> <td>2555.394</td> </tr> <tr> <td>Carga Axial</td> <td>0.761</td> </tr> <tr> <td>Esfuerzo principal menor efectivo</td> <td>74.3</td> </tr> <tr> <td>Esfuerzo principal mayor efectivo</td> <td>399.62</td> </tr> </tbody> </table>			Diámetro (mm)	50.1	Altura (mm)	116.4	Área (mm²)	1971.356	Área corregida (mm²)	2555.394	Carga Axial	0.761	Esfuerzo principal menor efectivo	74.3	Esfuerzo principal mayor efectivo	399.62
Diámetro (mm)	50.1																		
Altura (mm)	116.4																		
Área (mm²)	1971.356																		
Área corregida (mm²)	2555.394																		
Carga Axial	0.761																		
Esfuerzo principal menor efectivo	74.3																		
Esfuerzo principal mayor efectivo	399.62																		
OBSERVACIONES:																			
LABORATORISTA	Administrador del sistema	DIRECTOR LABORATORIO																	

Informe 25: Triaxial #3 del suelo natural. Elaborado por autor.

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Sthefany Carolina Ordóñez Armijos portadora de la cédula de ciudadanía N° 0106543853. En calidad de autora y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación "Estabilización de arcillas expansivas mediante procesos químicos y mecánicos" de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 29 de agosto de 2022

F: 

Sthefany Carolina Ordóñez Armijos
0106543853