

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS DE LA PROVINCIA  
DE MANABÍ CON PUZOLANA EXTRAÍDA DE CENIZA DE  
CASCARILLA DE ARROZ**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
MENCION ESTRUCTURAS**

**EDISON ANDRÉS CHICAIZA ESTÉVEZ**

**edison.chicaiza01@epn.edu.ec**

**FRANCISCO JAVIER OÑA OÑA**

**francisco.ona@epn.edu.ec**

**DIRECTORA: Msc. EUGENIA DE LAS MERCEDES VILLACIS TRONCOSO**

**mercedes.villacis@epn.edu.ec**

**TOMO 1**

**Quito, Junio 2018**

## **DECLARACIÓN**

Nosotros, Edison Andrés Chicaiza Estévez y Francisco Javier Oña Oña, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

**EDISON A. CHICAIZA ESTÉVEZ**

---

**FRANCISCO J. OÑA OÑA**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Edison Andrés Chicaiza Estévez y Francisco Javier Oña Oña, bajo mi supervisión.

---

**Msc. EUGENIA DE LAS MERCEDES VILLACIS T.  
DIRECTORA DE PROYECTO**

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres y hermanos por siempre estar presente en todos los momentos más importantes y necesarios de mi vida, por siempre ser un apoyo incondicional y siempre levantarme cuando lo he necesitado.

Agradezco al equipo del LEMSUR de la Politécnica Nacional, Ing. Mercedes Villacis, Iván Lituma e Ing. Gustavo Martínez por su apoyo, guía y enseñanzas durante todo el proyecto de investigación, por el tiempo dedicado para que todo esto pueda realizarse de la mejor manera y por todos los conocimientos impartidos que han sido de gran importancia para un crecimiento mutuo.

Un gran agradecimiento a todos mis compañeros y grandes amigos los Panchu's, Andrés O., Rommel A., Alfredo L., Jose Luis B., Luis M., Gaby A. y Erika L., por su apoyo, risas, grandes momentos y experiencias vividas durante todos estos años dentro y fuera de la universidad, momentos inolvidables y grandes recuerdos.

Agradezco también a mis amigos incondicionales, Jonathan B., Alejandro U., Luis H., Santiago B., Diana M., Estefanía S., Nathaly D., Saskia H., Diana CL. Y Paula P. por siempre brindarme su apoyo y su fuerza para siempre levantarme y seguir adelante, personas que han enriquecido mi vida tanto personal como profesionalmente.

Un infinito agradecimiento a Celene por siempre ser el apoyo fundamental durante todos los años de universidad, por ser el soporte primordial para lograr este objetivo ahora cumplido.

Por último, un gran agradecimiento a todas las personas que me conocen y de una u otra forma han formado parte de mi vida, gracias a todos por brindarme su amistad.

*Francisco Javier Oña Oña*

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Celene Coque, la persona que ha sido el apoyo más importante en mi vida durante todos estos años, ya que gracias a su soporte incondicional y amor logre culminar con éxito la carrera y este proyecto de investigación. Para ella este trabajo porque sin su apoyo no lo hubiese podido lograr.

*Francisco Javier Oña Oña*

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco a toda mi familia en general por ser un pilar de apoyo en todo momento, principalmente a mis padres Antonio y Blanca quienes han dedicado todo el esfuerzo y sacrificio para mi bien personal, han sido fuente de inspiración y han sabido guiarme en cada decisión tomada, muchos de mis logros se los debo a ustedes y a mi querida hermana Anita quien a pesar de los buenos y malos momentos ha sabido apoyarme y comprender las situaciones que se nos han presentado.

Un agradecimiento especial a mis tías Cecilia, Magola, Irma e Hilda, quienes han tenido la voluntad de ayudar en todos los momentos y situaciones difíciles, brindando todo su apoyo y comprensión en todos los sentidos.

Agradezco a mis queridos abuelos Luis y Eleuterio quienes me han demostrados que la felicidad se logra siendo una persona sencilla, dando el mayor esfuerzo de uno, y siempre con las ganas de ser una persona sabia.

Agradezco a la Universidad por los conocimientos adquiridos, las experiencias vividas, los amigos encontrados y los buenos momentos que he compartido dentro de la misma.

Un afectuoso agradecimiento a todas las personas que han guiado y apoyado de una u otra forma con el desarrollo de esta investigación como lo son los miembros del LEMSUR, la directora de tesis Ing. Mercedes Villacis, el Ing. Gustavo Martínez, e Iván Lituma. Agradezco a mis amigos en especial a mis más grandes amigos Iván Ruales y Maryto Montenegro, con quienes he compartido grandiosos momentos.

Finalmente agradezco a todas esas personas allegadas, y conocidos por acompañarme en las grandes o pequeñas experiencias que me han llenado de felicidad, orgullo y sabiduría.

*Edison Andrés Chicaiza Estévez*

## DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a un amor muy especial que es mi novia Estefany Yépez, a mi hermana, a mis tías Cecilia e Irma, a mis abuelos, a la madre de mi hijo, y principalmente a mis padres y la persona más importante y más amada de mi vida, mi pequeñito Felipe Bladymir quien es los máspreciado en mi vida, mi fuente de inspiración, la persona por quien luche y lucharé cada día y por quien lo daría todo; mi Felipito te amo.

*Edison Andrés Chicaiza Estévez*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	I
CERTIFICACIÓN .....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIV
ÍNDICE DE ANEXOS .....	XVII
RESUMEN .....	XX
ABSTRACT .....	XXXI
PRESENTACIÓN .....	XXXII
CAPÍTULO I .....	23
GENERALIDADES .....	23
1.1. INTRODUCCIÓN.....	23
1.1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	23
1.2. OBJETIVOS .....	24
1.2.1. OBJETIVO GENERAL .....	24
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	24
1.3. ALCANCE .....	24
1.4. JUSTIFICACIÓN .....	25
1.4.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA .....	25
1.4.2. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA .....	25
1.4.3. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA .....	26
CAPÍTULO II .....	26

BASES TEÓRICAS Y MUESTREO .....	26
2.1. ORIGEN DE LAS MUESTRAS.....	26
2.1.1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y UBICACIÓN.....	27
2.1.2. GEOLOGÍA DE LA ZONA .....	29
2.1.2.1. RASGOS GEOMORFOLÓGICOS DE LA REGIÓN .....	29
2.1.2.2. PRINCIPALES FORMACIONES GEOLÓGICAS DE LA ZONA.....	30
2.2. SUELOS EXPANSIVOS.....	31
2.2.1. ARCILLAS EXPANSIVAS .....	33
2.2.2. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA.....	35
2.2.3. CRITERIOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE ARCILLAS .....	42
2.2.4. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS.....	42
2.2.5. DEFINICIÓN DE LA ZONA ACTIVA, HUMEDAD DE EQUILIBRIO Y PRESIÓN DE EXPANSIÓN .....	49
CAPÍTULO III .....	52
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS .....	52
3.1. DEFINICIONES GENERALES SOBRE ESTABILIZACIÓN .....	53
3.2. ALTERNATIVAS DE ESTABILIZACIÓN .....	54
3.3. ESTABILIZACIÓN FÍSICA, MECÁNICA, QUÍMICA Y FÍSICO QUÍMICA.....	55
3.4. PUZOLANA DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ Y SU APLICACIÓN EN LA ESTABILIZACIÓN .....	58
3.5. CRITERIOS DE DOSIFICACIÓN .....	61
3.6. MÉTODOS DE APLICACIÓN.....	64
CAPÍTULO IV .....	66

TRABAJOS DE LABORATORIO .....	66
4.1. SUELO NATURAL.....	67
4.1.1. CONTENIDO DE HUMEDAD.....	67
4.1.2. DENSIDAD DE SÓLIDOS .....	68
4.1.3. GRANULOMETRIA .....	68
4.1.3.1. GRANULOMETRIA POR TAMIZADO .....	69
4.1.3.2. GRANULOMETRIA POR HIDROMETRO .....	69
4.1.4. LÍMITES DE ATTERBERG.....	71
4.1.4.1. LÍMITE LÍQUIDO .....	71
4.1.4.2. LÍMITE PLÁSTICO .....	72
4.1.4.3. ÍNDICE DE PLASTICIDAD .....	72
4.1.5. ENSAYO ÍNDICE DE EXPANSIÓN .....	73
4.1.6. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN .....	75
4.1.6.1. TIPOS DE CONSOLIDACIÓN.....	76
4.1.6.2. CURVA DE CONSOLIDACION .....	77
4.1.6.3. CURVA DE COMPRESIBILIDAD .....	78
4.1.6.4. COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN.....	79
4.1.7. COMPACTACIÓN .....	83
4.1.7.1. PROCTOR MODIFICADO .....	85
4.1.8. PERMEABILIDAD .....	87
4.1.8.1. COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD.....	87
4.1.8.2. PERMEAMETRO DE CARGA VARIABLE.....	89
4.1.9. CORTE DIRECTO.....	91
4.1.10. ANÁLISIS MINERALÓGICO DEL SUELO .....	94
4.2. DOSIFICACIONES CON CENIZA DE CASCARRILLA DE ARROZ (C.C.A) COMO AGENTE ESTABILIZANTE (10%, 20% y 30%) .....	100
4.2.1. DENSIDAD DE SÓLIDOS .....	100

4.2.2.	LÍMITES DE ATTERBERG.....	101
4.2.3.	ÍNDICE DE EXPANSIÓN .....	102
4.2.4.	ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN .....	103
4.2.5.	PERMEABILIDAD .....	104
4.2.6.	CORTE DIRECTO.....	104
CAPITULO V .....		105
ANÁLISIS DE RESULTADOS .....		105
5.1.	CLASIFICACIÓN DEL SUELO (S.U.C.S).....	105
5.2.	ACTIVIDAD DE SUELOS.....	108
5.3.	ÍNDICE DE EXPANSIÓN .....	113
5.4.	CONSOLIDACIÓN .....	118
5.5.	PERMEABILIDAD DEL SUELO .....	124
5.6.	CORTE DIRECTO.....	125
CAPÍTULO VI .....		130
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		130
6.1.	CONCLUSIONES.....	130
6.2.	RECOMENDACIONES .....	134
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		136

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b><u>Figura 2.1.</u></b> Zonificación de suelos expansivos en el mundo .....	27
<b><u>Figura 2.2.</u></b> Ubicación primera zona de muestreo M3 .....	28
<b><u>Figura 2.3.</u></b> Ubicación segunda zona de muestreo M4 .....	28
<b><u>Figura 2.4.</u></b> Ubicación tercera zona de muestreo M5 .....	29
<b><u>Figura 2.5.</u></b> Esquema de la cuenca de Manabí (Deniaud Y., 1998). .....	30
<b><u>Figura 2.6.</u></b> Expansión del suelo debido a saturación. ....	32
<b><u>Figura 2.7.</u></b> Reducción de volumen del suelo debido a la evaporación del agua .....	33
<b><u>Figura 2.8.</u></b> Cambio volumétrico de las arcillas debido a procesos de deshidratación e hidratación.....	34
<b><u>Figura 2.9.</u></b> Interacción de partículas de arcilla con el agua.....	34
<b><u>Figura 2.10.</u></b> Grano de arcilla amplificada. ....	35
<b><u>Figura 2.11.</u></b> Unidades de forma de minerales arcillosos .....	36
<b><u>Figura 2.12.</u></b> Mineral Montmorillonita .....	38
<b><u>Figura 2.13.</u></b> Mineral Caolinita .....	39
<b><u>Figura 2.14.</u></b> Mineral Illita .....	41
<b><u>Figura 2.15.</u></b> Muestras: (a) M3, (b) M4, (c) M5 .....	43
<b><u>Figura 2.16.</u></b> (a) Partículas de arcilla floculadas, (b) partículas de arcilla dispersa ...	44
<b><u>Figura 2.17.</u></b> Interacción por carga superficial entre agua y arcilla.....	45
<b><u>Figura 2.18.</u></b> Proceso de disociación y dispersión de láminas con el agua .....	46
<b><u>Figura 2.19.</u></b> Relación entre índice de plasticidad, fracción arcillosa y actividad.....	49
<b><u>Figura 2.20.</u></b> Esquema de variación del nivel freático .....	50
<b><u>Figura 2.21.</u></b> Perfiles de humedad de zona activa.....	51
<b><u>Figura 3.1.</u></b> Tipos de puzolanas y ejemplos .....	59
<b><u>Figura 4.1.</u></b> Serie de Tamices.....	69

<b><u>Figura 4.2. Ensayo Granulometría por Hidrómetro</u></b> .....	70
<b><u>Figura 4.3. Límites de Atterberg</u></b> .....	71
<b><u>Figura 4.4. Equipo para ensayo límite líquido</u></b> .....	71
<b><u>Figura 4.5. Muestra Expandida en el anillo del consolidómetro después de ser ensayada</u></b> .....	73
<b><u>Figura 4.6. Estrato de Arcilla consolidada M3</u></b> .....	76
<b><u>Figura 4.7. Consolidómetro</u></b> .....	76
<b><u>Figura 4.8. Curva de Consolidación</u></b> .....	77
<b><u>Figura 4.9. Curva de Compresibilidad</u></b> .....	78
<b><u>Figura 4.10. Método de Logaritmo del tiempo para determinar Cv</u></b> .....	81
<b><u>Figura 4.11. Método de la Raíz cuadrada del tiempo para determinar Cv</u></b> .....	82
<b><u>Figura 4.12. Molde con suelo compactado</u></b> .....	83
<b><u>Figura 4.13. Tipos de Curvas de Compactación</u></b> .....	83
<b><u>Figura 4.14. Curva de Compactación</u></b> .....	86
<b><u>Figura 4.15. Permeámetro de carga variable</u></b> .....	89
<b><u>Figura 4.16. Equipo para ensayo de corte directo</u></b> .....	91
<b><u>Figura 4.17. Diagrama de prueba del ensayo de corte directo</u></b> .....	92
<b><u>Figura 4.18. Plano de falla de una muestra después de ser ensayada</u></b> .....	92
<b><u>Figura 4.19. Envolvente de falla de corte directo</u></b> .....	94
<b><u>Figura 5.1. Ubicación de los puntos de análisis en la carta de plasticidad</u></b> .....	106
<b><u>Figura 5.2. Reducción del Índice de Plasticidad de las muestras M3, M4 y M5</u></b> .....	107
<b><u>Figura 5.3. Variación de actividad de la muestra M3</u></b> .....	109
<b><u>Figura 5.4. Variación de actividad de la muestra M4</u></b> .....	111
<b><u>Figura 5.5. Variación de actividad de la muestra M5</u></b> .....	112
<b><u>Figura 5.6. Reducción de la actividad de las muestras M3, M4 y M5</u></b> .....	113

<b><u>Figura 5.7.</u></b> Variación del índice de expansión de la muestra M3 .....	114
<b><u>Figura 5.8.</u></b> Tendencia de reducción del índice de expansión con el aumento de % C.C.A., muestra M3.....	114
<b><u>Figura 5.9.</u></b> Variación del índice de expansión de la muestra M4 .....	115
<b><u>Figura 5.10.</u></b> Tendencia de reducción del índice de expansión con el aumento de % C.C.A., muestra M4.....	115
<b><u>Figura 5.11.</u></b> Variación del índice de expansión de la muestra M5 .....	116
<b><u>Figura 5.12.</u></b> Tendencia de reducción del índice de expansión con el aumento de % C.C.A, muestra M5.....	116
<b><u>Figura 5.13.</u></b> Variación del Índice de Expansión de las muestras dosificadas .....	117
<b><u>Figura 5.14.</u></b> Grafica e-log $\sigma'$ .....	119
<b><u>Figura 5.15.</u></b> Gráfica para obtención de Cs.....	121
<b><u>Figura 5.16.</u></b> Variación del coeficiente de abultamiento de la M3.....	121
<b><u>Figura 5.17.</u></b> Variación del coeficiente de abultamiento de la M4.....	122
<b><u>Figura 5.18.</u></b> Variación del coeficiente de abultamiento de la M4.....	122
<b><u>Figura 5.19.</u></b> Variación del Coeficiente de Abultamiento (Cs) de las Muestras M3, M4 y M5 .....	123
<b><u>Figura 5.20.</u></b> Variación del ángulo de fricción de la muestra M3.....	126
<b><u>Figura 5.21.</u></b> Variación del ángulo de fricción de la muestra M4 .....	127
<b><u>Figura 5.22.</u></b> Variación del ángulo de fricción de la muestra M5 .....	128
<b><u>Figura 5.23.</u></b> Variación del ángulo de las Muestras M3, M4 y M5 .....	129

## ÍNDICE DE TABLAS

<b><u>Tabla 2.1.</u></b> Denominación y ubicación de las muestras .....	29
<b><u>Tabla 2.2.</u></b> Clasificación de los minerales arcillosos .....	37
<b><u>Tabla 2.3.</u></b> Propiedades del mineral Montmorillonita .....	38
<b><u>Tabla 2.4.</u></b> Propiedades del mineral Caolinita.....	40
<b><u>Tabla 2.5.</u></b> Propiedades del mineral Illita .....	41
<b><u>Tabla 2.6.</u></b> Características de las arcillas .....	42
<b><u>Tabla 2.7.</u></b> Dimensiones y superficie específica de ciertos minerales de arcilla .....	44
<b><u>Tabla 2.8.</u></b> Grado de Plasticidad del Suelo.....	48
<b><u>Tabla 2.9.</u></b> Actividad de Arcillas .....	49
<b><u>Tabla 2.10.</u></b> Potencial expansivo de los suelos .....	52
<b><u>Tabla 4.1.</u></b> Contenido de Humedad de muestras naturales.....	67
<b><u>Tabla 4.2.</u></b> Densidad de sólidos M3, M4 y M5 en estado natural.....	68
<b><u>Tabla 4.3.</u></b> Porcentaje de Arcilla de muestras naturales .....	70
<b><u>Tabla 4.4.</u></b> Límites de Atterberg.....	72
<b><u>Tabla 4.5.</u></b> Clasificación del Potencial de Expansión.....	73
<b><u>Tabla 4.6.</u></b> Índice de Expansión de muestras naturales inalteradas .....	75
<b><u>Tabla 4.7.</u></b> Datos de Consolidación de muestras naturales inalteradas .....	82
<b><u>Tabla 4.8.</u></b> Datos de Compactación de muestras naturales .....	87
<b><u>Tabla 4.9.</u></b> Valores de K para diferentes tipos de suelo.....	87
<b><u>Tabla 4.10.</u></b> Valores de viscosidades dinámicas del agua.....	88
<b><u>Tabla 4.11.</u></b> Datos de Permeabilidad de muestras naturales inalteradas .....	90
<b><u>Tabla 4.12.</u></b> Datos de Corte Directo de muestras naturales inalteradas.....	94
<b><u>Tabla 4.13.</u></b> Resultados del análisis mineralógico utilizando Difracción de Rayos X.....	96

<b><u>Tabla 4.14. Análisis del potencial expansivo según los resultados de difracción de rayos X</u></b> .....	97
<b><u>Tabla 4.15. Resultados de cantidades de elementos químicos encontrados en las muestras, utilizando análisis de fluorescencia de rayos X</u></b> .....	98
<b><u>Tabla 4.16. Resultados de cantidades de óxidos encontrados en las muestras, utilizando análisis de fluorescencia de rayos X</u></b> .....	98
<b><u>Tabla 4.17. Densidad de Sólidos de muestras dosificadas</u></b> .....	100
<b><u>Tabla 4.18. Límites de Atterberg de las muestras dosificadas</u></b> .....	101
<b><u>Tabla 4.19. Índice y Potencial de Expansión de muestras dosificadas</u></b> .....	102
<b><u>Tabla 4.20. Datos de Consolidación de las muestras dosificadas</u></b> .....	103
<b><u>Tabla 4.21. Coeficiente de Permeabilidad de muestras dosificadas</u></b> .....	104
<b><u>Tabla 4.22. Cohesión y Ángulo de fricción de las muestras dosificadas</u></b> .....	104
<b><u>Tabla 5.1. Clasificación S.U.C.S. de las muestras a diferentes porcentajes</u></b> .....	106
<b><u>Tabla 5.2. Tabla de referencia del potencial de expansión según la actividad</u></b> .....	108
<b><u>Tabla 5.3. Actividad, porcentaje de reducción, asignación de clasificación y potencial de expansión de la muestra M3</u></b> .....	109
<b><u>Tabla 5.4. Actividad, porcentaje de reducción, asignación de clasificación y potencial de expansión de la muestra M4</u></b> .....	110
<b><u>Tabla 5.5. Actividad, porcentaje de reducción, asignación de clasificación y potencial de expansión de la muestra M5</u></b> .....	111
<b><u>Tabla 5.6. Potencial de expansión de la muestra M3</u></b> .....	113
<b><u>Tabla 5.7. Tendencia de reducción del índice de expansión, muestra M3</u></b> .....	114
<b><u>Tabla 5.8. Potencial de expansión de la muestra M4</u></b> .....	115
<b><u>Tabla 5.9. Tendencia de reducción del índice de expansión, muestra M4</u></b> .....	116
<b><u>Tabla 5.10. Potencial de expansión de la muestra M5</u></b> .....	116
<b><u>Tabla 5.11. Tendencia de reducción del índice de expansión, muestra M5</u></b> .....	117

<b><u>Tabla 5.12.</u></b> Variación de relación de vacíos, presión de preconsolidación, coeficientes de compresibilidad (Cc) y abultamiento (Cs) M3 .....	121
<b><u>Tabla 5.13.</u></b> Variación de relación de vacíos, presión de preconsolidación, coeficientes de compresibilidad (Cc) y abultamiento (Cs) M4 .....	122
<b><u>Tabla 5.14.</u></b> Variación de relación de vacíos, presión de preconsolidación, coeficientes de compresibilidad (Cc) y abultamiento (Cs) M5 .....	122
<b><u>Tabla 5.15.</u></b> Coeficiente de permeabilidad de muestras naturales y remodeladas.....	124
<b><u>Tabla 5.16.</u></b> Ángulo de Fricción y Cohesión de la muestra natural y dosificada, M3 .....	126
<b><u>Tabla 5.17.</u></b> Ángulo de Fricción y Cohesión de la muestra natural y dosificada, M4 .....	127
<b><u>Tabla 5.18.</u></b> Ángulo de Fricción y Cohesión de la muestra natural y dosificada, M5 .....	128

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO N° 1 .....	¡Error! Marcador no definido.
ENSAYOS DE LABORATORIO.....	¡Error! Marcador no definido.
1.1. ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)¡Error!	<b>Marcador no definido.</b>
1.1.2. MUESTRAS DOSIFICADAS CON CCA (10,20 y 30%).....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.1.2.1.MUESTRA N°3.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.1.2.2. MUESTRA N°4.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.1.2.3. MUESTRA N°5.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.2. GRANULOMETRÍA.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.2.1. MUESTRAS PATRÓN.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.2.1.1. MUESTRA 3 .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.2.1.2.MUESTRA 4 .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.2.1.3.MUESTRA 5 .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.2.2. MUESTRAS DOSIFICADAS (10, 20 y 30%)¡Error!	<b>Marcador no definido.</b>
1.2.2.1. MUESTRA 3 .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.2.2.2. MUESTRA 4 .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.2.2.3. MUESTRA 5 .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.3. ÍNDICE DE EXPANSIÓN.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.3.1. MUESTRAS PATRÓN.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.3.1.1.MUESTRA 3 .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.3.1.2. MUESTRA 4 .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.3.1.3. MUESTRA 5 .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.3.2. MUESTRAS DOSIFICADAS (10, 20 y 30%)¡Error!	<b>Marcador no definido.</b>

- 1.3.2.1. MUESTRA 3..... ¡Error! Marcador no definido.
- 1.3.2.2. MUESTRA 4 ..... ¡Error! Marcador no definido.
- 1.3.2.3. MUESTRA 5 ..... ¡Error! Marcador no definido.
- 1.4. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN ..... ¡Error! Marcador no definido.
  - 1.4.1. MUESTRAS PATRÓN..... ¡Error! Marcador no definido.
    - 1.4.1.1. MUESTRA 3 ..... ¡Error! Marcador no definido.
    - 1.4.1.2. MUESTRA 4 ..... ¡Error! Marcador no definido.
    - 1.4.1.3. MUESTRA 5 ..... ¡Error! Marcador no definido.
  - 1.4.2. MUESTRAS DOSIFICADAS (10, 20 y 30%)¡Error! Marcador no definido.
    - 1.4.2.1. MUESTRA 3 ..... ¡Error! Marcador no definido.
    - 1.4.2.2. MUESTRA 4 ..... ¡Error! Marcador no definido.
    - 1.4.2.3. MUESTRA 5 ..... ¡Error! Marcador no definido.
- 1.5. COMPACTACIÓN-PROCTOR MODIFICADO¡Error! Marcador no definido.
  - 1.5.1. MUESTRA 3..... ¡Error! Marcador no definido.
  - 1.5.2. MUESTRA 4..... ¡Error! Marcador no definido.
  - 1.5.3. MUESTRA 5..... ¡Error! Marcador no definido.
- 1.6. PERMEABILIDAD ..... ¡Error! Marcador no definido.
  - 1.6.1. MUESTRAS PATRÓN..... ¡Error! Marcador no definido.
    - 1.6.1.1. MUESTRA 3 ..... ¡Error! Marcador no definido.
    - 1.6.1.2. MUESTRA 4 ..... ¡Error! Marcador no definido.
    - 1.6.1.3. MUESTRA 5 ..... ¡Error! Marcador no definido.
  - 1.6.2. MUESTRAS DOSIFICADAS (10, 20 y 30%)¡Error! Marcador no definido.
    - 1.6.2.1. MUESTRA 3 ..... ¡Error! Marcador no definido.
    - 1.6.2.2. MUESTRA 4 ..... ¡Error! Marcador no definido.

1.6.2.3. MUESTRA 5 .....	¡Error! Marcador no definido.
1.7. CORTE DIRECTO .....	¡Error! Marcador no definido.
1.7.1. MUESTRAS PATRÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
1.7.1.1. MUESTRA 3 .....	¡Error! Marcador no definido.
1.7.1.2. MUESTRA 4 .....	¡Error! Marcador no definido.
1.7.1.3. MUESTRA 5 .....	¡Error! Marcador no definido.
1.7.2. MUESTRAS DOSIFICADAS (10, 20 y 30%)	¡Error! Marcador no definido.
1.7.2.1. MUESTRA 3 .....	¡Error! Marcador no definido.
1.7.2.2. MUESTRA 4 .....	¡Error! Marcador no definido.
1.7.2.3. MUESTRA 5 .....	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO Nº 2 .....	¡Error! Marcador no definido.
MINERALOGÍA DEL SUELO.....	¡Error! Marcador no definido.
2.1. ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X	¡Error! Marcador no definido.
2.2. ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO Nº 3.....	¡Error! Marcador no definido.
HOJA GEOLÓGICA DE CHONE.....	¡Error! Marcador no definido.
3.1. MAPA GEOLÓGICO .....	401
3.2. TEXTO MAPA GEOLÓGICO .....	¡Error! Marcador no definido.

## RESUMEN

El presente proyecto se enfoca en la investigación del comportamiento físico y mecánico del suelo de la provincia de Manabí, clasificado como arcilla de alta plasticidad (CH) y con un alto potencial de expansión.

Se tomaron muestras de suelo tanto alteradas como inalteradas (para ser ensayadas) de los sectores Rocafuerte y Tosagua de la provincia de Manabí.

Los ensayos pertinentes se realizaron en las muestras patrón según las normas ASTM (American Society for Testing and Materials), para la obtención de los datos iniciales y comprobar su modificación mediante la adición de un agente estabilizante. Además de un análisis mineralógico para comprobar la presencia de minerales expansivos dentro del suelo estudiado.

El agente estabilizante que se usó para las mezclas con diferentes dosificaciones en peso es puzolana de ceniza de cascarilla de arroz, obtenida mediante un proceso de combustión a una temperatura controlada menor a 700°C durante una hora y tamizada por el tamiz No.200. El proceso de dosificación para las mezclas se realizó considerando diferentes porcentajes en peso (10, 20 y 30%) de puzolana, con lo que posteriormente se analizó el comportamiento del suelo dando como resultado el control de la expansión y la presentación de una nueva alternativa de estabilización para suelos con similares características a las estudiadas en este proyecto.

## ABSTRACT

The present project focuses on the investigation of the physical and mechanical behavior of the soil of the province of Manabí, classified as high plasticity clay (CH) and with a high expansion potential.

Altered and unaltered soil samples were taken to be tested in the Rocafuerte and Tosagua sectors of the province of Manabí.

The pertinent tests were carried out on patten samples according to the ASTM (American Society for Testing and Materials) standards, in order to obtain the initial data and check their modification by adding a stabilizing agent. In addition to a mineralogical analysis to check the presence of expansive minerals in the soil studied.

The stabilizing agent that was used for the mixtures with different dosages by weight is pozzolana of rice husk ash, obtained by a combustion process at a controlled temperature of less than 700 ° C for one hour and sieved by the sieve No. 200. The dosage process for the mixtures was carried out considering different percentages by weight (10, 20 and 30%) of pozzolan, later the behavior of the soil was analyzed, presenting as a result the control of the expansion and the presentation of a new alternative of stabilization for soils with similar characteristics to those studied in this project.

## PRESENTACIÓN

El presente proyecto de investigación se encuentra conformado por seis capítulos en los cuales se realiza un análisis técnico experimental sobre la estabilización de arcillas expansivas de la provincia de Manabí.

En el capítulo 1 “GENERALIDADES”, se presentan: Introducción, Planteamiento del problema, Objetivos, Alcance y Justificación.

En el capítulo 2 “BASES TEÓRICAS Y MUESTREO”, se presentan: origen de las muestras, la situación geográfica y ubicación de la zona de donde fueron extraídas, datos geológicos y geomorfológicos, y se define las bases teóricas y caracterización de las arcillas expansivas.

En el capítulo 3 “ESTABILIZACIÓN DE SUELOS”, se presentan: Definiciones generales sobre estabilización, alternativas de estabilización, estabilización con puzolana de ceniza de cascarilla de arroz, criterios de dosificación y métodos de aplicación.

En el capítulo 4 “TRABAJOS DE LABORATORIO”, se presentan: los ensayos, las normas utilizadas y los procedimientos realizados en laboratorio tanto para las muestras de suelo natural como para las muestras remodeladas con la dosificación especificada de puzolana de ceniza de cascarilla de arroz.

En el capítulo 5 “ANÁLISIS DE RESULTADOS”, se presentan: los resultados de todos los ensayos realizados con sus respectivos análisis y comparaciones.

En el capítulo 6 “CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES”, se presentan: conclusiones y recomendaciones pertinentes que pueden ser adoptadas en aplicaciones futuras.

# **CAPÍTULO I**

## **GENERALIDADES**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Al representar el suelo una base fundamental para la implantación de las obras civiles se hace necesario un estudio previo que permita conocer sus propiedades y posteriormente determinar la factibilidad de construcción sobre éste.

En el Ecuador existe una diversidad de tipos de suelos con diferentes características y comportamientos que varían dependiendo de la zona donde se hallen. De acuerdo a esto y a estudios preliminares se ha encontrado que en la provincia de Manabí gran parte de su suelo se halla la presencia de arcillas expansivas que causan afectaciones relacionadas con el sector de la construcción debido a su susceptibilidad a cambios volumétricos producidos por variaciones en el contenido de humedad.

Éstas, denominadas arcillas expansivas, se contraen al secarse y se expanden con el incremento de humedad, además son capaces de producir grandes asentamientos diferenciales que afectan directamente a las cimentaciones si éstas no fueron diseñadas para soportar la presión ejercida por las arcillas cuando se producen los cambios de volumen; una de las principales consecuencias ocasionadas por dichos cambios es, la presencia de daños considerables en estructuras si no se realiza el debido reemplazo de suelo o a su vez, una estabilización con la que se evite tener deformaciones que afecten a la estructura y que al mismo tiempo proporcione al suelo un comportamiento mecánico acorde a las sollicitaciones de carga a ser soportadas (Sireesh Saride M. ASCE and Troyee Tanu Dutta, 2016).

De acuerdo a estos antecedentes y con el actual crecimiento poblacional se hace necesario la búsqueda e investigación de nuevas tecnologías y métodos

que puedan ser implementados en el área de la construcción y que representen soluciones factibles directamente relacionadas con un problema, para el presente caso, la presencia de arcillas expansivas en la provincia de Manabí.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Estudiar el proceso de estabilización de arcillas expansivas con puzolana extraída de la ceniza de cascarilla de arroz, para controlar la excesiva presión de expansión y expansión libre que se produce con el incremento de humedad.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar el comportamiento físico mecánico y analizar las propiedades de consolidación y permeabilidad de las arcillas expansivas estabilizadas con la puzolana extraída de ceniza de cascarilla de arroz, en varios porcentajes en peso.
- Hallar una correlación entre la mineralogía y la presión de expansión de las arcillas expansivas estabilizadas con puzolana de ceniza de cascarilla de arroz.

### **ALCANCE**

Con el propósito de reducir la presión de expansión de las arcillas expansivas, éste proyecto determinará las características físico-mecánicas de las muestras tomadas en la provincia de Manabí, así como el cambio de propiedades producidas con la adición de material puzolánico.

Además se pretende proporcionar un método de estabilización que utilizará un porcentaje específico de material puzolánico extraído de la ceniza de cascarilla de arroz, que pueda ser reproducido en especímenes de suelo de similares características de densidad, humedad y rangos de presión de expansión.

Al mismo tiempo se proyecta dejar un preámbulo investigativo presentando datos experimentales acerca de este método de estabilización para suelos

expansivos que puedan ser utilizados como referencia para posteriores investigaciones tomando en cuenta las conclusiones y recomendaciones presentadas en el presente proyecto de titulación.

## **JUSTIFICACIÓN**

### **JUSTIFICACIÓN TEÓRICA**

Este proyecto de investigación enfocado en las arcillas expansivas encontradas en determinados sectores de la provincia de Manabí se realiza con el propósito de aportar al conocimiento actual existente, donde simplifícadamente se conoce que éstas arcillas al entrar en contacto con el agua generan una presión de expansión que conlleva a tener cambios volumétricos, los cuales, podrían ser considerados como importantes factores causantes de daños en las estructuras cimentadas sobre éste tipo de arcillas (Thomas Rukenya Karatai, James Wambua Kaluli, Charles Kabubo and George Thiong'o, 2017).

El presente estudio plantea proponer una nueva alternativa para poder estabilizar a las arcillas expansivas presentando resultados que evidencien el control y la reducción de los cambios de volumen, teniendo como efecto una mayor estabilidad del suelo, cumplir con las sollicitaciones de carga de las estructuras y mitigar pérdidas económicas.

### **JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA**

El trabajo plantea un método que mezcla cada una de las muestras con una dosificación porcentual en peso de un material puzolánico (extraído de la ceniza de cascarilla de arroz) que actúa como un agente que mejora las propiedades físico-mecánicas y que permitan la estabilización de arcillas expansivas, limitando o reduciendo la expansión cuando varía su contenido de humedad. Con esto se puede lograr obtener una relación aproximada de la cantidad porcentual que podría ser usada para estabilizar suelos con rangos de presión de expansión similares a las estudiadas en esta investigación.

## **JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA**

En el Ecuador los diferentes tipos de proyectos estructurales presentan una interacción con variados tipos de suelos presentes en el territorio; las interacciones existentes relacionadas con arcillas expansivas podrían ser causantes de daños considerables en los elementos estructurales debido a los efectos que se producen ante variaciones de humedad.

La elaboración y aplicación de ésta investigación, se direcciona a obtener resultados que puedan ser utilizados como una posible solución en cuanto a mejoramiento y estabilización de las arcillas expansivas; se prevé tener un control aproximado de la expansión de las mismas para atenuar los daños que pueden presentarse en las interacciones suelo-estructura.

## **CAPÍTULO II**

### **BASES TEÓRICAS Y MUESTREO**

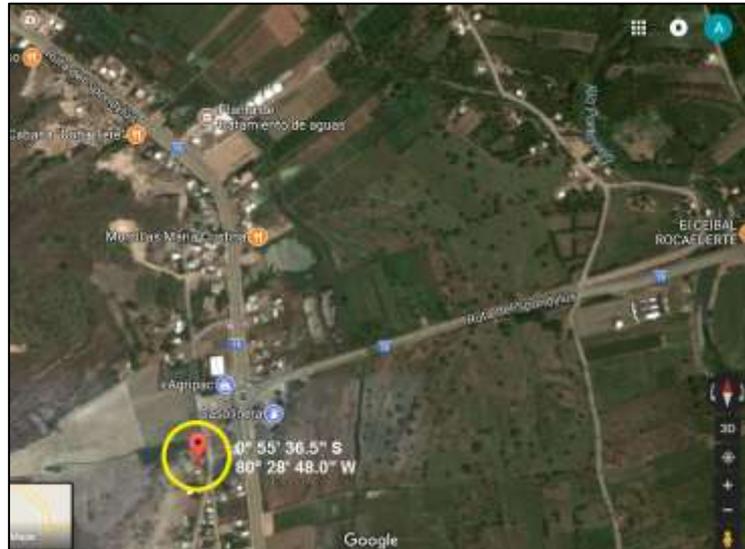
#### **ORIGEN DE LAS MUESTRAS**

A nivel global, en los diferentes continentes los suelos potencialmente expansivos están confinados en regiones con características semiáridas de



Portoviejo, a una altitud de 29 m.s.n.m. cuyas coordenadas son: Latitud:  $0^{\circ}55'36.5''$  S y Longitud:  $80^{\circ}28'48.0''$  W (Figura 2.2.).

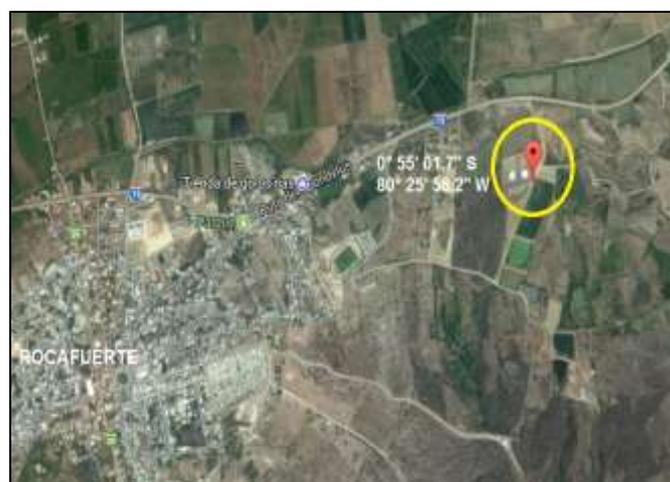
**Figura 2.2.** Ubicación primera zona de muestreo M3



Fuente: <https://www.google.com.ec/maps/place/0%C2%B055'36.5%22S+80%C2%B028'48.0%22W/@-0.9235089,-80.4801314,1141m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x0:0x0!8m2!3d-0.9268!4d-80.48?hl=es-419>

La segunda zona de muestreo (muestra M4) fue tomada del sector Rocafuerte sobre la Ruta del Spondylus, ubicada al nororiente de la ciudad de Portoviejo, a una altitud de 23 m.s.n.m. cuyas coordenadas son: Latitud:  $0^{\circ}55'01.7''$  S y Longitud:  $80^{\circ}25'56.2''$  W (Figura 2.3.).

**Figura 2.3.** Ubicación segunda zona de muestreo M4



Fuente: <https://www.google.com.ec/maps/place/0%C2%B055'01.7%22S+80%C2%B025'56.2%22W/@-0.9205553,-80.4469354,2603m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x0:0x0!8m2!3d-0.91715!4d-80.4322667?hl=es-419>

La tercera zona de muestreo (muestra M5) fue tomada del sector Tosagua sobre la vía Nuevo Paso Lateral Km 48, ubicada al nororiente de la ciudad de Portoviejo, a una altitud de 19 m.s.n.m. cuyas coordenadas son: Latitud: 0°47'45.1" S y Longitud: 80°15'01.7" W (Figura 2.4.).

**Figura 2.4.** Ubicación tercera zona de muestreo M5



Fuente: <https://www.google.com.ec/maps/place/0%C2%B047'45.1%22S+80%C2%B015'01.7%22W/@-0.7929744,-80.2479391,1521m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x0:0x0!8m2!3d-0.7958667!4d-80.2504667?hl=es-419>

**Tabla 2.1.** Denominación y ubicación de las muestras

Muestra	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud
Primera	M3	0°55'36.5" S	80°28'48.0" W	29 m.s.n.m.
Segunda	M4	0°55'01.7" S	80°25'56.2" W	23 m.s.n.m.
Tercera	M5	0°47'45.1" S	80°15'01.7" W	19 m.s.n.m.

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

## GEOLOGÍA DE LA ZONA

### 1.1.1.1. RASGOS GEOMORFOLÓGICOS DE LA REGIÓN

La cuenca de Manabí (Figura 2.5.) se halla conformada de sedimentos del periodo terciario cuaternario. Los ríos de esta zona presentan una dirección

predominante desde el Noreste hacia el Suroeste, las pendientes más pronunciadas se encuentran en las formaciones conocidas como Tosagua y Dos Bocas, las cuales hacen notoria la diferencia de la topografía del sector con formaciones cuaternarias que son productos aluviales, así también, la formación de terrenos planos vulnerables a inundaciones, ríos secos y lagos intermitentes (Sánchez, 2014).

Está limitada al noroeste por la cordillera Jama Coaque, al sur por la cordillera de Chongón Colonche y al este por la cordillera occidental (Hernández, 2012).

**Figura 2.5.** Esquema de la cuenca de Manabí.



Fuente: (Hernández, 2012)

### **1.1.1.2. PRINCIPALES FORMACIONES GEOLÓGICAS DE LA ZONA**

La topografía del sector varía entre 0 y 520 m.s.n.m. y se encuentra cubierta por una vegetación tropical de tipo semidesértico; se presentan dos estaciones durante el año tropical y húmedo (Hoja Geológica N° 12, Chone, 1979, pág. 1), (Anexo 3; 3.1., 3.2.; Pág. 401-402).

El área de estudio pertenece a la parte central de la cuenca de Manabí y se encuentra principalmente conformado por la formación Tosagua, en la cual se puede encontrar que aparecen las formaciones correspondientes a la época del Mioceno y Oligoceno, donde existe una predominancia de acillas color café

oscuro mezclado con partículas blanquecinas similares al yeso (Sánchez, 2014).

La formación Tosagua ubicada en la cuenca de Manabí se encuentra conformada por tres miembros: Zapotal, Dos Bocas y Villingota.

- Miembro Zapotal: “Está expuesto alrededor de las márgenes de la cuenca Progreso, el Miembro Zapotal consiste de conglomerados basales, areniscas y lutitas sobrepasando los 1000 metros de espesor” (Hoja Geológica N° 12, Chone, 1979, pág. 1), (Anexo 3; 3.1., 3.2.; Pág. 401-402).
- Miembro Dos Bocas: “El miembro inferior Dos Bocas, yace en discordancia sobre la Formación San Mateo; consiste de lutitas macizas y estratificadas con estratos centimétricos de color café chocolate, con intercalaciones de limonitas y areniscas. Abundante cantidad de yeso se encuentra rellenando las fracturas y es notable la presencia de concreciones dolomíticas y de porcelanita. La potencia parcial observada en el pozo Tosagua N° 1 es 990 m” (Hoja Geológica N° 12, Chone, 1979, pág. 1), (Anexo 3; 3.1., 3.2.; Pág. 401-402).
- Miembro Villingota: “Se encuentra yaciendo sobre el Miembro Dos Bocas en forma progresiva y se presenta en forma de lutitas tobaceas gris blancas a café en estratos delgados con intercalaciones de areniscas amarillas de grano medio. Las lutitas son frecuentemente fosfatadas, presentan restos de peces. Su potencia varía entre 0 y 800 m” (Hoja Geológica N° 12, Chone, 1979, pág. 1), (Anexo 3; 3.1., 3.2.; Pág. 401-402).

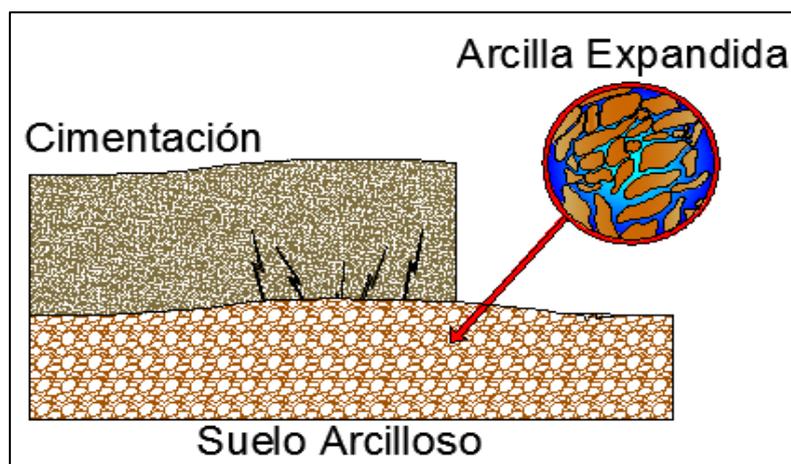
## **SUELOS EXPANSIVOS**

Los suelos están constituidos por cuatro principales componentes que son: agua, aire, materia orgánica y mineral. Las partes mineral y orgánica de los suelos generalmente están constituidos por pequeñas partes de roca y minerales de diferentes clases, entre estas clases las partículas inorgánicas

más importantes son: grava, arena, limo y arcilla (Cristian Marcelo Guncay, Guido Fernando Morocho, 2005).

Los suelos expansivos son aquellos susceptibles a los cambios de volumen debido a las fluctuaciones en el contenido de humedad ocurridas en el interior de su estructura y se caracterizan por estar conformados de materiales finos sedimentarios heterogéneos; dentro de nuestro entorno las variaciones climáticas generan temporadas húmedas en las cuales, de forma natural todos los tipos de suelo absorben agua en diferentes porcentajes dependiendo tanto de su composición, mineralogía, granulometría, etc. Al ser analizados los suelos expansivos se ha llegado a determinar que, con la acción del agua, éstos se hinchan volviéndose suaves (Figura 2.6.) y reduciendo su capacidad de resistencia; contrariamente, cuando las variaciones climáticas producen temporadas secas estos suelos reducen su volumen debido a la evaporación del agua natural que puede contener su estructura (Figura 2.7.).

**Figura 2.6.** Expansión del suelo debido a saturación.



Fuente: (López, 2015).

Pero no solo las variaciones climáticas pueden afectar el cambio de contenido de humedad, estas fluctuaciones internas pueden ser tanto de origen natural (cambios climáticos) o a su vez artificial (intervención humana); descartando enfatizar la razón u origen por el cual se produzca el cambio de contenido de humedad, dichos cambios producen modificaciones significativas en la capacidad portante (como en las propiedades fundamentales de resistencia y deformabilidad). Por tanto, es de suma importancia comprender el comportamiento geotécnico de los suelos naturales para lograr predecir, prevenir y minimizar los daños producidos por la inestabilidad de los mismos, tanto en procesos de erosión, asentamientos e inestabilidad de taludes.

**Figura 2.7.** Reducción de volumen del suelo debido a la evaporación del agua



Fuente: (Sánchez, 2014)

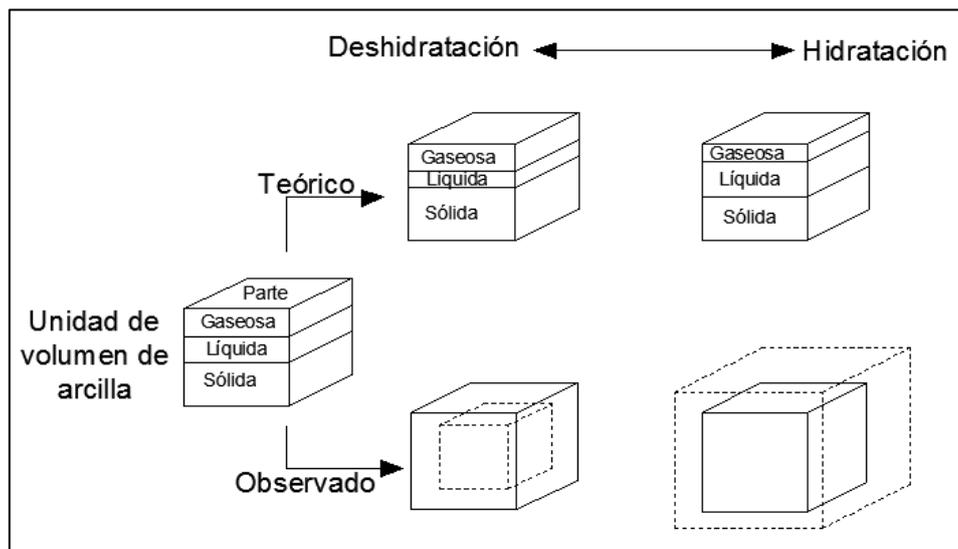
## **ARCILLAS EXPANSIVAS**

Técnicamente a las arcillas se las define como cualquier tipo de sedimento o depósito mineral compuestas principalmente de silicato de aluminio hidratado; plásticas cuando se humedecen y conformadas de un material granuloso muy fino que las hace frágiles en seco y con alta capacidad de absorción (Cristian Marcelo Guncay, Guido Fernando Morocho, 2005).

Las arcillas expansivas desde un análisis estructurado se pueden definir como aquellas que están conformadas por partículas de un tamaño menor a  $2\mu$  (0.002 mm, correspondiente a un material heterogéneo), que experimentan procesos de expansión y contracción no uniformes que dan lugar a cambios volumétricos dependientes de la cantidad de agua contenida en los poros del

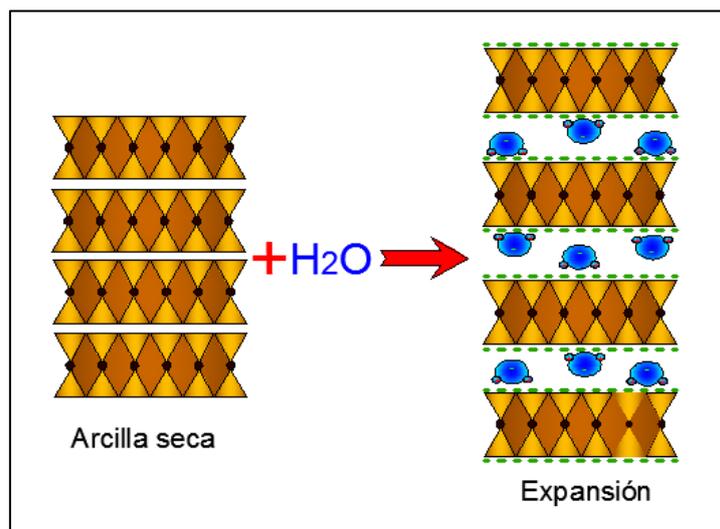
suelo (Figura 2.8.), (Sánchez, 2014). Un prefacio de este fenómeno es que, se produce debido a que las partículas de arcilla tienen carga eléctrica negativa en su superficie que atraen a los cationes de las moléculas dipolares del agua (Figura 2.9.).

**Figura 2.8.** Cambio volumétrico de las arcillas debido a procesos de deshidratación e hidratación.



Fuente: (Cristian Marcelo Guncay, Guido Fernando Morocho, 2005)

**Figura 2.9.** Interacción de partículas de arcilla con el agua



Fuente: <https://es.slideshare.net/edafoIPA/minerales-arcilla>

Las arcillas expansivas generalmente se caracterizan por su deformación excesiva, colapso, baja resistencia al corte, baja capacidad de carga y alto potencial de hinchamiento, factores que afectan directamente al rendimiento de resistencia del suelo como un material constructivo.

Por otro lado, independientemente del lugar donde se encuentren son capaces de generar profundas grietas caracterizadas con una textura de arena seca que las hace susceptibles a la erosión en temporadas secas, mientras que, cuando llegan temporadas húmedas se presentan procesos de expansión drástica caracterizada con texturas blandas, pegajosas y resbaladizas.

## **CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA**

La caracterización mineralógica se encuentra definida por los tipos de minerales contenidos dentro de un material. Un mineral está definido como una sustancia natural e inorgánica, cuya estructura interna es determinada por un cierto arreglo específico de sus átomos e iones, además de que, su composición química y sus propiedades físicas pueden ser fijas o pueden variar dentro de límites especificados. (Paul Garnica, Alfonso Pérez, Antonio Gómez, Yhaaraby Obil, 2002)

Los variados tipos de suelos expansivos que se conocen actualmente se encuentran definidos de acuerdo al tipo de arcilla y del mineral que contienen en su estructura como también del volumen total del suelo (Figura 2.10.).

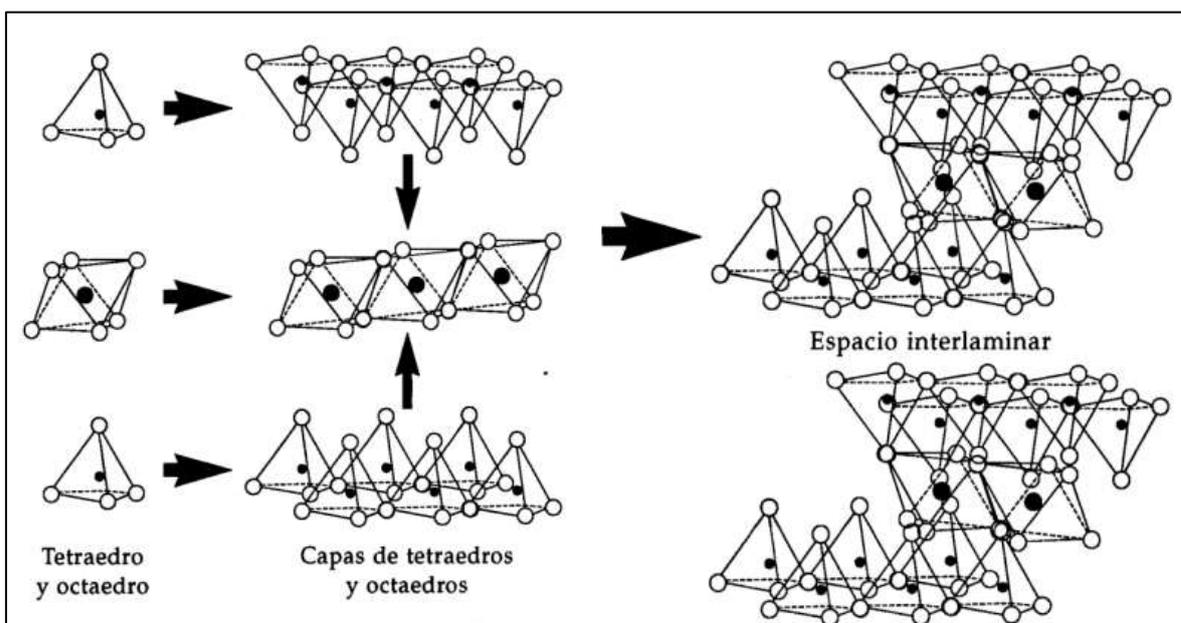
**Figura 2.10.** Grano de arcilla amplificada.



Fuente: [http://www.cubaeduca.cu/media/www.cubaeduca.cu/medias/cienciatodos/Libros\\_3/ciencia3/109/htm/sec\\_6.htm](http://www.cubaeduca.cu/media/www.cubaeduca.cu/medias/cienciatodos/Libros_3/ciencia3/109/htm/sec_6.htm)

La mineralogía de la arcilla es el principal factor que contribuye a fuerzas físico-químicas de atracción que influyen en el comportamiento de expansión del suelo, la gran mayoría de los minerales que constituyen las arcillas expansivas poseen estructuras químicas con forma laminar, cuya combinación llega a conformar diferentes minerales arcillosos, entre los más comunes la caolinita, montmorillonita, illita, que tienen unidades de forma como el tetraedro, octaedro (Figura 2.11.); poseen diferentes propiedades químicas, físicas y mecánicas, además presentan la capacidad de retener agua que queda absorbida mediante enlaces electrostáticos (Cristian Marcelo Guncay, Guido Fernando Morocho, 2005).

**Figura 2.11.** Unidades de forma de minerales arcillosos



Fuente: (Arturo Méndez Salas, Víctor Pineda Núñez, 2011)

Los minerales arcillosos se pueden dividir en las siguientes familias o grupos de acuerdo a su distribución estructural interna:

- Filosilicatos Bilaminares: se denominan así ya que están formados por dos capas, una tetraédrica de silicio y otra octaédrica de aluminio o magnesio, cuya representación es 1:1 ó T:0 (I. Bernal, H. Cabezas, C. Espitia, J. Mojica y J. quintero, 2003).
- Filosilicatos Trilaminares: se denominan así porque cada lámina se encuentra formada por dos capas de tetraedros de sílice que cubren una capa de octaedros de alumina o magnesia, cuya representación es 2:1 ó T:0:T (I. Bernal, H. Cabezas, C. Espitia, J. Mojica y J. quintero, 2003)

Las micelas (conformados por filosilicatos de Al, Fe, Mg, u otros iones metálicos) que son parte de los suelos esmectíticos (expansivos) (Tabla 2.2.) son partículas microscópicas con geometría similar a las piezas de madera de parquet, organizadas desordenadamente y que entran en contacto de forma filo-filo, cara-cara y filo-cara.

Resumiendo, las arcillas expandibles, presentan estructuras que las hacen susceptibles a que el agua penetre entre las láminas tetraédricas y octaédricas mediante enlaces de hidrógeno, lo cual genera una expansión de la celda cristalográfica y explica su alto índice de plasticidad (I. Bernal, H. Cabezas, C. Espitia, J. Mojica y J. quintero, 2003).

**Tabla 2.2.** Clasificación de los minerales arcillosos

Tipo	Diocdaédricos	
T:0 (Filosilicatos Bilaminares)	KANDITAS	Caolinita Nacrita Dickita  Haloisita Illita Moscovita Paragonita Pirofilita
T:0:T (Filosilicatos Trilaminares)	ESMECTITAS (Expandibles)	Montmorillonita Beidelita Nontronita  Vermiculita
	ATAPULGITAS (Fibroso)	Paligorskita

Fuente: (I. Bernal, H. Cabezas, C. Espitia, J. Mojica y J. quintero, 2003)

## Montmorillonita

La Montmorillonita (Figura 2.12.) es un mineral común perteneciente a las arcillas, posee espacios entre láminas que pueden absorber agua desencadenando la expansión del suelo, la cual, se puede considerar como causante de problemas relacionados a obras civiles.

Un alto porcentaje de montmorillonita presente en las arcillas, conlleva a que éste, sea considerado como un factor indicador que incentiva la búsqueda de soluciones para mitigar posibles fallas estructurales en obras proyectadas o construidas sobre arcillas usualmente expansivas.

**Figura 2.12.** Mineral Montmorillonita



Fuente: (Laibana, 2012).

**Tabla 2.3.** Propiedades del mineral Montmorillonita

Ítem	Descripción
Fórmula Química:	$(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Cristalografía:	Monoclínico
Clase:	Prismático
Propiedades Ópticas:	Biáxico negativo
Hábito:	Masas micro y criptocristalino
Dureza:	1-2.0
Densidad Relativa:	1-2.7
Fractura:	Concoidal (no agregado)

Brillo:	Lustroso (no agregado)
Color:	Blanco, rosa, azul
Asociación:	Asociada a zeolitas, cuarzo y otros minerales de arcilla
Origen:	Producto de rocas ígneas efusivas, metamórficas y sedimentares en ambiente mal drenado

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

### Caolinita

La caolinita (Figura 2.13.) es un aluminosilicato compuesto de láminas dioctaédricas, cada una de éstas conformada por dos capas, una tetraédrica (formada por átomos de silicio u oxígeno coordinados tetraédricamente) y otra capa octaédrica (formada con átomos de aluminio coordinados octaédricamente a átomos de oxígeno y grupos hidroxilo).

Las caolinitas son estables debido a la pequeña sustitución de átomos en su red cristalina, además de que, no permite el ingreso de agua entre moléculas por a la fuerte unión de sus retículas (Hernández, 2012).

**Figura 2.13.** Mineral Caolinita



Fuente: <http://presentacionespp.spot.com/2015/01/caolinita.html>

**Tabla 2.4.** Propiedades del mineral Caolinita

Ítem	Descripción
Formula Química:	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
Cristalografía:	Triclínico
Clase:	Silicatos
Propiedades Ópticas:	Biáxico
Hábito:	Laminar-exfoliación
Dureza:	2-2.5
Densidad Relativa:	2.6 g/cm <sup>3</sup>
Fractura:	Astillosa
Brillo:	Mate, nacarada
Color:	Blanco
Asociación:	Asociada a las Halositas
Origen:	Producto de la alteración en situ de minerales como feldespatos u otros silicatos aluminicos

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

**Illita**

Las illitas (Figura 2.14.) generalmente poseen abundante cantidad de hierro y valores medios de magnesio, aunque también, existen casos de escasos de estos elementos dentro del material. Además son utilizadas para hacer referencia a grupos de minerales con gran variedad de componente de rocas y suelos de granulometría del tamaño de la arcilla (2µm). Se considera un

mineral tanto del grupo de las micas así como del grupo de arcillas (Figuroa, 2003).

Presentan estructura semejante a la montmorillonita, con la diferencia de que tiene cargas equilibradas por un átomo de potasio, los cuales se ubican entre las unidades fundamentales (Hernández, 2012).

**Figura 2.14.** Mineral Illita



Fuente: [http://greco.fmc.cie.uva.es/explorador\\_mine.asp?cm=972&nn=1&f=n](http://greco.fmc.cie.uva.es/explorador_mine.asp?cm=972&nn=1&f=n)

**Tabla 2.5.** Propiedades del mineral Illita

Ítem	Descripción
Formula Química:	$(K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)]$
Cristalografía:	Monoclínico
Clase:	Filosilicatos
Propiedades Ópticas:	Biáxico
Hábito:	Como agregados de pequeños cristales monoclínico de grises a blancos
Dureza:	1-2
Densidad Relativa:	2.8 g/cm <sup>3</sup>
Fractura:	Micácea
Brillo:	Perlado
Color:	Gris blanco a plateado blanco, gris verdoso
Asociación:	Común en sedimentos, suelos, rocas arcillosas sedimentarias y rocas metamórficas

Origen:	Producto de la alteración de la moscovita y los feldspatos en ambientes de pluviometría y temperaturas elevadas
---------	---

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

## CRITERIOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE ARCILLAS

Basándose en la estructura mineralógica dominante que compone la red cristalina de las arcillas y su comportamiento se puede clasificarlas con los siguientes criterios determinados mediante la difracción de rayos X:

1. Carga de la capa X
2. Tipo de material del intercapa
3. Tipo de combinación de láminas de tetraedro-octaedro
4. Contenido de cationes de láminas octaédricas

**Tabla 2.6.** Características de las arcillas

Propiedad	Montmorillonita	Caolinita
Enlace entre láminas	Cationes ("baja")	Hidrógeno ("fuerte")
Carga superficial	Alta	Baja
Superficie específica	800-1200 cm <sup>2</sup> /100g	10-15 cm <sup>2</sup> /100g
Capacidad de cambio	75-150meq/100g	2-15meq/100g
Plasticidad	Alta	Baja

Fuente: Bauza Juan, El tratamiento de suelos arcillosos con Cal

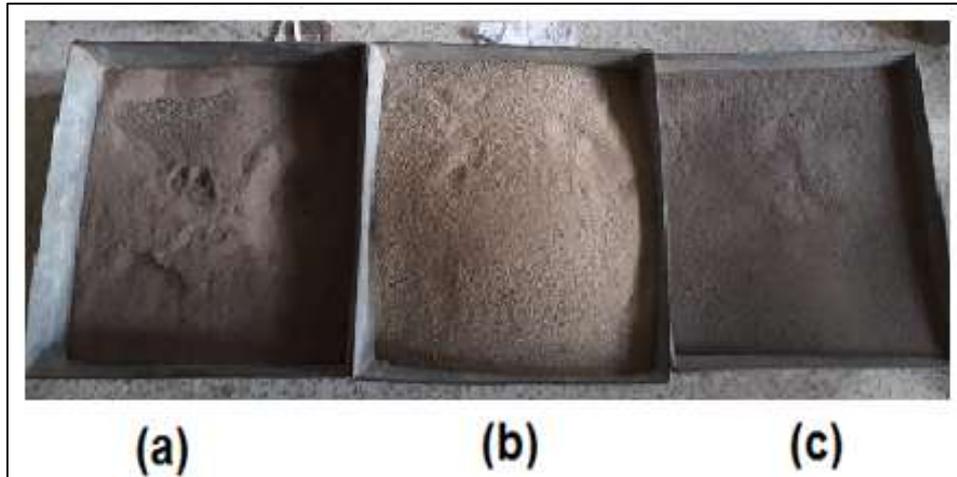
## PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

### Color

Esta propiedad es un factor importante para, a simple vista, determinar rasgos importantes del suelo, debido a que un color oscuro hace notar la presencia de materia orgánica, mientras que un color claro denota la presencia de carbonatos o yesos; generalmente los suelos de alto potencial expansivo presentan un color café oscuro y contienen pequeños cristales de yeso. Para el caso de este estudio las muestras a ser analizadas M3 y M5, en estado natural

presentan un color café oscuro, mientras que la muestra M4 tiene un color café claro (Figura 2.15.).

**Figura 2.15.** Muestras: (a) M3, (b) M4, (c) M5



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

### **Superficie Específica**

La superficie específica se puede definir como la relación entre toda la superficie de las partículas encontradas y la unidad de volumen o masa ( $m^2/m^3$ ,  $m^2/gr$  correspondientemente), por lo tanto, con un menor tamaño de partículas se tendrá una mayor superficie específica.

La forma de las partículas es un factor de alta importancia debido a que determina el arreglo interno de partículas en un cierto volumen, generalmente partículas alargadas presentan mayor superficie específica que las cúbicas o esféricas. Las partículas de arcilla al tener una forma laminada presentan una alta superficie específica, especialmente las que poseen en su contenido mineral mayor cantidad de montmorillonita, ya que ésta, presenta superficie externa y además interna (L. Rucks, F. Garcia, A. Kaplan, J. Ponce de León, M. Hill, 2004).

Entre las dimensiones de los minerales más representativos de la arcilla se tiene:

**Tabla 2.7.** Dimensiones y superficie específica de ciertos minerales de arcilla

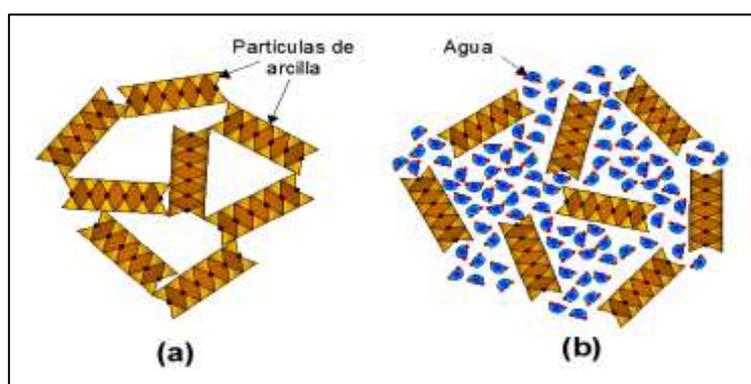
Minerales de arcilla	Dimensiones en angstroms (Å)			Superficie específica
	Largo	Ancho	Espesor	Rangos en m <sup>2</sup> /gr
Montmorillonita	1000	5000	10 a 50	Hasta 800
Caolinita	1000	20000	100 a 1000	10 a 20
Illita	1000	5000	50 a 500	65 a 100

Fuente: (Juerez, NA)

### Floculación y dispersión

Floculación y dispersión son propiedades que dependen principalmente de las interacciones electrostáticas entre partículas (atracción y repulsión) que se encuentran cercanas entre sí dentro de un medio líquido. Cuando la fuerza de atracción es mayor a la de repulsión las partículas tenderán a moverse de una hacia otra entrando en contacto y formando partículas de mayor tamaño en un estado denominado floculación. Mientras que cuando se suscita lo contrario respecto a las fuerzas, la resultante va a ser repulsiva, lo cual produce que las partículas traten de separarse entre ellas formando un estado de dispersión (Figura 2.16.).

**Figura 2.16.** (a) Partículas de arcilla floculadas, (b) partículas de arcilla dispersa



Fuente: (Castellanos, 2016)

Las partículas de arcillas expansivas al poseer un campo eléctrico negativo en su superficie generan interacciones electrostáticas e iónicas con las moléculas

de agua. Cuando gran parte de las partículas de arcilla se encuentran en estado floculado, ésta propiedad influye en la capa absorbida de agua y su espesor, produciendo un proceso de hinchamiento de mayor escala.

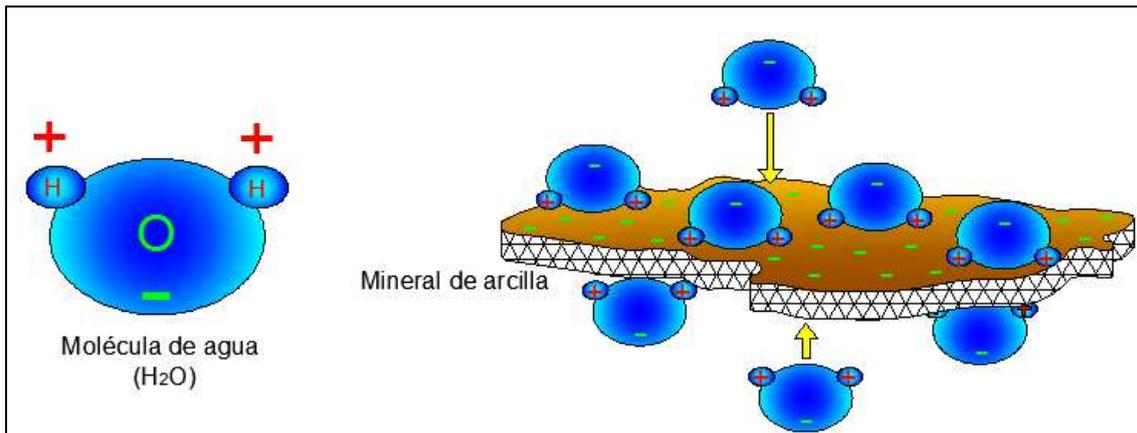
### **Carga superficial**

La carga superficial (o capacidad de adsorción) es una capacidad que poseen los materiales sólidos de atraer a sus superficies moléculas de gas o disoluciones por medio de un campo electromagnético cargado. Físicamente por fuerzas electrostáticas existentes entre átomos del sustrato sólido y moléculas de material absorbido, caracterizado por su polaridad (Ibon Aranberri, Alexander Bismarck, 2007).

En la formación de las láminas de arcilla se puede describir que están constituidas de tal forma que los átomos positivos quedan colocados en el interior de la lámina y los átomos negativos en el exterior, lo que causa que, el área superficial que influye en la atracción entre moléculas tenga una carga completamente negativa, permitiendo que se genere un campo electromagnético capaz de atraer los cationes de partículas de cualquier otra sustancia que se encuentre en su radio de influencia.

Tomando en cuenta el campo electromagnético negativo de las láminas de arcilla y además el dipolo positivo que poseen las moléculas de agua, se llega a tener un proceso en el cual las moléculas de agua orientan su dipolo hacia la superficie de las láminas de arcilla generando una atracción y una adherencia que al final llega a cubrir toda la lámina (Figura 2.17.). Las arcillas expansivas, especialmente las que contienen en su mayoría mineral de montmorillonita, tienen altos rangos de superficie específica, por lo que se tiene mayor área con carga negativa que hace que sean más susceptibles a atraer más moléculas de agua que al final trae como consecuencia la separación y disociación de láminas o el llamado hinchamiento (L. Contreras, O. Escolano, V. Rodríguez, J. Díaz, R. Pérez, S. García, J. García Frutos, 2003).

**Figura 2.17.** Interacción por carga superficial entre agua y arcilla



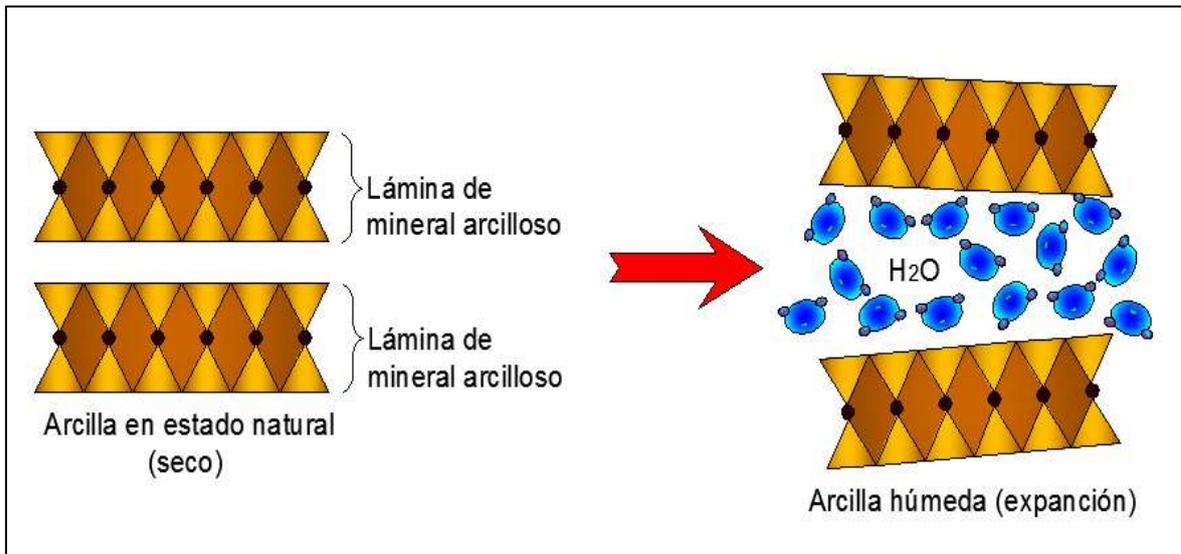
Fuente: (L. Contreras, O. Escolano, V. Rodríguez, J. Díaz, R. Pérez, S. García, J. García Frutos, 2003)

### Hidratación e hinchamiento

La hidratación (absorción de agua) tanto como la deshidratación de los espacios interlaminares existentes en las arcillas, son propiedades características de las esmectitas; si se hace un enfoque en la hidratación, este proceso adquiere mayor importancia cuando la arcilla posee mineral del tipo montmorillonita, ya que se genera una inestabilidad de partículas cuando existe presencia de medios acuosos debido a la absorción de agua que se da por las propiedades que están presentes como: la forma laminar, pequeño tamaño con alta capa superficial, débil unión entre sus láminas y la carga superficial negativa existente (Beltrán, 2009).

Así también la hidratación y deshidratación se producen con independencia de la clase de catión de cambio presente, pero el grado de hidratación sí está sujeto a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina, por lo cual, al entrar en contacto con moléculas de agua dan como resultado un alto grado de disociación y dispersión de las láminas dando lugar al hinchamiento (Figura 2.18.); por ejemplo, cuando se tiene la presencia de láminas silícicas, la atracción es fuerte y las moléculas de agua se instalan entre ellas, originando un considerable aumento de volumen; y de la misma forma la presión de expansión podría llegar a valores tan altos que podría afectar edificaciones de cualquier tamaño.

**Figura 2.18.** Proceso de disociación y dispersión de láminas con el agua



Fuente: (L. Contreras, O. Escolano, V. Rodríguez, J. Díaz, R. Pérez, S. García, J. García Frutos, 2003)

### Plasticidad

La plasticidad es una propiedad característica de los suelos finos (limos y arcillas), se produce debido a que el agua que rodea las partículas laminares actúa como un agente lubricante que facilita el deslizamiento entre partículas cuando se produce un esfuerzo sobre ellas.

Debido a la morfología laminar, tamaño de partículas (sumamente pequeñas) y alta capacidad de hinchamiento las arcillas presentan una alta plasticidad, que puede ser determinada mediante la obtención de los límites de Atterberg (límite líquido, plástico y de contracción), con los cuales se marca una separación entre los estados de comportamiento del suelo en: sólido, semisólido, plástico y semilíquido.

Para la obtención del Índice de plasticidad (IP), basta con tener la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico como se muestra en la ecuación 2.1, donde el IP es considerado como un factor que ayuda a determinar el grado de plasticidad del suelo (Tabla 2.8.).

$$IP = LL - LP$$

(Ec. 2.1)

Donde:

IP: es el índice de plasticidad

LL: es el límite líquido

LP: es el límite plástico

**Tabla 2.8.** Grado de Plasticidad del Suelo

IP	Descripción
0 - 3	No plástico
3- 15	Ligeramente Plástico
15 - 30	Baja Plasticidad
> 30	Alta Plasticidad

Fuente: <http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/11/normal-0-false-false-false.html>

### Actividad

La actividad de las arcillas se puede definir como la relación entre el índice de plasticidad (IP) y la cantidad de arcilla que posee el suelo analizado (Ec. 2.2). Dicha relación puede ser utilizada como un parámetro para medir el potencial de expansión de las arcillas.

De acuerdo con la actividad se pueden definir tres clases de arcillas, siendo estas:

Inactiva: presenta actividades menores a 0.75

Normal: con rangos de actividad que van desde 0.75 – 1.25

Activa: con una actividad superior a 1.25

Generalmente los suelos arcillosos se encuentran conformados de un 40% a 70% de partículas con minerales de arcilla que proporcionan plasticidad al suelo. Si dicha cantidad de minerales aumenta, afecta directamente a los límites tanto líquido como plástico del suelo.

Skempton (1953), notó que el índice de plasticidad del suelo aumenta linealmente conforme se presenta un incremento del porcentaje de partículas de arcilla (menor a 0.002 mm), dependiendo del tipo de minerales de arcilla que contenga (Figura 2.19.). Por lo tanto, definió a la actividad (Ec. 2.2) como la

pendiente de la línea correspondiente a la relación entre el índice de plasticidad (IP) y la fracción en peso de las partículas de arcilla (%), porcentaje que se obtiene de las partículas menores a 0.002mm de la curva de distribución granulométrica.

$$A = \frac{IP}{\text{Fracción de Arcilla (\%)}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

A: actividad

IP: Índice de Plasticidad

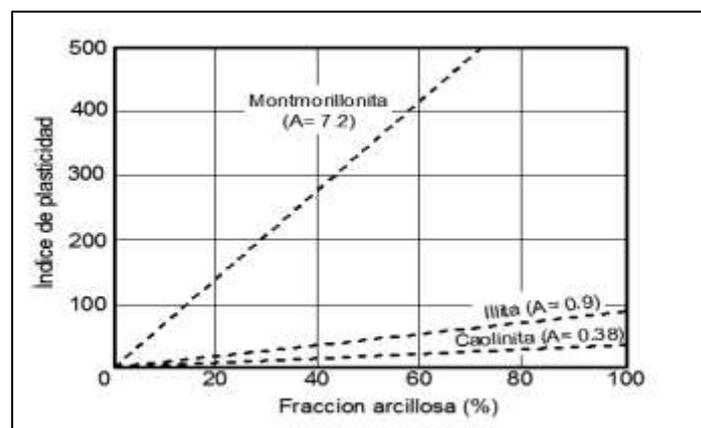
A continuación (Tabla 2.9.), se presentan rangos de valores típicos de actividad para algunas arcillas:

**Tabla 2.9.** Actividad de Arcillas

Tipo de Arcilla	Minerales	Actividad
Arcillas Glaciales	Caolinita	0.4 - 0.5
Arcilla Común	Illita	0.5 - 0.75
Arcilla Orgánica	Montmorillonita	> 1.25

Fuente: <http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/11/normal-0-false-false-false.html>

**Figura 2.19.** Relación entre índice de plasticidad, fracción arcillosa y actividad



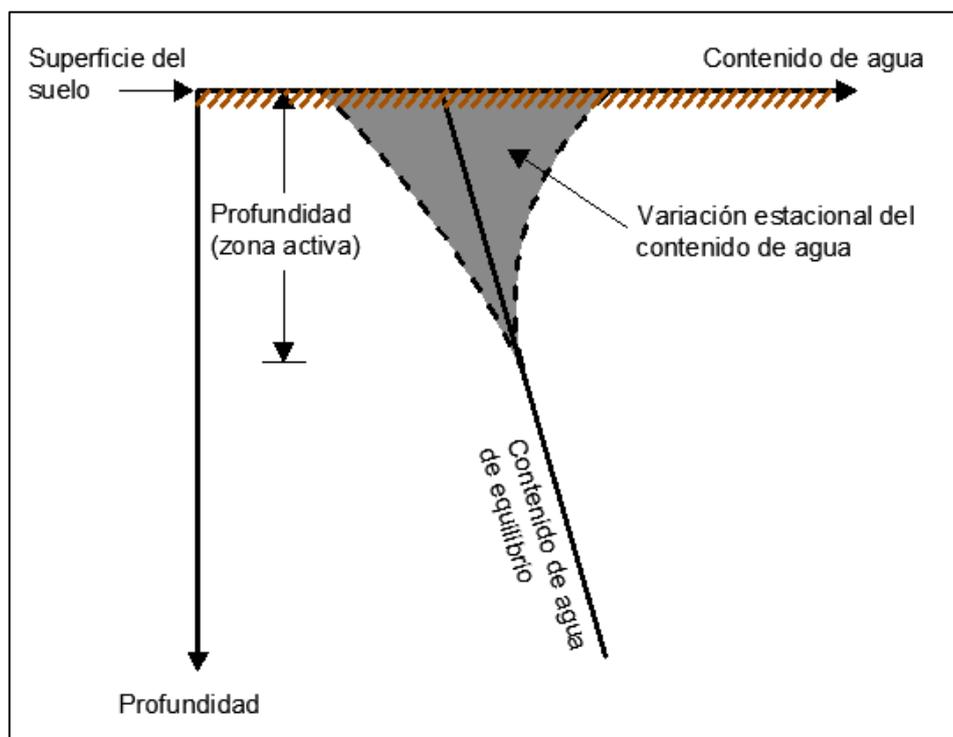
Fuente: <http://notasconstructorcivil.blogspot.com/2011/01/>

## DEFINICIÓN DE LA ZONA ACTIVA, HUMEDAD DE EQUILIBRIO Y PRESIÓN DE EXPANSIÓN

### Zona Activa

La definición de zona activa en relación con suelos expansivos adquiere mayor importancia ya que se define como la máxima profundidad o capa de suelo sujeta a fluctuaciones estacionales de humedad que pueden llegar a producir significativos cambios de volumen. Cuando se proyecta la construcción de obras de ingeniería sobre suelos que revelen la presencia de arcillas expansivas es fundamental tener conocimiento sobre esta zona ya que ésta podría verse afectada por el ascenso o descenso del nivel freático, especialmente en zonas costeras donde se ha identificado la presencia de niveles freáticos altos que pueden ser fácilmente afectados por factores climáticos (Figura 2.20.).

**Figura 2.20.** Esquema de variación del nivel freático



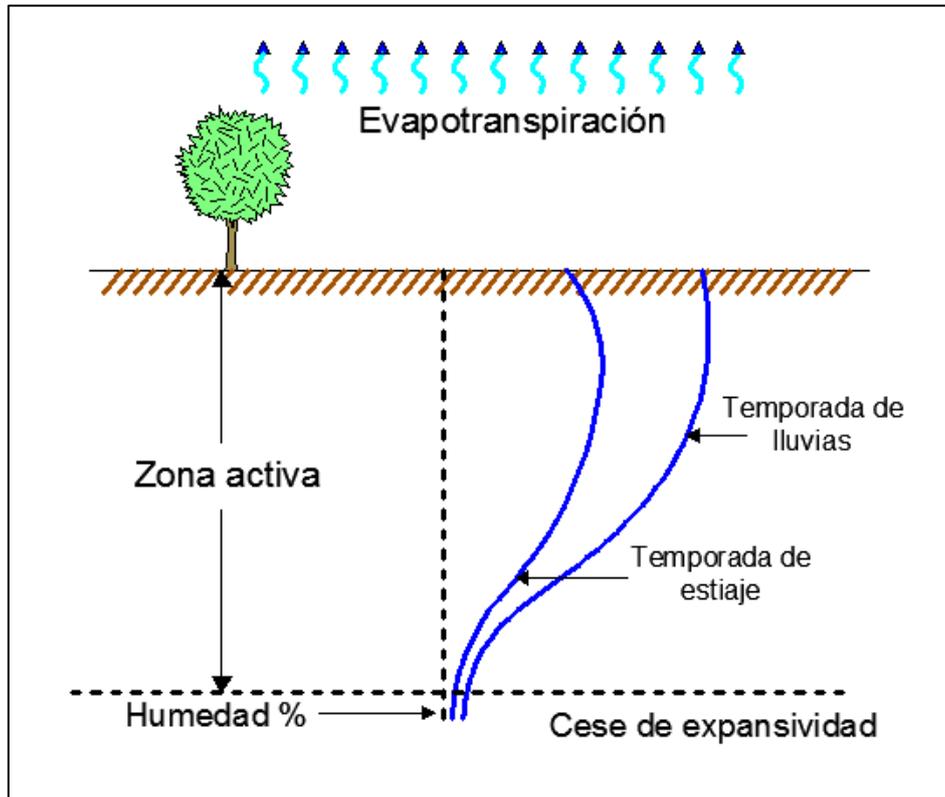
Fuente: (Braja, Principios de Ingeniería de Cimentaciones , 2006)

La zona activa que se halla sobre el nivel freático es altamente susceptible a experimentar procesos de expansiones y contracciones en temporadas de lluvia y estiaje respectivamente, mientras que la expansibilidad cesa bajo éste (Figura 2.21.).

La profundidad de esta zona puede variar dependiendo del tipo de material y de la zona donde se encuentre; se puede determinar graficando el contenido

de humedad vs la profundidad del suelo a lo largo de varias estaciones (Figura 2.20.) (Braja, Principios de Ingeniería de Cimentaciones , 2006).

**Figura 2.21.** Perfiles de humedad de zona activa



Fuente: (Mendes Salas, Pineda Núñez, NA)

### Humedad de equilibrio

La humedad de equilibrio se define como aquella que corresponde a la necesidad natural del suelo por el agua. Cuando la humedad natural es menor a la humedad de equilibrio el suelo tiende a querer satisfacer esta necesidad para llegar al equilibrio, proceso por el cual se da lugar a la expansión (Ramirez, 2006).

La humedad de equilibrio se puede determinar con la siguiente expresión:

$$W_{eq} = 0.47 LL + 3.6 \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde:

$W_{eq}$ : Humedad de equilibrio

LL: Límite líquido

## Potencial de expansión

El potencial de expansión se refiere a un grado en el cual los suelos pueden expandirse dependiendo de los límites de Atterberg y la succión natural del suelo.

Para su cálculo se pueden utilizar los métodos tradicionales donde se determina el límite líquido (LL), el índice de plasticidad (IP) y la succión del suelo ( $t_{nat}$ ), propiedades con las cuales se puede tener una referencia cualitativa del potencial de expansión (Tabla 2.10.).

Siendo la succión del suelo una tensión interna en la estructura del material producida por el fenómeno capilar y por la concentración de sales dentro del agua de los poros del suelo. La succión es responsable por ejemplo de la forma de campana de la curva de compactación, por la rigidez de un suelo seco, la abrupta pérdida de resistencia ante la hidratación y por los agrietamientos causados por las arcillas expansivas (Instituto Nacional de Vías, 2007).

**Tabla 2.10.** Potencial expansivo de los suelos

Potencial de Expansión	LL	IP	$t_{nat}$ (KPa)
Alto	> 60	> 35	> 383
Medio	50 - 60	25 - 35	144 - 383
Bajo	< 50	< 25	< 144

Fuente: (Instituto Nacional de Vías, 2007)

## CAPÍTULO III

### ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Puesto que los suelos poseen una variada capacidad de resistir los esfuerzos transmitidos por las interacciones suelo-estructura, es de suma importancia evitar suelos problemáticos (débiles, rellenos, expansivos y con niveles freáticos superficiales). Con los antecedentes expuestos en los capítulos

anteriores acerca del comportamiento de las arcillas expansivas, sus propiedades y sus características de expansión, es conocido que este tipo de suelo genera problemas sobre las obras de ingeniería, por ende, es indispensable la búsqueda de suelos naturales con buena resistencia portante y volúmenes estables o suelos que tengan la capacidad de ser tratados con alternativas de estabilización que ayuden a mejorar las propiedades evitando deformaciones perjudiciales.

El mejoramiento de suelos en el campo constructivo ha venido siendo una práctica muy antigua, permitiendo la aplicación de conocimientos ingenieriles en el desarrollo de proyectos estructurales en terrenos problemáticos. Los métodos más comunes de estabilización de suelos consisten en el empleo de productos químicos, o tratamientos físicos que mejoran las propiedades iniciales del suelo a ser tratado.

Dependiendo de las propiedades y características que necesiten ser mejoradas, debe buscarse el método más factible para su estabilización; los suelos más comunes a ser tratados son los siguientes:

- Suelos expansivos.
- Suelos de relleno.
- Suelos blandos.
- Suelos con niveles freáticos superficiales.
- Suelos de base y sub base de pavimentos (en caso de ser necesario).

## **DEFINICIONES GENERALES SOBRE ESTABILIZACIÓN**

### **Estabilización de los suelos**

La estabilización de los suelos se puede definir como la aplicación de uno o varios procesos que tienen como objetivo principal el mejorar o modificar las propiedades físico-mecánicas naturales del suelo para tener una mejor respuesta frente a la acción de factores climáticos o esfuerzos externos aplicados sobre éste.

Si se describe el concepto en otras palabras más simples, la estabilización es la modificación de ciertas propiedades naturales del suelo para que cumpla con

requerimientos fijados y pueda ser aprovechado de forma eficiente en el campo ingenieril.

### **Agentes estabilizadores**

Un agente estabilizador se puede definir como un material o sustancia que puede ser implementada en un proceso de estabilización y que al momento de interactuar con una porción de suelo actúa como un conglomerante, evitando o reduciendo considerablemente variaciones de las propiedades del suelo ante la acción de factores externos.

### **Procesos de estabilización de suelos**

Se refiere a la implementación o adecuación de una serie de pasos en los que se podría incluir la adición de otros materiales con el propósito de llegar a conseguir la variación de las propiedades del suelo.

## **ALTERNATIVAS DE ESTABILIZACIÓN**

En la actualidad se han documentado una gran cantidad de alternativas de estabilización, esto conlleva a tener una amplia oferta de procedimientos que pueden ser adoptados para lograr conseguir un mejoramiento de las propiedades del suelo, la mejor alternativa es evitar la interacción de obras de ingeniería con terrenos potencialmente inestables o expansivos.

La elección de cualquier alternativa de estabilización depende de varios factores como por ejemplo de las características iniciales del suelo o las condiciones finales a las cuales se prevea llegar como requerimiento para cumplir los propósitos proyectados en una obra ingenieril. La estabilización de un suelo expansivo puede ser desarrollada en situ o también con la construcción de rellenos artificiales dependiendo de la alternativa planteada, entre las alternativas más comunes aplicadas se encuentran la excavación y remplazo de la o las capas que contengan arcillas expansivas, estabilización del suelo con adición de agentes estabilizantes que funcionen como conglomerantes, confinando las arcillas con barreras de humedad o bajo capas de suelo que funcionen como subrasante y que ayuden a disminuir o aislar el

suelo ante los cambios de humedad, realizar un prehumedecimiento bajo elementos impermeables colocados en el área donde se propone asentar obras civiles, etc.

Todas las alternativas propuestas y analizadas corresponden a diferentes técnicas de estabilización que dependen principalmente de los procesos adoptados, materiales utilizados, sustancias agregadas y la combinación de todos estos.

Hausmann (1990) en una investigación menciona que las técnicas para mitigación de los suelos expansivos podrían ser resumidas y clasificadas en las siguientes:

- Física
- Mecánica
- Química
- Físico química

En la misma investigación se presenta la conclusión que debido a su eficiencia, aplicabilidad y confiabilidad, la estabilización mecánica y química son las metodologías más recomendadas que las físicas y físico químicas (Hausmann, M.R., 1990).

## **ESTABILIZACIÓN FÍSICA, MECÁNICA, QUÍMICA Y FÍSICO QUÍMICA**

En el mundo se han venido desarrollando varias investigaciones sobre la estabilización del suelo debido a la interacción que se tiene con la mayor parte de los proyectos de infraestructura, hoy en día, es posible elegir una alternativa de estabilización de una gran variedad existente, cada una de ellas deberá ser considerada tomando en cuenta parámetros como características iniciales del suelo y condiciones que se pretendan mejorar del mismo con el objetivo de cumplir los propósitos deseados. Las alternativas de estabilización tienen fundamentos teóricos que dependen tanto del tipo de agente estabilizador

como del proceso de estabilización y están divididas en cuatro grupos descritos a continuación:

### **Estabilización Física**

La estabilización física se produce cuando se efectúa una o varias mezclas de suelos con propiedades complementarias, o a su vez la adición y mezcla materiales pétreos de buena granulometría con el suelo a ser estabilizado, muchas veces aplicando adicionalmente geotextiles y un proceso de compactación. De esta forma logrando obtener un material de mejor calidad, generalmente esta alternativa se limita a mejorar textura y a producir una adecuación de los límites de consistencia.

### **Estabilización Mecánica**

Esta alternativa es la mayormente utilizada, ya que es considerada como una de la más práctica, funcional, económica y que logra mejoras en toda circunstancia. En ciertas ocasiones este método se combina con las demás alternativas para lograr resultados óptimos, puesto que su desarrollo consiste en la utilización de equipo mecánico que deberá ser adecuado según el tipo de material, además, éste equipo tiene como función realizar un efecto de compactación con el cual se transmite energía mecánica a la masa del suelo para lograr la densificación que contempla una mejora considerable en comparación a las condiciones iniciales.

Generalmente se desarrolla humedeciendo la muestra considerando humedades óptimas indicadas en ensayos previos y adicionando las correspondientes a pérdidas por laboreo, mezclado, evaporación, etc.

El objetivo principal de la estabilización mecánica es reducir la permeabilidad con la reducción de la relación de vacíos, bajar la compresibilidad o evitar asentamientos futuros, y aumentar la resistencia al cortante mejorando la estabilidad del suelo.

### **Estabilización Química**

La estabilización química se basa en el intercambio iónico entre los granos o láminas del suelo a estabilizar y el agente estabilizador, además en esta alternativa se producen efectos sobre una o varias propiedades mecánicas y químicas del suelo dependiendo de las cantidades adheridas de agente estabilizante, composición química, condiciones en las cuales se procesa, características del suelo natural y métodos de aplicación.

Hasta la actualidad existen un gran número de investigaciones relacionadas con la búsqueda de agentes químicos que tengan buenos resultados en cuanto a estabilización de suelos, en su mayoría se han encontrado resultados satisfactorios, permitiendo ampliar el campo a la difusión y experimentación con nuevos métodos y agentes estabilizantes.

Este proceso se desarrolla mediante la mezcla íntima y homogénea que permite mejorar considerablemente las propiedades del suelo resultante, especialmente si se combina con la estabilización mecánica.

La presente investigación se encuentra fundamentada en esta alternativa tomando como muestras tres tipos de arcillas expansivas y ceniza de cascarilla de arroz como agente estabilizador, material que posee características puzolánicas, cuyas propiedades mineralógicas han sido determinadas mediante procedimientos descritos en capítulos posteriores.

Para explicar de una mejor forma como suceden las interacciones químicas entre el agente estabilizante y el suelo, se puede mencionar que: uno de los principales factores de los aditivos químicos y la estructura mecánica de los suelos es la reacción puzolánica, ya que los aditivos químicos que poseen calcio ( $\text{CaO}$ ) reaccionan con sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) generando productos cementosos como hidratos de silicato de calcio y silicato de aluminato de calcio, hidratos que actúan como un pegamento para unir las partículas del suelo, mejorando sus propiedades y obteniendo resultados efectivos (Mustafa Dayioglu, Bora Cetin, Soonkie Nam, 2017).

Estos productos cementosos reducen considerablemente el potencial de expansión de los suelos expansivos a través del efecto de atracción entre las

partículas de arcilla, suprimiendo el cambio volumétrico y aumentando la resistencia (Mustafa Dayioglu, Bora Cetin, Soonkie Nam, 2017).

### **Estabilización Físico-Química**

Esta alternativa es una combinación entre la estabilización física, química y complementada con la estabilización mecánica, en sí toma las bases de todas estas alternativas para generar una estabilización que se aproxime al 100% de eficacia.

Comúnmente la presente estabilización se utilizada en proyectos de gran envergadura, como cimentaciones de puentes de gran longitud, proyectos hidroeléctricos, túneles, etc. Un ejemplo tradicional de esta alternativa es aquella en la que se estudia el suelo a ser tratado para posteriormente desarrollar una mezcla con suelos de buena graduación, agentes químicos como cal y cemento, para posteriormente implementar equipo mecánico dando como resultado mejoras indudablemente superiores.

## **PUZOLANA DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ Y SU APLICACIÓN EN LA ESTABILIZACIÓN**

La cascarilla de arroz conforma un material identificado como el mayor residuo orgánico de la producción agrícola de granos; haciendo una referencia estadística en un panorama a macro-escala, ésta constituye alrededor del 20% del peso de la producción mundial de arroz, por lo que su disposición final se convierte en un problema existente en países productores de arroz, llegando a la conclusión de generar algún tipo de uso que pueda ser aprovechado en cualquier campo del desarrollo humano (Pedro Matthey, Rafael Robayo, Jherson Díaz, Silvio Delvasto, José Monzó, 2015).

Por lo tanto, se han generado diversas investigaciones en las cuales se pretende de algún modo incluir a este material en procesos de reutilización, uno de estos se da mediante la incineración controlada que da origen a la ceniza de cascarilla de arroz, proceso en el cual la cascarilla de arroz se transforma en un nuevo material que adquiere características puzolánicas con

un alto contenido de sílice convirtiéndose en una de varias alternativas potenciales para usos industriales debido a su alta disponibilidad alrededor del mundo.

Se puede definir las puzolanas como materiales en los cuales gran parte de su composición principal son sílice reactiva y/o aluminio, elementos que en presencia de agua dan al material propiedades aglomerantes. Las puzolanas se pueden dividir en dos grupos dentro de los cuales existen una gran variedad de materiales; a continuación, se presentan los que están mayormente disponibles a nivel global:

**Figura 3.22.** Tipos de puzolanas y ejemplos

Puzolanas	
Naturales	Cenizas Volcánicas, Diatomita, materias sedimentarias de origen animal o vegetal.
Artificiales	Arcillas calcinadas, Cenizas pulverizadas de carbón de piedra, cenizas de residuos agrícolas quemados, cenizas volantes, humo de sílice.

Fuente: Chicaiza, Oña, (2018)

Las puzolanas artificiales son categorizadas como sustancias de buen rendimiento y bajo costo en varios artículos científicos debido a los resultados exitosos que se obtienen con el cambio significativo de las propiedades en los suelos potencialmente expansivos.

Entre las investigaciones efectuadas con el fin de reconocer que tipo de materiales agrícolas producen puzolana de buena calidad potencialmente susceptible a explotación, la ceniza de cascarilla de arroz que está incluida dentro de las puzolanas artificiales ha demostrado tener una potencialidad máxima debido a las grandes cantidades existentes en muchos países productores de arroz, su relación 1:5 en el proceso de incineración (una tonelada de ceniza por cinco de cascarilla) y su alto contenido de sílice.

Una desventaja que podría ser causante de problemas es que el proceso de incineración debe estar bien controlado si se desea obtener como resultado una ceniza altamente puzolánica (PRACTICAL ACTION, 1994).

En cuanto al uso de la ceniza de cascarilla de arroz como un agente estabilizador de arcillas expansivas algunos estudios han demostrado que la implementación de este material forma parte de una tecnología verde, asequible y económica; su caracterización morfológica semejante a las partículas arcillosas hace que sea viable la implementación de este material como un sustitutivo en diferentes porcentajes en peso de la muestra con lo que se logra reducir el grado de expansividad y aumentar considerablemente la resistencia.

En el proceso de obtención del material utilizado como agente estabilizante se debe considerar que, para tener mejores resultados sin perder propiedades importantes de la ceniza que se obtiene del proceso de incineración, éste proceso debe estar preparado bajo condiciones controladas como se menciona en la ficha técnica publicada por el sitio web PRACTICAL ACTION, Technology challenging poverty (1994), en el cual, su artículo llamado "Puzolanas" menciona que: el incinerado se debe desarrollar a temperaturas menores a los 700°C debido a que la sílice a esta temperatura se cristaliza perdiendo su grado de reactividad, utilizando hornos con oxígeno para asegurar la oxidación completa del carbono.

En cuanto al pulverizado, se debe procurar reducir a la ceniza a tamaños de partículas que pasen el tamiz No.200 (0.074mm). En esta investigación la ceniza de cascarilla de arroz seca fue incinerada considerando estos aspectos técnicos para procurar obtener puzolana con buenas propiedades que se vean reflejadas en los ensayos posteriores con la reducción de la expansividad de las muestras analizadas (Figura 3.1.).

**Figura 3.1.** Proceso de incineración de la cascarilla de arroz en horno con oxígeno a temperatura controlada (< 700°C)



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

## **CRITERIOS DE DOSIFICACIÓN**

En el mundo se han desarrollado una gran variedad de estudios directamente relacionados a la estabilización de suelos potencialmente expansivos, por lo que, se puede encontrar una amplia cantidad de información de pruebas que se han realizado tanto con diferentes métodos de estabilización, materiales usados como agentes estabilizantes y porcentajes de mezcla, información que puede ser utilizada para obtener criterios de dosificaciones que puedan ser empleados para la realización de nuevos estudios que igualen o preferiblemente mejoren los resultados antes obtenidos.

Uno de los criterios de dosificación se puede definir tomando en cuenta un análisis previo en el cual se presente las exigencias, requisitos o posiblemente propiedades que deben cumplir las arcillas expansivas una vez que sean tratadas con un proceso de estabilización. Este criterio es comúnmente utilizado cuando se tiene un enfoque direccionado a proyectos viales, en los cuales se presentan la construcción de puentes, terraplenes, explanadas así como también la conformación de bases y sub bases en los que se asienta la capa de pavimento. Con estos antecedentes, en este tipo de proyectos se debe hacer estudios muy minuciosos para determinar tanto el método, material, y porcentaje que se va a utilizar en la estabilización debido a la constante y alta carga de tráfico y al periodo de diseño que normalmente tiene un largo plazo.

Otro criterio de dosificación es basado en la prueba y error, en donde simplemente se conoce las propiedades iniciales del tipo de suelo a ser

estabilizado y se determina mediante informaciones previas posibles variaciones de métodos, materiales y porcentajes con lo que se podría realizar un nuevo estudio que tenga como resultado presentar los efectos o modificaciones que se han dado en el suelo.

Esta investigación esta direccionada a obtener resultados comparativos basados en la prueba, relacionando las propiedades iniciales de las muestras de arcillas expansivas y las propiedades finales obtenidas con una variación de porcentaje en peso de material utilizado como agente estabilizante, para este caso puzolana extraída de la ceniza de cascarilla de arroz. Esto, previamente realizando una serie de ensayos y análisis para obtener las propiedades de las muestras elegidas M3, M4, M5 y recolectando una serie de información relacionada al estudio de suelos expansivos como se presenta a continuación, con el fin de llegar a concluir cual sería el mejor porcentaje (%) de prueba.

Estabragh (2013) utilizó cal, cemento y cenizas volantes para evaluar los efectos sobre las propiedades expansivas del suelo mediante la mezcla de un suelo expansivo local con 5% y 10% de cal, 5%, 10% y 20% de cemento y 5%, 10%, 15% y 20% de cenizas volantes (alto contenido de calcio) por el peso seco del suelo. Estudio que concluyó que, al mismo porcentaje el impacto de cal para reducir el potencial de hinchamiento del suelo expansivo tiene mejor resultados que los observados para cemento y cenizas volantes (Mustafa Dayioglu, Bora Cetin, Soonkie Nam, 2017).

Zhang y Cao (2002) agregaron entre 40-50% de cenizas volantes y 4-6% de cal por peso seco a un suelo expansivo y estudió los efectos en su comportamiento dando como resultado, que usar cal y cenizas volantes para mitigar el potencial de hinchamiento de suelos expansivos rinde con éxito (Mustafa Dayioglu, Bora Cetin, Soonkie Nam, 2017).

Edil (2006) evaluó el efecto de la ceniza volante en suelos inorgánicos y orgánicos de grano fino. Se realizaron pruebas con mezclas en el lado húmedo natural y en el lado de contenido de humedad óptimo dando como resultado que para suelos inorgánicos las propiedades aumentaron con la adición de

cenizas volantes, mientras que para suelos orgánicos no se observaron cambios significativos (Mustafa Dayioglu, Bora Cetin, Soonkie Nam, 2017).

Rukenya, Wambau, Kabubo y Thiog'o (2017) realizaron una investigación en la cual una combinación de 20% en peso de ceniza de cascarilla de arroz y aproximadamente 2% en peso de cal natural mejoran considerablemente las propiedades del suelo arcilloso expansivo, influyendo en la resistencia del suelo y disminuyendo la expansión libre en un 70%. La conclusión fue que la ceniza de cascarilla de arroz estabiliza efectivamente el suelo arcilloso expansivo y que al aumentar la cantidad de cal fue acompañado por un aumento de la resistencia del suelo (Thomas Rukenya, James Wambua, Charles Kabubo, George Thiong'o, 2017).

Kumar y Sharma (2004) investigaron el efecto de diferentes proporciones de mezclas de cenizas volantes en el comportamiento de hinchamiento y los resultados indicaron que un contenido de ceniza volante mayor al 20% no redujo aún más el potencial de hinchamiento del suelo (Mustafa Dayioglu, Bora Cetin, Soonkie Nam, 2017).

Tomando en cuenta estas referencias anteriormente descritas y los hallazgos que se han tenido como resultado en los cuales se menciona que la adición tanto de cal como de ceniza volante llega a producir resultados favorables en cuanto a mitigación o reducción del potencial de expansión y aumento de las propiedades mecánicas, se llega a tener un criterio de dosificación con el cual se espera tener un resultado positivo en cuanto a estabilización de arcillas expansivas.

Ante estos antecedentes se determina una estimación de los porcentajes en peso de puzolana de cascarilla de arroz a ser utilizada como agente estabilizante en las mezclas con cada una de las muestras a ser analizadas, independientemente de otras sustancias utilizadas por otros autores, se toma como criterio únicamente las cantidades de porcentajes correspondiente a las cenizas volantes (para el caso de la presente investigación ceniza de cascarilla de arroz); en el estudio de Estabragh (2013) se utilizaron porcentajes de 5%, 10%, 15% y 20% de ceniza; Zhang y Cao (2002) agregaron entre 40-50% de

cenizas; Rukenya, Wambau, Kabubo y Thiog'o (2017) añadieron un 20% en peso de ceniza de cascarilla de arroz, y Kumar y Sharma (2004) investigaron el efecto de diferentes proporciones de mezclas de cenizas volantes y suelo expansivo concluyendo que un contenido de ceniza volante mayor al 20% no reduce aún más el potencial de hinchamiento. Por lo tanto, con estos criterios se ha estimado que los porcentajes en peso a ser empleados en este trabajo son de 10% 20% y 30%, tomando en cuenta que estas cantidades de agente estabilizante podrían llegar a variar significativamente las propiedades de las muestras analizadas, parámetros que podrán ser observados en resultados posteriores.

## **MÉTODOS DE APLICACIÓN**

La estabilización de suelos desarrollada mediante cualquiera de las alternativas descritas en capítulos anteriores puede ser utilizada en diversas aplicaciones, entre las más conocidas están: las de ser utilizadas como un material de construcción, un ejemplo de ello es la producción de adobes vibro prensados, los cuales poseen mejores propiedades que los que son fabricados de barro simple y forma tradicional. Otra aplicación es en carreteras, específicamente en proyectos viales donde se requiere tener una subbase de suelo que sea capaz de soportar los esfuerzos actuantes sobre las capas superiores, entonces, muchos suelos que se encuentran a lo largo del eje vial deben ser tratados para que estos cumplan condiciones de diseño requeridas, y garanticen funcionalidad y periodo de servicio para las cuales son construidas.

Por último, también es común aplicar la estabilización de suelos en la construcción de edificaciones como en la construcción de muros, mamposterías, tapias, o simplemente para mejorar las condiciones del suelo que interactúa directamente con las cimentaciones, las cuales conforman factor de análisis muy importante en el diseño y construcción de proyectos de infraestructura.

Para todas las aplicaciones anteriormente mencionadas, donde interviene la estabilización de suelos se deben considerar métodos de aplicación que

permitan garantizar las condiciones objetivas para las cuales un proceso de estabilización sea efectivo.

Debido a que las bases teóricas y los procesos de estabilización de las arcillas expansivas tienen relación a la estabilización de suelos que han sido tratados con cal u otros agentes estabilizantes, se permite mencionar tres posibles métodos de aplicación que son los siguientes:

- Inyección a presión.
- Mezcla en planta.
- Mezcla in situ vía seca o húmeda.

Independientemente de la aplicación a la cual está dirigida la estabilización, estos métodos de aplicación comúnmente involucran las siguientes etapas: caracterización y preparación de la arcilla a estabilizar, adición y esparcimiento del agente estabilizante (en este caso puzolana de ceniza de cascarilla de arroz), mezclado y en caso de ser necesario humectado, confinamiento y por último terminación y curado.

En esta investigación relacionada con las arcillas expansivas no se realizará un estudio profundo que permita determinar cuál de los tres sea el que provee mejores resultados. El estudio realizado por Sánchez, (2014) menciona que la mezcla in situ es una técnica económica, sencilla y que requiere menor trabajo, por lo cual, ha demostrado tener un alto rendimiento y ser la más utilizada a diferencia de las otras dos.

En general, para poner en práctica cualquiera de los métodos, previamente se debería, realizar un análisis minucioso que recopile información relacionada con las características de la arcilla encontrada, tipos de agentes estabilizadores y procesos de estabilización; información importante que puede generar un criterio determinista sobre un método de aplicación efectivo.

## **CAPÍTULO IV**

### **TRABAJOS DE LABORATORIO**

En el presente capítulo se procederá a dar una breve descripción de los ensayos a realizarse sobre las muestras de suelo obtenidas de la provincia de Manabí, con la finalidad de obtener observaciones y mediciones que serán utilizadas como las condiciones iniciales de las muestras ensayadas para su posterior análisis y comparación de los efectos producidos al realizar la estabilización mediante la mezcla de diferentes dosificaciones en peso de la puzolana obtenida de la cascarilla de arroz con el suelo.

Se mencionarán las normas utilizadas para los ensayos, así también como una breve explicación teórica de los trabajos de laboratorio realizados para poder entender adecuadamente las variables importantes a ser analizadas y verificadas durante el tratamiento del suelo en este proyecto de investigación.

Posterior a la obtención de las condiciones iniciales del suelo natural se procederá a una descripción de la forma de dosificación de las muestras estudiadas en diferentes porcentajes, continuamente un análisis y comparación de los resultados obtenidos de los ensayos en suelo natural y estabilizado.

En general, todos los ensayos a realizarse en las muestras de suelo tanto naturales como dosificadas se regirán a las normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM), que es una sociedad internacional dedicada al desarrollo de normas.

## SUELO NATURAL

### CONTENIDO DE HUMEDAD

Generalmente es uno de los ensayos más utilizados frecuentemente dentro de un laboratorio debido a su rápida ejecución y a su sencillez, puesto que permite estimar cualitativamente ciertas características mecánicas del suelo y correlacionarlas con los resultados de otros ensayos.

El contenido de humedad del suelo natural proporciona una importante información sobre el estado actual del suelo a ser estudiado; técnicamente se define como la relación entre el peso de agua contenido en una muestra comparado con el peso seco de la misma, generalmente expresado en porcentaje.

$$W = \frac{W_w}{W_s} * 100 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Dónde:

$W$  = Contenido de humedad [%].

$W_w$  = Peso de agua contenido en la muestra [gr].

$W_s$  = Peso seco de la Muestra [gr].

Para la realización del ensayo en las tres muestras (M3, M4, y M5) se procederá a la utilización de la norma ASTM D 2216-10 (Test Method for Laboratory Determination of Water Content of soil and rock).

**Tabla 4.11.** Contenido de Humedad de muestras naturales (Anexo 1; 1.1.1; Pág. 122-124)

Muestra	Prueba Nº	W [%]
M3	1	20
M4	1	20
M5	1	15

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

## DENSIDAD DE SÓLIDOS

La densidad de sólidos ( $G_s$ ) se puede definir como la relación entre el peso y el volumen de las partículas sólidas de una muestra de suelo. Los minerales de arcilla que constituye la fracción coloidal de suelo poseen un  $G_s$  comprendido entre 2.8 y 2.9  $\text{gr/cm}^3$  (Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 2015).

La norma utilizada para el desarrollo del ensayo es la ASTM D 854-14 (Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer).

**Tabla 4.12.** Densidad de sólidos M3, M4 y M5 en estado natural (Anexo 1; 1.2.1; Pág. 145, 148,151)

Densidad de Sólidos		
Muestra	$G_s$	Unidad
M3	2,783	$\text{gr/cm}^3$
M4	2,747	$\text{gr/cm}^3$
M5	2,784	$\text{gr/cm}^3$

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

## GRANULOMETRÍA

La determinación granulométrica de un suelo consiste básicamente en separar y clasificar por tamaños las partículas que lo conforman, es decir, realizar una distribución de partículas de acuerdo al tamaño de las mismas.

En esta investigación se utilizarán dos métodos para hallar la distribución de partículas de las muestras de suelo a ser estudiadas; granulometría por tamizado, que es un método para partículas gruesas y la granulometría por hidrómetro, método utilizado para la fracción fina. Métodos que al combinar sus resultados se puede obtener la curva completa de la distribución granulométrica de las muestras de suelo sometidas al ensayo.

### 3.1.1.1.GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO

Es el método utilizado para fracciones gruesas de suelo, consiste en hacer pasar las partículas de suelo antes retenidas en el tamiz No. 200 (0.075mm), por una serie de tamices de aberturas conocidas; por lo tanto, el diámetro de la partícula se encuentra definido por la abertura de los tamices utilizados para el ensayo. Para este tipo de ensayo se pueden utilizar tamices que van desde la abertura de 4" (10.16 cm) hasta el tamiz No. 200 (0.075mm) (ver Figura 4.1.).

Las normas utilizadas en el desarrollo del ensayo son: la ASTM D 421 (Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants) y la ASTM D422 (Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils).

**Figura 4.23.** Serie de Tamices



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

### 3.1.1.2.GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO

Es el método utilizado para fracciones finas de suelo (material que pasa el tamiz No. 200), con la utilización del hidrómetro y en base a la ley de Stokes que se refiere a la velocidad de sedimentación de partículas en función de su tamaño (Sánchez, 2014).

El método es aplicable para partículas entre tamaños de 0.1mm y 0.001mm puesto que a partículas mayores a 0.1mm, la ley de la sedimentación se altera

por las turbulencias provocadas por las mismas partículas, mientras que en tamaños menores a 0.001mm las partículas están sujetas a un movimiento Browniano.

**Figura 4.24.** Ensayo Granulometría por Hidrómetro



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

Este método consiste básicamente en dejar sedimentar una muestra de agua – suelo y con ayuda del hidrómetro sumergido en la muestra se puedan medir valores de densidad en el transcurso de un tiempo determinado (Figura 4.2.).

A partir de la curva de distribución granulometría se obtienen los porcentajes de arcilla presentes en las muestras ensayadas; generalmente se define a las arcillas como las partículas menores de 0.002mm.

La norma utilizada para el desarrollo del ensayo es la ASTM D 7928-17 (Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Graduation) of Fine-Grained soils Using The Sedimentation (Hydrometer) Analysis).

**Tabla 4.13.** Porcentaje de Arcilla de muestras naturales (Anexo 1; 1.2.1.1., 1.1.2.2., 1.2.1.3.; Pág. 143-151)

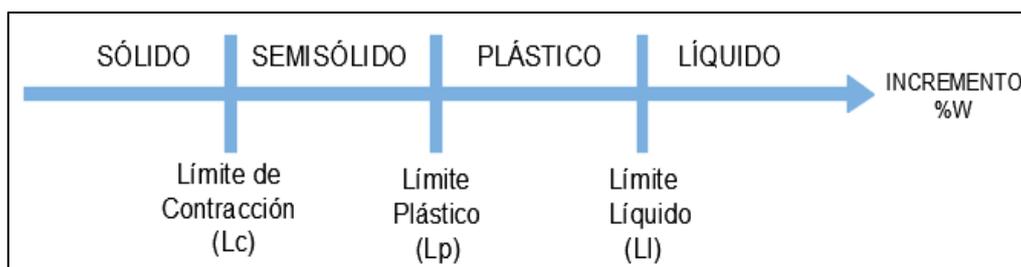
Muestra	W [%]	Gs [gr/cm <sup>3</sup> ]	Arcilla [%]
M3	19,6	2,783	45,160
M4	21,6	2,747	51,080
M5	11,5	2,784	49,050

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

## LÍMITES DE ATTERBERG

Albert Atterberg desarrolló un método para caracterizar la consistencia del suelo fino frente a la variación del contenido de humedad. Con baja presencia de humedad el suelo tiende al comportamiento de un sólido quebradizo, mientras que, con alta presencia de humedad el suelo tiende al comportarse como un líquido. Por lo tanto, Atterberg dependiendo del contenido de humedad, definió cuatro comportamientos básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido. Las transiciones entre los cuatro estados expresados en porcentajes son los conocidos como los límites de Atterberg (Figura 4.3).

**Figura 4.25.** Límites de Atterberg



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

### 3.1.1.3. LÍMITE LÍQUIDO

Se define a esta propiedad como el límite entre el estado plástico y el estado líquido de una muestra.

Mediante la obtención de la curva de fluidez, que es la relación entre el contenido de humedad y el  $\log(N)$  (donde  $N$ =número de golpes), se puede definir al límite líquido (LL) como el contenido de agua necesario para que un canal de dimensiones normalizadas se cierre con la aplicación de 25 golpes a una altura de un 1cm utilizando la copa de casa grande (figura 4.4.) (Braja, Principios de Ingeniería de Cimentaciones , 2006).

**Figura 4.26.** Equipo para ensayo límite líquido



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

#### 3.1.1.4. LÍMITE PLÁSTICO

Es la propiedad límite entre el estado semisólido y el estado plástico de una muestra, se define como el contenido de agua en porcentaje, cuando el suelo se empieza a resquebrajar al formar rollos o tiras entre 25 a 30mm de longitud y 3mm de diámetro, sobre una superficie de vidrio.

#### 3.1.1.5. ÍNDICE DE PLASTICIDAD

Numéricamente el índice plástico (IP) se determina mediante la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), e indica el rango de humedades en el cual el suelo presenta un comportamiento plástico. Generalmente los suelos de alta plasticidad (es decir con IP elevado) son extremadamente compresivos y con una alta cohesión, mientras que los suelos que no tienen límite plástico (arenas), es decir, sin cohesión se los denomina suelos no plásticos (NP).

$$IP = LL - LP \quad (\text{Ec. 4.2})$$

La norma utilizada para el desarrollo del ensayo es la ASTM D 4318-10 (Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils).

**Tabla 4.14.** Límites de Atterberg (Anexo 1; 1.1.1.; Pág. 122-124)

Muestra	W [%]	LL [%]	LP [%]	IP [%]
M3	20,0	89,0	37,0	52,0

M4	20,0	83,0	30,0	53,0
M5	15,0	67,0	24,0	42,0

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

## ENSAYO ÍNDICE DE EXPANSIÓN

Es un ensayo utilizado para evaluar el potencial de expansión del suelo de una muestra saturada, permitiendo obtener un parámetro índice para utilizaciones prácticas dentro de la ingeniería.

El Índice de expansión (EI) es una proporción del potencial de hinchamiento del suelo, se puede calificar cualitativamente mediante la tabla presentada a continuación:

**Tabla 4.15.** Clasificación del Potencial de Expansión

Índice de Expansión	Potencial de Expansión
0 - 20	Muy Bajo
21 - 50	Bajo
51 - 90	Medio
91 - 130	Alto
>130	Muy Alto

Fuente: ASTM D 4829-11

El ensayo utiliza los anillos del consolidómetro (Figura 4.5), para la preparación de la muestra, primero se toma una cantidad representativa de suelo dosificándola con agua hasta que ésta alcance un grado de saturación del 50%  $\pm$  2% en condición compactada. El proceso se lleva a cabo en el molde de 4" de diámetro, en dos capas compactadas con 15 golpes a una caída de 30.5cm del martillo apisonador.

**Figura 4.27.** Muestra Expandida en el anillo del consolidómetro después de ser ensayada.



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

**Grado de saturación:** para que el ensayo sea correctamente realizado las muestras deben encontrarse con un grado de saturación del  $50\% \pm 2\%$ , que se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{W \cdot G_s \cdot Y_s}{G_s \cdot Y_h - Y_s} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde:

S: Grado de saturación [%]

W: Contenido de Humedad [%]

G<sub>s</sub>: Gravedad específica, usar 2.7 cuando sea menor a 2.6 o mayor a 2.8

Y<sub>h</sub>: Peso unitario húmedo, 9.79 [kN/m<sup>3</sup>] a 20°C

Y<sub>s</sub>: Peso unitario seco de la muestra compactada [KN/m<sup>3</sup>]

### Procedimiento

1. Se coloca la muestra compactada en el interior del anillo de un Consolidómetro, colocando discos porosos tanto en la parte inferior como superior.
2. Se somete a la muestra a una presión total de 6.9Kpa, permitiendo que la muestra se comprima durante 10min, para obtener la lectura inicial D1.
3. Se satura la muestra para obtener lecturas periódicas durante 24 horas o hasta que la velocidad de expansión sea inferior a 0.005mm/h, obteniendo la última lectura D2.

4. Calcular el índice de expansión (EI) mediante la siguiente expresión:

$$EI = \frac{\Delta H}{H_1} * 1000 \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Donde:

$\Delta H$ : Diferencia de altura D2-D1 [mm]

H1: Altura Inicial [mm]

D1: Lectura inicial del dial [mm]

D2: Lectura final del dial [mm]

La norma utilizada para el desarrollo del ensayo es la ASTM D 4829-11 (Standard Test Method for Expansion Index of Soils).

**Tabla 4.16.** Índice de Expansión de muestras inalteradas (Anexo 1; 1.3.1.1, 1.3.1.2, 1.3.1.3; Pág. 179-190)

Muestra	Índice de Expansión	Potencial de Expansión
	EI	
M3	175,2	Muy Alto
	175,85	Muy Alto
M4	134,825	Muy Alto
	136,475	Muy Alto
M5	82,15	Medio
	83,35	Medio

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

## ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

Se define la consolidación como el cambio de volumen en función de tiempo, debido a la expulsión de agua y reducción de vacíos que se produce por el aumento de cargas sobre el suelo, provocando asentamientos de consolidación. En relación a los suelos cohesivos como las arcillas, ésta variación da como resultado la transformación gradual de sedimentos blandos en estratos de arcilla dura para finalmente convertirse en rocas sedimentarias (Figura 4.6.) (María Calvo, Danny Durán, 2013).

**Figura 4.28.** Estrato de Arcilla consolidada M3



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

Terzaghi (1925), sugirió por primera el ensayo de consolidación unidireccional, que se lleva a cabo dentro de un consolidómetro (Figura 4.7.), donde la muestra de suelo es colocada dentro de un anillo metálico normalizado junto con dos piedras porosas, tanto en la parte superior como inferior de la probeta, donde la carga es aplicada mediante un brazo de palanca y la compresión provocada es medida por deformímetros calibrados. Generalmente la probeta se encuentra saturada (sumergida totalmente en agua) por un periodo de 24 horas por cada carga aplicada.

**Figura 4.29.** Consolidómetro



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

### **3.1.1.6. TIPOS DE CONSOLIDACIÓN**

La consolidación es una deformación plástica en función del tiempo, se produce al aplicarse cargas a un suelo fino que se encuentra parcial o totalmente saturado.

El proceso de consolidación ocurre principalmente por la reducción de vacíos del suelo, pero también depende de ciertos factores como:

1. Grado de saturación del suelo
2. Coeficiente de permeabilidad
3. Propiedades del flujo de los poros
4. La longitud de la trayectoria que debe recorrer el flujo expulsado para encontrar el equilibrio.

**Consolidación Inicial:** se debe a la expulsión y compresión de aire contenido en los vacíos del suelo, producido por la reducción casi instantánea del volumen de masa de suelo bajo la aplicación de una carga.

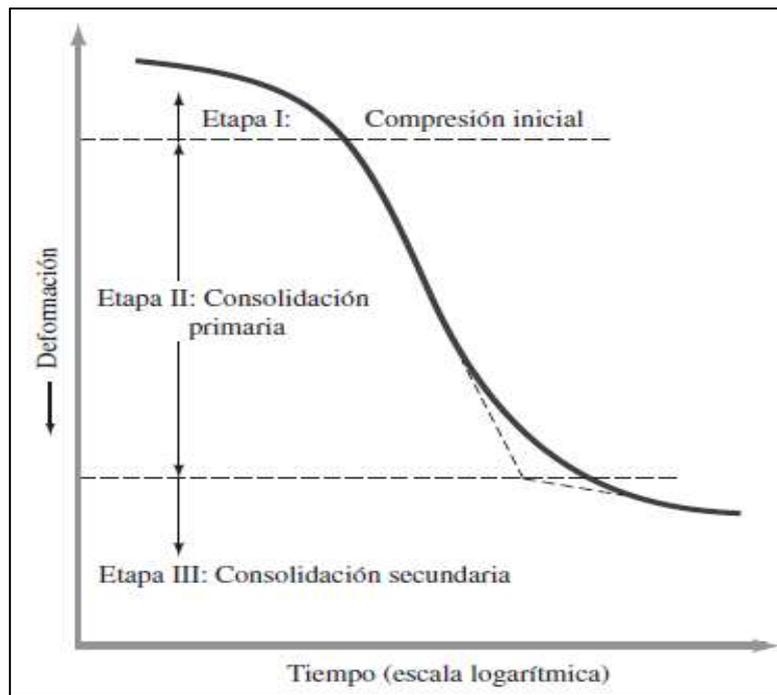
**Consolidación Primaria:** se debe a la expulsión de agua de los vacíos seguida de una transferencia de carga del agua a las partículas sólidas del suelo, producida por la aplicación de una carga permanente en un suelo saturado.

**Consolidación Secundaria:** se presenta inmediatamente después de la consolidación primaria, producida por la reducción de volumen de masa y el acomodo de la estructura interna de una muestra de suelo saturada (María Calvo, Danny Durán, 2013).

### 3.1.1.7. CURVA DE CONSOLIDACIÓN

Es la representación gráfica entre los registros de  $\log(t)$  o  $\sqrt{t}$  en el eje de las abscisas, mientras que, en el eje de las ordenadas la lectura del deformímetro que mide la deformación vertical de la muestra sometida a cargas aplicadas (Figura 4.8.) (María Calvo, Danny Durán, 2013).

**Figura 4.30.** Curva de Consolidación



Fuente: (Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 2015)

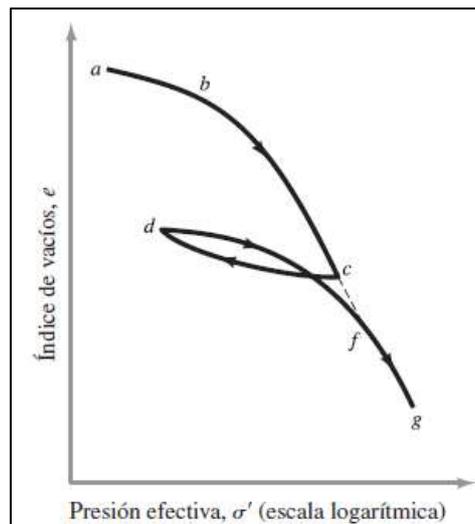
### Características de la Curva de Consolidación

1. Consolidación Inicial: Reducción de vacíos por expulsión de aire.
2. Consolidación Primaria: Reducción de Vacíos por expulsión de Agua.
3. Consolidación Secundaria: Reacomodo de partículas de la estructura interna.
4. Coeficiente de consolidación ( $C_v$ ): velocidad de consolidación, depende de la sobrecarga aplicada y la permeabilidad del suelo.

#### 3.1.1.8. CURVA DE COMPRESIBILIDAD

Es la curva que se obtiene mediante la representación gráfica de la presión actuante con cada incremento de carga en escala logarítmica en el eje de las abscisas y las correspondientes relaciones de vacíos en el eje de las ordenadas, datos obtenidos durante todo el proceso de consolidación (Figura 4.9.) (María Calvo, Danny Durán, 2013).

**Figura 4.31.** Curva de Compresibilidad



Fuente: (Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 2015)

### Características de la Curva de Compresibilidad

1. Trayecto ab: tramo de curvatura creciente.
2. Trayecto bc: Tramo Virgen, tramo recto.
3. Trayecto cd: tramo de descarga que presenta una recuperación elástica.
4. Trayecto dfg: representa el proceso de recarga.
5. Coeficiente de Compresibilidad ( $a_v$ ): pendiente de la recta tangente a la curva de compresibilidad.

$$a_v = - \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'}$$

(Ec. 4.5)

6. Pendiente del Tramo Virgen: índice de compresibilidad ( $C_c$ ).

$$C_c = \frac{e_{\text{inicial}} - e_{\text{Final}}}{\log \left( \frac{\sigma'_{\text{final}}}{\sigma'_{\text{inicial}}} \right)}$$

(Ec. 4.6)

#### 3.1.1.9. COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN

Existen dos métodos gráficos utilizados para la determinación del coeficiente de consolidación ( $C_v$ ) a partir de los ensayos de laboratorio, el primero propuesto por Casagrande y Fadum en el año de 1940 denominado “método de logaritmo de tiempo” y el segundo propuesto por Taylor en 1942 conocido

como “método de la raíz cuadrada del tiempo” (Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 2015).

### **Método del Logaritmo de tiempo**

Para la obtención del  $C_v$  a partir de una gráfica por el método de Casagrande (Figura 4.10.) se deben seguir los siguientes pasos:

1. Escoger los puntos  $t_1$  y  $t_2$  en la parte inicial de la curva cercano al eje de ordenadas, de tal manera que  $t_2 = 4t_1$ , obteniéndose la diferencia de deformaciones  $X$  entre los puntos B y C.
2. Dibujar la línea horizontal  $d_0$  (línea teórica del 0% de consolidación), a partir del punto B de manera que la distancia vertical entre el punto y la recta sea  $X$ .
3. Para obtener la deformación del 100% de consolidación se traza la tangente al tramo recto de la consolidación primaria y la asíntota del tramo final de la consolidación secundaria obteniéndose el punto de intersección A. La ordenada de este punto representa el  $d_{100}$ .
4. La ordenada y abscisa del punto D corresponden a la deformación en el 50% de consolidación primaria en un tiempo  $t_{50}$  respectivamente (Figura 4.9.).
5. Para 50% de grado de consolidación  $T_v = T_{50}$  (donde  $T_v$  es la variación del factor del tiempo con el grado de consolidación).
6. Se obtiene  $C_v$  mediante la siguiente ecuación:

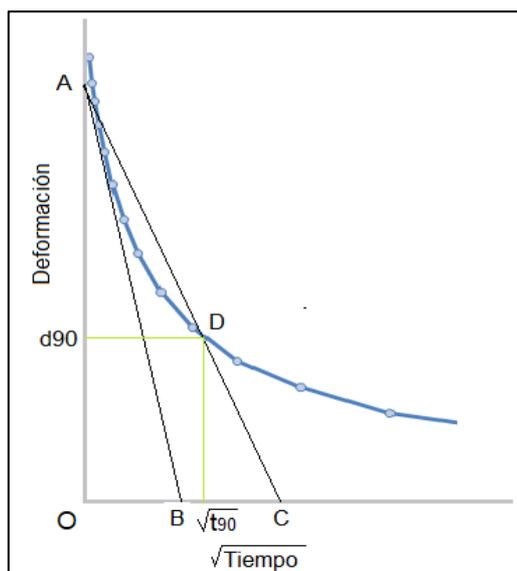
$$C_v = \frac{T_{50} \cdot H_{dr}^2}{t_{50}} \quad (\text{Ec. 4.7})$$

Donde:

$H_{dr}^2$ : Longitud promedio de drenaje durante la consolidación

$T_{50}$ : Es el factor del tiempo  $T_v$  para un 50% de grado de consolidación ( $T_{50} = 0.197$ )



**Figura 4.33.** Método de la Raíz cuadrada del tiempo para determinar  $C_v$ 

Fuente: Tesis Chicaiza Oña 2018

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos de consolidación en las muestras naturales M3, M4 y M5.

La norma utilizada para el desarrollo del ensayo es la ASTM D 2435-11 (Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading).

**Tabla 4.17.** Datos de Consolidación de muestras naturales inalteradas (Anexo1; 1.4.1.1, 1.4.1.2, 1.4.1.3; Pág. 227-268)

Muestra	Nº	W [%]	Densidad Húmeda $Y_h$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Densidad Seca $Y_s$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Relación de vacíos $e_o$	Presión Preconsolidación [Kg/cm <sup>2</sup> ]
M3	1	34,099	1,67	1,25	1,236	2,95
	2	33,307	1,63	1,22	1,277	3,10
M4	1	35,030	1,719	1,27	1,16	2,90
	2	32,430	1,758	1,33	1,069	2,50
M5	1	34,189	1,664	1,24	1,245	2,20
	2	32,595	1,692	1,28	1,182	1,90

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

Los datos de densidad húmeda y densidad seca son obtenidos de las muestras naturales que se utilizaron para realizar la consolidación.

## COMPACTACIÓN

La compactación es un proceso de consolidación que se da por eliminación de aire mediante la aplicación de energía mecánica, disminuyendo la relación de vacíos y la compresibilidad, mejorando la densidad del suelo seco y aumentando su capacidad de soportar cargas, es decir, se mejoran las propiedades mecánicas del suelo.

**Figura 4.34.** Molde con suelo compactado



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

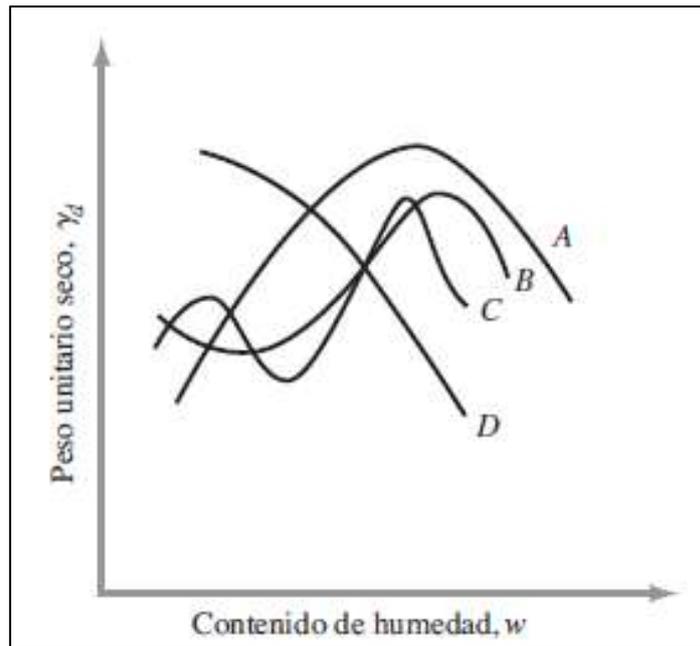
### Factores que afectan la compactación

El contenido de humedad es uno de los factores que tiene gran influencia en el grado de compactación del suelo (Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 2015), además, otros factores que afectan la compactación son los descritos a continuación:

#### Tipo de Suelo

Los parámetros como la distribución granulométrica, forma del grano, el peso específico de sólidos, la cantidad y el tipo de minerales presentes en el suelo influyen en la unidad de peso seco máxima y el contenido de humedad óptimo. De acuerdo a esto se pueden observar diferentes tipos de curvas de compactación (Figura 4.13.) (Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 2015).

**Figura 4.35.** Tipos de Curvas de Compactación



Fuente: (Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 2015)

**Tipo A:** presentan un solo pico y normalmente son suelos con límites líquidos entre 30-70.

**Tipo B:** presentan un pico y medio, comúnmente en suelos con límites líquidos menores a 30.

**Tipo C:** tienen un doble pico y al igual que las curvas de tipo B se presentan en suelos con LL menores a 30.

**Tipo D:** son conocidas como extrañas, puesto que no tienen un pico definido y se presentan en suelos con LL superior a los 70.

### Efectos del Esfuerzo o Energía de Compactación

La curva de compactación se afecta directamente por la energía aplicada puesto que, al ser aumentada, la densidad seca máxima se incrementa mientras que el contenido de humedad óptimo disminuye. Se define la energía de compactación por unidad de volumen de suelo como:

$$E = \frac{N \cdot n \cdot W \cdot h}{V}$$

(Ec. 4.9)

Donde:

E: Energía de Compactación

N: Número de Golpes

n: Número de capas

W: Peso del martillo

h: Altura de caída del martillo

V: Volumen del molde

El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso unitario seco, además es importante tener en cuenta que la energía de compactación no es directamente proporcional al grado de compactación. (Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 2015)

### 3.1.1.10. PROCTOR MODIFICADO

En el ensayo proctor modificado, se compacta el suelo en un molde con un volumen de  $964\text{cm}^3$ , con un diámetro de 10.20cm (Figura 4.12.). Esta prueba se lleva acabo con dosificaciones variables de agua, para luego ser compactada en cinco capas con 25 golpes de un martillo cuyo peso es 4.5kg y a una altura de caída de 46cm según las normas ASTM D 1557. Para cada dosificación se obtiene la densidad húmeda del suelo ( $Y_h$ ) mediante la siguiente ecuación:

$$Y_h = \frac{W}{V_m} \quad (\text{Ec. } 4.10)$$

Donde:

W: Peso del suelo compactado [gr]

$V_m$ : Volumen del molde [ $\text{cm}^3$ ]

Con el contenido de humedad determinado en el laboratorio dependiendo de las dosificaciones de agua y la densidad húmeda se puede calcular la densidad seca ( $Y_s$ ) como:

$$Y_h = Y_s * \left( 1 + \frac{W [\%]}{100} \right) \qquad Y_s = \frac{Y_h}{1 + \frac{W [\%]}{100}} \quad (\text{Ec. 4.11})$$

4.11)

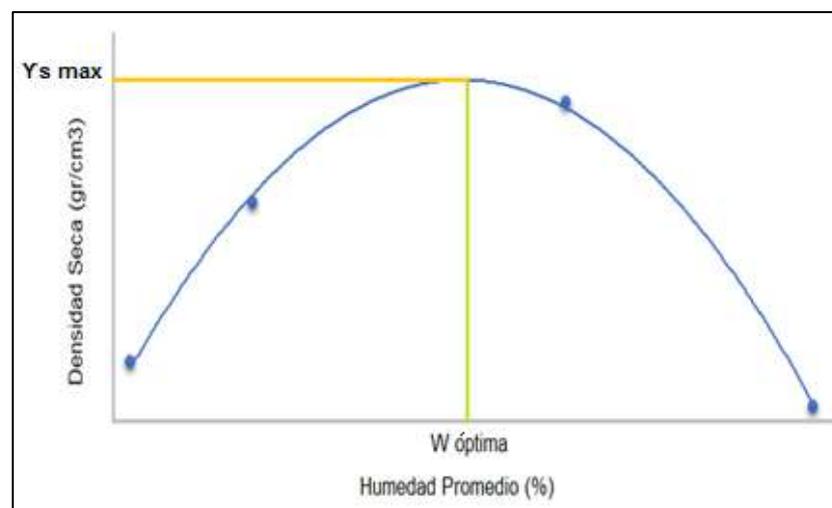
Donde:

$Y_h$ : Densidad húmeda [ $\text{gr}/\text{cm}^3$ ]

$W$ : Contenido de humedad [%]

Al trazar los valores determinados de la densidad seca en función de los contenidos de humedad se obtiene la curva de compactación, con la cual se obtiene la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo de la muestra de suelo ensayada (Figura 4.14.). Debido al aumento en la energía de compactación en el ensayo Proctor modificado con respecto al Proctor estándar, la densidad seca máxima aumenta mientras que el contenido de humedad óptimo disminuye.

**Figura 4.36.** Curva de Compactación



Fuente: Tesis Chicaiza Oña 2018

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de proctor modificado de las muestras naturales ensayadas.

La norma utilizada para el desarrollo del ensayo es la ASTM D 1557-12 (Standard Test Methods for laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort ( $56.000\text{ft}\cdot\text{lbf}/\text{ft}^3$  ( $2.700\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ ))).

**Tabla 4.18.** Datos de Compactación de muestras naturales inalteradas (Anexo 1; 1.5.1, 1.5.2, 1.5.3; Pág. 332-334)

Muestra	Húmeda Óptima $W_{\text{óptimo}}$ [%]	Den. Seca Máxima $Y_{s_{\text{max}}}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]
M3	25,36	1,526
M4	19,66	1,640
M5	17,56	1,634

Fuente: (Chicaiza, Oña 2018)

## PERMEABILIDAD

Se define la permeabilidad como la capacidad de permitir que un líquido fluya a través de la estructura de una masa de suelo por efecto del gradiente hidráulico, dependiendo de las distribuciones de los poros, es decir se rige por la Ley de Darcy (Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 2015).

El coeficiente de permeabilidad ( $k$ ) no es una constante, depende del tipo de suelo. A continuación, se muestran valores típicos de  $k$  para diferentes muestras de suelo:

**Tabla 4.19.** Valores de  $k$  para diferentes tipos de suelo

Tipo de Suelo	$k$ [cm/s]
Grava Limpia	100-1
Arena Gruesa	1,0 - 0,01
Arena Fina	0,01 - 0,001
Arcilla Limosa	0,001 - 0,00001
Arcilla Limosa	<0,000001

Fuente: (Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 2015)

### 3.1.1.11. COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD

El coeficiente de permeabilidad es la medida de la velocidad con la que un fluido atraviesa una masa de suelo cuando se encuentra sujeta a un gradiente hidráulico unitario. Se expresa generalmente a una temperatura de 20°C con la

finalidad de establecer un valor comparativo cuando se conoce un valor  $k_t$  a cualquier temperatura, de esta forma el valor de  $K_{20}$  se obtiene mediante la ecuación:

$$k_{20} = \frac{n_T}{n_{20}} * k_t \quad (\text{Ec. 4.12})$$

Donde:

$k_{20}$ : Coeficiente de permeabilidad a 20°C

$k_t$ : Coeficiente de permeabilidad a T°C

$n_T/n_{20}$ : Razón de viscosidad dinámica del agua a temperaturas T° y 20°C (Tabla 4.6.)

**Tabla 4.20.** Valores de razones de viscosidades dinámicas del agua

T [°C]	$n_T/n_{20}$	T [°C]	$n_T/n_{20}$
15	1,135	23	0,931
16	1,106	24	0,910
17	1,077	25	0,889
18	1,051	26	0,869
19	1,025	27	0,850
20	1,000	28	0,832
21	0,976	29	0,814
22	0,953	30	0,797

Fuente: (Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 2015)

Para la determinación del coeficiente de permeabilidad en laboratorio se usan dos métodos: permeámetro de carga constante y permeámetro de carga variable.

### 3.1.1.12. PERMEÁMETRO DE CARGA VARIABLE

Para este ensayo de laboratorio se usa la norma ASTM D 2434, se aplica a suelos poco permeables, es decir suelos finos como arenas finas, limos, limos orgánicos e inorgánicos y arcillas, el procedimiento para la determinación de  $k$  es similar al del permeámetro con carga constante a diferencia que, en este caso la carga hidráulica es variable y la cantidad de agua que atraviesa la muestra se determina por la diferencia de niveles en el tubo de carga (Figura 4.15.) (Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 2015).

$$k = 2.303 * \frac{a \cdot L}{A \cdot t} * \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (\text{Ec. 4.13})$$

Donde:

a: Área del tubo de carga

L: Longitud de la muestra de suelo

A: Área de la sección transversal de la muestra

t: Tiempo transcurrido

$h_1$ : Carga hidráulica inicial

$h_2$ : Carga Hidráulica final

**Figura 4.37.** Permeámetro de carga variable



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

En la siguiente tabla se muestran los resultados del ensayo de permeabilidad de carga variable para las muestras naturales M3, M4 y M5 inalteradas.

La norma utilizada para el desarrollo del ensayo es la ASTM D 2434 (Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)).

**Tabla 4.21.** Datos de Permeabilidad de muestras naturales inalteradas (Anexo 1; 1.6.1.1, 1.6.1.2, 1.6.1.3; Pág. 335-339)

Muestra	Nº Probeta	Contenido de Humedad W [%]	Densidad Húmeda Y <sub>h</sub> [gr/cm <sup>3</sup> ]	Coef. Permeabilidad K <sub>20</sub> [cm/seg]	K <sub>20</sub> Promedio
M3	1	33.72	1,65	4,9338E-06	4,227E-06

	2	33.14	1,63	3,5206E-06	
M4	1	33.30	1,74	1,1519E-06	1,421E-06
	2	34.15	1,73	1,691E-06	
M5	1	34.19	1,65	2,4041E-07	1,907E-07
	2	34.86	1,67	1,4096E-07	

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

## CORTE DIRECTO

El ensayo de corte directo se realizó con la norma ASTM D3080-11 y tiene como objetivo principal determinar la resistencia del suelo, para ésto, se toma una muestra que sirve para ser sometida a fatigas y/o deformaciones que simulen las existentes en el terreno como producto de los esfuerzos internos del suelo o cargas aplicadas externamente.

“La resistencia cortante del suelo es la resistencia interna por unidad de área que la masa de suelo puede ofrecer a la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano en su interior” (Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 2015).

La resistencia al cortante del suelo está influida por varios factores, entre los más importantes se encuentran la cohesión y la fricción de las partículas de suelo, además del contenido de humedad y la presión de agua interna de la masa de suelo (Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 2015).

Al aplicar la fuerza horizontal, se van midiendo las deformaciones y con estos valores es posible graficar la tensión de corte (T) en función de la deformación ( $\epsilon$ ) en el plano de tensión de corte. De la gráfica es posible tomar el punto máximo de tensión de corte como la resistencia al corte del suelo.

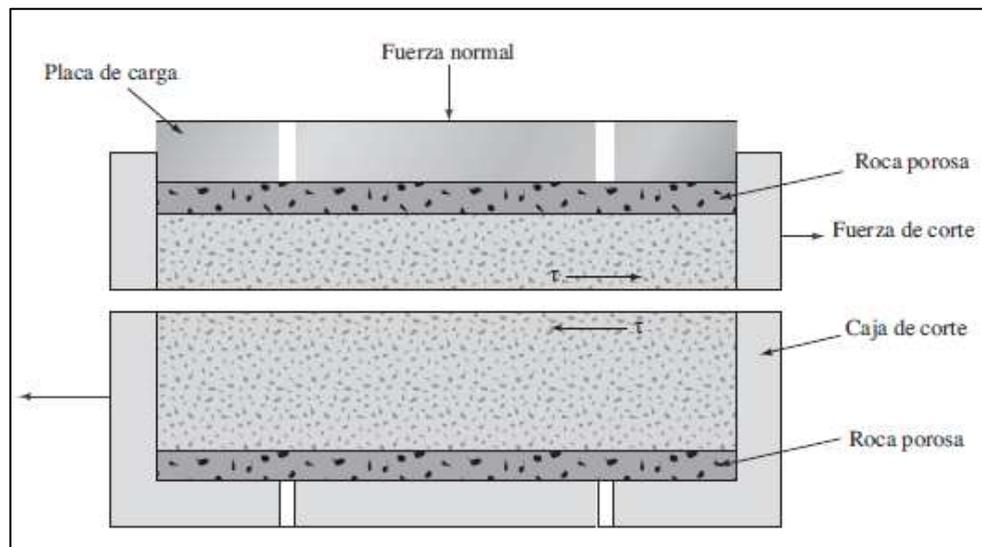
**Figura 4.38.** Equipo para ensayo de corte directo



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

Cada una de las muestras utilizadas es colocada en la máquina de corte, la cual reproduce las fuerzas actuantes como se representa en el siguiente gráfico:

**Figura 4.39.** Diagrama de prueba del ensayo de corte directo



Fuente: (Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 2015)

**Figura 4.40.** Plano de falla de una muestra después de ser ensayada



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

Mohr (1900), presentó una teoría para la ruptura en los materiales. La teoría sostiene que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, y no de cualquier esfuerzo máximo normal o cortante solo. Por lo tanto, la relación funcional entre el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante en un plano de falla se puede expresar en la forma:

$$T = f(\sigma) \quad (\text{Ec. 4.14})$$

Donde:

T : Esfuerzo cortante en el plano de falla

$\sigma$  : Esfuerzo normal en el plano de falla

La envolvente de falla definida por la ecuación 4.15. Para la mayoría de los problemas de mecánica de suelos, es suficiente aproximar el esfuerzo cortante sobre el plano de falla a una función lineal del esfuerzo normal (Coulomb, 1776).

$$T = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (\text{Ec. 4.15})$$

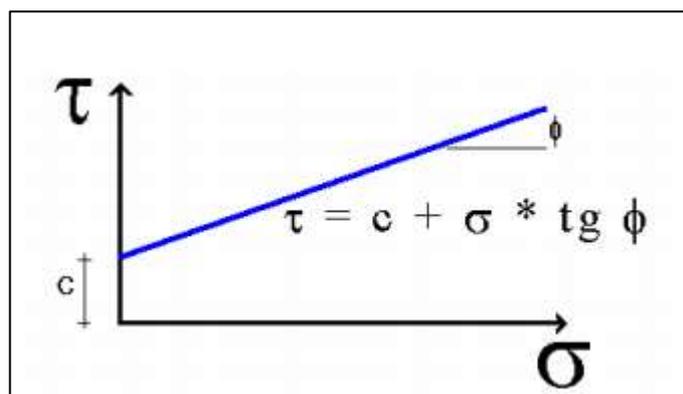
Donde:

c : Cohesión

$\phi$  : Ángulo de fricción

$\sigma$  : Esfuerzo normal

Los valores de T se llevan a un gráfico en función del esfuerzo normal ( $\sigma$ ), obteniendo la recta intrínseca (Figura 4.19.), donde T va como ordenada y  $\sigma$  como abscisa. El ángulo que forma esta recta con el eje horizontal es el ángulo de fricción  $\phi$  y el intercepto con el eje T es la cohesión c.

**Figura 4.41.** Envoltente de falla de corte directo

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

En la siguiente tabla se muestran los resultados del ensayo de corte directo para las muestras naturales M3, M4 y M5 inalteradas.

La norma utilizada para el desarrollo del ensayo es la ASTM D 3080-11 (Standard Test Method for Direct Shear Test Of Soils Under Consolidated Drained Conditions).

**Tabla 4.22.** Datos de Corte Directo de muestras naturales inalterada (Anexo1; 1.7.1.1, 1.7.1.2, 1.7.1.3; Pág. 353- 361)

Muestra	Contenido de Humedad $W_{\text{Promedio}}$ [%]	Densidad Húmeda $Y_{h\text{Promedio}}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Densidad Seca $Y_s$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Ángulo de Fricción $\phi$ [°]	Cohesión $c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]
M3	33,44	1,65	1,24	30,96	0,23
M4	32,33	1,80	1,36	18,26	0,30
M5	33,05	1,69	1,27	18,26	0,51

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

Los datos de la densidad seca son calculados a partir de la densidad húmeda obtenida del ensayo de corte directo mediante la ecuación 4.11.

## ANÁLISIS MINERALÓGICO DEL SUELO

Anteriormente se ha descrito una síntesis explicativa sobre las principales características de los minerales más comunes encontrados en las arcillas que

tienen mediano y alto potencial de expansión; investigaciones anteriores han demostrado que minerales como la caolinita, illita y montmorillonita están presentes en mayores cantidades dentro de suelos considerados como expansivos. Con el fin de realizar un contraste con la mencionada información, y con ayuda de un análisis previo, en el presente trabajo se planteó utilizar muestras de arcillas potencialmente expansivas provenientes de diferentes zonas de la Provincia de Manabí en la cuales se realizó un análisis mineralógico con el fin de conocer las propiedades mineralógicas que éstas presentan. Para esto las muestras de arcillas M3, M4 y M5 fueron enviadas y analizadas por el Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional (DEMEX-EPN), el cual está capacitado técnica e instrumentalmente para realizar dos de los métodos más comunes descritos posteriormente. Además, se realizó el análisis de una muestra adicional denominada M7 correspondiente a ceniza de cascarilla de arroz, material fino obtenido por tamizado, utilizando el tamiz No. 200.

El primer método de análisis es el conocido como método directo o Difracción de Rayos X, el cual, mediante procesamiento por separado de las muestras inalteradas correspondientemente permite identificar las fases cristalinas o minerales presentes; en los resultados que se obtienen de este análisis hay que tomar en consideración que las cantidades y tipos de minerales que se presentan como resultados de dicho análisis pueden definir las propiedades físico-químicas, así como también pueden ser factores causantes de variaciones en la realización de ensayos que determinan las propiedades mecánicas de las muestras.

El segundo método denominado Fluorescencia de Rayos X, es una técnica espectroscópica que utiliza emisión secundaria o fluorescente de radiación X producida al excitar un tipo de muestra con una fuente de radiación X. De manera simplificada se trata de un análisis químico elemental que da como resultados valores tanto cualitativos como cuantitativos de los elementos químicos presentes, mismos que pueden ser representados porcentualmente tanto para cada elemento como para los óxidos obtenidos a partir del cálculo estequiométrico.

Los dos análisis fueron realizados conjuntamente con las muestras antes mencionadas tomando en cuenta las bases teóricas correspondientes y dando como resultado lo que se presenta a continuación:

### Análisis de Difracción de Rayos X

El análisis de difracción de rayos X se desarrolló basado en la determinación de los compuestos con cristalización definida presentes en cada una de las muestras; empleando un Difractómetro D8 ADVANCE y un programa llamado Diffrac plus (EVA Y TOPAS), con lo cual se obtuvo resultados de calificación y semi-cuantificación.

Los resultados se presentan a continuación:

**Tabla 4.23.** Resultados del análisis mineralógico utilizando Difracción de Rayos X (Anexo 2; 2.1, Pág. 390-396)

Mineral	Fórmula	Muestra 3 (contenido en [%])	Muestra 4 (contenido en [%])	Muestra 5 (contenido en [%])
Caolinita	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	30	25	15
Montmorillonita	$(\text{Na},\text{Ca})_{0,3}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	2	2	5
Cuarzo	$\text{SiO}_2$	16	20	25
Grupo Plagioclasas (albita, andesina, anortita)	$(\text{Na},\text{Ca})\text{Al}(\text{Si},\text{Al})\text{Si}_2\text{O}_8$	13	15	24
Diópsido	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	12	13	11
Mordenita	$(\text{Na}_2,\text{Ca},\text{K}_2)_4(\text{Al}_8\text{Si}_{40})\text{O}_{96}\cdot 28\text{H}_2\text{O}$	7	8	9
Muscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	6	5	3
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	5	3	3
Gypsun	$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	5	2	2
Cordierita	$\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$	2	1	1
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1	1	1
Ferropargasita	$\text{NaCa}_2\text{Fe}^{2+}_4\text{AlSi}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	1	4	2
Crossita	$\text{Na}_2(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{Al},\text{Fe})_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	1	1	1

Fuente: (DEMEX-EPN, 2017)

Como se puede visualizar en los resultados obtenidos (Tabla 4.13.), se observa la presencia de minerales como caolinita y montmorillonita en cada una de las muestras de arcilla analizadas, las cantidades son representativas en mayor porcentaje de caolinita en la muestra M3 y M4, mientras que, en la muestra M5 existe una cantidad menor de caolinita con un pequeño aumento de

montmorillonita; con la presencia de estos minerales de carácter expansivo se puede corroborar que las muestras poseen un potencial expansivo considerable, el cual tendrá una mejor percepción si se observan los resultados obtenidos del ensayo de índice de expansión (Tabla 4.6.). Además, en el análisis de la muestra M7 correspondiente a la ceniza de cascarilla de arroz se evidenció la presencia de un alto contenido de material amorfo por lo cual no se pudo cuantificar la mineralogía debido a que el límite de detección del equipo utilizado es del 1% en compuestos con cristalización definida.

Si se toma únicamente los porcentajes correspondiente a los minerales representativos de características expansivas se puede observar tendencias en cuanto a valores de actividad y potencial expansivo de cada una de las muestras.

En la investigación realizada por Jamsawang P., Nuansrithong N., Voottiprues P., Songpiriyakij S.y Jongpradist P. (2017), definieron tres clases de arcillas de acuerdo a la actividad para clasificar el potencial de expansión: inactivas y potencial expansivo bajo para actividades menores a 0.75; normalmente activas y potencial expansivo normal para valores entre 0.75 a 1.25 y activas con potencial expansivo alto para valores mayores a 1.25 (Jamsawang P.,Nuansrithong N.,Voottipruex P., Songpiriyakij S., Jongpradist P., 2017).

**Tabla 4.24.** Análisis del potencial expansivo según los resultados de difracción de rayos X

Muestra	Mineral Representativo	Porcentaje [%]	Actividad referencial	Actividad
M3	Montmorillonita	2	>1.25	Activas
M4	Montmorillonita	2	>1.25	Activas
M5	Montmorillonita	5	>1.25	Activas

Fuente: (DEMEX-EPN, 2017)

Para tener un análisis más profundo entre actividad y mineralogía de las muestras se debería considerar un estudio sobre las propiedades de todos los minerales que componen cada una de éstas, y determinar cuál es su incidencia en relación a la reducción o aumento del potencial de expansión en las muestras.

### Análisis de Fluorescencia de Rayos X

Este procedimiento se basa en un análisis químico de las muestras, el cual se desarrolló empleando un equipo de Fluorescencia de rayos X S8 Tiger y el programa Spectra Pluss, obteniendo valores porcentuales de los elementos y óxidos presentes en cada una de las muestras.

Los resultados se los presenta a continuación:

**Tabla 4.25.** Resultados de cantidades de elementos químicos encontrados en las muestras, utilizando análisis de fluorescencia de rayos X (Anexo 2; 2.2, Pág. 397-399)

Elemento	Contenido en %			
	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 7
Si	26.7	22.45	23.32	34.13
Al	9.33	7.3	7.36	0.08
Fe	4.82	3.94	3.5	0.07
Na	1.47	1.47	1.08	0.12
K	1.43	0.83	0.86	1.41
Ca	1.24	3.21	2.42	0.3
Mg	1.03	0.82	0.8	-
Ti	0.41	0.32	0.32	-
P	0.05	0.09	0.06	0.23
Mn	-	-	0.01	0.05
S	0.05	0.34	0.05	0.16

Fuente: (DEMEX-EPN, 2017)

**Tabla 4.26.** Resultados de cantidades de óxidos encontrados en las muestras, utilizando análisis de fluorescencia de rayos X (Anexo 2; 2.2, Pág. 397-399)

Óxido	Contenido en %			
	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 7
SiO <sub>2</sub>	57.13	48.03	49.88	73.02
AlO <sub>3</sub>	17.63	13.79	13.98	0.15

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.89	5.63	5.01	0.1
Na <sub>2</sub> O	1.96	1.98	1.46	0.16
K <sub>2</sub> O	1.74	4.49	1.03	1.7
CaO	1.73	0.99	3.39	0.41
MgO	1.71	1.36	1.33	-
TiO <sub>2</sub>	0.68	0.53	0.53	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.21	0.13	0.54
Mn	-	-	0.01	0.08

Fuente: (DEMEX-EPN, 2017)

Se puede observar que los elementos que están en mayor cantidad para la muestra M3, M4 y M5 son el Silicio, Aluminio y Hierro; tomando en cuenta que para este tipo de muestras los porcentajes considerables varían entre 22.45% y 26.7% en cuanto corresponde al elemento de Silicio, de 7.3% a 9.33% correspondiente al aluminio y de 3.5% a 4.82% en cuanto al hierro (Tabla 4.15.). Éstos elementos presentados como óxidos causan que los mayores porcentajes pertenezcan al SiO<sub>2</sub>, AlO<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, óxidos con características beneficiosas ya que promueven una mayor posibilidad de control de la expansión, proceso experimental que para el presente caso, se desarrolló con la adición de ceniza de cascarilla de arroz que actúa como un agente estabilizador.

En cuanto a la muestra M7 correspondiente a la ceniza de cascarilla de arroz, se puede visualizar que el elemento absolutamente predominante con respecto a otros es el Silicio con un 34.13% (Tabla 4.15.), valor que conlleva a tener una cantidad muy elevada de óxido de dicho elemento (SiO<sub>2</sub>) con un valor 73.02% (Tabla 4.16.). Mustafa Dayioglu, Bora Cetinb, Soonkie Nam (2017) mencionan que las cantidades de CaO, SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presentes en cualquiera de las sustancias utilizadas como agentes estabilizadores de la expansión son muy importantes ya que pueden afectar directamente a la mineralogía y a las propiedades mecánicas de los suelos expansivos, sin embargo, no hay suficientes estudios enfatizados en correlacionar estos factores con las afectaciones antes mencionadas ya que existe una amplia variedad de suelos expansivos que de igual forma poseen una amplia y variada caracterización. Finalmente, el mismo estudio concluyó que los suelos estabilizados con

agentes que presentan altos contenidos de CaO, CaO/SiO<sub>2</sub>, CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y CaO/(SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) tienen mayor capacidad de disminuir el potencial de expansión y aumentar la resistencia a la compresión no confinada de los suelos expansivos.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este análisis, la presencia de alto contenido de dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) en las diferentes dosificaciones es un factor importante en cuanto a la modificación de las propiedades mecánicas y principalmente de la reducción del potencial expansivo, esto se puede ver reflejado con mayor claridad en los resultados de los diferentes ensayos y principalmente con la obtención del índice de expansión.

### **DOSIFICACIONES CON CENIZA DE CASCARRILLA DE ARROZ (C.C.A) COMO AGENTE EXTABILIZANTE (10%, 20% y 30%)**

Después de realizado los ensayos con las muestras naturales se procede a dosificarlas con tres porcentajes en peso de ceniza de cascarilla de arroz (C.C.A.), para poder determinar y analizar cómo van modificando sus propiedades mecánicas y reduciendo su potencial de expansión en función del agente estabilizante.

Para el desarrollo de los ensayos de las muestras con las respectivas dosificaciones, se toma en cuenta que para remoldear las muestras se trabajará con el 95% de la densidad máxima seca, parámetro que se obtuvo en el ensayo de proctor modificado realizado anteriormente (Tabla 4.8.).

### **DENSIDAD DE SÓLIDOS**

Se procedió a realizar una mezcla en peso de ceniza de cascarilla de arroz como agente estabilizante en porcentajes de 10, 20 y 30% en las muestras M3, M4 y M5, obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 4.27.** Densidad de Sólidos (Gs) de muestras dosificadas (Anexo 1; 1.2.2.1, 1.2.2.2, 1.2.2.3; Pág. 154, 157, 160, 163, 166, 169, 172, 175, 178)

Muestra	% C.C.A.	Gs	Unidad
M3	10	2,536	gr/cm <sup>3</sup>
	20	2,467	gr/cm <sup>3</sup>
	30	2,409	gr/cm <sup>3</sup>
M4	10	2,518	gr/cm <sup>3</sup>
	20	2,471	gr/cm <sup>3</sup>
	30	2,396	gr/cm <sup>3</sup>
M5	10	2,553	gr/cm <sup>3</sup>
	20	2,509	gr/cm <sup>3</sup>
	30	2,433	gr/cm <sup>3</sup>

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

## LÍMITES DE ATTERBERG

Se mezcló porcentajes de 10, 20 y 30% en peso de ceniza de cascarilla de arroz en las muestras naturales con la finalidad de poder analizar el cambio en la plasticidad de las mismas, los resultados se presentan a continuación:

**Tabla 4.28.** Límites de Atterberg de las muestras dosificadas (Anexo 1; 1.1.2.1, 1.1.2.2, 1.1.2.3; Pág. 125-142)

Muestra	% C.C.A.	Nº Muestra	Límites De Atterberg					
			LL [%]	LL [%] Prom	LP [%]	LP [%] Prom	IP [%]	IP [%] Prom
M3	10%	1	75	75,5	40	41	35	34,5
		2	76		42		34	
	20%	1	86	86,5	57	55,5	29	31
		2	87		54		33	
	30%	1	65	64	38	38	27	26
		2	63		38		25	

M4	10%	1	66	65	32	33	34	32
		2	64		34		30	
	20%	1	66	66,5	43	42	23	24,5
		2	67		41		26	
	30%	1	71	72,5	59	59,5	12	13
		2	74		60		14	
M5	10%	1	60	61	28	29,5	32	31,5
		2	62		31		31	
	20%	1	55	56	29	29	26	27
		2	57		29		28	
	30%	1	55	59,5	41	40,5	14	19
		2	64		40		24	

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

## ÍNDICE DE EXPANSIÓN

Uno de los ensayos más importantes para determinar el potencial de expansión del suelo es el ensayo de índice de expansión, por tal motivo se realizaron las respectivas dosificaciones y los ensayos correspondientes en las muestras para analizar la disminución de expansión en las muestras con el aumento del agente estabilizante (C.C.A).

**Tabla 4.29.** Índice y Potencial de Expansión de muestras dosificadas (Anexo 1; 1.3.2.1, 1.3.2.2, 1.3.2.3; Pág. 191-226)

Muestra	% C.C.A.	Índice de Expansión	Potencial de Expansión
		EI	
M3	10	129,25	Alto
		129,125	Alto
	20	102,575	Alto
		101,9	Alto
	30	76,05	Medio
		74,425	Medio
M4	10	118,65	Alto

	20	118,1	Alto
		88,025	Medio
		86,475	Medio
	30	53,325	Medio
		51,575	Medio
	M5	10	77,65
75,4			Medio
20		50,95	Medio
		51,325	Medio
30		30,9	Bajo
		26,975	Bajo

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

## ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

Las muestras dosificadas fueron sometidas al ensayo de consolidación con la finalidad de analizar la presión de preconsolidación de las mismas, además de analizar su expansión mediante la variación de la relación de vacíos de carga y su recuperación al momento de descarga.

**Tabla 4.30.** Datos de Consolidación de las muestras dosificadas (Anexo 1; 1.4.2.1, 1.4.2.2, 1.4.2.3; Pág. 269-331)

Muestra	% C.C.A.	Densidad Húmeda Yh [gr/cm <sup>3</sup> ]	Densidad Seca Ys [gr/cm <sup>3</sup> ]	Relación de vacíos e <sub>o</sub>	Presión Preconsolidación [Kg/cm <sup>2</sup> ]	Índice Compresibilidad Cc	Índice Abultamiento Cs
M3	10	1,80	1,44	0,767	2,20	0,46	0,030
	20	1,78	1,42	0,740	2,70	0,54	0,032
	30	1,77	1,41	0,708	1,80	0,38	0,027
M4	10	1,95	1,63	0,545	1,60	0,39	0,027
	20	1,82	1,52	0,624	2,40	0,40	0,024
	30	1,80	1,51	0,589	1,00	0,44	0,021
M5	10	1,845	1,56	0,635	2,50	0,36	0,019
	20	1,80	1,53	0,639	2,90	0,32	0,015
	30	1,78	1,51	0,607	2,20	0,35	0,016

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

## PERMEABILIDAD

Para realizar un análisis de reducción de la permeabilidad del suelo en las muestras dosificadas, se procedió a realizar el ensayo con dosificaciones del 10, 20 y 30% en peso de ceniza de cascarilla de arroz, obteniendo como resultados lo siguiente:

**Tabla 4.31.** Coeficiente de Permeabilidad de muestras dosificadas (Anexo 1; 1.6.2.1, 1.6.2.2, 1.6.2.3, Pág. 341-352)

Muestra	% CCA	Nº Muestra	Contenido de Humedad W [%]	Permeabilidad			
				kt (cm/seg)	Kt Prom	k20 (cm/seg)	k20 Prom
M3	10%	1	25.37	1,3023E-08	1,300E-08	1,3683E-08	1,366E-08
		2	25.40	1,2982E-08		1,3640E-08	
	20%	1	24.97	NO PERMEABLE			
	30%	1	24.37	NO PERMEABLE			
M4	10%	1	19.72	1,7369E-08	1,734E-08	1,8249E-08	1,822E-08
		2	19.63	1,7308E-08		1,8185E-08	
	20%	1	19.58	NO PERMEABLE			
	30%	1	19.23	NO PERMEABLE			
M5	10%	1	17.70	2,6068E-08	2,567E-08	2,7389E-08	2,697E-08
		2	17.76	2,5279E-08		2,6560E-08	
	20%	1	16.93	NO PERMEABLE			
	30%	1	18.32	NO PERMEABLE			

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

## CORTE DIRECTO

El ensayo de corte directo se realizó a las muestras dosificada con la finalidad de poder analizar y comparar la disminución o aumento del ángulo de fricción del suelo, los resultados obtenidos de los ensayos realizados con las dosificaciones del 10, 20 y 30% en peso de ceniza de cascarilla de arroz son los siguientes:

**Tabla 4.32.** Cohesión y ángulo de fricción de las muestras dosificadas (Anexo 1; 1.7.2.1, 1.7.2.2, 1.7.2.3; Pág. 362-388)

Muestra	% C.C.A	Nº Muestra	Contenido Humedad $W_{Promedio}$ [%]	Densidad Húmeda $Y_{hPromedio}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Densidad Seca $Y_s$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Ángulo de Fricción $\phi$ [°]	Cohesión $c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]
M3	10%	1	25,39	1,8	1,44	45,57	2,95

		2					
	20%	1	25,52	1,78	1,42	53,47	2,3
		2					
	30%	1	25,51	1,77	1,41	59,39	1,9
		2					
M4	10%	1	19,62	1,95	1,63	37,23	2,45
		2					
	20%	1	19,59	1,82	1,52	43,53	2,2
		2					
	30%	1	19,36	1,8	1,51	50,19	1,9
		2					
M5	10%	1	17,62	1,83	1,56	39,01	2,33
		2					
	20%	1	17,59	1,8	1,53	46,94	2,03
		2					
	30%	1	17,57	1,78	1,51	53,47	1,74
		2					

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

## CAPITULO V

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### CLASIFICACIÓN DEL SUELO (S.U.C.S)

Para la clasificación del suelo se utilizó el sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S), norma ASTM D 2487-17 (Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes), que permite clasificar suelos minerales y suelos organominerales basándose en la determinación de características del suelo como: tamaño de partícula, límite líquido e índice de plasticidad.

En este sistema de clasificación se utilizan símbolos para identificar los diferentes grupos de suelos. Letras como G o S para determinar grava y arena correspondientemente, es decir, para clasificar suelos de grano grueso con un porcentaje pasante menor al 50% del tamiz No. 200.

Letras como M para limos inorgánicos, C para arcillas inorgánicas y O para arcillas y limos orgánicos, es decir, suelos de grano fino con un porcentaje pasante de 50% del tamiz No. 200. Además, se utiliza el símbolo Pt, para nombrar como turbas, lodo y suelos con alto contenido orgánico.

Acompañado de los símbolos anteriores se colocan letras que identifican a la plasticidad del suelo dependiente del límite líquido:

L: baja plasticidad ( $LL < 50$ )

H: alta plasticidad ( $LL > 50$ )

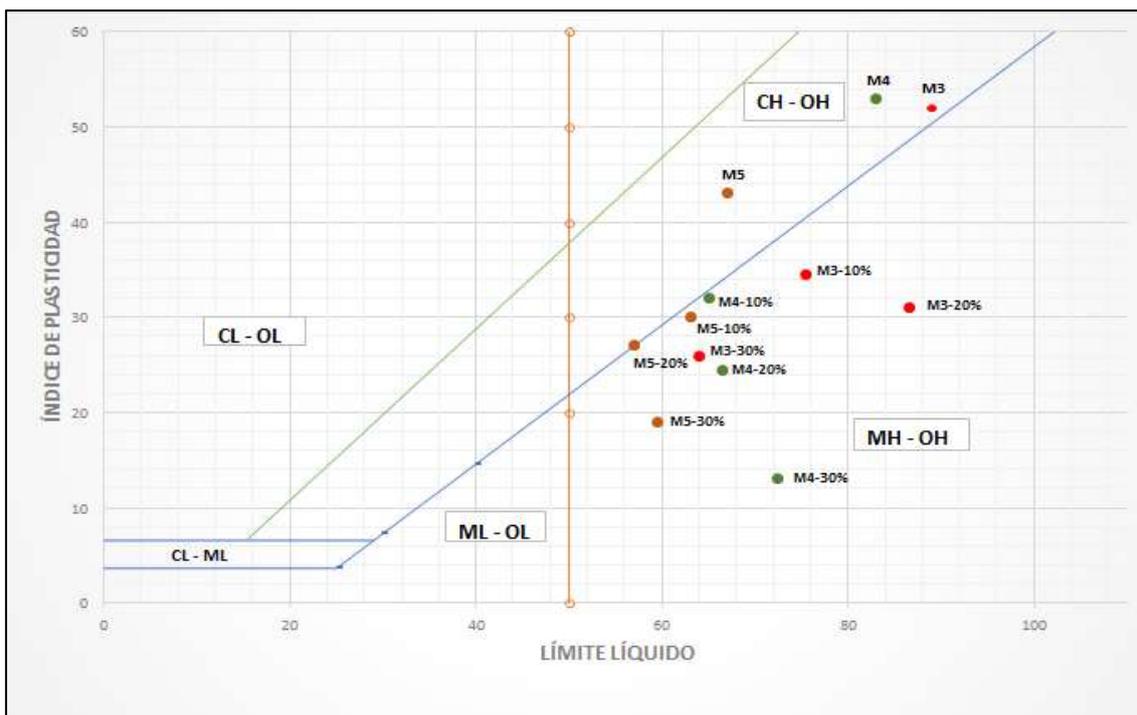
Para la clasificación de las muestras estudiadas se utilizará el límite líquido y el índice de plasticidad, llevando los valores obtenidos a la carta de plasticidad (Figura 5.1) y así, determinar el tipo de suelo al que corresponden como se muestra en la tabla a continuación:

**Tabla 5.33.** Clasificación S.U.C.S. de las muestras a diferentes porcentajes (Anexo 1; 1.1, 1.2; Pág. 122-178)

Muestra	% C.C.A.	W [%]	LL [%] prom	LP [%] prom	IP [%] prom	% Grava	% Arena	% Finos	% Arcilla	S.U.C.S
M3	0	20	89	37	52	0,00	6,80	93,10	45,16	MH-CH
	10	0	75,5	41	34,5	0,00	6,10	93,80	41,80	MH
	20	0	86,5	55,5	31	0,00	5,50	94,50	37,90	MH
	30	0	64	38	26	0,00	4,80	95,10	33,19	MH
M4	0	20	83	30	53	0,00	0,30	99,10	51,08	CH
	10	0	65	33	32	0,00	0,20	99,20	47,55	MH
	20	0	66,5	42	24,5	0,00	0,20	99,30	42,50	MH
	30	0	72,5	59,5	13	0,00	0,20	99,40	38,00	MH
M5	0	15	67	24	42	0,00	4,10	95,70	49,05	CH
	10	0	61	29,5	31,5	0,00	3,70	96,10	45,91	MH
	20	0	56	29	27	0,00	3,20	96,50	41,12	MH
	30	0	59,5	40,5	19	0,00	2,80	97,00	36,55	MH

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

**Figura 5.42.** Ubicación de los puntos de análisis en la carta de plasticidad



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

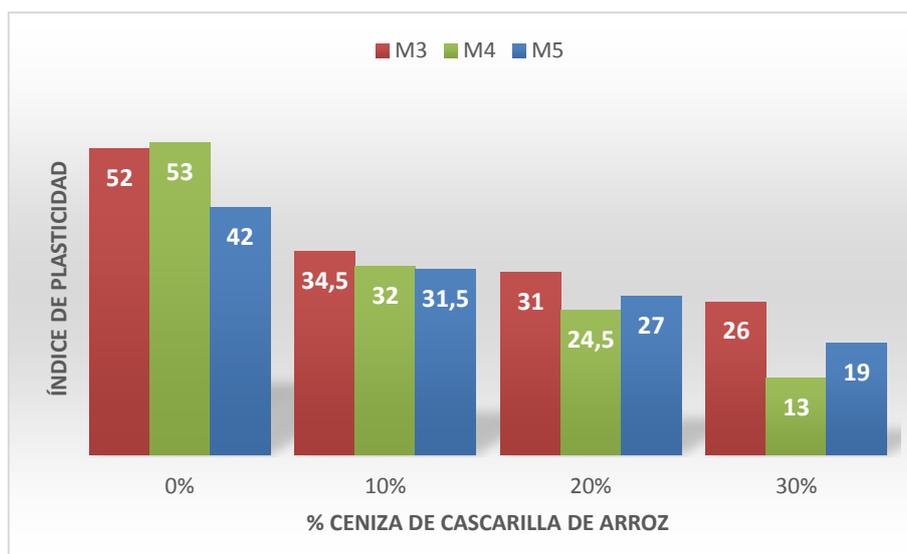
Mediante la clasificación S.U.C.S de las muestras ensayadas se puede determinar que las muestras patrón (muestras naturales) y muestras dosificadas con C.C.A. son:

**Muestra 3:** MH-CH, es decir, se clasifica como un limo con arcilla de alta plasticidad debido a que según el LL y el IP se ubica por encima de la línea A (separación entre MH y CH) de la carta de plasticidad (Figura 5.1).

**Muestra 4:** según la ubicación en la carta de plasticidad (Figura 5.1) del LL y del IP se clasifica como una arcilla de alta plasticidad (CH).

**Muestra 5:** de acuerdo a la carta de plasticidad (Figura 5.1) se clasifica como una arcilla de alta plasticidad (CH).

**Figura 5.43.** Reducción del Índice de Plasticidad de las muestras M3, M4 y M5



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

Una vez realizada las dosificaciones al 10, 20 y 30% en peso de las muestras M3, M4 y M5, según la carta de plasticidad (Figura 5.1), éstas se clasifican como limos de alta plasticidad (MH), esto debido a la reducción del índice de plasticidad de acuerdo a las diferentes dosificaciones como se muestra en la tabla 5.1.

## ACTIVIDAD DE SUELOS

Como se hace referencia en capítulos anteriores, la actividad de las arcillas no es más que un valor representativo que relaciona parámetros importantes en el estudio de las arcillas, como lo son el Índice plástico y el porcentaje en peso de fracción arcillosa presente en una cantidad de muestra. Esta propiedad físico-química puede ser utilizada como referencia para definir a las arcillas en un rango numérico de actividad, el cual, ha sido obtenido de investigaciones en las que se ha demostrado tener una certeza de un probable potencial de expansión esperado. A continuación, se tienen los valores (Tabla 5.2.) que serán utilizados como referencia para realizar una comparación cualitativa con los resultados obtenidos de las muestras M3, M4 y M5 analizadas en el presente trabajo.

**Tabla 5.34.** Tabla de referencia del potencial de expansión según la actividad

Muestra	Actividad (A)	Clasificación	Potencial de expansión
Arcilla	$A < 0.75$	Inactivas	Bajo
	$0.75 < A < 1.25$	Normales	Medio
	$A > 1.25$	Activas	Alto

Fuente: (Jamsawang P., Nuansrithong N., Voottipruex P., Songpiriyakij S., Jongpradist P., 2017)

A continuación se presenta el cálculo de la actividad con la expresión que relaciona el índice de plasticidad y la fracción en peso de las partículas de arcilla expresado en porcentaje (Ec. 2.2). Además, se toma en cuenta únicamente la actividad promedio para la clasificación y estimación cualitativa del potencial de expansión.

A continuación se presenta los siguientes resultados para cada una de las muestras:

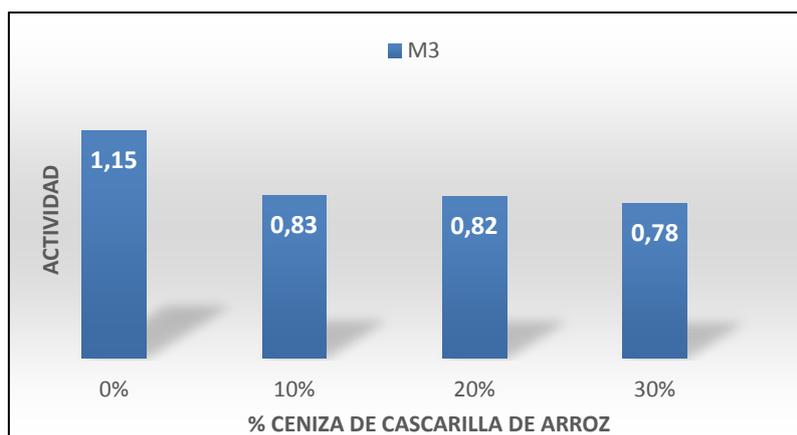
### Muestra 3:

**Tabla 5.35.** Actividad, porcentaje de reducción, asignación de clasificación y potencial de expansión de la muestra M3

Muestra	% C.C.A.	IP [%]	IP prom [%]	Fracción Arcillosa [%]	Actividad (A)	Actividad prom	Reducción [%]	Clasificación	Potencial Expansión
M3	0	52	52	45.16	1.151	1.151	0.00	Normal	Medio
	10	35	34.5	41.8	0.837	0.825	28.32	Normal	Medio
		34			0.813				
	20	29	31	37.9	0.765	0.818	28.96	Normal	Medio
		33			0.871				
	30	27	26	33.19	0.813	0.783	31.97	Normal	Medio
		25			0.753				

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

**Figura 5.44.** Variación de Actividad de la muestra M3



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

De los resultados obtenidos (Tabla 5.3.) se observa que la muestra M3 en estado natural tiene un valor de actividad de 1.151, valor que en comparación con los valores referenciales da como resultado una arcilla normalmente activa con un potencial de expansión medio. Continuamente se puede ver que con la adición de la puzolana de ceniza de cascarilla de arroz a diferentes porcentajes en peso se establece un cambio significativo en cuanto a la actividad, representando un porcentaje de reducción que varía aproximadamente entre el 28.32% y 31.97%, con lo que se determina que la clasificación se mantiene como normalmente activa y de la misma forma el potencial de expansión se mantiene en un rango medio debido a que la actividad bajo de 1.151 a 0.783 manteniéndose en los rangos de arcillas normalmente activas. También cabe recalcar, que en el análisis de la presente muestra (M3) no manifiesta un cambio representativo que conlleve a que pase de una clasificación normalmente activa a inactiva y de un potencial de expansión de medio a bajo, por lo tanto, se podría tener en consideración probar con un aumento de ceniza mayor al 30% para que posiblemente se obtengan resultados aún más satisfactorios.

#### Muestra 4:

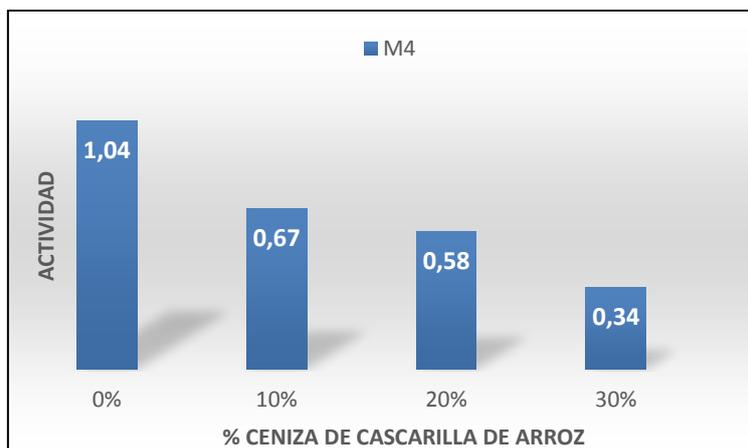
**Tabla 5.36.** Actividad, porcentaje de reducción, asignación de clasificación y potencial de expansión de la muestra M4

Muestra	% C.C.A.	IP [%]	IP prom [%]	Fracción Arcillosa [%]	Actividad (A)	Actividad prom	Reducción [%]	Clasificación	Potencial Expansión
M4	0	53	53	51.08	1.038	1.038	0.00	Normal	Medio
	10	34	32	47.55	0.715	0.673	35.14	Inactiva	Bajo

	30			0.631				
20	23	24.5	42.5	0.541	0.576	44.44	Inactiva	Bajo
	26			0.612				
30	12	13	38	0.316	0.342	67.03	Inactiva	Bajo
	14			0.368				

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

**Figura 5.45.** Variación de actividad de la muestra M4



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

En los resultados de la muestra M4 (Tabla 5.4.) se observa un valor inicial de 1.038 en cuanto a la actividad correspondiente a la muestra inalterada, con la adición de 10% de ceniza ese valor presenta una reducción porcentual de 35.14% con lo que se tiene una nueva clasificación designada como inactiva y un potencial de expansión bajo, pero con la adición de 20% y 30% ese valor de actividad inicial presenta una reducción mucho más amplia correspondiente al 44.44% y 67.03% causando que en los dos porcentajes reduzcan la actividad de la muestra manteniéndose en el rango de arcillas inactivas y con un bajo potencial de expansión. Análisis con el que se concluye que la muestra cumple con las condiciones de estabilización, siempre y cuando los valores de ceniza agregados estén en un rango aproximado entre el 20% y 30% en peso en lo que respecta a esta investigación.

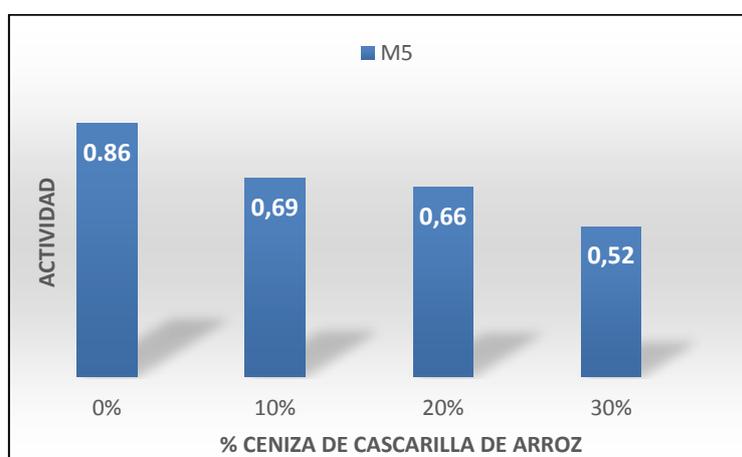
#### **Muestra 5:**

**Tabla 5.37.** Actividad, porcentaje de reducción, asignación de clasificación y potencial de expansión de la muestra M5

Muestra	% C.C.A.	IP [%]	IP prom [%]	Fracción Arcillosa [%]	Actividad (A)	Actividad prom	Reducción [%]	Clasificación	Potencial Expansión
M5	0	42	42	49.05	0.856	0.856	0.00	Normal	Medio
	10	32	31.5	45.91	0.697	0.686	19.87	Inactiva	Bajo
		31			0.675				
	20	26	27	41.12	0.632	0.657	23.32	Inactiva	Bajo
		28			0.681				
	30	14	19	36.55	0.383	0.520	39.29	Inactiva	Bajo
		24			0.657				

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

**Figura 5.46.** Variación de actividad de la muestra M5

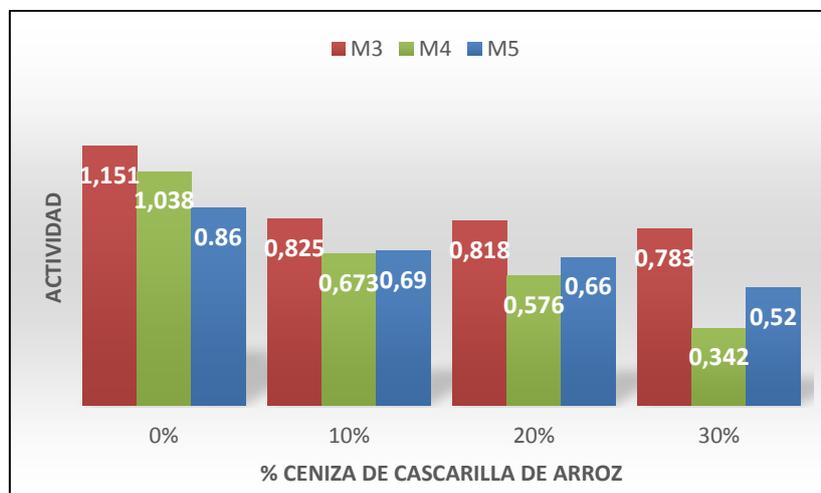


Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

De la misma forma que en la muestra M4, los resultados obtenidos de la muestra M5 (Tabla 5.5.) son positivos, se puede apreciar que la actividad inicial de la muestra es de 0.856, valor que sufre una reducción entre 19.87%, 23.32% y 39.29% con la ceniza agregada a la muestra inicial en 10, 20 y 30% correspondientemente, por tanto, se observa un notable cambio de la clasificación que pasa de ser normalmente activa a inactiva y un potencial de expansión que pasa de medio a bajo. La conclusión del presente análisis es

que la muestra M5 cumple con el objetivo de estabilización para los tres porcentajes debido a que a partir del 10% de dosificación en peso se hace notable la reducción de la actividad.

**Figura 5.47.** Reducción de la actividad de las muestras M3, M4 y M5



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

## ÍNDICE DE EXPANSIÓN

El ensayo de índice de expansión es el más representativo para la determinación del potencial expansivo del suelo. Es evidente que en base al porcentaje de agente estabilizante (10, 20 y 30% de ceniza de cascarilla de arroz) utilizado se nota una clara reducción del índice de expansión en las muestras estudiadas como se presenta a continuación en las siguientes tablas y gráficas.

Para el desarrollo del ensayo se utilizó la norma ASTM D4829-11 (Standard Test Method For Expansion Index of Soils).

### Muestra 3:

**Tabla 5.38.** Potencial de expansión de la muestra M3 (Tabla 4.6 y 4.19)

Muestra	% C.C.A.	Índice de Expansión		Potencial de Expansión	Reducción [%]
		EI	EI prom		
M3	0	175,2	175,53	Muy Alto	0,00
		175,85		Muy Alto	
	10	129,25	129,19	Alto	26,40
		129,125		Alto	
	20	102,575	102,24	Alto	41,75
		101,9		Alto	

	30	$\frac{76,05}{74,425}$	75,24	Medio Medio	57,14
--	----	------------------------	-------	----------------	-------

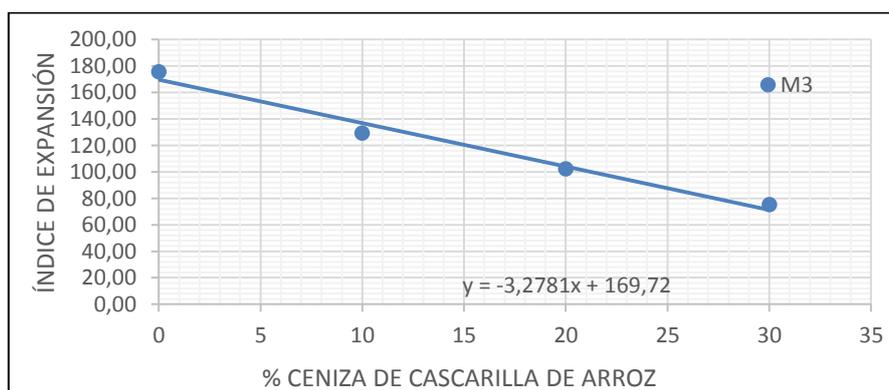
Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

**Figura 5.48.** Variación del índice de expansión de la muestra M3



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

**Figura 5.49.** Tendencia de reducción del índice de expansión con el aumento de % C.C.A., muestra M3



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

De acuerdo con la tendencia lineal mostrada en la figura 5.8 correspondiente a la reducción del índice de expansión de la muestra M3 y realizando una extrapolación de la misma para un porcentaje del 40% de dosificación en peso de ceniza de cascarilla de arroz, se obtienen el siguiente resultado:

**Tabla 5.39.** Tendencia de reducción del índice de expansión, muestra M3

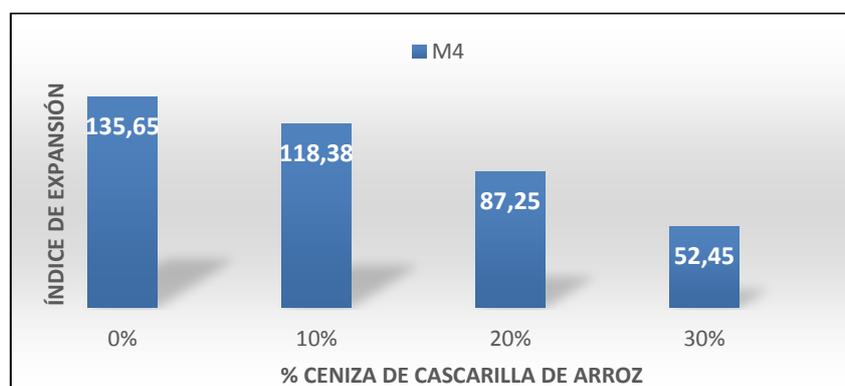
Tendencia % C.C.A.	
% C.C.A.:	40
El:	38,59
P. Exp:	Bajo

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

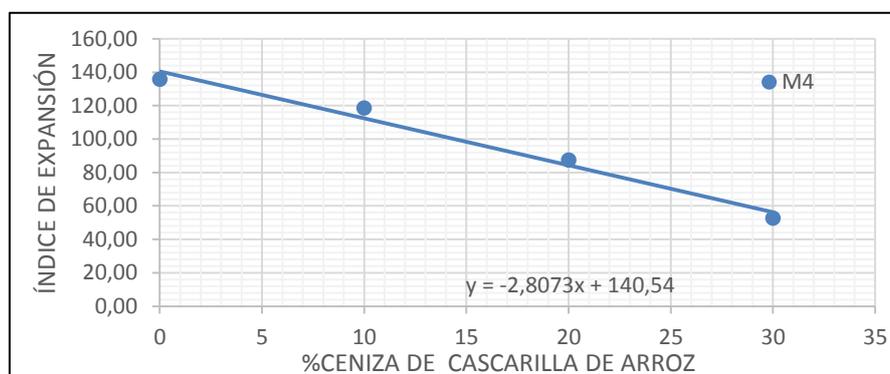
**Muestra 4:****Tabla 5.40.** Potencial de expansión de la muestra M4 (Tabla 4.6 y 4.19)

Muestra	% C.C.A.	Índice de Expansión		Potencial de Expansión	Reducción [%]
		EI	EI prom		
M4	0	134,825	135,65	Muy Alto	0,00
		136,475		Muy Alto	
	10	118,65	118,38	Alto	12,73
		118,1		Alto	
	20	88,025	87,25	Medio	35,68
		86,475		Medio	
	30	53,325	52,45	Medio	61,33
		51,575		Medio	

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

**Figura 5.50.** Variación del índice de expansión de la muestra M4

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

**Figura 5.51.** Tendencia de reducción del índice de expansión con el aumento de % C.C.A., muestra M4

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

De acuerdo con la tendencia lineal mostrada en la figura 5.10 correspondiente a la reducción del índice de expansión de la muestra M4 y realizando una

extrapolación de la misma para un porcentaje del 40% de dosificación en peso de ceniza de cascarilla de arroz, se obtienen el siguiente resultado:

**Tabla 5.41.** Tendencia de reducción del índice de expansión, muestra M4

Tendencia % C.C.A.	
% C.C.A.	40
EI:	28,25
P. Exp:	Bajo

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

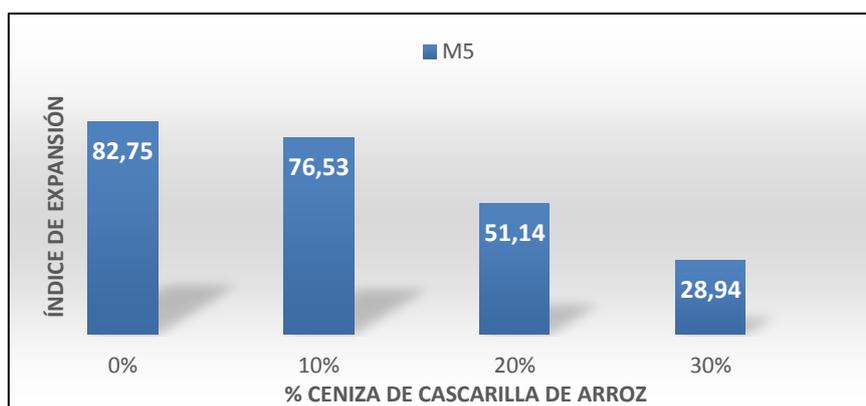
### Muestra 5:

**Tabla 5.42.** Potencial de expansión de la muestra M5 (Tabla 4.6 y 4.19)

Muestra	% C.C.A.	Índice de Expansión		Potencial de Expansión	Reducción [%]
		EI	EI prom		
M5	0	82,15	82,75	Medio	0,00
		83,35		Medio	
	10	77,65	76,53	Medio	7,52
		75,4		Medio	
	20	50,95	51,14	Medio	38,20
		51,325		Medio	
	30	30,9	28,94	Bajo	65,03
		26,975		Bajo	

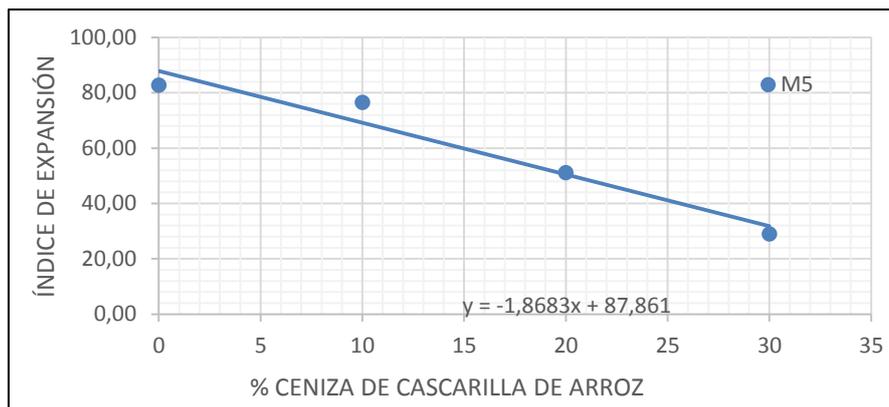
Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

**Figura 5.52.** Variación del índice de expansión de la muestra M5



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

**Figura 5.53.** Tendencia de reducción del índice de expansión con el aumento de % C.C.A., muestra M5



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

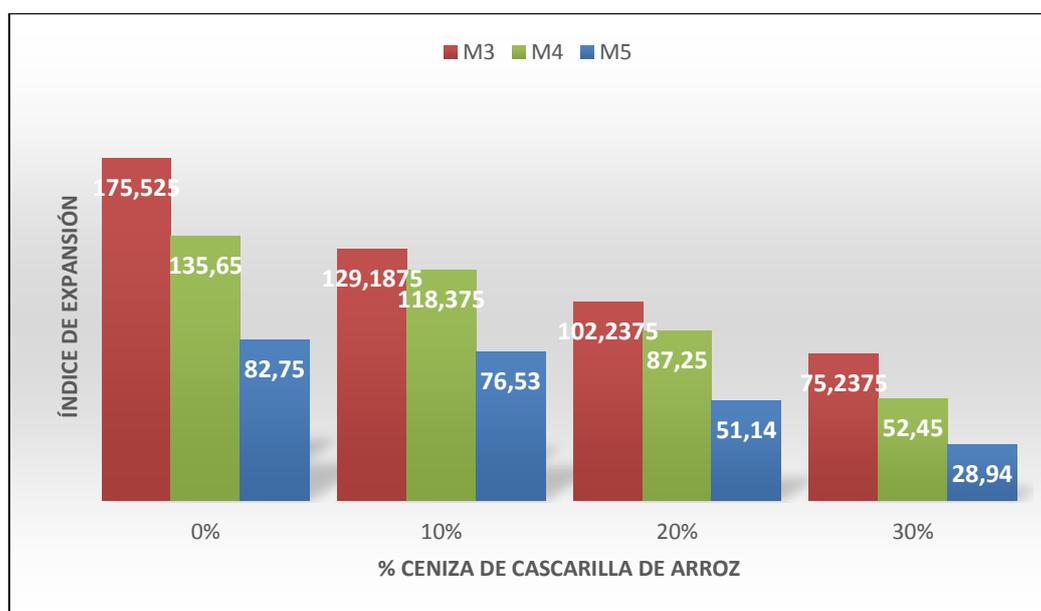
De acuerdo con la tendencia lineal mostrada en la figura 5.12 correspondiente a la reducción del índice de expansión de la muestra M5 y realizando una extrapolación de la misma para un porcentaje del 40% de dosificación en peso de ceniza de cascarilla de arroz, se obtienen el siguiente resultado:

**Tabla 5.43.** Tendencia de reducción del índice de expansión, muestra M5

Tendencia % C.C.A.	
% C.C.A.:	40
EI:	13,13
P. Exp:	Bajo

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

**Figura 5.54.** Variación del Índice de Expansión de las muestras dosificadas



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

Realizando una comparación de las muestras M3, M4 y M5 con sus diferentes dosificaciones existe un rango de reducción entre el 7.52 al 26.40 % para las dosificaciones al 10%, del 35.68 al 41.75% al 20% de dosificación y del 57.14 al 65.03% correspondiente al 30 % de dosificación en peso de ceniza de cascarilla de arroz, es decir, se obtiene la mayor descenso del índice de expansión con un porcentaje del 30% en peso de ceniza de cascarilla de arroz con una reducción de más del 50% comparado con las muestras patrón.

En la muestra M3 (Tabla 5.6.) se ha logrado la reducción del potencial de expansión, de un potencial muy alto (EI= 175.53) a uno medio (EI= 75.24) con el 30% de ceniza de cascarilla de arroz.

Además se realizó una curva de tendencia del descenso del índice de expansión y por lo tanto del potencial de expansión de las muestras analizadas (Figuras 5.8., 5.10. y 5.12.), por ejemplo, en la muestra 3 que solo se logró una reducción del potencial de expansión a medio, si se continua con la tendencia de dosificación, es decir con una al 40% de C.C.A. se obtiene una reducción del índice de expansión de 175.53 a 38.94 (Tabla 5.7.), lográndose un potencial de expansión bajo según la norma ASTM D 4829-11.

De la misma manera se realizó el análisis para las muestras 4 y 5 con dosificaciones del 40% en peso de ceniza de cascarilla de arroz obteniendo un potencial de expansión bajo como se presenta en las tablas 5.9. y 5.11.

La mayor reducción del potencial de expansión se presenta en la muestra 5 puesto que con un 30% en peso de ceniza de cascarilla de arroz el índice de expansión se reduce un 65.03%, comparando con la muestra patrón se obtiene un potencial de expansión denominado bajo, sin la necesidad de prolongar a la siguiente dosificación del 40% como se analizó en las muestras 3 y 4.

## **CONSOLIDACIÓN**

Con datos obtenidos mediante los ensayos de consolidación realizados tanto a las muestras naturales como a las remoldeadas con ceniza de cascarilla de arroz (al 10, 20 y 30%) se procede al análisis de la presión de consolidación y la variación de la relación de vacíos de las muestras. Es importante tener

presente que para el remoldeo de las muestras dosificadas se utiliza el 95% de la densidad seca obtenida en el ensayo de proctor modificado.

Históricamente, en su geología, el suelo ha sido sometido a una presión máxima efectiva, que puede ser igual o mayor a la presión existente al momento del muestreo. Durante la toma de muestras existe una liberación de presión de sobrecarga existente produciéndose expansión en las muestras.

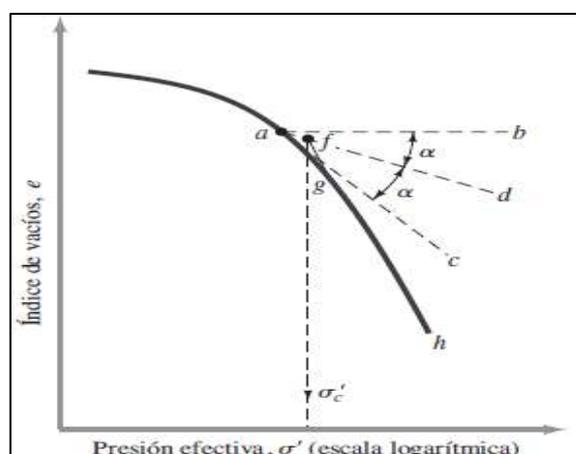
Cuando la presión total aplicada en el ensayo de consolidación es menor que la presión máxima efectiva pasada, se produce una pequeña cantidad de compresión en las muestras, mientras que cuando la presión aplicada es mayor que la máxima efectiva pasada la relación  $e$ -log  $\sigma'$  es prácticamente lineal con una pendiente pronunciada (Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 2015).

Esto conlleva a dos definiciones de arcillas en base del esfuerzo histórico:

**Normalmente consolidadas:** “Son normalmente consolidadas cuando la presión efectiva actual es la presión máxima a la que el suelo ha sido sometido en el pasado” (Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 2015).

**Sobreconsolidadas:** “La presente presión de sobrecarga efectiva es menor que la que el suelo ha experimentado en el pasado. La presión máxima efectiva se llama presión de preconsolidación” (Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 2015). Casagrande propuso un método para la determinación de la presión de preconsolidación mediante la gráfica  $e$ -log  $\sigma'$ .

**Figura 5.55.** Grafica  $e$ -log  $\sigma'$



Fuente: (Braja,2015)

1. Se coloca el punto "a" en la gráfica e-log  $\sigma'$  donde presenta el radio mínimo de curvatura.
2. Se traza una recta horizontal paralela al eje de las abscisas que pase por el punto "a" hasta el punto "b" (Figura 5.14.)
3. Se traza una línea tangente a la curva en el punto "a".
4. Se traza la línea "ad", bisectriz del ángulo "bac".
5. Se proyecta la línea "gh" hasta intersectar con la bisectriz trazada anteriormente, la abscisa del punto de intersección es la presión de preconsolidación ( $\sigma'_c$ ).

### **Índice de Compresibilidad (Cc) e Índice de Abultamiento (Cs).**

El índice de compresibilidad (Cc) relaciona características de esfuerzo Vs deformación, por lo tanto, es una característica para conocer el asentamiento del suelo. Skempton propuso expresiones empíricas para el cálculo del índice de compresión tanto para arcillas inalteradas como para remoldeadas:

Arcillas inalteradas:

$$C_c = 0.009 (LL-10)$$

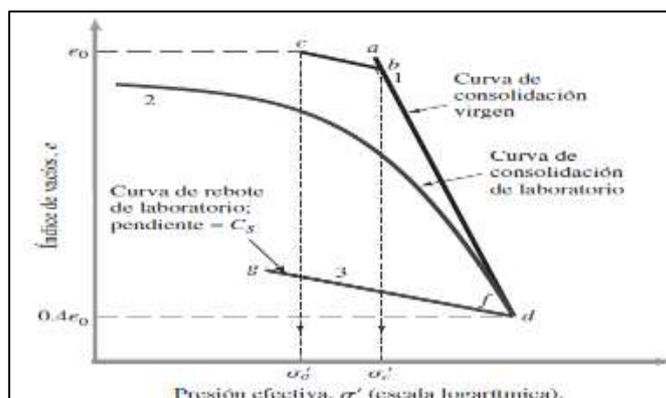
(Ec. 5.1)

Arcillas remoldeadas:

$$C_c = 0.007 (LL-10)$$

(Ec. 5.2)

En cuanto al índice de abultamiento (Cs) se relaciona con la recuperación de las muestras al momento de la descarga, es decir, la expansión. Este índice se lo puede obtener mediante la pendiente de la gráfica de relación de vacíos Vs esfuerzo efectivo en escala logarítmica (Figura 5.15.) en la parte de la descarga de las muestras.

**Figura 5.56.** Gráfica para obtención de  $C_s$ 

Fuente: (Braja,2015)

A continuación, se presentan tablas y gráficos con los resultados obtenidos de los ensayos de consolidación, tanto de las muestras patrón como de las muestras dosificadas.

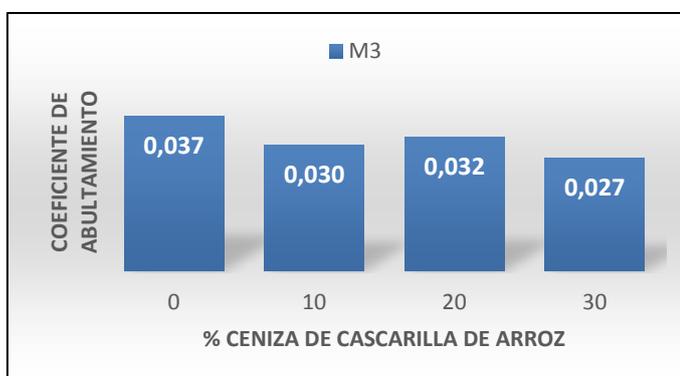
**Muestra 3:**

**Tabla 5.44.** Variación de relación de vacíos inicial ( $e_0$ ), presión de preconsolidación, coeficientes de compresibilidad ( $C_c$ ) y abultamiento ( $C_s$ ) M3.

Muestra	% C.C.A.	Densidad Húmeda $Y_h$ [ $\text{gr}/\text{cm}^3$ ]	Densidad Seca $Y_s$ [ $\text{gr}/\text{cm}^3$ ]	Relación de vacíos $e_0$	Presión Preconsolidación [ $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ]	Índice Compresibilidad $C_c$	Índice Abultamiento $C_s$	% Reducción $C_s$	% Reducción $e_0$
M3	0	1,65	1,23	1,257	3,00	0,71	0,037	0,00	0,00
	10	1,80	1,44	0,767	2,20	0,46	0,030	18,92	38,96
	20	1,78	1,42	0,740	2,70	0,54	0,032	13,51	41,11
	30	1,77	1,41	0,708	1,80	0,38	0,027	27,03	43,65

(Tablas 4.7 y 4.20)

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

**Figura 5.57.** Variación del coeficiente de abultamiento de la M3

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

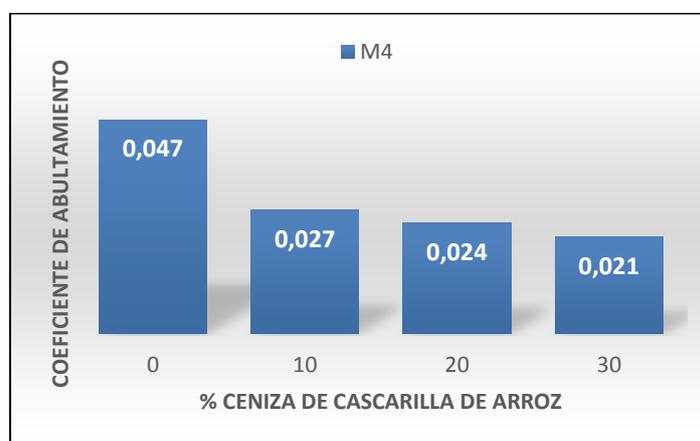
**Muestra 4:**

**Tabla 5.45.** Variación de relación de vacíos inicial (eo), presión de preconsolidación, coeficientes de compresibilidad (Cc) y abultamiento (Cs) M4 (Tablas 4.7 y 4.20)

Muestra	%CCA	Densidad Húmeda Yh (gr/cm <sup>3</sup> )	Densidad Seca Ys (gr/cm <sup>3</sup> )	Relación de vacíos eo	Presión Preconsolidación (Kg/cm <sup>2</sup> )	Índice Compresibilidad Cc	Índice Abultamiento Cs	% Reducción Cs	% Reducción eo
M4	0	1,74	1,30	1,114	2,70	0,66	0,047	0,00	0,00
	10	1,95	1,63	0,545	1,60	0,39	0,027	41,94	51,06
	20	1,82	1,52	0,624	2,40	0,40	0,024	48,39	43,96
	30	1,80	1,51	0,589	1,00	0,44	0,021	54,84	47,10

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

**Figura 5.58.** Variación del coeficiente de abultamiento de la M4



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

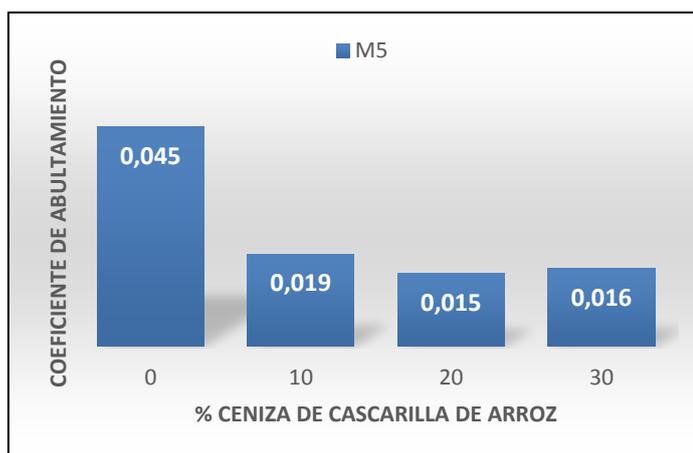
#### Muestra 5:

**Tabla 5.46.** Variación de relación de vacíos inicial (eo), presión de preconsolidación, coeficientes de compresibilidad (Cc) y abultamiento (Cs) M5 (Tablas 4.7 y 4.20).

Muestra	%CCA	Densidad Húmeda Yh (gr/cm <sup>3</sup> )	Densidad Seca Ys (gr/cm <sup>3</sup> )	Relación de vacíos eo	Presión Preconsolidación (Kg/cm <sup>2</sup> )	Índice Compresibilidad Cc	Índice Abultamiento Cs	% Reducción Cs	% Reducción eo
M5	0	1,68	1,26	1,214	2,05	0,51	0,045	0,00	0,00
	10	1,845	1,56	0,635	2,50	0,36	0,019	57,78	47,67
	20	1,80	1,53	0,639	2,90	0,32	0,015	66,67	47,34
	30	1,78	1,51	0,607	2,20	0,35	0,016	64,44	49,98

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

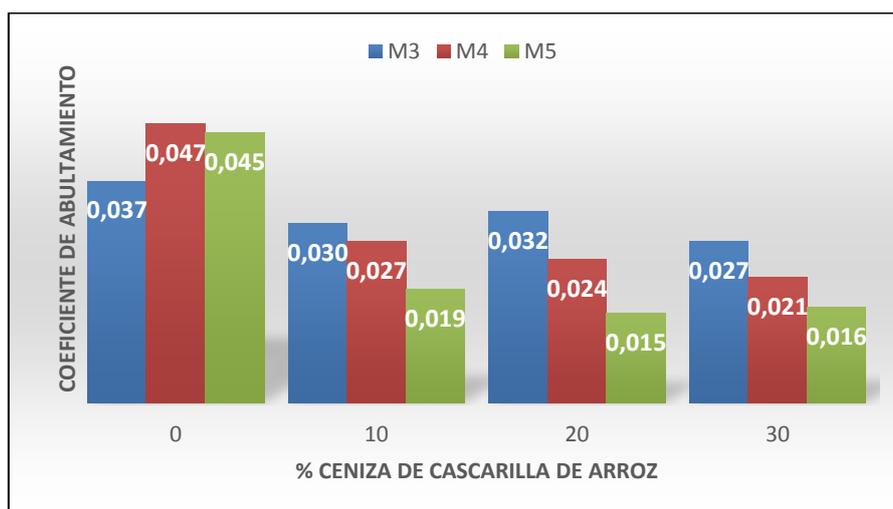
**Figura 5.59.** Variación del coeficiente de abultamiento de la M4



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

Finalmente se presenta una tabla general:

**Figura 5.60.** Variación del Coeficiente de Abultamiento (Cs) de las Muestras M3, M4 y M5



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

Como se observa en las tablas presentadas anteriormente, se puede notar como conforme aumentan las dosificaciones de ceniza de cascarilla de arroz la relación de vacíos inicial disminuye en comparación de las muestras patrón, lo que indica un mejor control de la consolidación de las muestras para un menor asentamiento y una menor expansión.

Si se observa la Figura 5.19., es claramente notoria la reducción del índice de abultamiento en todas las muestras ensayadas con las diferentes dosificaciones de ceniza de cascarilla de arroz, por ejemplo, en la muestra 4 se

logra reducciones del 41.94, 48.39 y 54.84% con dosificaciones del 10, 20 y 30% de CCA respectivamente, en otras palabras, se nota claramente que existe control de la expansión de las muestras ensayadas.

Naturalmente esta reducción del coeficiente de abultamiento y por lo tanto la expansión de las muestras se produce no solo en la muestra 4, sino en las muestras 3 y 5; siendo la muestra 5 (Tabla 5.14.) la de mayor reducción de este índice, alcanzando un 57.78% de reducción con el 10% de dosificación de CCA, y valores mayores para las siguientes dosificaciones.

## PERMEABILIDAD DEL SUELO

Para llevar a cabo el ensayo en muestras remodeladas con las dosificaciones del 10, 20 y 30% en peso de ceniza de cascarilla de arroz, se toma en cuenta el parámetro de la densidad obtenida en el ensayo de proctor modificado realizado anteriormente, donde se obtuvo la densidad seca máxima. Por lo tanto, para este ensayo se trabajó con el 95% de la desanidad obtenida en la compactación para el remoldeo de las muestras a ser ensayadas.

A continuación se presentan los datos obtenidos del ensayo de permeabilidad, y la densidad seca máxima calculada con la ecuación 4.11. que relaciona el contenido de humedad y la densidad húmeda.

**Tabla 5.47.** Coeficiente de permeabilidad de muestras naturales y remodeladas. (Tablas 4.11 y 4.21)

Muestra	% CCA	Nº Muestra	W [%]	Densidad Húmeda Yh [gr/cm <sup>3</sup> ]	Densidad Seca Ys [gr/cm <sup>3</sup> ]	Coef. Permeabilidad K <sub>20</sub> [cm/seg]	K <sub>20</sub> Promedio [cm/seg]	Reducción [%]
M3	0%	1	33,72	1,65	1,23	4,9338E-06	4,227E-06	0,00
		2	33,14	1,63	1,22	3,5206E-06		

	10%	1	25,37	1,806	1,44	1,3683E-08	1,366E-08	99,68
		2	25,40	1,784	1,42	1,3640E-08		
	20%	1	24,97	1,761	1,41	NO PERMEABLE		-
	30%	1	24,37	1,761	1,42	NO PERMEABLE		
M4	0%	1	33,30	1,74	1,31	1,1519E-06	1,421E-06	0,00
		2	34,15	1,73	1,29	1,691E-06		
	10%	1	19,72	1,953	1,63	1,8249E-08	1,822E-08	98,72
		2	19,63	1,964	1,64	1,8185E-08		
	20%	1	19,58	1,811	1,51	NO PERMEABLE		-
	30%	1	19,23	1,806	1,51	NO PERMEABLE		
M5	0%	1	34,19	1,65	1,23	2,4041E-07	1,907E-07	0,00
		2	34,86	1,67	1,22	1,4096E-07		
	10%	1	17,70	1,816	1,54	2,7389E-08	2,697E-08	85,85
		2	17,76	1,843	1,57	2,6560E-08		
	20%	1	16,93	1,801	1,54	NO PERMEABLE		-
	30%	1	18,32	1,796	1,52	NO PERMEABLE		

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

Como se observa en la tabla anterior (Tabla 5.15.) se logra una alta reducción del coeficiente de permeabilidad del suelo en la primera dosificación (10% en peso de ceniza de cascarilla de arroz), logrando una reducción del 99.68% para la muestra M3, 98.72% para la muestra M4 y un 85.85% para la muestra M5.

Debido a que en la primera dosificación se logra una alta reducción del coeficiente de permeabilidad, en las siguientes dosificaciones del 20 y del 30% en peso de ceniza de cascarilla de arroz las muestras se vuelven prácticamente impermeables, por lo tanto se vuelve imposible lograr determinar un coeficiente de permeabilidad y un porcentaje de reducción de las muestras dosificadas.

## **CORTE DIRECTO**

El ensayo de corte directo se realizó siguiendo los parámetros establecidos en la Norma ASTM D3080M -11. Así como en los anteriores ensayos, las muestras han sido analizadas independientemente con cada una de las mezclas dosificadas al 10, 20 y 30% en peso de ceniza de cascarilla de arroz, las cuales, han sido preparadas tomando en cuenta los datos del ensayo de proctor modificado trabajando con el 95% de la densidad seca máxima obtenida.

Para el desarrollo se realizó una serie de ensayos (mínimo 3) en los cuales se varia el esfuerzo confinante sobre la muestra contenida en los anillos, posteriormente, se establece una relación entre esfuerzos normales y cortantes que son representados en el diagrama de Mohr-Coulomb, en donde la línea de forma tangente a los círculos es la envolvente de falla de donde se obtienen los resultados representativos que son el ángulo de fricción y la cohesión.

Las tablas y gráficas correspondientes al análisis del ensayo de corte directo se presentan a continuación:

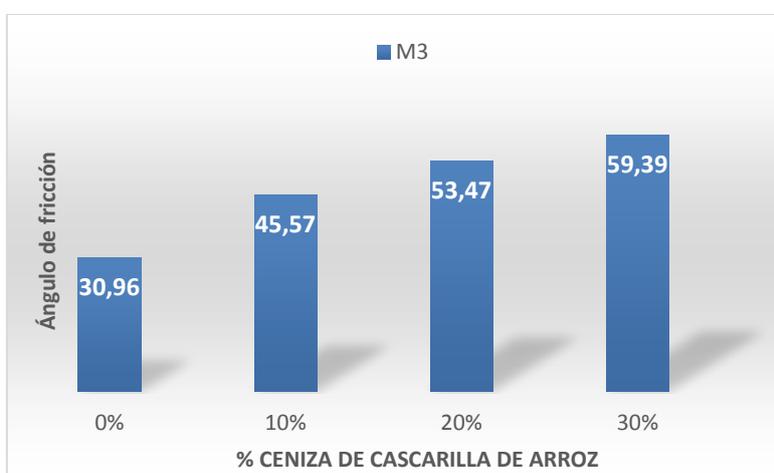
### Muestra 3:

**Tabla 5.48.** Ángulo de Fricción y Cohesión de la muestra natural y dosificada, M3 (Tablas 4.12 y 4.22)

Muestra	% C.C.A.	Contenido Húmedad $W_{Promedio}$ [%]	Densidad Húmeda $Yh_{Promedio}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Densidad Seca $Ys$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Ángulo de Fricción $\phi$ [°]	Cohesión $c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Incremento $\phi$ [%]
M3	0	33.44	1.65	1.24	30.96	0.23	0.00
	10	25.39	1.80	1.44	45.57	2.95	47.19
	20	25.52	1.78	1.42	53.47	2.30	72.71
	30	25.51	1.77	1.41	59.39	1.90	91.83

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

**Figura 5.61.** Variación del ángulo de fricción de la muestra M3



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

Como se puede apreciar en los resultados mostrados (Tabla 5.16. y Figura 5.20.) el ángulo de fricción presenta un porcentaje de incremento significativo, especialmente para la dosificación en peso correspondiente al 30%, se tiene que este porcentaje es el que tiene un mejor resultado, ya que, el ángulo de fricción inicial presenta un valor de  $30.96^\circ$  y con la dosificación se incrementa a un valor de  $59.39^\circ$ , correspondiente a un incremento del 91.83%.

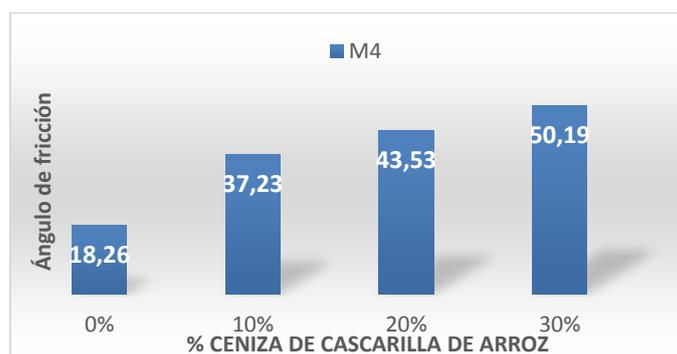
#### Muestra M4:

**Tabla 5.49.** Ángulo de Fricción y Cohesión de la muestra natural y dosificada, M4 (Tablas 4.12 y 4.22)

Muestra	% C.C.A.	Contenido Húmedad $W_{\text{Promedio}}$ [%]	Densidad Húmeda $Y_{h\text{Promedio}}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Densidad Seca $Y_s$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Ángulo de Fricción $\phi$ [°]	Cohesión $c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Incremento $\phi$ [%]
M4	0	32.33	1.80	1.36	18.26	0.30	0.00
	10	19.62	1.95	1.63	37.23	2.45	103.89
	20	19.59	1.82	1.52	43.53	2.20	138.39
	30	19.36	1.80	1.51	50.19	1.90	174.86

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

**Figura 5.62.** Variación del ángulo de fricción de la muestra M4



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

Se puede apreciar en los resultados mostrados (Tabla 5.17. y Figura 5.21.) el ángulo de fricción en la muestra M4 presenta un alto porcentaje de incremento; se observa que todos los porcentajes de dosificación en peso presentan muy buenos resultados, ya que, el ángulo de fricción inicial presenta un valor de  $18.26^\circ$  y con la dosificación (10, 20 y 30% en peso) se incrementa a valores de

37.23°, 43.53° y 50.19° correspondientemente, todo esto representando un porcentaje de incremento que supera el 100%, inclusive llegando a un valor máximo del 174.86% que corresponde a la dosificación en peso del 30%.

Entonces, con la implementación de ceniza de cascarilla de arroz como agente estabilizante, se tiene resultados satisfactorios en cuanto al incremento del ángulo de fricción para muestras que tienen características similares a la muestra M4 presente en este estudio.

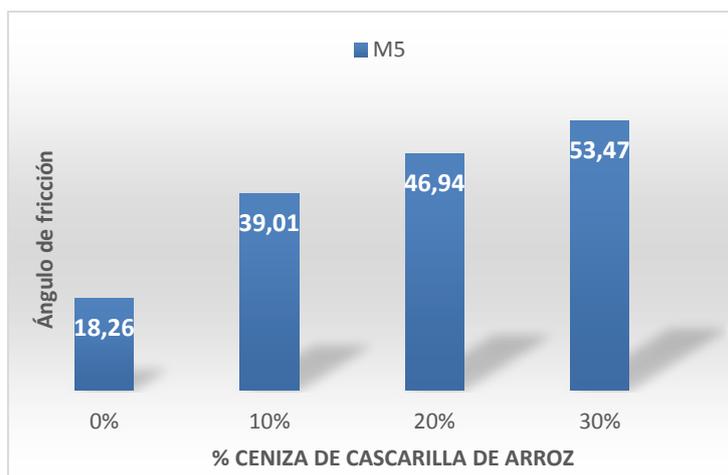
#### Muestra M5:

**Tabla 5.50.** Ángulo de Fricción y Cohesión de la muestra natural y dosificada, M5 (Tablas 4.12 y 4.22)

Muestra	% C.C.A.	Contenido Húmedad $W_{Promedio}$ [%]	Densidad Húmeda $Y_{hPromedio}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Densidad Seca $Y_s$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Ángulo de Fricción $\phi$ [°]	Cohesión $c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Incremento $\phi$ [%]
M5	0	33.05	1.69	1.27	18.26	0.51	0.00
	10	17.62	1.83	1.56	39.01	2.33	113.64
	20	17.59	1.80	1.53	46.94	2.03	157.06
	30	17.57	1.78	1.51	53.47	1.74	192.83

Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

**Figura 5.63.** Variación del ángulo de fricción de la muestra M5



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

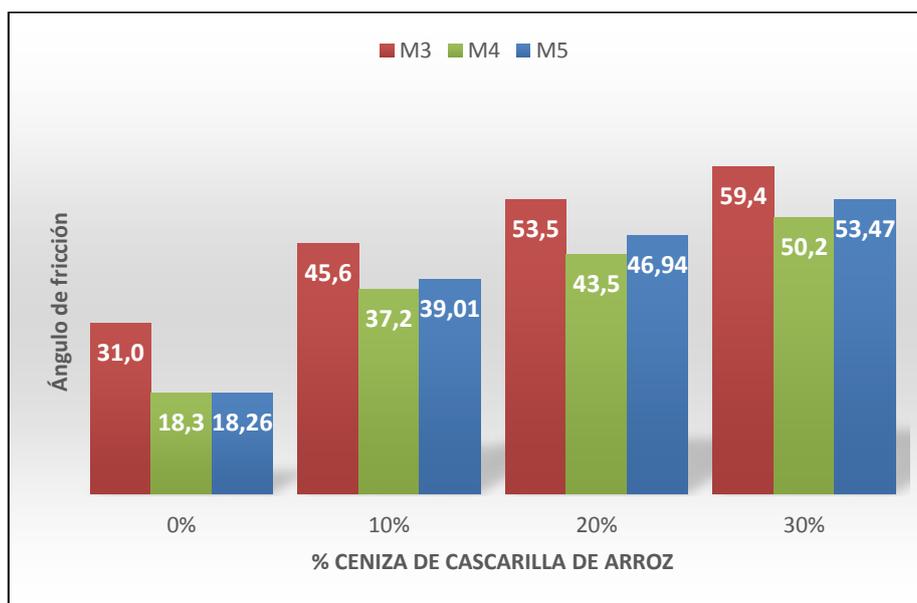
Al igual que en la muestra anterior (M4), se puede ver que, para la muestra M5 los resultados mostrados (Tabla 5.18. y Figura 5.22.) son muy satisfactorios; se observa que el ángulo de fricción presenta un alto porcentaje de incremento, además, se aprecia que todos los porcentajes de dosificación en peso

presentan muy buenos resultados, debido a que, el ángulo de fricción inicial presenta un valor de  $18.26^\circ$  y con la dosificación (10, 20 y 30% en peso) se incrementa a valores de  $39.01^\circ$ ,  $46.94^\circ$  y  $53.47^\circ$  correspondientemente, y al igual que la muestra M4 representando un porcentaje de incremento que supera el 100%, llegando a un valor máximo del 192.83% que corresponde a la dosificación en peso del 30%.

Con la implementación de ceniza de cascarilla de arroz como agente estabilizante, se tiene resultados satisfactorios en cuanto al incremento del ángulo de fricción para muestras que tienen características similares a la muestra M5 presente en este estudio.

Finalmente, se presenta la figura general (Figura 5.23.) donde se representan las variaciones de todas las muestras M3, M4 y M5 con las respectivas dosificaciones:

**Figura 5.64.** Variación del ángulo de las Muestras M3, M4 y M5



Fuente: (Chicaiza, Oña, 2018)

## **CAPÍTULO VI**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **CONCLUSIONES**

- Las muestras que han sido recolectadas de la Provincia de Manabí han demostrado ser arcillas que poseen un alto potencial expansivo (Tabla 4.6.) según los ensayos preliminares realizados como: clasificación SUCS donde se comprueba que las muestras M4 y M5 son arcillas de alta plasticidad (CH) mientras que la muestra M3 conforma una arcilla con limo de alta plasticidad (CH-MH); índice de expansión donde se obtuvo que las muestras M3 y M4 tienen un potencial expansivo muy alto, mientras que la M5 corresponde a potencial expansivo medio; e incluso ensayos cualitativos y cuantitativos como difracción y fluorescencia de rayos X, donde se ha confirmado la presencia de minerales con características expansivas como montmorillonita y caolinita (cantidades que varían entre 2 a 5% y 15 a 30% respectivamente), y finalmente cálculo de la actividad donde se obtiene que las muestras corresponden a una clasificación normalmente activa con potencial de expansión medio. Todos los ensayos previos justifican la expansibilidad de las muestras permitiendo que estas

cumplan con las condiciones iniciales planteadas para la realización del presente proyecto.

- Luego de aplicar las dosificaciones correspondientes (de 10, 20 y 30% en peso de ceniza de cascarilla de arroz) a cada una de las muestras (M3, M4 y M5), todas presentan una modificación respecto a la clasificación, pasando a clasificarse como limos de alta plasticidad (MH) debido básicamente a la reducción del índice de plasticidad que se logra con la adición de cada uno de los porcentajes.
- La mayor reducción del potencial de expansión de las muestras estudiadas se produjo con el porcentaje de 30% de ceniza de cascarilla de arroz, esto es demostrable ya que si se toma una muestra representativa como la muestra 5 (Tabla 5.10.), se llega a reducir el potencial de expansión medio ( $EI=82.75$ ) a un nivel bajo ( $EI=28.94$ ), llegando a reducirse un 65.03%, en comparación al potencial de expansión obtenido con el 10% y 20% donde se refleja una reducción de 7.52 y 38.20% correspondientemente, datos que no llegan a superar el 50% de reducción obtenido con la dosificación del 30% en peso de ceniza de cascarilla de arroz.
- En el análisis de los ensayos es importante tener presente que se realizó la comparación entre muestras naturales inalteradas vs muestras remoldeadas al 95% de la densidad máxima (Tabla 4.8) obtenida en el ensayo proctor estándar para todas muestras naturales.
- En cuanto a la permeabilidad del suelo la reducción es bastante alta llegando a superar el 90% solamente con el 10% de dosificación en peso de ceniza de cascarilla de arroz para todas las muestras, mientras que para porcentajes superiores, las probetas ensayadas se vuelven no permeables.
- La reducción de la expansión también se demuestra con el análisis del ensayo de consolidación, puesto que, este claramente muestra cómo se reduce el coeficiente de abultamiento a medida que aumenta las dosificaciones en peso de ceniza de cascarilla de arroz, controlando de esta manera la expansión presente en todas las muestras.

- Al ser la actividad un factor con el que se puede relacionar el potencial de expansión de una muestra, se puede observar que los resultados obtenidos reflejan una considerable reducción si se hace una comparación entre cada una de las muestras en estado natural y las muestras con cada uno de los porcentajes de dosificación en peso, generalizando, se observa que las tres muestras M3, M4 y M5 que fueron clasificadas como activas, con potencial de expansión alto, sufrieron un cambio positivo con cada uno de los porcentajes de dosificación. En cuanto a las muestras que fueron dosificadas con un 10% en peso de ceniza de cascarilla de arroz presentaron una variación en la actividad que refleja un porcentaje de reducción promedio de 28.4%, permitiendo que la muestra M3 se conserve con la misma clasificación y potencial de expansión, mientras que, en las muestras M4 y M5 pasen a ser clasificadas como inactivas, con un potencial de expansión bajo. Las muestras que fueron tratadas con la dosificación en peso del 20%, presentan una actividad que tiene un porcentaje de reducción promedio de 32.83%, provocando que la muestra M3 se conserve en una clasificación de normalmente activas con potencial de expansión medio; mientras que con este mismo porcentaje aplicado en la muestra M4 y M5 se presentan resultados más favorables que reflejan un cambio de clasificación denominada como inactiva con un potencial de expansión bajo. Finalmente con un porcentaje de dosificación en peso del 30% se tienen un porcentaje de reducción promedio de la actividad de un 46.57%, con lo que la muestra M3 se mantiene en la clasificación de normalmente activa con potencial de expansión medio, mientras que las muestra M4 y M5 se clasifican como inactivas y de potencial de expansión bajo (Tablas 5.3., 5.4., y 5.5.).
- Tomando en cuenta los valores que se han obtenido como resultado de los ensayos de corte directo, se puede observar que evidentemente las muestras de arcillas estabilizadas mediante la inclusión de los porcentajes en peso de ceniza de cascarilla de arroz presentan valores mucho más altos de resistencia confinada en comparación al valor inicial obtenido de cada muestra en estado natural inalterado. Los resultados evidencian que para la muestra M3 el ángulo de fricción obtenido con 10 y 20% de

dosificación representa un aumento en porcentaje de 47.19 y 72.71% respectivamente, llegando a un máximo que se da con la dosificación del 30% con la cual se tiene un aumento de 91.83%. Mientras que en las muestras M4 y M5 todas las dosificaciones representan más del 100% de aumento, llegando de igual forma a valores máximos con la dosificación del 30% en peso, donde se tiene incrementos del 174.86% y 192.83% correspondientemente. Esto se puede visualizar en la representación gráfica de las envolventes de falla de cada una de las muestras dosificadas y la natural, donde se observa el incremento significativo de la pendiente a medida que aumenta el porcentaje de dosificación lo que significa el incremento del ángulo de fricción, decremento de la cohesión y aumento de la resistencia (Tablas 5.16., 5.17., 5.18.y Anexo 1.7.)

- De la comparación entre los ángulos de fricción obtenidos tanto para muestra natural como para las dosificadas, se puede observar los incrementos representativos y útiles para la aplicación de este método de estabilización debido a que este parámetro no solo involucra efectos de fricción mecánica, sino que también influye en otras propiedades físicas como: trabazón estructural, resistencia de los granos y naturalmente del grado de saturación de las muestras, por lo tanto, las muestras tratadas al presentar un mayor valor de dicho parámetro dan como resultado un evidente mejoramiento del comportamiento cuyo rendimiento de soporte de sobrecargas será mayor al momento de ser aplicado a obras de ingeniería.
- Con esta investigación se ha logrado demostrar que la aplicación de este método de estabilización es factible debido a que las muestras naturales analizadas presentaron resultados que reflejan un requerimiento de algún tratamiento estabilizante que mejore las condiciones mecánicas iniciales y principalmente el potencial expansivo que poseen. En consecuencia, este método basado en la experimentación ha logrado reducir el potencial expansivo demostrando ser un método viable en la solución de problemáticas relacionadas con aspectos constructivos como el desarrollo de la planificación, diseño y construcción de obras de ingeniería que tengan una interacción con suelos similares a los descritos en este estudio.

- De acuerdo al análisis mineralógico las muestras M3, M4 y M5 presentan 2%, 2% y 5% (Tabla 4.14.) de mineral montmorillonita, el cual es el principal causante del alto potencial de expansión en las arcillas, factor que se comprueba con el ensayo de índice de expansión que da como resultado altos índices (Tabla 4.6.).
- Es importante tomar en cuenta que los resultados obtenidos en este proyecto de investigación son válidos únicamente para la provincia de Manabí o en su defecto para suelos que muestren similares características.

## **RECOMENDACIONES**

- Si se desea reducir el potencial de expansión de muestras que tengan las mismas o similares propiedades mecánicas a las analizadas en este estudio, es factible incluir el agente estabilizante en porcentajes en peso que estén dentro del rango de 20 a 30%, debido a que con estas dosificaciones se visualizó mejores resultados en los diferentes ensayos realizados, optimizando la estabilización reduciendo considerablemente el potencial expansivo y aumento de la resistencia.
- Para la aplicación de este método es recomendable que la compactación en campo permita alcanzar el 95% de la densidad seca máxima del suelo a ser estabilizado o porcentajes que se aproximen al 100% para obtener resultados favorables de estabilización.
- En la aplicación práctica es muy difícil tener un control sobre la humedad natural del suelo, por lo tanto se debería buscar una forma de evitar que el suelo sufra grandes variaciones de humedad para poder tener resultados aproximados a los presentados, con el fin de minimizar los cambios representativos de volumen.
- Para tener un análisis más profundo en la aplicación de este método de estabilización, se debería considerar el ampliar el campo de estudio a la realización de nuevas investigaciones en las cuales se contemple otros

parámetros adicionales importantes relacionados a economía, disponibilidad, adquisición y postratamiento.

- Se debe considerar que para la obtención de ceniza de cascarilla de arroz, la cantidad de materia prima deberá ser sumamente alta, debido a que con el proceso de incineración existe una reducción de 5:1 en peso, es decir que por cada 5kg de cascarilla de arroz se obtiene 1kg de puzolana para usarse como agente estabilizante.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Arturo Méndez Salas, Victor Pineda Núñez. (2011). *Comportamiento de Cimentaciones en Suelos Expansivos*. México, D.F.
2. Beltrán, R. (2009). *Diseño Geotécnico y Estructural de una Cimentación en Arcilla Expansiva*. México D.F.
3. Braja, D. M. (2006). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*. México D.F.: Thomson.
4. Braja, D. M. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: Cengage Learning Editores, S.A.
5. Castellanos, J. (11 de Febrero de 2016). *Intagri*. Obtenido de Manual del Uso del yeso Agrícola como Mejoramiento de Suelos: <https://www.intagri.com/articulos/suelos/manual-de-uso-del-yeso-agricola#>
6. Cristian Marcelo Guncay, Guido Fernando Morocho. (2005). *Estudio de Suelos Expansivos en Cuenca: Sector Parroquia Bellavista*. Cuenca.
7. Figueroa, L. M. (2003). Termocronología K Ar en IllitasÑ Aspectos Metodológicos, Vol 25. *Boletín de Geología*, 40.
8. Hausmann, M.R. (1990). *Engineering Principles of Ground Modification*. New York: McGraw-Hill.
9. Hernández, M. J. (2012). *El sistema de fallas de Jama en la plataforma continental (OFF-SHORE) del margen Ecuatoriano*. Quito.
10. I. Bernal, H. Cabezas, C. Espitia, J. Mojica y J. Quintero. (2003). Análisis Próximos de arcillas para cerámica. *Revista Académica Colombia Científica*, Vol. XXVII, 105.
11. Ibon Aranberri, Alexander Bismarck. (2007). Caracterización superficial de minerales arcillosos presentes en los depósitos de crudo. *Real Sociedad Española de Química*, Vol. 103(2), 23-27.
12. Instituto Nacional de Vías. (2007). *Normas I.N.V. E - 132-07*.
13. Jamsawang P., Nuansrithong N., Voottipruex P., Songpiriyakij S., Jongpradist P. (2017). Laboratory Investigations on the swelling behavior of composite Expansive Clays stabilized with shallow and deep clay-cement mixing methods. *Applied Clay Science*, 83-94.

14. Juárez, B. (NA). *Geolabs Blog, Laboratorio de Mecánica de Suelos y Pavimentos*. Obtenido de <http://geolabs.com.mx/blog/trabajo/estructura-de-los-suelos/>
15. L. Contreras, O. Escolano, V. Rodríguez, J. Díaz, R. Pérez, S. García, J. García Frutos. (2003). *Estudio de Adsorción de Fenantreno en Diferentes Tipos de Arcillas*. Madrid: CIEMAT.
16. L. Rucks, F. Garcia, A. Kaplan, J. Ponce de León, M. Hill. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*. Montevideo.
17. Laibana, P. (16 de junio de 2012). *FMF Foro de Minerales*. Obtenido de <http://www.foro-minerales.com/forum/viewtopic.php?t=7747>
18. López, A. A. (01 de Abril de 2015). *Tierra y Tecnología*. Obtenido de <https://www.icog.es/TyT/index.php/2015/04/arcillas-expansivas/>
19. María Calvo, Danny Durán. (2013). *Determinación del Índice de Compresibilidad e Índice de Expansión de los Suelos Cohesivos Blandos en la Zona de Tonsupa en la Provincia de Esmeraldas*. Quito.
20. Mendes Salas, Pineda Núñez. (NA). *Comportamiento de Cimentaciones en Suelos Expansivos*. México.
21. Mustafa Dayioglu, Bora Cetin, Soonkie Nam. (2017). Stabilization of expansive Belle Fourcheshale Clay whit different chemical additives. *Applied Clay Science*, 56-69.
22. Paul Garnica, Alfonso Pérez, Antonio Gómez, Yhaaraby Obil. (2002). *Estabilización de Suelos con Cloruro de Sodio para su Uso en las Vías Terrestres*. México: Sanfandila.
23. Pedro Matthey, Rafael Robayo, Jherson Díaz, Silvio Delvasto, José Monzó. (2015). Aplicación de Ceniza de Cascarrilla de Arroz Obtenida de un Proceso Agro Industrial para la Fabricación de BLOQUES DE CONCRETO NO Estructurales. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 286.
24. Peter L. Bebrry, David Reid. (2000). *Mecánica de Suelos*. Salford: McGRAW-HILL.

25. Practical Action, F. T. (Febrero de 1994). *Practical action*. Obtenido de The Schumacher Centre for Technology and Development: <http://practicalaction.org/practicalanswers/puzolanas>
26. Ramirez, J. (2006). *Reglamento de Construcciones Sismo-Resistentes*. Colombia: RAM Ediciones Digitales LTDA.
27. Sánchez, M. A. (2014). *Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Calcical del cantón Tosagua Provincia de Manabí*. Quito.
28. Sireesh Saride M. ASCE and Troyee Tanu Dutta. (2016). Effect of Fly-Ash Stabilization on Stiffness Modulus Degradation of Expansive Clays. *Mater. Civ. Eng.*, 675-684.
29. Thomas Rukenya Karatai, James Wambua Kaluli, Charles Kabubo and George Thiong'o. (2017). Soil stabilization Using Rice Husk Ash and Natural Lime as an Alternative to Cutting and Filling in Road Construction. *Constr. Eng. Manage.*, 1-5.
30. Thomas Rukenya, James Wambua, Charles Kabubo, George Thiong'o. (2017). Soil stabilization Using Rice Husk Ash and Natural Lime as an Alternative to Cutting and Filling in Road Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 143, 1-5.