

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL



TEMA DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

**“DETERMINACION DEL COMPORTAMIENTO AL HINCHAMIENTO
Y RETRACCIÓN DE SUELOS QUE TIENEN PLASTICIDAD, EN
ALGUNOS PUNTOS DE LA CARRETERA LONGITUDINAL DEL
NORTE, EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE METAPAN (DPTO.
SANTA ANA) Y SENSUNTEPEQUE (DPTO. CABAÑAS)”**

PRESENTADO POR:

VICTOR EDUARDO CALERO SANTOS

MARLON DANILO RIVERA CHÁVEZ

JORGE ULISES VALDEZ RIVERA

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL 2016

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR INTERINO :

LIC. JOSÉ LUIS ARGUETA ANTILLÓN

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR :

ING. JORGE OSWALDO RIVERA FLORES

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título :

**“DETERMINACION DEL COMPORTAMIENTO AL HINCHAMIENTO
Y RETRACCIÓN DE SUELOS QUE TIENEN PLASTICIDAD, EN
ALGUNOS PUNTOS DE LA CARRETERA LONGITUDINAL DEL
NORTE, EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE METAPAN (DPTO.
SANTA ANA) Y SENSUNTEPEQUE (DPTO. CABAÑAS)”**

Presentado por :

VITOR EDUARDO CALERO SANTOS

MARLON DANILO RIVERA CHÁVEZ

JORGE ULISES VALDEZ RIVERA

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores :

ING. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJÍA

ING. JOSÉ MIGUEL LANDAVERDE QUIJADA

San Salvador, Abril 2016

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores :

ING. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJÍA

ING. JOSÉ MIGUEL LANDAVERDE QUIJADA

AGRADECIMIENTOS.

La culminación de nuestra carrera es fruto del esfuerzo de muchas personas que han estado a lo largo de nuestra vida, dedicamos este trabajo de graduación y agradecemos a:

A Dios por darnos la sabiduría y fortaleza para entender y superar cada una de las etapas de la carrera y por permitirnos finalizarla de manera satisfactoria.

A nuestros padres por brindarnos su ayuda, por esforzarse día con día para darnos la mejor educación y por su constante apoyo moral en toda la realización de la carrera.

A nuestros hermanos y hermanas por brindarnos su apoyo incondicional.

A nuestros asesores por su ayuda a realizar este Trabajo de Graduación, aportando sus conocimientos y su tiempo para el desarrollo del mismo.

A nuestros compañeros y amigos que hicimos durante nuestra estancia en la UES y por su ayuda y apoyo en momentos claves de la carrera.

A familiares y amigos por estar presentes durante todo el desarrollo de nuestra carrera.

Que Dios los bendiga y que sus vidas estén llenas de bendición por siempre.

EL GRUPO.

DEDICATORIA.

Agradezco en primer lugar a Dios Todopoderoso por haberme permitido culminar mis estudios académicos, por haberme dado la sabiduría y entendimiento necesarios para comprender cada etapa de la carrera y por darme la fortaleza necesaria para seguir adelante.

Agradezco además, a mi madre, mis hermanas y mi hermano por su incondicional apoyo desde mi educación básica, por su incansable labor diaria para sacarme adelante y porque siempre han sido y serán las personas que me impulsen en la vida.

Quiero agradecer además, a mi novia por ser una persona que siempre me ha apoyado emocionalmente e incondicionalmente durante todo momento.

Agradezco también, a los asesores de nuestra tesis por guiarnos durante toda la investigación, por compartir su conocimiento y por brindarnos sus experiencias en el ámbito teórico y experimental para desarrollar el trabajo de graduación.

Y en última instancia doy gracias también, al personal del laboratorio de la Escuela de Ingeniería Civil, por su ayuda y colaboración en la realización de los ensayos de laboratorio.

Víctor Eduardo Calero Santos.

DEDICATORIA.

Doy principalmente gracias a **Dios**, porque él ha hecho posible que este Trabajo de Graduación finalice satisfactoriamente.

Agradezco, a los coordinadores de esta investigación, **Ing. Lesly Emidalia Mendoza Mejía, Ing. José Miguel Landaverde Quijada**, por su ayuda, comprensión, y por transmitir sus conocimientos técnicos; convirtiéndose, en un apoyo fundamental para que esta investigación culminaran de la mejor manera.

Agradezco a mis padres **Telma Chávez Navarrete y Héctor Antonio Rivera**, por el apoyo y entusiasmo recibido en todo este tiempo. Han sido el pilar fundamental para llegar hasta este momento importante de mi vida.

Agradezco a mi novia **Jessica Portillo** por darme fuerzas, aconsejar y estar conmigo en todo momento.

Gracias al Jefe de laboratorio de la Escuela de Ingeniería Civil el **Ing. Evelio López**, y a **Carlos Morataya** técnico de dicha escuela, por hacer posible la realización de los ensayos de laboratorio.

Agradezco también, a las personas que hicieron posible la realización de esta investigación: **Luis Cardoza, Jhovanny Anaya, Enmanuel Hernández, Jhony Gámez, Carlos Guzmán, Ledy Esquivel, Walther Ríos**

Marlon Danilo Rivera Chávez.

DEDICATORIA.

Primeramente doy gracias a Dios todopoderoso por haberme permitido haber culminado satisfactoriamente mis estudios universitarios porque sin Él no hubiera podido lograr este propósito ya que fue Dios el cual me brindó la sabiduría, la inteligencia, las fuerzas necesarias para lograr este objetivo y me protegió durante todo este proceso.

A mis padres **María Neri Elizandra Rivera de Valdez, Jorge Alberto Valdez Arias** por su apoyo y sacrificio para yo pudiera llegar a alcanzar esta meta, asimismo a mí hermano **Fredy Armando Valdez Rivera** y su esposa **Idalia Marina Mejía Valdez** por el apoyo y consejos que me brindaron a lo largo del estudio de mi carrera y por su ayuda en los momentos difíciles de mi vida, que Dios les bendiga siempre.

A mis amigos: **Ledy Esquivel, Jessica Portillo, Jhony Gámez, Walther Ríos, Diana Paola, Enmanuel Hernández,** quienes me mostraron siempre su amistad y apoyo a lo largo de esta travesía que fue culminar mis estudios universitarios.

A mis compañeros de Tesis **Víctor Eduardo Calero Santos, Marlon Danilo Rivera Chávez** por trabajar en equipo a pesar de las dificultades que se presentaron a lo largo de este trabajo de graduación que ustedes saben que fueron muchas, pero a pesar de todo eso con esfuerzo logramos terminar satisfactoriamente.

A mis asesores **Ing. Lesly E. Mendoza, Ing. José Miguel Landaverde** por su ayuda a realizar este Trabajo de Graduación, aportando sus conocimientos y su tiempo para el desarrollo del mismo, deseando que Dios los bendiga.

A todos los docentes. Que han formado parte de mi formación profesional hasta ahora, y además han mostrado una mano amiga, gracias.

A todas aquellas personas que han formado parte de este logro directa o indirectamente gracias.

Jorge Ulises Valdez Rivera.

ÍNDICE

Contenido	pág.
INTRODUCCIÓN.....	xxix
CAPITULO 1: CONSIDERACIONES GENERALES	1
1.1 ANTECEDENTES.	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	4
1.3 OBJETIVOS.	8
1.3.1 Objetivo general.	8
1.3.2 Objetivos específicos.	8
1.4 ALCANCES.	9
1.5 LIMITACIONES.	10
1.6 JUSTIFICACIÓN.....	11
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO	13
2.1 GENERALIDADES.....	14
2.2 ORIGEN DEL SUELO.	15
2.3 CONCEPTO DE SUELO.....	18
2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS.	20
2.4.1 Sistemas de clasificación de suelos.	23

2.5	SUELOS GRUESOS.....	27
2.5.1	Gravas:.....	27
2.5.2	Arenas	28
2.6	SUELOS FINOS.	29
2.6.1	Coloides.....	29
2.6.2	Limos.....	30
2.6.2.1	Origen de los limos.....	31
2.6.2.2	Características físicas de los limos.....	31
2.6.2.3	Mineralogía de los limos.....	32
2.6.3	Arcillas.....	32
2.6.3.1	Origen de las arcillas.....	33
2.6.3.2	Características físicas de las arcillas.....	33
2.6.3.3	Mineralogía de las arcillas.	34
2.6.3.4	Tipos de arcilla más comunes.....	48
2.6.3.5	Propiedades físico-químicas de las arcillas.....	50
2.6.3.6	Propiedades físicas de las arcillas.....	57
2.7	METODOLOGÍA PARA ESTUDIAR UN SUELO ARCILLOSO POTENCIALMENTE EXPANSIVO.....	84
2.7.1	Identificación mineralógica.....	84

2.7.2	Expansividad.....	85
2.7.3	Grado de pre-consolidación.	95
2.7.4	Humedad inicial.....	95
2.7.5	Influencia de la cementación.....	96
2.8	TÉCNICAS PARA MEJORAMIENTO DE SUELOS EXPANSIVOS.....	96
2.8.1	Impermeabilización.	97
2.8.2	Estabilización química.	97
2.8.3	Compactación.....	98
2.8.4	Remoldeo.	98
2.8.5	Sustitución del material.....	99
CAPITULO 3: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN		100
3.1	INTRODUCCIÓN.....	101
3.2	METODOLOGÍA PARA MUESTREO PRELIMINAR.	102
3.2.1	Obtención de información bibliográfica.	102
3.2.2	Visitas de campo de reconocimiento y definición de los puntos de muestreo.....	102
3.2.2.1	Reconocimientos de puntos de muestreo.	103
3.2.2.2	Ubicación de puntos de muestreo.....	105
3.2.2.3	Extracción de muestras.	105
3.2.2.3.1	Extracción de muestras alteradas.....	105

3.2.3	Ensayos de laboratorio.....	106
3.2.4	Análisis de resultados.....	106
3.3	METODOLOGÍA PARA MUESTREO DEFINITIVO.....	107
3.3.1	Visitas de campo para muestreo de puntos definitivos.....	107
3.3.2	Extracción de muestras.....	107
3.3.2.1	Extracción de muestras alteradas.....	108
3.3.2.2	Extracción de muestras inalteradas.....	108
3.3.3	Ensayos de laboratorio.....	109
3.3.3.1	ENSAYO LAMBE (INV E-132-07 / determinación de suelos expansivos).....	110
3.3.3.2	HINCHAMIENTO LIBRE (Retomado de UNE 103 601 / Expansión Libre- Retomado de ensayo de Presión de hinchamiento ASTM D-4546).....	128
3.3.3.3	PRESIÓN DE HINCHAMIENTO (Retomado de UNE 103 602 / Ensayo para calcular la presión de hinchamiento de un suelo en edómetro ASTM D-4546).....	135
	CAPITULO 4: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	143
4.1	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE MUESTREO PRELIMINAR.....	144
4.1.1	Obtención de información bibliográfica.....	144
4.1.2	Visitas de reconocimiento y definición de puntos de muestreo.....	150
4.1.2.1	Reconocimiento de puntos de muestreo preliminares.....	151
4.1.2.2	Ubicación de puntos de muestreo preliminares.....	154

4.1.2.3 Extracción de muestras.	155
4.1.3 Ensayos de laboratorio.	157
4.1.4 Análisis de resultados.	157
4.2 APLICACIÓN DE METODOLOGÍA DE MUESTREO DEFINITIVO.	165
4.2.1 Visitas de campo para muestreo de puntos de estudio definitivos.	165
4.2.2 Extracción de muestras.	166
4.2.2.1 Muestras alteradas.	166
4.2.2.2 Muestras inalteradas.	167
4.2.3 Ensayos de Laboratorio.	169
CAPITULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LABORATORIO	170
5.1 INTRODUCCIÓN.	171
5.2 RESULTADOS DE LABORATORIO PARA CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS EN ESTUDIO.	171
5.2.1 Humedad natural.	171
5.2.2 Límites de consistencia de los suelos (Límite líquido y límite plástico).	173
5.2.3 Gravedad específica.	174
5.2.4 Granulometría (Mecánica e hidrometría).	175
5.2.4.1 Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango).	175
5.2.4.2 Suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango).	179

5.2.4.3 Suelo No 4.2 (Nueva Concepción, Chalatenango).....	182
5.2.4.4 Suelo No 6 (Metapán).....	186
5.2.4.5 Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque).	189
5.2.5 Límite de Contracción.....	192
5.2.6 Caracterización de los suelos.....	194
5.2.7 Clasificación del potencial expansivo del material en base a propiedades índices.	196
5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE HINCHAMIENTO LIBRE, ENSAYO LAMBE Y PRESIÓN DE HINCHAMIENTO.....	200
5.3.1 Hinchamiento Libre.	200
5.3.1.1 Resultados de hinchamiento libre para el Suelo No 1.	201
5.3.1.2 Resultados de hinchamiento libre para suelo No 2.	207
5.3.1.3 Resultados de hinchamiento libre para suelo 4.2.....	209
5.3.1.4 Resultados de hinchamiento libre para suelo No 6.	210
5.3.1.5 Resultados de hinchamiento libre para suelo No 10.	214
5.3.1.6 Correlación entre los resultados obtenidos entre plasticidad e hinchamiento. ..	218
5.3.2 Ensayo Lambe.....	220
5.3.3 Presión de hinchamiento (Volumen constante).	224
5.3.3.1 Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango).....	224
5.3.3.2 Suelo No 2 (San Rafael, Chalatenango).....	230

5.3.3.3 Suelo No 6 (Metapán).....	235
5.3.3.4 Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque).....	239
5.4 RESUMEN DE RESULTADOS DE HINCHAMIENTO LIBRE, ENSAYO LAMBE Y PRESION DE HINCHAMIENTO.....	242
CAPITULO 6: APLICACIÓN PRÁCTICA DE RESULTADOS DE LABORATORIO	247
6.1 GENERALIDADES.....	248
6.2 DAÑOS OCASIONADOS POR SUELOS EXPANSIVOS.....	249
6.3 CAPA ACTIVA.....	252
6.4 TIPOS DE CIMENTACIÓN ADECUADOS PARA SUELOS EXPANSIVOS.....	256
6.5 APLICACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES.....	264
6.5.1 Caso práctico.....	266
CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	275
7.1 CONCLUSIONES.....	276
7.1.1 Conclusiones en base a resultados de laboratorio.....	276
7.1.2 Conclusiones de la aplicación de resultados de laboratorio.....	281
7.2 RECOMENDACIONES.....	282
7.2.1 Recomendaciones para ensayos de laboratorio.....	282
7.2.2 Recomendaciones en lo referente a la aplicación de resultados de laboratorio:	284

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	285
ANEXOS	289

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No 2.1: Carta de Plasticidad de Casagrande.....	23
Figura No 2.2: Estructura Molecular del Tetraedro (Unidad básica de los silicatos).....	36
Figura No 2.3: Cadenas de tetraedros.....	37
Figura No 2.4: Adición de átomos a la estructura para neutralizarla.....	37
Figura No 2.5: Estructura molecular de los silicatos.....	38
Figura No 2.6: Estructura molecular de Hoja tetraédrica tipo T.....	39
Figura No 2.7: Lámina compuesta por tetraedros (lamina tipo T).....	40
Figura No 2.8: Estructura molecular de Hoja Octaédrica (O).....	40
Figura No 2.9: Lamina tipo 1:1 (Estructura molecular tipo T-O).....	41
Figura No 2.10: Lamina tipo 2:1 (Estructura molecular de Hoja T-O-T).....	42
Figura No 2.11: Grupo de los Caolines.....	44
Figura No 2.12: Grupo de las Esmécticas.....	45
Figura No 2.13: Composición química de la lámina de T-O-T.....	47
Figura No 2.14: Familia de las micas.....	48

Figura No 2.15: Esquema de la estructura molecular de la caolinita.....	49
Figura No 2.16: Esquema de la estructura molecular de la illita.....	50
Figura No 2.17: Esquema de la estructura molecular de la montmorillonita.....	50
Figura No 2.18: Estructura química de la Sepiolita y la Paligorskita.....	56
Figura No 2.19: Esquema de los procesos de absorción.....	57
Figura No 2.20: Esquema de los procesos de adsorción.....	57
Figura No 2.21: Relación simplificada entre índice de plasticidad y porcentaje de la fracción de tamaño arcilloso por peso.....	62
Figura No 2.22: Proceso de hidratación de las arcillas, en forma secuencial (7 etapas).....	64
Figura No 2.23: Etapa 1.....	64
Figura No 2.24: Etapa 2.....	65
Figura No 2.25: Etapa 3.....	65
Figura No 2.26: Etapa 4.....	66
Figura No 2.27: Etapa 5.....	66
Figura No 2.28: Etapa 6.....	67
Figura No 2.29: Etapa 7.....	68
Figura No 2.30: Sección Aparato Lambe.....	75
Figura No 2.31: Relación índice hinchamiento y cambio potencial de volumen.....	76

Figura No 2.32: Representación gráfica de los límites de Atterberg.....	80
Figura No 2.33: Relación entre contenido de coloides, índice plástico y el límite de contracción.....	89
Figura No 2.34: Relación entre actividad y porcentaje de tamaño de arcilla.....	91
Figura No 2.35: Relación entre potencial de hinchamiento, succión y plasticidad.....	92
Figura No 2.36: Potencial de expansión y actividad.....	93
Figura No 3.1: Proceso de labrado de muestras: a) Labrado de muestra; b) Inserción de anillo en la muestra labrada; c) Toma de peso de anillo más probeta de suelo.....	114
Figura No 3.2: Ilustración del montaje del equipo Lambe (los elementos de color azul son los que se van colocando en el procedimiento de ensayo).....	116
Figura No 3.3: Gráfico % de hinchamiento vs presión.....	138
Figura No 4.1: Sección de mapa geológico donde se ubica el tramo en estudio.....	145
Figura No 4.2: Proceso de humedecimiento y remoldeo para evaluar dilatancia y plasticidad.....	152
Figura No 4.3: Mapa de ubicación de puntos muestreados.....	155
Figura No 4.4: Suelo natural en punto de muestreo No 10 (Sensuntepeque, Cabañas).....	156
Figura No 4.5: Procedimiento de extracción de muestras inalteradas en campo para los puntos de estudio definitivos.....	167
Figura No 6.1: Daños comunes en estructuras livianas debido al hinchamiento de suelos expansivos.....	249

Figura No 6.2: Daños provocados a edificaciones por suelos expansivos.....	250
Figura No 6.3: Variación de la capa activa en un estrato arcilloso.....	252
Figura No 6.4: Representación de los conceptos de succiones matricial, osmótica y total.....	254
Figura No 6.5: Perfil de zona activa de un suelo arcilloso ubicado en Santa Fé, Querétaro, México.....	255
Figura No 6.6: Transmisión de cargas a suelo firme por debajo de la capa activa.....	260
Figura No 6.7: Pozo relleno de concreto pobre que funciona como aislante de material expansivo.....	262
Figura No 6.8: Sustitución de suelo expansivo por material adecuado para cimentar.....	263
Figura No 6.9: Solución para suelo No 1.....	268
Figura No 6.10: Zapata corrida para muro.....	270
Figura No 6.11: Diseño de zapata corrida para suelo No 6.....	273
Figura No 6.12: Solución para suelo No 10.....	274

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No 2.1: Descripción de Mecanismos de ataque en Intemperismo Químico.....	17
Tabla No 2.2: Simbología utilizada para clasificar los suelos en el sistema SUCS.....	25
Tabla No 2.3: Características generales de los grupos del SUCS.....	25
Tabla No 2.4: Minerales constitutivos de la grava.....	28
Tabla No 2.5: Clasificación de coloides.....	30
Tabla No 2.6: Valores de superficie específica para diferentes arcillas.....	52
Tabla No 2.7: Valores de CIC para diferentes tipos de arcillas.....	55
Tabla No 2.8: Comportamiento del suelo respecto a su IL.....	58
Tabla No 2.9: Historial de esfuerzos a los que ha estado sometido el suelo, según el IL (suelos plásticos).....	59
Tabla No 2.10: Valores de actividad y potencial de hinchamiento en arcillas.....	60
Tabla No 2.11: Valores de Actividad para diferentes tipos de arcilla.....	61
Tabla No 2.12: Potencial de expansión de los minerales puros de arcilla.....	69
Tabla No 2.13: Energía de compactación según estado de la muestra de suelo.....	74
Tabla No 2.14: Relación entre Límites de Atterberg y otros índices del suelo.....	81
Tabla No 2.15: Plasticidad del suelo según el IP.....	83
Tabla No 2.16: Criterios de Expansividad.....	87

Tabla No 2.17: Clasificación del potencial expansivo respecto al IP.....	87
Tabla No 2.18: Clasificación de suelos expansivos basado en el Índice Plástico.....	88
Tabla No 2.19: Cambio de volumen en relación al límite de contracción e índice plástico.....	88
Tabla No 2.20: Estimación probable del cambio volumétrico en suelos expansivos.....	89
Tabla No 2.21: Relación entre potencial de hinchamiento, succión y plasticidad.....	91
Tabla No 2.22: Determinación del potencial de expansión.....	93
Tabla No 2.23: Clasificación del potencial de expansión del suelo.....	94.
Tabla No 2.24: Clasificación de suelos expansivos basado en el índice de plasticidad e índice de contracción.....	94
Tabla No 3.1: Características físicas esperadas de los suelos con plasticidad.....	104
Tabla No 3.2: Ensayos de laboratorio que se realizarán a muestras preliminares.....	106
Tabla No 3.3: Ensayos de laboratorio que se realizarán a los puntos definitivos.....	109
Tabla No 3.4: Alternativas de compactación de la probeta.....	112
Tabla No 3.5: Índice de expansión mediante el método Lambe.....	122
Tabla No 4.1: Resultados de la evaluación de las características del método visual – manual de la Norma ASTM D 2488; Resistencia en seco, dilatancia y plasticidad, en la zona de estudio.....	152
Tabla No 4.2: Ubicación detallada de cada punto de muestreo preliminar.....	154
Tabla No 4.3: Resultados obtenidos para ensayo de contenido de humedad.....	158

Tabla No 4.4: resultados de ensayos granulométrico, porcentaje de fracción gruesa y fina.....	159
Tabla No 4.5: Resultados de los ensayos de Límite Líquido y Limite Plástico los puntos de muestreo.....	160
Tabla No 4.6: Clasificación de Plasticidad de Suelos en base a su Índice de Plasticidad.....	161
Tabla No 4.7: Resultados de los ensayos de Gravedades Especificas a los suelos en estudio.....	162
Tabla No 4.8: Resumen de ensayos de laboratorio preliminares y selección de puntos de muestreo definitivos.....	163
Tabla No 4.9: Suelos seleccionados para estudio el definitivo.....	165
Tabla No 4.10: Ubicación de puntos de muestreo definitivos.....	166
Tabla No 5.1: Resultados obtenidos de ensayo de contenido de humedad.....	172
Tabla No 5.2: Resultados obtenidos para los ensayos de límite líquido y límite plástico.....	173
Tabla No 5.3: Resultados de ensayos obtenidos para Gravedad Específica.....	174
Tabla No 5.4: Resultados de los ensayos granulométricos para el suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango).....	176
Tabla No 5.5: Porcentaje de gruesos y finos del suelo No 1.....	177
Tabla No 5.6: Porcentaje de arcilla y coloide.....	177
Tabla No 5.7: Resultados de los ensayos granulométricos para el suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango).....	179

Tabla No 5.8: Porcentaje de gruesos y finos del suelo No 2.....	181
Tabla No 5.9: Porcentaje de arcilla y coloide para el suelo No 2.....	182
Tabla No 5.10: Resultados de los ensayos granulométricos para el suelo No 4.2 (Nueva Concepción, Chalatenango).....	183
Tabla No 5.11: Porcentaje de gruesos y finos del suelo No 4.2.....	185
Tabla No 5.12: Porcentaje de arcilla y coloide.....	186
Tabla No 5.13: Resultados de ensayo de granulometría para el suelo No 6 (Metapán).....	186
Tabla No 5.14: Porcentaje de gruesos y finos del suelo No 6.....	188
Tabla No 5.15: Porcentaje de arcilla y coloide.....	188
Tabla No 5.16: Resultados de ensayo de granulometría para suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque).....	189
Tabla No 5.17: Porcentaje de finos y gruesos del suelo No 10.....	191
Tabla No 5.18: porcentaje de arcilla y coloide.....	191
Tabla No 5.19: Resultados de los ensayos de límite de contracción (LC) e índice de contracción (IC).....	192
Tabla No 5.20: Caracterización y propiedades de los suelos en estudio.....	195
Tabla No 5.21: Clasificación de expansividad de acuerdo a propiedades índices.....	197
Tabla No 5.22: Resultados del ensayo de hinchamiento libre para el suelo No 1.....	202
Tabla No 5.23: Resultados de hinchamiento de suelo No 2.....	209

Tabla No 5.24: Resultados de hinchamientos y relaciones volumétricas del suelo 4.2.....	210
Tabla No 5.25: Resultados de hinchamientos y relaciones volumétricas del suelo No 6.....	212
Tabla No 5.26: Resultados de ensayos de hinchamiento (Suelo No 10).....	216
Tabla No 5.27: Valores de % de hinchamiento e índice plástico para los suelos seleccionados con su respectiva humedad inicial.....	219
Tabla No 5.28: Resultados del ensayo Lambe para los suelos en estudio.....	221
Tabla No 5.29: Categoría de cambio potencial de volumen (CPV).....	222
Tabla No 5.30: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 1).....	225
Tabla No 5.31: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 2).....	225
Tabla No 5.32: Presión vs diferencial de hinchamiento (Ensayo No 3).....	226
Tabla No 5.33: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 4).....	227
Tabla No 5.34: Resumen de resultados obtenidos para ensayo de presión de hinchamiento para suelo No 1.....	229
Tabla No 5.35: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 1).....	230
Tabla No 5.36: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 2).....	231
Tabla No 5.37: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 3).....	231
Tabla No 5.38: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 4).....	232

Tabla No 5.39: Resumen de resultados obtenidos para ensayo de presión de hinchamiento para suelo No 2.....	234
Tabla No 5.40: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 1).....	235
Tabla No 5.41: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 2).....	236
Tabla No 5.42: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 3).....	237
Tabla No 5.43: Resumen de resultados obtenidos para ensayo de presión de hinchamiento para suelo No 6.....	238
Tabla No 5.44: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 1).....	239
Tabla No 5.45: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 2).....	240
Tabla No 5.46: Resumen de resultados obtenidos del ensayo de presión de hinchamiento para suelo No 10.....	241
Tabla No 5.47: Resumen de resultados de ensayos de hinchamiento.....	242
Tabla No 5.48: Relación entre Potencial de Expansión e Hinchamiento Libre.....	243
Tabla No 6.1: Técnica y dispositivos para la medición de succión.....	254
Tabla No 6.2: Resultados de hinchamiento y presión de hinchamiento.....	265

ÍNDICE DE GRAFICOS

Gráfico No 3.1: Lectura del micrómetro vs presión (Lb/pie ²).....	124
Gráfico No 3.2: Índice de expansión vs Cambio potencial de volumen.....	125
Gráfico No 3.3: Índice de expansión vs Índice plástico.....	127
Gráfica No 5.1: Curvas Granulométricas del Suelo No 1.....	177
Gráfica No 5.2: Curvas Granulométricas del Suelo No 2.....	181
Gráfica No 5.3: Curvas Granulométricas del Suelo No 4.2.....	184
Gráfica No 5.4: Curvas Granulométricas del Suelo No 6.....	187
Gráfica No 5.5: Curvas Granulométricas Suelo No 10.....	190
Gráfica No 5.6: Relación entre el % de hinchamiento y humedad inicial (%) del suelo No 1.....	205
Gráfica No 5.7: Relación entre grado de saturación inicial de la probeta y % de hinchamiento (suelo No 1).....	206
Gráfica No 5.8: Relación entre % de hinchamiento y humedad inicial del suelo No 6.....	213
Gráfica No 5.9: Relación entre Peso volumétrico húmedo inicial y % de hinchamiento (suelo No 6).....	214
Gráfica No 5.10: Relación entre humedad inicial y % de hinchamiento (suelo No 10).....	217

Gráfica No 5.11: Relación entre Grado de saturación inicial e hinchamiento (suelo No 10).....	218
Gráfica No 5.12: Relación entre % de hinchamiento e índice plástico.....	219
Gráfica No 5.13: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 1).....	225
Gráfica No 5.14: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 2).....	226
Gráfica No 5.15: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 3).....	227
Gráfica No 5.16: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 4).....	228
Gráfica No 5.17: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 1).....	230
Gráfica No 5.18: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 2).....	231
Gráfica No 5.19: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 3).....	232
Gráfica No 5.20: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 4).....	233
Gráfica No 5.21: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 1).....	235
Gráfica No 5.22: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 2).....	236
Gráfica No 5.23: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 3).....	237
Gráficas No 5.24: Curva de Presión de hinchamiento (Ensayo No 1).....	239
Gráfica No 5.25: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 2).....	240

INTRODUCCIÓN.

Las obras civiles están presentes en cualquier lugar del mundo, estas van desde viviendas o carreteras de sencilla construcción hasta obras que representan un nivel de complejidad superior dentro del área ingenieril, tanto por su diseño y ejecución, un ejemplo de ello es el edificio “BurjKhalifa” ubicado en Emiratos Árabes Unidos que cuenta con más de 800 metros de altura.

Las obras civiles independientemente de su envergadura llevan consigo un análisis geotécnico correspondiente al material sobre el cual serán emplazadas, de manera de asegurar que se cuenta con una superficie capaz de soportar las cargas que la estructura transmitirá al suelo.

En el área de pavimentos, la importancia del estudio geotécnico influye en aspectos como el análisis para determinar los espesores de las capas que componen la estructura del pavimento e incluso, en el tipo de material del que estará compuesta cada capa.

Existen muchos problemas que experimentan las estructuras, que se derivan de un estudio geotécnico deficiente, que en la mayoría de los casos, no revelan lo perjudicial que pueden ser ciertos materiales que sustentan la obra.

Dentro de los materiales de comportamiento anómalo para el emplazamiento de cualquier obra civil están los suelos plásticos. Estos materiales tienen un comportamiento de expansión-contracción, debido a la cantidad de agua que puede tener en su composición. Es decir, al tener una mayor cantidad de agua se expanden y

cuando esta agua se evapora, producto de aumentos de temperatura, estos se contraen.

El comportamiento de suelos que tienen plasticidad, debe ser obtenido en base a resultado de ensayos de laboratorio, de tal forma, de caracterizarlos adecuadamente, conociendo así los cambios volumétricos (expansión y contracción) que podrían experimentar, bajo determinadas condiciones de carga y humedad.

Ante el aumento de humedad, algunos materiales se disgregan, otros, como en el caso de materiales plásticos (arcillosos o que tengan presencia de ellas), se expanden, cambiando su estado físico de sólido a plástico.

En esta investigación, se estudiará el comportamiento que presentan los suelos plásticos a la expansión y a la retracción, lo cual se conseguirá mediante ensayos de laboratorios. Estos ensayos se realizan bajo condiciones de saturación del material y son conocidos como “Ensayo Lambe”, “Presión de hinchamiento”, “Hinchamiento libre” y “Limite de Contracción”.

Los suelos a ensayar serán seleccionados y extraídos de ciertos puntos comprendidos en el tramo de Metapán (Santa Ana) y Sensuntepeque (Cabañas), junto a la carretera Longitudinal del Norte. El material se tomará de zonas donde sea posible visualizar en los laterales, suelos con comportamiento plásticos (suelos agrietados) o donde se observen daños en los taludes de la carretera.

Se realizará un muestreo preliminar a lo largo del tramo antes mencionado, y por medio de ensayos de laboratorio se caracterizaran los materiales extraídos.

Luego de haber generado los resultados preliminares en el laboratorio, se escogerán al menos 3 puntos que sean los más representativos del muestreo preliminar; la investigación se enfocará en determinar el comportamiento de los suelos plásticos ante el hinchamiento y retracción de los puntos definitivos seleccionados, y en base a este, proponer las alternativas Geotécnicas que mejor se adapten a las condiciones del terreno natural.

CAPITULO 1:

CONSIDERACIONES GENERALES

1.1 ANTECEDENTES.

Desde hace mucho tiempo el ser humano comenzó a construir edificaciones en diferentes entornos, en los cuales han estado presentes diversos tipos de suelos, que en ocasiones tenían condiciones favorables para emplazar las construcciones, y en otras, generaban problemas de estabilidad en ellas.

A lo largo de la historia han existido muchos investigadores que se dedicaron a estudiar los suelos, y a partir de esos estudios se han formulado hipótesis, teorías y aplicaciones prácticas. Entre ellos, cabe mencionar a Karl Von Terzaghi, ingeniero reconocido como el fundador de la mecánica de Suelos y de la Ingeniería Geotécnica, quien presentó una nueva filosofía relativa al suelo como material de estudio, y muestra cómo tratar sus propiedades mecánicas y su comportamiento bajo diversas cargas y condiciones de humedad.

A partir de la publicación del eminente profesor K.V. Terzaghi, han aparecido numerosos trabajos e importantes investigaciones relacionados con los suelos. Así, figuran entre los más sobresalientes en el ramo: Arthur Casagrande con su clasificación de suelos y la creación de la copa para determinación de Límite líquido, *La Copa de Casagrande*.

Estas investigaciones han ayudado a comprender de mejor manera el comportamiento y las propiedades de los suelos, tomando en cuenta, que un suelo puede estar compuesto por una gama de materiales, y que muchos de estos, podrían generar problemas a la cimentación que se construirá sobre él.

Dentro de los materiales que componen el suelo, se pueden mencionar de manera general: gravas y arenas (suelos gruesos), limos y arcillas (suelos finos); estos se encuentran mezclados entre sí en la naturaleza y presentes en diferentes proporciones, dando origen a los tipos de suelos. De los materiales mencionados, existen unos que particularmente merecen especial atención: los suelos plásticos, debido a que son materiales muy susceptibles a cambios de volumen ante el aumento o disminución del contenido de humedad, este hecho representa un problema en la construcción de obras civiles.

Los materiales plásticos tienen la capacidad de absorber una gran cantidad de agua y retenerla, debido a su estructura molecular y a su composición química.

En El Salvador existen muchas zonas donde se encuentran materiales plásticos, y una de las herramientas a disposición para ubicar dichas zonas, es el mapa Geológico de El Salvador. El cual fue elaborado por un equipo de investigadores alemanes, entre los años 60's y 70's; mapa donde se delimita la geología de la mayoría de las rocas que dieron origen a los suelos que se encuentran en el país.

Para proyectar los elementos de cimentación sobre estos suelos, es necesario conocer el comportamiento que presentan, y de esta manera poder tomar las precauciones necesarias al cimentar.

Dentro de los estudios realizados en El Salvador para conocer el comportamiento de estos suelos tenemos: "Estudio experimental de las arcillas negras de Pasaquina para su utilización como material de construcción", en el departamento de La Unión;

investigación que data del año 1992. Así como también: “Clasificación de Arcillas presentes en los bancos de Guatajiagua, departamento de Morazán, y Facultad Multidisciplinaria Oriental” que data del año 2007. Ambas investigaciones han sido realizadas como trabajos de graduación de la Universidad de El Salvador. En estos trabajos se ha llevado a cabo una investigación exhaustiva para determinar la composición mineralógica, clasificación del material, etc. de las arcillas que están en algunos sitios (específicos) de El Salvador. Sin embargo, a la fecha no se ha realizado un estudio de los materiales plásticos (arcillas o limos con arcilla, etc.) presentes en la zona norte del país, en lo que respecta al hinchamiento o retracción del material. Por ello, el presente trabajo de graduación se centrará en investigar, el comportamiento ante cambios volumétricos de estos suelos, en un tramo de la carretera longitudinal del norte.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El comportamiento de los suelos que tienen, frente a diferentes cambios de humedad es muy variable, y genera especial interés para los ingenieros civiles, cuando sobre estos materiales se construye la cimentación de una obra en particular.

En El Salvador existen muchas zonas con suelos que tienen plasticidad, tal es el caso de Ilobasco, Chalatenango, Morazán, Pasaquina, la zona de la Cordillera del Bálsamo, entre otras; y dentro de estos lugares se presentaron problemas, tales como: agrietamiento en estructuras en particular, como también deslizamientos en taludes y laderas.

Un proyecto que ha presentado problemas debido al comportamiento de los materiales citados, es el Tramo entre las Ciudades de Metapán y Santa Ana (Dpto. Santa Ana), donde en algunos puntos se necesitó corregir pequeños agrietamientos y hundimientos sobre la capa de rodadura de concreto hidráulico, la cual requirió reparaciones, y los efectos de cambios volumétricos del material de cimentación influyó en gran medida en dichas imperfecciones.

Los efectos negativos de los suelos plásticos o suelos que poseen cierta plasticidad sobre las estructuras, han sido generalmente traducidos a problemas de agrietamiento. Cuando se tienen presentes estos materiales, el mayor número de problemas en casos presentados en carreteras, se da debido a cambios volumétricos en los materiales del terreno natural de fundación que afecta directamente a la capa de rodadura, sea ésta de concreto hidráulico o concreto Asfáltico.

Algunos casos donde la capa de pavimento es de asfalto, la carretera tiende a presentar hundimientos. En el caso de viviendas construidas de mampostería, por lo general son las paredes las que presentan el agrietamiento (en los elementos más débiles), y en el caso de los marcos de concreto reforzado, generalmente se presentan cerca de las uniones de los elementos estructurales.

El problema estriba en el comportamiento de los suelos plásticos (específicamente la fracción de arcilla presente en estos). Estos materiales molecularmente son láminas sobrepuestas, cuando el agua penetra entre las láminas, la masa de suelo se expande

según la cantidad de agua presente. Esto hace que se generen cambios en su volumen y con ello subpresiones sobre las estructuras.

Dentro de las posibles soluciones que se toman como válidas para la mejora de un problema de este tipo, están:

- Retirar la capa de material plástico (arcilla o material con alta proporción de arcilla).
- Estabilización con cal, cemento, emulsión asfáltica, u otro material que permita disminuir la plasticidad del material.
- Aislar con suelo cemento.
- Equilibrar el hinchamiento con una capa de suelo selecto colocada sobre los suelos plásticos, para apoyar la estructura que haya que cimentar sobre esta, entre otras.

Cada una de estas soluciones está sujeta al tipo de material plástico que se encuentra en el lugar. Para ello, es necesario conocer su plasticidad, mineralogía, porcentaje de arcilla o limo, determinando así, a qué grupo pertenecen.

La fracción correspondiente a la arcilla puede ser: Montmorillonita, Caolinita e Illita. Lo anterior, requiere la realización de ensayos como los límites de Atterberg, granulometrías por sedimentación y difracción de rayos X, que proporcionarían la información necesaria para determinar el tipo de arcilla que se tiene.

Los estudios realizados sobre los suelos arcillosos en El Salvador, se han enfatizado en el tema de la plasticidad o la estabilización de las arcillas. Ya que para muchos el

interés principal estriba en los conocimientos sobre, “material arcilloso en los procesos industriales” o “mejoramiento de suelos arcillosos como sub-base”. Ahora se pretende profundizar en cuanto a la Expansividad de materiales plásticos, con el propósito de incorporarlo como una herramienta en la solución de los problemas, a los que se puede enfrentar el ingeniero civil, cuando se le presenta trabajar con este tipo particular de suelos.

En estudios realizados por algunos autores han tratado de correlacionar el grado de Expansividad (hinchamiento) con algunas de las propiedades de los suelos plásticos como: índice de plasticidad, límite de contracción, contenido coloidal, etc. (Ladd y Lambe-1961, Holtz y Gibbs-1956, Skempton-1953). Sin embargo, los ensayos más utilizados para medir el hinchamiento de estos suelos son:

1. Expansión Libre, en el que se obtiene el máximo hinchamiento del material arcilloso (medido en porcentaje).
2. Presión de Hinchamiento, donde se obtiene la máxima presión que el material plástico puede generar.
3. Ensayo Lambe, en éste se obtiene un índice de expansión, es decir, se obtiene un resultado cualitativo de que tan activo es el material.

Por ello, las soluciones que pueden tomarse deben basarse en estos resultados y la cantidad de material plástico que se tenga que tratar.

Por lo anteriormente planteado, se presenta la necesidad de determinar las características mencionadas para utilizarlas en la toma de decisiones ingenieriles, en los

problemas con suelos plásticos, que permitan asegurar y mejorar el comportamiento de las obras civiles que se cimentaran sobre ellos.

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 Objetivo general.

- ✓ Determinación del comportamiento al hinchamiento y retracción de suelos que tienen plasticidad, en algunos puntos de la carretera Longitudinal del Norte, en el tramo comprendido entre Metapán (Dpto. Santa Ana) y Sensuntepeque (Dpto. Cabañas).

1.3.2 Objetivos específicos.

- ✓ Ubicar y muestrear varios puntos donde se encuentren suelos que posean plasticidad, en el área de interés.
- ✓ Determinar mediante ensayos de laboratorio el grado de plasticidad de los materiales de los diferentes puntos muestreados.
- ✓ Seleccionar al menos 3 materiales con la plasticidad requerida para la investigación en el tramo de estudio (alta, media y baja plasticidad).
- ✓ Determinar los componentes mineralógicos que constituyen los suelos seleccionados.
- ✓ Determinar la máxima presión de hinchamiento, Hinchamiento máximo e Índice de Expansión, retracción y granulometría por sedimentación, del material en los puntos seleccionados.

- ✓ Aplicar los resultados de hinchamiento en la solución de problemas prácticos, que podrían presentarse al proyectar la cimentación de una estructura de pavimento o edificación. Tratándose de que la solución sea la que mejor se adapte al funcionamiento de la estructura ante cambios volumétricos.
- ✓ De acuerdo a los resultados obtenidos, recomendar la solución que mejor se adapte a los tipos de suelos en estudio, para controlar los cambios volumétricos que presentan estos materiales y que afectan a las estructuras cimentadas sobre ellos.

1.4 ALCANCES.

- ✓ Se realizarán muestreos preliminares sobre ciertos puntos de la carretera Longitudinal del Norte (CA-3), para obtener materiales con diferentes plasticidades, que sirvan para seleccionar al menos tres que presenten las características deseadas. Este muestreo tendrá como base una visita de campo, en la cual se identificarán los puntos (del tramo de carretera), donde se realizará el muestreo.
- ✓ Se buscará determinar suelos de diferentes plasticidades. Con alta plasticidad, intermedia y de plasticidad baja, parámetros que se determinaran a partir de ensayos de laboratorio (límites de Atterberg, gravedades específicas y granulometrías por lavado).
- ✓ Se realizará un muestreo definitivo en los bancos de materiales seleccionados en base al grado de plasticidad determinado.

- ✓ Se realizarán ensayos de laboratorio para determinar Expansión máxima, Presión hinchamiento, Índice de expansión del material seleccionado, Granulometría e Hidrometría, límites de Atterberg y Ensayo para la determinación de la mineralogía del material.
- ✓ Una vez determinados los parámetros requeridos, se aplicaran en la solución de problemas geotécnicos que tienen como material de fundación suelos plásticos, de tal manera que la solución aplicada sea capaz de contrarrestar los efectos del hinchamiento que generan estos tipos de suelos.

1.5 LIMITACIONES.

1. Debido a la extensión de la Carretera Longitudinal del Norte se vuelve difícil muestrear toda la carretera, por ello se ha delimitado el tramo entre Metapán (Dpto. Santa Ana) a Sensuntepeque (Dpto. Cabañas), para ello se tomaran al menos 10 puntos preliminares, los cuales servirán de base para seleccionar los puntos de muestreo definitivos, al menos 3 con diferentes plasticidades (con alta, media y con baja plasticidad).
2. Las muestras no se tomarán de los materiales bajo la capa de rodadura, sino, de puntos adyacentes que sean representativos del material de dicha zona.
3. La caracterización de los materiales en estudio, se hará en base a resultados de laboratorio y no de campo.

4. La aplicación de los resultados será a nivel teórico y no se verificará su efectividad en campo, debido a que requiere de recursos, tiempo y de un problema en particular, que esta fuera de los alcances de la investigación.

1.6 JUSTIFICACIÓN.

Los suelos plásticos, se conocen en forma práctica que experimentan expansiones o contracciones debido a los cambios del contenido de humedad. Al hincharse pueden generar presiones sobre los cimientos de las construcciones, asentamientos, desplazamientos laterales, y en los pavimentos agrietamientos en la capa de rodadura, etc.

En nuestro país en forma acelerada va aumentando la demografía poblacional. Esto nos conduce a tener que buscar nuevos terrenos donde probablemente vayan a construirse nuevas obras civiles, aun si, las estructuras deban ser apoyadas sobre suelos plásticos, que se sabe generan problemas en su estabilidad, por lo que existe la necesidad de buscar alternativas geotécnicas que permitan tener un buen comportamiento de las estructuras.

Para proporcionarle un tratamiento adecuado a los suelos de este tipo, es importante conocer qué tipo de arcilla y porcentaje de ella que se tiene en el lugar y su comportamiento. Esto se logra a partir de una investigación, llevando a cabo ensayos de laboratorio para determinar qué tan expansivas pueden ser.

En El Salvador existen zonas que se han visto afectadas por la presencia de suelos que contienen plasticidad, tal es el caso de la carretera Santa Ana- Metapán (Dpto. de Santa

Ana), específicamente en ciertos puntos, se ha podido identificar una gama de materiales, y en el caso más desfavorable que sean plásticos, lo que ha provocado pequeños agrietamientos sobre la capa de rodadura. Expertos en Geotecnia acreditan estos daños al fenómeno de hinchamiento de materiales plásticos. Por ello, se tomará como base este conocimiento previo, que servirá de referencia para analizar el material del tramo de interés.

La orientación que lleva esta investigación es poder determinar valores cuantitativos de hinchamiento y retracción, que reflejen el comportamiento de estos materiales en su condición natural más desfavorable (saturación del suelo). Por lo que se requiere la realización de ensayos de Hinchamiento libre, Presión de Hinchamiento, Ensayo Lambe y contracción.

El conocimiento de estos resultados es vital y debe ser considerado en el análisis y diseño de proyectos que se desarrollen en la construcción de obras civiles que serán cimentadas sobre estos materiales, y que permitan no verse afectadas por deformaciones mayores a las admisibles.

CAPITULO 2:
MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES.

En este capítulo se presenta de manera general como se origina el suelo, los factores que intervienen para su formación (intemperismo) y el concepto que se tiene de él en el área de geotecnia.

Para poder identificar y clasificar la gama de suelos que se encuentran en la naturaleza, están los sistemas de clasificación, que con base a características físicas como tamaño de grano y plasticidad los dividen en: Suelos gruesos (gravas y arenas) y suelos finos (limos, arcillas y coloides).

La fracción gruesa es originada por factores mecánicos, por lo tanto, no son alterados químicamente, en cambio la fracción fina es la que presenta la plasticidad en las diferentes mezclas de suelo que existen en la naturaleza, ya que esta fracción del suelo no solo es originada por factores mecánicos, sino también en combinación con factores químicos, que han modificado la estructura química de la roca madre.

La fracción fina debido a que presenta plasticidad es la que genera los cambios volumétricos (hinchamiento-retracción), los cuales son el objetivo principal de esta investigación. Las arcillas y los coloides son los que presentan mayor plasticidad y los limos en menor proporción.

Por ello, este capítulo desarrolla a profundidad los suelos finos, limos, coloides y en especial las arcillas. Estudiando el origen, la mineralogía, propiedades físicas y fisicoquímicas, que dan origen al hinchamiento y retracción.

Además, se presenta una metodología con base en estudios que realizaron investigadores como Seed, Lambe, Holtz y Gibbs, entre otros, para identificar suelos arcillosos que puedan tener un potencial de expansión.

Para finalizar, se mencionan algunas técnicas que se utilizan para controlar los cambios volumétricos que pueden tener suelos expansivos (arcillosos).

2.2 ORIGEN DEL SUELO.

Todos los suelos tienen su origen directamente de las rocas sólidas, que se clasifican de acuerdo con su origen y proceso de formación en:

- **Rocas ígneas:** se forman por el enfriamiento del material fundido (magma) dentro o sobre la superficie de la corteza terrestre.
- **Rocas sedimentarias:** se forman por la acumulación de sedimentos mediante el proceso de litificación en cuerpos de agua como mares y lagos.
- **Rocas metamórficas:** son las que se forman por la modificación en la estructura química a causa de calor extremo o presiones muy altas.

La corteza terrestre está constituida en su mayor parte por roca ígnea, además de rocas sedimentarias y metamórficas en menor proporción, sin embargo, es atacada constantemente por diferentes agentes que la modifican, principalmente por el aire y el agua. Se genera una degradación de la roca madre y se forman los suelos. A esta degradación de las rocas se le conoce con el nombre de Intemperización.

La **Intemperización** o **Degradación**, que a su vez puede ser **Física** como también **Química**, es el concepto fundamental para definir lo que le sucede a las rocas para que se formen los suelos.

Intemperización: Es la acción combinada de procesos (climáticos, biológicos, etc.) mediante los cuales la roca es descompuesta y desintegrada por la exposición continua a los agentes atmosféricos, transformando a las rocas masivas y duras en un manto residual finamente fragmentado.¹

Todos los mecanismos de ataque a las rocas pueden incluirse en dos grandes grupos:

- ✓ **Intemperismo mecánico:** Se refiere a un proceso de desintegración en el que las rocas se rompen en fragmentos más y más pequeños, como el resultado de la energía desarrollada por las fuerza físicas.²

Algunos de los agentes físicos que intervienen son:

- a) Cambios periódicos de temperatura (expansión y contracción térmica).
- b) Acción de la congelación del agua en las juntas y grietas de las rocas (que actúa como cuña).
- c) Liberación de presiones.
- d) Crecimiento de cristal salino.
- e) Efectos de organismos vivos (plantas y animales).

¹ Por: M.I. Hugo Sergio Haas Mora. Formación de suelos. Universidad Autónoma de México. Pag.4.

² Por: M.I. Hugo Sergio Haas Mora. Formación de suelos. Universidad Autónoma de México. Pag.6.

- ✓ **Intemperismo químico:** Se refiere a la transformación del material original que denota cambios en las propiedades químicas del material primitivo que integran la roca, transformando la constitución mineralógica en nuevos minerales que son más estables con la temperatura y presiones relativamente bajas existentes en la superficie terrestre³. El principal agente es el agua. En la Tabla No 2.1, están contenidos los mecanismos de ataque más importantes.

Tabla No 2.1: Descripción de Mecanismos de ataque en Intemperismo Químico.

Mecanismo de ataque	Descripción
Oxidación	Se produce por la acción del oxígeno, generalmente cuando es liberado en el agua. En la oxidación existe una reducción simultánea, ya que la sustancia oxidante se reduce al adueñarse de los electrones que pierde la que se oxida. Los estratos rocosos de tonalidades rojizas, ocres o parduzcas, tan abundantes, se producen por la oxidación del hierro contenido en las rocas.
Hidratación	Es el proceso por el cual el agua se combina químicamente con un compuesto. Cuando las moléculas de agua se introducen a través de las redes cristalinas de las rocas se produce una presión que causa un aumento de volumen, que en algunos casos puede llegar al 50%. Cuando estos materiales transformados se secan se produce el efecto contrario, se genera una contracción y se resquebrajan.
Carbonatación	Consiste en la capacidad del dióxido de carbono para actuar por sí mismo, o para disolverse en el agua y formar ácido carbónico en pequeñas cantidades. El agua carbonatada reacciona con rocas cuyos minerales predominantes sean calcio, magnesio, sodio o potasio, dando lugar a los carbonatos y bicarbonatos.
Disolución	Consiste en la incorporación de las moléculas de un cuerpo sólido a un disolvente como es el agua. Mediante este sistema se disuelven muchas rocas sedimentarias compuestas por las sales que quedaron al evaporarse el agua que las contenía en solución.
Hidrolisis	Es la descomposición química de una sustancia por el agua, que a su vez también se descompone. En este proceso el agua se transforma en iones que pueden reaccionar con determinados minerales, a los cuales rompen sus redes cristalinas. Este es el proceso que ha originado la mayoría de materiales arcillosos que conocemos.
Acción biológica	Los componentes minerales de las rocas pueden ser descompuestos por la acción de sustancias liberadas por organismos vivos, tales como ácidos nítricos, amoniacos y dióxido de carbono, que potencian la acción erosionadora del agua.

FUENTE: De los autores.

³ Por: M.I. Hugo Sergio Haas Mora. Formación de suelos. Universidad Autónoma de México. 2010. Pag.13.

2.3 CONCEPTO DE SUELO.

Los suelos provienen a partir de la disgregación de un macizo rocoso, debido a agentes como el agua, el viento, la temperatura, reacciones químicas, etc. Sin embargo, es importante conocer el concepto que se tiene acerca de él.

Para el interés de la geotecnia el suelo se puede definir de la siguiente manera:

Suelo: Es el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) junto con el líquido y gas que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas⁴.

El suelo es un material heterogéneo que varía de un punto a otro, tanto en aspectos físicos como: color, textura, olor y tamaño de los granos, así como en su estructura química.

Al formarse el suelo, la roca de la que se origina ocupa la parte más baja y alejada de la superficie, y el suelo la más alta. Cuando el suelo permanece en el sitio de formación se le denomina suelo residual, y cuando ha sufrido transporte, siendo removido del lugar de formación y depositados en otra zona, quedando en la parte superior de otros estratos sin relación directa con ellos, se les denomina suelos transportados⁵.

De los numerosos agentes de transporte, los principales son los glaciares, el viento, los ríos y corrientes de agua superficial, los mares y las fuerzas de gravedad; estos factores actúan a menudo en combinación.

⁴Braja M. Das. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Editorial: Thompson Learning. 2001. Pág. 1.

⁵ Luis I. Gonzáles de Vallejo, Mercedes Ferrer. Ingeniería Geológica. Editorial: Prentice Hall. 2002. Pág. 18.

El escurrimiento de flujos de agua produce arrastre de materiales de gran tamaño (mayor tamaño a mayores velocidades del agua), depositados en forma graduada a lo largo de su curso. Los materiales más finos se depositan en las zonas planas de los valles.

Los ríos acarrean materiales de muy diversas graduaciones, depositándolos a lo largo de su perfil, según la velocidad de su curso. Al disminuir ésta, se depositan los materiales más gruesos. Las partículas más finas (limos y arcillas) corresponden a depósitos próximos a la desembocadura de los ríos, en aguas tranquilas.

Los vientos pueden arrastrar desde partículas de limo hasta arenas gruesas, a veces a grandes distancias del lugar de origen.

En general, se pueden definir los tipos de suelo siguientes:

- ✓ **Suelos Residuales:** Son los remanentes de la intemperización de las rocas que no han sido transportados. Suelen ser arenosos o con gravas (gravosos) con altas concentraciones de óxidos, resultantes de los procesos de lixiviación (líquido pasa a través de un sólido pulverizado para que se produzca la disolución de uno o más de los componentes solubles del sólido).
- ✓ **Suelos Transportados:** Este es un término geológico que describe a los depósitos superficiales que han sido removidos del lugar de su formación, y depositados en otra zona, no consolidados, de origen reciente, tales como aluvión y arena arrastrada por el viento.

2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS.

Dada la complejidad y prácticamente la infinita variedad con que los suelos se presentan en la naturaleza, cualquier intento de sistematización científica, debe ir precedido por otro de clasificación completa.⁶

Para estudiar un material complejo como el suelo (con diferente tamaño de partículas y composición química) es necesario seguir una metodología con definiciones y sistemas de evaluación de propiedades del suelo⁷.

La información que se utilice para clasificar los suelos debe ser cualitativa, ya que si se incluyen relaciones cuantitativas tomando en cuenta sus propiedades mecánicas se vuelve muy complicado y engorroso.

Las propiedades físicas que se utilizan en algunos sistemas de clasificación son:

- **Granulometría**

Se denomina distribución granulométrica de un suelo a la división del mismo en diferentes fracciones, seleccionadas por el tamaño de sus partículas componentes; las partículas de cada fracción se caracterizan porque su tamaño se encuentra comprendido entre un valor máximo y un valor mínimo de una malla con aberturas determinadas⁸.

⁶ Juárez Badillo, Rico Rodríguez. Mecánica de Suelos (Tomo I). Editorial: Limusa, México. 1992. Pág. 149.

⁷ Luis I. Gonzáles de Vallejo, Mercedes Ferrer. Ingeniería Geológica. Editorial: Prentice Hall. 2002. Pág. 20.

⁸ Rico Rodríguez Alfonso y Hermilio del Castillo. La ingeniería de suelos en las vías terrestres (Tomo I). Editorial: Limusa, México. 1981. Pág. 24.

Se refiere a las proporciones relativas en que se encuentran las diferentes partículas minerales del suelo expresada en base al peso seco de una muestra del suelo (en porcentaje). La separación en fracciones se hace sencillamente por mallas, cuando es posible el cribado (tamizado).

Habiendo obtenido el porcentaje de cada fracción, se obtiene la curva granulométrica donde se observa la tendencia de si está bien graduado o no el suelo.

- Límites de Consistencia

Definen la consistencia del suelo en función del contenido de humedad, a través de la determinación de la relación entre la masa de agua contenida en una muestra de suelo antes de secarse y la masa de los sólidos.

Se definen tres valores de contenidos de humedad: Límite de Contracción, que separa el estado sólido seco y semisólido, el límite plástico, que separa el estado semisólido del plástico, y el límite líquido, que separa el estado plástico del semilíquido (Los dos últimos son los más utilizados)⁹.

El índice plástico es la diferencia entre el límite líquido y límite plástico. Este valor indica un rango de humedades en las que la fracción fina permanece en estado plástico.

⁹ Los ensayos de granulometría y límites de consistencia se desarrollaran más a fondo en el Capítulo No 3.

- Carta de Plasticidad

Tras un estudio experimental de diferentes muestras de suelo de grano fino, Casagrande consigue ubicarlos en un diagrama que relaciona el Límite Líquido (LL) con el Índice de Plasticidad (IP). Este diagrama es conocido como la Carta de Casagrande de los suelos cohesivos (Carta de Plasticidad. Ver Figura No 2.1).

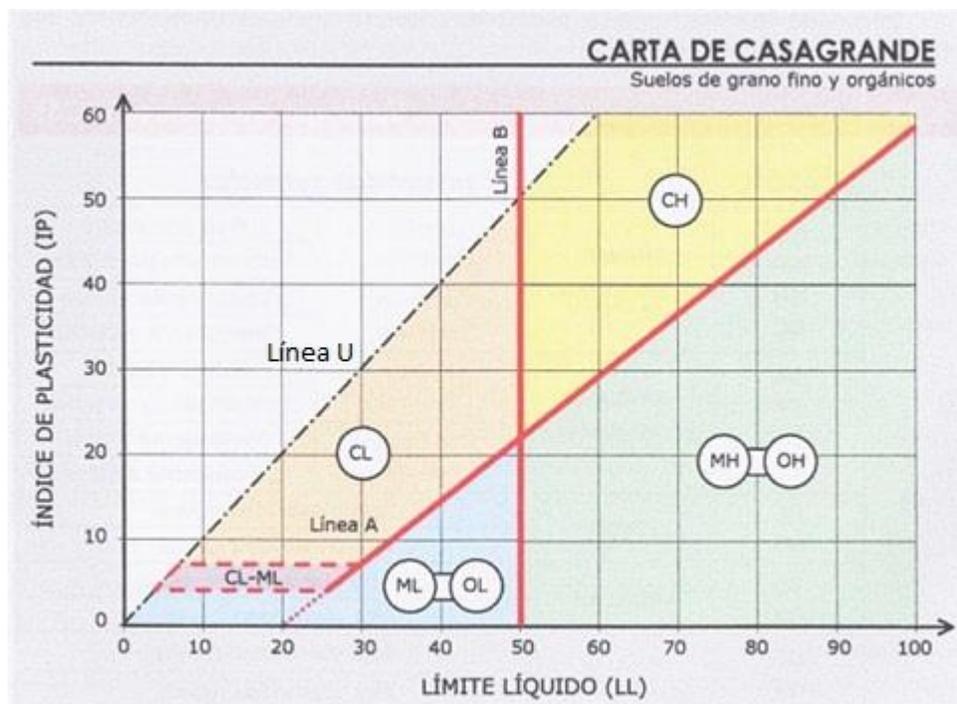
La característica importante de esta carta es la línea A empírica dada por la ecuación:

$IP = 0.73(LL - 20)$. La línea separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos.

Los limos orgánicos se grafican en la misma región de los limos inorgánicos de compresibilidad media (debajo de la línea A y con el LL variando entre 30 y 50). Las arcillas orgánicas se grafican en la misma región que los limos inorgánicos de alta compresibilidad (debajo de la Línea A y LL mayor que 50).

La línea U se encuentra arriba de la línea A, y es aproximadamente el límite superior de la relación del IP respecto al LL para cualquier suelo encontrado hasta ahora. La ecuación para la línea U se da como: $IP = 0.9(LL - 8)$.

Figura No 2.1: Carta de Plasticidad de Casagrande.



FUENTE: http://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02010103.pdf

2.4.1 Sistemas de clasificación de suelos.

Dada la gran variedad de suelos que se presentan en la naturaleza, la Mecánica de Suelos ha desarrollado algunos métodos de clasificación. Cada uno de estos métodos tiene, prácticamente su campo de aplicación, según la necesidad y uso que los haya fundamentado.

Así se tiene, por ejemplo, la clasificación de los suelos, según el tamaño de sus partículas, la clasificación de la Asociación Americana de Funcionarios de Caminos Públicos (American Association State Highway Officials, AASHTO), la clasificación de la

Administración de la Aeronáutica Civil (C.A.A), el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.), siendo este último el más utilizado en el área de la geotecnia.

Cabe mencionar que el sistema de clasificación SUCS, es el que se utilizara para clasificar los suelos que serán el objeto de investigación de este trabajo de graduación, por lo tanto será el único sistema que se explicara.

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

La forma original de este sistema fue propuesto por Arthur Casagrande en 1942 para usarse en la construcción de aeropuertos emprendida por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército durante la Segunda Guerra Mundial. En Cooperación con la Oficina de Restauración de Estados Unidos, el sistema fue revisado en 1952. Actualmente es muy utilizado en la ingeniería.

El SUCS hace una distinción entre suelo gruesos y finos. Los suelos gruesos se clasifican con criterio granulométrico y con las características de plasticidad de su fracción fina y clasifica a los suelos finos principalmente en base a sus características de plasticidad.

Siendo los primeros con un tamaño mayor a 0.075mm (malla No 200), y los segundos con dimensiones debajo de 0.075mm (malla No 200).

Para su identificación se hace uso de símbolos de grupo, consistentes en prefijos que designan la composición del suelo y un sufijo que matiza sus propiedades.

Símbolo de grupo SUCS.

A continuación, se presenta en la Tabla No 2.2 la simbología que utiliza el sistema SUCS.

Tabla No 2.2: Simbología utilizada para clasificar los suelos en el sistema SUCS.

Tipo de suelo	Prefijo	Subgrupo	Sufijo
Grava	G	Bien graduado	W
Arena	S	Mal graduado	P
Limo	M	Limoso	M
Arcillas	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Limite líquido alto (>50)	L
Turba	Pt	Limite líquido bajo (<50)	H

FUENTE: http://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02010103.pdf

En función de estos símbolos pueden darse diferentes combinaciones que definen uno u otro tipo de suelo. Eso se logra con la combinación de los prefijos y sufijos tal y como se muestra en la Tabla No 2.3.

Tabla No 2.3: Características generales de los grupos del SUCS.

Símbolo	Características generales		
GW GP GM GC	GRAVAS (>50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (Finos <5%)	Bien graduadas
			Mal graduadas
		Con finos (Finos >12%)	Componente limoso
			Componente arcilloso
SW SP SM SC	ARENAS (<50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (Finos <5%)	Bien graduadas
			Mal graduadas
		Con finos (Finos >12%)	Componente limoso
			Componente arcilloso
ML MH	LIMOS	Baja compresibilidad (LL<50)	
		Alta compresibilidad (LL>50)	
CL CH	ARCILLAS	Baja plasticidad (LL<50)	
		Alta plasticidad (LL>50)	
OL OH	SUELOS ORGÁNICOS	Baja plasticidad (LL<50)	
		Alta plasticidad (LL>50)	
Pt	TURBA	Suelos altamente orgánicos	

FUENTE: http://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02010103.pdf

De la Tabla No 2.3 se deducen tres grandes grupos de suelo:

- a) **Suelos de grano grueso (G y S):** Formados por gravas y arenas con menos del 50% de contenido de finos, y más del 50% de suelo que se retenga en la malla N° 200 (0.075mm).
- b) **Suelo de grano fino (M y C):** Formados por suelos con más del 50% en contenido de limos, arcillas y coloides, es decir, más del 50% pasa la malla N° 200 (0.075mm).
- c) **Suelos orgánicos (O, Pt):** Constituidos fundamentalmente por materia orgánica. Son inservibles como terreno de cimentación.

Además, en la Tabla No 2.3 se puede observar que para suelos gruesos (gravas y arenas) se utiliza el término “bien graduado” y “mal graduado”. Esto se determina a través de los coeficientes de uniformidad y curvatura.

El **coeficiente de uniformidad (Cu)** indica la variación o rango del tamaño de los granos presentes en la muestra. En realidad es un coeficiente de no uniformidad, ya que su valor numérico decrece, cuando la uniformidad aumenta. Un valor de Cu grande, indica que los diámetros D_{60}^{10} y D_{10} difieren en tamaño apreciable y suelos con un $Cu < 3$ se consideran muy uniformes. (Ecuación 2.1)

Ecuación 2.1:
$$C_u = \frac{D_{60}^{10}}{D_{10}}$$

¹⁰ Se refiere al tamaño del grano o diámetro aparente de la partícula de suelo. El subíndice = (10, 30, 60) denota el porcentaje de material más fino.

El **coeficiente de curvatura (Cc)** es una medida de la forma de la curva entre el D_{60} y el D_{10} . Un C_c muy diferente de 1 indica que falta una serie de diámetros entre los tamaños correspondientes al D_{10} y el D_{60} . (Ecuación 2.2)

$$\text{Ecuación 2.2: } C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

Para que un material sea bien graduado, debe cumplir la condición de que el coeficiente de uniformidad sea mayor que 4 para gravas y mayor que 6 para arenas y que el coeficiente de curvatura esté comprendido entre 1 y 3; sin embargo, dependiendo de sus valores, un suelo bien graduado debe cumplir con las dos especificaciones a la misma vez. Luego, cuando el coeficiente de uniformidad C_u es menor que los valores indicados, significa que el material no es graduado, sino prácticamente uniforme en el diámetro de sus partículas.

2.5 SUELOS GRUESOS.

Los sistemas de clasificación hacen uso de propiedades físicas como el tamaño de los granos y la plasticidad de la fracción fina, sin embargo, el conocimiento de la parte mineralógica no se toma en cuenta para ello. Es necesario conocer la estructura que puede tener un suelo debido a que un sistema de clasificación no proporciona la información completa.

2.5.1 Gravas: Son partículas de suelo con un tamaño de grano superior a 4.75mm. Se considera un rango variable de tamaño desde 4.75mm hasta 75mm. Las gravas corresponden principalmente a minerales de rocas como: caliza, granito, dolomita,

basalto, arenisca, cuarzo, cuarcita, andesitas y riolitas, entre otras. Se encuentran también en tamaños de grava rocas como piedra pómez en depósitos de tierra blanca, escoria volcánica, entre otras.

La Tabla No 2.4, muestra algunas rocas de donde puede provenir la grava y los minerales que esta pudiera contener.

Tabla No 2.4: Minerales constitutivos de la grava.

Roca madre	Minerales constitutivos
Granito	Cuarzo, feldespato y mica
Dolomita	Minerales carbonatos y nitratos
Basalto	Silicatos de magnesio y hierro, y bajo contenido en sílice
Pumita (Piedra Pómez)	Feldespato, cuarzo y plagioclasas

FUENTE: www.wikipedia.org

2.5.2 Arenas: Son partículas de suelo con tamaño variable entre 2mm hasta 0.075mm. El componente más común de la arena, en tierra continental y en las costas no tropicales es el sílice, generalmente en forma de cuarzo. Sin embargo, la composición varía de acuerdo a los recursos y condiciones locales de la roca. En algunos lugares hay arena que contiene hierro, feldespato e incluso yeso.

2.6 SUELOS FINOS.

Los suelos finos están constituidos de partículas de fragmentos diminutos de roca, minerales y minerales de arcilla, con textura granular y en hojuelas. De acuerdo al sistema de clasificación SUCS, estas partículas tienen un tamaño inferior a 0.075mm, que corresponden a la categoría del limo, la arcilla y coloides, por lo que toda fracción de suelo que pasa el tamiz No 200 es considerada como suelo fino¹¹.

2.6.1 Coloides.

Son dispersiones de pequeñas partículas de un material en un solvente, formando una fase continua. Generalmente forma una sustancia gelatinosa al contacto con el agua. Las partículas dispersadas pueden ser partículas sólidas, macromoléculas, gotas de líquido o burbujas de gas y el solvente puede ser un líquido o un gas. El tamaño de las partículas está entre 0.001mm a 0.0001mm.

En el caso del sistema coloidal del suelo, están involucradas las arcillas, los óxidos y las sustancias húmicas. Los coloides tienen en común algunas propiedades importantes que desempeñan las arcillas, entre ellas se tiene: retención de agua y gases, intercambio iónico y molecular, contracción-expansión y alta superficie específica. (Ver apartado: 2.6.3.5)

Los coloides se pueden clasificar de acuerdo a lo contenido en la Tabla No 2.5:

¹¹Fuente: (<http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/10/suelos-finos.html>)

Tabla No 2.5: Clasificación de coloides.

Clasificación	Sub-clasificación	Descripción
Por su relación con el agua	Coloides Hidrofílicos	Como las gelatinas, adsorben gran cantidad de agua. Se necesita agregar gran cantidad de electrolitos para que abandonen la solución y floculen. En un medio acuoso se rehidratan espontáneamente, por eso se los llaman de floculación reversible. La materia orgánica y las arcillas se consideran hidrofílicas.
	coloides hidrófobos	Presentan menos moléculas de agua o están menos fuertemente unidas sobre las partículas. Floculan fácilmente con el agregado de electrolitos y son difíciles de rehidratar y redispersar, por eso se llaman de floculación irreversible. En el sistema coloidal del suelo, los óxidos de Fe y Al se consideran hidrófobos
Por su carga	Positivos	Se llaman coloides positivos a los que presentan como balance, carga positiva. Un ejemplo de estos son los óxidos de Fe ³⁺ , Al ³⁺ , que presentan carga + a los valores de pH normales del suelo
	Negativos	Se llaman negativos aquellos que tienen como balance, carga neta negativa. Por ejemplo la mayoría de las arcillas y las sustancias húmicas.

FUENTE: De los autores.

2.6.2 Limos.

Es un sedimento clástico (compuesto por fragmentos de partículas muy finas), con poca o ninguna cohesión, transportado en suspensión por los ríos y por el viento, que se deposita en el lecho de los cursos de agua o sobre los terrenos que han sido inundados.

Con poca o ninguna plasticidad, las partículas tienen tamaños entre los 0.075mm hasta 0.002mm¹².

2.6.2.1 Origen de los limos.

Los limos son producto de los depósitos sedimentarios, de la fragmentación en partículas diminutas de una roca como la Limolita o Lutita.

Cabe mencionar que la Limolita es una roca sedimentaria que tiene un grano de tamaño en el rango de limo más fino que la arenisca y más grueso que la arcilla.

Por su composición, el limo y la limolita son de carácter intermedio entre las areniscas¹³ y las lutitas¹⁴. Son más ricos en sílice, más pobres en alúmina, óxido de potasio y agua que las lutitas, pero generalmente no tan ricos en sílice como las arenas.

Se puede tener limos Inorgánicos como los producidos en canteras o por intemperismo, o limo orgánico como el suelo encontrado en los ríos, siendo este último el de características plásticas.

2.6.2.2 Características físicas de los limos.

Los limos orgánicos generalmente se encuentran mezclados con materia orgánica finamente dividida, de olor desagradable si está contaminada. Su color varía desde gris claro a muy oscuro.

¹²Fuente: Wikipedia (<http://es.wikipedia.org/wiki/Limo>)

¹³ Areniscas: Roca sedimentaria constituida por clastos de tamaño de arena (2-0,02mm) y una matriz (o cemento) que los engloba.

¹⁴La lutita es una roca sedimentaria compuesta por partículas del tamaño de la arcilla y del limo.

Al igual que las arcillas permite formar bolitas, pero esas se rompen con facilidad y no se pegan entre los dedos, debido a que poseen poca o cero plasticidad.

Las partículas de limos son más angulosas que redondas como los granos de la arena.

2.6.2.3 Mineralogía de los limos.

Los minerales de los que están compuestos los limos son de cuarzo al igual que las arenas, con la diferencia que el grano es más fino. Además, de algunas partículas en forma de escamas (hojuelas) que son fragmentos de minerales micáceos.

Las micas son minerales pertenecientes a un grupo numeroso de silicatos (Ver apartado: 2.6.3.3.2) de alúmina, hierro, calcio, magnesio y minerales alcalinos caracterizados por su fácil exfoliación en delgadas láminas flexibles, elásticas y muy brillantes, dentro del grupo de los filosilicatos. Algunos limos poseen plasticidad, por lo que es natural que haya presencia de minerales de arcilla (filosilicatos) mezclados con los limos.

2.6.3 Arcillas.

Fundamentalmente esta investigación está centrada en determinar las características de hinchamiento y retracción de las arcillas de los puntos o bancos seleccionados.

De manera general, la arcilla es un material que se genera de la fragmentación de una roca (intemperismo), con partículas de forma laminar de tamaño inferior a 2 micras. Químicamente es un silicato de Aluminio hidratado, es plástica cuando se humedece

(gran capacidad de absorción) y al deshidratarse, se endurece mucho, “como un roca blanda”.

2.6.3.1 Origen de las arcillas.

La arcilla tiene su origen en rocas feldespáticas. La acción del sol, viento, la lluvia, el aire y el agua, rompen esas rocas en partículas cada vez más pequeñas que son transportadas por inundaciones y depositadas en lagos, campos, pantanos y lagunas. Los cambios de la corteza terrestre, en el transcurso de los años, exponen depósitos de estas arcillas que se encuentran con frecuencia en las márgenes empinadas de los ríos y en las laderas de las montañas.

De acuerdo a como han sido formados estos suelos, tenemos *arcillas residuales*, son aquellas que se encuentran en el sitio de formación o cerca del sitio de la roca madre, y al no ser transportadas poseen menos impurezas. Las *arcillas sedimentarias* han sido transportadas de su lugar de origen por el agua y se han mezclado en el proceso con otros ingredientes. Con frecuencia esta clase de arcillas son más plásticas que las residuales debido a sus impurezas y granos más finos¹⁵.

2.6.3.2 Características físicas de las arcillas.

Presenta diversas coloraciones según su mineralogía, las impurezas que contiene son desde el rojo, anaranjado, hasta el blanco cuando es pura.

El término arcilla se aplica a un material natural, terroso, de tamaño de grano fino y forma laminar.

¹⁵Se profundizara más sobre el origen geológico de las arcillas, en el ítem Mineralógica de las arcillas

Físicamente se considera un coloide, de partículas extremadamente pequeñas y superficie lisa. El diámetro de las partículas de la arcilla es inferior a 0.002mm. En la fracción textural de la arcilla puede haber partículas no minerales, los fitolitos¹⁶.

Se caracteriza por adquirir plasticidad al ser mezclada con agua, y también sonoridad y dureza al calentarla por encima de 800 °C.

2.6.3.3 Mineralogía de las arcillas.

2.6.3.3.1 El origen de los silicatos.

Las arcillas pertenecen a una clase particular de minerales denominados silicatos. Los silicatos son, desde un punto de vista práctico, el conjunto de minerales de mayor importancia de la naturaleza puesto que constituyen el 25% de los minerales conocidos y cerca del 40% de los más corrientes. Si se hace un promedio del porcentaje en peso de los principales elementos de la corteza terrestre vemos que el 46.6 % es oxígeno, el 27.72 % silicio, el 8.13 % aluminio, el 5.0 % hierro, el 3.63 % calcio, el 2.83 % sodio, el 2.59 % potasio y el 2.09 % magnesio, es decir que las arcillas están hechas de los mismos elementos químicos que la propia corteza terrestre. Ello es lógico, pues las arcillas no son más que una de las etapas en el devenir de los elementos a lo largo de los ciclos geológicos.

A través de los años, se ha logrado poner en evidencia que la estructura interna de la Tierra está formada por capas que tienen una composición más o menos definida: así,

¹⁶Fitolito: biomineralización de origen vegetal

hacia el interior de la superficie encontramos la capa llamada SIAL, situada entre los 40 y 100 km de profundidad, que es rica en sílice (SiO_2) y aluminio, es de tipo ácido y con una densidad media de 2.7. Más hacia el interior hallaremos la capa denominada SIMA, rica en hierro y magnesio pero con algunas porciones de sílice, aluminio y otros elementos, de carácter básico, más caliente y fluido que la capa SIAL. La capa SIMA es considerada la madre directa de todas las formaciones minerales que afloraron a la superficie. Es decir, que es muy probable que las primeras rocas superficiales se hayan formado por el enfriamiento y cristalización posterior de las corrientes de magma provenientes de la capa SIMA, acarreadas por las erupciones volcánicas y enfriadas en la superficie, dando origen a las rocas básicas como los basaltos. En cambio, la afloración del material fundido proveniente de la capa SIAL, a través de las hendiduras y fallas, originó la formación de las rocas ígneas de carácter ácido.

Por lo anterior, es fácil aceptar que el 95% de la corteza terrestre está formada por silicatos. Los silicatos forman el árbol genealógico de las arcillas.

La familia de los silicatos comprende la mayoría de los minerales de la corteza terrestre, incluido el cuarzo. Su composición y estructura obedece directamente a la historia geológica de la Tierra; es decir, depende de la naturaleza de la roca madre, como también del ambiente al que fue sometido. Las arcillas son, pues, una rama de los silicatos y su formación obedeció a tres mecanismos principales: 1) por herencia, 2) por neo-formación y 3) por transformación.

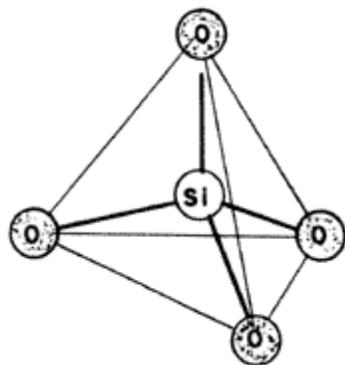
El primer mecanismo indica que el material arcilloso fue derivado directamente de una roca madre y es este tipo de arcillas el que predomina en los sedimentos de lagos y mares.

Los otros dos mecanismos implicaron una reacción química entre varios componentes —o bien a partir de la arcilla original—, por lo que este tipo de formación requirió de mayor energía y de ciertas condiciones hidro-térmicas.

2.6.3.3.2 Estructura química de los silicatos.

Los silicatos están formados por cristales regulares, los cristales tienen a su vez una unidad básica: el tetraedro, compuesto por un átomo de Sílice y cuatro átomos de Oxígeno, tal como se muestra en la Figura No 2.2.

Figura No 2.2: Estructura Molecular del Tetraedro (Unidad básica de los silicatos).

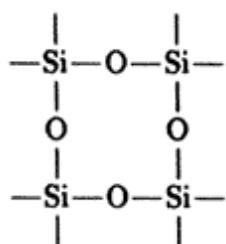


FUENTE: http://www.academia.edu/6325388/Clasificacion_arcillas

Si cada átomo de silicio tiene cuatro cargas eléctricas positivas, mientras que cada átomo de oxígeno tiene dos cargas negativas, es necesario que cada uno de los átomos de oxígeno use una de sus cargas para atraer a una de las cargas del silicio, quedando

así saturado el átomo central (Si), mientras que las esquinas todavía tienen una carga negativa para enlazarse a otro átomo con carga positiva. En la Figura No 2.3, se puede observar que cuando esto último ocurre, se forma una cadena de tetraedros, mediante los enlaces del tipo: ..-O-Si-O-Si-O-Si-O-...

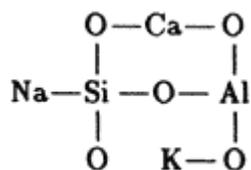
Figura No 2.3: Cadenas de tetraedros.



FUENTE: http://www.academia.edu/6325388/Clasificacion_arcillas

Similarmente, mediante este mecanismo podemos formar cadenas verticales que se unen a las cadenas horizontales para formar redes, podemos superponer una red encima de otra, a manera de formar arreglos tridimensionales. También podemos sustituir uno de los átomos de silicio por otro, por ejemplo de aluminio (Al), con lo cual el arreglo quedaría desbalanceado, ya que el aluminio sólo tiene tres cargas eléctricas positivas en vez de cuatro, dejando una carga negativa "extra" en uno de los átomos de oxígeno.

Figura No 2.4: Adición de átomos a la estructura para neutralizarla.

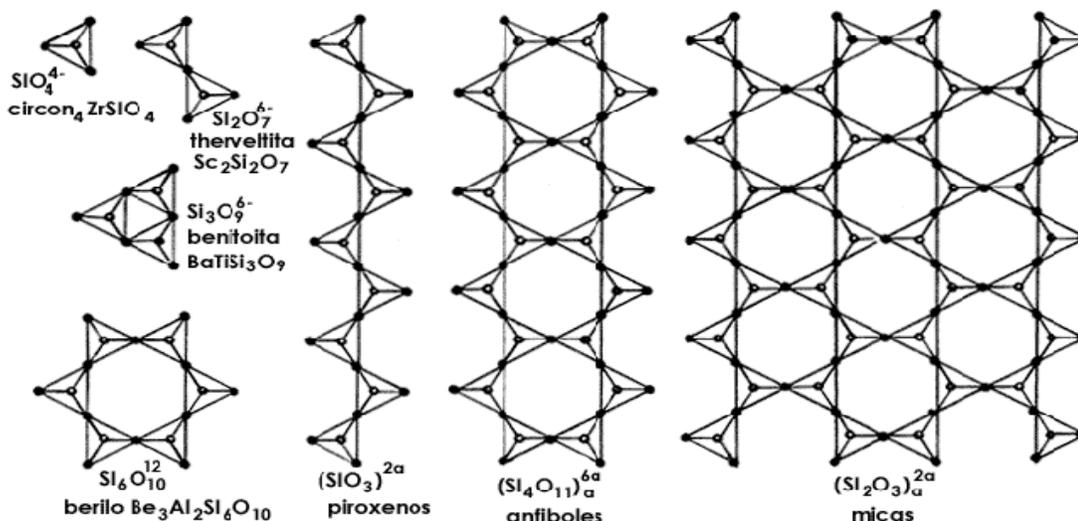


FUENTE: http://www.academia.edu/6325388/Clasificacion_arcillas

Como se observa en la Figura No 2.4, la carga negativa desbalanceada puede ser satisfecha por un catión positivo, por ejemplo el sodio (Na) o el potasio (K), con lo cual se logra nuevamente una estructura neutra.

Lo más sorprendente es que cada uno de estos arreglos es típico de alguno de los **silicatos** más conocidos. Así vemos que el mineral circón está compuesto de tetraedros aislados (1T), mientras que los piroxenos por cadenas simples de un número infinito de miembros (nT). En particular, las redes de tetraedros que se extienden a lo largo y a lo ancho formando hojas completas, constituyen el grupo de filosilicatos o estructuras laminares del que forman parte las arcillas, tal como se muestra en la Figura No 2.5.

Figura No 2.5: Estructura molecular de los silicatos.



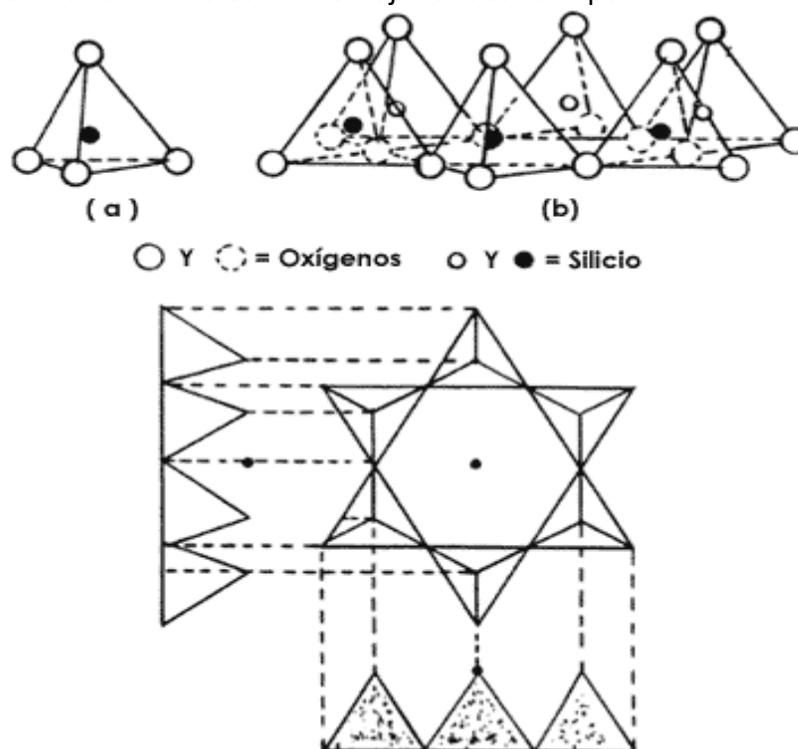
FUENTE: http://www.academia.edu/6325388/Clasificacion_arcillas

Una propiedad extraordinaria de estas estructuras moleculares es su posibilidad de ser capaces de sustituir al átomo de silicio (Si) situado en el centro de los tetraedros (Ver Figura No 2.4), por otro de menor carga como el aluminio (Al^{3+}), generando así una

deficiencia de carga positiva o un exceso de carga negativa en el tetraedro, la cual necesita atraer a otros cationes para compensarse, por ejemplo: Na, K, Ca, etc. Este es el mecanismo que permite a los silicatos tener propiedades superficiales únicas de acidez e intercambio iónico, tan importantes que a ellas se deben las propiedades catalíticas de las arcillas.

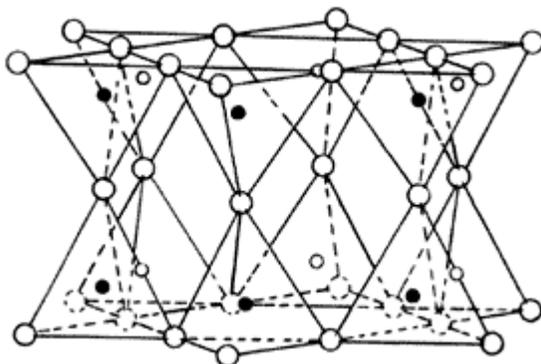
Las puntas de los tetraedros se encuentran a la misma altura formando un plano, de igual manera ocurre con los átomos de silicio situados en el centro de los tetraedros y con los de oxígenos situados en las bases. La articulación de esos tres planos nos conduce pues a la formación de una hoja tetraédrica (tipo T). (Ver Figura No 2.6).

Figura No 2.6: Estructura molecular de Hoja tetraédrica tipo T.



Siguiendo esta secuencia podemos ahora unir dos hojas para formar una lámina tetraédrica, tal y como se ilustra en la Figura No 2.7. En ésta se observa que las dos hojas se encuentran invertidas, una con respecto a la otra, compartiendo uno de los vértices.

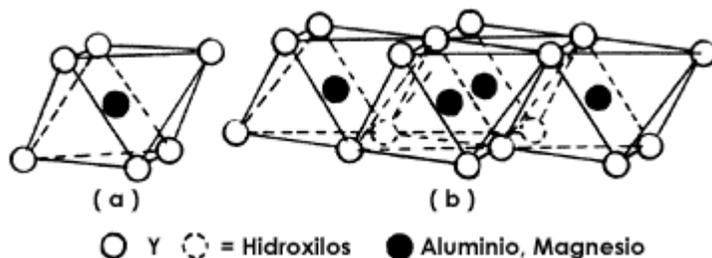
Figura No 2.7: Lámina compuesta por tetraedros (lamina tipo T).



FUENTE: http://www.academia.edu/6325388/Clasificacion_arcillas

Similarmente, existen otros cuerpos poligonales que podemos unir entre sí para formar cadenas, tal y como ocurre con el octaedro (octa, ocho; edros, cara), representado en la Figura No 2.8. Esta es una formación típica de los compuestos de aluminio, por ejemplo: $\text{Al}(\text{OH})_6$, o del magnesio. Este arreglo es una hoja octaédrica (tipo O).

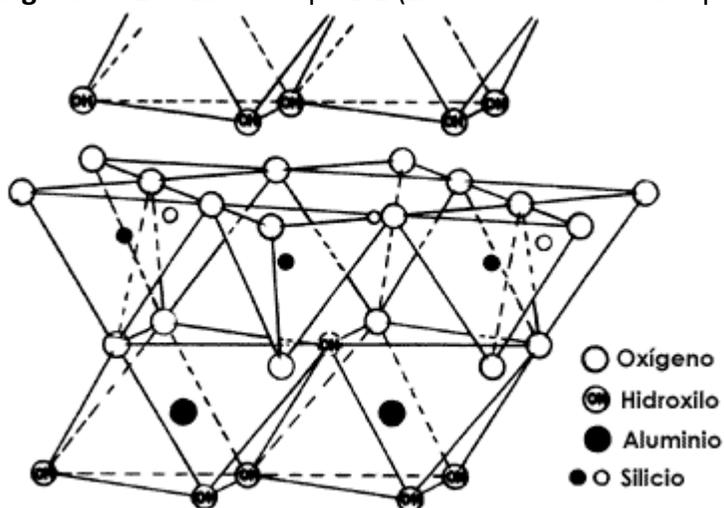
Figura No 2.8: Estructura molecular de Hoja Octaédrica (O).



FUENTE: http://www.academia.edu/6325388/Clasificacion_arcillas

Ahora bien, la unión de una hoja del tipo T con otra del tipo O, genera una lámina T – O o lámina 1:1, tal y como se ilustra en la Figura No 2.9. La coincidencia, sin embargo, no es perfecta cuando se trata de hojas T formadas por silicio-oxígeno y de hojas tipo O formadas por aluminio-oxígeno-oxhidrilo, lo cual crea un efecto de esfuerzo entre las hojas.

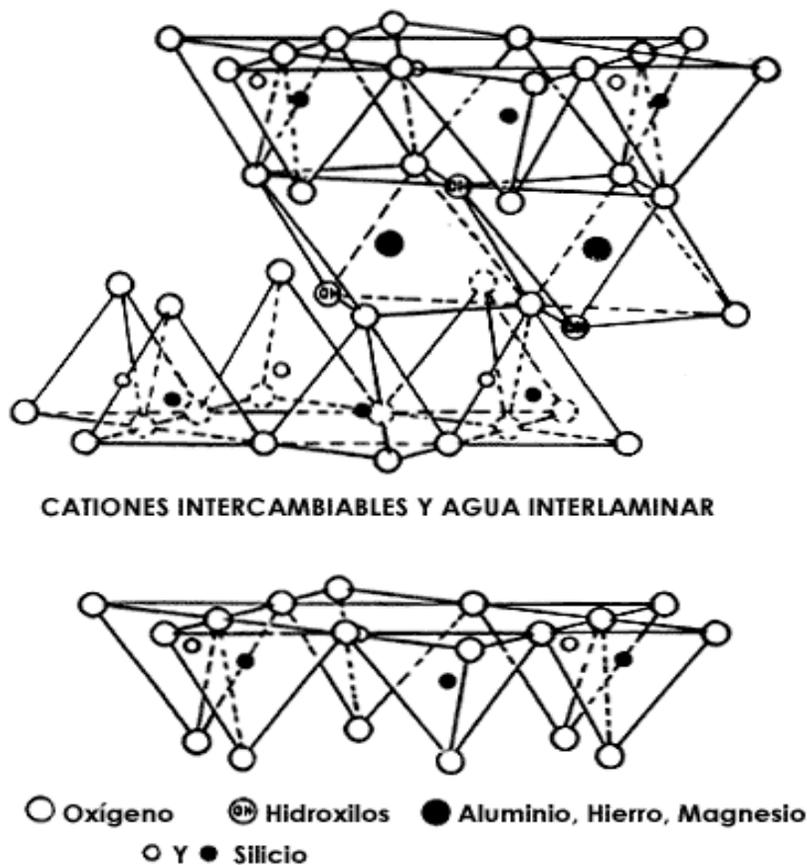
Figura No 2.9: Lamina tipo 1:1 (Estructura molecular tipo T-O).



FUENTE: http://www.academia.edu/6325388/Clasificacion_arcillas

Ahora terminamos la secuencia agregando una tercera hoja tipo T a la lámina T – O mencionada anteriormente, y el resultado se ilustra en la Figura No 2.10, que muestra la lámina T – O – T. La lámina es del tipo 2:1.

Figura No 2.10: Lamina tipo 2:1 (Estructura molecular de Hoja T-O-T).



FUENTE: http://www.academia.edu/6325388/Clasificacion_arcillas.

Las láminas 2:1 (hoja T – O – T) y 1:1 (hoja T – O), no son más que las diferentes estructuras que presentan las arcillas. Para ello, se describe mejor los dos grupos de láminas:

✓ **Grupo 1:1: Láminas tetraédricas – octaédricas (T – O).**

Este tipo de láminas forman las estructuras básicas de los caolines. El caolín o caolinita se refiere a un tipo de arcilla presente en China, la cual generalmente es blanca y

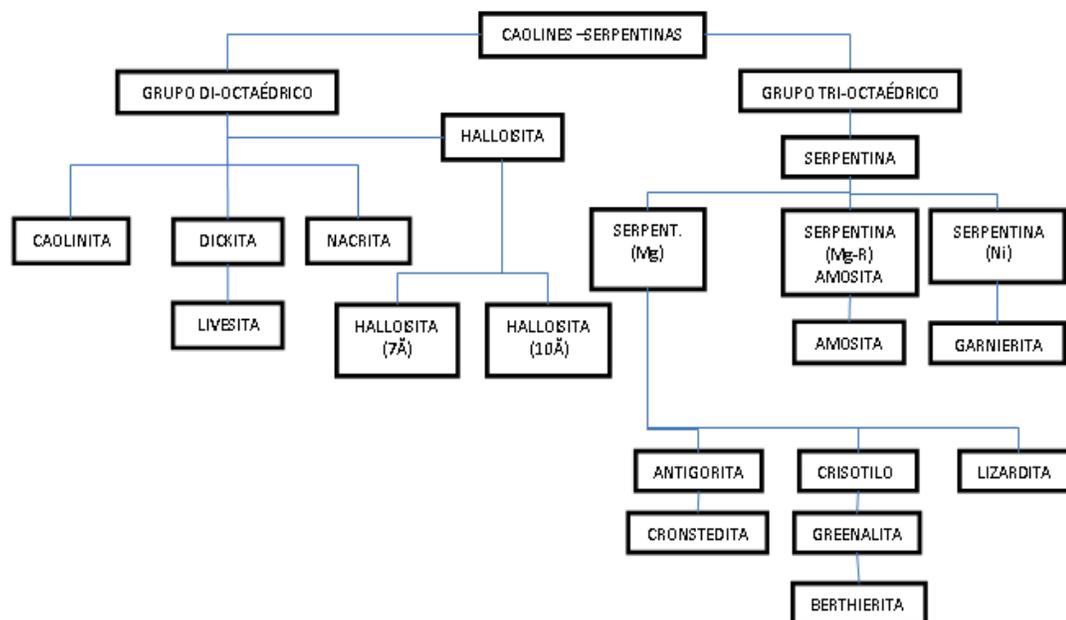
muchos autores la denominan como la arcilla pura. A continuación se presenta una descripción de este tipo de arcilla:

- **Caolinita.**

El nombre caolín proviene de la voz china Kau-Ling, nombre del cerro de una región situada al norte de China de donde se extraía esta arcilla desde el siglo VIII d.C., para la fabricación de la porcelana. La unidad fundamental de la estructura del caolín es la lámina T – O, o sea la lámina 1:1, una hoja de tetraedros de *silicio-oxígeno* unida a otra hoja de octaedros de *aluminio-oxígeno-OH*. La sustitución del silicio por otro elemento, como el aluminio, o bien la sustitución del aluminio en la hoja tipo O por otro elemento de menor carga, por ejemplo el magnesio, causa un cambio químico en el material pero mantiene esencialmente la misma estructura. Estas sustituciones dan origen a la familia de los caolines (Ver Figura No 2.11).

En las estructuras de estos derivados del caolín, se ve que sus hojas se ensamblan naturalmente unas sobre otras, como las cartas de una baraja, con las variaciones antes mencionadas, de modo que entre una hoja y otra hay un enlace muy débil, del tipo Van Der Waals.

Figura No 2.11: Grupo de los Caolines.



FUENTE: http://www.academia.edu/6325388/Clasificacion_arcillas.

✓ **Grupo 2:1: Láminas tetraédricas –octaédricas –tetraédricas (T – O – T).**

Dentro de las arcillas que presentan este arreglo laminar (T – O – T) están las esmectitas y las micas, las cuales se describen a continuación:

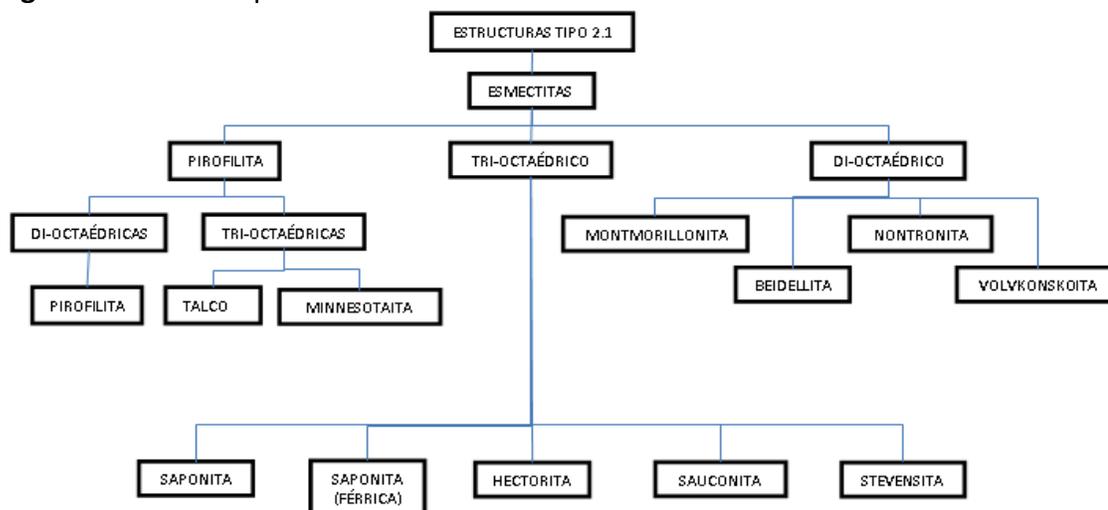
- **Esmectitas.**

La familia de las esmectitas está formada por todas aquellas arcillas que presentan una estructura constituida por dos hojas de tipo T y por otra intermedia de tipo O. La fórmula estructural típica de estas arcillas es la siguiente:



Esta estructura es eléctricamente neutra debido a que todas las posiciones en la hoja T se encuentran ocupadas por átomos de silicio, mientras, que todas las posiciones de la capa O contienen aluminio. Ésta es la fórmula típica de la pirofilita. Sin embargo, tal y como se muestra en la Figura No 2.12, existen numerosas ramas en el árbol de las arcillas, las cuales presentan la misma estructura de sándwich, excepto que algunas veces el aluminio sustituye al silicio parcialmente en la capa T, o bien el magnesio o el hierro sustituyen al aluminio en la capa O, e inclusive el flúor (F) pudiera sustituir al oxígeno de la capa O. Luego, estas diferencias de composición química hacen que las propiedades de cada arcilla mineral sean distintas.

Figura No 2.12: Grupo de las Esmecticas.

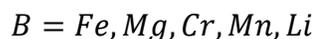
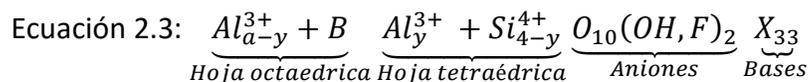


FUENTE: http://www.academia.edu/6325388/Clasificacion_arcillas

La Ecuación 2.3 ilustra la composición de las láminas T-O-T para todas las arcillas del tipo esmectita. Entre ellas destaca la montmorillonita, cuyo nombre se deriva del

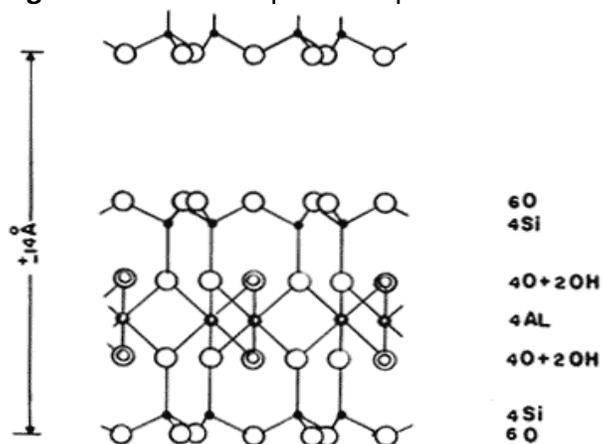
francés Montmorillon, lugar de Francia en que se encontró esta arcilla típica en 1874.

La composición química de una arcilla esmectita, tipo montmorillonita, es la siguiente:



Como se observa en esta fórmula estructural, la hoja tetraédrica está compuesta sólo de silicio y aluminio mientras que la hoja octaédrica contiene aluminio y una variedad de cationes (B). Esto ilustra perfectamente la gran variedad de arcillas tipo esmectita que se pueden conseguir simplemente cambiando el catión de la hoja octaédrica y manteniendo ocupada la hoja T con Si y Al (Ver Figura No 2.13), para cada caso. Por supuesto, la sustitución de aluminio (O) y silicio (T) por un catión de menor carga eléctrica, por ejemplo Mg, origina una deficiencia de carga eléctrica que es responsable de algunas de las propiedades superficiales más importantes de las arcillas: la capacidad de intercambio catiónico, la absorción de moléculas polares como el agua, así como de otros compuestos orgánicos. Por ejemplo, el agua al introducirse en el espacio interlaminar causa **el hinchamiento** de la estructura laminar de las arcillas.

Figura No 2.13: Composición química de la lámina de T-O-T.

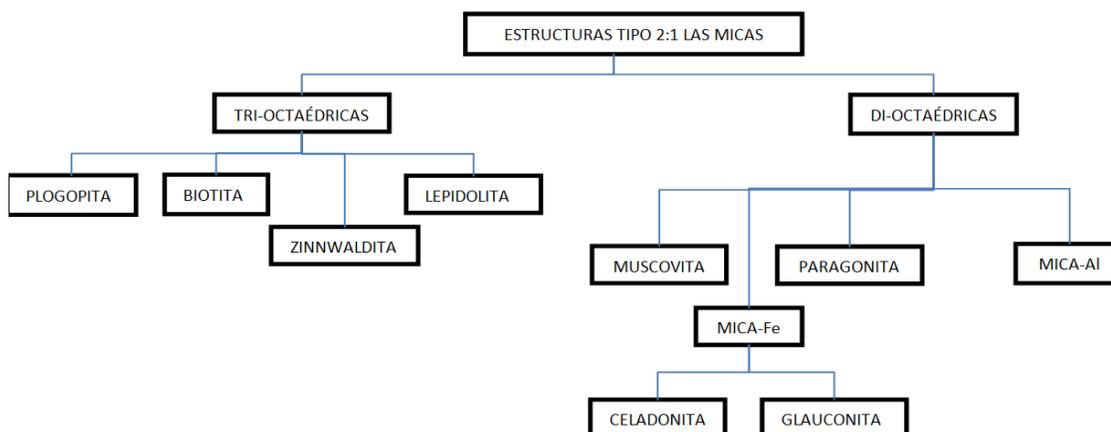


FUENTE: http://www.academia.edu/6325388/Clasificacion_arcillas.

- Las micas.

Las micas son clasificadas como arcillas que tienen la misma estructura que las esmectitas, excepto que el grado de sustitución y la naturaleza de los cationes que se alojan entre láminas, por ejemplo el potasio, hacen que la carga residual sea muy alta. En estas condiciones, las láminas se fijan unas a otras haciendo que su estructura no sea expansible, ni sus cationes inter-laminares intercambiables. La familia de las micas se ilustra en la Figura No 2.14. La carga residual de las micas está localizada en la hoja tetraédrica, es decir, en la superficie misma de las hojas, originando un amarre fuerte de los cationes inter-laminares con las hojas, por lo que, la estructura no es fácilmente expansible. Entre las micas más conocidas se encuentran la moscovita, y a la vez, su estructura es similar a la illita, con algo más de silicio, magnesio, hierro, y agua; y ligeramente menos aluminio tetraédrico y potasio interlaminar (es llamado en ocasiones arcilla micácea).

Figura No 2.14: Familia de las micas.



FUENTE: http://www.academia.edu/6325388/Clasificacion_arcillas

2.6.3.4 Tipos de arcilla más comunes.

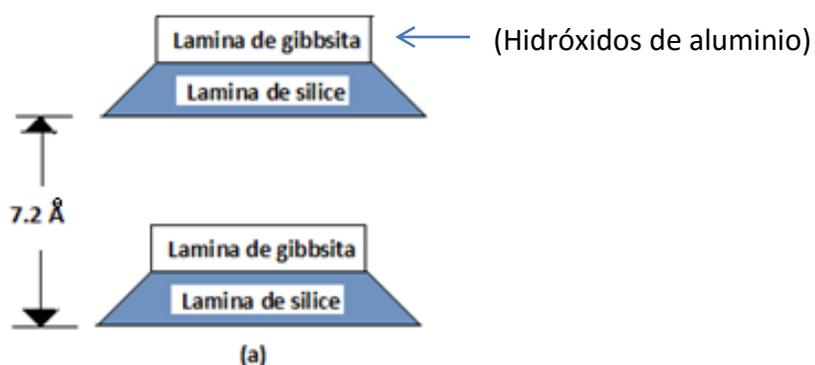
Ahora que se tiene un mejor conocimiento sobre la mineralogía de las arcillas, en cuanto a su origen, estructura molecular y a los grupos a los cuales pertenecen, nos enfocaremos en tres tipos específicos: Montmorillonita, Illita y Caolinita. En el estudio de la Mecánica de los suelos clasifican a estos minerales arcillosos como los más comunes de encontrar. A continuación se define cada uno de estas:

2.6.3.4.1 Caolinita: consiste en capas repetidas elementales de sílice-gibbsita (tetraedro-octaedro), como lo muestra la Figura No 2.15. Cada capa se mantiene unida por enlaces hidrogénicos (enlaces de hidrógeno). El área superficial de las partículas de las caolinita es de aproximadamente de 15 m²/g. (Ver Tabla No 2.6).

2.6.3.4.2 Illita: consiste en una lámina de gibbsita enlazada a dos láminas de sílice, una arriba y otra abajo (Figura No 2.16), y es denominada a veces mica arcillosa. Las capas de illita están unidas mediante iones de potasio, mediante sustitución Isomorfa de Aluminio por Sílice en las láminas tetraédricas. La superficie específica de las partículas es de aproximadamente $80 \text{ m}^2/\text{g}$. (Ver Tabla No 2.6).

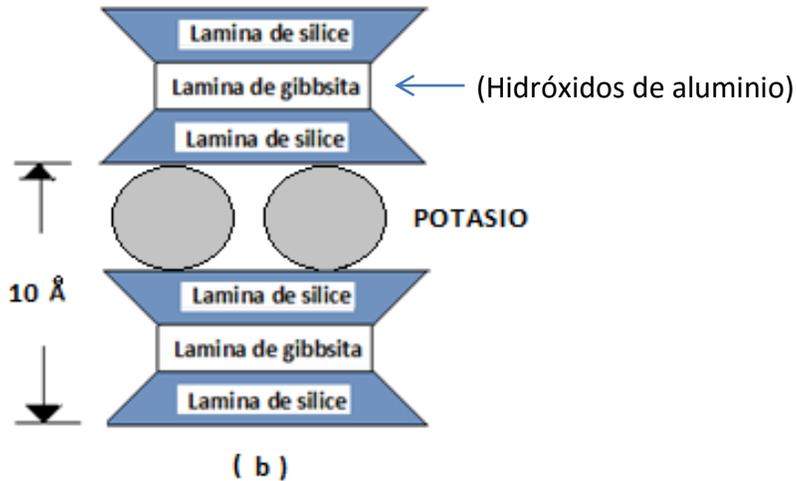
2.6.3.4.3 Montmorillonita: tiene una estructura similar a la illita, es decir una lámina de gibbsita intercalada por dos láminas de sílice (Figura No 2.17). En la Montmorillonita hay sustitución Isomorfa de magnesio y hierro por aluminio en las láminas octaédricas. Los iones de potasio no están presentes como en el caso de la illita y una gran cantidad de agua es atraída hacia los espacios interlaminares. La superficies específica es de aproximadamente $300 \text{ m}^2/\text{g}$. (Ver Tabla No 2.6).

Figura No 2.15: Esquema de la estructura molecular de la caolinita.



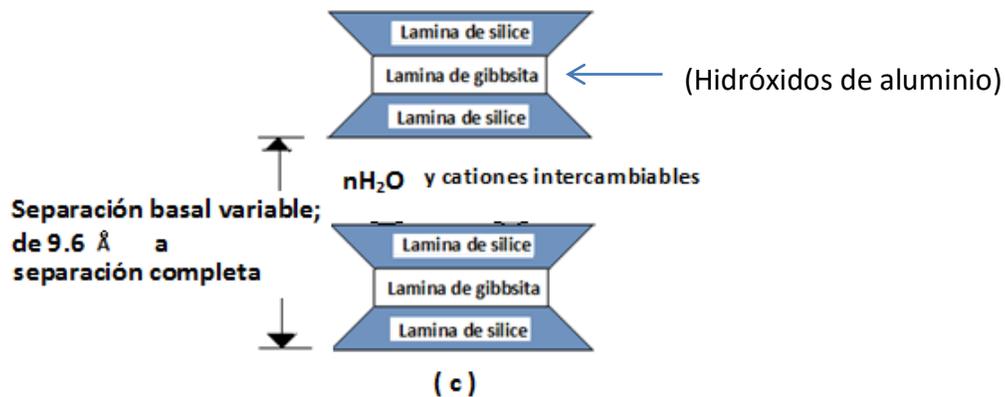
FUENTE: Braja M. Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, Edit. Thompson Learning, 2001, pág. 7.

Figura No 2.16: Esquema de la estructura molecular de la illita.



FUENTE: Braja M. Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, Edit. Thompson Learning, 2001, pág. 7.

Figura No 2.17: Esquema de la estructura molecular de la montmorillonita.



FUENTE: Braja M. Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, Edit. Thompson Learning, 2001, pág. 7.

2.6.3.5 Propiedades físico-químicas de las arcillas.

El comportamiento de este grupo de minerales radica en sus propiedades físico-químicas, dichas propiedades derivan de:

- Su pequeño tamaño de partícula (inferior a 0.002 mm).

- Su estructura en forma de láminas (Filosilicatos).
- Las sustituciones isomorfas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio inter-laminar. Las sustituciones isomorfas se dan con el cambio de elementos como el Mg, Al, Fe, entre otros.

Los factores anteriormente mencionados, presentan un valor elevado de área superficial, y a la vez, una gran cantidad de superficie específica o activa, con enlaces saturados. Por ello, pueden interactuar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas¹⁷ en suspensiones acuosas.

Entre las principales propiedades físico-químicas que presentan los minerales arcillosos podemos mencionar las siguientes:

2.6.3.5.1 Superficie específica (área superficial).

Se denomina superficie específica al área de la superficie por unidad de masa (m^2/g). Es decir, la suma del área de la superficie de todas las partículas que forman un gramo de material.

En los suelos esta propiedad presenta una alta reactividad físico-química con el medio, como puede ser arcilla en interacción con las moléculas de agua, adsorción de cationes

¹⁷Reología: Estudio de la relación entre el esfuerzo y la deformación de los materiales que son capaces de fluir.

o fuerzas de atracción-repulsión entre partículas, a su vez, estas fuerzas pueden variar de acuerdo al pH, salinidad y temperatura del medio. Es por ello que la superficie específica tiene una fuerte incidencia sobre el comportamiento físico-químico y mecánico del material en cuestión.

La superficie específica depende de la morfología de las partículas y tamaño de las partículas. La primera se refiere a que la superficie específica es mínima cuando se tienen morfologías esféricas y es máxima cuando se tienen morfologías laminares y fibrosas. Y en el caso de del tamaño de las partículas, por consiguiente la superficie específica aumenta entre más pequeña sea.

A continuación se presentan algunos valores de superficie específica de las arcillas en la Tabla No 2.6:

Tabla No 2.6: Valores de superficie específica para diferentes arcillas.

Arcilla	Superficie específica (m²/g)
Caolinita de elevada cristalinidad	Hasta 15
Caolinita de baja cristalinidad	Hasta 50
Ilita	Hasta 80
Montmorillonita	80-300

FUENTE: Garay Díaz, Rene Arturo. Clasificación de Arcillas presentes en los bancos de Guatajiagua, departamento de Morazán, y Facultad Multidisciplinaria Oriental. 2007, pág. 23.

Los valores de superficie específica nos indican una mayor plasticidad y a la vez que el hinchamiento puede ser mayor. Es decir, entre más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, es más plástico el material. Esto se debe a que las partículas

se deslizan unas sobre otras con mayor facilidad. A su vez si existe mayor plasticidad hay un mayor hinchamiento.

2.6.3.5.2 Capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Capacidad de cambiar sus iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares o en otros espacios interiores de sus estructuras, por otras existentes en las soluciones acuosas envolventes, por ejemplo una arcilla hidrogena (catión H^+) puede transformarse en sódica, si se hace que circule a través de su masa, agua con sales de sodio en disolución. Los cationes de intercambio más usuales son: Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ y (NH_4^+) .

Algunas arcillas son más susceptibles al intercambio. Así las caolinitas son menos susceptibles de intercambiar sus cationes que las Montmorillonitas, y las Illitas poseen la propiedad en grado intermedio.

La capacidad de intercambio crece con el grado de acidez de los cristales, a mayor pH mayor capacidad, para valores menores de 7 el intercambio catiónico se hace notable. Este crece también con la velocidad y concentración que circule por la masa de suelo.

La CIC está expresada en términos de miligramos equivalentes por 100 gramos de suelo (mg/100g). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH, y es equivalente a la medida del total de las cargas negativas del mineral.

Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomorfas dentro de la estructura.
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80% de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de PH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos de origen varían en función del pH y de la actividad iónica, y las cargas que generan son conocidas como cargas dependientes. Corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20 % de la carga total de la lámina.

La capacidad de intercambio varía, para un determinado tipo de arcilla, con el tamaño de la partícula, siendo más elevado en tamaños finos, por ser mayor su superficie específica. Para arcillas diferentes, la capacidad depende de la estructura; así por ejemplo, en el caso de la Montmorillonita, todos los cationes situados dentro de la estructura son intercambiables, mientras que los cationes intercapa de la illita no son tan fácilmente cedidos porque forman parte de la red.

A continuación, en la Tabla No 2.7 se muestran algunos ejemplos de capacidad de intercambio catiónico (en mg/100g):

Tabla No 2.7: Valores de CIC para diferentes tipos de arcillas.

Tipo de arcilla	CIC (mg / 100 g)
Caolinita	3-15
Ilita	10-40
Montmorillonita	80-150

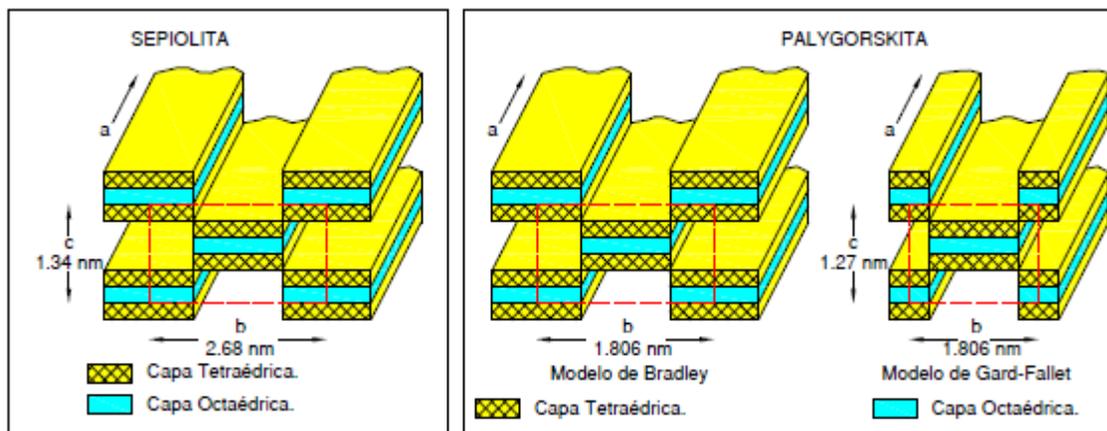
FUENTE: Garay Díaz, Rene Arturo. Tesis Clasificación de Arcillas presentes en los bancos de Guatajiagua, departamento de Morazán, y Facultad Multidisciplinaria Oriental. 2007, pág. 26.

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

2.6.3.5.3 Capacidad de absorción y adsorción.

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmectitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita). (Ver Figura No 2.18).

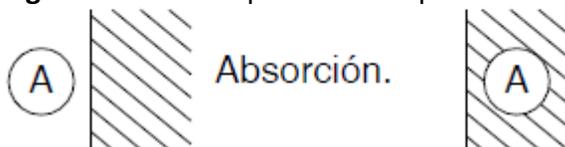
Figura No 2.18: Estructura química de la Sepiolita y la Palygorskita.



FUENTE: Garay Díaz, Rene Arturo. Tesis Clasificación de Arcillas presentes en los bancos de Guatajiagua, departamento de Morazán, y Facultad Multidisciplinaria Oriental. 2007, pág. 27

La absorción es un proceso en el cual las moléculas o átomos de una fase interpenetran casi uniformemente en los de otra fase constituyéndose una "solución" con esta segunda. Se puede decir que la capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales de las arcillas (superficie específica y porosidad). Por lo contrario, la adsorción es un proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida). Por ello se considera como un fenómeno sub-superficial (ver Figura No 2.18). La sustancia que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama "adsorbato" y la fase adsorbente se llama "adsorbente". La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La Figura No 2.19 y No 2.20 representa esquemáticamente los procesos de adsorción y absorción.

Figura No 2.19: Esquema de los procesos de absorción.



FUENTE: Garay Díaz, Rene Arturo. Tesis Clasificación de Arcillas presentes en los bancos de Guatajiagua, departamento de Morazán, y Facultad Multidisciplinaria Oriental. 2007, pág. 28.

En la absorción (Figura No.2.19) las moléculas penetran en la fase sólida de otro elemento. Este es un fenómeno físico. Así por ejemplo: el agua penetra en una masa de suelo.

Figura No 2.20: Esquema de los procesos de adsorción.



FUENTE: Garay Díaz, Rene Arturo. Tesis Clasificación de Arcillas presentes en los bancos de Guatajiagua, departamento de Morazán, y Facultad Multidisciplinaria Oriental. 2007, pág. 28.

En la Adsorción (Figura No 2.20) las moléculas se adhieren a la superficie de otro elemento, este es un fenómeno químico.

2.6.3.6 Propiedades físicas de las arcillas.

2.6.3.6.1 Índice de liquidez.

La consistencia relativa de un suelo cohesivo en estado natural se define por una razón llamada Índice de Liquidez (Ecuación 2.4).

Ecuación 2.4:
$$IL = \frac{w-LP}{LL-LP}$$

Dónde: $w =$ contenido de agua del suelo *in situ*.

$LP =$ límite plástico

$LL =$ límite líquido

Según la norma (ASTM D4318-Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos), el índice de liquidez se define así:

IL se expresa por lo general en porcentaje y puede utilizarse para evaluar el comportamiento de un depósito de suelo si este se encuentra alterado. Con base en el contenido de humedad, al comparar los valores de IL puede establecerse lo siguiente: (ver Tabla No 2.8).

Tabla No 2.8: Comportamiento del suelo respecto a su IL.

IL	Comportamiento del suelo
< 0.0	Demostrará fractura rígida al ser sometido a corte, porque el contenido natural de humedad (w_n) es menor que el límite plástico (LP). En este caso el suelo estará en estado sólido a semi sólido. EL valor de IL será negativo
0.0 - 1.0	Como un plástico. Rango que comprende la mayoría de las arcillas en estado natural.
> 1.0	Será esencialmente un líquido muy viscoso cuando se somete a corte, porque el contenido natural de humedad (w_n) es mayor que el límite líquido (LL). Tales suelos pueden ser extremadamente sensibles al colapso de la estructura del suelo. Mientras no sean alterados de manera alguna, pueden ser relativamente fuertes, pero si por alguna razón son sometidos a corte (remoldeo) y la estructura del suelo colapsa, entonces literalmente pueden fluir como un líquido viscoso. Hay depósitos de arcillas ultra sensibles (licuables o rápidas) en Canadá oriental y Escandinavia.

FUENTE: Holtz & Kovacs. An Introduction to Geotechnical Engineering.

El Índice Líquido indica en suelos plásticos, la historia de esfuerzos a la que ha estado sometido. En la Tabla No 2.9, se establecen dichas relaciones:

Tabla No 2.9: Historial de esfuerzos a los que ha estado sometido el suelo, según el IL (suelos plásticos).

IL	Comportamiento del suelo
IL cercano a 0	Suelo preconsolidado (suelo que ha soportado presiones efectivas mayores a las encontradas al momento de la prueba por los estratos en estado natural). Por ejemplo, suelos que en superficie han estado sometidos a la acción de la erosión (remoción de estratos superficiales).
IL cercano a 1	Suelo normalmente consolidado (suelo que nunca ha estado sometido a presiones efectivas mayores que las encontradas al momento de la prueba en estado natural). En estos suelos w_n cercana a LL.
IL cercano a 0.20	Indica que el suelo siendo altamente plástico tendrá poca o nula expansión.
IL = 1	El suelo remoldeado se encuentra en el límite líquido (LL) y posee una resistencia al corte no drenada de aproximadamente 2 kPa.
IL = 0	El suelo remoldeado se encuentra en su límite plástico (LP) y posee una resistencia al corte no drenada de aproximadamente 200 kPa.

FUENTE: Holtz & Kovacs. An Introduction to Geotechnical Engineering.

Un depósito natural de suelo con w (%) > LL, tendrá un IL > 1.0. En estado inalterado, estos suelos pueden parecer estables, pero un impacto súbito puede conducirlos al estado líquido. Este tipo de suelos se denomina arcillas sensibles o sensitivas.

2.6.3.6.2 Actividad.

La actividad refleja la capacidad de las partículas de un suelo arcilloso para retener la humedad. La propiedad plástica de los suelos, resulta del agua adsorbida que rodea a las partículas de arcilla, podemos esperar que el tipo de minerales arcillosos y sus cantidades proporcionales en un suelo, afectaran los límites líquido y plástico. Skempton (1953) observó que el índice de plasticidad crece linealmente con el porcentaje de la fracción de tamaño arcilloso presente en él. En base a estos resultados Skempton definió una cantidad llamada *actividad*, que es la pendiente de la línea que

correlaciona el índice plástico (IP) con el porcentaje de granos más finos que $2 \mu m$. Esta actividad se expresa como (Ecuación 2.5):

$$\text{Ecuación 2.5: } A = \frac{IP}{(\text{porcentaje de la fracción de tamaño arcilloso, en peso})}$$

Donde A = actividad.

La actividad se usa como un índice para identificar el potencial de expansión de los suelos arcillosos.

La información proveniente de la actividad de la arcilla puede proveer una cierta inclinación al tipo de arcilla presente y en consecuencia, el comportamiento natural del suelo. Por ejemplo, el nivel relativo de actividad esperado es bajo para la caolinita, medio para la illita y alto para la montmorillonita.

Skempton propone además, los siguientes valores que relacionan a la Actividad con un potencial de hinchamiento¹⁸. (Ver Tabla No 2.10).

Tabla No 2.10: Valores de actividad y potencial de hinchamiento en arcillas.

Actividad	Clasificación	Tipo de arcilla	Potencial de cambio de volumen
$A < 0.75$	Inactivas	Caolinita	Bajo
$0.75 < A < 1.25$	Normales	Illita	Medio
$A > 1.25$	Activas	Montmorillonita ($A > 7.0$)	Alto

FUENTE: Holtz & Kovacs. An Introduction to Geotechnical Engineering.

Existen parámetros de actividad para cada tipo de arcilla. En la Tabla No 2.11 (Mitchelle, 1976) se muestran valores de actividad para varios arcillas.

¹⁸ El potencial de hinchamiento (Expansividad o cambio de volumen), se desarrollara en el apartado: Hidratación e hinchamiento.

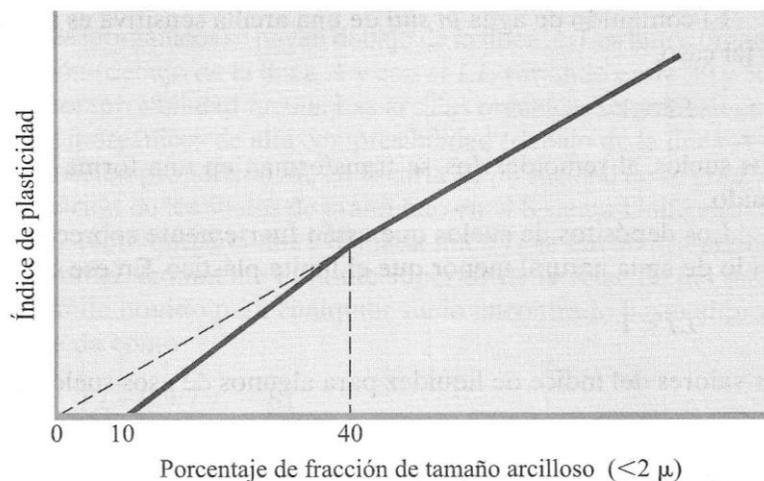
Tabla No 2.11: Valores de Actividad para diferentes tipos de arcilla.

Actividad de materiales de arcilla	
Materiales	Actividad, A
Esmectitas	1 – 7
Ilitas	0.5 – 1
Caolinitas	0.5

FUENTE: Mitchell, 1965 (Braja M. Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, Edit. Thompson Learning, 2001) pág. 32

Por otro lado: Seed, Woodward y Ludgren (1964) estudiaron la propiedad plástica de varias mezclas artificiales preparadas con arena y arcilla. Ellos concluyeron que la relación entre IP y porcentaje de fracción de arcilla es lineal como lo observo Skempton, sin embargo, la línea no siempre pasa por el origen. Ellos observaron que solo cuando se proyecta hacia atrás, para fracciones de tamaño arcilloso mayores del 40%, la línea pasa por el origen, es decir, esta relación se presenta por dos líneas rectas, como se muestra cualitativamente en la Figura No 2.21.

Figura No 2.21: Relación simplificada entre índice de plasticidad y porcentaje de la fracción de tamaño arcilloso por peso.



FUENTE: Seed, Woodward y Ludgren (1964), Braja M. Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, Edit. Thompson Learning, 2001 pág. 33.

2.6.3.6.3 Hinchamiento¹⁹.

La “**expansión o hinchamiento**” se produce cuando un suelo no saturado se humedece adsorbiendo agua entre sus partículas y aumentando de volumen. Los resultados experimentales indican que el aumento de volumen es al principio, menos que proporcional a la cantidad de agua fijada, luego aumenta en forma brusca para posteriormente anularse y perder significación cuando el suelo se licua. La variación inversa sucede con el desecamiento, denominándose entonces, “fenómeno de retracción”.

¹⁹Ing. Agr. Miguel A. Scalone Echave – Instituto de Agrimensura. Propiedades físico-químicas de los suelos capítulo 10 Pág.6.

La expansión está directamente atribuida a la presencia de los coloides orgánicos y a los arcillosos que, según su proporción y naturaleza, son más o menos expandibles. Así Por ejemplo, la montmorillonita es más expandible que la caolinita.

Por otra parte, la expansión de los mismos, depende de la riqueza de los coloides en cationes intercambiables, siendo por ejemplo más expandible una arcilla sódica que una cálcica. Se recuerda así mismo, que los fenómenos de dispersión están favorecidos por las mismas condiciones. Si hay dispersión, al provocarse la expansión, puede haber desaparición de la estructura y gran susceptibilidad a la compactación.

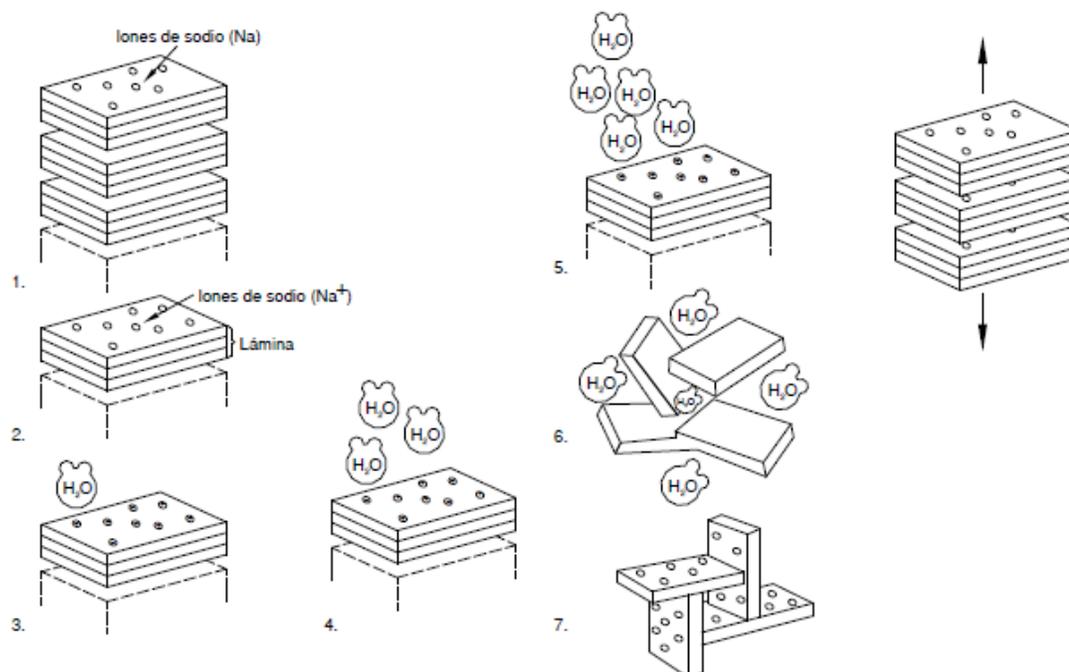
Delgado (1986) resume en tres los mecanismos micros estructurales fundamentales que producen el hinchamiento²⁰:

- Hidratación de las partículas de arcilla.
- Hidratación de cationes.
- Repulsión osmótica.

Estos mecanismos se presentan en el proceso de hidratación de las arcillas y su posterior hinchamiento que se describen a continuación en la Figura No 2.22 en forma secuencial.

²⁰ Comportamiento de suelos no saturados. Estado del conocimiento capítulo 2.

Figura No 2.22: Proceso de hidratación de las arcillas, en forma secuencial (7 etapas).



FUENTE: Tesis Clasificación de Arcillas presentes en los bancos de Guatajiagua, departamento de Morazán, y Facultad Multidisciplinaria Oriental. 2007, pág. 29.

Etap 1: En el principio la arcilla se encuentra en un estado deshidratado, algunos iones de sodio (Na^+), potasio (K^+) o tal vez calcio (Ca^{2+}) son adsorbidos en el espacio interlaminares (Ver Figura No 2.23).

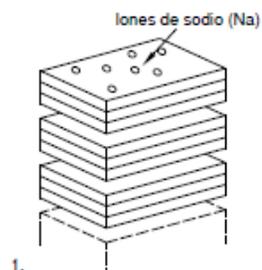


Figura No 2.23: Etapa 1.

Etapa 2: Desde el punto de vista electrostático, las cargas negativas en la arcilla se acumulan en las superficies planas de las laminillas, mientras que los bordes acumulan cargas positivas. Luego los iones de sodio tienden a concentrarse sobre las caras planas (Ver Figura No 2.24).

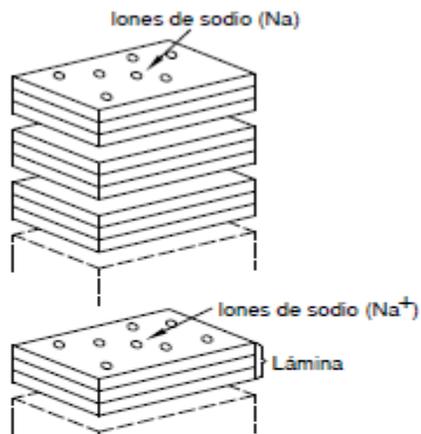


Figura No 2.24: Etapa 2.

Etapa 3: Al ponerse en contacto con la arcilla, las moléculas de agua son atraídas fuertemente hacia las superficies planas debido a la presencia de los iones sodio cargados positivamente. Hay que recordar que, a la escala molecular, las fuerzas electrostáticas son las más importantes (Ver Figura No 2.25).

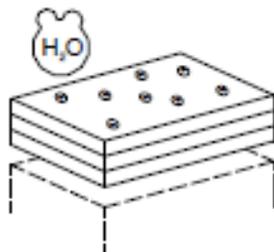


Figura No 2.25: Etapa 3.

Etapa 4: En este estado, las moléculas de agua se hacen más dipolares, atrayendo a otras de su especie (Ver Figura No 2.26).

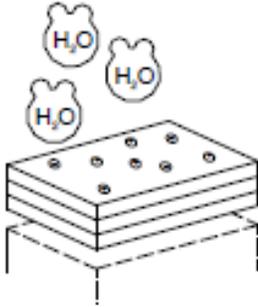


Figura No 2.26: Etapa 4.

Etapa 5: La carga negativa en la superficie de las laminillas se incrementa conforme las moléculas de agua se enlazan unas con otras al aumentar su polarización. Llega un momento en que la carga superficial es tal, que las láminas se repelen entre sí separándose unas de otras por lo que el espacio interlaminar se expande, originando el hinchamiento característico de las arcillas (Ver Figura No 2.27).

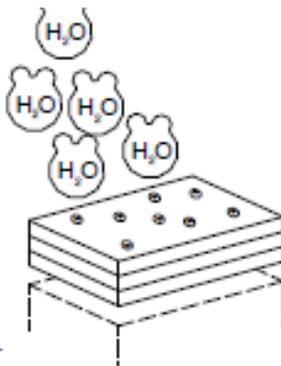


Figura No 2.27: Etapa 5.

Etapa 6: Las moléculas de agua continúan llenando el espacio interlaminar, neutralizando parcialmente las superficies expuestas y manteniendo las láminas apartadas unas de otras, hasta que el agua es eliminada mediante algún procedimiento de secado, lo cual origina una contracción del volumen de la lámina (Ver Figura No 2.28).

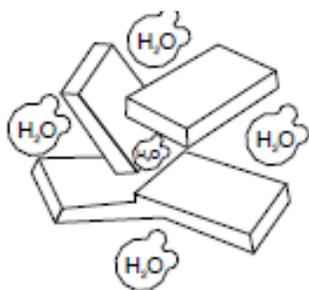


Figura No 2.28: Etapa 6.

Etapa 7: El equilibrio de la hidratación es alcanzado cuando termina la mezcla de la arcilla con el agua, dando como resultado una estructura interna hidratada que hace coincidir los bordes cargados positivamente con las caras planas cargadas negativamente, de modo que se forma una estructura de castillo de naipes, por lo que las moléculas de agua entran y salen libremente. Este castillo puede derrumbarse mediante una agitación vigorosa de la suspensión, pero tiende a formarse de nuevo si la agitación termina, esto es, si el medio queda libre de esfuerzos mecánicos. Este último efecto se debe a que las hojas mantienen la fuerte carga electrostática que las atrae. Cabe mencionar que cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como resultado un alto

grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida (Ver Figura No 2.29).

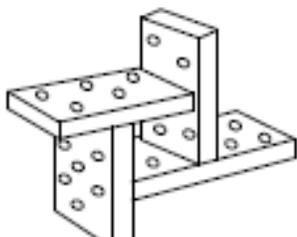


Figura No 2.29: Etapa 7.

En el estudio de este tipo de materiales es muy importante el estudio mineralógico, ya que a través de este, se determinan los minerales de arcilla y esto permite identificar adecuadamente la arcilla que se estudia.

Factores que afectan al hinchamiento²¹.

El proceso de hinchamiento de un terreno viene afectado por una serie de factores que condicionan su evolución y magnitud. Gromko (1974) resume estos factores en los siguientes:

- ✓ *Tipo de minerales y cantidad de los mismos:* cuanto más expansivos sean los minerales presentes en el suelo mayor será el hinchamiento que se producirá cuando el suelo se inunde. (Ver Tabla No 2.12).

²¹<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/746/A5.pdf>

Tabla No 2.12: Potencial de expansión de los minerales puros de arcilla.

Sobrecarga (Kpa)	Potencial de expansión (%)		
	Caolinita	Ilita	Montmorilonita
9.60	Insignificante	350	1500
19.10	Insignificante	150	350

FUENTE:<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/746/A5.pdf>

- ✓ *Densidad:* para el mismo suelo con la misma humedad inicial, el hinchamiento será mayor cuanto mayor sea la densidad seca del mismo. Las arcillas densas se expanden más y presentan mayores presiones de expansión que sus contrapartes de menor densidad y mismo contenido de humedad inicial (los suelos expansivos con densidades secas superiores a los 1,750 kg/m³ generalmente exhiben altos potenciales de expansión).
- ✓ *Estado de esfuerzos:* la magnitud del hinchamiento es tanto menor cuanto mayor es la presión aplicada al suelo pudiendo llegar a anularlo por completo.
- ✓ *Estructura del suelo:* los suelos que han experimentado cementaciones tienen menor tendencia a hinchar. Seed y Chan (1959) señalan que las estructuras floculadas tienen mayor tendencia a hinchar que las dispersas, en cambio la retracción es mucho menor para las primeras. Este es el caso, por ejemplo, de que existan cementaciones o enlaces entre partículas que son eliminadas en el proceso de remoldeo. Por otro lado, estructuras de suelo dispersas con las partículas orientadas preferentemente en una dirección pueden producirse respuestas anisótropas de la deformación al humedecer o secar. En este caso,

lógicamente, las deformaciones serán mayores en la dirección perpendicular a la correspondiente a las partículas.

- ✓ *Espesor del estrato:* Si un estrato expansivo posee un espesor muy delgado (generalmente menor de 60 cm), es factible esperar un daño relativamente pequeño a las estructuras. Cabe destacar que el espesor del estrato está limitado por la profundidad del *NAF* (nivel de agua freático), ya que se espera que debajo de él no existan variaciones de humedad. Por tanto, rara vez se presentan daños a las estructuras desplazadas sobre suelos expansivos con un *NAF* (nivel de agua freático) a distancias muy cortas del desplante de la cimentación.
- ✓ *Permeabilidad y tiempo:* Puesto que las arcillas con un potencial de expansión muy alto tienden a poseer permeabilidades extremadamente bajas, es posible que requieran de una cantidad de tiempo considerable para que lleven a cabo la totalidad de sus expansiones (semanas o incluso años). Por tanto, es probable que las arcillas con un potencial de expansión menor, pero con una mayor permeabilidad, lleguen a expandirse más durante una estación que las propias arcillas más altamente expansivas. Aunque se debe señalar que la presencia de fisuras (tales como las grietas de desecación) y de lentes de arena y grava en el suelo, pueden hacer que el agua fluya más fácilmente, acelerando el proceso de humedecimiento y expansión del suelo.

- ✓ *Fluidos intersticiales:* la presencia de sales disueltas en el agua que ocupan los poros del suelo influye en los fenómenos de formación de la capa doble. Una elevada concentración de sales y un pH alto favorecen la disociación de éstas y por lo tanto aumenta la cantidad de cationes presentes en el agua libre. Esto hace que se produzca una menor adsorción de cationes y que por lo tanto el hinchamiento sea menor.

- ✓ *Humedad:* a igualdad de otros factores la humedad del suelo influye también en la magnitud del hinchamiento. Cuanto menor es la humedad mayor es la expansividad potencial, por cuanto el suelo es capaz de adsorber mayor cantidad de agua. En general, las arcillas muy secas, usualmente con contenidos de humedad menores al 15 por ciento, fácilmente pueden adsorber humedad hasta alcanzar valores de alrededor de un 35 por ciento, provocando daños muy severos a las estructuras. Por el contrario, las arcillas con contenidos de humedad relativamente altos, de alrededor de un 30 por ciento, indican que la mayoría de las expansiones ya han tenido lugar, con lo que se puede esperar que las expansiones posteriores sean relativamente pequeñas.

- ✓ *Clima:* Los suelos de climas húmedos generalmente se encuentran húmedos y con tendencias a permanecer así durante todo el año, debido a que sus periodos de mayor evapotranspiración (verano) usualmente coinciden con los de mayor lluvia. Por tanto, tienden a presentar expansiones pequeñas, aunque

se han llegado a reportar problemas graves cuando se han tenido periodos prolongados de sequía. Los mayores problemas de expansión se presentan en las áreas áridas, semiáridas y monzónicas, debido a que la distribución estacional de sus precipitaciones y evapotranspiraciones tiende a causar amplias fluctuaciones en el contenido de humedad del suelo.

- ✓ *Sobrecarga:* Una sobrecarga moderada puede restringir en mucho al potencial de expansión de un suelo, aunque usualmente se requieren sobrecargas muy grandes para restringirlas totalmente. Por tanto, el permitir una pequeña expansión puede reducir en mucho a la presión de expansión del suelo.

Determinación de características de hinchamiento. (Ensayos de laboratorio²²).

Para determinar las características de hinchamiento de un suelo que presenta plasticidad, se requiere realizar una serie de ensayos de laboratorio que permitan determinar la expansividad o aumento de volumen de una muestra de suelo cohesivo. El fenómeno de cambio de volumen de un suelo arcilloso es resultado directo de la disponibilidad y variación de la cantidad de agua que él posea. Para medir la expansividad de un suelo parcialmente saturado, se recurre a ensayos realizados en el edómetro. Los más comunes son el ensayo de hinchamiento libre, que permite el hinchamiento de la muestra al ser inundada, el ensayo de presión de hinchamiento,

²²Jiménez Salas J. y de Justo alpañes J. Vol. 1 .1975.

donde se mide la presión que ejerce el suelo al expandirse y el ensayo de identificación el ensayo Lambe, estos ensayos serán descritos a continuación.

Ensayo de hinchamiento libre: Se toma una muestra inalterada de suelo y se monta en el edómetro, se pone en cero el lector de deformación y a continuación se inunda la muestra, hasta un nivel en que el agua solamente penetre en la pastilla de suelo por la piedra porosa inferior (con esto se evita que quede aire atrapado en el interior de la muestra). Se mide el hinchamiento final el cual se expresa en porcentaje del espesor inicial de la muestra y se designa con el nombre de hinchamiento libre.

Como no hay que aplicar presiones sobre la muestra, se puede colocar el lector de deformación, directamente sobre el pistón de carga, con lo cual habrá menos errores en la medida de deformaciones. Existen casos en que este ensayo se realiza bajo una carga pequeña, aplicando una presión inicial de 0.07 a 0.1 kg/cm². Una vez inundada la muestra y transcurrido el tiempo necesario para que se produzca la expansión, se varía la carga, obteniendo el comportamiento carga - deformación en condiciones de inundación.

Ensayo de presión de hinchamiento: Este tipo de ensayo se realiza prácticamente en la misma forma que en el caso anterior, pero en lugar de medir el hinchamiento de la muestra, se añaden cargas para no permitirlo. La presión máxima que hay que aplicar para que no se produzca hinchamiento se conoce con el nombre de presión de hinchamiento. Aplicada la presión máxima, se van quitando cargas y se miden los hinchamientos que se producen. El hinchamiento bajo carga nula en este ensayo es

siempre inferior al hinchamiento libre (o bajo la carga de 0.1 kg/cm^2). En este ensayo, el hinchamiento es igual y contrario al movimiento de compresión que experimenta el equipo, inducido por la carga aplicada.

Ensayo Lambe: Ensayo rápido cuyo objetivo es, descubrir o evaluar la susceptibilidad de un suelo al hinchamiento o la retracción. Es un ensayo de identificación, por ello no sustituye a ensayos realizados con muestras inalteradas o compactadas en las mismas condiciones que en obra. Por ello ha recibido numerosas críticas principalmente por trabajar con muestras remoldeadas donde es difícil reproducir las condiciones in situ. Se toma una muestra de suelo que pase por el tamiz N^o 10 ASTM (10 mm.) que deberá cumplir con uno de los siguientes estados: seco, húmedo o en el límite plástico. La muestra se compacta mediante el martillo de ensayos Proctor (según el estado en que se encuentre el suelo, será la energía de compactación utilizada según lo indicado en la Tabla No 2.13) dentro de la célula interior del aparato Lambe. Realizada la compactación, se aplica una presión a la muestra de 0.1 kg/cm^2 , mediante un vástago ajustable.

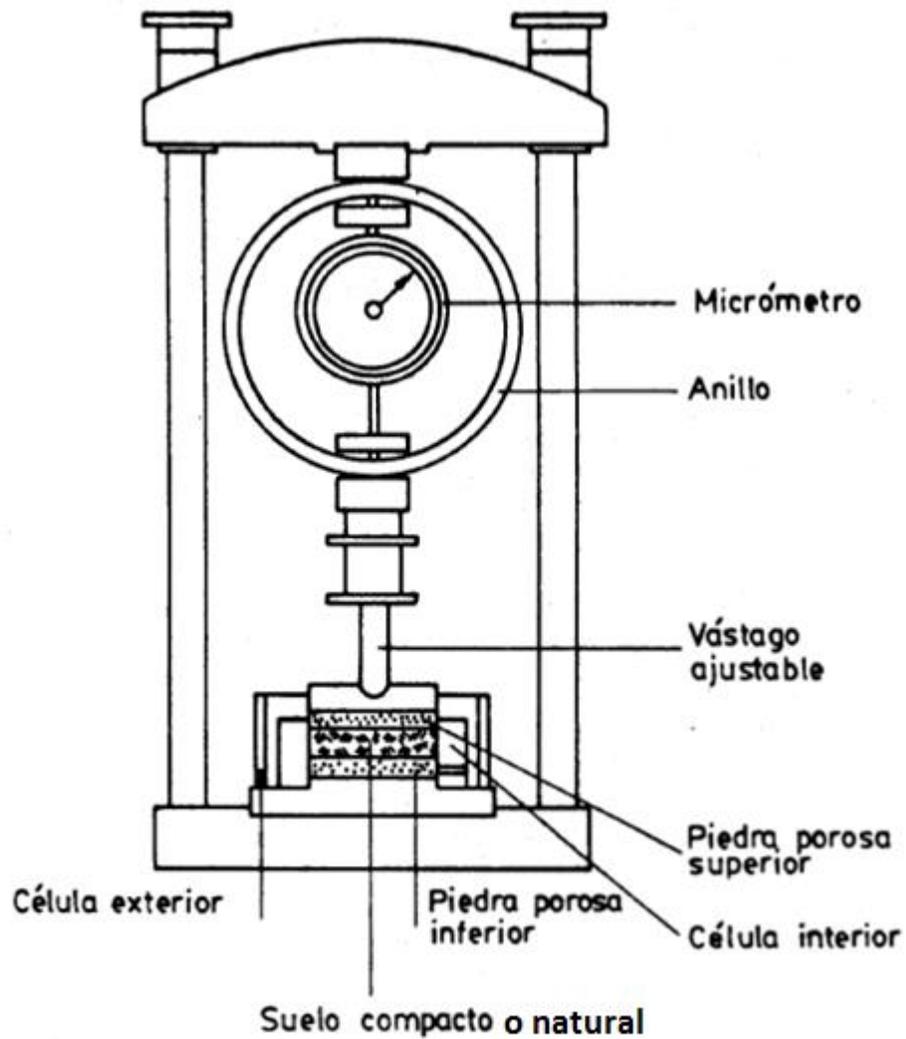
Tabla No 2.13: Energía de compactación según estado de la muestra de suelo.

Estado de la muestra de suelo	N ^o de capas	N ^o de golpes Por capa	Energía de compactación por unidad de volumen
Seco	3	7	$E = PM = 27.2 \text{ Kg} \cdot \text{cm/cm}^3$
Húmedo	3	4	$E = 1/2 PM = 13.6 \text{ Kg} \cdot \text{cm/cm}^3$
Límite plástico	1	5	$E = PN = 6.0 \text{ Kg} \cdot \text{cm/cm}^3$

FUENTE: Jiménez Salas J. y de Justo alpañes J. Vol. 1 .1975.

Finalmente, se inunda la muestra y la presión que actúa sobre esta al cabo de dos horas, se designa con el nombre de índice de expansividad. El esquema del equipo utilizado, se puede apreciar en la Figura No 2.30.

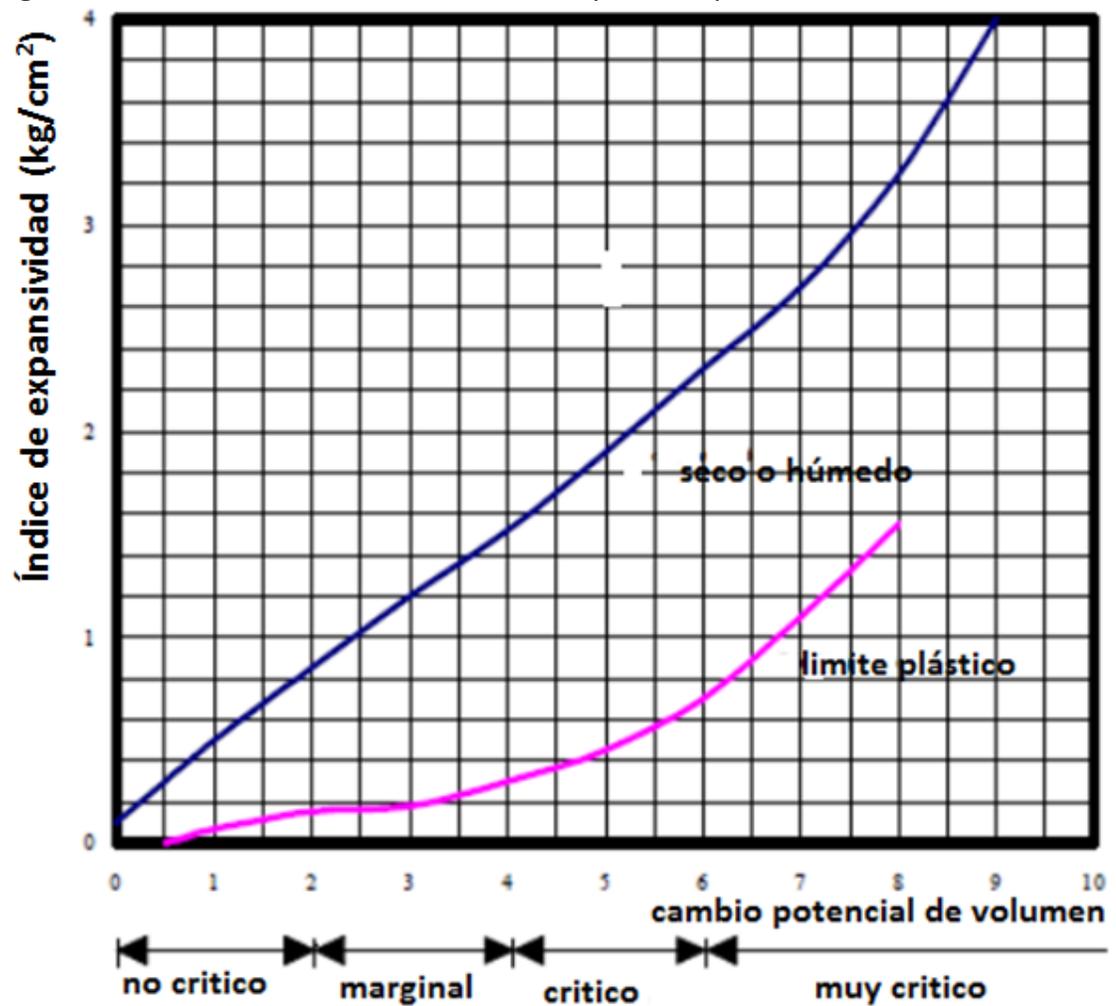
Figura No 2.30: Sección Aparato Lambe.



FUENTE: Jiménez Salas J. y de Justo alpañes J. Vol. 1 .1975.

Además, es posible graficar el índice de expansividad contra el cambio potencial de volumen, el cual nos indica lo peligroso que es el suelo, como se observa en el gráfico de la Figura No 2.31.

Figura No 2.31: Relación índice hinchamiento y cambio potencial de volumen.



FUENTE: Jiménez Salas J. y de Justo alpañes J. Vol. 1 .1975.

2.6.3.6.4 Plasticidad.

Es la propiedad que poseen los suelos de grano fino de no desmoronarse cuando estos son remoldeados, específicamente las arcillas. Esto es posible por el agua adsorbida, la cual rodea las partículas de arcilla formando una capa, produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras, cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

En el libro de Mecánica de suelos (J. Badillo), plasticidad se define como: *“La propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse”*.

La elevada plasticidad se debe a su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial), por lo que guarda una relación específica con las propiedades fisicoquímicas de las arcillas. Así también, existe relación entre la plasticidad y otras propiedades físicas de importancia, por ejemplo, la forma laminar de las partículas ejerce una influencia importante en la compresibilidad del suelo, mientras que el pequeño tamaño de las partículas hace que la permeabilidad del conjunto sea muy baja. En gran parte, la plasticidad se debe al tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

La plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los límites de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Contracción). Estos límites marcan

una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo: sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso.

Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. Los experimentos realizados por Atterberg, Terzaghi y Gold Schmidt han revelado que la plasticidad de los suelos se debe a la carga eléctrica de las partículas laminares, el catión de cambio juega un papel importante, porque es quien neutraliza a las cargas del oxígeno, produciéndose una mayor o menor carga eléctrica en las partículas de arcilla, y con ello adsorbiendo una cantidad de moléculas de agua.

Como se mencionó anteriormente, para medir la plasticidad se realizan ensayos como: Límite líquido, Límite plástico y Límite de contracción. Estos ensayos fueron desarrollados por Atterberg, y por ello llevan su nombre (*Límites de Atterberg*).

Límite Líquido (LL): Es el contenido de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado líquido. En este estado la mezcla se comporta como un fluido viscoso y fluye bajo su propio peso. Por debajo de éste contenido de humedad la mezcla se encuentra en estado plástico. Cualquier cambio en el contenido de humedad a cualquier lado de LL produce un cambio en el volumen del suelo.

Límite Plástico (LP): Es el contenido de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado plástico. En este estado la mezcla se deforma a cualquier forma, bajo ligera presión. Por debajo de éste contenido de humedad la mezcla está en un

estado semi sólido. Cualquier cambio en el contenido de humedad a cualquier lado de LP produce un cambio en el volumen del suelo.

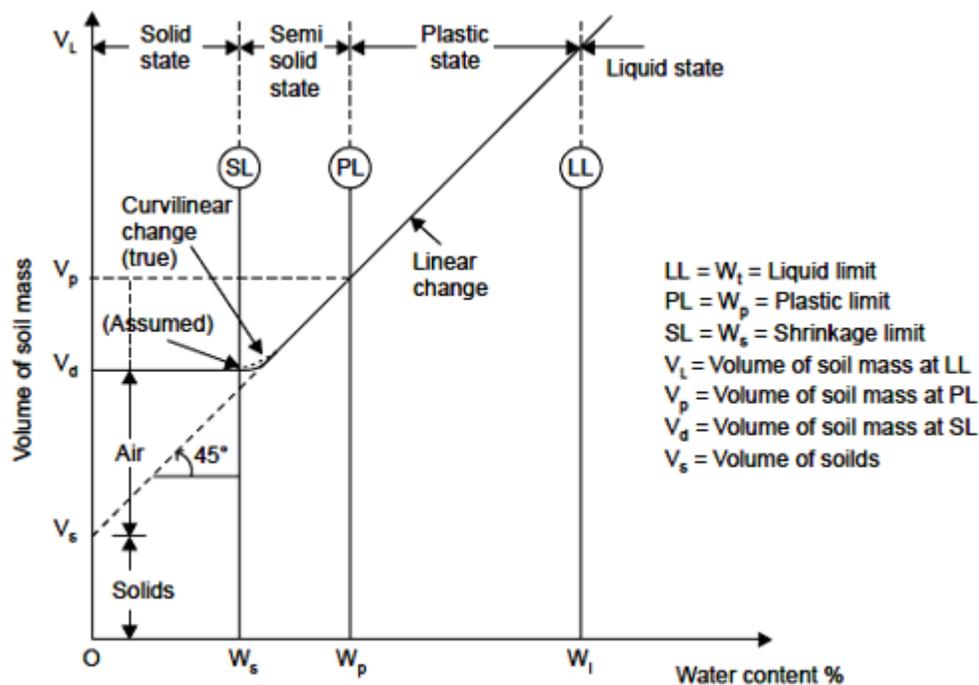
Límite de Contracción (LC): Es el contenido de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado semi sólido. Por debajo de éste contenido de humedad la mezcla se encuentra en estado sólido. Cualquier incremento en el contenido de humedad está asociado con un cambio de volumen pero una reducción en el contenido de humedad no produce un cambio de volumen. Este es el mínimo contenido de humedad que provoca saturación completa de la mezcla suelo-agua. El volumen permanece constante mientras la mezcla pasa del estado seco a LC moviéndose desde saturación 0 % a 100 %. En el lado húmedo de LC el volumen de la mezcla se incrementa linealmente con el contenido de humedad. La Figura No 2.32 muestra los estados del suelo al variar su contenido de humedad.

Los Límites de Atterberg son utilizados en la clasificación de suelos finos. Encontrar relaciones entre estos límites y las propiedades del suelo, ha sido materia de investigación durante muchos años. Terzaghi & Peck (1967) sugirieron la proporción directa entre LL y la compresibilidad del suelo. Whyte (1982) sugirió un método basado en la extrusión para la determinación de LP y encontró que la relación de resistencia en LP comparada con la relación de resistencia en LL es de aproximadamente 70. Según Skempton & Northy (1953) ésta relación es de aproximadamente 100.

LL para minerales de arcilla puede variar desde 50 para la caolinita a 60 para la illita y hasta 700 para la montmorillonita. La caolinita e illita exhiben LP medio de 25 a 35,

mientras la montmorillonita puede tener LP de 100 (*Soil Mechanics Basic Concepts and Engineering Application. Aysen, A. 2002*).

Figura No 2.32: Representación gráfica de los límites de Atterberg.



FUENTE: Soil Mechanics Basic Concepts and Engineering Application. Aysen, A. 2002.

Índices obtenidos a partir de los Límites de Atterberg.

Los parámetros de correlación más útiles obtenidos a partir de la determinación de los límites de Atterberg son: el índice de plasticidad IP, el índice de liquidez IL, el índice de contracción IC y el grado de actividad de las arcillas A_c , los cuales se definen en la Tabla No 2.14.

Tabla No 2.14: Relación entre Límites de Atterberg y otros índices del suelo.

Índice	Definición	Correlación
De Plasticidad	$IP = LL - LP$	Resistencia, compresibilidad, compactabilidad, etc.
De Liquidez	$IL = \frac{W_n - LP}{IP}$	Compresibilidad, resistencia del suelo y estado de esfuerzos.
De Contracción	$IC = LP - LC$	Potencial de contracción.
Actividad de las Arcillas	$A = \frac{IP}{\text{Fraccion de Arcilla } (< \% 2\mu m)}$	Potencial de expansión y otros.

FUENTE: Holtz & Kovacs. An Introduction to Geotechnical Engineering.

Índice de Plasticidad IP.

Atterberg definió el índice de plasticidad para describir el rango de contenido de humedad natural sobre el cual el suelo era plástico. El índice de plasticidad IP, es por tanto numéricamente igual a la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico (Ecuación. 2.6):

Ecuación 2.6:
$$IP = LL - LP$$

LP es altamente influenciado por el contenido orgánico del suelo ya que elevan su valor sin aumentar LL, por esto suelos con alto contenido orgánico presentan IP bajo y LL elevado.

LL y LP dependen de la cantidad y tipo de arcilla en el suelo. IP depende solo de la cantidad de arcilla (de allí la relación de Skempton para definir la actividad de la arcilla, basada en IP).

Un suelo con un IP igual a 2 tiene una gama muy estrecha de plasticidad, por el contrario, un suelo con un IP igual a 30 tiene características plásticas muy elevadas.

El índice de plasticidad es útil en la clasificación ingenieril de suelos finos. La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y clasificación.

Con frecuencia, con fines de construcción se especifican suelos con un determinado IP plasticidad que se encuentra por debajo de cierta cantidad dada. Puesto que los suelos que conforman la subrasante para carreteras y autopistas se mejorarán necesariamente en alguna ocasión, los departamentos de caminos casi siempre requieren que la base de pavimentación de las carreteras tenga un IP menor que 4 (Ver Tabla No 2.15).

A menudo se utiliza cemento para agregar resistencia al suelo in situ. Por lo común, la cantidad utilizada está entre 5 y 10 por ciento del suelo utilizado, teniendo resistencias entre 300 - 800 psi.

A menudo se emplea cal para mejorar las características de los suelos arcillosos. Por lo común, estos últimos son pobres y su subrasante es inestable para soportar la base de pavimentación, y poseen un IP elevado. La adición de cal reduce el IP y se puede duplicar la resistencia de la arcilla compactada. La cal tiende a desecar el suelo, cuando la arcilla esté demasiado mojada para poder compactarla.

Tabla No 2.15: Plasticidad del suelo según el IP.

Plasticidad	Descripción del suelo	Rango IP
Nula	Limo	$0 \leq IP \leq 3$
Baja	Limo con trazas de arcilla	$4 \leq IP \leq 15$
Media	Limo arcilloso Arcilla limosa Arcillas y limos orgánicos	$16 \leq IP \leq 30$
Alta	Arcilla limosa Arcilla	$IP \geq 31$

FUENTE: Holtz & Kovacs. An Introduction to Geotechnical Engineering.

2.6.3.6.5 Tixotropía.

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide al amasarlo o cuando es sometido a esfuerzos de corte, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Si a continuación se las deja en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido, por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico.

Es importante tener en cuenta la diferencia entre un fluido tixotrópico y otro pseudoplástico. El primero muestra una disminución de la viscosidad a lo largo del tiempo, a una velocidad de corte constante, mientras que el último muestra esta disminución, al aumentar la velocidad de corte. A los fluidos que exhiben la propiedad

opuesta, en la que la agitación a lo largo del tiempo provoca la solidificación, se les llama reopéticos²³, a veces anti-tixotrópicos, y son mucho menos comunes.

2.7 METODOLOGÍA PARA ESTUDIAR UN SUELO ARCILLOSO POTENCIALMENTE EXPANSIVO.

Para poder identificar un suelo expansivo, debemos determinar su mineralogía (tipo de arcilla) y conocer el fenómeno de Expansividad (Hinchamiento o cambio volumétrico del suelo), que se da en los materiales plásticos, y posteriormente poder correlacionar el tipo de arcilla y su potencial expansivo. A continuación, se describe brevemente el análisis mineralógico que se le realizan a estas.

2.7.1 Identificación mineralógica.

Para el estudio de suelos finos, es muy importante reconocer los minerales de los que están compuestos, la caracterización del material se describe mejor conociendo los minerales de los que se compone. Existen muchos métodos para su determinación, estos pueden ser: Químicos, a través de microscopios electrónicos, difracción de rayos X, Análisis térmico diferencial, petrográficos, entre otros. Sin embargo, el más utilizado es el de Difracción de rayos X, y en menor grado, el análisis térmico diferencial y la microscopia electrónica.

²³Reopexia: es el aumento de la viscosidad a partir de la aplicación de esfuerzos cortantes, contraria a la tixotropía

Debido a que el método más utilizado es el de difracción de rayos X, se explicara un poco más acerca de este a continuación:

Difracción de rayos X: es utilizada para la identificación de los minerales cristalinos arcillosos y de los no-arcillosos. También nos permite poder conocer la distancia entre capas de las placas de las arcillas antes y después de cada tratamiento.

Primeramente, se deben separar los granos finos de los gruesos. Se debe hacer en estado natural para no alterar la muestra, ya que las arcillas son muy sensibles a los cambios de ambiente. Las formas de separar las partículas pueden ser por floculación o por lento asentamiento.

Una vez se tenga la fracción de arcilla, se procede a la difracción de rayos X, y en este se puede apreciar los minerales arcillosos como los no arcillosos (impurezas) y se puede de esta manera determinar el tipo de arcilla en análisis.

Cabe mencionar que en algunos casos se utilizan conjuntamente con este método, métodos químicos o análisis térmico diferencial, con el fin de comprobar los resultados, y tener datos aún más confiables²⁴.

2.7.2 Expansividad.

Una vez que se conocen los componentes mineralógicos de la muestra, se puede correlacionar la arcilla con el grado de Expansividad, así por ejemplo, si la arcilla es una Montmorillonita se esperaría una alta Expansividad (mediante el ensayo de

²⁴Para conocer más acerca de los métodos para la determinación mineralógica ver los enlaces que aparecen en la bibliografía del presente documento.

hinchamiento libre por ejemplo), y por el otro lado, una caolinita tendría una baja Expansividad. Para tal fin, se han efectuado numerosos estudios tendientes a obtener una identificación rápida y simple en el laboratorio del carácter expansivo de un cierto tipo de suelo. Diversos autores como Ladd y Lambe (1961), Seed et al. (1962), Holtz y Gibbs (1956 y 1959), Skempton (1953), han establecido correlaciones entre las propiedades índices del suelo, como puede ser: índice de plasticidad, límite de contracción, contenido coloidal, entre otras.

Seed (1962), llega a una relación entre el índice de plasticidad y el porcentaje de hinchamiento libre (con sobre carga de 1psi) con muestras compactadas a la humedad óptima, este presentaría los resultados con un error no mayor al 35% (Ver Tabla No 2.16).

Lambe (1960), propuso medir el cambio potencial de volumen, utilizando un equipo que lleva su nombre, es un edómetro con un vástago ajustable en el cabezal superior, el cual permite ensayos de hinchamiento a volumen constante. El resultado es el llamado Índice de Expansividad o Índice Lambe²⁵.

En la Tabla No 2.16, se presenta el resumen de los criterios de Expansividad correspondientes a Seed (1962) y Lambe (1960).

²⁵ Ver apartado de hinchamiento

Tabla No 2.16: Criterios de Expansividad.

Criterios de expansividad					
Expansividad	En terminos de propiedad indice			En muestras compactadas	
	Limite de contraccion	Indice de plasticidad	Actividad	Potencial de Hinchamiento De Seed (%)	Indice de Lambe (Kg/cm²) Muestra seca o húmeda
Baja	>15	<18	<0.5	0 – 1.5	<0.8
Media	12 - 16	15 – 28	0.5 – 0.7	1.5 – 5.0	0.8 – 1.5
Alta	8 – 12	25 – 40	0.7 – 1.0	5 – 25	1.5 – 2.3
Muy alta	<10	>35	>1.0	>25	>2.3

FUENTE: F. Rodríguez Roa, Fundaciones en arcillas expansivas, 1975, pág. 361.

Chen (1965): Desarrolla la Clasificación de suelos expansivos basado en el Índice Plástico (Ver Tabla No 2.17).

Tabla No 2.17: Clasificación del potencial expansivo respecto al IP.

IP	Clasificación del potencial de expansión
0 – 15	Bajo
15 – 35	Medio
35 – 55	Alto
>55	Muy alto

FUENTE: Saúl Orlando Flores Contreras, Influencia de la compactación y el contenido de humedad en arcillas expansivas de El Salvador, tesis Uca, octubre 2014, pág. 68.

Kansas Highway Commission (1974): Esta Comisión desarrolla una clasificación de potencial expansivo en base al Índice de Plasticidad (Ver Tabla No 2.18).

Tabla No 2.18: Clasificación de suelos expansivos basado en el Índice Plástico.

IP	Clasificación del potencial de expansión
<15	Bajo a nulo
15 – 35	Mediano
>35	Alto

FUENTE: Saúl Orlando Flores Contreras, Influencia de la compactación y el contenido de humedad en arcillas expansivas de El Salvador, tesis Uca, octubre 2014, pág. 42.

Holtz & Gibbs (1956): Utilizan el límite de contracción y el índice de plasticidad para definir tres niveles sobre el cambio de volumen de un suelo con potencial expansivo.

(Ver Tabla No 2.19).

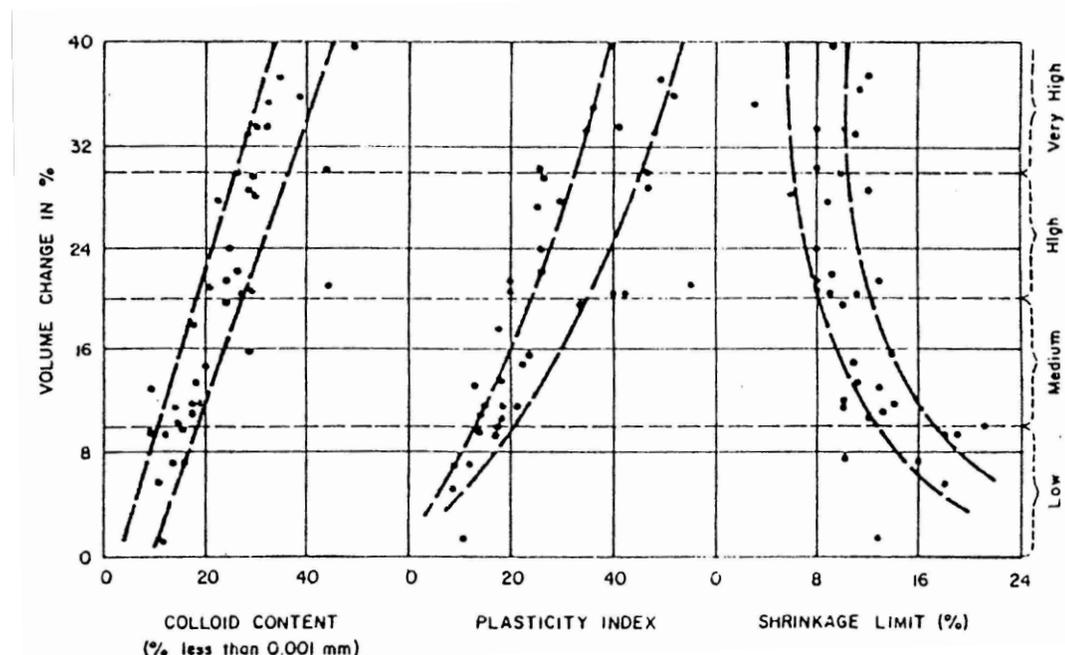
Tabla No 2.19: Cambio de volumen en relación al límite de contracción e índice plástico.

Cambio de volumen	Límite de contracción	Índice de plasticidad
Probablemente bajo	>12	0-15
Probablemente moderado	10-12	15-30
Probablemente alto	0-10	>30

FUENTE: Clasificación de suelos expansivos con base al límite de contracción. Adoptado por Holtz & Gibbs (1956), pág. 20.

Método desarrollado por Holtz (1959): El siguiente gráfico (Ver Figura No 2.33) muestra una relación entre el contenido de coloides, el índice plástico y el límite de contracción:

Figura No 2.33: Relación entre contenido de coloides, índice plástico y el límite de contracción.



FUENTE: Ing. Julio Patrone y José Enrique Prefumo. La acción de los suelos expansivos sobre las cimentaciones. Métodos de prevención y control, pág. 5.

Basado en las curvas presentadas (Figura No 2.33), Holtz propone el siguiente criterio

(Ver Tabla No 2.20) para la identificación de suelos expansivos.

Tabla No 2.20: Estimación probable del cambio volumétrico en suelos expansivos.

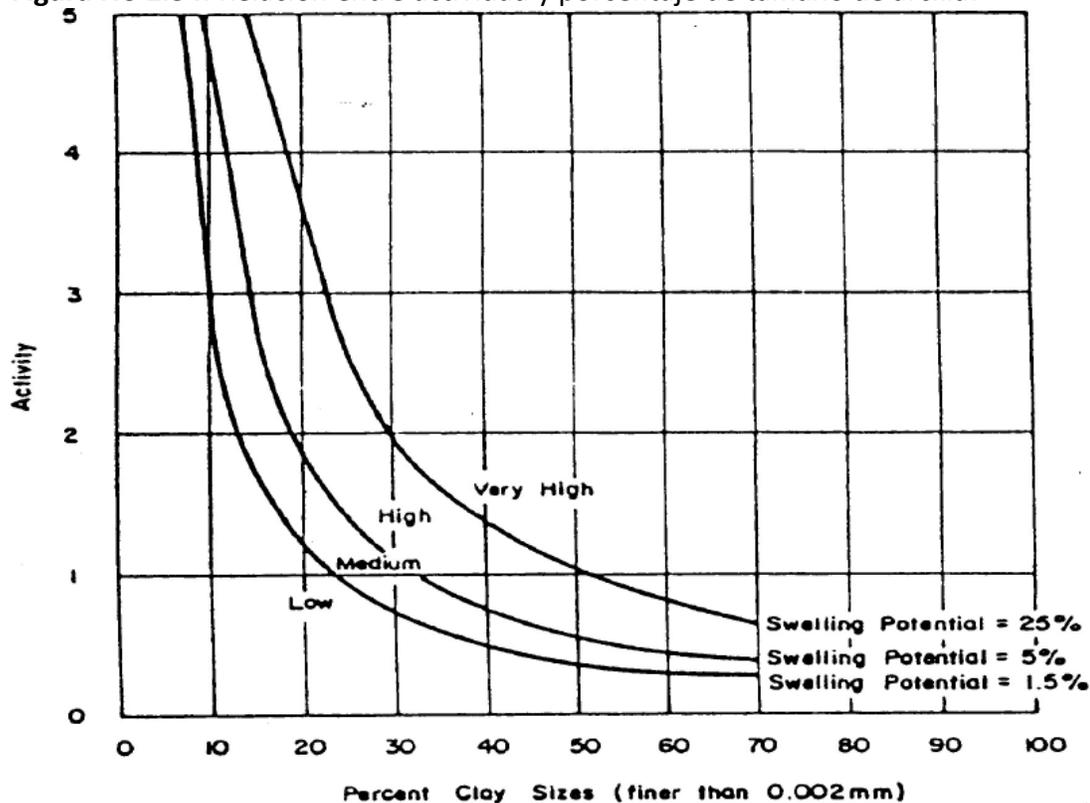
Contenido de coloide (<0.001 mm) en %	Índice Plástico	Límite de contracción	% Expansión probable (seco a saturado) %	Grado de expansión
>28	>35	<11	>30	Muy alto
20-31	25-41	7-12	20-30	Alto
13-23	15-28	10-16	10-20	Medio
<15	<18	>15	<10	Bajo

FUENTE: Ings. Julio Patrone y José Enrique Prefumo, "La acción de los suelos expansivos sobre las Cimentaciones. Métodos de prevención y control", (Doc. De congreso en Universidad Montevideo), pág. 5.

Seed, Woodward y Lundgren: Método del “índice de actividad de la arcilla”, está basado en muestras remoldeadas de suelo compuestos por mezcla de arcillas, bentonita, ilita, caolinita y arena fina. En la Figura No 2.34, se muestra un gráfico que relaciona la actividad con el porcentaje de tamaño de arcillas, donde se puede verificar el potencial de hinchamiento de las arcillas.

La expansión se midió como un % del hinchamiento que experimentan probetas compactadas al 100 % de la densidad del Proctor Estándar y con el contenido de humedad óptimo y sometidas a una sobrecarga de 1 Psi. La actividad se define mediante la Ecuación 2.3.

Figura No 2.34: Relación entre actividad y porcentaje de tamaño de arcilla.



FUENTE: Ing. Julio Patrone y José Enrique Prefumo, la acción de los suelos expansivos sobre las cimentaciones. Métodos de prevención y control, pág. 6.

Zepeda & Pérez (1995): el límite líquido también ha sido utilizado junto con el índice de plasticidad y la succión del suelo para definir tres niveles del potencial de expansión (Ver Tabla No 2.21).

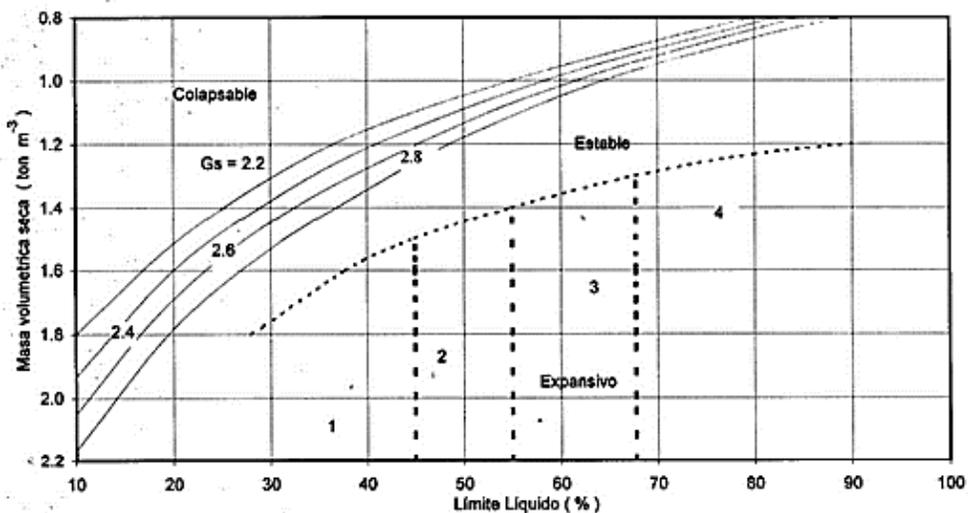
Tabla No 2.21: Relación entre potencial de hinchamiento, succión y plasticidad.

Potencial de expansión	Potencial de expansión (%)	LL (%)	IP (%)	Succión del suelo natural kg/cm ²
Bajo	<0.5	<50	<25	<1.5
Marginal	0.5-1.5	50-60	25-35	1.5-4.0
Alto	1.5	>60	>35	>4.0

FUENTE: Clasificación de suelos expansivos de acuerdo con el límite líquido. Adoptado de: Zepeda & Pérez (1995), pág. 21.

Bureau of Reclamation EE. UU: Con el límite líquido, masa volumétrica seca (ρ_d) y la gravedad específica de un suelo (G_s), se puede determinar la susceptibilidad de un suelo a la expansión o colapso. (Ver Figura No 2.35).

Figura No 2.35: Relación entre potencial de hinchamiento, succión y plasticidad.



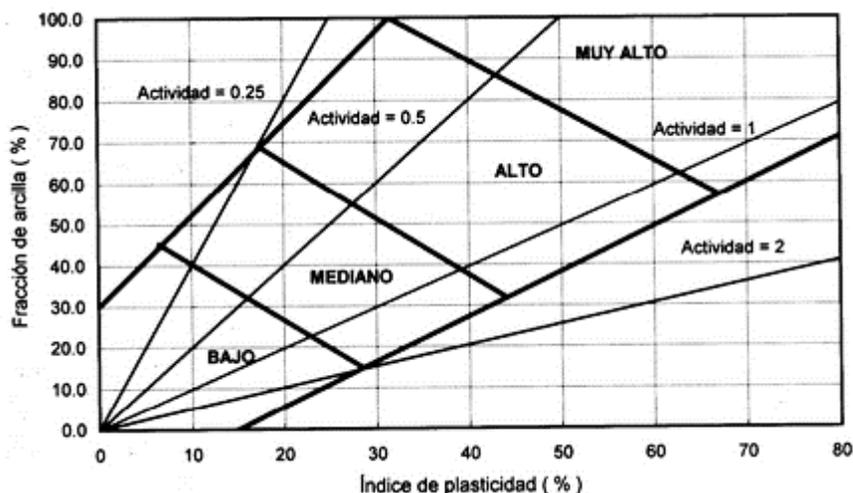
No.	Grado de expansividad
1	baja
2	mediana
3	alta
4	muy alto

Nota: Los límites de expansión se definieron de los datos reportados por *W. G. Holtz* en su libro "Propiedades y Problemas de las Arcillas Expansivas"

FUENTE: Determinación del potencial expansivo o colapsable de un suelo. Adoptado de: Bureau of Reclamation EE. UU. (1984), pág. 175.

Williams & Pidgeon (1982): Desarrollaron un criterio de identificación de suelos expansivos con base a los criterios de Holtz y Gibbs (1956), Van de Merve (1964) y una clasificación que aparece en el BRE Digest 240 (1980). En este se requiere el porcentaje de arcilla, la actividad y el índice de plasticidad (Ver Figura No 2.36).

Figura No 2.36: Potencial de expansión y actividad.



FUENTE: Saúl Orlando Flores Contreras, Influencia de la compactación y el contenido de humedad en arcillas expansivas de El Salvador, tesis Uca, octubre 2014, pág. 24

BRE “Building Research Establishment Digest 240” (1993): sugiere que el índice de plasticidad y la fracción de arcilla, puede ser utilizado para indicar el potencial de un suelo para contraerse o expandirse. La superposición de categorías refleja que las cifras se obtuvieron a partir de múltiples fuentes (Ver Tabla No 2.22).

Tabla No 2.22: Determinación del potencial de expansión.

IP (%)	Fracción de arcilla (<0.002 mm)	Potencial de expansión.
>35	>95	Muy alto
22-48	60-95	Alto
12-32	30-60	Medio
<18	<30	Bajo

FUENTE: BRE “Building Research Establishment Digest 240” (1993), pág. 23.

Ranganatham & Satyanarayana (1965): clasificaron el potencial de expansión con base en el índice de contracción, definiendo este como la diferencia entre el límite líquido y el límite de contracción. La Tabla No 2.23 muestra el criterio utilizado.

Tabla No 2.23: Clasificación del potencial de expansión del suelo.

Índice de Contracción (%) IC = LL-LC	Clasificación del potencial de expansión
<20	Bajo
20 – 30	Medio
30 - 60	Alto
>60	Muy alto

FUENTE: Exploraciones Geotécnicas (Doc. Universidad Nacional de Perú), pág. 2.

Raman (1967): presentó el grado de expansión en función del índice plástico y el índice de contracción (Ver Tabla No 2.24).

Tabla No 2.24: Clasificación de suelos expansivos basado en el índice de plasticidad e índice de contracción.

Índice Plástico (%)	Índice de Contracción (%) IC = LL-LC	Grado de expansión
<20	<15	Bajo
12 – 33	15 – 30	Medio
23 – 32	30 – 40	Alto
>32	>40	Muy alto

FUENTE: Exploraciones Geotécnicas (Doc. Universidad Nacional de Perú), pág. 4.

Si bien es cierto que todos los suelos altamente expansivos tienen plasticidades altas, no es cierto que los suelos con elevada plasticidad sean necesariamente expansivos.

2.7.3 Grado de pre-consolidación.

En arcillas normalmente consolidadas, se ha observado que el hinchamiento en una muestra inalterada, resulta del mismo orden que presenta la muestra remoldeada con el mismo contenido de humedad. Sin embargo, en suelos preconsolidados, la destrucción de uniones tipo diagenético²⁶ que origina el remoldeo, puede conducir a potenciales de hinchamiento muy superiores en las muestras perturbadas, que los correspondientes a las muestras inalteradas, sobreestimando así el potencial expansivo del terreno natural.

2.7.4 Humedad inicial.

Por humedad inicial se entiende como la cantidad de agua presente en las partículas de suelo, en un principio, el potencial de expansión de un suelo varía según este valor inicial, es decir, un suelo inicialmente húmedo tiene menor potencial a cambiar su volumen; caso contrario, si el suelo está inicialmente seco su potencial de cambio de volumen aumenta considerablemente. Podemos decir que si variamos su condición inicial de humedad, se puede reducir significativamente el potencial que tiene éste para cambiar su volumen en el tiempo.

²⁶Diagénesis: proceso de formación de una roca sedimentaria a partir de sedimentos sueltos que sufren un proceso de cementación y compactación.

2.7.5 Influencia de la cementación.

La presencia de elementos cementantes como carbonatos, sesquióxidos²⁷ y sílice, es favorable para disminuir el hinchamiento, o cuando el grado de cementación es alto, el hinchamiento puede ser nulo. Cabe mencionar, que no solamente materiales cementantes pueden disminuir la plasticidad, también materiales de tamaño mayor como la arena, pueden disminuir en gran medida la plasticidad, como lo explica Seed, Woodward y Lundgren (Ver apartado 2.6.3.6.2).

Al agregar estos materiales llevan a la disminución de la plasticidad de un suelo fino, por lo que se confirma la relación entre la plasticidad y el grado de Expansividad.

2.8 TÉCNICAS PARA MEJORAMIENTO DE SUELOS EXPANSIVOS.

Los suelos expansivos causan daños perjudiciales a las obras civiles. La expansión o contracción que pueden sufrir ante diferentes contenidos de humedad, genera cambios de volumen en el suelo y se pueden generar asentamientos diferenciales, agrietamientos en carreteras, etc.

Las condiciones ambientales del área en la que se sitúen los suelos expansivos influyen en su comportamiento. Entre los factores a tomar en cuenta se tiene: La frecuencia de lluvia, profundidad del estrato y mineral de arcilla presente en el suelo.

Como ya se ha visto anteriormente, la estructura de las arcillas es en forma laminar, el hinchamiento se ocasiona debido a la adsorción de moléculas de agua entre los

²⁷ Sesquióxido: es un óxido que contiene tres átomos de oxígeno con dos átomos de otro elemento. Por ejemplo: óxido de aluminio (Al_2O_3) y sílice.

espacios laminares, y provoca que se vaya dando una mayor separación entre sus láminas e induce al cambio de volumen.

El mejoramiento del suelo se debe entender como un procedimiento mediante el cual se busca modificar su estado natural, modificando sus propiedades para un mejor comportamiento ante diferentes condiciones de carga y humedad.

Entre algunas propiedades que se busca mejorar están: Estabilidad volumétrica (Expansión – Retracción), Resistencia, Permeabilidad y Compresibilidad.

El mejoramiento de suelos con comportamiento anómalo se realiza a través de técnicas de tratamiento. Estas técnicas tienen un efecto particular sobre cada material que se trate, algunas de ellas son:

2.8.1 Impermeabilización.

Se trata de utilizar recubrimientos plásticos o asfálticos entre una cimentación y el suelo, para impedir el aumento del contenido de agua del terreno de apoyo, en general es difícil asegurar que el terreno permanecerá realmente protegido.

2.8.2 Estabilización química.

Se realiza con el fin de obtener mejoras del suelo en los siguientes aspectos:

- ✓ Aumento de la resistencia y durabilidad.
- ✓ Impermeabilización del suelo.
- ✓ Disminución del potencial del cambio de volumen (Expansión - Contracción).
- ✓ Manejabilidad del suelo.

Entre los aditivos que pueden utilizarse se incluyen el cemento, la cal, los materiales bituminosos y las sales. Estas han sido estudiadas desde hace varias décadas con fines de estabilización, entre las que se pueden mencionar: Cloruro de potasio, cloruro de magnesio, cloruro de bario, nitrato de sodio y carbonato de sodio.

El material que reduce la plasticidad en mayor porcentaje y por ello el más usado, es la cal.

2.8.3 Compactación.

Se realiza mediante la aplicación de energía a la masa de suelo, por un proceso mecánico a través del que se busca obtener la máxima densidad seca del material, estando el suelo humectado con el contenido de agua óptimo. Producto de ello se reducen los espacios vacíos del suelo.

2.8.4 Remoldeo.

Consiste en remodelar cierto espesor de suelo (romper su estructura) y volverlo a colocar compactado con un contenido de agua mayor que el original y con un peso volumétrico menor que el que tenía en su estado original. El sobresaturar el suelo podría traer como consecuencia cambios importantes que afectarían sus propiedades mecánicas.

2.8.5 Sustitución del material.

Consiste en retirar buena cantidad o todo el material que no sea adecuado para cimentar. Por lo general, si el estrato de suelo es muy grande, es antieconómico retirarlo en su totalidad, entonces, se hace una restitución de una capa de un espesor adecuado, por un material más resistente como puede ser suelos de grano grueso como: gravas y arenas o combinaciones de ellas, o suelos que incluyan una mejora con algún producto químico, como la tierra blanca mejorada con cemento para formar el suelo cemento.

Este apartado de técnicas de mejoramiento en conjunto con soluciones prácticas de cimentación para suelos expansivos, será profundizado con más detalle en el capítulo No 6.

CAPITULO 3:

METODOLOGÍA DE LA

INVESTIGACIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se presenta la metodología a seguir para la realización del trabajo de graduación, con el fin de caracterizar el suelo así como buscar los parámetros de hinchamiento y retracción de los suelos, lo que se realizaría a partir de los resultados de ensayos de laboratorio a los suelos en estudio.

La metodología consistirá en:

- ✓ Se llevara a cabo una investigación bibliográfica para conocer la geología de los lugares a muestrear y acerca de los procedimientos de ensayo que se les realizaran a las muestras recolectadas.
- ✓ La realización de visita de campo para identificar los suelos con las características prefijadas de plasticidad, ubicando los puntos preliminares y tomando las muestras alteradas de dichos puntos.
- ✓ Realización de ensayos de laboratorio preliminares.
- ✓ Análisis de resultados preliminares para seleccionar puntos definitivos.
- ✓ Seleccionar los puntos definitivos en base a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados a las muestras preliminares.
- ✓ La realización de visitas técnicas de campo para la extracción de muestras inalteradas en los puntos definitivos seleccionados.
- ✓ Ejecución de ensayos de laboratorio a las muestras inalteradas para la reclasificación de los suelos en los puntos definitivos.

- ✓ Determinación de los parámetros de hinchamiento del suelo por los métodos de hinchamiento libre, método de Lambe y presión de hinchamiento.
- ✓ Determinación de contracción del suelo por medio del límite de contracción.
- ✓ Análisis de resultados de laboratorio de ensayos definitivos.

3.2 METODOLOGÍA PARA MUESTREO PRELIMINAR.

3.2.1 Obtención de información bibliográfica.

La información bibliográfica que servirá para dar apoyo a la investigación será tomada de: Libros de texto, Trabajos de Graduación, Artículos científicos, Revistas, Videos, Investigaciones referentes al tema, Internet, entre otros. Mapas geológicos de El Salvador.

3.2.2 Visitas de campo de reconocimiento y definición de los puntos de muestreo.

En las visitas de campo se hará un recorrido general en el tramo en estudio comprendido entre Metapán (Santa Ana) y Sensuntepeque (Cabañas), en la Carretera Longitudinal del Norte, en compañía de los docentes directores del trabajo de graduación, con el fin de identificar y ubicar puntos preliminares para muestrear suelos que puedan tener plasticidad, además de realizar un registro fotográfico.

Estas visitas se realizarán en diferentes etapas, las cuales se especifican a continuación:

3.2.2.1 Reconocimientos de puntos de muestreo.

El reconocimiento de estos puntos, se llevara a cabo por medio de los procedimientos que se encuentran en la Norma ASTM D 2488: "Práctica estándar para Descripción e Identificación de Suelos (Procedimiento Visual - Manual)", apartado No 14: "Procedimiento de identificación de suelos de grano fino", en el que se detalla el proceso que se debe seguir para evaluar características físicas que se espera que los suelos finos tengan en campo al manipularse. Las características antes mencionadas que se citan en la norma son: Resistencia en seco, dilatancia, tenacidad y plasticidad. Cabe mencionar que en las visitas de campo solo se evaluarán tres de las cuatro características, estas son: Resistencia en seco, dilatancia y plasticidad.

La reacción que se espera obtener en campo, para suelos que tienen plasticidad, se muestra en la Tabla No 3.1.

Tabla No 3.1: Características físicas esperadas de los suelos con plasticidad.

Característica	Procedimiento	Suelos con alto porcentaje de limos	Suelos con alto porcentaje de arcillas
Resistencia en seco:	Para la resistencia en seco se toma una porción de suelo natural seca, a la cual se le ejerce presión con los dedos para verificar que resistencia opone el suelo a desmoronarse.	El suelo en condición seca puede desmoronarse con facilidad con una presión considerable entre los dedos.	El suelo en condición seca no se desmorona con facilidad, llegando a tener una apariencia de roca "blanda".
Dilatancia:	El suelo es humedecido y remoldeado hasta que se logre una consistencia no pegajosa, luego se agita entre las manos y se observa si el agua se retiene o aflora a la superficie.	Al agitarse la masa de suelo, el agua aflora con facilidad cuando es sacudida.	Al agitarse la masa de suelo, el agua no aflora. Debido a las propiedades físico-químicas de las arcillas, el agua se retiene en medio de las partículas de forma laminar. Entonces, por fuerzas electrostáticas, el agua no sale de la masa de suelo.
Plasticidad:	Se forman un rollo de aproximadamente 3mm (1/8") de diámetro. Los rollitos son formados con las manos y se remoldean de tal forma que si se agrietan cerca del diámetro de 3mm, la humedad deberá estar cercana al límite plástico. La idea es que antes que se agriete el rollito de suelo pueda manipularse manteniendo una consistencia maleable y plástica.	Al formarse el rollo de 3mm de diámetro y remoldearlo, pierde humedad y se agrieta muy rápido a humedades muy bajas (cercanas al límite plástico).	Al formar el rollo de 3mm de diámetro, es posible remoldearlo repetidas veces, ya que el agua se retiene en las arcillas y pierde poca humedad al remoldearse. Por lo que, requiere de muchos remoldeos para que llegue a agrietarse el rollo de suelo.

FUENTE: De los autores.

La norma ASTM D 2488 utiliza estos parámetros cualitativos para dar una clasificación de suelos preliminar, sin necesidad de hacer ensayos de laboratorio. En campo, esto sirve para identificar el suelo rápidamente y decidir si se muestrea o no el punto de interés; la clasificación definitiva resultará de los ensayos que se ejecuten en laboratorio.

3.2.2.2 Ubicación de puntos de muestreo.

La ubicación de los diferentes puntos de muestreo se realizara por medio de coordenadas geodésicas haciendo uso del GPS (Global Position System) y la dirección del municipio en que se localizan.

3.2.2.3 Extracción de muestras.

3.2.2.3.1 Extracción de muestras alteradas.

Para esta etapa, se recolectara una cantidad de muestras suficientes para llevar a cabo los ensayos de caracterización: contenido de humedad, Límites de Atterberg, Granulometría (por lavado) y Gravedad Específica. Para la obtención de la muestra se excavará a una profundidad variable dependiendo de las condiciones del suelo, para evitar que la muestra contenga materia orgánica.

3.2.3 Ensayos de laboratorio.

Los ensayos preliminares que se llevaran a cabo se presentan en la Tabla No 3.2:

Tabla No 3.2: Ensayos de laboratorio que se realizarán a muestras preliminares.

Tipo de Ensayo	Norma	Tipo de muestra	Estado de la muestra
Contenido de humedad	ASTM D – 2216	Alterada	Natural
Límites de Atterberg (Límite Líquido y Límite Plástico)	ASTM D – 4318	Alterada	Natural
Gravedad Específica	ASTM D – 854	Alterada	Natural
Granulometría (Por lavado)	ASTM D – 422	Alterada	Natural

FUENTE: De los autores.

3.2.4 Análisis de resultados.

Con el propósito de escoger los puntos de muestreo definitivos, se revisarán los resultados de los ensayos mencionados en el apartado anterior, y se procederá a elegir los puntos definitivos tomando como base los siguientes criterios:

- ✓ **Plasticidad:** Que preferentemente hayan suelos con diferente plasticidad. De acuerdo a la Tabla No 2.15, los intervalos deben ser: $0\% \leq IP \leq 3\%$: nula, $4\% \leq IP \leq 15\%$: baja, $16\% \leq IP \leq 30\%$: media e $IP \geq 31\%$: alta.
- ✓ **Gravedad específica:** Que el suelo tenga un valor de gravedad específica característico de suelos finos con altos contenidos de arcillas o limos con arcillas. Este valor puede ser de 2.50 a 2.80.

- ✓ **Granulometría:** El suelo debe tener un alto contenido de fracción fina, arriba de un 50% que pase la malla No 200.

3.3 METODOLOGÍA PARA MUESTREO DEFINITIVO.

3.3.1 Visitas de campo para muestreo de puntos definitivos.

Las visitas de campo que se harán, serán a los puntos definitivos seleccionados en el apartado 3.2.4. Estas visitas también se realizarán en compañía de los docentes directores del Trabajo de Graduación.

En esta salida a campo se tomarán muestras alteradas e inalteradas, se realizará un registro fotográfico del suelo en el lugar, del proceso de extracción de las muestras, además de la ubicación de los diferentes puntos de muestreo con coordenadas geodésicas haciendo uso del GPS (Global Position System), y la dirección del municipio en la que se localiza.

3.3.2 Extracción de muestras.

La extracción de muestras se llevará a cabo en cada punto de muestreo seleccionado, las cuales servirán para la realización de ensayos de laboratorio. Las muestras deben ser representativas del lugar. La extracción se hará de la forma siguiente:

3.3.2.1 Extracción de muestras alteradas.

Estas muestras se extraerán del estrato objeto de estudio, y a la misma profundidad en la que se extraerán las muestras inalteradas.

Las muestras a extraer tendrán las siguientes características: cantidad suficiente de suelo para desarrollar los ensayos de laboratorio y debe estar lo más libre posible de materia orgánica. Para esta extracción no importa si se altera el estado natural del suelo.

3.3.2.2 Extracción de muestras inalteradas.

Este tipo de muestras serán extraídas del estrato objeto de estudio a una profundidad variable que depende de la ubicación y del estado superficial del suelo al momento de la extracción, teniendo los cuidados necesarios para la obtención de este tipo de muestras, en cuanto a: excavación y manipulación (tratando de que no altere la condición natural de la muestra in situ).

Se extraerá una muestra de dimensiones manejables, y según lo permita el tipo de suelo, la que preferentemente será de forma cúbica.

Para su traslado, se protegerá y almacenará de forma adecuada, siguiendo los lineamientos para la obtención de este tipo de muestras.

3.3.3 Ensayos de laboratorio.

Los ensayos de laboratorio que se realizarán tendrán como objetivo caracterizar el suelo y evaluar el potencial de hinchamiento y retracción cuantitativamente. Los ensayos de caracterización serán utilizados para poder clasificar el suelo con base en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Los ensayos de hinchamiento son los que proveerán los resultados cuantitativos de que tanto se puede hinchar un suelo. Estos ensayos se realizarán en muestras inalteradas con condiciones naturales, es decir, no se remodelarán las muestras y se llevará a cabo en un estado crítico que se pudiera tener en suelos expansivos. Este estado crítico se refiere a la saturación de la muestra.

En la Tabla No 3.3 se muestra un resumen de los ensayos que se van a realizar.

Tabla No 3.3: Ensayos de laboratorio que se realizarán a los puntos definitivos.

Tipo de Ensayo	Norma	Tipo de muestra	Estado de la muestra
Contenido de humedad	ASTM D – 2216	Alterada	Natural
Límites de Atterberg (Límite Líquido y Límite Plástico)	ASTM D – 4318	Alterada	Natural
Límite de Contracción	ASTM D – 427	Alterada	Natural
Gravedad Específica	ASTM D – 854	Alterada	Natural
Granulometría (Por cribado e hidrometría)	ASTM D – 422	Alterada	Natural
Hinchamiento Libre	UNE 103 601 ASTM D 4546	Inalterada	Natural
Presión de Hinchamiento	ASTM D 4546	Inalterada	Natural
Ensayo Lambe	INV E-132-07	Inalterada	Natural

FUENTE: De los autores.

A continuación se describe el procedimiento de los ensayos de laboratorio utilizados para calcular el hinchamiento de los puntos de muestreo definitivos²⁸.

3.3.3.1 ENSAYO LAMBE (INV E-132-07 / determinación de suelos expansivos).

Resumen del método:

La muestra de suelo es compactada de acuerdo al T-99 o T-180, luego es extraída del molde metálico, con el fin de moldear una probeta de esta. Para ello, se utiliza el anillo del equipo lambe, la muestra antes extraída se labra hasta formar una pastilla, que es de diámetro igual al del anillo, una vez formado, se introduce el anillo haciéndolo quedar lo más ajustado posible a la probeta, luego se corta de la parte inferior y se enrasa en ambas caras de tal manera de que queden las superficies niveladas. Se pesa la pastilla con el anillo y posteriormente se arma el equipo Lambe, se coloca el anillo sobre la piedra porosa inferior y sobre este la piedra porosa superior, se ajustan todas las piezas y el micrómetro, luego se procede a saturar la muestra (llenando el recipiente que tienen la muestra con agua). Luego se permite la expansión del suelo hasta que se estabilice o hasta alcanzar 2 horas. Luego registrar la lectura del micrómetro. La lectura que se toma del micrómetro se relaciona con el índice de expansión, Cambio potencial de volumen (CPV) y el índice plástico.

El procedimiento normal de esta prueba es el siguiente:

²⁸ En esta investigación se presenta el procedimiento solo de los ensayos de hinchamiento ya que son los menos conocidos, los demás ensayos son más frecuentemente utilizado por ende si se desea ver su procedimiento referirse a la normas citadas Tabla N° 3.3.

Preparación de la muestra:

La muestra de suelo se seca al aire, en horno, o por medio de secadores de aire frío o caliente, pero siempre a menos de 60 °C, hasta que la muestra se pueda deshacer por medio un mazo de goma.

Una vez seca, se cuartea hasta obtener dos porciones de 1 kg aproximadamente. Una de ellas, se tamiza por la malla No.10 (2.00 mm). El ensayo se realiza con la fracción que pasa dicho tamiz. Esta muestra se prepara con una humedad en particular, esta puede ser, de acuerdo a lo siguiente:

- 1- La correspondiente al límite plástico.
- 2- La que resulte de mantener la muestra durante 48 horas en un ambiente con una humedad relativa al 100% (para ello se puede utilizar una cámara húmeda).
A este se le denomina húmedo.
- 3- La que resulte de mantener la muestra durante 48 horas en un ambiente con una humedad relativa al 50%. Se puede utilizar una cámara húmeda o dejar al aire durante 48 horas en una zona de clima seco. A este estado se le denomina seco.

La energía de compactación con la que se compacta el suelo para la obtención de la probeta, depende de la humedad con que se haya preparado la muestra. En la Tabla No 3.4, se indican los valores correspondientes a la compactación para cada caso:

Tabla No 3.4: Alternativas de compactación de la probeta.

Humedad	No de capas	No de golpes por capa con martillo de Proctor normal (T-99)	Energía por unidad de volumen
Limite plástico	1	5	T - 99
Húmedo (100 % Humedad Relativa)	3	4	½ T - 180
Seco (50% Humedad Relativa)	3	7	T - 180

FUENTE: Norma INV E-132-07.

Sin embargo, para este trabajo de graduación no se compactará la muestra, sino que se labrará directamente de una muestra inalterada de suelo, una pastilla con humedad natural. En el caso de que la muestra presente mucha humedad, se procederá a secarla a temperatura ambiente de tal manera que no se agriete, y de esta forma poder evaluar las variaciones del hinchamiento debido al cambio de humedad inicial, en el suelo.

Ensayo realizado en el laboratorio.

Procedimiento:

1. Pesar el anillo (del equipo Lambe) y tomar dimensiones de este (diámetro y altura).
2. Labrado de probeta: Se debe inspeccionar la muestra inalterada, y se ubicara un punto en la muestra donde no se presente agrietamientos, ni tenga raíces u otro defecto que produzca que la probeta se deteriore en el momento de labrarla. Para el labrado se utilizara una herramienta con filo, que permita dejar una superficie plana, con el objetivo de que esta sea la cara superior de la probeta para que el anillo se introduzca verticalmente en la muestra. debe dejar una marca del

diámetro del anillo en el suelo para que esta sirva como guía al momento de labrar, cortar hacia abajo de ésta cuidando de no dañar la probeta. Debe cortar lo más exacto posible, para que la probeta pueda llegar a tener el diámetro del anillo. (Ver Figura No 3.1a).

3. Conforme se va labrando la probeta (producto del corte) se va introduciendo el anillo. (Ver Figura No 3.1b), hasta que la probeta sobresalga del anillo en la parte superior. Esto es recomendable ya que ambas caras de la probeta deben quedar niveladas, y cuando se prepara la superficie (inicialmente) antes de comenzar a labrar, dicha superficie no queda perfectamente horizontal, lo mejor es perfeccionarla al final, cuando ya se tiene la probeta dentro del anillo.
4. Hacer un corte en la parte inferior de la probeta, teniendo el cuidado de no dañar la probeta, ni de ejercer presión sobre el anillo, ya que generaría un corte y la probeta no serviría para el ensayo. Proceder a enrasar y nivelar en ambas caras de la probeta, esta debe tener la misma altura del anillo y la cara superior e inferior deben quedar lo más planas posible (sin imperfecciones)²⁹.
5. Pesar el anillo con la probeta (este será el peso húmedo inicial) y se procede a montar en el equipo de ensayo lambe. (Ver Figura No 3.1c).

²⁹ Si en este proceso queda alguna pequeña cavidad, se rellena con suelo procedente del enrasado, tomando toda clase de precauciones para que no se altere el resto de la probeta.

Figura No 3.1: Proceso de labrado de muestras: a) Labrado de muestra; b) Inserción de anillo en la muestra labrada; c) Toma de peso de anillo más probeta de suelo.



a)



b)



c)

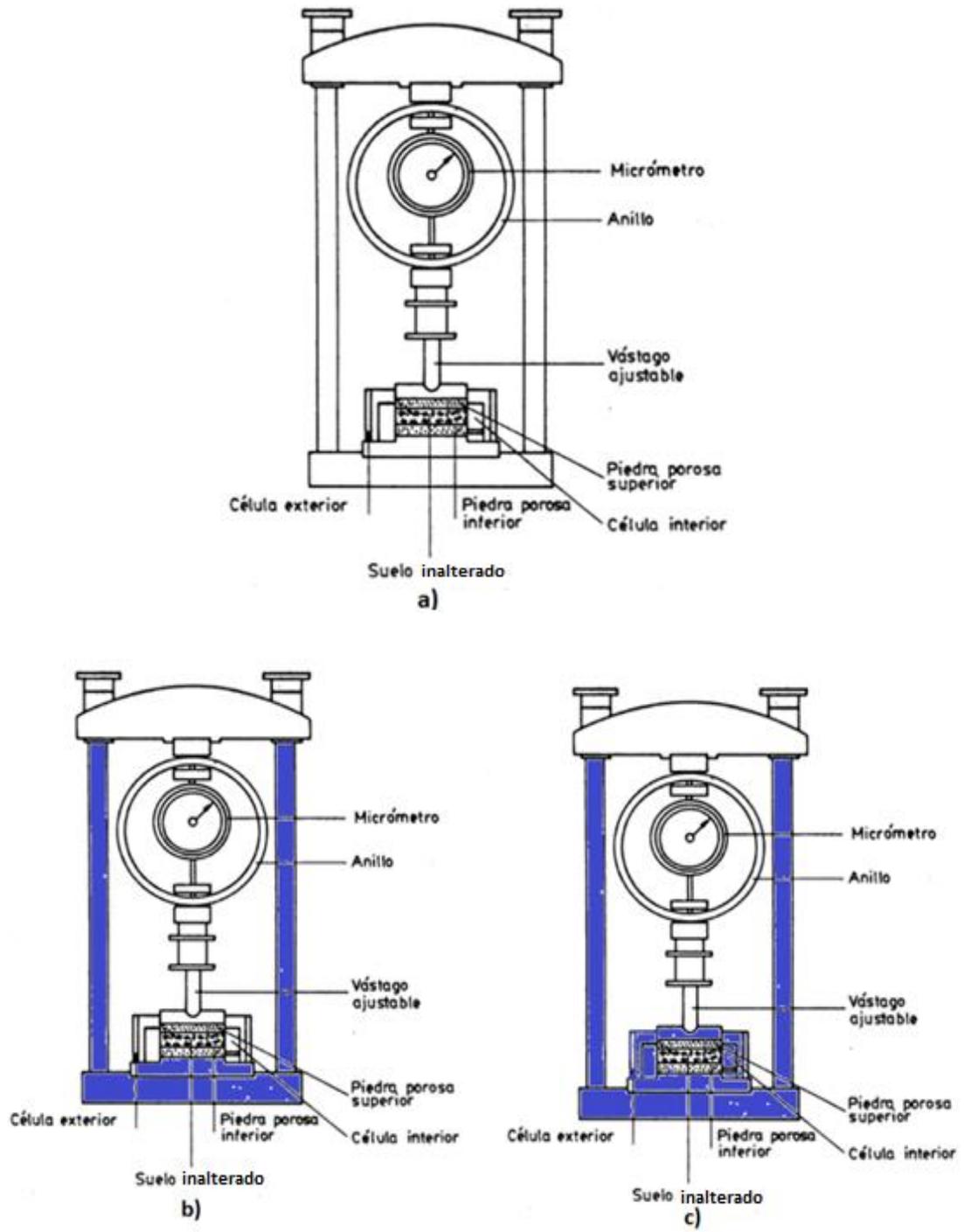
FUENTE: De los autores. Fotografía tomada por Br. Víctor Calero en Laboratorio de Suelos y Materiales "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina". Junio 2015.

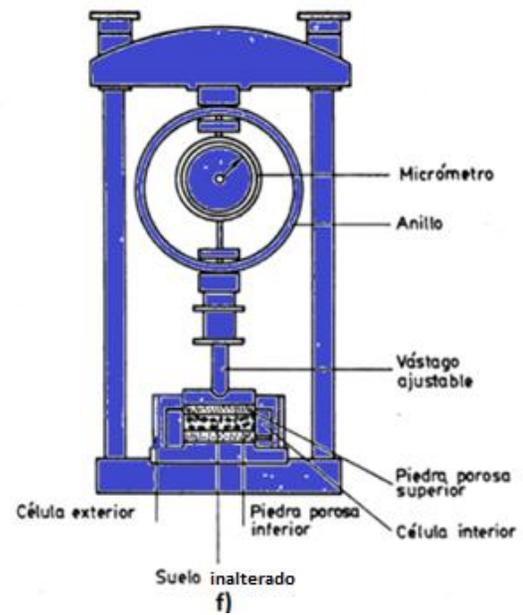
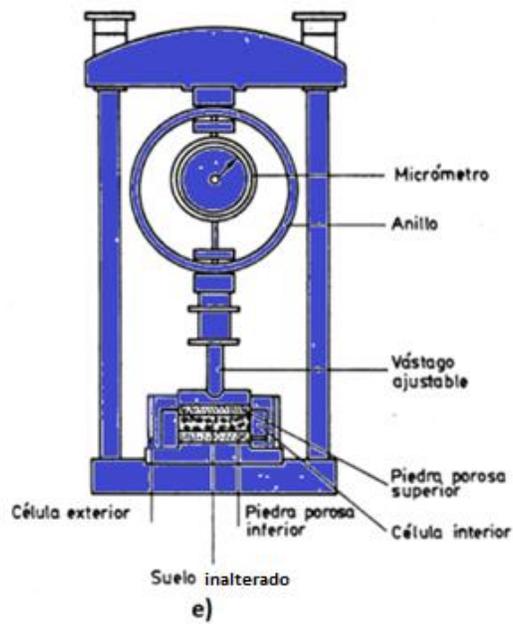
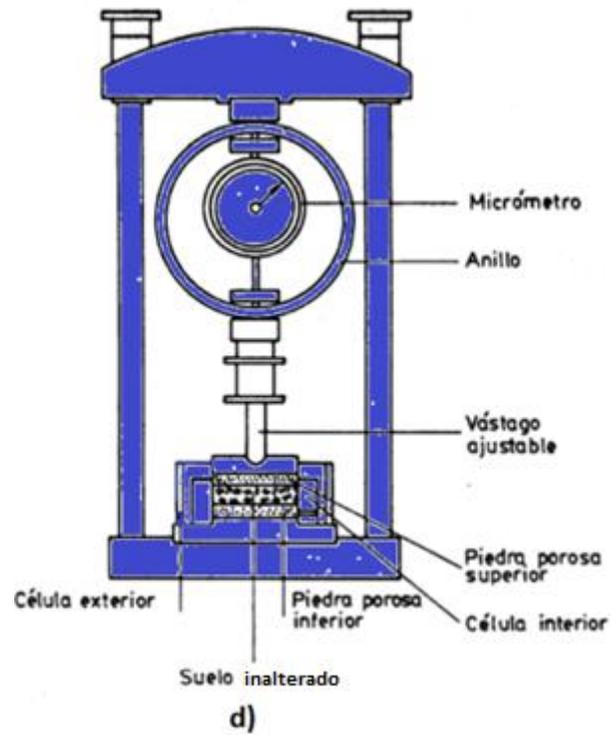
6. Para el montaje del equipo lambe, se debe contar con una superficie nivelada y que no se vea afectada por vibración, golpes u otros, que generen movimiento al equipo. (ver Figura No 3.2a-equipos Lambe).

Primero se coloca su base (esta posee un marco metálico) –ver Figura No 3.2b- luego se coloca el disco poroso inferior junto con el anillo base, asegurando un buen contacto entre dichos elementos. A continuación, se sitúa el anillo con la muestra, debiendo asegurar el ajuste de ambos anillos por medio de los tornillos correspondientes. Colocar sobre la probeta, el disco poroso superior y ajustar la placa que hace contacto con el vástago (esta posee una cavidad esférica en la parte superior). Por último colocar el anillo plástico haciéndolo girar para ajustarlo a la base y evitar que haya fuga de agua (ver Figura No 3.2c).

7. Colocar en su posición el puente superior del marco metálico con el anillo de carga sin ajustar las tuercas. (ver Figura No 3.2d).
8. Ajustar el vástago del anillo de carga sobre la superficie de la placa con cavidad esférica. Esto se hace fijando la contratuerca de la que va provisto el vástago, de manera que no existe movimiento lateral entre el vástago y la placa. (ver Figura No 3.2e).
9. Por último se ajustan las tuercas ubicadas en la parte superior del marco, para evitar el movimiento vertical. Se debe verificar que se dé un buen contacto entre probeta, placa y vástago, para proceder al ajuste las tuercas. (ver Figura No 3.2f).

Figura No 3.2: Ilustración del montaje del equipo Lambe (los elementos de color azul son los que se van colocando en el procedimiento de ensayo).





FUENTE: De los autores.

10. Saturar la muestra y tomar lecturas. Anote la fecha y hora de inicio de la realización del ensayo y con el cronómetro en cero, inunde el espécimen. Tomar lecturas del anillo de carga a diferentes tiempos: 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120 minutos. El procedimiento de ensayo Lambe recomienda dejar expandir la probeta hasta que estabilice o un máximo de 2 horas. Para nuestro caso se dejó de tomar lecturas hasta que estabilizara y no presentara más deformación.
11. Posteriormente se realiza el proceso inverso, el desmontaje del equipo Lambe.
12. Tomar el peso de la probeta húmeda más anillo (este será el peso húmedo final).
13. Utilizar una tara pesada para introducir la probeta y anillo en el horno, se coloca la probeta húmeda y anillo en esta, y se toma su peso, esto con el fin de que la probeta al reducir su volumen una vez seque, no pierda material.
14. Introducir la tara en el horno y se mantiene a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta obtener masa constante.
15. Sacar del horno y tomar el peso de la probeta seca más anillo más tara (para obtener el peso seco de la probeta).

Cálculos:

1. Calcular el peso húmedo inicial (M_{hi}), peso húmedo final (M_{hf}) y peso seco (M_s) de la probeta:

$$\text{Peso húmedo inicial } (M_{hi}) = [\text{Peso de anillo} + \text{probeta } (h)] - \text{peso de anillo}$$

Peso húmedo final(Mhf)

$$= [\text{Peso de anillo} + \text{probeta}(\text{sat}) + \text{charola}]$$

$$- [\text{Peso de anillo} + \text{probeta}(s) + \text{charola}]$$

Peso seco (Ms) = [Peso de anillo + probeta(s) + charola] – Peso de anillo

$$- \text{peso de charola}$$

2. Calcular humedad inicial y final:

$$\text{Humedad (i)} = \frac{M_{hi}}{M_s} \times 100\%$$

$$\text{Humedad (f)} = \frac{M_{hf}}{M_s} \times 100\%$$

3. Calcular el área y volumen de la muestra (inicial y final) relaciones de vacíos y porcentaje de saturación.

La deformación que experimente la probeta se obtiene de las lecturas del dial, cada unidad equivale a 0.0025 mm, así para la deformación de la probeta tenemos:

$$\text{Deformación } (\Delta H) = N * 0.0025, \text{ mm}$$

$$\text{Área de la probeta} = \frac{\pi \varphi^2}{4}, \text{ cm}^2$$

Dónde:

φ : diámetro del anillo

- Cálculo de volumen inicial y final de la probeta

*Volumen inicial de la probeta = Área de la probeta * Hi, cm³*

*Volumen final de la probeta = Área de la probeta * Hf, cm³*

Dónde:

Hi: altura inicial de la probeta

Hf: altura final de la probeta

$$Hf = Hi + \Delta H$$

Dónde:

Hf: altura final de la probeta (mm)

Hi: altura inicial de la probeta

ΔH : deformación

- Cálculo de volumen de los sólidos

$$V_s = \frac{M_s}{G_s * \rho_w}$$

Dónde:

V_s: volumen de sólidos (cm³)

M_s: masa de los sólidos (peso seco en gramos)

G_s: Gravedad específica

ρ_w : densidad del agua (g/cm³)

- Cálculo de altura de los sólidos

$$H_s = \frac{V_s}{A}$$

Dónde:

H_s: Altura de los sólidos

V_s: volumen de sólidos

A: área de la probeta

- Cálculo de relación de vacíos inicial y final

$$e_i = \frac{H_i - H_s}{H_s}$$

Dónde:

e_i: Relación de vacíos inicial

H_i: altura inicial de la probeta

H_s: Altura de los sólidos

$$e_f = \frac{H_f - H_s}{H_s}$$

Dónde:

e_f: Relación de vacíos final

H_f: altura final de la probeta

H_s: Altura de los sólidos

- Cálculo de grado de saturación inicial y final

$$S_i = \frac{(M_{hi} - M_s)}{A * \rho_w * (H_i - H_s)}$$

Dónde:

S_i: saturación inicial, %

M_{hi}: Peso húmedo inicial

M_s: masa de los sólidos (peso seco)

A: área de la probeta

ρ_w: densidad del agua

H_i: altura inicial de la probeta

H_s: Altura de los sólidos

$$S_f = \frac{(Mh_f - Ms)}{A * \rho_w * (H_f - H_s)}$$

Dónde:

S_f : saturación final, %

Mh_f : Peso húmedo final

M_s : masa de los sólidos (peso seco)

A : área de la probeta

ρ_w : densidad del agua

H_f : altura final de la probeta

H_s : Altura de los sólidos

4. Partiendo de la lectura del micrómetro y haciendo uso de la Tabla No 3.5, del procedimiento Lambe, se puede encontrar la correlación entre Índice de expansión, Cambio Potencial de volumen (sus siglas en ingles PVC) e índice de plasticidad.

Tabla No 3.5: Índice de expansión mediante el método Lambe.

Lectura del micrómetro	Índice de expansión (lb/pie ²)	PVC	Índice de plasticidad (%)
5	775	0.8	8.5
6	925	1.0	9.5
7	1075	1.2	10.7
8	1250	1.4	11.7
9	1375	1.6	12.7
10	1550	1.8	13.8
10.8	1675	2.0	14.6
11	1700	2.0	14.8
12	1875	2.2	15.8

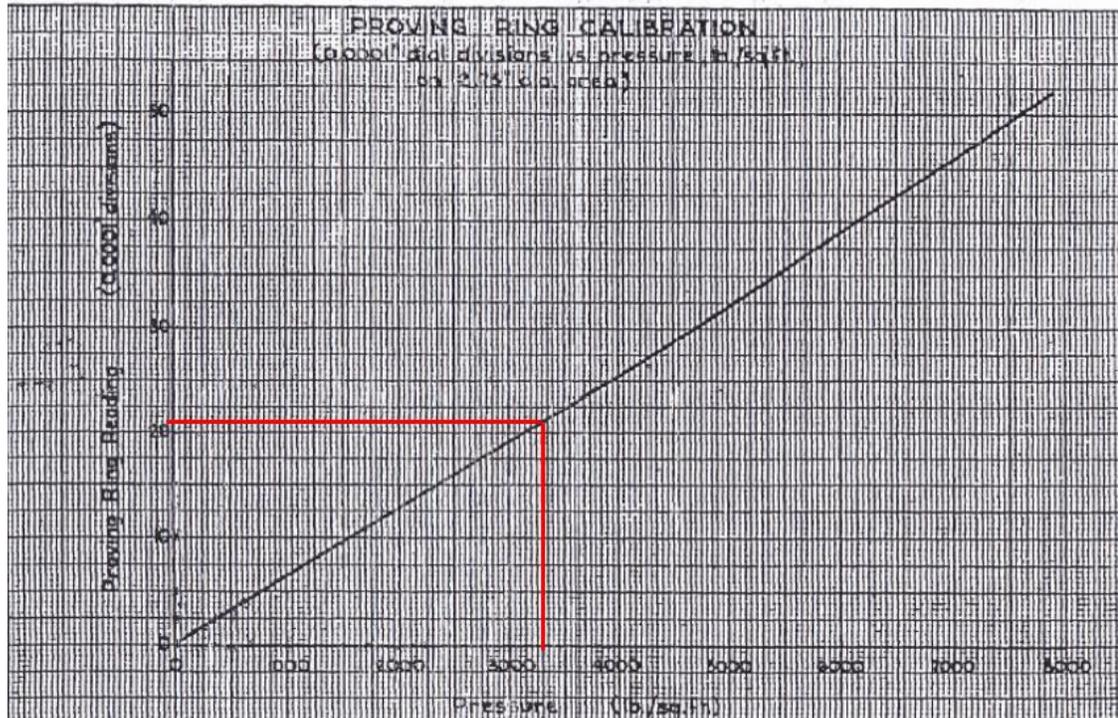
13	2025	2.4	17.0
14	2175	2.65	18.0
15	2350	2.85	19.0
16	2500	3.05	20.0
17	2675	3.3	21.5
18	2800	3.45	22.5
19	2975	3.7	23.8
20	3150	3.9	25.0
20.3	3200	4.0	25.5
21	3300	4.1	26.0
22	3450	4.3	27.5
23	3600	4.5	28.5
24	3775	4.75	29.8
25	3925	4.95	30.8
26	4075	5.15	31.8
27	4225	5.4	33.0
28	4375	5.55	34.0
29	4525	5.75	35.3
30	4700	5.95	37.0
30.2	4725	6.00	37.1
31	4850	6.2	38.0
32	4975	6.35	39.0
33	5125	6.5	40.4
34	5275	6.7	41.7
35	5425	6.9	43.4
36	5575	7.1	44.2
37	5725	7.25	45.5
38	5850	7.4	46.6
39	6000	7.5	48.0
40	6150	7.65	49.5
40.5	6225	7.7	50.0

FUENTE: "FHA soil PVC Meter Publicación", Administración Federal de vivienda (FHA), Publicación No. 701.

Así por ejemplo si la lectura del micrómetro es 21, de acuerdo a la tabla se tiene un Índice de expansión de 3300 Lb/pie², un valor de PVC de 4.1 y un Índice de plasticidad de 26.0 %.

5. Estos valores también se pueden obtener de los gráficos No 3.1, No 3.2 y No 3.3.

Grafico No 3.1: Lectura del micrómetro vs presión (Lb/pie²).

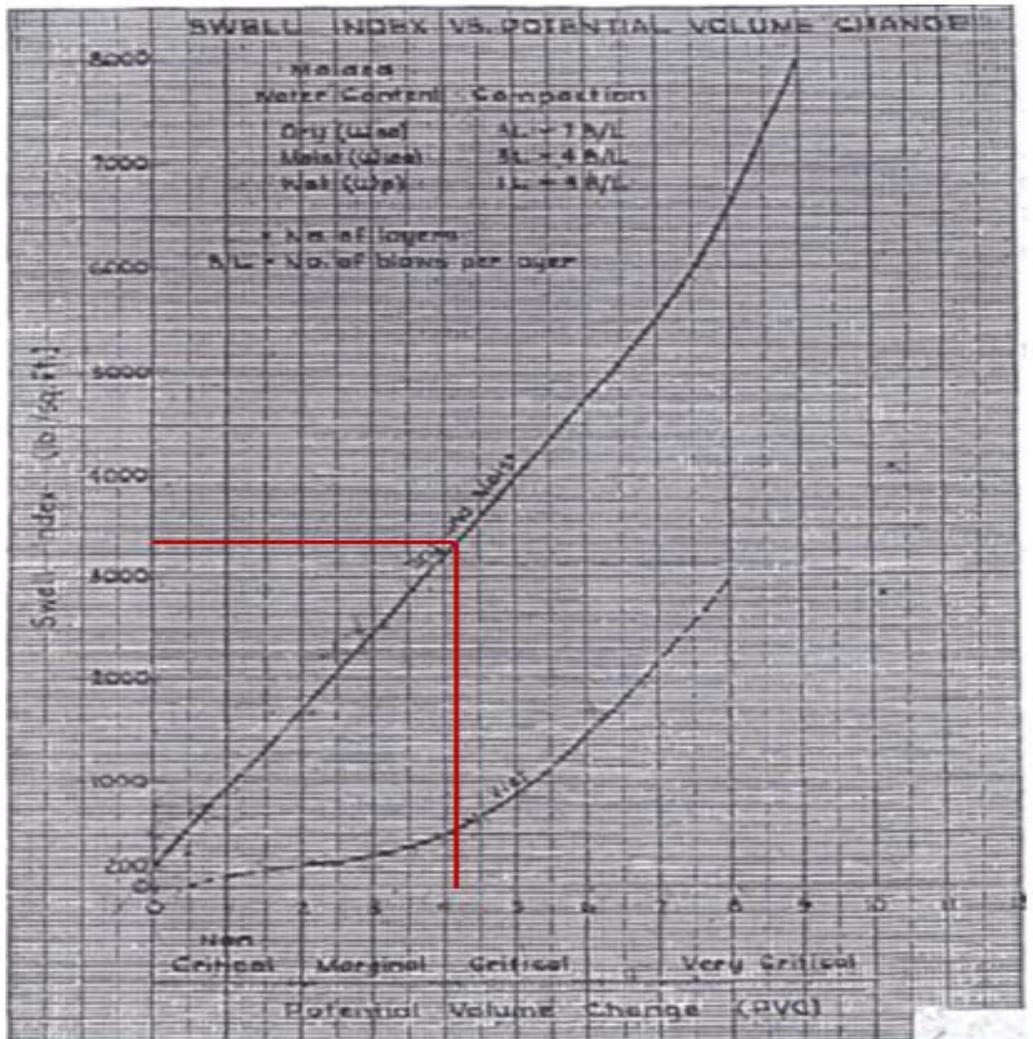


FUENTE: "FHA soil PVC Meter Publicación", Administración Federal de vivienda (FHA), Publicación No. 701.

El Grafico No 3.1, presenta las lecturas marcadas por el micrómetro (eje Y) y la presión que ejerce la probeta (eje X). Partiendo de la lectura que se toma del micrómetro en el momento de ensayo, se debe intersectar la recta del gráfico, y proyectar verticalmente hasta interceptar el eje horizontal, el valor intersectado será el valor de la presión de la probeta. Esta presión representa un Índice de expansión en unidades de Lb/pie², y es el valor que aparece en la columna Índice de expansión (lb/pie²) de la Tabla No 3.5. Tomando el mismo ejemplo, el valor de 21 en el eje Y da como valor de 3300 (aproximadamente).

El Gráfico No 3.2, presenta el Índice expansión con el Cambio potencial de volumen (PVC).

Gráfico No 3.2: Índice de expansión vs Cambio potencial de volumen.



FUENTE: "FHA soil PVC Meter Publicación", Administración Federal de vivienda (FHA), Publicación No. 701.

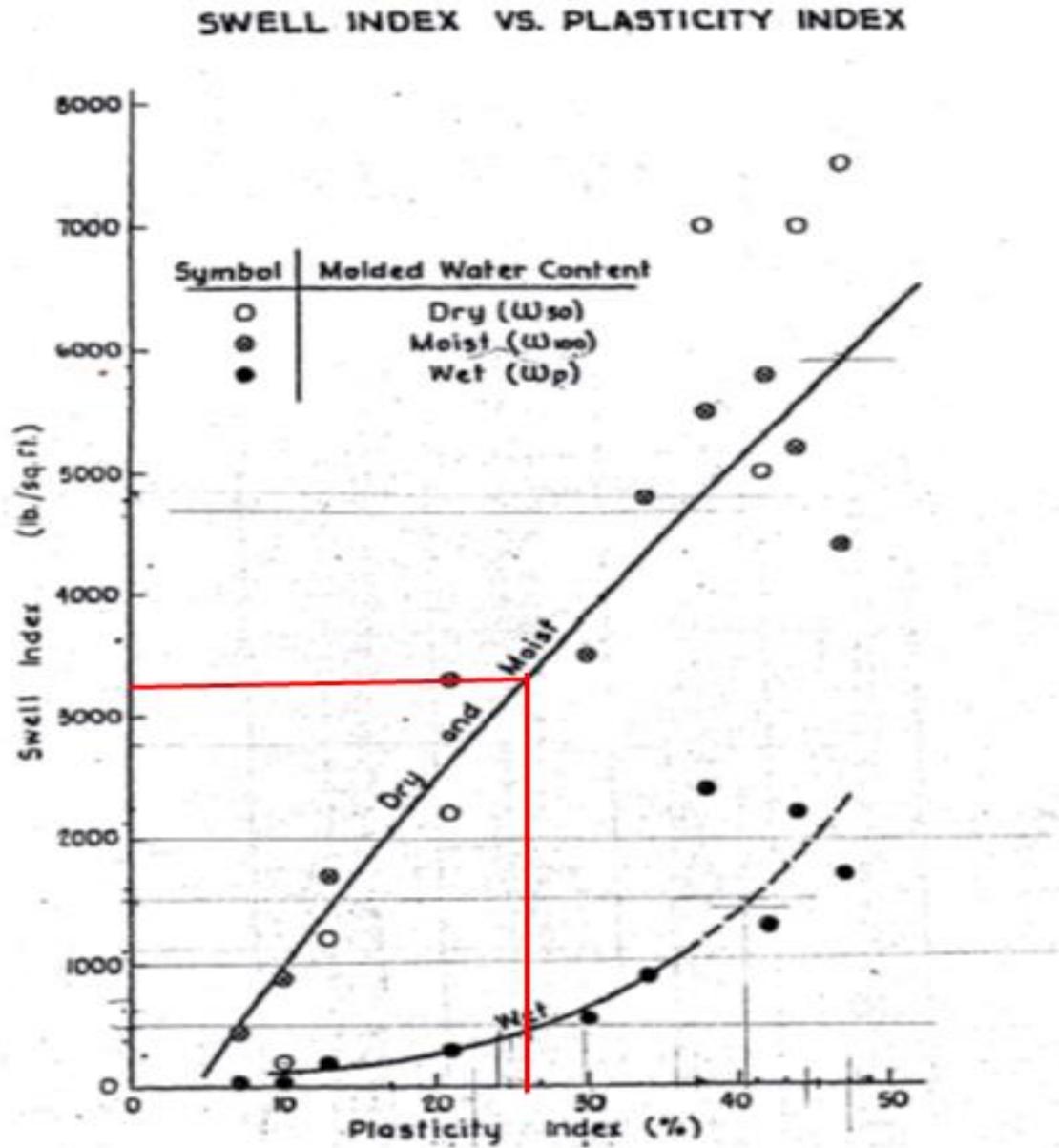
En el Gráfico No 3.2 tenemos dos curvas, la inferior representa la condición de estado equivalente a una humedad de límite plástico; y la superior que representa la

condición en estado seco o húmedo de la probeta (como se describe en el apartado de preparación de la muestra).

Siguiendo el ejemplo, si se tiene un valor de índice de expansión de 3300 Lb/pie² (en el eje Y) e intersectando la curva superior, correspondiente al estado seco, se obtiene un valor de PVC igual a 4.1 (aproximadamente).

Por último, se tiene la relación de índice de expansión vs índice de plasticidad (Gráfico No 3.3). Al igual que el Gráfico No 3.2, este usa dos curvas, que representan los 3 estados de humedad de la probeta.

Grafico No 3.3: Índice de expansión vs Índice plástico.



FUENTE: "FHA soil PVC Meter Publicación", Administración Federal de vivienda (FHA), Publicación No. 701.

Siguiendo el ejemplo, si se tiene un valor de 3300 Lb/pie², e intersectando la curva superior, equivalente al estado seco, y proyectar en el eje horizontal, se obtiene un valor de Índice plástico de 26 (aproximadamente).

3.3.3.2 HINCHAMIENTO LIBRE (Retomado de UNE 103 601 / Expansión Libre- Retomado de ensayo de Presión de hinchamiento ASTM D-4546).

Se labra una pastilla de suelo (muestra inalterada) en el anillo de consolidación, luego se coloca en el consolidómetro, se ajusta junto con el vástago y el deformímetro, y se coloca la lectura en cero y se satura la muestra. Las lecturas se toman con la siguiente secuencia de tiempo: 6, 15, 30 s, 1, 2, 4, 8, 15, 30 min, 1, 2, 4, 8 y 24 h. Si la muestra se sigue expandiendo o retrayendo, se le deja más tiempo en el consolidómetro hasta que llegue al equilibrio³⁰.

Preparación de la muestra:

1. Pesar el anillo de consolidación.
2. Tomar cuatro medidas de la altura del anillo de consolidación.
3. Medir cuatro veces el diámetro del anillo de consolidación empleando un vernier.
4. Labrar la probeta: para ello se toma la muestra inalterada extraída de campo y se debe asegurar que no esté agrietada, tenga raíces u otro defecto que produzca que la probeta se deteriore en el momento de labrarla.

Se utiliza un cuchillo u otra herramienta que permita el corte de la muestra. Se deja una superficie plana, con el objetivo de que esta sea la cara superior de la probeta y

³⁰ El procedimiento que se llevara a cabo es similar al procedimiento de ensayo Lambe.

para que el anillo se introduzca verticalmente. Se marca sobre la superficie preparada un círculo utilizando el anillo, ya que la probeta debe tener el mismo diámetro del anillo. Se labra verticalmente siguiendo la marca circular y con el cuidado de no dañar la probeta. Se introduce en la probeta poco a poco, cuando sea necesario se le deben dar golpecitos con un material que no dañe el anillo, y que el anillo se introduzca verticalmente, sin inclinación, esto para evitar que se fracture la probeta. La altura de la probeta antes de cortarlo de la muestra inalterada debe ser mayor a la del anillo, luego cortar de la parte inferior teniendo el cuidado de no dañarla.

5. Enrasar y nivelar ambas caras procurando no dejar imperfecciones. En caso hayan **pequeños orificios** se puede rellenar con material del que se obtuvo del enrasado.

Procedimiento:

1. Labrada la muestra, pesar el anillo más probeta (para obtener peso húmedo inicial), y se registra su valor como peso húmedo más anillo.
2. Previo al montaje del consolidómetro en el banco de consolidación, se coloca en el consolidómetro los siguientes elementos: la pastilla porosa inferior, luego papel filtro, luego el anillo con la probeta, sobre este papel filtro nuevamente, la pastilla porosa, luego se ajustan con las pequeñas tuercas del consolidómetro.

3. Sobre la piedra porosa superior se coloca la pieza que hará contacto con el vástago³¹. Luego, se coloca el vástago sobre esta y sobre el vástago el deformímetro. Se debe asegurar que los elementos del deformímetro y el vástago no presenten ningún movimiento entre ellos, con el fin de que las lecturas de deformación sean lo más exactas posible.
4. Colocar el deformímetro en cero³² y para el marcador de unidades enteras en una lectura media³³.
5. Una vez se tenga todo el equipo ajustado, colocar el cronómetro en cero y saturar la probeta. Las lecturas comenzarán a tomarse una vez el agua haga contacto con la probeta, en intervalos de tiempo de 6, 15, 30 segundos, 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos, y 1, 2, 4, 8, 24 horas³⁴. Dependiendo del tipo de suelo que se tenga, este tiempo puede extenderse.
6. Tomar la lectura final del deformímetro cuando se llega al equilibrio, es decir cuando la lectura del deformímetro no cambia. Se debe colocar la hora a la que se tomó dicha lectura.

³¹ Esta tiene una superficie semiesférica en su centro para que encaje con el vástago.

³² El deformímetro utilizado en la realización de este ensayo para esta investigación fue de una precisión de 0.0025mm.

³³ Según la norma se le debe aplicar una presión de contacto de 1 Kpa (0.01 kg/cm²) a la muestra cuando se coloca sobre el consolidómetro. Sin embargo, para esta investigación se omitirá la aplicación de esa pre-carga a la pastilla de suelo, y se toma una lectura inicial de entre 9 y 15, según el tipo de suelo.

³⁴ La toma de lecturas se realizó con los mismos intervalos de tiempo que en el ensayo Lambe.

7. Hacer el proceso inverso de montaje del equipo de consolidación, teniendo el cuidado para quitar el deformímetro, ya que es un instrumento muy sensible. Y posteriormente se desajusta el vástago y el consolidómetro.
8. Tomar el peso de probeta húmeda más anillo (para obtener peso húmedo final).
9. Utilizar una tara pesada para introducir la probeta y anillo en el horno, esto con el fin de que la probeta al reducir su volumen una vez seque, no pierda material. Se coloca la probeta húmeda y anillo en la tara, se toma su peso y se introducen el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C.
10. Cuando se tenga masa constante, se toma el peso seco de la probeta más anillo más tara.
11. Luego debemos calcular las humedades inicial y final.

Cálculos:

1. Calcular el peso húmedo inicial (M_{hi}), peso húmedo final (M_{hf}) y peso seco (M_s) de la probeta:

$$\text{Peso húmedo inicial } (M_{hi}) = [\text{Peso de anillo} + \text{probeta } (h)] - \text{peso de anillo}$$

$$\text{Peso húmedo final } (M_{hf})$$

$$= [\text{Peso de anillo} + \text{probeta}(sat) + \text{charola}]$$

$$- [\text{Peso de anillo} + \text{probeta}(s) + \text{charola}]$$

$$\text{Peso seco } (M_s) = [\text{Peso de anillo} + \text{probeta}(s) + \text{charola}] - \text{Peso de anillo}$$

$$- \text{peso de charola}$$

2. Calcular humedad inicial y final:

$$\text{Humedad (i)} = \frac{M_{hi}}{M_s} \times 100\%$$

$$\text{Humedad (f)} = \frac{M_{hf}}{M_s} \times 100\%$$

3. Calcular el hinchamiento, área y volumen de la muestra (inicial y final), relaciones de vacíos y porcentaje de saturación.

El Hinchamiento será la deformación de la probeta expresada en milímetros, y/o deformación de la probeta en función de la altura inicial multiplicada por 100 para ser expresada en porcentaje.

$$\text{Hinchamiento } (\Delta H) = N * 0.0025, \text{ mm}$$

$$\% \text{ de Hinchamiento} = \frac{\Delta H}{H_i} * 100, \%$$

Dónde:

$$\text{Hinchamiento} = \Delta H, \text{ mm}$$

H_i : altura inicial de la probeta

$$\text{Área de la probeta} = \frac{\pi \varphi^2}{4}, \text{ cm}^2$$

Dónde:

φ : diámetro del anillo

- Cálculo de volumen inicial y final de la probeta

$$\text{Volumen inicial de la probeta} = \text{Área de la probeta} * H_i, \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen final de la probeta} = \text{Área de la probeta} * H_f, \text{ cm}^3$$

Dónde:

H_i : altura inicial de la probeta

H_f : altura final de la probeta

$$H_f = H_i + \Delta H$$

Dónde:

H_f : altura final de la probeta (mm)

H_i : altura inicial de la probeta

ΔH : hinchamiento

➤ Cálculo de volumen de los sólidos

$$V_S = \frac{M_s}{G_S \cdot \rho_w}$$

Dónde:

V_S : volumen de sólidos (cm^3)

M_s : masa de los sólidos (peso seco en gramos)

G_S : Gravedad específica

ρ_w : densidad del agua (g/cm^3)

➤ Cálculo de altura de sólidos

$$H_S = \frac{V_S}{A}$$

Dónde:

H_S : Altura de los sólidos

V_S : volumen de sólidos

A : área de la probeta

- Cálculo de relación de vacíos inicial y final

$$e_i = \frac{H_i - H_s}{H_s}$$

Dónde:

e_i : Relación de vacíos inicial

H_i : altura inicial de la probeta

H_s : Altura de los sólidos

$$e_f = \frac{H_f - H_s}{H_s}$$

Dónde:

e_f : Relación de vacíos final

H_f : altura final de la probeta

H_s : Altura de los sólidos

- Cálculo de grado de saturación inicial y final

$$S_i = \frac{(M_{hi} - M_s)}{A * \rho_w * (H_i - H_s)}$$

Dónde:

S_i : saturación inicial, %

M_{hi} : Peso húmedo inicial

M_s : masa de los sólidos (peso seco)

A : área de la probeta

ρ_w : densidad del agua

H_i : altura inicial de la probeta

H_s : Altura de los sólidos

$$S_f = \frac{(Mh_f - Ms)}{A * \rho_w * (H_f - H_s)}$$

Dónde:

S_f : saturación final, %

Mh_f : Peso húmedo final

M_s : masa de los sólidos (peso seco)

A : área de la probeta

ρ_w : densidad del agua

H_f : altura final de la probeta

H_s : Altura de los sólidos

3.3.3.3 PRESIÓN DE HINCHAMIENTO (Retomado de UNE 103 602 / Ensayo para calcular la presión de hinchamiento de un suelo en edómetro ASTM D-4546).

Se utiliza una muestra inalterada utilizando un anillo de consolidación, luego se coloca en el consolidómetro, se ajusta junto con el vástago y el deformímetro, se coloca la lectura en cero y se le coloca una precarga de 0.1 kg/cm² por 5 minutos, sin colocar agua a la muestra. Luego se inunda de agua la muestra y no se deja que se expanda ni se comprima más de 0.05mm.

Preparación de la muestra:

1. Se toman las dimensiones del anillo como su diámetro y su altura, además de su peso.

2. Labrar una pastilla utilizando el anillo del consolidómetro en una muestra inalterada de suelo, a modo de formar una pastilla que quede ajustada en el anillo para evitar que se deforme hacia los lados.

Procedimiento:

1. Pesar el anillo + pastilla y se registra su valor como peso húmedo más anillo.
2. El montaje sobre el consolidómetro se hace colocando primero la piedra porosa inferior, seguidamente de papel filtro, sobre este se coloca el anillo con la muestra, se coloca otro papel filtro y la piedra porosa superior.
3. Colocar el consolidómetro en el banco de consolidación después se ajusta el brazo verificando que este horizontalmente y en equilibrio. Posteriormente sobre la piedra porosa superior se coloca la pieza que hará contacto con el vástago³⁵. Luego, se coloca el vástago sobre esta y sobre el vástago el deformímetro. Se debe asegurar cada uno de estos, ya que no debe tener movimiento, con el fin de que las lecturas sean exactas.
4. Se coloca el deformímetro en cero y para el marcador de unidades enteras en una lectura media.
5. Se coloca una precarga de 0.1 Kg/cm^2 por 5 minutos antes de saturar la muestra, pasado ese tiempo se toma la lectura en el deformímetro y se le añade agua a la muestra para que se sature.

³⁵ Esta tiene una superficie semiesférica en su centro para que encaje con el vástago.

6. Cuando la pastilla comience a saturarse, empezará a hincharse; para evitar eso se debe de cargar la muestra a modo de que su expansión no sobrepase un valor de deformación máximo que corresponde a 0.05mm. A medida se va expandiendo el suelo, se carga la pastilla para que no se deforme más de 0.05mm, haciendo que la pastilla tenga hinchamiento nulo.
7. Dejar que se equilibre la pastilla en el consolidómetro, si se hincha un poco se le coloca más carga, si se ha asentado entonces, se toma el valor de la carga y del deformímetro.
8. Luego, se realizan ciclos de descarga para obtener la recuperación que puede llegar a tener la pastilla después de haber sido cargada evitando que se deforme (hinchamiento nulo).
9. Posteriormente después del ciclo de descarga se desmonta la pastilla, se toma el peso de una tara, se coloca la probeta húmeda y anillo en la tara, se toma su peso y se introducen el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C.
10. Cuando tenga masa constante, se toma el peso seco de la probeta más anillo más tara.

Cálculos:

1. Calcular la presión de hinchamiento.

El valor de la presión de hinchamiento de P_h se obtiene del grafico entre hinchamiento en % y presión en kg/cm^2 (ver Figura No 3.3), donde la presión se obtiene dividiendo la carga aplicada en el momento del equilibrio.

$$P_h = \frac{Q}{S}$$

Dónde:

Q: carga aplicada en el momento de equilibrio en kg

S: área de la probeta en cm²

Y el hinchamiento (%) en cada etapa de descarga se calcula al final de cada etapa de la siguiente manera:

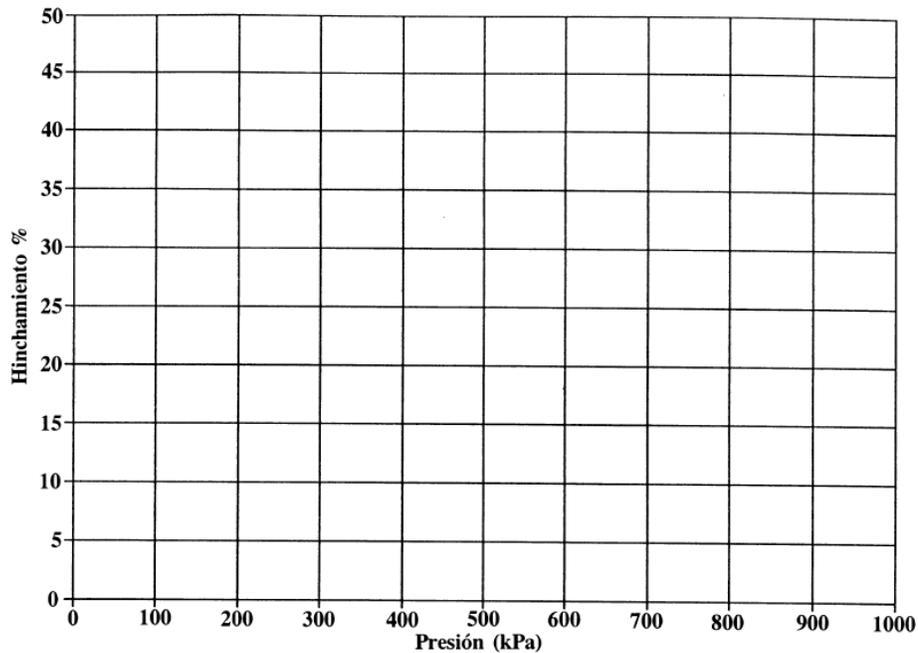
$$\Delta L = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100$$

Dónde:

Δh : es el cambio de altura que experimenta la probeta en cada etapa de descarga

h_0 : es la altura del anillo, en mm, que coincide con la altura inicial de la probeta

Figura No 3.3: Gráfico % de hinchamiento vs presión.



FUENTE: UNE 103 602 “Ensayo para calcular la presión de hinchamiento de un suelo en edómetro”.

Donde la curva de descarga en el gráfico presentado en la Figura No 3.3 toca el valor de cero presiones en eje abscisas esa es considerada como la presión de hinchamiento.

2. Calcular el peso húmedo inicial (M_{hi}), peso húmedo final (M_{hf}) y peso seco (M_s) de la probeta:

$$\text{Peso húmedo inicial } (M_{hi}) = [\text{Peso de anillo} + \text{probeta } (h)] - \text{peso de anillo}$$

$$\begin{aligned} \text{Peso húmedo final } (M_{hf}) \\ &= [\text{Peso de anillo} + \text{probeta}(\text{sat}) + \text{charola}] \\ &\quad - [\text{Peso de anillo} + \text{probeta}(s) + \text{charola}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Peso seco } (M_s) &= [\text{Peso de anillo} + \text{probeta}(s) + \text{charola}] - \text{Peso de anillo} \\ &\quad - \text{peso de charola} \end{aligned}$$

3. Calcular humedad inicial y final:

$$\text{Humedad } (i) = \frac{M_{hi}}{M_s} \times 100\%$$

$$\text{Humedad } (f) = \frac{M_{hf}}{M_s} \times 100\%$$

4. Calcular el área y volumen de la muestra (inicial y final) relaciones de vacíos y porcentaje de saturación.

$$\text{Área de la probeta} = \frac{\pi \varphi^2}{4}, \text{ cm}^2$$

Dónde:

φ : diámetro del anillo

- Cálculo de volumen inicial y final de la probeta

$$\text{Volumen inicial de la probeta} = \text{Área de la probeta} * H_i, \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen final de la probeta} = \text{Área de la probeta} * H_f, \text{ cm}^3$$

Dónde:

H_i: altura inicial de la probeta

H_f: altura final de la probeta

➤ Cálculo de altura final de la probeta

Deformacion (ΔH) = $N * 0.0025$, mm

$H_f = H_i + \Delta H$

Dónde:

H_f: altura final de la probeta (mm)

H_i: altura inicial de la probeta

ΔH : deformación

➤ Cálculo de volumen de los sólidos

$$V_s = \frac{M_s}{G_s * \rho_w}$$

Dónde:

V_s: volumen de sólidos (cm³)

M_s: masa de los sólidos (peso seco en gramos)

G_s: Gravedad específica

ρ_w: densidad del agua (g/cm³)

➤ Cálculo de altura de los sólidos

$$H_s = \frac{V_s}{A}$$

Dónde:

H_s: Altura de los sólidos

V_s: volumen de sólidos

A: área de la probeta

- Cálculo de relación de vacíos inicial y final

$$e_i = \frac{H_i - H_s}{H_s}$$

Dónde:

e_i: Relación de vacíos inicial

H_i: altura inicial de la probeta

H_s: Altura de los sólidos

$$e_f = \frac{H_f - H_s}{H_s}$$

Dónde:

e_f: Relación de vacíos final

H_f: altura final de la probeta

H_s: Altura de los sólidos

- Cálculo de grado de saturación inicial y final

$$S_i = \frac{(M_{hi} - M_s)}{A * \rho_w * (H_i - H_s)}$$

Dónde:

S_i: saturación inicial, %

M_{hi}: Peso humedo inicial

M_s: masa de los sólidos (peso seco)

A: área de la probeta

ρ_w: densidad del agua

H_i: altura inicial de la probeta

H_s: Altura de los sólidos

$$S_f = \frac{(Mh_f - Ms)}{A * \rho_w * (H_f - H_s)}$$

Dónde:

S_f: saturacion final, %

Mh_f: Peso humedo final

Ms: masa de los solidos (peso seco)

A: area de la probeta

ρ_w: densidad del agua

H_f: altura final de la probeta

H_s: Altura de los solidos

CAPITULO 4:

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE MUESTREO PRELIMINAR.

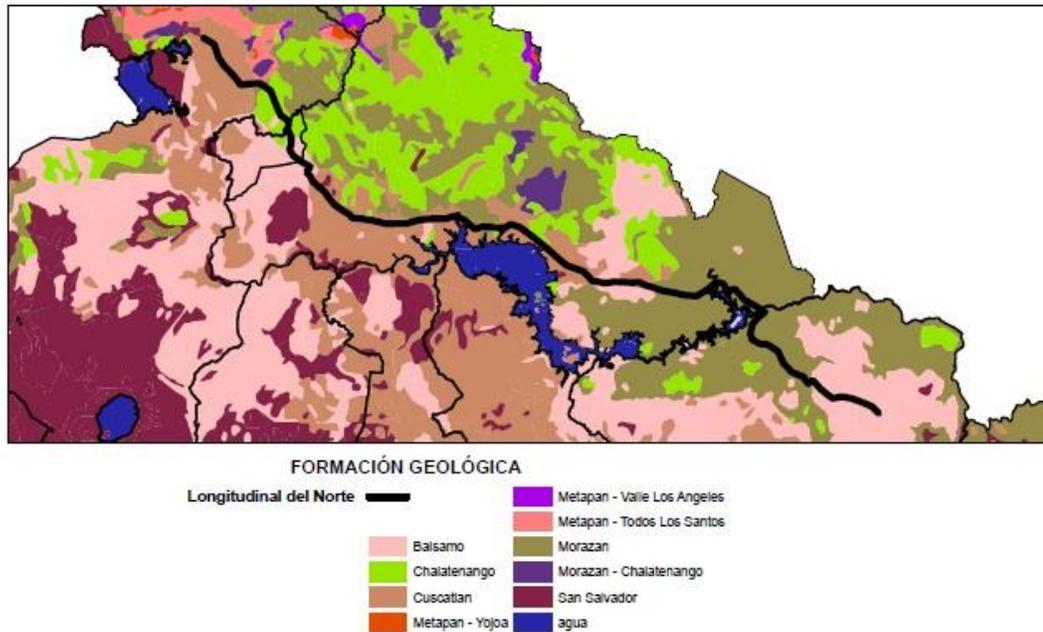
4.1.1 Obtención de información bibliográfica.

Para emprender la etapa de muestreo en campo fue necesario documentarse acerca de la geología de la zona donde está ubicado el tramo en estudio comprendido entre Metapán (Santa Ana) y Sensuntepeque (Cabañas), en la Carretera Longitudinal del Norte. Con este fin fue necesario apoyarnos del mapa Geológico, donde se describen las formaciones geológicas y las unidades presentes en el área, y con esto tener una idea del tipo de roca que han dado origen a los suelos en el tramo en estudio.

En la zona de estudio las formaciones presentes a investigar son: Chalatenango, Morazán, Rocas intrusivas, Bálsamo y Cuscatlán. (Ver Figura No 4.1).

Figura No 4.1: Sección de mapa geológico donde se ubica el tramo en estudio.

FORMACIÓN GEOLÓGICA



FUENTE: Captura de imagen tomada de programa ArcGIS.

De acuerdo al mapa geológico de El Salvador, las formaciones geológicas están compuestas de 26 unidades litológicas, por lo que, los suelos pueden tener un origen geológico diferente.

A continuación, se define que unidades litológicas conforman las formaciones antes citadas³⁶:

- ✓ **Formación Chalatenango (ch):** se divide en dos miembros ch1 y ch2, Constituida por rocas volcánicas ácidas piroclásticas, ignimbritas y epiclastitas, de tipo riolítico-dacítico, los cuales probablemente constituyen las facies de

³⁶ Tomado de Léxico estratigráfico de El Salvador.

origen extrusivas o volcánicas y las intrusivas con las intrusiones graníticas-dioríticas más o menos contemporáneas, efusivas intercaladas, localmente silicificadas, tobas piroclásticas multicolores duras con cuarzo y biotita. Los afloramientos de esta unidad están restringidos al norte del país.

- ✓ **Rocas intrusivas (I):** Estratigráficamente se ubican entre los depósitos de las formaciones Morazán y Chalatenango. Hacen mención de pequeñas intrusiones dioríticas, pórfidos graníticos, granodioritas y cuarzo-monzonitas, en el flanco noreste de la sierra de Metapán; describen monzonitas muy similares entre sí. La roca es parda, de grano más grueso en la parte más baja y más fino en la parte superior donde el enfriamiento fue más rápido. La composición mineral es de 40-50% ortoclasa, 25-30% plagioclasa (oligoclasa), 15-20% cuarzo, 10% hornblenda pleocroica y en menor proporción biotita y magnetita. Parte de los ferromagnesianos están alterados a calcita y clorita.
- ✓ **Formación Morazán (m):** Esta formación tiene origen volcánico y se subdivide en cuatro miembros m 1'a, m 1'b, m 2'a, m 2'b, los cuales se extienden desde el sector noroccidental hasta nororiental de El Salvador. Las rocas que se encuentran en esta formación son las siguientes: piroclastitas ácidas hasta intermedias, epiclastitas volcánicas, efusivas intermedias hasta intermedias-ácidas, ignimbritas, Piroclastitas subordinadas, en parte silicificadas, con metamorfismo de contacto o con alteración hidrotermal.

- ✓ **Formación Bálsamo (b):** Se extiende considerablemente al sur del país en la cadena costera, y las rocas tienden a ser de tipo ácido en las partes bajas e intermedias a básicas en la parte superior, constituido por epiclastitas volcánicas, piroclastitas e ignimbritas; localmente efusivas básicas-intermedias intercaladas y limo rojo; alteración hidrotermal localmente. esta formación se divide en tres miembros; b1, b2, b3.
- ✓ **Formación Cuscatlán (c):** esta formación se puede encontrar en el centro del país y se divide en tres miembros c1, c2 y c3. es una secuencia volcánica con algunos depósitos sedimentarios (fluviales, lacustres), la sección volcánica está constituida por tobas ácidas en la base, seguido por lavas ácidas intermedias y andesitas-basaltos en la parte superior, La secuencia sedimentaria está limitada a cuencas intermontanas, las cuales incluyen horizontes de diatomita, epiclastitas y areniscas, intercaladas localmente por capas carbonosas, tobas y una localidad con calizas de agua dulce. Existen rocas sedimentarias marinas solamente en el extremo NW cerca de Metapán, donde cubren un área aproximada de 200 km². Se trata de una sucesión litológica que lleva de rocas clásticas por una serie de calizas a otra serie de rocas clásticas.

En general, la mayoría de las unidades litológicas de las que provienen los suelos en la zona de estudio han sido originadas debido a la actividad volcánica, generalmente explosiva, seguida de una remoción o un retrabajo del material.

Rocas ígneas, se forman por la solidificación del magma (lava) en la superficie de la corteza terrestre o bajo esta. Las que pueden clasificarse de la siguiente manera:

- **Rocas ígneas intrusivas:** Se forman a partir de magma solidificado en grandes masas en el interior de la corteza terrestre. El magma, rodeado de rocas preexistentes (conocidas como rocas caja), se enfría lentamente, lo que permite que los minerales formen cristales grandes, visibles a simple vista, por lo que son rocas de "grano grueso". Las cuales a su vez pueden ser:
 - **Ácidas e intermedias.** Rocas compuestas por minerales de colores claros, ricos en silicio y/o sin Fe-Mg, como cuarzo y feldespato potásico. Los tipos más comunes son el **granito**, la **granodiorita**, y la **tonalita**³⁷.
 - **Básicas.** Rocas compuestas por minerales de colores oscuros, en general pobres en silicio y ricos en Hierro y Magnesio (ferromagnesianos), como biotita, anfíboles, piroxenos, olivino y óxidos de Hierro. El tipo más común es el **gabro**.
- **Rocas ígneas extrusivas (volcánicas):** Dado que el enfriamiento es mucho más rápido debido al contacto con el aire circundante en la atmósfera, los iones de los minerales no pueden organizarse en cristales grandes, por lo que las rocas volcánicas son de grano fino (cristales invisibles al ojo), como el basalto, o completamente amorfas (una textura similar al vidrio), como la obsidiana. En

³⁷ Estas rocas pueden dar paso con el tiempo a la existencia de arcillas o arcillas limosas.

muchas rocas volcánicas se pueden observar los huecos dejados por las burbujas de gas que escapan durante la solidificación del magma.³⁸

Las rocas extrusivas de enfriamiento rápido son: Basalto, andesita, riolita, obsidiana, piedra pómez, escoria volcánica, piroclastitas y epiclastitas volcánicas.

Entre las rocas ígneas volcánicas que pueden dar paso a materiales limosos y arcillosos tenemos:

- ✓ **Basalto:** Es una roca de color oscuro, de composición máfica³⁹, rica en silicatos de magnesio y hierro y bajo contenido en sílice, que constituye una de las rocas más abundantes en la corteza terrestre.⁴⁰
- ✓ **Andesita:** Se puede clasificar en tres tipos: las dacitas, las andesitas con hornblenda y biotita, y las andesitas con piroxeno. Las dacitas son andesitas con cuarzo. Las andesitas con piroxeno son las más comunes de todas. Son más oscuras y densas. Mineralógicamente se denomina andesita basáltica a aquellas andesitas que poseen minerales ferromagnésicos típicos del basalto, como el olivino, pero poseen feldespatos con composiciones químicas típicas de las andesitas.
- ✓ **Riolita:** Es una roca con textura de grano fino, constituida esencialmente por cuarzo, feldespato y mica.

³⁸ www.wikipedia.org.

³⁹Máfico: es un adjetivo que se aplica a un silicato que es rico en magnesio y hierro.

⁴⁰ El Gabro también es una roca ígnea con composición máfica.

- ✓ También entre las rocas extrusivas se tienen a **piroclastitas** y **epiclastitas volcánicas**, se conocen también como “rocas piroclásticas”. Son rocas que tienen un aspecto similar a las rocas clásticas⁴¹ (compuesta de fragmentos), debido a que se transportan, depositan y acumulan por procesos similares a dichas rocas. Aunque el proceso es con material volcánico, están constituidas de material “particulado” o fragmentado. Estas rocas se forman mediante transporte por aire o por gravedad, ya que son depósitos de caída. También se les conoce como flujos piroclásticas.

Como puede verse, el origen de los suelos en estudio proviene de materiales diferentes, por lo cual todos tienen plasticidades diferentes, que en el tiempo de descomposición de las rocas han dado lugar a la formación de Arcillas y Limos.

La etapa de recolección de información ayudo a conocer los tipos de roca presentes en la zona de estudio, y a través de la investigación determinar preliminarmente si estas rocas dan paso con el tiempo a la presencia de suelos que pudieran tener plasticidad.

4.1.2 Visitas de reconocimiento y definición de puntos de muestreo.

El objetivo de las visitas de campo es identificar los suelos que preliminarmente tengan plasticidad: baja, media y alta, además de tomar muestras alteradas, se tomaron fotografías y ubicaron los puntos geográficamente.

⁴¹ Rocas clásticas: son una clase de rocas sedimentarias compuestas de fragmentos o clastos de roca y minerales pre-existentes acumulados mecánicamente, que se han vuelto a consolidar en mayor o menor grado.

Estas visitas técnicas se realizaron en compañía de los docentes directores del trabajo de graduación. Debido a que el tramo en estudio de la Carretera es muy largo, el recorrido preliminar se llevó a cabo en dos visitas de reconocimiento.

La salida a campo se desarrolló en tres etapas:

- ✓ Reconocimiento de puntos.
- ✓ Ubicación de puntos.
- ✓ Extracción de muestras.

4.1.2.1 Reconocimiento de puntos de muestreo preliminares.

Para esta investigación fue necesario hacer un reconocimiento general del tramo en estudio, comprendido entre Metapán (Dpto. Santa Ana) y Sensuntepeque (Dpto. Cabañas), en la Carretera Longitudinal del Norte. Inicialmente solo se tenía la información geológica de la zona, sin tener conocimiento de la ubicación de puntos de muestreo con antecedentes de suelos con plasticidad. Por lo que, para identificar un suelo con cierto grado de plasticidad, fue necesario aplicar el método visual – manual, tal como se describe en el proceso de la norma ASTM D 2488 en el apartado 14. Las características evaluadas fueron: Resistencia en seco, dilatancia y plasticidad.

Para la resistencia en seco se tomó una porción de suelo natural seca, a la cual se le ejerció presión con los dedos para verificar que resistencia oponía el suelo a desmoronarse. Para la dilatancia y plasticidad se tomó una porción de suelo natural, se humedeció y remoldeó, tal como se muestra en la Figura No 4.2. Lo que se pretendía

identificar, eran suelos que al humedecerlos y remoldearlos, presentarían plasticidad, consistencias en estado seco y un alto contenido de fracción fina (limos y arcillas). Los puntos que se estudiaron fueron aproximadamente 20, sin embargo, de ellos solo 11 puntos presentaron las características deseables.

Figura No 4.2: Proceso de humedecimiento y remoldeo para evaluar dilatancia y plasticidad.



FUENTE: De los autores. Fotografías tomada por Br. Marlon Rivera. Marzo 2015.

Luego se aplicaron los procedimientos detallados en la Tabla No 3.1, y se observó lo que sucedía en la muestra, procediendo a describir las características de forma cualitativa. En la Tabla No 4.1, se muestra la descripción de las características para cada punto de muestreo.

Tabla No 4.1: Resultados de la evaluación de las características del método visual – manual de la Norma ASTM D 2488; Resistencia en seco, dilatancia y plasticidad, en la zona de estudio.

Designación	Resistencia en seco	Dilatancia	Plasticidad	Clasificación Visual
Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango)	Fue muy difícil desmoronar la porción de suelo	El agua no aflora de la masa de suelo	Fue fácil formar el rollito, y se pudo rolar repetidas veces	Arcilla
Suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango)	No fue fácil desmoronar la porción de suelo	El agua aparece lentamente en la superficie cuando	El rollito es fácil de rolar, sin embargo, no se pudo	Limo y arcilla

		se sacude la masa de suelo	remoldear mucho antes que se agrietara	
Suelo No 3 (Río Las Minas, Chalatenango)	El suelo se desmoronaba con mucha facilidad	El agua aflora con facilidad de la masa de suelo	El rollito no pudo ser rolado con ningún contenido de agua	Limo no Plástico
Suelo No 4* (Nva. Concepción)	No fue fácil desmoronar la porción de suelo	El agua no aflora de la masa de suelo, se retenía mucho en el suelo	El rollito fue rolado con facilidad, aunque no acepto muchos remoldeos	Arcilla con fracción considerable de limos
Suelo No 5 (Cantón, Sunapa, Nva. Concepción)	No fue fácil desmoronar la porción de suelo	El agua no aflora de la masa de suelo, se retenía mucho en el suelo	El rollito fue rolado con facilidad, aunque no acepto muchos remoldeos	Arcilla con fracción considerable de limo
Suelo No 6 (Km 104, Metapán)	Fue muy difícil desmoronar el suelo	El agua no aflora de la masa de suelo	Fue fácil formar el rollito, y se pudo rolar repetidas veces	Arcilla
Suelo No 7 (Comunidad La Isla, Metapán)	No se requirió ejercer mucha presión al suelo para que se desmoronará	El agua aparece lentamente en la superficie cuando se sacude la masa de suelo	El rollito es fácil de rolar, sin embargo, no se pudo remoldear mucho antes que se agrietara	Limo con poca fracción de arcilla
Suelo No 8 (Chiapas, Chalatenango)	No se requirió ejercer mucha presión al suelo para que se desmoronará	El agua aparece lentamente en la superficie cuando se sacude la masa de suelo	El rollito de suelo fue muy difícil de formarlo y se agrieto muy rápido	Limo con muy poca fracción de arcilla
Suelo No 9 (Cebadilla, Cabañas)	No se requirió ejercer mucha presión al suelo para que se desmoronará	El agua aparece lentamente en la superficie cuando se sacude la masa de suelo	El rollito de suelo fue muy difícil de formarlo y se agrieto muy rápido	Limo con poca fracción de arcilla
Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	Fue muy difícil desmoronar el suelo	El agua no aflora de la masa de suelo	El rollito es fácil de formar y acepta muchos remoldeos antes de agrietarse	Arcilla
Suelo No 11 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	Fue muy difícil desmoronar el suelo	El agua no aflora de la masa de suelo	El rollito es fácil de formar y acepta muchos remoldeos antes de agrietarse	Arcilla

*El suelo No 4 corresponde al suelo No 4.1 y No 4.2 conjuntamente.

FUENTE: De los autores.

4.1.2.2 Ubicación de puntos de muestreo preliminares.

Los puntos de muestreo se encuentran ubicados principalmente en los municipios de Metapán, Nueva Concepción, Chalatenango y Sensuntepeque.

En la Tabla No 4.2, se muestra la designación de los puntos de muestreo, con sus coordenadas geodésicas y ubicación.

Tabla No 4.2: Ubicación detallada de cada punto de muestreo preliminar⁴².

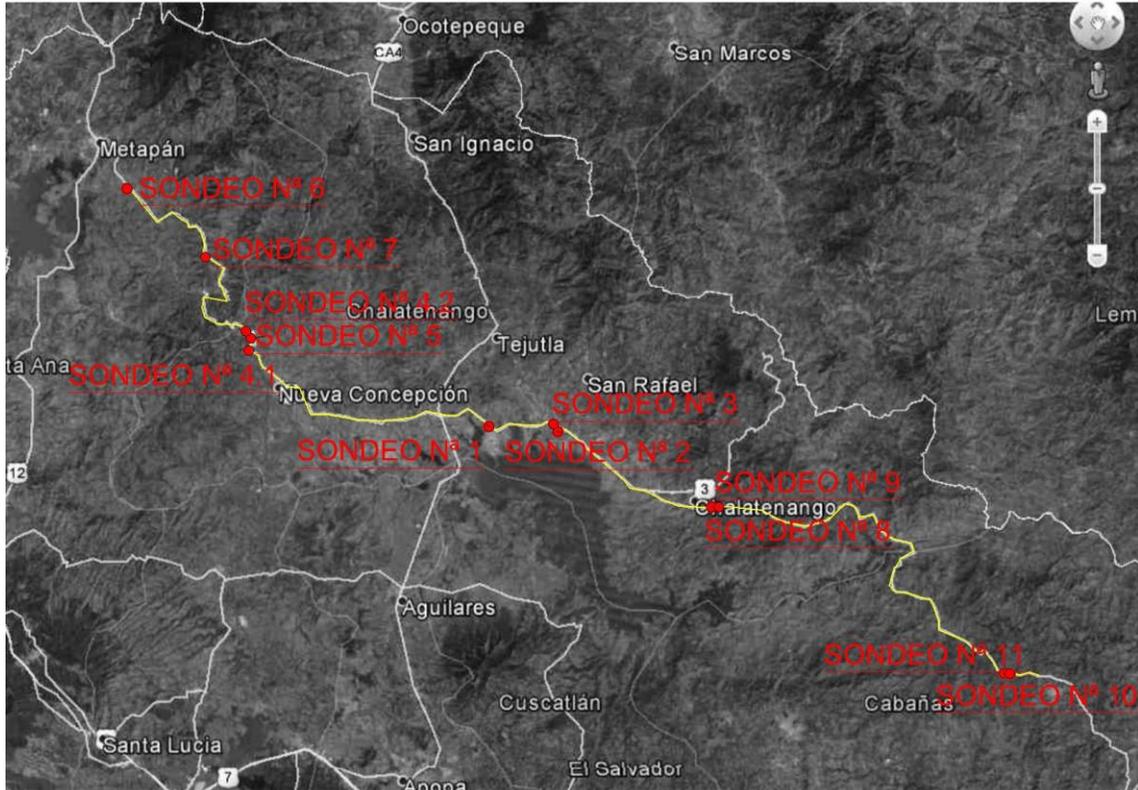
Designación	Latitud	Longitud	Ubicación
Suelo No 1	14° 05' 45.41" Norte	89° 06' 27.94" Oeste	Caserío Calle Nueva, Cantón Santa Bárbara, Santa Rita, Chalatenango
Suelo No 2	14° 05' 29.47" Norte	89° 02' 55.38" Oeste	Desvío El Morrito, Municipio de San Rafael, Chalatenango
Suelo No 3	14° 05' 48.50" Norte	89° 03' 04.10" Oeste	Río Las Minas, Chalatenango
Suelo No 4.1	14° 09' 31.23" Norte	89° 18' 46.19" Oeste	Est 6+700, Carretera Longitudinal del Norte, Nueva Concepción, Chalatenango
Suelo No 4.2	14° 10' 26.80" Norte	89° 18' 53.57" Oeste	Cantón Sunapa, Est 10+200, Carretera Longitudinal del Norte, Nueva Concepción, Chalatenango
Suelo No 5	14° 10' 09.90" Norte	89° 18' 41.58" Oeste	Cantón Sunapa, Est 9+400, Carretera Longitudinal del Norte, Nueva Concepción, Chalatenango
Suelo No 6	14° 17' 37.79" Norte	89° 25' 01.39" Oeste	Km 104, Carretera Longitudinal del Norte, Metapán, Santa Ana
Suelo No 7	14° 14' 11.00" Norte	89° 20' 58.10" Oeste	Caserío La Isla, Carretera Longitudinal de Norte, Metapán, Santa Ana
Suelo No 8	14° 01' 42.53" Norte	88° 55' 03.49" Oeste	Km 81 ½, Carretera Longitudinal del Norte, Chiapas, Chalatenango
Suelo No 9	14° 01' 44.48" Norte	88° 55' 03.39" Oeste	Km 126, Carretera Longitudinal del Norte, Comunidad Cebadilla, Cabañas
Suelo No 10	13° 53' 23.70" Norte	88° 40' 05.39" Oeste	Km 128 ½, Carretera Longitudinal del Norte, San Lorenzo, Sensuntepeque, Cabañas
Suelo No 11	13° 53' 24.06" Norte	88° 40' 07.98" Oeste	Km 128 ½, Carretera Longitudinal del Norte, San Lorenzo, Sensuntepeque, Cabañas

FUENTE: Coordenadas obtenidas de con aparato GPS (Global Position System).

En la Figura No 4.3, se muestra un mapa general de la Carretera Longitudinal del Norte, donde se encuentran ubicados los puntos de muestreo preliminares.

⁴² El suelo No 4.1 y No 4.2 corresponden a un muestreo que se realizó dentro de una misma zona, en la que ambos materiales presentaron características muy parecidas.

Figura No 4.3: Mapa de ubicación de puntos muestreados.



FUENTE: Captura de imagen tomada de Google Earth. Ubicación de puntos con programa Autocad Civil 3D.

4.1.2.3 Extracción de muestras.

En la mayoría de los puntos muestreados, el suelo se encontraba con una humedad muy baja (casi seco), presentando grietas y con cierta dureza al manipularse, (dado a que, a la fecha no había llovido en la zona). En la Figura No 4.4, se muestra las condiciones que presentaba el suelo en uno de los puntos de muestreo.

Figura No 4.4: Suelo natural en punto de muestreo No 10 (Sensuntepeque, Cabañas).



FUENTE: De los autores. Fotografías tomada por Br. Marlon Rivera. Marzo 2015.

En la Tabla No 4.1, se puede observar que con base a los resultados cualitativos mencionados se obtiene una clasificación visual de cada suelo en estudio. Es muy poco probable encontrar arcillas puras, por lo tanto, al estar combinadas con otros materiales como limos o arenas, su plasticidad puede cambiar o verse reducida. Por lo que, los 11 suelos muestreados contenidos en la Tabla No 4.1, son los que de acuerdo al método visual – manual, se determinó que tienen una fracción arcillosa potencialmente plástica.

Luego de seleccionar los suelos en base al método visual – manual, se procedió a tomar muestras alteradas, en cantidad suficiente para realizar los ensayos de laboratorio para clasificación. Las muestras fueron extraídas a una profundidad tal que correspondiera al estrato de interés y que no existiera materia orgánica presente en él.

4.1.3 Ensayos de laboratorio.

Los ensayos de laboratorio que se realizaron para la identificación de los suelos fueron: Contenido de humedad, Granulometría (por lavado), Límites de Atterberg y Gravedad Específica. Con los resultados de laboratorio obtenidos, se clasificaron los suelos y de acuerdo a esta clasificación, se seleccionaron los suelos definitivos que cumplieran con las plasticidades requeridas: plasticidad baja, media y alta.

4.1.4 Análisis de resultados.

En este apartado se presenta el análisis de los resultados obtenidos y la metodología aplicada, para seleccionar los puntos de muestreo definitivos.

Metodología para llevar a cabo la selección de los puntos de muestreo definitivos a partir de los resultados de laboratorio:

1. Análisis granulométrico: Sirve para determinar la distribución de los tamaños de las partículas y la fracción gruesa y fina. Lo que se requiere es que más del 50% de la muestra pase por la malla No 200.
2. Plasticidad: Obtener suelos con alta, media y baja plasticidad. De acuerdo a la Tabla No 2.15⁴³, los intervalos de IP para ello son: $0\% \leq IP \leq 3\%$: nula, $4\% \leq IP \leq 15\%$: baja, $16\% \leq IP \leq 30\%$: media e $IP \geq 31\%$: alta.
3. Gravedad Específica: Se verificará que este valor sea característico de arcillas o arcillas limosas. El valor debe estar entre 2.50 a 2.80.

⁴³ Fuente: Holtz & Kovacs. An Introduction to Geotechnical Engineering.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en forma resumida.

✓ **Contenido de Humedad Natural.**

En la Tabla No 4.3, se presentan los resultados obtenidos para los ensayos de contenido de humedad natural, realizados a los suelos.

Tabla No 4.3: Resultados obtenidos para ensayo de contenido de humedad*.

Designación	Humedad (%)	Designación	Humedad (%)
Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango)	5	Suelo No 6 (Km 104, Metapán)	8
Suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango)	12	Suelo No 7 (Comunidad La Isla, Metapán)	14
Suelo No 3 (Río Las Minas, Chalatenango)	16	Suelo No 8 (Chiapas, Cabañas)	10
Suelo No 4.1 (Nva. Concepción)	7	Suelo No 9 (Cebadilla, Cabañas)	7
Suelo No 4.2 (Nva. Concepción)	25	Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	25
Suelo No 5 (Cantón Sunapa, Nva Concepción)	9	Suelo No 11 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	25

*Los valores de humedad son el resultado del promedio de 3 ensayos.

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, año 2015.

✓ **Granulometría.**

En la Tabla No 4.4, se muestran los resultados de los ensayos granulométricos, realizados a las muestras de suelo.

Tabla No 4.4: resultados de ensayos granulométrico, porcentaje de fracción gruesa y fina.

Designación	% gruesos	% finos	Designación	% gruesos	% finos
Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango)	8.1	91.9	Suelo No 6 (Km 104, Metapán)	23.8	76.2
Suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango)	4.2	95.8	Suelo No 7 (Comunidad La Isla, Metapán)	3.4	96.6
Suelo No 3 (Río Las Minas, Chalatenango)	1.7	98.3	Suelo No 8 (Chiapas, Cabañas)	0.8	99.2
Suelo No 4.1 (Nva. Concepción)	1.4	98.6	Suelo No 9 (Cebadilla, Cabañas)	0.8	99.2
Suelo No 4.2 (Nva. Concepción)	2.2	97.8	Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	4.0	96.0
Suelo No 5 (Canton Sunapa, Nva Concepción)	2.5	97.5	Suelo No 11 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	2.5	97.5

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, año 2015.

Nota: Los resultados obtenidos están basados en el ensayo granulométrico por lavado en la malla No 200.

Al observar los resultados, se puede determinar que para los suelos No 1 al No 5, y del No 7 al No 11 los porcentajes de material que pasa la malla No 200 oscilan entre el 91.9% y el 97.8%, y solo para el suelo No 6, se tiene un porcentaje de finos del 76.2%.

Por lo que, se puede concluir que en su totalidad cumplen con el primer criterio que la fracción fina debe ser mayor al 50%.

✓ **Límite Líquido y Plástico.**

En la Tabla No 4.5, se muestran los resultados para los ensayos de límites de Atterberg ejecutados a los suelos de los puntos de muestreo.

Tabla No 4.5: Resultados de los ensayos de Límite Líquido y Límite Plástico los puntos de muestreo.

Designación	Límite Líquido	LL (Promedio)	Límite Plástico	LP (Promedio)	IP	Clasificación (SUCS)
Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango)	43	44	29	29	15	ML
			29			
	44		29			
Suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango)	72	73	38	38	35	MH
	73		38			
Suelo No 3 (Río Las Minas, Chalatenango)	118	118	NP	NP	NP	ML (NP)
Suelo No 4.1 (Nva. Concepción)	66	67	40	40	27	MH
	67					
Suelo No 4.2 (Nva. Concepción)	61	62	35	35	27	MH
	62		35			
Suelo No 5 (Cantón Sunapa, Nva Concepción)	61	61	45	45	16	MH
Suelo No 6 (Km 104, Metapán)	47	48	24	23	25	CL
	49		21			
Suelo No 7 (Caserío La Isla, Metapán)	56	62	33	33	29	MH
	67					
Suelo No 8 (Chiapas, Chalatenango)	69	69	NP	NP	NP	MH
Suelo No 9 (Cebadilla, Cabañas)	70	70	56	56	14	MH
Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	63	63	44	44	19	MH
Suelo No 11 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	62	62	43	43	19	MH

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, año 2015.

A continuación, se presenta la Tabla No 4.6 que contiene la clasificación de la plasticidad de los suelos en base a su IP.

Tabla No 4.6: Clasificación de Plasticidad de Suelos en base a su Índice de Plasticidad.

Designación	IP%	Plasticidad	Designación	IP%	Plasticidad
Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango)	15	Baja	Suelo No 6 (Km 104, Metapán)	25	Media
Suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango)	35	Alta	Suelo No 7 (Comunidad La Isla, Metapán)	29	Media
Suelo No 3 (Río Las Minas, Chalatenango)	NP	Nula	Suelo No 8 (Chiapas, Cabañas)	NP	Nula
Suelo No 4.1 (Nva. Concepción)	27	Media	Suelo No 9 (Cebadilla, Cabañas)	14	Baja
Suelo No 4.2 (Nva. Concepción)	27	Media	Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	19	Media
Suelo No 5 (Canton Sunapa, Nva Concepción)	16	Media	Suelo No 11 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	19	Media

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, año 2015.

De acuerdo a la Tabla No 4.6, los suelos se pueden clasificar dentro de los siguientes rangos de plasticidad:

- Plasticidad Nula: El suelo No 3 y No 8 con IP = 0%.
- Baja plasticidad: El Suelo No 1 con un IP = 15% y No 9 con un IP = 14%.
- Mediana plasticidad: Suelos No 4.1 al No 7, el suelo No 10 y No 11, presentan valores de IP entre 16% y 29%.
- Alta plasticidad: El suelo No 2 con un IP = 35%.

✓ **Gravedad Específica.**

En la Tabla No 4.7, se presentan los resultados de gravedad específica para cada suelo.

Tabla No 4.7: Resultados de los ensayos de Gravedades Especificas a los suelos en estudio*.

Designación	Gs	Designación	Gs
Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango)	2.56	Suelo No 6 (Km 104, Metapán)	2.53
Suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango)	2.37	Suelo No 7 (Comunidad La Isla, Metapán)	2.56
Suelo No 3 (Río Las Minas, Chalatenango)	2.34	Suelo No 8 (Chiapas, Cabañas)	2.62
Suelo No 4.1 (Nva. Concepción)	2.71	Suelo No 9 (Cebadilla, Cabañas)	2.60
Suelo No 4.2 (Nva. Concepción)	2.67	Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	2.63
Suelo No 5 (Canton Sunapa, Nva Concepción)	2.67	Suelo No 11 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	2.61

*Los valores de gravedad específica corresponden al promedio de 3 ensayos.

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, año 2015.

Los suelos No 2 y No 3 tienen un valor de Gs de 2.37 y 2.34 respectivamente. Al ser estos valores menores que 2.50, no se puede catalogar como valores típicos de arcillas o arcillas limosas.

El suelo No 1 y del No 4.1 al No 11 presentan valores de Gs que oscilan entre 2.53 y 2.71. Estos valores se encuentran dentro del rango requerido de 2.50 a 2.80, por lo que, presentan valores de Gravedad específica de arcillas o arcillas limosas.

En base a los resultados obtenidos, se realiza el análisis para la selección de los suelos que servirán para el estudio de las características de hinchamiento y retracción, los que deberán cumplir con los criterios establecidos previamente (ver apartado 3.2.4). A continuación se presenta el análisis realizado:

✓ **Selección de suelos para puntos de estudio definitivos.**

Para el análisis de los resultados, se muestra la Tabla No 4.8, donde se realiza la verificación del cumplimiento con los requisitos establecido, para cada suelo en estudio.

Tabla No 4.8: Resumen de ensayos de laboratorio preliminares y selección de puntos de muestreo definitivos.

Designación	% gruesos	% finos	IP%	Plasticidad	Gs
Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango)	8.1	91.9	15	Baja	2.56
Suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango)	4.2	95.8	35	Alta	2.37
Suelo No 3 (Río Las Minas, Chalatenango)	1.7	98.3	NP	Nula	2.34
Suelo No 4.1 (Nva. Concepción)	1.4	98.6	27	Media	2.71
Suelo No 4.2 (Nva. Concepción)	2.2	97.8	27	Media	2.67
Suelo No 5 (Cantón Sunapa, Nva Concepción)	2.5	97.5	16	Media	2.67
Suelo No 6 (Km 104, Metapán)	23.8	76.2	25	Media	2.53
Suelo No 7 (Comunidad La Isla, Metapán)	3.4	96.6	29	Media	2.56
Suelo No 8 (Chiapas, Cabañas)	0.8	99.2	NP	Nula	2.62
Suelo No 9 (Cebadilla, Cabañas)	0.8	99.2	14	Baja	2.60
Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	4.0	96.0	19	Media	2.63
Suelo No 11(San Lorenzo, Sensuntepeque)	2.5	97.5	19	Media	2.61

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, año 2015.

De los resultados se puede concluir lo siguiente:

- ✓ Granulometría: Los 11 suelos cumplen con el requisito de que más del 50% de la muestra pasa la malla No 200.
- ✓ Plasticidad: Los 11 suelos están distribuidos dentro de las siguientes categorías, tal como se muestra a continuación:
 - Plasticidad Nula: se tiene los suelos No 3 y 8 ya que se determinó mediante los resultados de laboratorio que son no plásticos, por lo que no se tomaran en cuenta para el estudio.
 - Baja plasticidad: Se tiene el suelo No 1 con IP = 15% y suelo No 9 con IP = 14%. Dentro de esta clasificación se tomará el IP más alto dentro del intervalo $4\% \leq IP \leq 15\%$, por lo que, se selecciona el Suelo No 1.

- Plasticidad media: Se tienen los suelos No 4.1 y No 4.2 con IP = 27%, el No 5 con IP = 16%, el No 6 con IP = 25%, el No 7 con IP = 29% y el suelo No 10 y No 11 con IP = 19%. Ya que se tienen 7 puntos con en esta clasificación, se tomarán solo tres suelos que tengan un valor cercano al límite inferior y superior y uno intermedio en el intervalo $16\% \leq IP \leq 30\%$. Por lo tanto, se seleccionarán los suelos No 4.2, No 6 y No 10.
 - Alta plasticidad: El suelo con un IP mayor a 31%, es el No 2 con un IP = 35%, por lo que se seleccionara para el estudio.
- ✓ Gravedad Específica: Dado los resultados obtenidos de este parámetro, existen dos suelos que se encuentran fuera de los rangos establecidos (ver Tabla No 4.7, suelos No 2 y No 3), sin embargo, al revisar los resultados de los ensayos de plasticidad y granulometría se verifico, que el suelo No 2, poseía características propias de un suelo plástico (limo-arcilloso), por lo que, el bajo resultado de G_s 2.34, se podría atribuir a las características mineralógicas propias del material. Luego de este análisis se decidió tomarlo en cuenta para el estudio.
- De acuerdo a las características estudiadas se concluye que los suelos seleccionados serán: **No1, No 2, No 4.2, No 6 y 10. (Ver Tabla No 4.9).**

Tabla No 4.9: Suelos seleccionados para estudio el definitivo.

Designación	% gruesos	% finos	IP	Plasticidad	Gs
Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango)	8.1	91.9	15	Baja	2.56
Suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango)	4.2	95.8	35	Alta	2.37
Suelo No 4.2 (Nva. Concepción)	2.2	97.8	27	Media	2.67
Suelo No 6 (Km 104, Metapán)	23.8	76.2	25	Media	2.53
Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	4.0	96.0	19	Media	2.63

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, año 2015.

4.2 APLICACIÓN DE METODOLOGÍA DE MUESTREO DEFINITIVO.

4.2.1 Visitas de campo para muestreo de puntos de estudio definitivos.

El objetivo de estas visitas de campo es recolectar muestras alteradas e inalteradas de los puntos seleccionados como definitivos y tomar fotografías del proceso de extracción de muestras.

Los puntos seleccionados en el apartado 4.1.4, de acuerdo a los resultados de ensayos de laboratorio y al cumplimiento a los criterios establecidos se presentan en la Tabla No 4.10. A estos puntos de muestreo son a los que se le realizarán los ensayos de hinchamiento y retracción.

Tabla No 4.10: Ubicación de puntos de muestreo definitivos.

Designación	Latitud	Longitud	Ubicación
Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango)	14° 05' 45.41" Norte	89° 06' 27.94" Oeste	Caserío Calle Nueva, Cantón Santa Bárbara, Santa Rita, Chalatenango
Suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango)	14° 05' 29.47" Norte	89° 02' 55.38" Oeste	Desvío El Morrito, Municipio de San Rafael, Chalatenango
Suelo No 4.2 (Nva. Concepción)	14° 10' 26.80" Norte	89° 18' 53.57" Oeste	Cantón Sunapa, Est 10+200, Carretera Longitudinal del Norte, Nueva Concepción, Chalatenango
Suelo No 6 (Km 104, Metapán)	14° 17' 37.79" Norte	89° 25' 01.39" Oeste	Km 104, Carretera Longitudinal del Norte, Metapán, Santa Ana
Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	13° 53' 23.70" Norte	88° 40' 05.39" Oeste	Km 128 ½, Carretera Longitudinal del Norte, San Lorenzo, Sensuntepeque, Cabañas

FUENTE: De los autores.

4.2.2 Extracción de muestras.

4.2.2.1 Muestras alteradas.

Las muestras se tomaron a la profundidad a la que se extrajo una muestra inalterada, ya que el suelo a esa profundidad se presentaba menos alterado por los agentes climáticos (en esta etapa del estudio, ya había llovido en la zona). La profundidad de extracción fue variable dependiendo de la ubicación del estrato en estudio. Una vez extraída la muestra, se trasladaron al laboratorio de suelos de la UES y fueron almacenadas adecuadamente, asegurándose de evitar la pérdida de humedad, se recolectó la cantidad de suelo suficiente para realizar todos los ensayos necesarios en esta etapa de la investigación.

4.2.2.2 Muestras inalteradas.

Las muestras se han obtenido a una profundidad variable que dependía de la ubicación y estado superficial del estrato en estudio, principalmente que el suelo no estuviera alterado.

El suelo fue labrado cuidadosamente a modo de formar un cubo, el cual debía ser manipulado con sumo cuidado al momento de su extracción, para que no se agrietara, posteriormente fue parafinado, envuelto en tela y vuelto a parafinar, se protegió la muestra depositándola en una caja de madera a la que se le había colocado un material que sirviera de soporte para su traslado al laboratorio.

En la Figura No 4.5, se muestra la forma en cómo se extrajeron las muestras inalteradas.

Figura No 4.5: Procedimiento de extracción de muestras inalteradas en campo para los puntos de estudio definitivos.

A) Limpieza y retiro de materia orgánica.



B) Formación y labrado de muestra inalterada de suelo en forma cubica.



C) Extracción de muestras inalteradas.



FUENTE: De los autores. Fotografías tomadas por Br. Marlon Rivera. Mayo 2015.

4.2.3 Ensayos de Laboratorio.

Los ensayos de laboratorio realizados luego del muestreo han sido nuevamente los de clasificación: Límites de Atterberg, Gravedad Específica y Granulometría-Hidrometría, para corroborar los resultados obtenidos en la fase preliminar. Además, se les realizó el ensayo límite de contracción y para determinar las características de hinchamiento, los ensayos de: Hinchamiento Libre, Presión de Hinchamiento y Ensayo Lambe.

Estos ensayos son los que proporcionan datos cuantitativos a partir de los cuales se puede determinar el hinchamiento o retracción de los suelos en estudio, a partir de una humedad inicial hasta estar saturados, la presión necesaria para evitar el cambio de volumen y la identificación cualitativa de que tan crítico puede llegar a ser la expansividad de dichos suelos.

Los resultados de todos los ensayos citados anteriormente, se presentaran con su respectivo análisis en el capítulo No 5.

CAPITULO 5:

ANÁLISIS DE RESULTADOS DE

LABORATORIO

5.1 INTRODUCCIÓN.

Para la determinación del comportamiento al hinchamiento y retracción de los suelos que presentan plasticidades diferentes, según la metodología planteada en el capítulo No 3, se realizaron pruebas de laboratorio a los suelos definitivos, y de esta manera clasificar los materiales y conocer los valores de dichas propiedades.

5.2 RESULTADOS DE LABORATORIO PARA CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS EN ESTUDIO.

Los resultados que se presentan a continuación son para caracterización de los suelos en estudio, una vez clasificado el material, se procederá a determinar sus características en base a dichos resultados.

5.2.1 Humedad natural.

La humedad de los suelos, es la correspondiente a la condición en estado natural. El valor de humedad se obtuvo del promedio de ensayos realizados para cada suelo. A continuación, se presentan en la Tabla No 5.1 los resultados de humedad natural para los suelos seleccionados como definitivos.

Tabla No 5.1: Resultados obtenidos de ensayo de contenido de humedad.

Designación	Humedad (%)	Humedad Promedio (%)
Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango)	28.3	28.6
	29.0	
	28.5	
Suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango)	6.0	6.2
	5.7	
	7.0	
Suelo No 4.2 (Nva. Concepción)	25.6	25.6
	25.5	
	25.6	
Suelo No 6 (Metapán)	25.1	25.0
	25.4	
	24.6	
Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	25.3	24.7
	24.0	

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, año 2015.

Al analizar los resultados de los ensayos de contenido de humedad, se puede determinar que los suelos No 1, No 4.2, No 6 y No 10 presentan humedades entre 24.7% y 28.6%, y el suelo No 2 tiene una humedad de 6.2%, presentando la menor humedad. El muestreo de los materiales se realizó al inicio de la época de invierno, lo que condujo a que los valores de humedades en la mayoría de estos, dieron valores relativamente altos.

5.2.2 Límites de consistencia de los suelos (Límite líquido y límite plástico).

Se realizaron varios ensayos a cada suelo, tanto de límite líquido como plástico. La cantidad de ensayos dependió de la variación que presentaron los resultados.

En la Tabla No 5.2, se presentan los resultados de límites para cada suelo.

Tabla No 5.2: Resultados obtenidos para los ensayos de límite líquido y límite plástico.

Procedencia del material	Límite Líquido (%)	LL (%) (promedio)	Límite Plástico (%)	LP (%) (promedio)	Índice de Plasticidad (%)
Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango)	59	61	30	30	31
	61				
	62				
	61				
Suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango)	35	36	17	17	19
	36		17		
Suelo No 4.2 (Nva. Concepción)	61	61	35	35	26
	60		35		
	62				
Suelo No 6 (Metapán)	69	68	30	30	38
	68		31		
	66		28		
	68		30		
Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	62	63	41	40	23
	65		38		
	63		40		
	62				

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, año 2015.

Los resultados que se reportan de límite líquido y plástico de la Tabla No 5.2, corresponden al valor promedio de las pruebas que se hicieron para cada material.

De acuerdo a dicha tabla, el suelo que presenta la mayor plasticidad es el No 6 (Metapán) con un IP de 38%, y el que presenta la menor plasticidad es el suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango) con un IP de 19%.

5.2.3 Gravedad específica.

En la Tabla No 5.3, se presentan los resultados de las gravedades específicas de cada suelo, obtenidos a partir de los ensayos realizados.

Tabla No 5.3: Resultados de ensayos obtenidos para Gravedad Específica.

Procedencia del material	Gravedad Específica		Gravedad Específica promedio
Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango)	2.62		2.63
	2.63		
	2.64		
Suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango)	2.59		2.59
	2.60		
	2.59		
Suelo No 4.2 (Nva. Concepción)	2.67		2.67
	2.68		
	2.67		
Suelo No 6 (Metapán)	2.50	2.51	2.50
	2.49	2.51	
	2.49	2.51	
Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	2.67	2.68	2.67
	2.67	2.67	
	2.67	2.68	

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, año 2015.

Es importante recalcar, que los resultados obtenidos corresponden a valores característicos de suelos plásticos, con gravedades específicas que varían entre 2.50 a 2.67.

5.2.4 Granulometría (Mecánica e hidrometría).

En los ensayos Granulométricos se realizaron un mínimo de 2 ensayos a los suelos en estudio, sin embargo, en algunos casos no se lograba definir adecuadamente la curva granulométrica, ya que se observaba que el material tenía muchos sólidos en suspensión; a raíz de esto, se decidió dejar por mayor tiempo al que dicta el método de ensayo (dejando por un tiempo mayor a 24 horas), de tal forma que el suelo tuviera suficiente tiempo para sedimentar y poder definir mejor la curva granulométrica.

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos granulométricos para cada suelo, junto con sus respectivas curvas granulométricas.

5.2.4.1 Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango).

Se presentan en la Tabla No 5.4, los resultados de los ensayos de manera individual y en promedio, así como, sus correspondientes curvas granulométricas en la Gráfica No 5.1.

Tabla No 5.4: Resultados de los ensayos granulométricos para el suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango).

Método	Ensayo No 1			Ensayo No 2		Promedio
	No. Malla	Abertura (mm)	% que pasa	Abertura (mm)	% que pasa	% que pasa
Mecánico	3/8 "	9.53	100.00	9.53	100.00	100.00
	No. 4	4.75	99.91	4.75	99.94	99.93
	No. 8	2.36	99.82	2.36	99.84	99.83
	No.10	2.00	99.79	2.00	99.80	99.79
	No.16	1.18	99.67	1.18	99.64	99.66
	No.30	0.60	99.37	0.60	99.22	99.30
	No.50	0.30	98.86	0.30	98.49	98.68
	No.100	0.15	97.82	0.15	97.17	97.50
	No.200	0.075	96.34	0.075	95.42	95.88
Hidrometría	Hidrometría	0.02434430	79.93	0.02467109	77.46	78.69
	Hidrometría	0.01590835	75.40	0.01610846	72.99	74.20
	Hidrometría	0.00958297	69.37	0.00958297	68.52	68.95
	Hidrometría	0.00697038	64.85	0.00697038	64.05	64.45
	Hidrometría	0.00506240	60.32	0.00508870	58.09	59.21
	Hidrometría	0.00257803	52.03	0.00259016	49.90	50.96
	Hidrometría	0.00112608	43.73	0.00112608	43.20	43.47
	Hidrometría	0.00080859	41.70	0.00081460	39.70	40.70
	Hidrometría	0.00067665	38.15	0.00067915	37.69	37.92

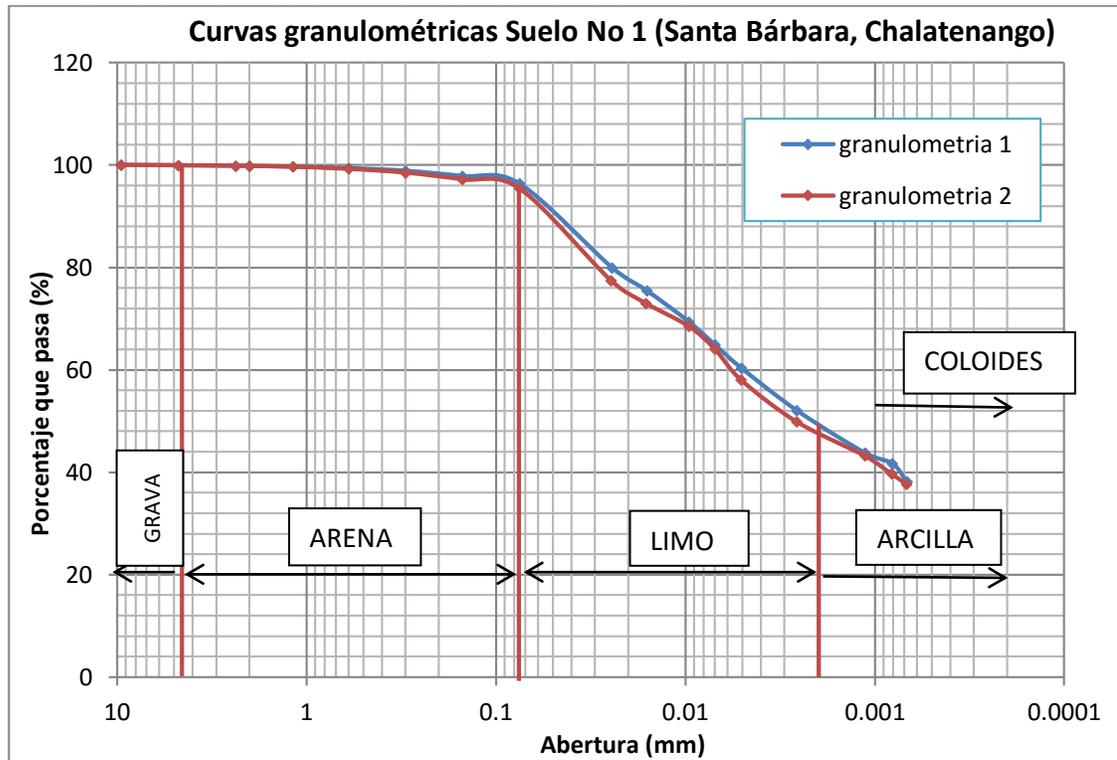
FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

De la Tabla No 5.4, se puede observar que este tipo de material corresponde a un suelo fino, cuya distribución de tamaños es la siguiente:

- % retenido en la malla No 200: 4.12, con un 4.05 que corresponde al tamaño arena y un 0.07 al tamaño grava;
- % que pasa la malla No 200: 95.88, con un 47 de tamaño limo y un rango entre 48 y 49% de arcilla (valores obtenidos a partir de las curvas

granulométricas, ver Gráfica No 5.1); la distribución de los tamaños para este tipo de material se encuentra resumida en la Tabla No 5.5.

Gráfica No 5.1: Curvas Granulométricas del Suelo No 1.



FUENTE: De los autores (gráfica obtenida a partir de los resultados de la Tabla No 5.4).

Tabla No 5.5: Porcentaje de gruesos y finos del suelo No 1*.

Material	Ensayo No 1	Ensayo No 2	Promedio	Clasificación
%Grava	0	0	0.0	Arcilla limosa
%Arena	4	5	4.5	
%Limo	47	47	47.0	
%Arcilla	49	48	48.5	
%Total	100	100	100	

*Los valores contenidos en la Tabla No 5.5 para cada ensayo se aproximan al entero, ya que los porcentajes de limos y arcillas se obtienen de la gráfica No 5.1 con una precisión hasta la unidad, por lo tanto, para determinar los valores de grava y arena, es necesario aproximar a la unidad los datos utilizados de la Tabla No 5.4.

FUENTE: De los autores (datos obtenidos de la gráfica No 5.1).

La Gráfica No 5.1 representa las granulometrías de los dos ensayos realizados, el comportamiento de ambas curvas es muy similar. Por lo que, en base a los valores promedios de la Tabla No 5.5, se pueden observar que en la fracción gruesa: la grava es despreciable, arena es de 4.5%; en la fracción fina: los limos representan un 47.0% y las arcillas un 48.5%, el tamaño predominante en este material es arcilla con un alto contenido de limo, por lo que en base al sistema de Unificado de clasificación de Suelos (SUCS), este material correspondería a una: *Arcilla Limosa*. En este caso, por su alto porcentaje de Arcilla, se espera que su comportamiento sea característico de un material plástico, presentando plasticidad y Expansividad. De la Gráfica No 5.1, se han obtenido los porcentajes que corresponden a tamaños menores de 0.002mm (arcilla) y menores a 0.001mm (coloides); dichos valores servirán para determinar el grado de expansividad de manera indirecta en estos suelos (Apartado de *Clasificación del Potencial expansivo del material en base a propiedades índices*). (Ver Tabla No 5.6).

Tabla No 5.6: Porcentaje de arcilla y coloide⁴⁴.

% <0.002mm		Promedio
Granulometría 1	49	48.5
Granulometría 2	48	
% <0.001 (coloides)		Promedio
Granulometría1	43	42.5
Granulometría2	42	

FUENTE: De los autores (datos obtenidos de la Gráfica No 5.1).

⁴⁴ Arcillas: partículas de tamaño menores a 0.002 mm, generalmente las arcillas están relacionadas a la actividad.

Coloides: Partículas de tamaño menores a 0.001 mm. Algunas autores se refieren a Arcillas como partículas coloidales.

5.2.4.2 Suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango).

A continuación, en la Tabla No 5.7 se presentan los resultados para los ensayos granulométricos y en la Gráfica No 5.2 las curvas granulométricas de estos.

Tabla No 5.7: Resultados de los ensayos granulométricos para el suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango).

Método	Ensayo No 1			Ensayo No 2		Promedio % que pasa
	No. Malla	Abertura (mm)	% que pasa	Abertura (mm)	% que pasa	
Mecánico	3/8 "	9.53	100.00	9.53	100.00	100.00
	No. 4	4.75	99.72	4.75	99.36	99.54
	No. 8	2.36	98.49	2.36	98.34	98.42
	No.10	2.00	98.07	2.00	97.84	97.96
	No.16	1.18	95.78	1.18	95.44	95.61
	No.30	0.60	90.21	0.60	89.84	90.03
	No.50	0.30	83.27	0.30	82.80	83.03
	No.100	0.15	75.27	0.15	74.62	74.95
	No.200	0.075	68.30	0.075	67.81	68.06
Hidrometría	Hidrometría	0.02747439	44.40	0.02777142	43.07	43.74
	Hidrometría	0.01802527	40.17	0.01802527	39.92	40.05
	Hidrometría	0.01056340	38.06	0.01066646	36.77	37.41
	Hidrometría	0.00761450	35.95	0.00765033	34.66	35.30
	Hidrometría	0.00545993	33.83	0.00550979	32.56	33.20
	Hidrometría	0.00271913	30.13	0.00276601	27.84	28.98
	Hidrometría	0.00116736	26.43	0.00117909	25.21	25.82
	Hidrometría	0.00084299	25.00	0.00084055	24.16	24.58
	Hidrometría	0.00069627	24.63	0.00069391	23.79	24.21

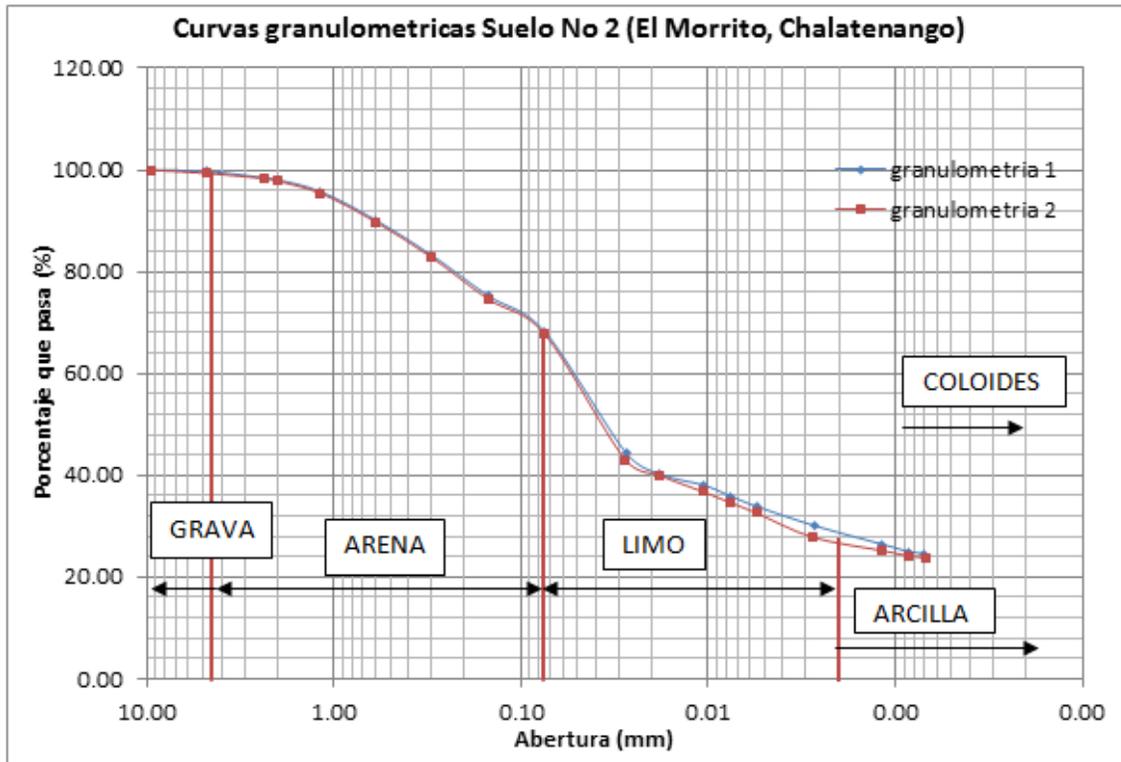
FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

De la Tabla No 5.7, se puede observar que este tipo de material corresponde a un suelo fino, con arena, cuya distribución de tamaños es la siguiente:

- % retenido en la malla No 200: 31.94, con un 31.48 que corresponde al tamaño de arena y un 0.46 al tamaño de grava;
- % que pasa la malla No 200: 68.06, con un 39 a un 41 de tamaño limo y un rango entre 27 y 29 de arcilla (valores obtenidos a partir de las curvas granulométricas, ver Gráfica No 5.2); la distribución de los tamaños para este tipo de material se encuentra resumida en la Tabla No 5.8.

La Gráfica No 5.2 que se presenta a continuación, proporciona la curva granulométrica correspondiente a los ensayos realizados a dicho suelo. De ésta se han obtenido los porcentajes de los tamaños correspondientes a la fracción fina, y a su vez, los porcentajes de coloides.

Gráfica No 5.2: Curvas Granulométricas del Suelo No 2.



FUENTE: De los autores (gráfica obtenida a partir de los resultados de la Tabla No 5.7).

Tabla No 5.8: Porcentaje de gruesos y finos del suelo No 2*.

Material	Ensayo No 1	Ensayo No 2	Promedio	Clasificación
%Grava	0	1	0.5	Limo Arenoso Arcilloso
%Arena	31	32	31.5	
%Limo	39	41	40.0	
%Arcilla	29	27	28.0	
%Total	100	100	100	

*Los valores contenidos en la Tabla No 5.8 para cada ensayo se aproximan al entero, ya que los porcentajes de limos y arcillas se obtienen de la gráfica No 5.2 con una precisión hasta la unidad, por lo tanto, para determinar los valores de grava y arena, es necesario aproximar a la unidad los datos procedentes de la Tabla No 5.7.

FUENTE: De los autores (datos obtenidos de la gráfica No 5.2).

La Gráfica No 5.2 representa las granulometrías de los dos ensayos realizados; el comportamiento de ambas curvas es casi el mismo. Por lo que, en base a los valores promedios de la Tabla No 5.8, se pueden observar que en la fracción gruesa: grava es

despreciable (0.5), arena es de 31.5%; la fracción fina: los limos representan un 40.0% y las arcillas un 28.0%. El tamaño predominante en este material es el limo con un alto contenido de arena y arcilla, por lo que en base al sistema de Unificado de clasificación de Suelos (SUCS), este material correspondería a un: *Limo Areno Arcilloso*.

Para este caso, se prevé que el porcentaje de arena estabiliza al material, disminuyendo su plasticidad y consecuentemente su hinchamiento.

De la Gráfica No 5.2, se han obtenido los porcentajes que corresponden a tamaños menores de 0.002 mm (arcilla) y menores a 0.001 mm (coloides), los que se encuentran resumidos en la Tabla No 5.9.

Tabla No 5.9: Porcentaje de arcilla y coloide para el suelo No 2.

% <0.002mm		Promedio
Granulometría 1	29	28.0
Granulometría 2	27	
% <0.001 (coloides)		Promedio
Granulometría1	26	25.5
Granulometría2	25	

FUENTE: De los autores (datos obtenidos de la gráfica No 5.2).

5.2.4.3 Suelo No 4.2 (Nueva Concepción, Chalatenango).

En la Tabla No 5.10 se encuentran los resultados de los tres ensayos realizados al material del suelo No 4.2, y en la Gráfica No 5.3 se encuentran las curvas granulométricas que servirán para su correspondiente análisis.

Tabla No 5.10: Resultados de los ensayos granulométricos para el suelo No 4.2 (Nueva Concepción, Chalatenango).

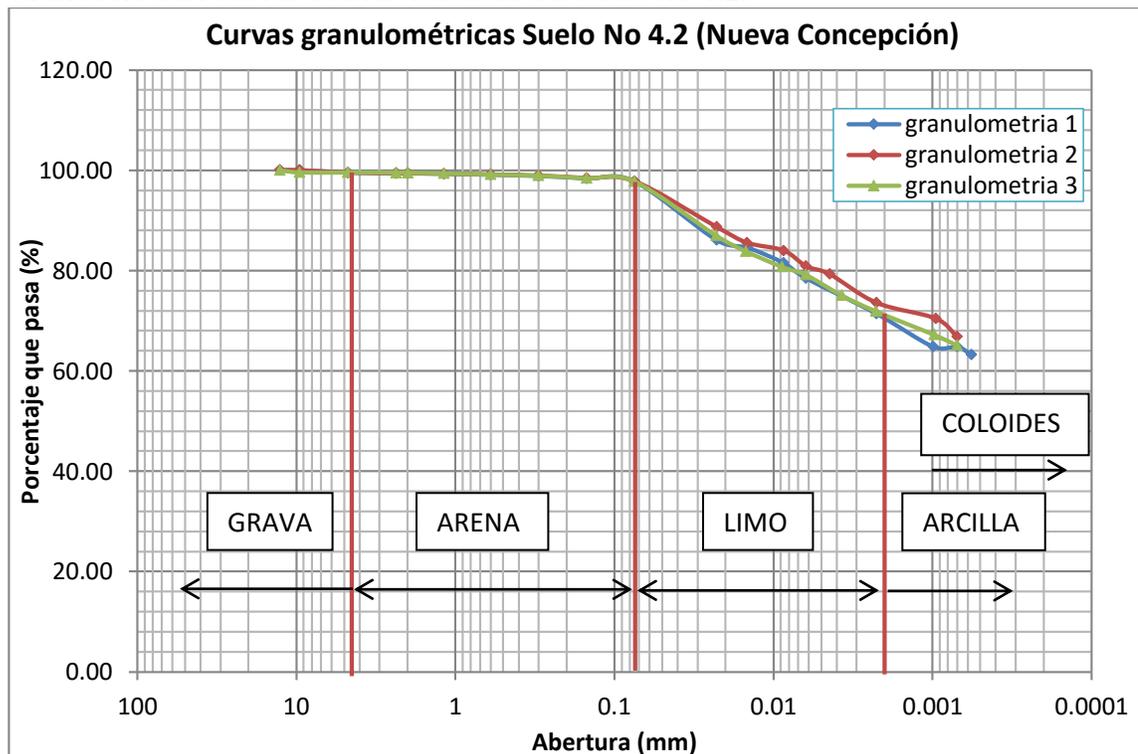
Método	Ensayo No 1			Ensayo No 2		Ensayo No 3		Promedio
	No. malla	Abertura (mm)	% que pasa	Abertura (mm)	% que pasa	Abertura (mm)	% que pasa	% que pasa
Mecánico	1/2"	12.7	100.00	12.7	100.00	12.70	100.00	100.00
	3/8 "	9.53	100.00	9.53	100.00	9.53	99.58	99.86
	No. 4	4.75	99.52	4.75	99.52	4.75	99.58	99.54
	No. 8	2.36	99.41	2.36	99.41	2.36	99.54	99.45
	No.10	2.00	99.39	2.00	99.39	2.00	99.52	99.43
	No.16	1.18	99.28	1.18	99.31	1.18	99.39	99.33
	No.30	0.60	99.09	0.60	99.17	0.60	99.17	99.14
	No.50	0.30	98.85	0.30	98.93	0.30	98.93	98.90
	No.100	0.15	98.35	0.15	98.45	0.15	98.44	98.41
No.200	0.075	97.78	0.075	97.82	0.075	97.80	97.80	
Hidrometría	Hidrometría	0.02279430	86.06	0.02279430	88.70	0.02296897	87.00	87.25
	Hidrometría	0.01452685	84.55	0.01474531	85.57	0.01496058	83.87	84.66
	Hidrometría	0.00863750	81.51	0.00863750	84.00	0.00882064	80.74	82.08
	Hidrometría	0.00623714	78.47	0.00623714	80.87	0.00627971	79.18	79.51
	Hidrometría	0.00225072	71.40	0.00444043	79.31	0.00370460	75.04	75.25
	Hidrometría	0.00098740	64.80	0.00225072	73.59	0.00227834	71.91	70.10
	Hidrometría	0.00069917	64.80	0.00095501	70.46	0.00097748	67.22	67.49
	Hidrometría	0.00057126	63.28	0.00069832	66.78	0.00070288	65.11	65.06

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

De la Tabla No 5.10, se puede observar que este tipo de material, corresponde a un suelo fino, cuya distribución de tamaños es la siguiente:

- % retenido en la malla No 200: 2.20, con un 1.74 que corresponde al tamaño arena y un 0.46 al tamaño grava.
- % que pasa la malla No 200: 97.80, con un 25 a un 27 de tamaño limo y un rango entre 71 y 73 de arcilla (valores obtenidos a partir de las curvas granulométricas, ver Gráfica No 5.3). La distribución de los tamaños para este tipo de material se encuentra resumida en la Tabla No 5.11.

Gráfica No 5.3: Curvas Granulométricas del Suelo No 4.2.



FUENTE: De los autores (gráfica obtenida a partir de los resultados de la Tabla No 5.10).

La Gráfica No 5.3 representa las granulometrías de los tres ensayos realizados, el comportamiento de las curvas es casi el mismo. Por lo que, en base a los valores promedios de la Tabla No 5.11, se pueden observar que en la fracción gruesa: la grava es despreciable, arena es de 2.0%; la fracción fina: los limos representan un 26.3% y las arcillas un 71.7%. El tamaño predominante en este material es la arcilla con un alto contenido de limo, por lo que en base al sistema de Unificado de clasificación de Suelos (SUCS), este material correspondería a una: *Arcilla Limosa*.

En este caso, por su alto porcentaje de Arcilla, se espera que su comportamiento sea característico de un material plástico, presentando plasticidad y Expansividad.

Tabla No 5.11: Porcentaje de gruesos y finos del suelo No 4.2*.

Material	Ensayo No 1	Ensayo No 2	Ensayo No 3	Promedio	Clasificación
%Grava	0	0	0	0.0	Arcilla Limosa
%Arena	2	2	2	2.0	
%Limo	27	25	27	26.3	
%Arcilla	71	73	71	71.7	
%Total	100	100	100	100.0	

*Los valores contenidos en la Tabla No 5.11 para cada ensayo se aproximan al entero, ya que los porcentajes de limos y arcillas se obtienen de la gráfica No 5.3 con una precisión hasta la unidad, por lo tanto, para determinar los valores de grava y arena, es necesario aproximar a la unidad los datos utilizados de la Tabla No 5.10.

FUENTE: De los autores (datos obtenidos de la gráfica No 5.3).

De la Gráfica No 5.3, se han obtenido los porcentajes que corresponden a tamaños menores de 0.002mm (arcilla) y menores a 0.001mm (coloides), los que se encuentran resumidos en la Tabla No 5.12.

Tabla No 5.12: Porcentaje de arcilla y coloide.

% <0.002mm		promedio
Granulometría 1	71	71.7
Granulometría 2	73	
Granulometría 3	71	
% <0.001 (coloides)		promedio
Granulometría 1	65	67.7
Granulometría 2	71	
Granulometría 3	67	

FUENTE: De los autores (datos obtenidos de la gráfica No 5.3).

5.2.4.4 Suelo No 6 (Metapán).

En la Tabla No 5.13 se presentan los resultados obtenidos para los ensayos granulométricos del suelo No 6, y en la Gráfica No 5.4 las correspondientes curvas granulométricas.

Tabla No 5.13: Resultados de ensayo de granulometría para el suelo No 6 (Metapán).

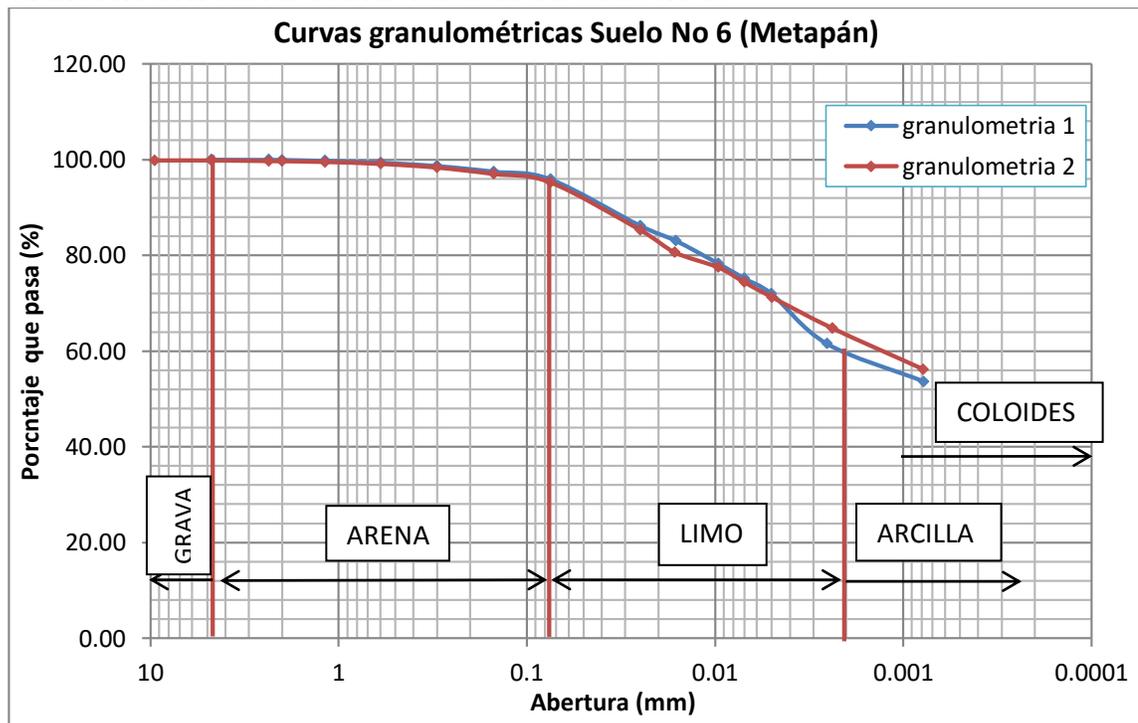
Método	Ensayo No 1			Ensayo No 2		Promedio
	No. Malla	Abertura (mm)	% que pasa	Abertura (mm)	% que pasa	% que pasa
Mecánico	½"	12.7	100.00	12.7	100.00	100.00
	3/8"	9.53	100.00	9.53	99.82	99.91
	No. 4	4.75	100.00	4.75	99.82	99.91
	No. 8	2.36	99.97	2.36	99.69	99.83
	No.10	2.00	99.94	2.00	99.66	99.80
	No.16	1.18	99.77	1.18	99.50	99.63
	No.30	0.60	99.38	0.60	99.10	99.24
	No.50	0.30	98.68	0.30	98.32	98.50
	No.100	0.15	97.51	0.15	96.99	97.25
	No.200	0.075	95.91	0.075	95.22	95.57
Hidrometría	Hidrometría	0.02513449	86.38	0.02513449	85.46	85.92
	Hidrometría	0.01622881	83.22	0.01644666	80.77	81.99
	Hidrometría	0.00968108	78.48	0.00968108	77.64	78.06
	Hidrometría	0.00701672	75.32	0.00701672	74.51	74.92
	Hidrometría	0.00505044	72.16	0.00500887	71.38	71.77
	Hidrometría	0.00255764	61.65	0.00252855	64.90	63.27
	Hidrometría	0.00078104	53.74	0.00078619	56.29	55.02

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

De la Tabla No 5.13, se puede observar que este tipo de material, corresponde a un suelo fino, cuya distribución de tamaños es la siguiente:

- % retenido en la malla No 200: 4.43, con un 4.34 que corresponde al tamaño arena y un 0.09 al tamaño grava;
- % que pasa la malla No 200: 95.57, con un 32 a un 36 de tamaño limo y un rango entre 60 y 63 de arcilla (valores obtenidos a partir de las curvas granulométricas, ver Gráfica No 5.4); la distribución de los tamaños para este tipo de material se encuentra resumida en la Tabla No 5.14.

Gráfica No 5.4: Curvas Granulométricas del Suelo No 6.



FUENTE: De los autores (gráfica obtenida a partir de los resultados de la Tabla No 5.13).

La Gráfica No 5.4 representa las granulometrías de los ensayos realizados, el comportamiento de las curvas es casi el mismo. Por lo que, en base a los valores

promedios de la Tabla No 5.14, se pueden observar que en la fracción gruesa: grava es despreciable, arena es de 4.5%; la fracción fina: los limos representan un 34.0% y las arcillas un 61.5%. El tamaño predominante en este material es la arcilla con un alto contenido de limo, por lo que en base al sistema de Unificado de clasificación de Suelos (SUCS), este material correspondería a una: *Arcilla Limosa*.

Tabla No 5.14: Porcentaje de gruesos y finos del suelo No 6*.

Material	Ensayo No 1	Ensayo No 2	Promedio	Clasificación
%Grava	0	0	0.0	Arcilla Limosa
%Arena	4	5	4.5	
%Limo	36	32	34.0	
%Arcilla	60	63	61.5	
%Total	100	100	100.0	

*Los valores contenidos en la Tabla No 5.14 para cada ensayo se aproximan al entero, ya que los porcentajes de limos y arcillas se obtienen del gráfico No 5.4 con una precisión hasta la unidad, por lo tanto, para determinar los valores de grava y arena, es necesario aproximar a la unidad los datos utilizados de la Tabla No 5.11.

FUENTE: De los autores (datos obtenidos de la Gráfica No 5.4).

De la Gráfica No 5.4, se han obtenido los porcentajes que corresponden a tamaños menores de 0.002mm (arcilla) y menores a 0.001mm (coloides), los que se encuentra resumidos en la Tabla No 5.15.

Tabla No 5.15: Porcentaje de arcilla y coloide.

% <0.002mm		Promedio
Granulometría 1	60	61.5
Granulometría 2	63	
% <0.001 (coloides)		Promedio
Granulometría 1	55	56.5
Granulometría 2	58	

FUENTE: De los autores (datos obtenidos de la gráfica No 5.4).

5.2.4.5 Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque).

En la Tabla No 5.16, se presentan los resultados de los ensayos granulométricos del suelo No 10, y en la Gráfica No 5.5 las curvas granulométricas correspondientes a estos.

Tabla No 5.16: Resultados de ensayo de granulometría para suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque).

Método	Ensayo No 1			Ensayo No 2		Promedio
	No. Malla	Abertura (mm)	% que pasa	Abertura (mm)	% que pasa	% que pasa
Mecánico	No. 4	4.75	100.00	4.75	100.00	100.00
	No. 8	2.36	99.99	2.36	100.00	99.99
	No.10	2.00	99.99	2.00	99.99	99.99
	No.16	1.18	99.87	1.18	99.71	99.79
	No.30	0.60	99.57	0.60	98.93	99.25
	No.50	0.30	99.11	0.30	97.68	98.40
	No.100	0.15	98.30	0.15	95.52	96.91
	No.200	0.075	97.33	0.075	93.18	95.26
Hidrometría	Hidrometría	0.02305624	83.60	0.02335543	79.38	81.49
	Hidrometría	0.01521177	77.63	0.01508447	76.52	77.08
	Hidrometría	0.00907438	73.15	0.00900234	72.23	72.69
	Hidrometría	0.00649727	71.66	0.00648688	69.37	70.51
	Hidrometría	0.00472637	67.93	0.00443965	65.08	66.50
	Hidrometría	0.00237110	61.28	0.00234574	60.14	60.71
	Hidrometría	0.00103512	55.98	0.00102461	55.07	55.53
	Hidrometría	0.00098573	54.49	0.00097173	53.64	54.06
	Hidrometría	0.00073797	53.00	0.00073334	53.64	53.32
	Hidrometría	0.00061015	53.00	0.00060858	52.21	52.60

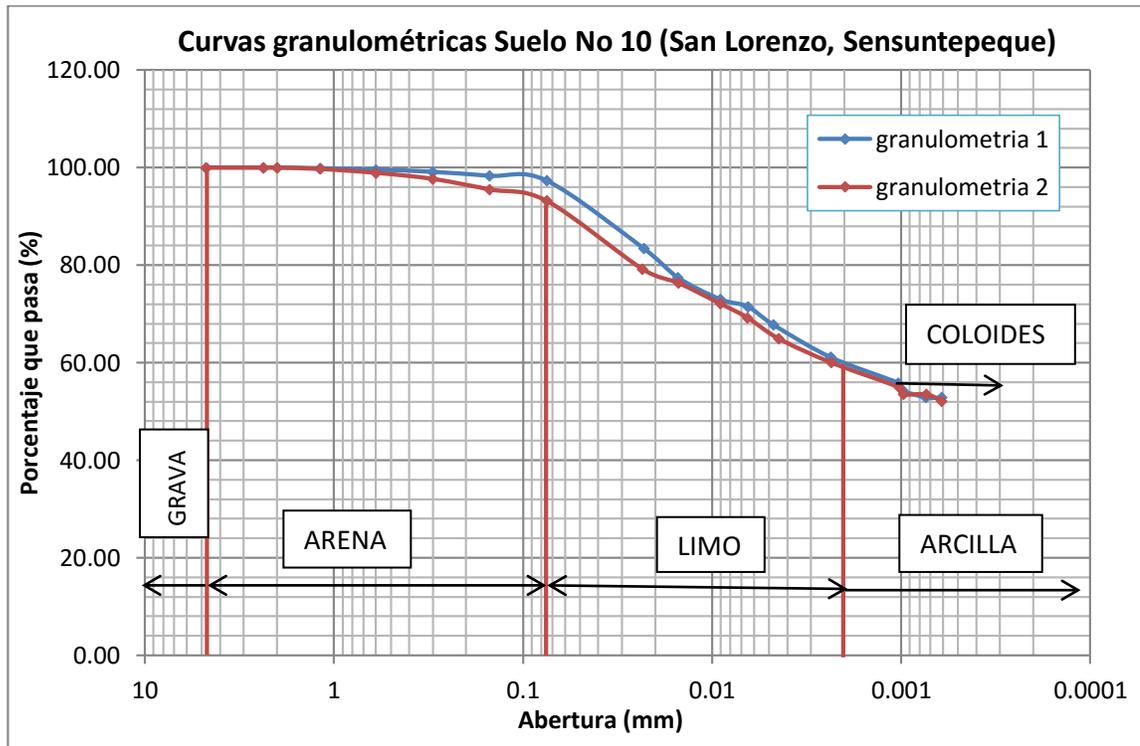
FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, año 2015.

De la Tabla No 5.16, se puede observar que este tipo de material, corresponde a un suelo fino, cuya distribución de tamaños es la siguiente:

- % retenido en la malla No 200: 4.74, que corresponde al tamaño arena.

- % que pasa la malla No 200: 95.26, con un 34 a un 37 de tamaño limo y un rango entre 59 y 60 de arcilla (valores obtenidos a partir de las curvas granulométricas, ver Gráfica No 5.5); la distribución de los tamaños para este tipo de material se encuentra resumida en la Tabla No 5.17.

Gráfica No 5.5: Curvas Granulométricas Suelo No 10.



FUENTE: De los autores (gráfica a partir de resultados de Tabla No 5.16).

La Gráfica No 5.5 representa las granulometrías de los ensayos realizados, el comportamiento de las curvas es casi el mismo. Por lo que, en base a los valores promedios de la Tabla No 5.17, se pueden observar que en la fracción gruesa: grava es despreciable, arena es de 5.0%; la fracción fina: los limos representan un 35.5% y las arcillas un 59.5%. El tamaño predominante en este material es la arcilla con un alto

contenido de limo, por lo que en base al sistema de Unificado de clasificación de Suelos (SUCS), este material correspondería a una: *Arcilla Limosa*.

Tabla No 5.17: Porcentaje de finos y gruesos del suelo No 10.

Material	Ensayo No 1	Ensayo No 2	Promedio	Clasificación
%Grava	0	0	0.0	Arcilla Limosa
%Arena	3	7	5.0	
%Limo	37	34	35.5	
%Arcilla	60	59	59.5	
%Total	100	100	100.0	

FUENTE: De los autores (datos obtenidos de la gráfica No 5.5).

De la Gráfica No 5.5, se han obtenido los porcentajes que corresponden a tamaños menores de 0.002mm (arcilla) y menores a 0.001mm (coloides), los que se encuentra resumidos en la Tabla No 5.18.

Tabla No 5.18: porcentaje de arcilla y coloide.

% <0.002mm		Promedio
Granulometría 1	60.0	59.5
Granulometría 2	59.0	
% <0.001 (coloides)		Promedio
Granulometría 1	55.0	55.0
Granulometría 2	55.0	

FUENTE: De los autores (Datos obtenidos de la gráfica No 5.5).

5.2.5 Límite de Contracción.

A continuación, se presenta en la Tabla No 5.19 los resultados obtenidos en el ensayo de límite de contracción para cada suelo, así como también el índice de contracción (según lo definen los autores **Ranganatham & Satyanarayana**)⁴⁵.

Tabla No 5.19: Resultados de los ensayos de límite de contracción (LC) e índice de contracción (IC).

Procedencia del material	LL	LC	IC	Clasificación
Suelo No 6 (Metapán)	68	16	52	Arcilla limosa
Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango)	61	15	46	Arcilla limosa
Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	63	23	40	Arcilla limosa
Suelo No 4.2 (Nueva Concepción, Chalatenango)	61	26	35	Arcilla limosa
Suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango)	36	12	24	Limo areno arcilloso

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, año 2015.

El límite de contracción representa la humedad a partir de la cual los suelos experimentan cambios volumétricos, a su vez, el límite líquido corresponde a la humedad hasta la cual el material se comporta de forma plástica; por lo que el índice de contracción será el rango de humedad (fase semisólida y plástica), correspondiente a los cambios de volumen. Muchos autores como **Holtz y Gibbs (1956)** definen que mientras más pequeño sea el límite de contracción mayor será el hinchamiento; por su parte el índice de contracción propuesto por los autores **Ranganatham & Satyanarayana**, es directamente proporcional al hinchamiento.

⁴⁵ En el capítulo No 2, apartado No 2.7.2 los autores Ranganatham & Satyanarayana definen un índice de contracción igual a la diferencia entre límite líquido y límite de contracción, el cual se usa para la clasificación del potencial de expansión.

De acuerdo a lo antes mencionado se realiza el siguiente análisis:

- ✓ El Suelo No 6 presenta un LC de 16% y un IC de 52%, en relación a los demás suelos se esperaría sea el que experimente los mayores hinchamientos, ya que su IC es el mayor de los 5 suelos.
- ✓ Suelo No 1 tiene un IC de 46% y un LC de 15%, este se espera que sea el segundo suelo que más expanda.
- ✓ Suelo No 10 presenta un IC de 40% y es el suelo del que se esperaría altos hinchamientos pero menores al suelo No1, ya que efectivamente posee un valor de IC menor y un LC mayor, respecto a los suelos No 6 y No 1.
- ✓ Suelo No 4.2 con un IC de 35% se espera tenga un valor de hinchamiento más bajo a los tres antes mencionados, en relación a su LC de 26% se espera tenga hinchamientos menores.
- ✓ Suelo No 2, es el suelo del que se esperan los menores hinchamientos por el hecho de tener el menor valor de IC igual a 24%, aunque presente el menor valor de LC igual a 12%.

Al revisar los resultados del límite de contracción y índice de contracción para los suelos existen unas contradicciones en los resultados como el del suelo No 6 con un IC de 52% que significa que presenta hinchamientos altos; y un valor de LC =16% que es típico de suelos que presentan hinchamientos bajos, por lo que este comportamiento se puede atribuir a que el potencial expansivo de cada material no solo dependerá de un valor bajo de LC, sino también del límite líquido, que dependen del porcentaje de

arcilla y del tipo de minerales arcillosos. En ese caso su Límite Líquido debe ser alto y su Límite de Contracción bajo.

5.2.6 Caracterización de los suelos.

Con los resultados obtenidos de los ensayos realizados, se ha determinado la clasificación de cada suelo en estudio, así como sus características de plasticidad, que nos proporcionan una idea del comportamiento al hinchamiento y retracción que puede tener cada uno.

A continuación, se presenta la Tabla No 5.20 donde se resumen todos los parámetros de identificación como: el Índice de Plasticidad, Gravedad Específica, Porcentajes de Grava, Arena, Limo y Arcillas, entre otros.

Tabla No 5.20: Caracterización y propiedades de los suelos en estudio.

Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango)			Suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango)			Suelo No 4.2 (Nueva Concepción, Chalatenango)			Suelo No 6 (Metapán)			Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque)		
Color:		Café claro	Color:		Gris claro	Color:		Café-rojizo	Color:		Negro	Color:		Café-Naranja
Wn %	28.6		Wn%	6.2		Wn%	25.6		Wn%	25.0		Wn%	24.7	
LL%	61	*Arcilla de alta plasticidad (CH)	LL%	36	*Arcilla de baja plasticidad (CL)	LL%	61	*Limo de alta compresibilidad (MH)	LL%	68	*Arcilla de alta plasticidad (CH)	LL%	63	*Limo de alta compresibilidad (MH)
LP%	30		LP%	17		LP%	35		LP%	30		LP%	40	
IP%	31		IP%	19		IP%	26		IP%	38		IP%	23	
LC%	15		LC%	12		LC%	26		LC%	16		LC%	23	
Gs	2.63		Gs	2.59		Gs	2.67		Gs	2.50		Gs	2.67	
Grava	0.0	**Arcilla limosa	Grava	0.5	**Limo arenoso arcilloso	Grava	0.0	**Arcilla limosa	Grava	0.0	**Arcilla limosa	Grava	0.0	**Arcilla limosa
Arena	4.5		Arena	32.0		Arena	2.0		Arena	4.5		Arena	5.0	
Limo	47.0		Limo	40.0		Limo	26.3		Limo	34.0		Limo	35.5	
Arcilla	48.5		Arcilla	28.0		Arcilla	71.7		Arcilla	61.5		Arcilla	59.5	

*Clasificación de referencia (en base a plasticidad).

**Clasificación definitiva (en base a granulometría y plasticidad).

FUENTE: De los autores (tabla resumen de ensayos de caracterización expuestos en los apartados anteriores).

Al clasificar los suelos a través del sistema SUCS, combinando las características granulométricas y de plasticidad se obtiene lo siguiente: Cuatro suelos son Arcillo Limosos y un suelo es Limo Areno Arcilloso. El suelo No 1 es una Arcilla Limosa de alta plasticidad de color café claro (CH); el suelo No 2 es un Limo Areno Arcilloso de baja compresibilidad, color gris claro (ML); el suelo No 4.2 es una Arcilla Limosa de alta plasticidad, de color café rojizo (CH); el suelo No 6 por su parte es una Arcilla Limosa de alta plasticidad de color negro (CH), y el suelo No 10 es una Arcilla Limosa altamente plástica, de color café naranja (CH) (Ver Tabla No 5.20). De acuerdo a la relación que existe entre plasticidad e hinchamiento, se puede decir que son directamente proporcionales; es decir, a mayor plasticidad mayor hinchamiento, por ello se espera que el suelo No 1 y No 6 sean los que presenten mayores hinchamientos. La relación que existe entre gravedad específica y su clasificación tiene correspondencia, ya que los valores para arcillas o arcillas limosas, por lo general se encuentra en el rango de 2.50 a 2.80, y en efecto, los valores obtenidos para los 5 suelos oscilan entre 2.50 a 2.67.

5.2.7 Clasificación del potencial expansivo del material en base a propiedades índices.

En el capítulo No 2, en el apartado 2.7.2 (De la Tabla No 2.16 a No 2.23), se presentan ciertas correlaciones de diferentes autores que nos permiten determinar la expansión de un suelo de manera cualitativa, a partir de propiedades índices tales como: límite

líquido, límite plástico, índice de plasticidad, límite de contracción, índice de contracción, porcentaje de coloides, porcentaje de arcillas, entre otros.

En la Tabla No 5.21, se presenta la clasificación del potencial de expansividad de acuerdo a las propiedades antes mencionadas.

Tabla No 5.21: Clasificación de expansividad de acuerdo a propiedades índices*.

Fuente	Parámetro	Suelo No1	Suelo No2	Suelo No4.2	Suelo No6	Suelo No10
Tabla No 2.16	LC	15	12	26	16	23
	Expansividad	Media (12-16)	Media (12-16)	Baja (>15)	Media (12-16)	Baja (>15)
Tabla No 2.17	IP	31	19	26	38	23
	Potencial expansivo	Medio (15-35)	Medio (15-35)	Medio (15-35)	Alto (35-55)	Medio (15-35)
Tabla No 2.18	IP	31	19	26	38	23
	Potencial expansivo	Mediano (15-35)	Mediano (15-35)	Mediano (15-35)	Alto (>35)	Mediano (15-35)
Tabla No 2.19	IP	31	19	26	38	23
	Cambio de volumen	Probablemente alto (>30)	Probablemente moderado(15-30)	Probablemente moderado(15-30)	Probablement e alto (>30)	Probablemente moderado(15-30)
Tabla No 2.20	%coloides	43	26	68	57	55
	Grado de expansión	Muy alto(>28)	Alto(20-31)	Muy alto(>28)	Muy alto(>28)	Muy alto(>28)
Tabla No 2.21	IP	31	19	26	38	23
	Potencial de expansión	Marginal (25-35)	Bajo(<25)	Marginal (25-35)	Alto(>35)	Bajo(<25)
Tabla No 2.22	%arcilla	49	28	72	62	60
	Potencial de expansión	Medio (30-60)	bajo (<30)	Alto (60-95)	Alto (60-95)	Medio (30-60)
Tabla No 2.23	IC=LL-LC	46	24	35	52	40
	Potencial de expansión	Alto (30-60)	Medio(20-30)	Alto(30-60)	Alto(30-60)	Alto(30-60)
Clasificación de Expansividad		Media a alta	Baja a Media	Media a alta	Alto	Media a alta

*Para clasificar el potencial expansivo de un suelo cualitativamente, se hará de acuerdo a la clasificación que más se repita obtenida de las propiedades índices.

FUENTE: De los autores (Valores tomados de los resultados de laboratorio y los parámetros establecidos en el capítulo No 2).

De la Tabla No 5.21 se puede interpretar lo siguiente:

- ✓ Para el suelo No 1 (Santa Bárbara) de acuerdo a los valores de las propiedades índices como Límite de Contracción, Índice de Plasticidad⁴⁶ y Porcentaje de Arcillas, se clasifica como de potencial expansivo medio; con los valores de Índice de contracción, porcentaje de coloide e Índice de Plasticidad³ se clasifica como de potencial expansivo alto. Por lo tanto, se puede concluir que el suelo No 1 posee **potencial de expansividad** que puede oscilar entre **medio** y **alto**. (Ver Tabla No 5.21).
- ✓ Para el suelo No 2 (El Morrito) de acuerdo a los valores de las propiedades índices como Índice de Plasticidad² y Porcentaje de Arcillas se clasifica como de potencial expansivo bajo; con valores de límite de contracción, índice de plasticidad e índice de contracción se clasifica como de potencial expansivo medio; con valores de porcentaje de coloides se clasifica como de potencial expansivo alto. Por lo tanto, se puede concluir que el suelo No 2 posee **potencial de expansividad** que puede oscilar entre **bajo** y **medio** (Ver Tabla No 5.21).
- ✓ Para el suelo No 4.2 (Nueva Concepción) de acuerdo a los valores de las propiedades índices como Límite de contracción se clasifica como de potencial

⁴⁶ En la Tabla No 5.21 se presentan 4 relaciones diferentes de IP con potencial de expansión que lo clasifican en diferentes categorías. Para el IP de cada suelo, podrá ser diferente esta clasificación dependiendo de los rangos establecidos.

expansivo bajo; con el valor de Índice de Plasticidad² se clasifica con potencial expansivo medio; con los valores de porcentaje de arcillas e Índice de contracción como de potencial expansivo alto y con el porcentaje de coloides como muy alto. Por lo tanto, se puede concluir que el suelo No 4.2 posee **potencial de expansividad** que puede oscilar entre **medio y alto** (Ver Tabla No 5.21).

- ✓ Para el suelo No 6 (Metapán) se tiene que con el valor de límite de contracción se clasifica con potencial expansivo medio; con los valores de IP⁴⁷, porcentaje de arcillas e Índice de Contracción como potencial expansivo alto y con el porcentaje de coloides como muy alto. Por lo que, se concluye que el suelo No 6 posee **potencial de expansividad alto** (Ver Tabla No 5.21).
- ✓ Para el suelo No 10 (San Lorenzo) se tiene que con el valor de Límite de Contracción e IP³ se clasifica con potencial expansivo bajo; con el valor de IP³ y Porcentaje de arcillas se clasifica con potencial expansivo medio; con el Índice de contracción se clasifica como potencial expansivo alto y con el porcentaje de coloides como muy alto. Por lo tanto, se concluye que el suelo No 10 posee **potencial de expansividad** que puede oscilar entre **medio y alto** (Ver Tabla No 5.21).

⁴⁷ En la Tabla No 5.21 se presentan 4 relaciones diferentes de IP con potencial de expansión que lo clasifican en diferentes categorías. Para el IP de cada suelo podrá ser diferente esta clasificación dependiendo de los rangos establecidos.

5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE HINCHAMIENTO LIBRE, ENSAYO LAMBE Y PRESIÓN DE HINCHAMIENTO.

El análisis de los resultados de los ensayos de hinchamiento libre, presión de hinchamiento y ensayo Lambe son parámetros muy importantes para definir el comportamiento de los suelos que presentan plasticidad. Los resultados de expansión y presión hinchamiento muestran que las condiciones de humedad inicial y final, relación de vacíos, grado de saturación y densidad húmeda, son parámetros muy importantes para establecer una relación entre los tipos de arcilla y su grado de expansión.

5.3.1 Hinchamiento Libre.

El ensayo de hinchamiento libre es uno de los ensayos de mayor interés en esta investigación, porque nos permite evaluar el máximo hinchamiento que experimenta un suelo cuando se deja saturar.

Durante la ejecución de los ensayos, se requirió en algunos casos, variar el contenido de humedad de la muestra, desde la condición de humedad natural hasta humedades inferiores a estas (ya que las humedades naturales presentes en algunos suelos eran altas, y se requería un mayor rango de hinchamiento en estas). Esto se logró permitiendo la evaporación lenta del agua en las muestras en laboratorio (condiciones controladas), disminuyendo así el contenido de humedad, pero teniendo el cuidado de no llegar al punto de agrietamiento.

A continuación se presentan los resultados del ensayo de hinchamiento libre para los cinco suelos en estudio, cada uno con sus correspondientes humedades, relaciones de vacíos, grado de saturación y densidades húmedas, tanto en su condición inicial y final. Se establece además, a partir de los resultados obtenidos, su comportamiento al hinchamiento versus algunas de las propiedades mencionadas a través de gráficas; sin embargo, para algunos de los suelos no se pudieron plasmar dichas relaciones, ya que no se contaba con suficiente información para ser evaluadas.

5.3.1.1 Resultados de hinchamiento libre para el Suelo No 1.

En la Tabla No 5.22 se presentan los resultados del ensayo de hinchamiento libre para el suelo No 1:

Tabla No 5.22: Resultados del ensayo de hinchamiento libre para el suelo No 1.

No	ΔH (mm)	ΔH_{max} (%)	W_n (%)	w_i (%)	w_f (%)	ΔW	e_i	e_f	Δe	S_i (%)	S_f (%)	ΔS (%)	$\rho(h)_i$ (Kg/m ³)	$\rho(h)_f$ (Kg/m ³)	Carga Kg	A_p cm ²	VM	Ph Kg/cm ²
1	2.9425	15.09	31.0	19.5	33.0	13.5	0.705	0.963	0.257	73	90	17	1843	1782	22	31.67	10	6.95
2	0.9900	5.05	31.0	26.7	39.0	12.3	0.928	1.026	0.097	76	100	24	1728	1804				
3	0.5775	2.96	31.0	27.1	35.8	8.7	0.909	0.966	0.057	78	97	19	1751	1816				
4	0.1500	0.77	31.0	30.6	33.9	3.4	0.904	0.919	0.015	89	97	8	1803	1836				

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

Nota: Al finalizar el ensayo No 1, se decidió cargar la probeta, con el objetivo de conocer con qué presión se lograba obtener una deformación nula (es decir, se le aplicó carga para conocer con qué valor la probeta regresaba a su condición inicial), resultando en un valor de 6.95 Kg/cm².

La nomenclatura usada para cada uno de los parámetros es la que se presenta a continuación:

ΔH : Hinchamiento, mm

ΔH : Hinchamiento, %

W_n : Humedad natural del material de ensayo, %

$W-i$: Humedad inicial de espécimen de ensayo, %

$W-f$: Humedad final de espécimen de ensayo, %

ΔW : Incremento de humedad del espécimen, %

e_i : Relación de vacíos inicial

e_f : Relación de vacíos final

Δe : Incremento en la relación de vacíos

S_i : Grado de saturación inicial, %

S_f : Grado de saturación final, %

ΔS : Aumento del grado de saturación del espécimen, %

$\rho(h) i$: Densidad inicial húmeda del espécimen, (Kg/m³)

$\rho(h) f$: Densidad final húmeda del espécimen, (Kg/m³)

A_p : Área de la probeta, cm²

VM: Ventaja Mecánica

P_h : Presión de hinchamiento, Kg/cm²

Partiendo de los resultados obtenidos en la Tabla No 5.22, se puede determinar lo siguiente:

El suelo en su estado natural presentaba un contenido de humedad del 31.0%, que representa un grado de saturación del 89%.

- Para el ensayo de humedad inicial de 19.5%, con una variación de la humedad natural de 11.5%, se obtuvo un % de hinchamiento libre de 15.09%, consiguiéndose un grado de saturación del 90%.
- Para el ensayo de humedad inicial de 26.7%, con una variación de la humedad natural de 4.3%, se obtuvo un % de hinchamiento libre de 5.05%, consiguiéndose un grado de saturación del 100%.
- Para el ensayo de humedad inicial de 27.1%, con una variación de la humedad natural de 3.9%, se obtuvo un % de hinchamiento libre de 2.96%, consiguiéndose un grado de saturación del 97%.
- Para el ensayo de humedad inicial de 30.6%, cercana a la natural, se obtuvo un % de hinchamiento libre de 0.77%, consiguiéndose un grado de saturación del 97%.

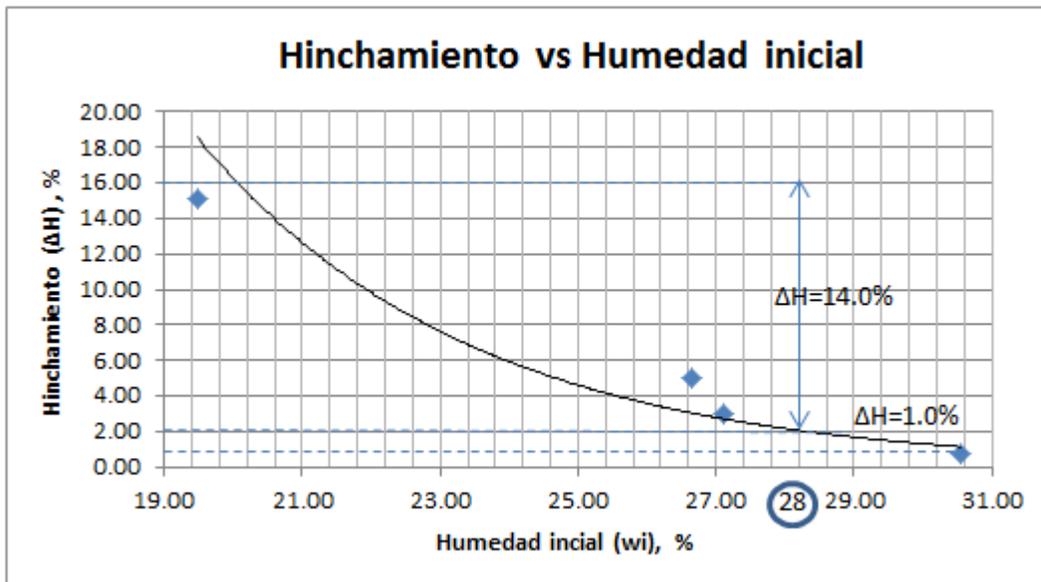
A partir de lo anterior se puede mencionar que a menores humedades iniciales los hinchamientos que experimenta este tipo de suelo son mayores, llegando a obtenerse valores del orden del 15.09% o más.

A continuación se presentan gráficamente las relaciones entre el hinchamiento y algunas relaciones volumétricas y gravimétricas, a partir de los resultados de los ensayos:

Relación entre % de hinchamiento y humedad inicial (Gráfica No 5.6): En dicha gráfica se observa que el hinchamiento es inversamente proporcional a la humedad inicial de ensayo, y que además, la tendencia de los puntos graficados es exponencial.

A partir de la gráfica se puede mencionar que para este suelo, para valores de humedad cercanos a la saturación, las variaciones volumétricas serán pequeñas (la gráfica se vuelve asintótica al eje x), los mayores cambios volumétricos se podrían presentar, para humedades aproximadamente menores a 28%.

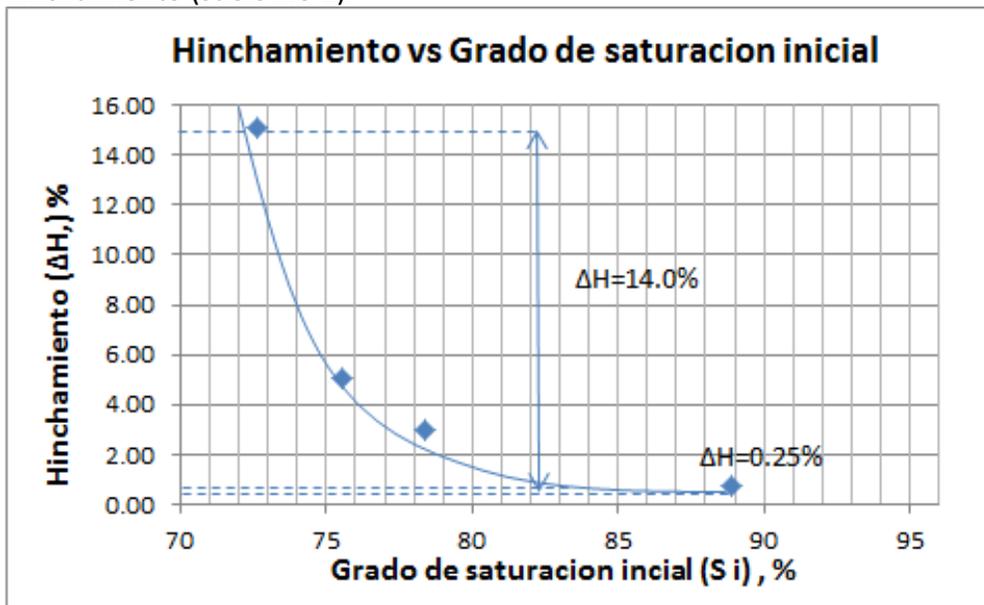
Gráfica No 5.6: Relación entre el % de hinchamiento y humedad inicial (%) del suelo No 1.



FUENTE: De los autores (puntos graficados a partir de los valores de la Tabla No 5.22).

Relación entre grado de saturación inicial vs % de hinchamiento (Gráfica No 5.7): a continuación se presenta la gráfica donde se relaciona el % de hinchamiento y el % de saturación inicial de las muestras ensayadas.

Gráfica No 5.7: Relación entre grado de saturación inicial de la probeta y % de hinchamiento (suelo No 1).



FUENTE: De los autores (puntos graficados a partir de los valores de la Tabla No 5.22).

En la Gráfica No 5.7, se observa la relación inversa que existe entre el % de hinchamiento y el grado de saturación inicial. De ésta se puede observar que a menor grado de saturación inicial, el suelo experimenta mayores hinchamientos, y que la gráfica tiende a volverse asintótica (al eje X), para valores de grados de saturación cercanos al 82%, debajo de este valor el suelo experimentaría sus mayores deformaciones.

5.3.1.2 Resultados de hinchamiento libre para suelo No 2.

De acuerdo a los resultados de la Tabla No 5.23, el hinchamiento para los tres ensayos son similares, debido a que las muestras de suelo, tenían valores de contenido de humedad inicial muy cercanas, además a este suelo no se le sometió a pérdida de humedad debido a que tenía una humedad inicial del 11.2%, suponiendo que con valores menores a este valor, se podría correr el riesgo de agrietar la muestra por pérdida de humedad.

A continuación se presentan algunos resultados de los parámetros obtenidos en los ensayos:

El material en su estado natural, presenta una humedad del 11.2% que corresponde a un grado de saturación del 77% aproximadamente.

1. Para el ensayo de humedad inicial de 11.1%, cercana a la natural, se obtuvo un % de hinchamiento libre de 5.56%, consiguiéndose un grado de saturación del 99%, con una humedad de saturación del 18.7%.
2. Para el ensayo de humedad inicial de 10.6%, cercana a la natural, se obtuvo un % de hinchamiento libre de 5.44%, obteniéndose un grado de saturación del 106%, con una humedad de saturación del 18.8%.
3. Para el ensayo de humedad inicial de 11.2%, igual a la natural, se obtuvo un % de hinchamiento libre de 5.43%, consiguiéndose un grado de saturación del 109%, con una humedad de saturación del 19.7%.

Para este suelo el grado de saturación se logra con un valor de contenido de humedad cercano al 18.7%, con % de hinchamiento máximo del orden del 5.5.

Según la clasificación del suelo No 2, este corresponde a un limo areno arcilloso, con arena en un 32%, limo en un 40% y arcilla en un 28%, las pequeñas expansiones que presenta es debido precisamente a la cantidad de arcilla, en este caso son del orden de 5.50%. El hecho de tener un 32% de arena contribuye a la estabilización de la plasticidad y a reducir el hinchamiento.

Tabla No 5.23: Resultados de hinchamiento de suelo No 2.

No	ΔH (mm)	ΔH_{max} (%)	W_n (%)	$w-i$ (%)	$w-f$ (%)	ΔW	e_i	e_f	Δe	S_i (%)	S_f (%)	ΔS (%)	$\rho (h)_i$ (Kg/m ³)	$\rho (h)_f$ (Kg/m ³)
1	1.0900	5.56	11.2	11.1	18.7	7.7	0.412	0.490	0.078	70	99	29	2038	2064
2	1.0600	5.44	11.2	10.6	18.8	8.3	0.385	0.460	0.075	71	106	35	2067	2108
3	1.0650	5.43	11.2	11.2	19.7	8.5	0.392	0.468	0.076	74	109	35	2068	2226

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

Debido a que los resultados son muy similares, para este ensayo no fue posible realizar correlaciones entre sus propiedades índices.

5.3.1.3 Resultados de hinchamiento libre para suelo 4.2.

En la Tabla No 5.24 se presentan los resultados de los ensayos de hinchamiento libre, para el suelo No 4.2.

El material en su estado natural, presenta una humedad del 27.0% que corresponde a un grado de saturación del 77% aproximadamente.

1. Para el ensayo de humedad inicial de 27.3%, cercana a la natural, se obtuvo un % de hinchamiento libre de 1.03%, consiguiéndose un grado de saturación del 106%, con una humedad de saturación del 38.4%.

2. Para el ensayo de humedad inicial de 27.4%, cercana a la natural, se obtuvo un % de hinchamiento libre de 1.28%, consiguiéndose un grado de saturación del 102%, con una humedad de saturación del 42.1%.

Este suelo presenta hinchamientos bajos, a pesar de ser una arcilla limosa, con un % de arcilla del 71.7 y un % de limo del 26.3, el comportamiento poco plástico de este suelo puede obedecer a la mineralogía del mismo. Este suelo experimenta un hinchamiento máximo del orden de 1.2%.

Tabla No 5.24: Resultados de hinchamientos y relaciones volumétricas del suelo 4.2.

No	ΔH (mm)	ΔH Max (%)	Wn (%)	W-i (%)	w -f (%)	ΔW	ei	ef	Δe	Si (%)	Sf (%)	ΔS (%)	ρ (h)i (Kg/m ³)	ρ (h)f (Kg/m ³)
1	0.2500	1.28	27.0	27.4	42.1	14.7	1.074	1.101	0.027	68	102	34	1640	1806
2	0.2000	1.03	27.0	27.3	38.4	11.1	0.943	0.963	0.020	77	106	29	1749	1882

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

5.3.1.4 Resultados de hinchamiento libre para suelo No 6.

A continuación se presentan los resultados del hinchamiento libre para el suelo No 6 (Tabla No 5.25). En este ensayo se permitió la evaporación lenta del suelo, para verificar la expansión máxima que experimenta.

El material en su estado natural, presentaba una humedad del 23.0% que corresponde a un grado de saturación del 74%.

1. Para el ensayo de humedad inicial de 16.0%, con una variación de la humedad natural de 7.0%, se obtuvo un % de hinchamiento libre de 22.42%, consiguiéndose un grado de saturación del 80%.
2. Para el ensayo de humedad inicial de 19.4%, con una variación de la humedad natural de 3.6%, se obtuvo un % de hinchamiento libre de 15.88%, consiguiéndose un grado de saturación del 81%.
3. Para el ensayo de humedad inicial de 21.8%, con una variación de humedad inicial de 1.2%, se tiene un hinchamiento libre de 10.86%, consiguiendo un grado de saturación del 97%.
4. Para el ensayo de humedad inicial de 23%, que corresponde a la humedad natural, su hinchamiento libre fue de 10.72%, consiguiendo un grado de saturación final de 95%.

De los resultados obtenidos se puede decir que este suelo al dejar humectarse experimentará deformaciones importantes, que serían muy peligrosas para una cimentación.

Para este suelo no se consiguió la saturación al 100%, por lo que se prevé que las expansiones serían mayores a las obtenidas.

Al finalizar los ensayos 1 y 2, se aplicó carga a las probetas para conocer con qué presión se lograba obtener una deformación nula, resultando para ambas un valor de 4.41Kg/cm².

Tabla No 5.25: Resultados de hinchamientos y relaciones volumétricas del suelo No 6.

No	ΔH (mm)	ΔH_{max} (%)	W_n (%)	$w-i$ (%)	$w-f$ (%)	ΔW	e_i	e_f	Δe	S_i (%)	S_f (%)	ΔS (%)	$\rho (h)_i$ (Kg/m ³)	$\rho (h)_f$ (Kg/m ³)	Carga Kg	A_p cm ²	VM	P_h Kg/cm ²
1	4.3725	22.42	23	16.0	29.5	13.5	0.570	0.922	0.352	70	80	10	1855	1692	14	31.77	10	4.41
2	3.0975	15.88	23	19.4	30.0	10.6	0.665	0.930	0.265	73	81	8	1799	1690	14	31.77	10	4.41
4	2.1175	10.86	23	21.8	37.5	15.7	0.753	0.943	0.190	73	97	24	1744	1776				
3	2.0900	10.72	23	23.0	36.8	13.8	0.784	0.976	0.191	74	95	21	1731	1738				

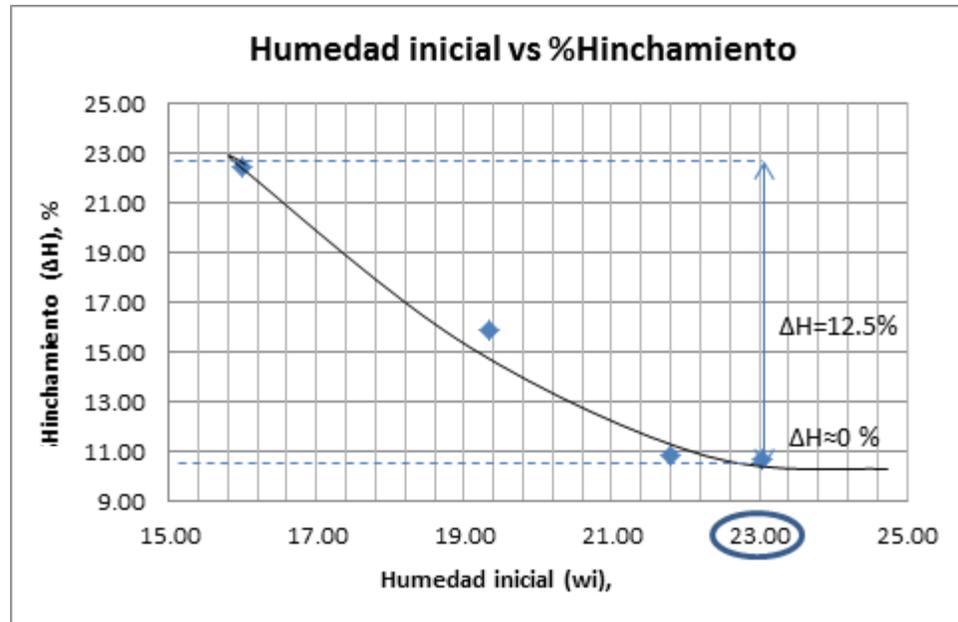
FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

De la Tabla No 5.25 podemos hacer los siguientes análisis:

1) *Relación entre % de hinchamiento y humedad inicial de la probeta (Gráfica No 5.8):* En dicha gráfica se observa que el hinchamiento es inversamente proporcional a la humedad inicial de ensayo, y que además, la tendencia de los puntos graficados es exponencial (Ver Gráfica No 5.8).

A partir de la gráfica se puede mencionar que para este suelo: con valores de humedad cercanos a la saturación, sus variaciones volumétricas serán pequeñas (la gráfica se vuelve asintótica al eje x), los mayores cambios volumétricos se podrán presentar, para humedades iniciales menores a 23.0%.

Gráfica No 5.8: Relación entre % de hinchamiento y humedad inicial del suelo No 6.



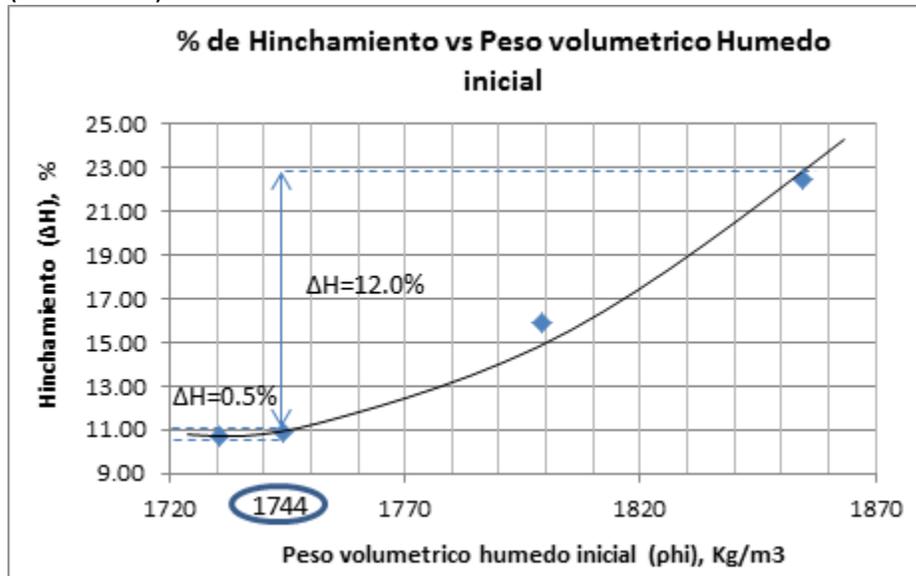
FUENTE: De los autores (puntos graficados a partir de los valores de la Tabla No 5.25).

2) *Relación entre Hinchamiento – densidad húmeda inicial (Gráfica No 5.9):*

En la Gráfica No 5.9, se puede observar la relación proporcional entre la densidad húmeda inicial o peso volumétrico húmedo inicial y el % de hinchamiento. La tendencia que presentan los puntos en este caso es de tipo exponencial (Ver Gráfica No 5.9).

De la gráfica se puede determinar que a mayor densidad, el suelo experimentara mayores hinchamientos cuando se humecta, y que para densidades menores a 1744 Kg/m^3 , la gráfica se vuelve aproximadamente asintótica con el eje de las x, lo que nos indica que por debajo de este valor los hinchamientos serán menores.

Gráfica No 5.9: Relación entre Peso volumétrico húmedo inicial y % de hinchamiento (suelo No 6).



FUENTE: De los autores (puntos graficados a partir de los valores de la Tabla No 5.25).

5.3.1.5 Resultados de hinchamiento libre para suelo No 10.

En la Tabla No 5.26, se presentan los resultados de hinchamiento para este suelo.

La humedad natural del suelo es de 25.3% que corresponde a un grado de saturación del 63%.

- 1) Para el ensayo de humedad inicial de 18.3%, con una variación de la humedad natural de 7.0%, se obtuvo un % de hinchamiento libre de 9.69%, consiguiéndose un grado de saturación del 102%.
- 2) Para el ensayo de humedad inicial de 24.2%, con una variación de la humedad natural de 1.1%, se obtuvo un % de hinchamiento libre de 1.96%, consiguiéndose un grado de saturación del 103%.

- 3) Para el ensayo que se realizó con igual humedad que la natural (25.3%), se obtuvo un hinchamiento de 1.55%, un grado de saturación del 99% y su densidad humedad inicial es de 1651 Kg/m³.
- 4) Otro de los ensayos que se realizó a la humedad natural, dio un hinchamiento de 1.48%, con respecto al anterior ensayo, el hinchamiento de este es menor, debido a que la densidad húmeda inicial fue de 1619 Kg/m³. Se obtuvo un 104% de saturación y su correspondiente humedad de 43%.

Para este suelo los máximos hinchamiento se experimentan con humedades menores al 18%, en el orden de 9.7%.

Tabla No 5.26: Resultados de ensayos de hinchamiento (Suelo No 10).

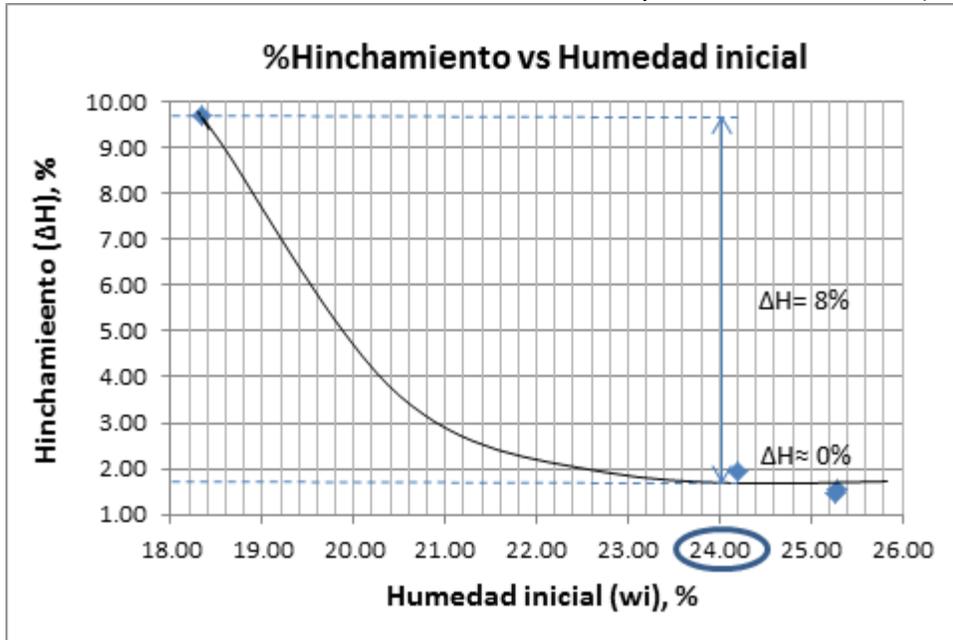
No	ΔH (mm)	ΔH max (%)	Wn (%)	w-i (%)	w-f (%)	ΔW	ei	ef	Δe	Si	Sf	ΔS	ρ (h)i (Kg/m ³)	ρ (h)f (Kg/m ³)
1	1.8900	9.69	25.3	18.3	38.6	20.3	0.834	1.012	0.178	59	102	43	1729	1846
2	0.3825	1.96	25.3	24.2	39.1	14.9	0.981	1.020	0.039	66	103	37	1680	1845
3	0.3025	1.55	25.3	25.3	39.4	14.2	1.033	1.065	0.032	66	99	34	1651	1810
4	0.2925	1.48	25.3	25.3	43.0	11.6	1.074	1.104	0.031	63	104	26	1619	1822

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

De la Tabla No 5.26 podemos hacer los siguientes análisis:

- 1) *Relación entre hinchamiento libre y humedad inicial de la probeta (Gráfica No 5.10):* En dicha gráfica se observa que el hinchamiento es inversamente proporcional a la humedad inicial de ensayo, y que además, la tendencia de los puntos graficados es exponencial. La gráfica se vuelve asintótica al eje X con humedades cercanas a 24%, lo que representa que con humedades debajo de esta, sus hinchamientos serán mayores.

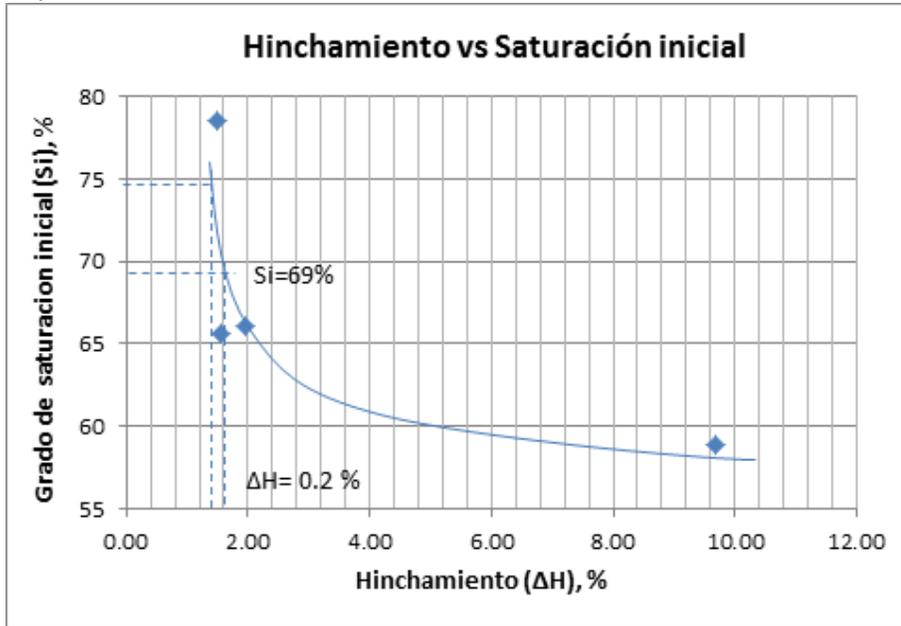
Gráfica No 5.10: Relación entre humedad inicial y % de hinchamiento (suelo No 10).



FUENTE: De los autores (puntos graficas a partir de la Tabla No 5.26).

- 2) *Relación entre grado de saturación inicial e hinchamiento (Gráfica No 5.11):* En dicha gráfica se observa que el hinchamiento es inversamente proporcional al grado de saturación, y que además, la tendencia de los puntos graficados es exponencial, se puede apreciar que con grados de saturación inicial mayores a 69% aproximadamente, sus hinchamientos son mínimos. Se tendrá un mayor hinchamiento cuando el incremento de la humedad de la probeta sea mayor (diferencia entre humedad final e inicial).

Gráfica No 5.11: Relación entre Grado de saturación inicial e hinchamiento (suelo No 10).



FUENTE: De los autores (puntos graficados de la Tabla No 5.26).

5.3.1.6 Correlación entre los resultados obtenidos entre plasticidad e hinchamiento.

Esta correlación es únicamente para los suelos en los que sus propiedades plásticas (índice plástico) y expansivas (hinchamiento máximo), conjuntamente representan una tendencia proporcional. Los valores de hinchamiento seleccionados fueron tomados en base a su correspondiente humedad inicial. Las consideraciones tomadas para elegir dicha humedad, fueron: Que la humedad inicial de uno de los ensayo de cada material fuera lo suficientemente baja, para que el hinchamiento fuera, sino el máximo, un valor cercano a éste. Además, que estas fueran cercanas entre ellas, en este caso la humedad común para los ensayos fue de 19% aproximadamente (Ver línea inferior de la Gráfica No 5.12).

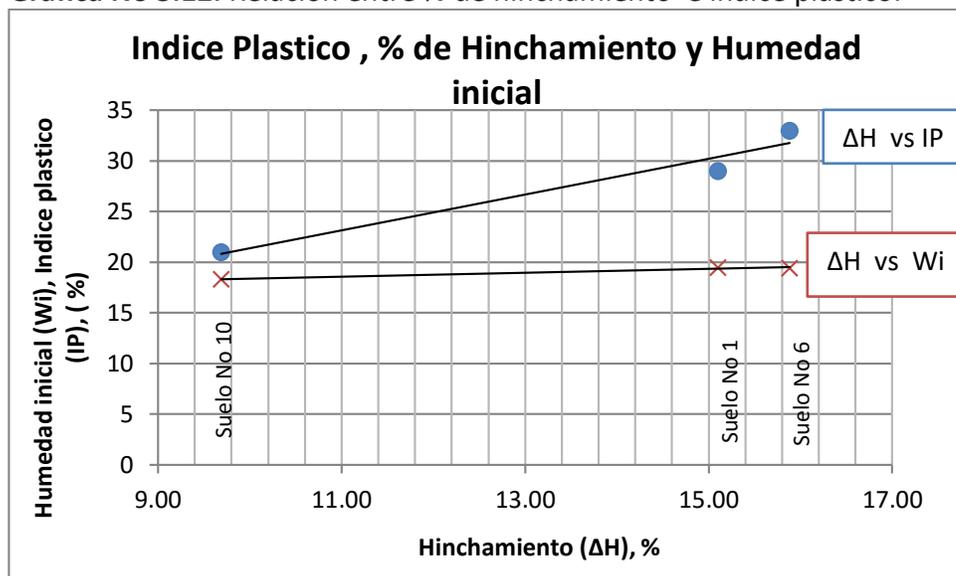
Los suelos que presentan dicha tendencia son: Suelo No 1, Suelo No 6 y Suelo No 10 (Ver Línea superior de la Gráfica No 5.12). Los datos son presentados en la Tabla No 5.27:

Tabla No 5.27: Valores de % de hinchamiento e índice plástico para los suelos seleccionados con su respectiva humedad inicial.

Suelo	ΔH (%)	wi (%)	IP
1	15.09	19.5	31
6	15.88	19.4	38
10	9.69	18.3	23

FUENTE: De los autores, valores tomados de ensayos de hinchamiento libre y límites de consistencia.

Gráfica No 5.12: Relación entre % de hinchamiento e índice plástico.



FUENTE: De los autores (% de Hinchamiento vs índice plástico: o, % de Hinchamiento vs humedad inicial: x)

En dicha gráfica se observa que si se mantiene constante el contenido de humedad para tipos de suelo con diferentes características plásticas, la expansión aumenta a medida que crece la plasticidad.

A partir de estos resultados se confirma, que si se tienen estos materiales como apoyo para una cimentación, experimentarán mayores hinchamientos, aquellos en los que sus características de plasticidad sean mayores.

5.3.2 Ensayo Lambe.

En el ensayo Lambe al igual que en el ensayo de hinchamiento libre, se dejó que el material perdiera un poco de humedad (Ver apartado 5.3.1). El ensayo Lambe se realizó en muestras inalteradas, obteniéndose información importantes como son el Índice de Expansión⁴⁸ (IE) y el Cambio Potencial de volumen (CPV). En la Tabla No 5.28, se presentan los resultados obtenidos para cada suelo en estudio. Y en la Tabla No 5.29 se muestran las categorías de cambio de potencial de volumen.

Cabe mencionar que para el suelo No 4.2 no se presentan resultados, ya que el estado natural del material no permitió obtener una muestra inalterada.

⁴⁸ El índice de expansión obtenido en el ensayo Lambe es equivalente a la presión de hinchamiento

Tabla No 5.28: Resultados del ensayo Lambe para los suelos en estudio.

Procedencia del material	IE (Kg/cm ²)	w _i (%)	w _f (%)	e _i	S _i (%)	S _f (%)	ρ (h) _i (Kg/m ³)	CPV	Categoría
Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango)	0.24	31.1	39.6	1.104	74	94	1639	0.50	NC
	0.29	26.2	33.5	0.931	74	95	1719	0.50	NC
	1.99*	20.1	36.5	0.874	61	109	1686	5.15*	C
Suelo No 2 (El Morrito, Chalatenango)	0.76	9.8	16.4	0.436	58	97	1980	1.80	NC
	0.76	9.5	15.7	0.396	62	103	2033	1.80	NC
Suelo No 6 (Metapán)	0.67*	21.8	29.1	0.810	67	90	1686	1.60*	NC
	1.15	19.8	28.4	0.670	74	106	1798	2.85	M
	1.85	18.1	24.4	0.684	66	89	1757	4.75	C
	1.99	16.3	26.4	0.618	66	106	1800	5.15	C
Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque)	1.37	26.5	37.0	1.021	69	97	1676	3.45	M
	1.85	22.5	34.5	0.830	73	111	1792	4.75	C
	1.85	18.8	34.9	0.858	59	108	1712	4.75	C

*Los valores de CPV que no se tomaron en cuenta, porque se alejan del promedio.

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, año 2015.

Tabla No 5.29: Categoría de cambio potencial de volumen (CPV).

Valor de CPV	Categoría
Menor a 2	No crítico (NC)
De 2 a 4	Marginal (M)
De 4 a 6	Crítico (C)
Mayor a 6	Muy crítico (MC)

FUENTE: De los autores (Valores de CPV establecidos en la guía de ensayo Lambe).

De la Tabla No 5.28 se puede deducir lo siguiente:

- ✓ El suelo No 1 (Santa Bárbara) tiene una humedad inicial en el rango de 20.1% a 31.1% con grado de saturación inicial entre 61% y 74%, llegando a humedades de saturación final entre 33.5% a 39.6% con grados de saturación final correspondientes entre 94% a 109%. El valor de CPV obtenido en promedio es 0.5, con el que se obtiene una categoría de No Crítico (NC). Reflejo de lo anterior es la presión baja de hinchamiento con relación a los otros suelos con valores de 0.24kg/cm² y 0.29kg/cm². En promedio la presión es 0.27kg/cm².
- ✓ El suelo No 2 (El Morrito) tiene una humedad inicial entre 9.5% y 9.8% con un grado de saturación inicial de 58% y 62%, llegando a humedades de saturación cercanas a un 16% con grado de saturación final entre 97% y 103%. El valor de CPV promedio es de 1.80 que lo categoriza como No crítico (NC), con presión de hinchamiento promedio 0.76kg/cm².
- ✓ Para el suelo No 6 (Metapán) se tiene una humedad inicial entre 16.3% a 21.8% con grado de saturación inicial entre 66% a 74%, saturándose con humedades entre 26.4% a 28.4% con grados de saturación final que varían entre 89% a

106%. Presenta valores de CPV de 2.85 que lo clasifican como Marginal, con EI de 1.15kg/cm²; con CPV de 4.75 y 5.15 como Crítico con EI de 1.85kg/cm² y 1.99 kg/cm² respectivamente. Este suelo se categorizara de Marginal (M) a Crítico (C), con EI correspondiente a 1.66kg/cm² en promedio.

- ✓ Para el suelo No 10 (San Lorenzo) se tienen humedades iniciales entre 18.8% a 26.5% con grados de saturación inicial de 59% a 73%, llegando a humedades de saturación entre 34.5% a 37.0% con grado de saturación final entre 97% y 111%. El suelo No 10 presenta valores de CPV de 3.45 que lo clasifica como Marginal con EI de 1.37 kg/cm²; con CPV de 4.75 y 4.75 se clasifica como Crítico, con EI de 1.85kg/cm² y 1.85kg/cm² respectivamente. Este suelo se categorizara de Marginal (M) a Crítico (C), con EI promedio de 1.69kg/cm².

Conociendo la categoría de cambio potencial de volumen para cada suelo, es necesario observar que el Índice de Expansión (presión de hinchamiento) tenga correspondencia con el valor de CPV. Efectivamente, el suelo No 1 y No 2 categorizados como No Críticos, tienen las presiones de hinchamiento más bajas, inferiores a 1 kg/cm². El suelo No 6 y No 10 categorizados como Marginal a Crítico, son los que tiene presiones mayores a 1 kg/cm² y son las más altas de los ensayos Lambe realizados a los suelos en estudio.

5.3.3 Presión de hinchamiento (Volumen constante).

Para el ensayo de presión de hinchamiento se llevaron a cabo un mínimo de 2 pruebas, para cada tipo de suelo, sin embargo en algunos casos fue necesario realizar pruebas adicionales, con el fin de generar la mejor tendencia tanto en la curva de carga como de descarga, y así encontrar el valor de la máxima presión de hinchamiento.

A partir de los resultados obtenidos antes y después del ensayo, se han calculado las relaciones volumétricas del suelo, que servirán para realizar el análisis de los resultados.

El valor de la presión de hinchamiento se obtiene a partir de la gráfica ΔH vs presión, en la curva de carga-descarga, en el punto donde ésta intercepta el eje de las abscisas con la curva de descarga.

Los resultados para cada ensayo, se presentan a continuación.

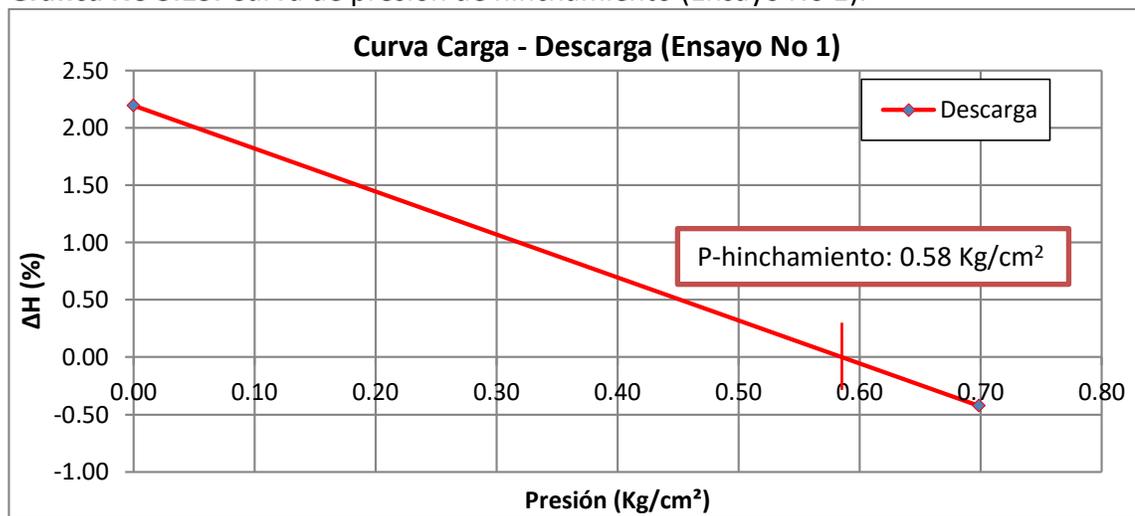
5.3.3.1 Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango).

Las Tablas No 5.30, No 5.31, No 5.32 y No 5.33, contienen las presiones y el diferencial de hinchamiento con los que se grafican las curvas de carga – descarga. Las Gráficas No 5.13, No 5.14, No 5.15 y No 5.16 representan las curvas de carga – descarga y en ellas se obtiene el valor de presión de hinchamiento para cada ensayo.

Tabla No 5.30: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 1).

Etapa	Carga (Kg)	Ventaja mecánica	Área (cm ²)	Presión (Kg/cm ²)	ΔH (%)
Carga	2.00	11	31.67	0.69	-0.42
Descarga	0.00	11	31.67	0.00	2.19

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

Gráfica No 5.13: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 1).

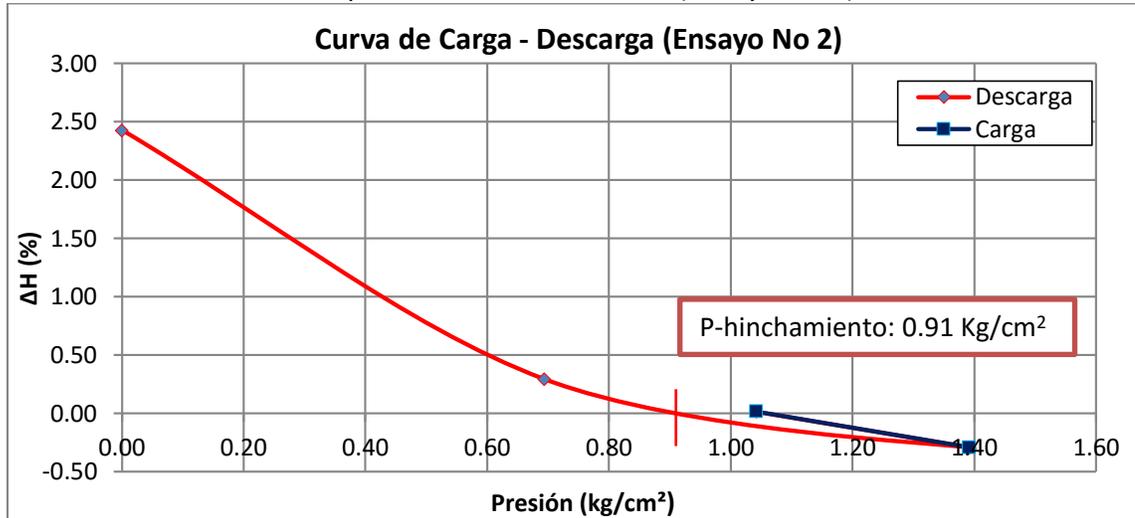
FUENTE: De los autores (gráfica obtenida a partir de los resultados de la Tabla No 5.30).

Tabla No 5.31: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 2).

Etapa	Carga (Kg)	Ventaja mecánica	Área (cm ²)	Presión (Kg/cm ²)	ΔH (%)
Carga	3.00	11	31.67	1.04	0.01
Carga	4.00	11	31.67	1.39	-0.29
Descarga	2.00	11	31.67	0.69	0.29
Descarga	0.00	11	31.67	0.00	2.43

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

Gráfica No 5.14: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 2).



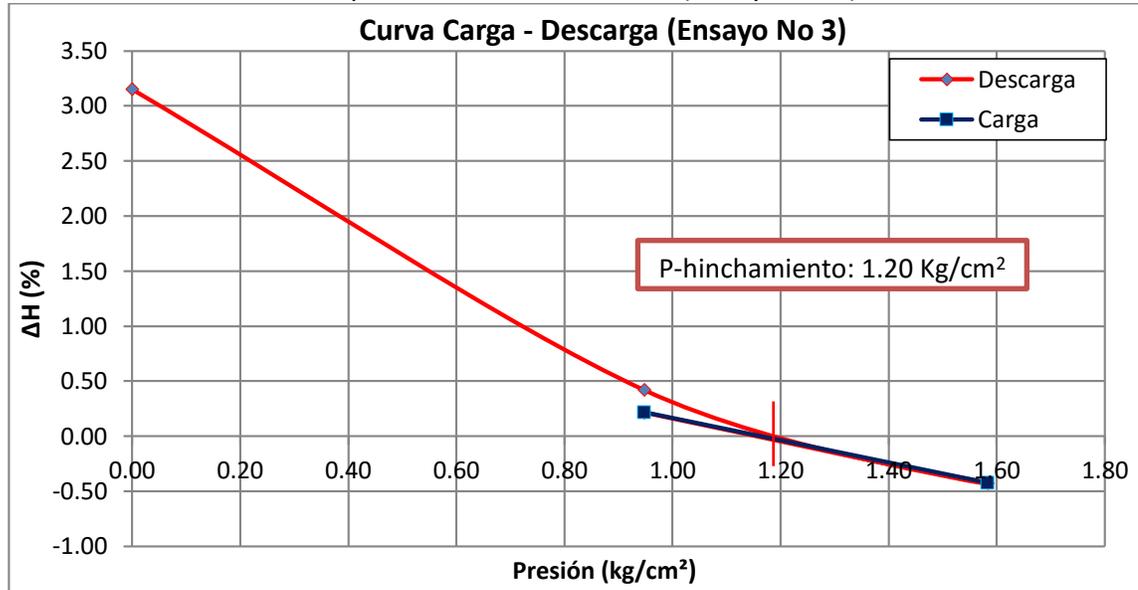
FUENTE: De los autores (gráfica obtenida a partir de los resultados de la Tabla No 5.31).

Tabla No 5.32: Presión vs diferencial de hinchamiento (Ensayo No 3).

Etapa	Carga (Kg)	Ventaja mecánica	Área (cm ²)	Presión (Kg/cm ²)	ΔH (%)
Carga	3.00	10	31.67	0.95	0.22
Carga	5.00	10	31.67	1.58	-0.42
Descarga	3.00	10	31.67	0.95	0.42
Descarga	0.00	10	31.67	0.00	3.15

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

Gráfica No 5.15: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 3).



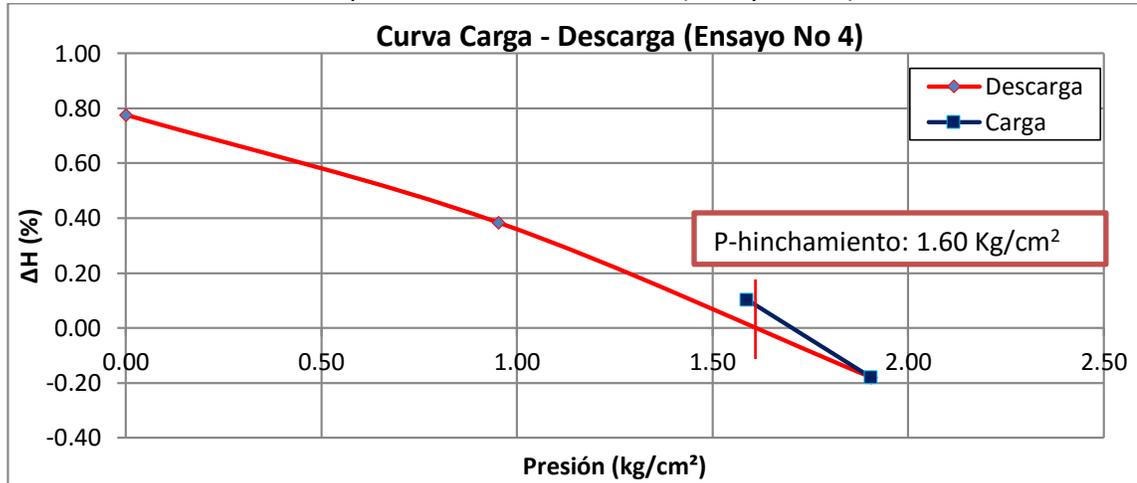
FUENTE: De los autores (gráfica obtenida a partir de los resultados de la Tabla No 5.32).

Tabla No 5.33: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 4).

Etapa	Carga (Kg)	Ventaja mecánica	Área (cm ²)	Presión (Kg/cm ²)	ΔH (%)
Carga	5.00	10	31.67	1.58	0.10
Carga	6.00	10	31.67	1.89	-0.18
Descarga	3.00	10	31.67	0.95	0.38
Descarga	0.00	10	31.67	0.00	0.78

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

Gráfica No 5.16: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 4).



FUENTE: De los autores (gráfica obtenida a partir de los resultados de la Tabla No 5.33).

La Tabla No 5.34, contiene el valor de la presión de hinchamiento obtenido para cada ensayo, además de los valores de las relaciones volumétricas antes y después de la consolidación.

Tabla No 5.34: Resumen de resultados obtenidos para ensayo de presión de hinchamiento para suelo No 1.

No de ensayos	Presión de Hinchamiento (kg/cm ²)	Wi (%)	Wf (%)	ΔW	ei	ef	Δe	Si (%)	Sf (%)	ΔS (%)	ρ (h)i (Kg/m ³)	ρ (h)f (Kg/m ³)
1	0.58*	26	44	18	1.094	1.131	0.036	63.33	102.88	39.56	1591.38	1785.06
2	0.91	23	41	17	0.995	1.045	0.050	62.07	102.83	40.76	1632.63	1816.38
3	1.20	25	43	18	1.036	1.103	0.066	63.38	102.72	39.34	1618.98	1794.21
4	1.60	23	42	19	1.026	1.042	0.016	59.87	106.63	46.77	1606.34	1837.14

*Los valores no son tomados en cuenta por que se alejan de la media.

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

De los resultados del ensayo de presión de hinchamiento a volumen constante presentados en la Tabla No 5.34, se puede observar que los 4 ensayos realizados para el suelo No 1 tienen una humedad inicial que oscila entre 23% y 26%. Estas humedades reflejan un grado de saturación inicial que varía entre 59.87% y 63.38%, y llegan a saturarse con humedades mayores al 40%. Aunque el suelo tiene una humedad inicial relativamente alta, ha expandido lo suficiente como para generar presiones mayores a 1.0 kg/cm² en algunos ensayos, lo que significa que a humedades más bajas se tendrían presiones aún mayores a las obtenidas en estos ensayos. Este suelo está clasificado como arcilla limosa con un IP de 31%, lo que es sinónimo de una alta expansividad. El valor de presión de hinchamiento para este suelo corresponde al valor de 1.24 kg/cm² (Promedio de los ensayos No 2, 3, 4).

5.3.3.2 Suelo No 2 (San Rafael, Chalatenango).

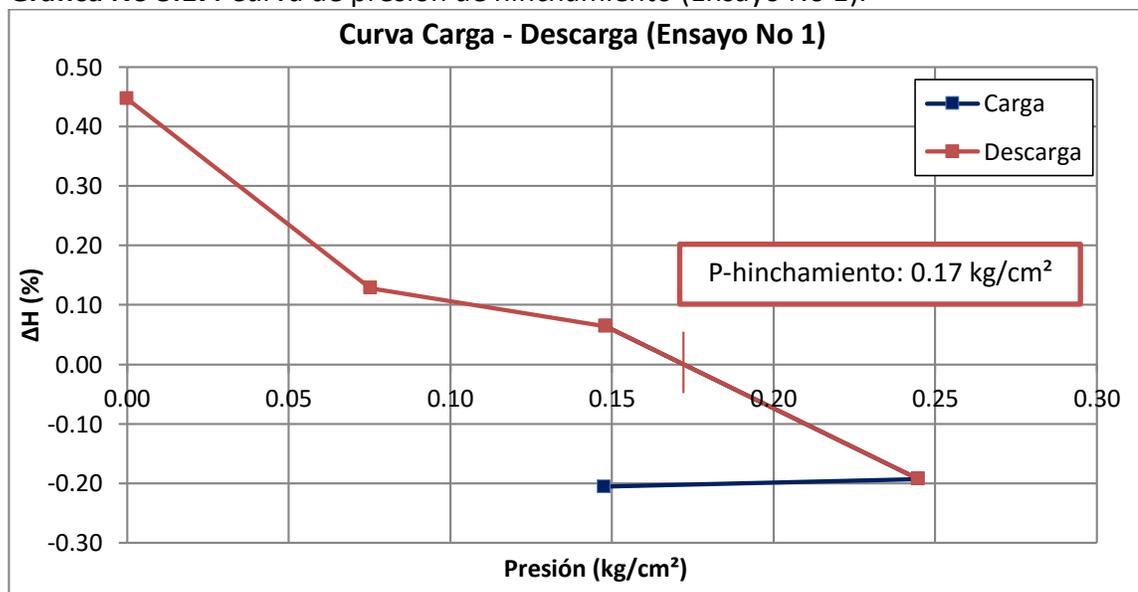
Las Tablas No 5.35, No 5.36, No 5.37 y No 5.38 contienen las presiones y el diferencial de hinchamiento con los que se grafican las curvas de carga – descarga. En las Gráficas No 5.17, No 5.18, No 5.19 y No 5.20 se presenta la curva de carga – descarga de cada ensayo y el valor de presión de hinchamiento obtenido de cada gráfica.

Tabla No 5.35: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 1).

Etapa	Carga (Kg)	Ventaja mecánica	Área (cm ²)	Presión (Kg/cm ²)	ΔH (%)
Carga	0.47	10	31.67	0.15	-0.21
Carga	0.70	10	31.67	0.25	-0.19
Descarga	0.47	10	31.67	0.15	0.06
Descarga	0.24	10	31.67	0.08	0.13
Descarga	0.00	10	31.67	0.00	0.45

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, año 2015.

Gráfica No 5.17: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 1).

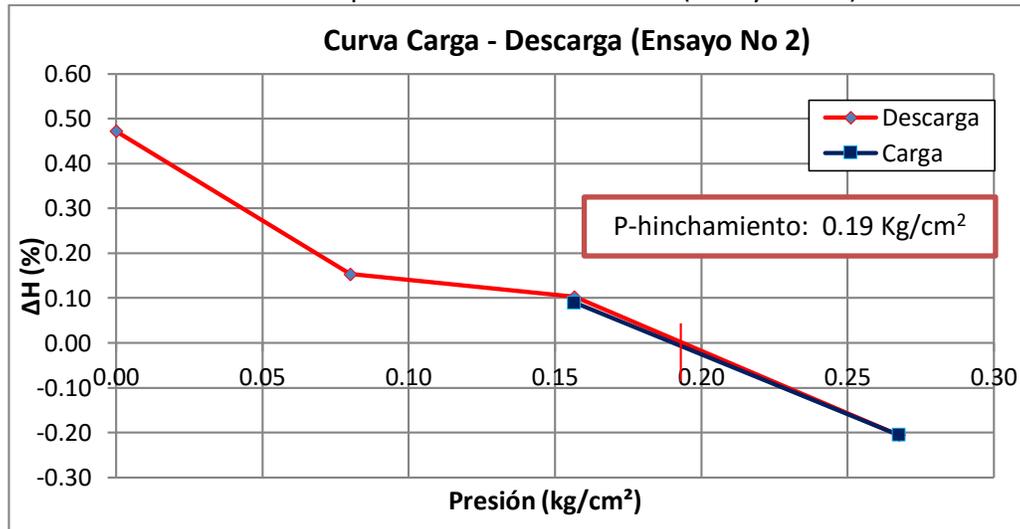


FUENTE: De los autores (gráfica obtenida a partir de los resultados de la Tabla No 5.35).

Tabla No 5.36: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 2).

Etapa	Carga (Kg)	Ventaja mecánica	Área (cm ²)	Presión (Kg/cm ²)	ΔH (%)
Carga	0.49	10	31.57	0.16	0.09
Carga	0.84	10	31.57	0.27	-0.21
Descarga	0.49	10	31.57	0.16	0.10
Descarga	0.25	10	31.57	0.08	0.15
Descarga	0.00	10	31.57	0.00	0.47

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, año 2015.

Gráfica No 5.18: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 2).

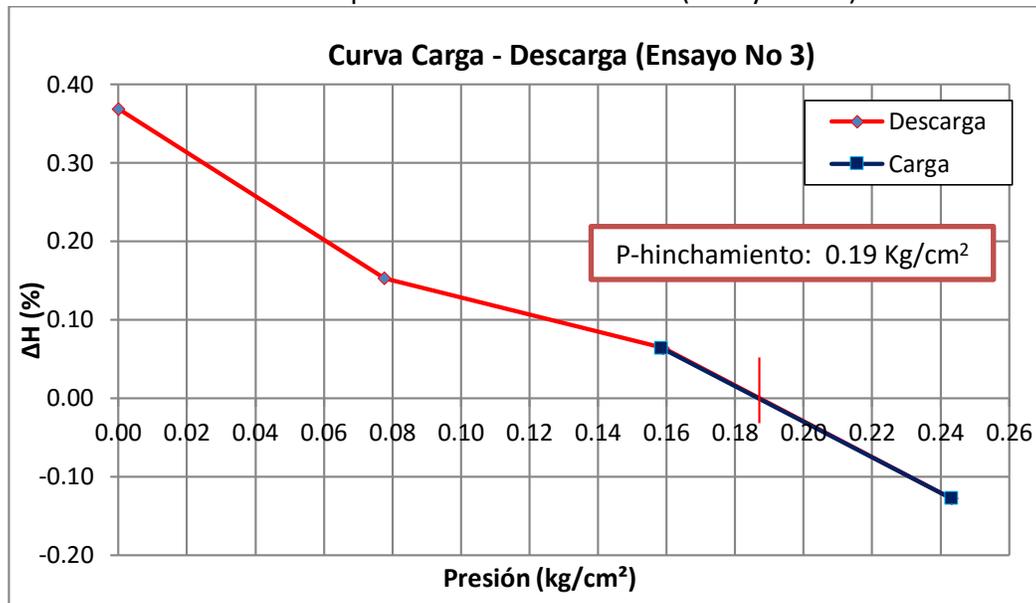
FUENTE: De los autores (gráfica obtenida a partir de los resultados de la Tabla No 5.36).

Tabla No 5.37: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 3).

Etapa	Carga (Kg)	Ventaja mecánica	Área (cm ²)	Presión (Kg/cm ²)	ΔH (%)
Carga	0.50	10	31.67	0.16	0.06
Carga	0.77	10	31.67	0.24	-0.12
Descarga	0.50	10	31.67	0.16	0.06
Descarga	0.25	10	31.67	0.08	0.15
Descarga	0.00	10	31.67	0.00	0.37

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, año 2015.

Gráfica No 5.19: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 3).



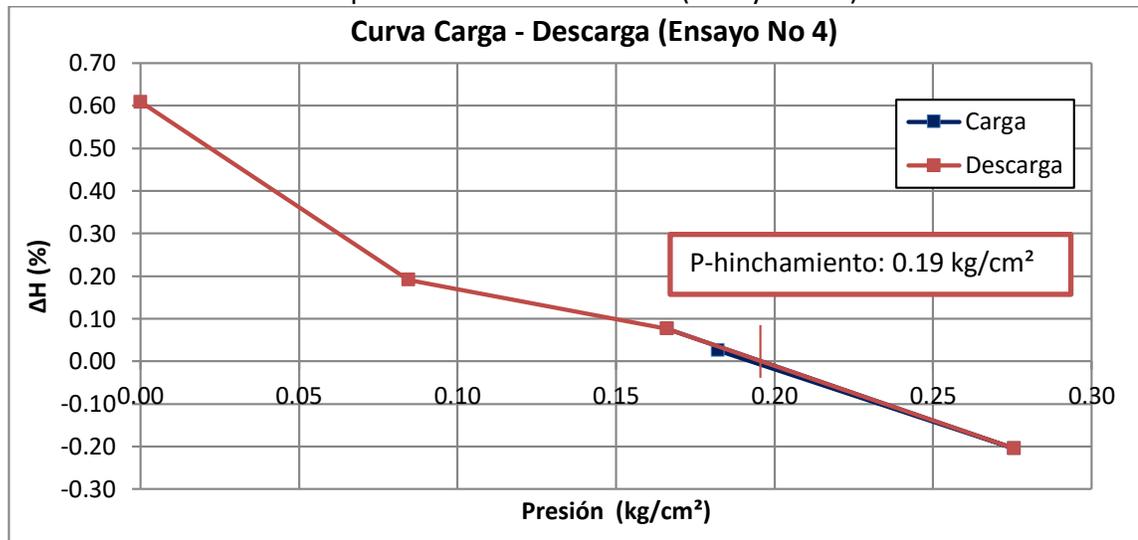
FUENTE: De los autores (gráfica obtenida a partir de los resultados de la Tabla No 5.37).

Tabla No 5.38: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 4).

Etapa	Carga (Kg)	Ventaja mecánica	Área (cm ²)	Presión (Kg/cm ²)	ΔH (%)
Carga	0.52	11	31.67	0.18	0.03
Carga	0.79	11	31.67	0.28	-0.20
Descarga	0.52	11	31.67	0.17	0.08
Descarga	0.27	11	31.67	0.09	0.19
Descarga	0.00	11	31.67	0.00	0.61

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

Gráfica No 5.20: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 4).



FUENTE: De los autores (gráfica obtenida a partir de los resultados de la Tabla No 5.38).

De las Gráficas No 5.17, No 5.18, No 5.19 y No 5.20 se obtiene la presión de hinchamiento para cada ensayo cuando el segmento de descarga de la curva, se intercepta con el eje de las abscisas.

La Tabla No 5.39, contiene el valor de la presión de hinchamiento obtenido para cada ensayo, además de los valores de las relaciones volumétricas antes y después de la consolidación.

Tabla No 5.39: Resumen de resultados obtenidos para ensayo de presión de hinchamiento para suelo No 2.

No de ensayos	Presión de Hinchamiento (kg/cm ²)	Wi (%)	Wf (%)	ΔW	ei	ef	Δe	Si (%)	Sf (%)	ΔS (%)	ρ (h)i (Kg/m ³)	ρ (h)f (Kg/m ³)
1	0.17	13	19	6	0.514	0.521	0.007	66.23	96.01	29.78	1935.39	2031.69
2	0.19	15	18	3	0.435	0.442	0.007	86.60	102.88	16.28	2067.06	2111.30
3	0.19	14	18	4	0.484	0.490	0.006	77.37	93.10	15.73	1997.36	2044.58
4	0.19	10	19	9	0.487	0.496	0.009	53.11	98.77	45.66	1916.17	2059.03

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

De los resultados del ensayo de presión de hinchamiento a volumen constante presentados en la Tabla No 5.39, se puede observar que los 4 ensayos realizados para el suelo No 2 tienen una humedad inicial que oscila entre 10% y 15%. Estas humedades corresponden a un grado de saturación inicial que varía entre 53.11% y 86.60%, y que llegan a saturarse con humedades mayores de 18%. Solo la probeta para el ensayo No 2 se satura por encima de un 100%, los ensayos restantes no logran saturarse, estos alcanzan un 93% a 99% de grado de saturación final. Aunque el suelo tiene una humedad inicial relativamente baja, no se ha hinchado lo suficiente como para generar una gran presión. Está clasificado como Limo Arenoso Arcilloso, con un IP de 19%; la fracción de limo y arena mayor que la de arcilla, disminuye la plasticidad del suelo.

Lo antes mencionado se confirma en la baja presión de hinchamiento obtenida igual a un valor promedio de 0.19 kg/cm² para los 4 ensayos.

5.3.3.3 Suelo No 6 (Metapán).

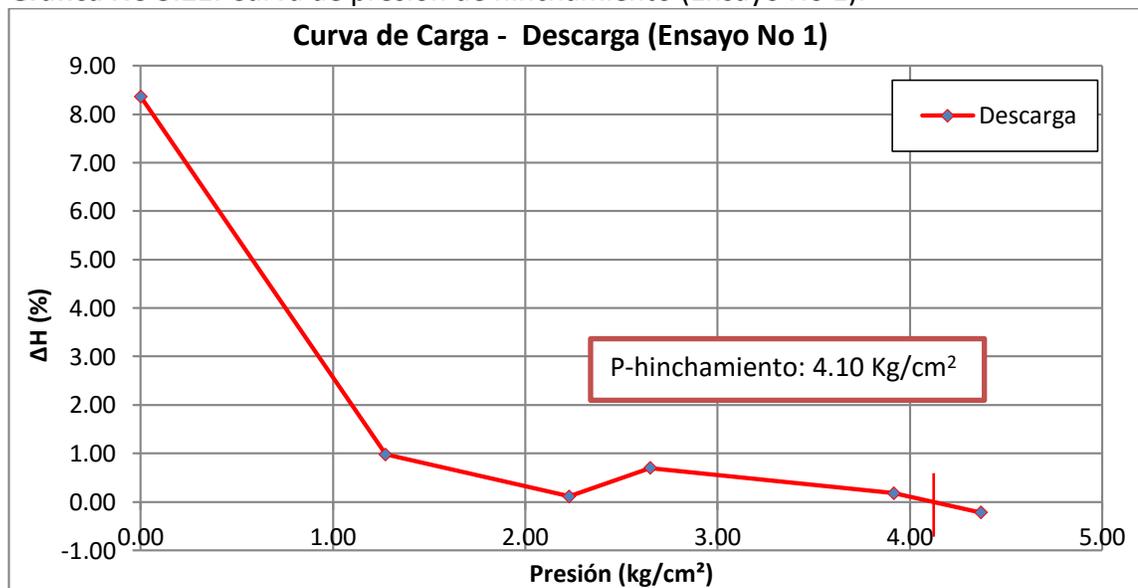
En las Tablas No 5.40, No 5.41 y No 5.42 se presentan las presiones y los diferenciales de hinchamiento con los que se obtienen las gráficas de carga – descarga, representadas en las Gráficas No 5.21, No 5.22 y No 5.23.

Tabla No 5.40: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 1).

Etapa	Carga (Kg)	Ventaja mecánica	Área (cm ²)	Presión (Kg/cm ²)	ΔH (%)
Carga	13.80	10	31.57	4.37	-0.22
Descarga	12.36	10	31.57	3.92	0.18
Descarga	8.36	10	31.57	2.65	0.70
Descarga	7.03	10	31.57	2.23	0.12
Descarga	4.02	10	31.57	1.27	0.98
Descarga	0.00	10	31.57	0.00	8.36

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, año 2015.

Gráfica No 5.21: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 1).

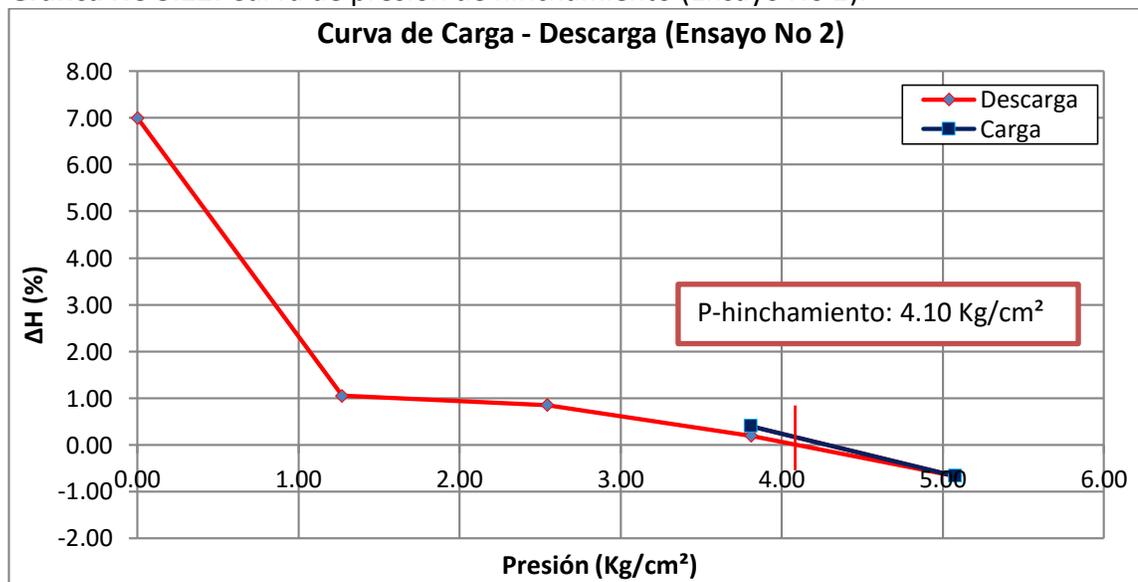


FUENTE: De los autores (gráfica obtenida a partir de los resultados de la Tabla No 5.40).

Tabla No 5.41: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 2).

Etapa	Carga (Kg)	Ventaja mecánica	Área (cm ²)	Presión (Kg/cm ²)	ΔH (%)
Carga	12.03	10	31.57	3.81	0.40
Carga	16.03	10	31.57	5.08	-0.67
Descarga	12.03	10	31.57	3.81	0.19
Descarga	8.03	10	31.57	2.54	0.85
Descarga	4.01	10	31.57	1.27	1.05
Descarga	0.00	10	31.57	0.00	7.00

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

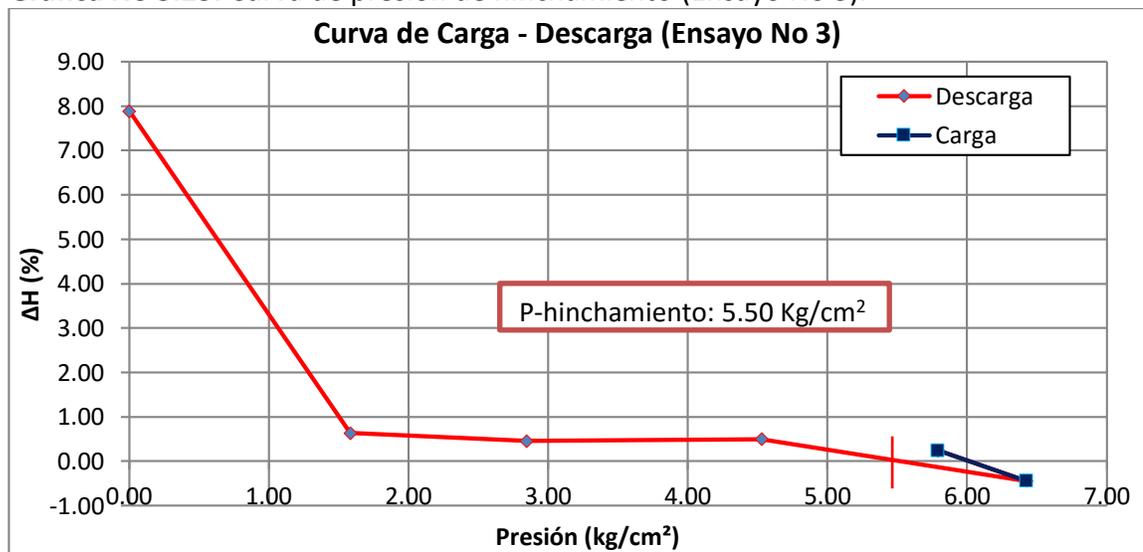
Gráfica No 5.22: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 2).

FUENTE: De los autores (gráfica obtenida a partir de los resultados de la Tabla No 5.41).

Tabla No 5.42: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 3).

Etapa	Carga (Kg)	Ventaja mecánica	Área (cm ²)	Presión (Kg/cm ²)	ΔH (%)
Carga	18.34	10	31.57	5.79	0.24
Carga	20.35	10	31.57	6.43	-0.45
Descarga	14.34	10	31.57	4.53	0.49
Descarga	9.01	10	31.57	2.85	0.46
Descarga	5.01	10	31.57	1.58	0.63
Descarga	0.00	10	31.57	0.00	7.88

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

Gráfica No 5.23: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 3).

FUENTE: De los autores (gráfica obtenida a partir de los resultados de la Tabla No 5.42).

La Tabla No 5.43 contiene los resultados de presión de hinchamiento obtenidos de las Gráficas No 5.21, No 5.22 y No 5.23, así como las relaciones volumétricas antes y después de consolidación.

Tabla No 5.43: Resumen de resultados obtenidos para ensayo de presión de hinchamiento para suelo No 6.

No de ensayos	Presión de Hinchamiento (kg/cm ²)	Wi (%)	Wf (%)	ΔW	ei	ef	Δe	Si (%)	Sf (%)	ΔS (%)	ρ (h)i (Kg/m ³)	ρ (h)f (Kg/m ³)
1	4.10	18	38	20	0.629	0.778	0.149	72.73	122.52	49.79	1821.61	1947.90
2	4.10	19	36	17	0.678	0.804	0.126	70.49	112.37	41.88	1780.84	1892.18
3	5.50	18	37	19	0.639	0.779	0.140	70.95	119.88	48.93	1808.07	1935.76

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", año 2015.

En dicha tabla se puede observar que las humedades iniciales para las probetas de los 3 ensayos son de 18% y 19% con un grado de saturación inicial de 70% aproximadamente, y que superan el 100% de grado de saturación final. Las humedades iniciales son relativamente bajas, lo que significa que el suelo puede llegar a hincharse mucho. El suelo No 6 (Metapán) es el más plástico de los materiales expansivos estudiados con un IP de 38%, indicativo de que es un suelo con potencial expansivo alto. Condiciones como humedades bajas, IP altos y con alta concentración de fracción arcillosa en el material, es sinónimo de un hinchamiento con valores elevados, que conllevan a presiones de hinchamiento altas. La presión de hinchamiento promedio de los 3 ensayos es 4.57 kg/cm².

5.3.3.4 Suelo No 10 (San Lorenzo, Sensuntepeque).

A continuación se presentan los resultados del último suelo en estudio, el suelo No 10.

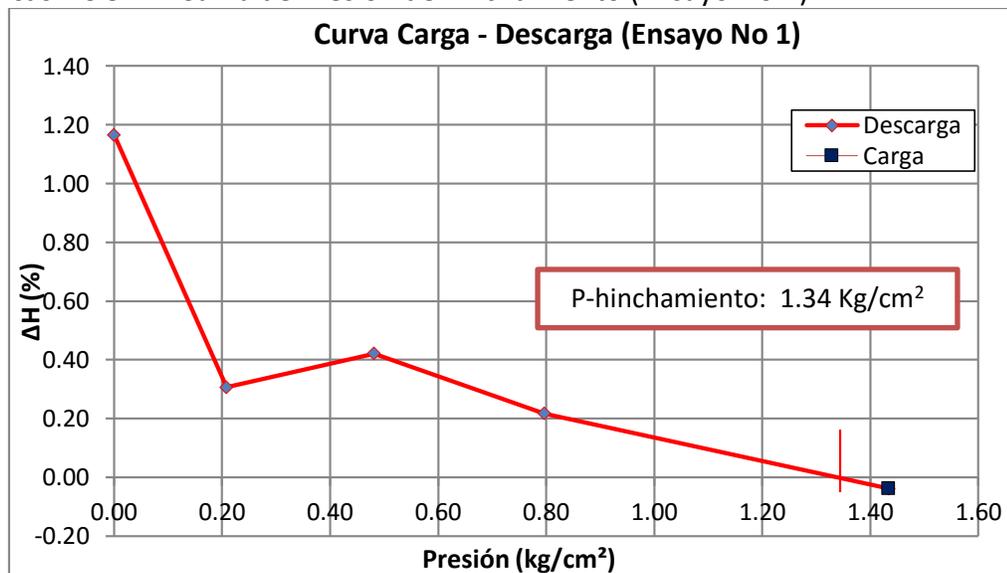
En la Tabla No 5.44 y No 5.45 se encuentran las presiones y diferencial de hinchamiento; en las gráficas No 5.24 y No 5.25 se encuentran las curvas correspondientes a la etapa de carga – descarga.

Tabla No 5.44: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 1).

Etapa	Carga (Kg)	Ventaja mecánica	Área (cm ²)	Presión (Kg/cm ²)	ΔH (%)
Carga	4.53	10	31.57	1.43	-0.04
Descarga	2.52	10	31.57	0.80	0.22
Descarga	1.52	10	31.57	0.48	0.42
Descarga	0.66	10	31.57	0.21	0.31
Descarga	0.00	10	31.57	0.00	1.17

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, año 2015.

Gráficas No 5.24: Curva de Presión de hinchamiento (Ensayo No 1).

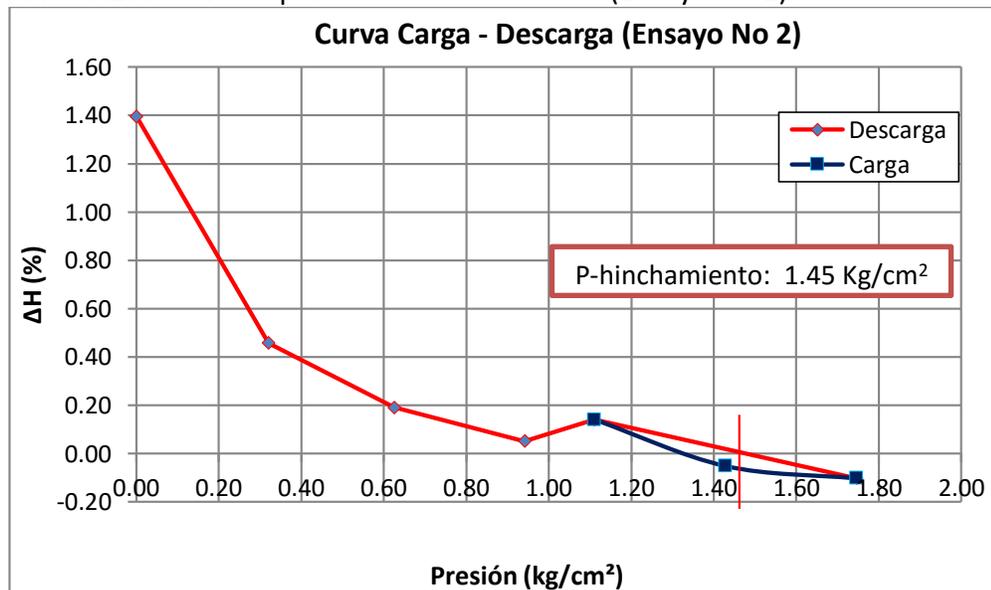


FUENTE: De los autores (gráfica obtenida a partir de los resultados de la Tabla No 5.44).

Tabla No 5.45: Presión vs Diferencial de hinchamiento (Ensayo No 2).

Etapa	Carga (Kg)	Ventaja mecánica	Área (cm ²)	Presión (Kg/cm ²)	ΔH (%)
Carga	3.52	10	31.67	1.11	0.14
Carga	4.52	10	31.67	1.43	-0.05
Carga	5.53	10	31.67	1.75	-0.10
Descarga	3.52	10	31.67	1.11	0.14
Descarga	2.98	10	31.67	0.94	0.05
Descarga	1.98	10	31.67	0.63	0.19
Descarga	1.02	10	31.67	0.32	0.46
Descarga	0.00	10	31.67	0.00	1.40

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", 2015.

Gráfica No 5.25: Curva de presión de hinchamiento (Ensayo No 2).

FUENTE: De los autores (gráfica obtenida a partir de los resultados de la Tabla No 5.45).

En la Tabla No 5.46 se presenta el resumen de la presión obtenida en cada ensayo, y además, las relaciones volumétricas antes y después de consolidación.

Tabla No 5.46: Resumen de resultados obtenidos del ensayo de presión de hinchamiento para suelo No 10.

No de ensayo	Presión de Hinchamiento (kg/cm ²)	Wi (%)	Wf (%)	ΔW	ei	ef	Δe	Si (%)	Sf (%)	ΔS (%)	$\rho (h)i$ (Kg/m ³)	$\rho (h)f$ (Kg/m ³)
1	1.34	13	36	23	0.822	0.844	0.021	41.69	115.14	73.46	1658.85	1980.51
2	1.45	19	38	19	0.943	0.971	0.028	53.60	105.84	52.24	1639.23	1881.16

FUENTE: De los autores, con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", 2015.

El suelo No 10 tiene humedades iniciales de 13% y 19%, que tienen un 41.69% y 53.60% de grado de saturación respectivamente. Las humedades de saturación 36% y 38%, obteniendo un grado de saturación final superior al 100%. Lo expresado anteriormente es indicativo de que las humedades iniciales son relativamente bajas, por lo tanto, el rango de humedades para saturarse es mayor. Este suelo es clasificado como arcilla limosa con un IP de 23%. La presión de hinchamiento promedio es de 1.40 kg/cm².

5.4 RESUMEN DE RESULTADOS DE HINCHAMIENTO LIBRE, ENSAYO LAMBE Y PRESION DE HINCHAMIENTO.

En este apartado se presenta un resumen del análisis de resultados hechos a los suelos en estudio, con el fin de verificar la correspondencia que existe entre la clasificación de Potencial de expansividad cualitativamente y los ensayos de hinchamiento, y de esta forma, determinar cuáles suelos podrían experimentar grandes cambios de volumen. Cabe mencionar que para el ensayo Lambe, solo se retomó la clasificación de Cambio Potencial de Volumen.

A continuación, se presenta la Tabla No 5.47 donde se resume la clasificación cualitativa y los resultados de los ensayos de hinchamiento.

Tabla No 5.47: Resumen de resultados de ensayos de hinchamiento.

Designación	Potencial de expansividad de acuerdo a propiedades índice*	Clasificación de CPV** (Ensayo Lambe)	Hinchamiento Libre (%) (Máximo)	Presión de Hinchamiento Promedio (kg/cm ²)
Suelo No 1	Medio a Alto	No Critico	15	1.24
Suelo No 2	Bajo a Medio	No Critico	6	0.19
Suelo No 4.2	Medio a Alto	-	1	-
Suelo No 6	Alto	Marginal a Critico	22	4.57
Suelo No 10	Medio a Alto	Marginal a Critico	10	1.40

*Clasificación cualitativa

**Cambio Potencial de Volumen.

FUENTE: De los autores.

En la Tabla No 5.48, se presenta una clasificación de potencial de expansividad para los ensayos de hinchamiento libre y presión de hinchamiento.

Tabla No 5.48: Relación entre Potencial de Expansión e Hinchamiento Libre.

Potencial de Expansión	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Hinchamiento Libre (%)	<10	10 - 20	20 - 30	>30
Presión de hinchamiento (Kg/cm ²)	< 1.44	1.44 - 2.39	2.39 - 9.58	> 9.58

FUENTE: Chen, F.H. (1988). "Foundations on Expansive Soils". Elsevier, New York, USA.

De la Tabla No 5.47 y No 5.48 se puede interpretar lo siguiente:

- ✓ El suelo No 1 (Santa Bárbara) está clasificado de manera cualitativa con un Potencial de Expansividad entre Medio a Alto. Del ensayo Lambe se obtiene una clasificación de CPV⁴⁹ No Crítico. Posee un % hinchamiento libre máximo de 15, valor con el que se clasifica con un Potencial de Expansividad Medio, y posee una presión de hinchamiento promedio 1.24kg/cm², con el que es clasificado como Expansividad baja. Se observa que la clasificación obtenida por medio de Lambe y presión de hinchamiento no tienen total correspondencia con las restantes; sin embargo, se determina como un suelo de **Expansividad Media**, ya que propiedades índices como un IP de 31 lo denota como un suelo altamente plástico (según tabla de capítulo 2, No 2.15) y un % de hinchamiento de 15, clasificado en base a dicho valor como de potencial expansivo medio.

⁴⁹ Cambio Potencial de Volumen.

- ✓ El suelo No 2 (El Morrito) está clasificado de manera cualitativa con Potencial de Expansividad que puede oscilar entre Bajo y Medio. Del ensayo Lambe se obtiene una clasificación de CPV No Crítico. Posee un % de hinchamiento máximo de 6, valor con el que se clasifica con un Potencial de Expansividad Bajo; y posee una presión de hinchamiento promedio de 0.19kg/cm^2 , con la que es clasificado de Expansividad baja. A partir de estos resultados se observa que la clasificación cualitativa tiene correspondencia con la obtenida de Lambe y con los ensayos de hinchamiento. Clasificándolo como de **Expansividad Baja**.
- ✓ El Suelo No 4.2⁵⁰ (Nueva Concepción) está clasificado de manera cualitativa con un Potencial de Expansividad de Medio a Alto. Posee un % de hinchamiento de 1; valor con el que se clasifica con un Potencial de expansividad bajo. A partir de estos resultados se observa que la clasificación de Potencial de expansividad en base a propiedades índices no posee concordancia con los resultados de hinchamiento libre. Sin embargo, a este suelo no fue posible realizarle los demás ensayos, ya que la muestra inalterada no permitía formar la probeta, obteniéndose poca o ninguna información de algunos ensayos (Ver Tabla No 5.24). Por lo tanto, el suelo se ha clasificado únicamente de forma cualitativa como de **Expansividad Media a Alta**.

⁵⁰ Para el suelo No 4.2 no fue posible realizar el ensayo Lambe y Presión de hinchamiento, por lo tanto no se tiene una clasificación cualitativa a partir de dichos ensayos.

- ✓ El Suelo No 6 (Metapán) está clasificado de manera cualitativa con un potencial de Expansividad Alto. Del ensayo Lambe se obtiene una clasificación de CPV de Marginal a Critico. Posee un % de hinchamiento máximo de 22, valor con el que se clasifica con un Potencial de expansividad alto. Su presión de hinchamiento es de 4.57 Kg/cm², valor que lo clasifica de Expansividad Alta. A partir de los resultados se observa que las clasificaciones de Potencial de expansividad en base a propiedades índices, de CPV obtenida de Lambe tienen correspondencia con los ensayos de hinchamiento. Este suelo se ha definido de **Expansividad Alta**.
- ✓ El suelo No 10 (Sensuntepeque) está clasificado de manera cualitativa con Potencial de expansividad que puede oscilar de Medio a Alto. Del ensayo Lambe se obtiene una clasificación con un CPV de Marginal a Critico. Posee un % de hinchamiento máximo de 10, valor con el que se clasifica con un potencial de expansividad medio. Su presión de hinchamiento es de 1.40 Kg/cm², y se clasifica de Expansividad Media. Este suelo se ha definido de **Expansividad Media**, ya que la clasificación cualitativa tiene correspondencia con los resultados de los ensayos de hinchamiento realizados.

Se ha comprobado que la clasificación de potencial de Expansividad en base a propiedades índices es la que tiene correspondencia en la mayoría de los suelos con el ensayo de hinchamiento libre. La clasificación obtenida por medio del Ensayo Lambe no en todos los casos es certera, el ensayo no fue lo suficientemente

verídico en relación a los resultados de los otros ensayos de hinchamiento. El ensayo de presión de hinchamiento, de igual manera no en todos los suelos proporcionó un valor característico que sea directamente proporcional con hinchamiento libre. Sin embargo, basado en la experiencia de laboratorio, con las propiedades índices obtenidas y el ensayo de hinchamiento libre, es que se logra dar una clasificación de expansividad de los suelos en estudio. Lambe y presión de hinchamiento a volumen constante son útiles para confirmar lo antes mencionado. Por lo que, se ha podido determinar que un suelo tiene Expansividad baja: Suelo No 2 (El Morrito); tres con Expansividad media: Suelos No 1 (Santa Bárbara), Suelo No 4.2 (Nueva Concepción) y No 10 (San Lorenzo); y un suelo con Expansividad Alta: Suelo No 6 (Metapán).

CAPITULO 6:

APLICACIÓN PRÁCTICA DE

RESULTADOS DE LABORATORIO

6.1 GENERALIDADES.

La presencia de suelos expansivos es sinónimo de alerta en cuanto a obras civiles se refiere, ya que estos tienden a generar daños, en ocasiones el colapso total de ellas. Esto es debido a los cambios volumétricos que pueden experimentar los suelos plásticos al modificarse su contenido de humedad. La intensidad del fenómeno está íntimamente ligada a las condiciones climáticas de la zona. Por ejemplo, cuando está seco, la evaporación supera la precipitación y el terreno se encuentra seco. Al construir una edificación, se impide la evaporación y se induce un aumento del contenido de agua bajo la estructura, siendo mayor en el centro que en los bordes, tardando varios años en manifestarse el problema.

Las consecuencias perjudiciales de la expansión se agudizan en lugares áridos y semiáridos, debido a que la humedad del suelo más superficial es generalmente baja a causa de la evaporación. Las circunstancias antes descritas suelen manifestarse con mayor gravedad en estructuras ligeras, sensibles a movimientos diferenciales, y sobre todo cuando el fenómeno no ha sido previsto desde el punto de vista estructural y geotécnico.

Los daños generados por las arcillas expansivas depende de tres factores que pueden interactuar entre si y que son:

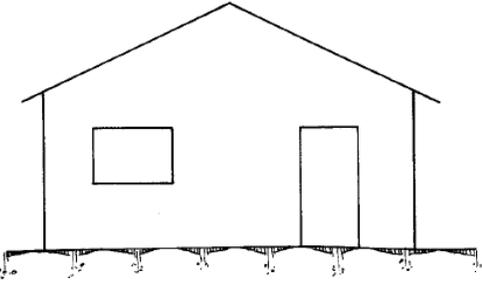
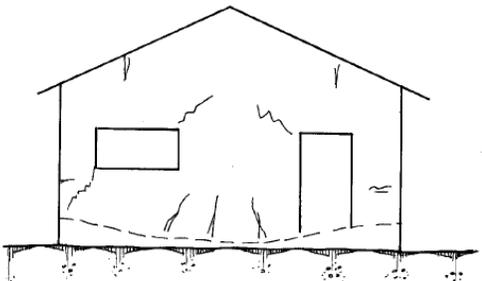
- ✓ La naturaleza geológica y geotécnica del suelo.
- ✓ El grado de expansividad.
- ✓ Cambios de humedad.

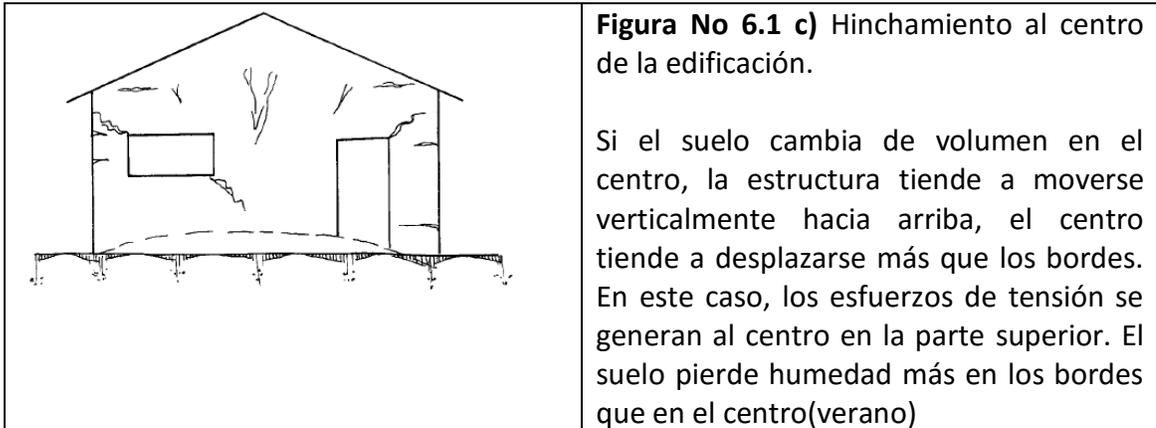
6.2 DAÑOS OCASIONADOS POR SUELOS EXPANSIVOS.

Cuando una edificación no transmite la presión suficiente para evitar el cambio de volumen en un suelo expansivo al saturarse, se ve influenciada por un movimiento brusco seguido de daños graves a la estructura debido al hinchamiento.

En la Figura No 6.1, se muestra como las edificaciones livianas se pueden ver afectadas en las siguientes formas:

Figura No 6.1: Daños comunes en estructuras livianas debido al hinchamiento de suelos expansivos.

	<p>Figura No 6.1 a) Estado inicial.</p> <p>En un principio, el suelo no ha sufrido cambio de volumen alguno, por lo tanto, el sistema estructural no está sometido a un esfuerzo crítico que cause su falla.</p>
	<p>Figura No 6.1 b) Hinchamiento en el borde y contorno de la edificación.</p> <p>Si el suelo cambia de volumen en los bordes a causa del aumento de humedad, la estructura tiende a moverse verticalmente hacia arriba más en los bordes que en el centro, por lo que, se desarrollan esfuerzos de tensión al centro en la parte inferior de la estructura y se generan grietas diagonales.</p>



FUENTE: Oteo Mazo, Salinas Rodríguez. "Mapa previsor de riesgos por expansividad de arcillas en España". 1986.

Dentro de la gran variedad de daños ocasionados a las construcciones debido al fenómeno de expansión de los suelos, se encuentran los siguientes:

- ✓ **Grietas verticales e inclinadas en ambos sentidos:** Estos suelos provocan problemas de fallas estructurales combinado con empujes horizontales, que se manifiesta en fisuraciones en fachadas (Ver Figura No 6.2b).
- ✓ **Grietas y rotura de elementos estructurales:** Grietas de cortante en nudos de conexión de vigas con columna, grietas horizontales y/o inclinadas en vigas, paredes de carga, entre otras. (Ver Figura No 6.2a).

Figura No 6.2: Daños provocados a edificaciones por suelos expansivos.



	<p>Figura No 6.2 b) Grietas inclinadas en fachada principal de vivienda unifamiliar.</p>
	<p>Figura No 6.2 c) Abombamiento de pisos en estructuras livianas.</p>
	<p>Figura No 6.2 d) Asentamiento de estructuras al transmitir demasiada presión al suelo expansivo.</p>

FUENTE: Méndez Salas, Pineda Núñez. Comportamiento de cimentaciones en suelos expansivos.

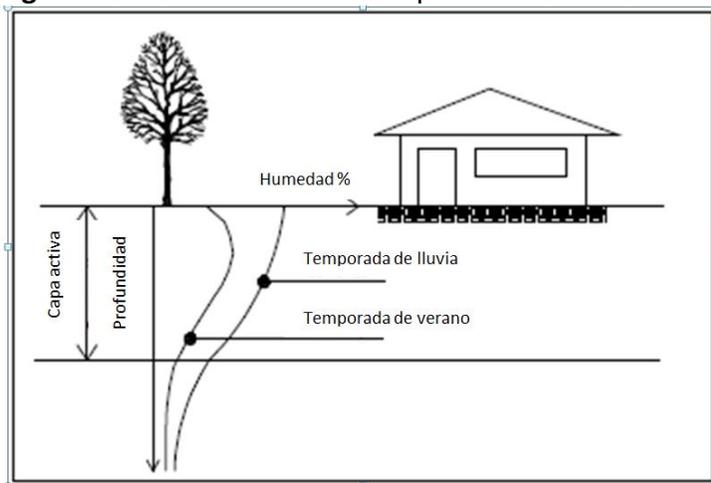
Los daños ocasionados son más severos si el entorno de las edificaciones lo propicia. En el caso del fenómeno hinchamiento – retracción, las condiciones climáticas son quienes lo favorecen, en especial en zonas áridas. Para saber que tan grave puede llegar a ser el

movimiento de arcillas, es necesario introducir el concepto de la capa activa, que se define en el siguiente apartado.

6.3 CAPA ACTIVA.

Los problemas de los suelos expansivos se producen generalmente por el resultado de las fluctuaciones volumétricas que se presentan en un estrato de estos, en un espesor de pocos o varios metros, a consecuencia de variaciones del contenido de agua, el cual se ve influenciado por factores como las condiciones climáticas del medio ambiente. Esta zona es generalmente definida como: **zona activa**. Esta no tiene el mismo espesor en un terreno desnudo (sin construcciones) que en uno cubierto por alguna edificación. (Ver Figura No 6.3).

Figura No 6.3: Variación de la capa activa en un estrato arcilloso.



FUENTE: Baeza Campusano. "Diseño de zapatas continuas de cimentación sobre suelos expansivos mediante la metodología Lytton – Mitchell, caso Querétaro". 2012.

Se puede observar en la Figura No 6.3 que la variación es máxima en la superficie, pero se amortigua a medida se profundiza, hasta un punto en el cual el cambio de humedad ya no se aprecia y se puede considerar constante.

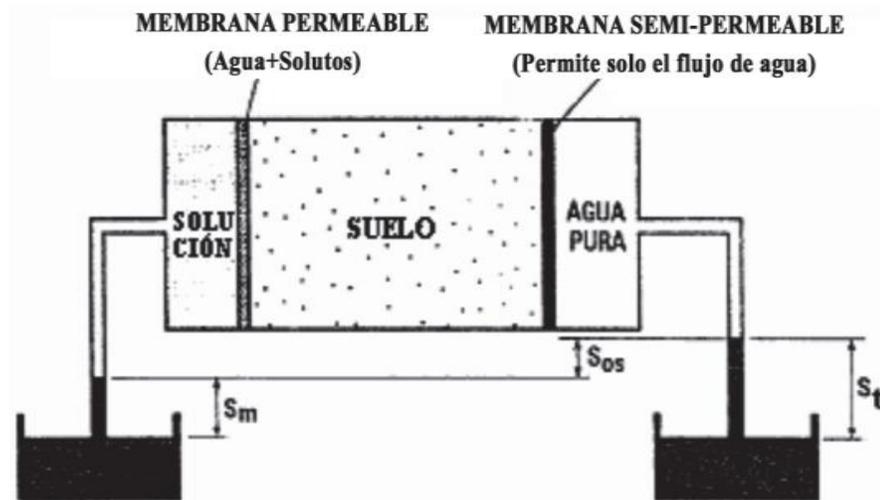
El espesor de capa activa puede ser determinado a partir del ensayo de succión realizado a muestras inalteradas de suelos arcillosos.

La succión se divide en tres conceptos diferentes que se presentan a continuación:

- **Succión matriz (S_m):** Se define como la presión negativa que debe aplicarse al agua que tiene una composición idéntica al agua del suelo, para que alcance el equilibrio con esta a través de una membrana semi-impermeable. Esta succión depende de las fuerzas de atracción entre el agua y los cationes del suelo, de las fuerzas de tensión superficial y de las cargas externas. (Ver Figura No 6.4).
- **Succión osmótica (S_{os}):** Se define como la presión negativa a la cual debe someterse el agua químicamente pura, para que este en equilibrio, a través de una membrana semi-impermeable con el agua del suelo. Esta componente depende de la presencia de sales disueltas en el agua del suelo y no de la sobrecarga; para la mayoría de los efectos prácticos, esta componente se puede despreciar. (Ver Figura No 6.4).
- **Succión total (S_t):** Se define como la presión negativa con respecto a la presión externa (atmosférica), que debe aplicarse al agua químicamente pura que se encuentra en un depósito para que alcance el equilibrio con el agua del suelo a través de una membrana semi-impermeable (permite el paso únicamente de

moléculas de agua). La succión total también se expresa como la suma de dos componentes: succión matricial y succión osmótica. (Ver Figura No 6.4).

Figura No 6.4: Representación de los conceptos de succiones matricial, osmótica y total.



FUENTE: Revista Geotecnia Vol_32.

La succión es una presión negativa (de vacío) que se presenta con su valor absoluto y se puede expresar en centímetros o metros de altura de columna de agua, Kpa, psi, entre otros. Para medir la succión se tienen diferentes equipos de laboratorio que se presentan a continuación en la Tabla No 6.1:

Tabla No 6.1: Técnica y dispositivos para la medición de succión.

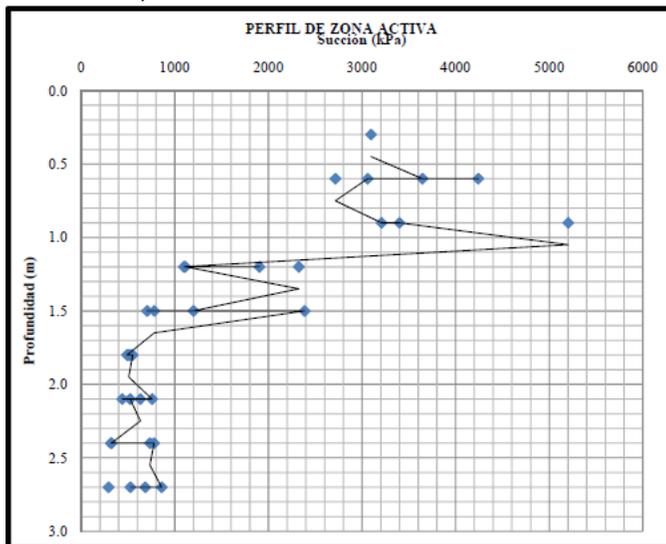
Equipo	Succión	Fenómeno asociado	Tiempo para que se establezca el equilibrio
Psicrómetro de transistor	Total	Humedad relativa	Minutos
Psicrómetro de termopar	Total	Humedad Relativa	Minutos
Papel Filtro	Total o matricial	Contenido de agua	7 a 15 días
Tensiómetro	Matricial	Tensión del agua	Minutos

FUENTE: Baeza Campusano. "Diseño de zapatas continuas de cimentación sobre suelos expansivos mediante la metodología Lytton – Mitchell, caso Querétaro". 2012.

Para poder determinar la profundidad de la capa activa, es útil el método del papel filtro, realizando ensayos de succión a muestras extraídas a diferentes profundidades en los sondeos⁵¹.

El uso principal de los datos de succión es la determinación del perfil de humedad de equilibrio, que es un gráfico de profundidad contra succión⁵² (Ver Figura No 6.5).

Figura No 6.5: Perfil de zona activa de un suelo arcilloso ubicado en Santa Fé, Querétaro, México.



FUENTE: Baeza Campusano. "Diseño de zapatas continuas de cimentación sobre suelos expansivos mediante la metodología Lytton – Mitchell, caso Querétaro". 2012.

La Figura No 6.5 muestra un perfil de humedad de equilibrio de un suelo arcilloso ubicado en Santa Fé, Querétaro, México, el cual es un ejemplo de cómo puede determinarse la capa activa. En este caso se puede ver como varía la succión a medida se va profundizando en el estrato, esto es muestra de que las partes más cercanas a la superficie son más susceptibles a cambios volumétricos, ya que pueden adsorber más

⁵¹ Para el ensayo de succión puede referirse a la norma INV E-159-07.

⁵² Preferiblemente se debe realizar el perfil de humedad de equilibrio con el valor de succión total.

agua. Se puede apreciar que el espesor mínimo de capa activa es de 1.8m; profundidad a partir de la cual no se presenta tanta variación de succión en el suelo y se prevé que debido a eso la humedad del suelo se puede considerar constante.

En este trabajo de graduación no se ha realizado el ensayo de succión, sin embargo, se ha tomado a bien hacer mención de este método, para poder determinar espesores de capas activas en suelos expansivos, ya que el proyecto de la cimentación sobre este tipo de suelos, requiere de esta información.

Cabe mencionar que la profundidad de la capa activa no necesariamente debe coincidir con la profundidad de desplante de la cimentación de una estructura. Es decir, el espesor de capa activa puede ser mayor o menor que la cota de fundación, y tener conocimiento de la profundidad de la capa activa es meramente indicativo para identificar en que parte de un estrato, el suelo puede sufrir cambios considerables de volumen.

6.4 TIPOS DE CIMENTACIÓN ADECUADOS PARA SUELOS EXPANSIVOS.

Ante la presencia de un suelo potencialmente expansivo las dos grandes soluciones a aplicar pueden ser:

1. Actuar en el sentido de reducir o eliminar la expansión del suelo.

Algunas de las formas en que se puede tratar el suelo expansivo son las siguientes:

- Inundar el suelo en el sitio de manera que se produzca una expansión antes de la construcción: la teoría de “prehumectar “el suelo antes de la

construcción está basada en el hecho de que si al suelo se le permite que se expanda antes de la construcción y si luego la humedad del suelo es mantenida, no es de esperar cambios volumétricos y por lo tanto no es esperable daños sobre la estructura. La experiencia indica que en las áreas cubiertas por una losa, contrapiso, pavimento, etc., el contenido de humedad del suelo rara vez decrece. Este método de “inundación previa” puede resultar útil para la cimentación mediante losas, construcción de pavimentos, canales, etc., pero no es adecuado para cimentaciones aisladas (tipo patín). La razón es que el prehumectar el suelo conlleva a reducir en una forma muy significativa los parámetros resistentes del suelo, lo que lo hace inadecuado para el apoyo de cimientos aislados.

- Reducir la densidad del suelo mediante un adecuado control de la compactación: este método es naturalmente válido cuando la cimentación se debe hacer sobre un material a terraplenar, o en aquellos casos en que se procede a la sustitución del suelo. La magnitud del asentamiento en un relleno depende de la densidad alcanzada en la compactación, el contenido de humedad de la compactación, el método de compactación y la carga que se aplique sobre el relleno. De acuerdo a investigaciones se puede decir las arcillas expansivas expanden poco cuando son compactadas a densidades bajas y alto contenido de humedad, pero expanden mucho cuando son compactadas a densidades altas y bajos contenidos de humedad. El año

1959 Dawson aconsejaba que en suelos expansivos se debía controlar no sólo el alcanzar un grado de compactación mínimo, sino también un valor máximo.

- Restitución del suelo expansivo por un material selecto adecuado: al llevar a cabo este tipo de solución se debe de tomar en cuenta que tipo de material se va a colocar, que espesor tendría el relleno (o sea que profundidad de sustitución) y en qué área bajo la fundación extenderíamos la sustitución.
- Modificar las propiedades expansivas del suelo mediante diversos procedimientos: estabilización mediante cal, cemento, materiales bituminosos y suelos granulares.
- Aislar el suelo de manera que no sufra modificaciones en su contenido de humedad: si se pudiera lograr que el suelo no sufriera variaciones importantes en su contenido de humedad, entonces, por mayor que sea el potencial expansivo de la arcilla no habrá cambios volumétricos. La variación de contenido de humedad puede provenir de dos fuentes básicamente:
 - a) la infiltración al terreno de aguas superficiales
 - b) la variación de niveles de agua subterránea.

Para realizar este método se debe de tratar de controlar o eliminar las fuentes de variación de contenido de humedad antes mencionadas.

2. Actuar sobre la estructura y a través de la selección de un diseño de cimiento apropiado.

En general, se actúa en el sentido de rigidizar o flexibilizar de tal forma la estructura que sea capaz de adaptarse a las deformaciones resultantes. En el diseño de la cimentación se tiende a considerar una concentración de cargas de manera que la presión transmitida al suelo sea capaz de controlar la deformación debido al hinchamiento.

En la realidad, para escoger el tipo más adecuado de cimentación depende mucho de los aspectos siguientes:

- ✓ Tipo de edificación, el uso que esta tendrá y las cargas que transmitirá al suelo.
- ✓ Tipo de suelo (Para este caso suelos expansivos).

Ante la gama de condiciones que pueden darse en el campo, es necesario identificar soluciones prácticas de manera general, que pueden dar una idea de que se puede hacer ante la presencia de suelos expansivos.

Entre las posibles soluciones prácticas que podemos mencionar tenemos las siguientes:

- ✓ **Aislamiento de la cimentación con relación a la Capa Activa.**

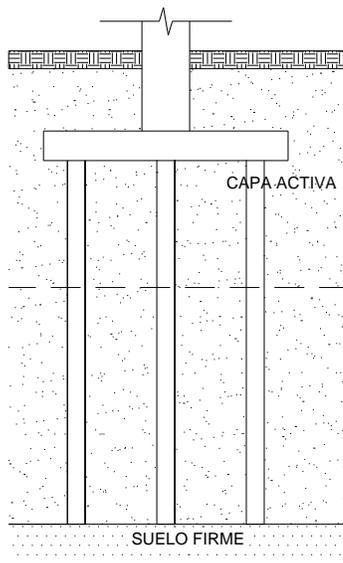
Se debe de disponer de cimientos que estén por debajo del espesor de la capa activa, ya que en ella es donde se presenta mayor susceptibilidad a cambios de humedad. La cimentación a utilizar puede ser: zapata aislada, combinada y zapata corrida. El fin es que el espesor de la capa activa quede desligado de la cimentación. Cuando la capa

activa tiene un espesor entre 1.50 a 2.00 metros la cimentación no se vuelve antieconómica.

✓ **Transmisión de esfuerzos al suelo únicamente por debajo de la capa activa.**

Consiste en el aislamiento de cimientos profundos como pilotes o pilas del suelo circundante dentro del estrato de la capa activa. Se debe llegar a profundidades donde la variación de humedad sea mínima y no afecten los hinchamientos a la estructura de cimentación (Ver Figura No 6.6). Esta solución requiere de gran inversión económica, sin embargo, queda del lado de la seguridad aplicarla, ya que se transmiten los esfuerzos fuera del estrato de capa activa. Es recomendable cuando el espeso de dicha capa tiene un espesor mayor a cuatro metros.

Figura No 6.6: Transmisión de cargas a suelo firme por debajo de la capa activa.



FUENTE: De los autores.

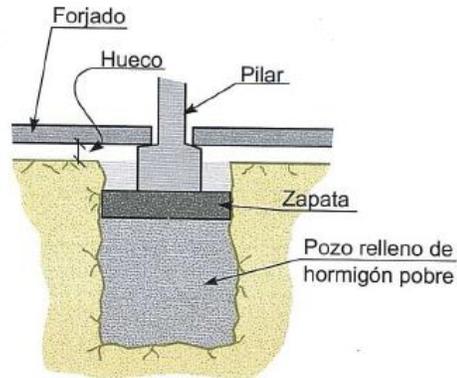
✓ **Cimentación con pozo.**

Consiste en rellenar de concreto pobre⁵³ o suelo cemento bajo una cimentación superficial como una zapata aislada o combinada, cuya función es aislar el cimiento del suelo. Es eficaz para estructuras livianas como viviendas de dos o tres niveles. Si el material de relleno es concreto se diseña con una dosificación para resistencia baja a compresión, si es suelo cemento⁵⁴ se compacta a la humedad óptima o se puede utilizar suelo cemento fluido. La resistencia a la compresión del material a utilizar es equivalente a la capacidad de carga requerida para un suelo. (Ver Figura No 6.7). En algunas ocasiones, es factible realizar un relleno un poco más profundo, creando una barrera más grande entre el suelo expansivo y la cimentación. Para este caso suele utilizarse un pedraplén, constituido de piedra como boleos, guijarros o cantos rodados ligados con suelo cemento fluido, impermeabilizando la zona circundante a la cimentación y dando un mayor soporte a la estructura. (Ver Figura No 6.7).

⁵³ Concreto con dosificación para resistencia baja a compresión.

⁵⁴ La dosificación para suelo cemento compactado o fluido se diseña de acuerdo al tipo de suelo que se disponga.

Figura No 6.7: Pozo relleno de concreto pobre que funciona como aislante de material expansivo.



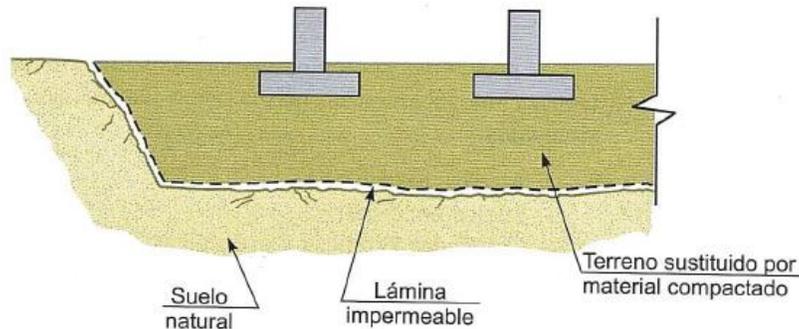
FUENTE: Bravo Quiñones. "Estudio geotécnico para vivienda unifamiliar en terreno expansivo". 2014.

✓ **Sustitución de suelos expansivos.**

Se puede restituir el suelo expansivo por otro material que tenga características mecánicas más apropiadas para cimentar. Si el material selecto queda en contacto directo con el suelo expansivo y este llega a humedecerse, se corre el riesgo de que se deforme la capa de suelo selecto compactado. Por lo tanto, es necesario aislar la capa restituida con una lámina impermeable que no permita que llegue humedad al suelo expansivo.

La lámina impermeable puede ser un geosintético adecuado que evite la introducción de agua a través de él. (Ver Figura No 6.8).

Figura No 6.8: Sustitución de suelo expansivo por material adecuado para cimentar.



FUENTE: Bravo Quiñones. "Estudio geotécnico para vivienda unifamiliar en terreno expansivo". 2014.

✓ **Estabilización de suelo.**

Consiste en tratar de reducir el potencial de cambio de volumen de un suelo expansivo, a través de la combinación con otro material que cambie sus propiedades fisicoquímicas, y el producto sea un suelo adecuado para cimentar.

Algunas de las estabilizaciones que se llevan a cabo son las siguientes:

- Estabilización con cal: Consiste en la adición de cal a arcillas o arcillas limosas, bajo una dosificación controlada, que permite modificar la estructura química de ellas, proporcionando de esta manera cambio en las características de plasticidad. Por ejemplo, disminuyendo el Índice de Plasticidad del suelo, con lo que se consigue disminuir directamente el hinchamiento o la retracción. La estabilización también se puede hacer con otros materiales como cemento o materiales bituminosos, pero no son tan efectivos como la neutralización de fuerzas eléctricas que genera la cal a los suelos expansivos. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que algunos tipos

de arcillas son tan plásticas, que ni siquiera la cal puede generar un cambio favorable.

- Estabilización química: Consiste en modificar las propiedades del suelo a través de un cambio en su estructura química. Actualmente, se han desarrollado estudios con la adición de productos químicos que generan resultados satisfactorios, entre estos productos se tienen: Silicato de Sodio, Hidróxido de calcio, Cloruro de calcio y ácido fosfórico. Muchos de estos productos son efectivos en condiciones de laboratorio, sin embargo, en campo su aplicación es dificultosa y limitada.

6.5 APLICACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES.

En el apartado anterior se han mencionado soluciones de cimentación como el aislamiento de cimientos de la capa activa, restitución de material, estabilización, entre otras. Sin embargo, el interés de la investigación es proponer una solución teórica que sea viable económicamente y que se vuelva funcional en el tiempo.

Para ello es necesario plantear un caso práctico, en el que se conozca la presión de hinchamiento que ejerce el suelo sobre la estructura, así como la presión resultante de la transmisión de cargas de una edificación al terreno.

Partiremos de resultados obtenidos en el laboratorio de los ensayos de presión de hinchamiento para cuatro suelos en estudio (Suelo No 1, No 2, No 6 y No 10, ubicados

en Santa Bárbara, San Rafael, Metapán y Sensuntepeque, respectivamente). A continuación, se presentan dichos resultados en la Tabla No 6.2.

Tabla No 6.2: Resultados de hinchamiento y presión de hinchamiento.

Designación	Clasificación (SUCS)	Índice de Plasticidad (IP)	Presión de Hinchamiento (kg/cm ²)*
Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango)	Arcillosa Limosa (CH)	31	1.24
Suelo No 2 (San Rafael, Chalatenango)	Limo areno arcillosa (CL)	19	0.19
Suelo No 6 (Metapán)	Arcillosa Limosa (CH)	38	4.57
Suelo No 10 (Sensuntepeque)	Arcillosa Limosa (CH)	23	1.40

* Resultados promedio de presión de hinchamiento a volumen constante.

FUENTE: De los autores.

El resultado de la presión de hinchamiento, es un valor importante para conocer qué esfuerzo puede transmitir el suelo a una estructura. Valores pequeños son subsanables con soluciones relativamente económicas como es el caso del suelo No 2 con una presión de 0.19kg/cm²; un valor alto, como el del suelo No 6 de 4.57 kg/cm², significa gran riesgo para edificar sobre un suelo altamente expansivo.

Para ver la aplicación de los resultados experimentales a continuación se presenta un caso práctico.

6.5.1 Caso práctico.

Una solución teórica que puede contrarrestar el hinchamiento de una arcilla, es un estrato de suelo que tenga un peso volumétrico determinado, para que ejerza una contrapresión que permita equilibrar la presión que el suelo ejercería.

Tomaremos de base una estructura liviana que, por lo general, transmite cargas relativamente pequeñas al suelo, para este caso un proyecto habitacional de una vivienda de dos niveles. Además, asumiremos que el suelo tiene una buena capacidad de carga.

✓ Suelo No 1 (Santa Bárbara, Chalatenango).

Se va a cimentar una vivienda que transmite un esfuerzo de 1.10 kg/cm^2 y el suelo puede generar una presión de hinchamiento de 1.24 kg/cm^2 ; con el diferencial de presión resultante y un peso volumétrico seco de $2,000 \text{ kg/m}^3$ hay que determinar un espesor de suelo que contrarreste el hinchamiento.

Datos: Carga transmitida = $1.10 \text{ kg/cm}^2 \equiv 11 \text{ T/m}^2$, $P_h = 1.24 \text{ kg/cm}^2$, $\gamma = 2,000 \text{ kg/m}^3$.

$$\Delta P = \text{Presión de hinchamiento} - \text{carga transmitida}$$

$$\Delta P = 1.24 \text{ kg/cm}^2 - 1.10 \text{ kg/cm}^2 = 0.14 \text{ kg/cm}^2$$

El peso de la estructura contrarresta casi por completo el hinchamiento, sin embargo, esa presión residual de 0.14 kg/cm^2 puede generar daños pequeños. Haciendo énfasis en las soluciones presentadas en el apartado 6.4, se puede actuar en el terreno sustituyendo el material por debajo de la cimentación a utilizar. Para ello se puede

sustituir con un material selecto compactado a un determinado peso volumétrico. Lo anterior se puede visualizar en el ejemplo siguiente:

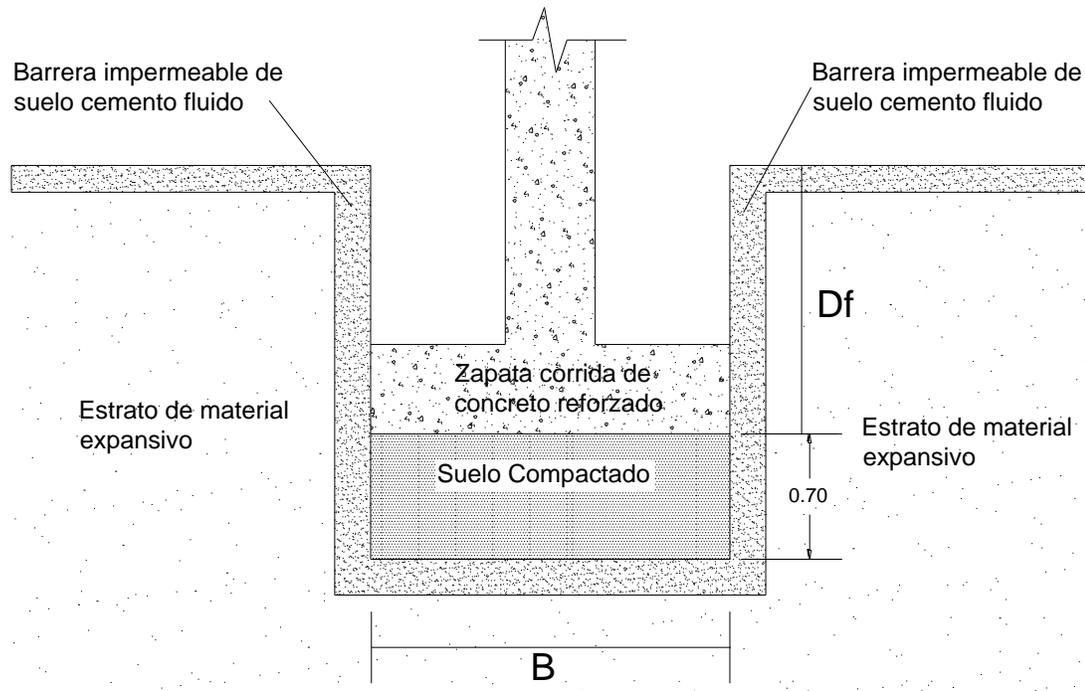
Si el diferencial $\Delta P = 0.14 \text{ kg/cm}^2 \equiv 1.4 \text{ T/m}^2$, para encontrar que altura equivalente “h” de material habría que colocar por encima del estrato expansivo, es necesario conocer el peso volumétrico seco al cual se quiere compactar éste, para este caso se utilizara $\gamma = 2,000 \text{ kg/m}^3 \equiv 2.0 \text{ T/m}^3$:

$$P = \gamma h \rightarrow h = \Delta P / \gamma \rightarrow h = (1.4 \text{ T/m}^2) / (2.0 \text{ T/m}^3) = 0.70 \text{ m}$$

Lo anterior significa, que se necesita un estrato de suelo con una altura de 0.70m y con un peso volumétrico de 2,000 kg/m³ para contrarrestar un diferencial de presión de hinchamiento de 0.14 kg/cm². En definitiva, es necesario este colchón de suelo, más el peso propio de la estructura para equilibrar el hinchamiento. Se recomienda restituir por debajo de la cimentación con material selecto compactado con un peso volumétrico seco máximo igual o mayor a 2,000 kg/m³, además de impermeabilizar los bordes y el fondo con MBRC⁵⁵ como suelo cemento fluido con un espesor mínimo de 0.50 m. Cabe mencionar que entre mayor sea el peso volumétrico del suelo de relleno, será menor la altura de restitución. (Ver Figura No 6.9).

⁵⁵ Mezcla de Baja Resistencia Controlada.

Figura No 6.9: Solución para suelo No 1.



FUENTE: De los autores.

✓ **Suelo No 2 (San Rafael, Chalatenango).**

El suelo No 2 produce una presión de hinchamiento de 0.19 kg/cm^2 , al comparar este valor con la carga de 1.10 kg/cm^2 que transmite la estructura, se nota que la presión del suelo no ejercerá mayor movimiento sobre la vivienda.

Anteriormente, se ha mencionado que se considerara que los suelos tienen buena capacidad de carga, por lo tanto, aunque la presión de hinchamiento sea menor en este caso, no significa que el suelo sufrirá un gran asentamiento o falle, ya que la capacidad portante de un suelo no está íntimamente ligada a la presión de hinchamiento. Por lo

que, para este suelo se recomienda siempre una impermeabilización en la superficie y una cimentación con pozo de concreto pobre o suelo cemento fluido por debajo de esta. (Ver Figura No 6.7).

✓ **Suelo No 6 (Metapán).**

El suelo No 6 produce una presión de hinchamiento de 4.57 kg/cm^2 , si se tiene un edificio de tres niveles que transmitirá una carga de 2.0 kg/cm^2 , se calculará el diferencial de presiones a continuación:

$$\Delta P = \text{Presión de hinchamiento} - \text{carga transmitida}$$

$$\Delta P = 4.57 \text{ kg/cm}^2 - 2.0 \text{ kg/cm}^2 = 2.57 \text{ kg/cm}^2$$

Si $\Delta P = 2.57 \text{ kg/cm}^2 \equiv 25.7 \text{ T/m}^2$ y utilizando un peso volumétrico de $2,000 \text{ kg/m}^3 \equiv 2.0 \text{ T/m}^3$, la altura equivalente "h" de material que habría que colocar por encima del estrato expansivo para equilibrar el hinchamiento sería:

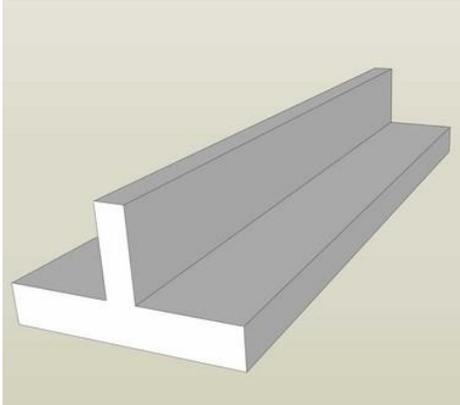
$$P = \gamma h \rightarrow h = \Delta P / \gamma \rightarrow h = (25.7 \text{ T/m}^2) / (2.0 \text{ T/m}^3) = 12.85 \text{ m}$$

El estrato de suelo a colocar es considerablemente grande y antieconómico al querer implementarlo. Por lo tanto, no es una solución viable y es necesario buscar otra solución.

Entonces, es necesario buscar una alternativa donde la estructura sea lo suficiente rígida para equilibrar la presión de hinchamiento del suelo. Para ilustrar mejor lo anterior vamos a plantear el siguiente ejemplo:

Supongamos que el espesor de capa activa del suelo No 6 tiene aproximadamente 4m, que a una profundidad inicial de 1.5m se tiene una capacidad de carga de 1.8kg/cm^2 , y que se tomara esa como la profundidad de desplante. La estructura a cimentar es un edificio de tres niveles que transmite una carga de 2.0kg/cm^2 , el sistema estructural será de paredes de carga, por lo tanto, la cimentación a diseñar será una zapata corrida (Ver Figura No 6.10).

Figura No 6.10: Zapata corrida para muro.



FUENTE: www.empresasconstruccion.es/cimentaciones-zapatas-losas-diferencias/

Datos:

Carga total = 2.0kg/cm^2 (carga muerta y viva),

$Q_{adm} = 1.8\text{kg/cm}^2 \equiv 18 \text{ T/m}^2$,

Profundidad de desplante inicial $D_f = 1.5\text{m}$,

Peso volumétrico de suelo = 1.6 T/m^3 ,

Sobrecarga = 0.3 T/m^2 ,

Espesor de pared = 0.15m .

Para poder diseñar las dimensiones de la zapata corrida se asumirá una dimensión de ancho “b” para 1 metro lineal. Luego, debe equilibrarse las cargas transmitidas por la estructura, el suelo y el concreto con la presión de hinchamiento, a partir de eso se encontrará el peralte “h” de la siguiente manera:

$$P_{\text{suelo}} + P_{\text{estructura}} + P_{\text{concreto}} = P_{\text{hinchamiento}}$$

$$\gamma Df + q + \gamma(A * h) = Ph$$

Para b=1.0m y Df=1.5m

$$(1.6 \text{ T/m}^3) (1.5\text{m}) + 20 \text{ T/m}^2 + (2.4 \text{ T/m}^3) (1\text{m} \times 1\text{m}) h = 45.7 \text{ T/m}^2$$

$$h=9.71 \text{ m}$$

Para b=2.0m y Df=2.0m

$$(1.6 \text{ T/m}^3) (2.0\text{m}) + 20 \text{ T/m}^2 + (2.4 \text{ T/m}^3) (2\text{m} \times 1\text{m}) h = 45.7 \text{ T/m}^2$$

$$h=4.69 \text{ m}$$

Para b=3.0 m y Df=2.5 m

$$(1.6 \text{ T/m}^3) (2.5\text{m}) + 20 \text{ T/m}^2 + (2.4 \text{ T/m}^3) (3\text{m} \times 1\text{m}) h = 45.7 \text{ T/m}^2$$

$$h=3.01 \text{ m}$$

Para b=4.0 m y Df=3.0 m

$$(1.6 \text{ T/m}^3) (3.0\text{m}) + 20 \text{ T/m}^2 + (2.4 \text{ T/m}^3) (4.0\text{m} \times 1\text{m}) h = 45.7 \text{ T/m}^2$$

$$h=2.18 \text{ m}$$

De lo anterior, se puede observar que para una profundidad de desplante de 3.0m se obtiene una zapata de b = 4.0 m y peralte h = 2.18 m. Las dimensiones obtenidas para una zapata corrida son sumamente grandes, no es razonable económicamente

construir una cimentación de ese tamaño para un edificio (Ver Figura No 6.11). Sin embargo, la condición evaluada es una presión de hinchamiento obtenida cuando el suelo está cercano a la saturación. En la realidad es poco probable que esto ocurra, entonces, se probará iterando una vez más bajando este valor de presión de hinchamiento a uno menos crítico. Tomaremos de base una presión de 3.5 kg/cm^2 , que equivale a 35 T/m^2 . Veamos la aplicación en el siguiente ejemplo:

Datos:

$$\text{Carga total} = 2.0 \text{ kg/cm}^2,$$

$$\text{Profundidad de desplante inicial} = 1.5 \text{ m},$$

$$\text{Peso volumétrico de suelo} = 1.6 \text{ T/m}^3,$$

$$\text{Sobrecarga} = 0.3 \text{ T/m}^2,$$

$$\text{Espesor de pared} = 0.15 \text{ m}.$$

Para $b=2.0 \text{ m}$ y $D_f=1.5 \text{ m}$

$$(1.6 \text{ T/m}^3) (1.5 \text{ m}) + 20 \text{ T/m}^2 + (2.4 \text{ T/m}^3) (2 \text{ m} \times 1 \text{ m}) h = 35.0 \text{ T/m}^2$$

$$h = 2.63 \text{ m}$$

Para $b=3.0 \text{ m}$ y $D_f=2.0 \text{ m}$

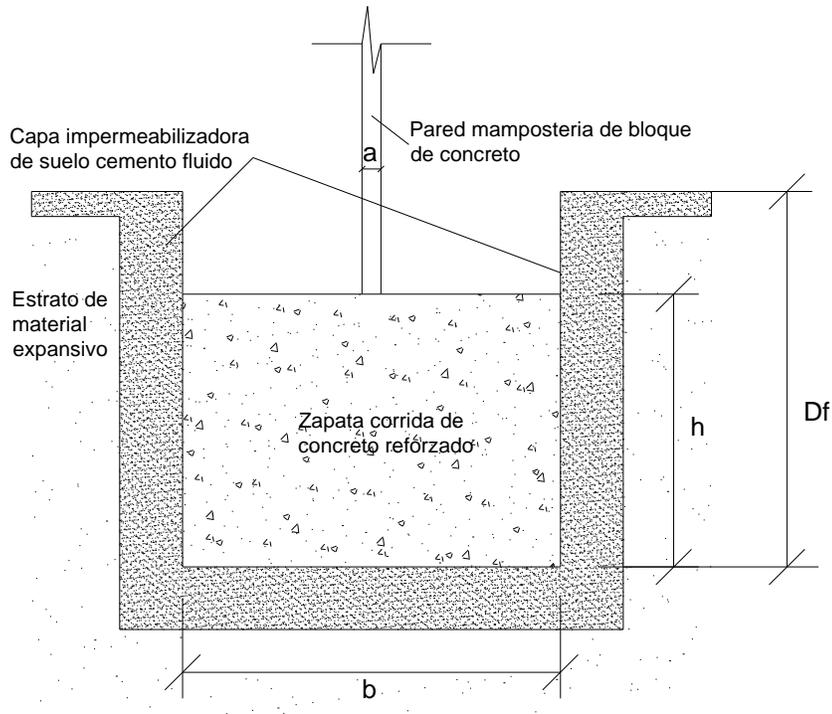
$$(1.6 \text{ T/m}^3) (2.0 \text{ m}) + 20 \text{ T/m}^2 + (2.4 \text{ T/m}^3) (3 \text{ m} \times 1 \text{ m}) h = 35.0 \text{ T/m}^2$$

$$h = 1.64 \text{ m}$$

Vemos que aun considerando presiones con valores relativamente menores que 45.7 T/m^2 , no se obtienen dimensiones razonables. Por lo que, para cimentaciones livianas como viviendas o edificios de tres niveles, es recomendable utilizar cimentaciones

profundas, donde se atravesase el espesor de capa activa y se transmitan las cargas por debajo de ella.

Figura No 6.11: Diseño de zapata corrida para suelo No 6.



FUENTE: De los autores.

✓ **Suelo No 10 (Sensuntepeque, Cabañas).**

Se va a cimentar una vivienda que transmite un esfuerzo de 1.10 kg/cm^2 y el suelo puede generar una presión de hinchamiento de 1.40 kg/cm^2 ; con el diferencial de presión resultante y un peso volumétrico seco de $2,000 \text{ kg/m}^3$ hay que determinar un espesor de suelo que contrarreste el hinchamiento.

Datos: Carga transmitida = $1.10 \text{ kg/cm}^2 \equiv 11 \text{ T/m}^2$, $P_h = 1.40 \text{ kg/cm}^2$, $\gamma = 2,000 \text{ kg/m}^3$.

$$\Delta P = \text{Presión de hinchamiento} - \text{carga transmitida}$$

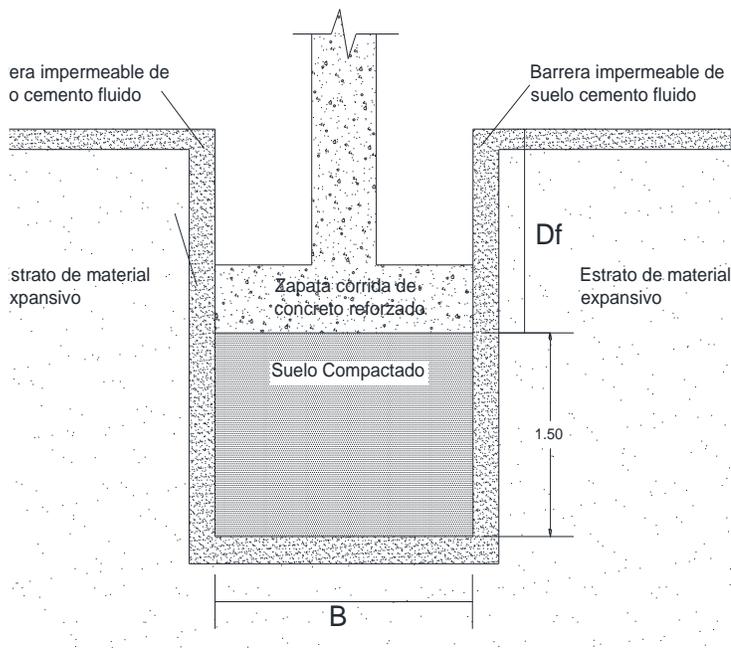
$$\Delta P = 1.40 \text{kg/cm}^2 - 1.10 \text{kg/cm}^2 = 0.30 \text{kg/cm}^2$$

Si $\Delta P = 0.30 \text{kg/cm}^2 \equiv 3.0 \text{T/m}^2$ y utilizando un peso volumétrico de $2,000 \text{kg/m}^3 \equiv 2.0 \text{T/m}^3$, la altura equivalente "h" de material que habría que colocar por encima del estrato expansivo para equilibrar el hinchamiento es:

$$P = \gamma h \rightarrow h = \Delta P / \gamma \rightarrow h = (3.0 \text{T/m}^2) / (2.0 \text{T/m}^3) = 1.50 \text{m}$$

El suelo No 10 genera una presión de hinchamiento con valores cercanos al No 1, el valor de "h" prácticamente es el doble de este, por lo tanto, la solución recomendada será la misma del No 1, es decir, restituir material selecto con una altura de 1.50m de relleno compactado con un Peso Volumétrico Seco Máximo igual o mayor a $2,000 \text{kg/m}^3$, por debajo de la cota de fundación. (Ver Figura No 6.12).

Figura No 6.12: Solución para suelo No 10.



FUENTE: De los autores

CAPITULO 7:

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES.

Las conclusiones se encuentran divididas en dos etapas, la primera referente a los resultados de laboratorio para cada tipo de suelo en estudio y la segunda en base a la aplicación de resultados:

7.1.1 Conclusiones en base a resultados de laboratorio.

La caracterización en base a los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio, de los puntos de muestreo seleccionados a lo largo de la Carretera Longitudinal del Norte, en el tramo comprendido entre Metapán (Dpto. de Santa Ana) y Sensuntepeque (Dpto. de Cabañas), a los que se les determinaron su clasificación, características de hinchamiento y retracción, permitieron clasificar a los suelos de la manera siguiente:

- Suelo No1 (Santa Bárbara, Chalatenango):
 - Clasificado como Arcilla Limosa de alta plasticidad (CH), con porcentajes de Limo y Arcilla de 47.0 y 48.5, respectivamente; color café claro, límite líquido de 61%, IP de 31% y límite de contracción de 15%.
 - En base a sus propiedades índices ha sido clasificado cualitativamente con un Potencial de Expansividad de Medio a Alto.
 - Ensayos de Hinchamiento:
 - Hinchamiento Libre máximo: 15%, con una humedad inicial de 19.5% y final de 33.0%; grado de saturación inicial de 73% y final de 90%, clasificándolo como de Potencial de Expansividad Medio.

- Presión de hinchamiento a volumen constante de: 1.24 kg/cm², clasificándolo como de Expansividad Baja.
 - El Cambio Potencial de Volumen (CPV) de Lambe igual a 0.50, lo clasifica como de Potencial de Expansión: No crítico.
- A partir de los resultados obtenidos se puede identificar a este suelo como de Potencial de Expansividad Medio.
- Suelo No2 (El Morrito, Chalatenango):
 - Clasificado como Limo Arenoso Arcilloso de baja compresibilidad (ML), con porcentajes de Arena de 32.0, Limo 40.0 y Arcilla de 28.0; color gris claro, límite líquido de 36%, IP de 19% y límite de contracción de 12%.
 - En base a sus propiedades índices ha sido clasificado cualitativamente con un Potencial de Expansividad de Medio a Bajo.
 - Ensayos de hinchamiento:
 - Hinchamiento Libre máximo: 6%, con una humedad inicial y final de 11.1% y 18.7% respectivamente; un grado de saturación inicial de 70% y final de 99%, clasificándolo en base a este parámetro como de Potencial de Expansividad Bajo.
 - Con presión de hinchamiento a volumen constante de: 0.19 kg/cm², clasificándolo como de Expansividad Baja.
 - El Cambio Potencial de Volumen (CPV) de Lambe igual a 1.80, lo clasifica de potencial de expansión: No crítico.

- A partir de los resultados de laboratorio obtenidos se puede identificar a este suelo como de Expansividad Baja.
- Suelo No4.2 (Nueva Concepción):
 - Clasificado como Arcilla Limosa de alta plasticidad (CH), con porcentajes de Limo de 26.3 y Arcilla de 71.7; color café rojizo, límite líquido de 61%, IP de 26% y límite de contracción de 26%.
 - En base a sus propiedades índices este suelo ha sido clasificado cualitativamente de Potencial de Expansividad de Medio a Alto.
- Suelo No6 (Metapán):
 - Clasificado como Arcilla Limosa de alta plasticidad (CH), con porcentajes de Limo y Arcilla de 34.0 y 61.5 respectivamente; color negro, límite líquido de 68%, IP de 38% y límite de contracción de 16%.
 - En base a sus propiedades índices, ha sido clasificado cualitativamente con un Potencial de Expansividad Alto.
 - Ensayos de hinchamiento:
 - Hinchamiento Libre máximo: 22%, con una humedad inicial de 16.0% y final de 29.5%; un grado de saturación inicial de 70% y final de 80%, clasificado en base a este parámetro como de Potencial de Expansividad Alto.
 - Presión de hinchamiento a volumen constante de: 4.57 kg/cm², clasificándolo como de Expansividad Alta.

- El Cambio Potencial de Volumen (CPV) de Lambe de 4.25 lo clasifica de potencial de expansión: Marginal a Crítico.
- A partir de los resultados obtenidos se puede identificar a este suelo como de Expansividad Alta.

Suelo No10 (San Lorenzo, Sensuntepeque):

- Clasificado como Arcilla Limosa de alta plasticidad (CH), con porcentajes de Limo y Arcilla de 35.5 y 59.5, respectivamente; color café naranja, límite líquido de 63%, IP de 23% y límite de contracción de 23%.
- En base a sus propiedades índices ha sido clasificado cualitativamente con un Potencial de Expansividad de Medio a Alto.
- Ensayos de Hinchamiento:
 - Hinchamiento Libre máximo: 10%, con una humedad inicial y final de 18.3% y 38.6% respectivamente, grado de saturación inicial de 59% y final de 102%, clasificándolo en base a este parámetro como de Potencial de Expansividad Alta.
 - Presión de hinchamiento a volumen constante de: 1.40 kg/cm², clasificado como de Expansividad Baja.
 - El valor de Cambio Potencial de Volumen (CPV) de Lambe igual a 4.32, lo clasifica de potencial de expansión: Marginal a Crítico.

- A partir de los resultados obtenidos se puede identificar a este suelo como de Expansividad Media.

A partir de lo anterior se puede concluir de forma general lo siguiente:

- Para los suelos No 1, 6 y 10, se tiene que a mayor Índice de Plasticidad (IP) el suelo experimenta mayores porcentajes de hinchamiento libre.
- El máximo hinchamiento de un suelo se experimenta a partir del menor contenido de humedad inicial (límite de contracción), hasta lograr la saturación del suelo, como se experimentó en los suelos investigados.
- A partir de los resultados de hinchamiento libre y presión de hinchamiento por el método de volumen constante, para los suelos No 6 y 10, se puede determinar que a mayor hinchamiento libre se tienen mayores presiones de hinchamiento.
- Al comparar la clasificación del potencial de expansividad obtenida del ensayo de Hinchamiento Libre y de las propiedades índices: Índice de Plasticidad, Porcentaje de arcillas e Índice de Contracción (definido por Ranganatham & Satyanarayana), se puede decir que los métodos indirectos permiten clasificar la expansividad del suelo de manera confiable. Como se puede comprobar con los resultados de los suelos No 1, 2, 6 y 10.

- Los resultados obtenidos del ensayo de Lambe de presión de hinchamiento (IE), no son congruentes con los valores obtenidos con los ensayos de presión de hinchamiento a volumen constante e hinchamiento libre, por lo que no es un método adecuado para la obtención de presiones que el suelo le ejercería a una estructura.
- Al comparar los % de tamaño arcilla en el suelo No 4.2: 71% y el grado de expansividad cualitativo que es bajo, se puede determinar que existe incongruencia entre ambas propiedades, por lo que se requiere la realización de ensayos que identifiquen su mineralogía y conocer a partir de este, el tipo de arcilla que lo constituye.

7.1.2 Conclusiones de la aplicación de resultados de laboratorio.

Tomando como base los resultados de presión de hinchamiento, se han analizado algunas de las posibles soluciones, aplicadas a un caso práctico, para cada suelo en estudio, determinándose lo siguiente:

- Cuando se tienen suelos plásticos con una presión de hinchamiento menor a 2 Kg/cm², como los que poseen los suelos: No1, No2 y No10, la solución a aplicar de manera económica, es la de colocar un espesor de suelo selecto compactado a una densidad óptima, que contrarreste la presión de hinchamiento al saturarse.

- Si se tienen suelos plásticos con presiones de hinchamiento mayores a 2 Kg/cm^2 , como los que presenta el suelo No 6, las soluciones al problema de expansión pueden ser variadas, como colocar un material compactado a una densidad máxima para contrarrestar dichas presiones o a través de una cimentación masiva de concreto, e incluso usar pilotes.
- Al tener suelos plásticos donde se apoyen estructuras, será necesario realizar una impermeabilización tanto de la superficie como de los laterales de la cimentación, para evitar que el agua infiltre hasta la capa de arcilla y la sature.

7.2 RECOMENDACIONES.

En base a la experiencia obtenida en laboratorio con el presente trabajo de investigación, se recomienda lo siguiente:

7.2.1 Recomendaciones para ensayos de laboratorio.

- En suelos finos muy plásticos (arcillosos, arcillo limosos o limo arcillosos), para el ensayo de granulometría por el método hidrométrico, el tiempo de ensayo debe ser mayor a 24 horas, con el fin de determinar los % y tamaños de las partículas de arcilla y coloides.
- Para determinar el potencial de expansividad de un suelo plástico, los ensayos indispensables que deben realizarse son: Límites de Atterberg, Hidrometría, Gravedad específica.

- Se recomienda usar la clasificación cualitativa de la Expansividad del material a estudiar, usando sus propiedades índices como lo son: IP, % de finos e IC (Definido por Ranganatham & Satyanarayana, como $IC=LL-LC$), ya que son un buen parámetro para saber qué tan expansivo puede llegar a ser el suelo.
- Para los ensayos de hinchamiento, al momento de labrar la muestra se debe procurar que las probetas a utilizar en los ensayos sean obtenidas del mismo estrato, al mismo nivel de la muestra inalterada.
- Para los ensayos de Hinchamiento libre, Presión de hinchamiento y Ensayo Lambe, se recomienda realizar los ensayos a cada material con humedades iniciales muy cercanas, para poder analizar y comparar los resultados de estos en las mismas condiciones.
- Al realizar el Ensayo Lambe se debe tomar en cuenta, que es un método indirecto donde se obtiene el potencial de expansividad de un suelo, por lo que se recomienda no usar el resultado de IE, que es equivalente a la presión de hinchamiento, para el diseño estructural de cimentaciones.
- Para los suelos con plasticidad, es importante definir el tipo de arcilla a partir de su mineralogía, además de conocer sus límites de consistencia y características granulométricas.
- Para que los resultados de los ensayos de laboratorio tengan mayor confiabilidad, se recomienda hacer la mayor cantidad de pruebas posibles.

7.2.2 Recomendaciones en lo referente a la aplicación de resultados de laboratorio:

- Al construir sobre un suelo arcilloso se recomienda siempre impermeabilizar la superficie, en una extensión tal que, se impida que el suelo inmediatamente bajo la cimentación absorba agua y genere presiones por hinchamiento bajo el cimiento. Por ello se debe dejar drenajes adecuados para la evacuación del agua superficial.
- Es necesario conocer la profundidad a la que se encuentra la capa activa, cuando se pretende cimentar una estructura sobre un estrato profundo de arcilla altamente plástica, para que se aplique la técnica de cimentación más adecuada desde el punto de vista geotécnico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

LIBROS DE TEXTO.

- Alfonso Rico Rodríguez & Herminio del Castillo. “La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres, carreteras, Ferrocarriles y Autopistas”, Volumen 2, México, 2005.
- Braja M. Das. “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”. Editorial: Thompson Learning. 2001.
- Luis I. González de Vallejo & Mercedes Ferrer. “Ingeniería Geológica”. Editorial: Prentice Hall. 2002.
- Juárez Badillo & Rico Rodríguez. “Mecánica de Suelos (Tomo I)”. Editorial: Limusa, México. 1992.
- J.A. Jiménez salas & J.L. de Justo Alpañes. “Geotecnia y Cimentaciones I”. Editorial: Rueda. 1975.

DOCUMENTOS TÉCNICOS.

- Aracely Ruiz Cruz, “Clasificación de las arcillas en base a su estabilidad”, Instituto Tecnológico de Tijuana, México, 2014.
- Hernández Rosales Marco, “Estudio Geológico y reconocimiento de arcillas expansivas en suelos de una zona al sur de Maracay, estado de Aragua”, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela, Febrero de 2006.

- Jesús Llorca Aquesolo, “Sobre la edificación en arcillas expansivas”, Ingeniero en caminos, Madrid, España, 1965.
- Mauro Codevilla, “Arcillas Expansivas del gran Buenos Aires”, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, 2007.
- F. Rodríguez – Roa, “Fundamentos de Arcillas Expansivas”, Profesor de Ingeniería Geotécnica, Universidad Católica de Chile, 2004.
- Julio Patrone & José Enrique Prefumo, “La acción de los suelos expansivos sobre las cimentaciones, métodos de prevención y control”, Docentes de mecánicas de suelos, Universidad de Montevideo, 2007.
- Juan Manuel Gisbert Blanquer, “Filosilicatos”, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2005.
- Hugo Sergio Haas Mora. “Formación de suelos”. Universidad Autónoma de México. 2010.
- Oteo Mazo, Salinas Rodríguez. “Mapa previsor de riesgos por expansividad de arcillas en España”. 1986.
- Méndez Salas & Pineda Núñez. “Comportamiento de cimentaciones en suelos expansivos”.
- Ing. Agr. Miguel A. Scalone Echave – Instituto de Agrimensura. “Propiedades físico-químicas de los suelos” capítulo 10.
- Holtz & Kovacs. “An Introduction to Geotechnical Engineering”.

- Baeza Campusano. “Diseño de zapatas continuas de cimentación sobre suelos expansivos mediante la metodología Lytton – Mitchell, caso Querétaro”, Trabajo de graduación para optar al grado de licenciado en ingeniería civil, Universidad Nacional Autónoma de Querétaro, México (2012).
- Bravo Quiñones. “Estudio geotécnico para vivienda unifamiliar en terreno expansivo”. 2014.
- Raúl Beltrán Martínez, “Diseño Geotécnico y estructural de una cimentación en arcilla expansiva”, Trabajo de graduación para optar al grado de master en ingeniería civil (Geotecnia), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México (2009).
- Joaquín Enrique Rodríguez Gutiérrez, “Asentamiento de los suelos”, Trabajo de graduación para optar al grado de ingeniero civil, Universidad José Simeón Cañas (UCA), Antiguo Cuscatlán, El Salvador (1980).
- Saúl Orlando Flores Contreras, “Influencia de la compactación y el contenido de humedad en arcillas expansivas de El Salvador”, Trabajo de graduación para optar al grado de ingeniero civil, Universidad José Simeón Cañas (UCA), Antiguo Cuscatlán, El Salvador (2014).
- René Arturo Garay Díaz, “Clasificación de Arcillas presentes en los bancos de Guatajiagua, departamento de Morazán, y Facultad Multidisciplinaria Oriental”, Trabajo de graduación para optar al título de ingeniero civil, Universidad de El Salvador (UES), San Salvador, El Salvador (2007).

- Oscar Edgardo Ayala Valdez, “Aplicación de los modelos constitutivos para representar el comportamiento de Tierra Blanca Joven (TBJ), unidad G”, Trabajo de graduación para optar al título de ingeniero civil, Universidad de El Salvador (UES), San Salvador, El Salvador (2013).

NORMATIVAS INTERNACIONALES.

- ✓ Determinación de Índice de Lambe (a través de la Norma INV E-132-07 “determinación de suelos expansivos”).
- ✓ American Society for Testing and Materials (ASTM).

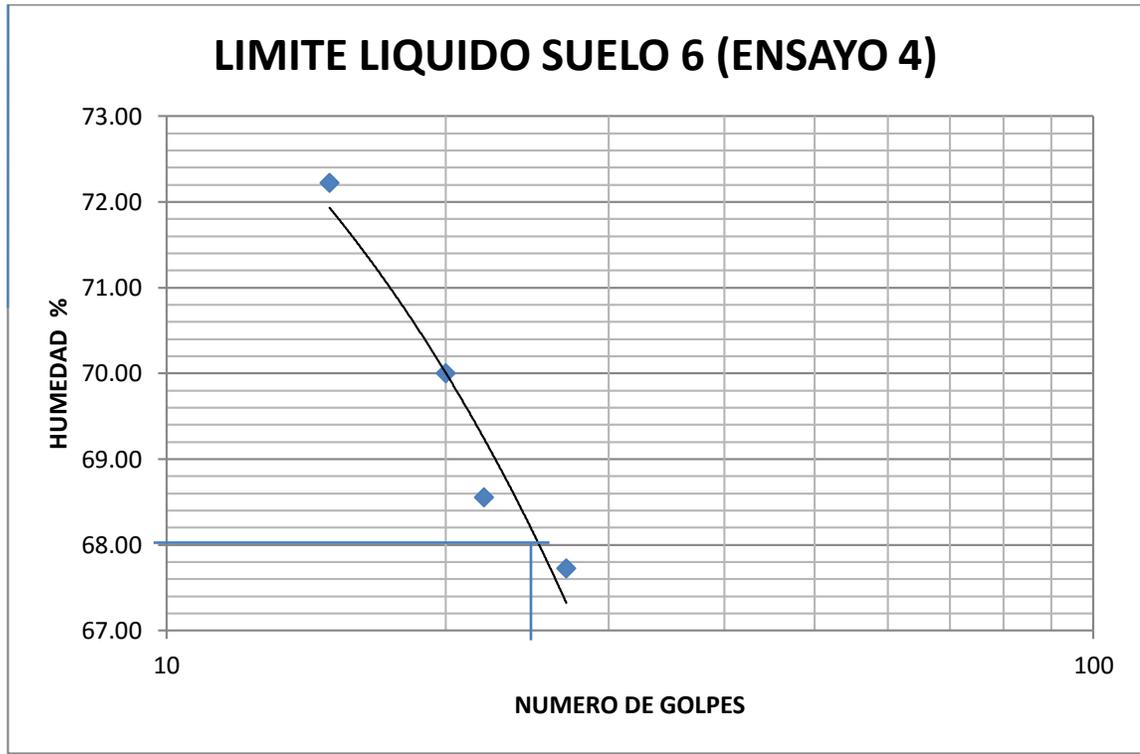
SITIOS WEB.

- ✓ http://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02010103.pdf
- ✓ <http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/10/suelos-finos.html>
- ✓ www.empresasconstruccion.es/cimentaciones-zapatasylosas-diferencias/
- ✓ http://www.dictuc.cl/geotecnia/images/expansivas_1.pdf
- ✓ <http://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2012/5922/Capitulo10.pdf>
- ✓ <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion3.PropiedadesArcillas.pdf>
- ✓ <http://materias.fi.uba.ar/6408/03b%20Consolidacion%20de%20suelos.pdf>
- ✓ <http://www.ing.unlp.edu.ar/constr/g1/Capitulo%205%20Consolidacion%20de%20suelos.pdf>
- ✓ <https://es.scribd.com/doc/87106148/PROPIEDADES-FISICO-QUIMICAS-DE-LAS-ARCILLAS>

ANEXOS

ANEXO 1: FORMATO UTILIZADO EN LA DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL.

	<p>UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES "ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"</p>																													
<p>HUMEDAD NATURAL - ASTM 2216 - 98</p>																														
<p>Proyecto: <i>Trabajo de graduación: "Determinación del comportamiento al hinchamiento y retracción de suelos que poseen plasticidad en algunos puntos de la carretera Longitudinal del Norte , en el tramo comprendido entre Metapán (Dpto. Santa Ana) y Sensuntepeque (Dpto. Cabañas)"</i></p>																														
<p>Ubicación : Metapán km 104 , Santa Ana</p>																														
<p>Ensayo No : 1 Profundidad : 0.4 m</p>																														
<p>Muestra : 1 Fecha : 8 de Mayo de 2015</p>																														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Número del recipiente</td> <td style="text-align: center;">104</td> <td style="text-align: center;">47</td> <td style="text-align: center;">2B</td> </tr> <tr> <td>peso del recipiente g</td> <td style="text-align: center;">10.30</td> <td style="text-align: center;">9.70</td> <td style="text-align: center;">17.99</td> </tr> <tr> <td>Peso del recipiente +suelo (h) g</td> <td style="text-align: center;">94.50</td> <td style="text-align: center;">93.98</td> <td style="text-align: center;">102.26</td> </tr> <tr> <td>Peso del recipiente +suelo (s) g</td> <td style="text-align: center;">77.59</td> <td style="text-align: center;">76.93</td> <td style="text-align: center;">85.65</td> </tr> <tr> <td>peso del sólidos g</td> <td style="text-align: center;">67.29</td> <td style="text-align: center;">67.23</td> <td style="text-align: center;">67.66</td> </tr> <tr> <td>W (natural) %</td> <td style="text-align: center;">25.13</td> <td style="text-align: center;">25.36</td> <td style="text-align: center;">24.55</td> </tr> <tr> <td>W (natural) _promedio %</td> <td></td> <td style="text-align: center;">25</td> <td></td> </tr> </table>		Número del recipiente	104	47	2B	peso del recipiente g	10.30	9.70	17.99	Peso del recipiente +suelo (h) g	94.50	93.98	102.26	Peso del recipiente +suelo (s) g	77.59	76.93	85.65	peso del sólidos g	67.29	67.23	67.66	W (natural) %	25.13	25.36	24.55	W (natural) _promedio %		25		
Número del recipiente	104	47	2B																											
peso del recipiente g	10.30	9.70	17.99																											
Peso del recipiente +suelo (h) g	94.50	93.98	102.26																											
Peso del recipiente +suelo (s) g	77.59	76.93	85.65																											
peso del sólidos g	67.29	67.23	67.66																											
W (natural) %	25.13	25.36	24.55																											
W (natural) _promedio %		25																												



Para 25 golpes sacado del grafico LL=68.00%

ANEXO 4: FORMATO UTILIZADO EN ENSAYOS DE LIMITE PLÁSTICO.

	<p>UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES "ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"</p>																																																		
LIMITE PLÁSTICO - ASTM D 4318-00																																																			
<p>Proyecto: <i>Trabajo de graduación: "Determinación del comportamiento al hinchamiento y retracción de suelos que poseen plasticidad en algunos puntos de la carretera Longitudinal del Norte , en el tramo comprendido entre Metapán (Dpto. Santa Ana) y Sensuntepeque (Dpto. Cabañas)"</i></p>																																																			
<p>Ubicación : Metapán km 104 , Santa Ana</p>																																																			
<p>Ensayo No : 4 Profundidad : 0.4 m</p>																																																			
<p>Muestra : 1 Fecha : 29 de Junio de 2015</p>																																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Descripción</th> <th colspan="4">Resultados</th> </tr> <tr> <th>Muestra</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N° de recipiente</td> <td>0-4</td> <td>0-7</td> <td>0-11</td> <td>0-12</td> </tr> <tr> <td>Masa de recipiente (g)</td> <td>19.30</td> <td>19.74</td> <td>29.88</td> <td>22.3</td> </tr> <tr> <td>Masa de suelo húmedo + recipiente (g)</td> <td>30.10</td> <td>30.92</td> <td>34.5</td> <td>29.48</td> </tr> <tr> <td>Masa de suelo seco + recipiente (g)</td> <td>27.60</td> <td>28.26</td> <td>33.44</td> <td>27.81</td> </tr> <tr> <td>Masa de agua (g)</td> <td>10.80</td> <td>11.18</td> <td>4.62</td> <td>7.18</td> </tr> <tr> <td>Masa de suelo seco (g)</td> <td>2.50</td> <td>2.66</td> <td>1.06</td> <td>1.67</td> </tr> <tr> <td>Humedad (%)</td> <td>30.12</td> <td>31.22</td> <td>29.78</td> <td>30.31</td> </tr> <tr> <td>Promedio (%)</td> <td colspan="4" style="text-align: center;">30.36</td> </tr> </tbody> </table>		Descripción	Resultados				Muestra	1	2	3	4	N° de recipiente	0-4	0-7	0-11	0-12	Masa de recipiente (g)	19.30	19.74	29.88	22.3	Masa de suelo húmedo + recipiente (g)	30.10	30.92	34.5	29.48	Masa de suelo seco + recipiente (g)	27.60	28.26	33.44	27.81	Masa de agua (g)	10.80	11.18	4.62	7.18	Masa de suelo seco (g)	2.50	2.66	1.06	1.67	Humedad (%)	30.12	31.22	29.78	30.31	Promedio (%)	30.36			
Descripción	Resultados																																																		
Muestra	1	2	3	4																																															
N° de recipiente	0-4	0-7	0-11	0-12																																															
Masa de recipiente (g)	19.30	19.74	29.88	22.3																																															
Masa de suelo húmedo + recipiente (g)	30.10	30.92	34.5	29.48																																															
Masa de suelo seco + recipiente (g)	27.60	28.26	33.44	27.81																																															
Masa de agua (g)	10.80	11.18	4.62	7.18																																															
Masa de suelo seco (g)	2.50	2.66	1.06	1.67																																															
Humedad (%)	30.12	31.22	29.78	30.31																																															
Promedio (%)	30.36																																																		

ANEXO 5: FORMATO UTILIZADO EN ENSAYOS DE LIMITE DE CONTRACCIÓN.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"

LIMITE DE CONTRACCIÓN - ASTM D 427-04

Proyecto: *Trabajo de graduación: "Determinación del comportamiento al hinchamiento y retracción de suelos que poseen plasticidad en algunos puntos de la carretera Longitudinal del Norte, en el tramo comprendido entre Metapán (Dpto. Santa Ana) y Sensuntepeque (Dpto. Cabañas)"*

Ubicación : Metapán km 104 , Santa Ana

Ensayo No : 1 Profundidad : 0.4 m
Muestra : 1 Fecha : 20 de Junio de 2015

Muestra	1	2	3	4
Densidad de mercurio (g/cm ³)	13.55			
Densidad del agua (g/cm ³)	1.00			
N° de recipiente	7	8	1,2	1,3
Masa de recipiente (g)	28.28	26.88	27.43	27.71
Masa de suelo húmedo + recipiente (g)	59.57	57.92	58.04	57.63
Masa de suelo seco + recipiente (g)	47.03	45.51	45.85	45.71
Masa de mercurio + capsula (g)	306.33	305.70	298.23	296.45
Masa de mercurio (g)	278.05	278.82	270.80	268.74
Volumen inicial (cm ³)	20.52	20.58	19.99	19.83
Masa de mercurio desplazado (g)	153.01	150.12	145.87	142.58
Volumen final (cm ³)	11.29	11.08	10.77	10.52
Masa inicial de suelo húmedo (g)	31.29	31.04	30.61	29.92
Masa de suelo seco (g)	18.75	18.63	18.42	18.00
Humedad (%)	66.88	66.61	66.18	66.22
Límite de contracción (%)	17.66	15.63	16.12	14.50
Promedio LC (%)	15.98			
Relación de contracción	1.66	1.68	1.71	1.71

ANEXO 6: FORMATOS UTILIZADO EN ENSAYOS DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.

		UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES "ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"		pag. 1/2			
ANALISIS GRANULOMETRICO (MECANICO)-ASTM D 422							
Proyecto:	Trabajo de Graduación: "Determinación del comportamiento al hinchamiento y retracción de suelos que poseen plasticidad en algunos puntos de la Carretera Longitudinal del Norte, en el tramo comprendido entre Metapán (Dpto. Santa Ana) y Sensuntepeque (Dpto. Cabañas)." Ubicación : Metapán km 104, Santa Ana						
Ensayo No :	1	Profundidad :	0.4 m				
Muestra :	1	Fecha :	15 de Junio de 2015				
Datos iniciales							
Peso total de muestra seca (g)			642.06				
Peso retenido en malla No 10 (g)			0.37				
Peso de material que pasa la malla No 10 (g)			641.69				
ANALISIS GRANULOMETRICO DEL MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ No 10							
Masa inicial	0.37g						
No Malla	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	Peso Retenido corregido (g)	% Retenido Parcial	% Acumulado	% Que pasa	
No 4	4.75	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	
No 8	2.36	0.20	0.20	0.03	0.03	99.97	
No 10	2.00	0.17	0.17	0.03	0.06	99.94	
Pasa No 10		641.69	641.69	99.94	100.00		
Total		642.06	642.06	100.00			
ANALISIS GRANULOMETRICO DEL MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ No 10 (DESPUES DE LAVADO)							
Masa inicial	62.50g		Material Retenido por el tamiz No	2.52g			
			Material que paso el tamiz No 200	59.98g			
Malla	Abertura (mm)	Peso parcial retenido (g)	Peso retenido compensado (g)	% Retenido Parcial	% Acumulado	% Que pasa	% que pasa referido a la muestra total
N° 16	1.18	0.11	0.11	0.18	0.18	99.82	99.77
N° 30	0.6	0.24	0.24	0.38	0.56	99.44	99.38
N° 50	0.3	0.44	0.44	0.70	1.26	98.74	98.68
N° 100	0.15	0.73	0.73	1.17	2.43	97.57	97.51
N° 200	0.075	1	1.00	1.60	4.03	95.97	95.91
Pasa N° 200		59.98	59.98	95.97	100.00		
Total		62.50	62.50	100.00			



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
 "ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"

pag. 2/2

ANALISIS GRANULOMETRICO (HIDROMETRIA)-ASTM D 422

Proyecto: Trabajo de Graduación: "Determinación del comportamiento al hinchamiento y retracción de suelos que poseen plasticidad en algunos puntos de la Carretera Longitudinal del Norte, en el tramo comprendido entre Metapán (Dpto. Santa Ana) y Sensuntepeque (Dpto. Cabañas)."

Ubicación : Metapán km 104, Santa Ana
 Ensayo No : 1 Profundidad : 0.4 m
 Muestra : 1 Fecha : 15 de Junio de 2015

Datos iniciales

Preparación de la muestra

Recipiente No M-1 Tipo de hidrometro: 152H
 Masa inicial seca (g) 62.5 Agente dispersante: Hexametáfosfato de Sodio
 Cantidad de defloculante (mL) 125

Lecturas reales de hidrometro y temperatura

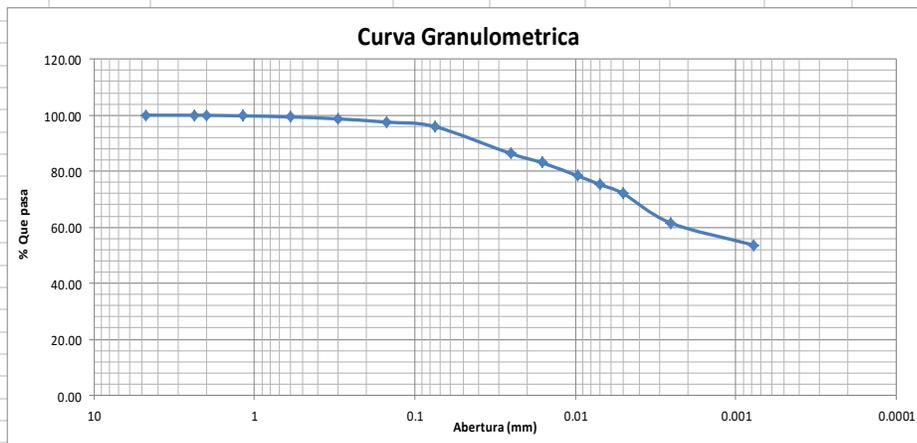
Lecturas de hidrometro

Lectura del nivel superior del menisco en probeta con agua	0
Lectura del nivel inferior del menisco en probeta con agua	1
Lectura en agua destilada	1
Lectura en agua con defloculante	5
Corrección por menisco y defloculante	
Corrección por menisco Cm	-1
Corrección por defloculante Cd	4
Gravedad Específica	2.51

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Lectura de hidrometro
2	26	57
5	25.9	55
15	26	52
30	26	50
60	26.2	48
250	27.2	43
2909	26.7	38

CALCULOS DE HIDROMETRIA

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Lectura de hidrometro	Lectura corregida (Rc)	% partículas en suspensión (P)	% partículas referido a la muestra total	Lectura corregida por menisco	L (cm)	K	$\sqrt{L/t}$	D(mm)
2	26	57	54.65	89.89	86.22	56	7.1	0.013296	1.88414	0.02505158
5	26	55	52.65	86.60	83.06	54	7.4	0.013296	1.21655	0.01617528
15	26	52	49.65	81.67	78.33	51	7.9	0.013296	0.72572	0.00964915
30	26	50	47.65	78.38	75.18	49	8.3	0.013296	0.52599	0.00699358
60	26	48	45.65	75.09	72.02	47	8.6	0.013296	0.37859	0.00503378
250	27	43	39	64.15	61.53	42	9.4	0.013146	0.19391	0.00254910
2909	27	38	34	55.92	53.63	37	10.2	0.013146	0.05921	0.00077843



ANEXO 7: FORMATOS UTILIZADO EN ENSAYOS DE HINCHAMIENTO LIBRE.

HINCHAMIENTO LIBRE - ASTM D 4829			
Proyecto:	Trabajo de graduación	Consolidómetro :	2
Ubicación :	Metapán km 104 , Santa Ana	Anillo :	2
Ensayo No :	3	Hinchamiento (mm) :	4.37
Muestra :	1	Max hinchamiento (%) :	22.22
Profundidad :	0.4 m	Gravedad especifica :	2.51
Fecha :	24 de junio de 2015		

DATOS DE LA PROBETA	
Peso del anillo 2 (g) :	63.86
peso de probeta + anillo (g) :	178.75
Peso probeta (g) :	114.89
Diámetro (cm) :	6.36
Altura (cm) :	1.95
Área (cm ²) :	31.77
Volumen (cm ³)	61.95
Peso de la muestra seca (g)	99.06

DATOS GENERALES	
Peso de la charola 16-4(g) :	80.47
Peso de anillo +charola+ probeta húmeda (g):	272.6 2
Peso de anillo(seco) + probeta húmeda+charola (g):	243.3 9

DATOS ANTES DE CONSOLIDACIÓN	
Peso húmedo (g) :	114.89
Peso seco (g) :	99.06
Peso de agua (g) :	15.83
Volumen total _inicial (cm ³) :	61.95
Relación de vacios _inicial :	0.57
Humedad _inicial (%) :	15.98
Grado de saturación (%) :	70.41

DATOS DESPUES DE LA CONSOLIDACIÓN	
Peso húmedo (g) :	128.2 9
Peso seco (g) :	99.06
Peso de agua (g) :	29.23
Volumen total _final (cm ³)	75.93
Volumen de solidos (cm ³) :	39.47
Volumen de vacios (cm ³) :	36.46
Relacion de vacios _final :	0.92
Humedad de saturación (%) :	29.51
Grado de saturación _final (final) :	80.17



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"

pág. 2/2

HINCHAMIENTO LIBRE - ASTM D 4829

Proyecto:	<i>Trabajo de graduación: "Determinación del comportamiento al hinchamiento y retracción de suelos que poseen plasticidad en algunos puntos de la carretera Longitudinal del Norte , en el tramo comprendido entre Metapán (Dpto. Santa Ana) y Sensuntepeque (Dpto. Cabañas)"</i>		
Ubicación :	Metapán km 104 , Santa Ana	Consolidómetro :	2
Ensayo No :	3	Anillo :	2
Muestra :	1	Hinchamiento (mm) :	4.37
Profundidad :	0.4 m	Max hinchamiento (%) :	22.22
Fecha :	24 de junio de 2015	Gravedad especifica :	2.51

FECHA	TIEMPO	TIEMPO TRANSCURRIDO	Temperatura	Presión (Kg/cm ²)	Lectura del micrómetro
24-06-20115	08:59	0	28		11.0000
	"	6	28		10.9750
	"	15	28		10.9500
	"	30	28		10.9150
	09:00	1 min	28		10.8650
	09:01	2min	28		10.7925
	09:03	4min	28		10.6600
	08:07	8min	28		10.5600
	09:14	15min	28		10.3725
	09:29	30min	28		10.1075
	09:59	1h	28		9.7600
	10:59	2	28		9.2150
	12:59	4	28		8.2425
	01:41	4.75	28		7.9875

25/06/2015	09:00	24	29		6.7400
	11:42	26.75			6.7225
26/06/2015	09:00	48	29		6.6350
	11:03	50			6.6275
<i>CARGA DE PASTILLA</i>	11:03	0	<i>carga total de = 10 KG</i>		6.6275
26/06/2015	"	6		3.15	8.0500
	"	15			8.5500
	"	30			8.6050
	11:04	1 min			8.6950
	11:05	2min			8.7850
	11:07	4min			8.9175
	11:11	8min			9.0900
	11:18	15min			9.3025
	11:33	30min			9.5725
	12:03	1h			9.7625
29/06/2015	08:48				10.5025
<i>CARGA DE PASTILLA</i>	11:24	0	<i>carga total de = 14 KG</i>		10.5025
29/06/2015		6		4.41	10.56
	"	15			10.5700
	"	30			10.5725
	11:25	1 min			10.0000
	11:26	2min			10.5825
	11:28	4min			10.5928
	11:32	8min			10.6050
	11:39	15min			10.6225
	11:54	30min			10.6325
	12:24	1h			10.6500
	01:24	2			10.7100
	02:24	3			10.7525
30/06/2015	08:44	21.25			10.8475

ANEXO 8: FORMATOS UTILIZADO EN ENSAYOS DE LAMBE.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"

pág. 1/2

ENSAYO LAMBE- INV E-132-07

Proyecto:	Trabajo de graduación		
Ubicación :	Metapán km 104 , Santa Ana		
Ensayo No :	2	Consolidómetro :	Lambe
Muestra :	1	Anillo :	Lambe
Profundidad :	0.4 m	Gravedad especifica :	2.51
Fecha :	24 de junio de 2015		

DATOS DE LA PROBETA

Peso del anillo 2 (g) :	243.85
peso de probeta + anillo (g) :	396.43
Peso probeta (g) :	152.58
Diametro (cm) :	6.96
Altura (cm) :	2.23
Area (cm ²) :	38.05
Volumen (cm ³)	84.84
Peso de la muestra seca (g)	127.32

DATOS GENERALES

peso de la charola A-34(g) :	87.75
suelo (h)+charola A-34(g):	251.24
suelo (s)+charola A-34(g):	215.07

DATOS ANTES DE ENSAYO

Peso húmedo (g) :	152.58
Peso seco (g) :	127.32
Peso de agua (g) :	25.26
Volumen total _inicial (cm ³) :	84.84
Relación de vacíos _inicial :	0.67
Humedad inicial (%) :	19.84
Grado de saturación (%) :	74.02

DATOS DESPUES DE ENSAYO

Peso húmedo (g) :	163.49
Peso seco (g) :	127.32
Peso de agua (g) :	36.17
Volumen total _final (cm ³)	84.85
Volumen de solidos (cm ³) :	50.73
Volumen de vacíos (cm ³) :	34.13
Relación de vacíos _final :	0.67
Humedad de saturación (%):	28.41
Grado de saturación _final (final) :	105.99



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"

pág. 2/2

ENSAYO LAMBE- INV E-132-07

Proyecto: *Trabajo de graduación: "Determinación del comportamiento al hinchamiento y retracción de suelos que poseen plasticidad en algunos puntos de la carretera Longitudinal del Norte , en el tramo comprendido entre Metapán (Dpto. Santa Ana) y Sensuntepeque (Dpto. Cabañas)"*

Ubicación : Metapán km 104 , Santa Ana **Consolidómetro :** Lambe

Ensayo No : 2 **Anillo :** Lambe

Muestra : 1 **Hinchamiento (mm) :** 0.04

Profundidad : 0.4 m **Max hinchamiento (%) :** 0.17

Fecha : 1 de Julio de 2015

FECHA	TIEMPO	TIEMPO TRANSCURRIDO	Temperatura	Presión (Kg/cm ²)	Lectura del micrómetro
01/07/2015	09:50	0		-	00
	"	6		-	0
	"	15		-	0
	"	30		-	0
	09:51	1 min		-	0
	09:52	2min		-	0
	09:54	4min		-	1
	09:58	8min		-	2
	10:05	15min		-	2
	10:20	30min		-	3
	10:50	1h		-	5
	12:17	2		-	8
02/07/2015	02:50	17.5		-	12
	04:06	19			12
	08:05	23			15
	09:05	24			15
Lectura: 15					
IE: 2350					
CPV: 2.85					

ANEXO 9: FORMATOS UTILIZADO EN ENSAYOS DE PRESIÓN DE HINCHAMIENTO.

	UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES "ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"	<p>pág. 1/2</p>
PRESION DE HINCHAMIENTO - ASTM D 4546		
Proyecto: <i>Trabajo de graduación: "Determinación del comportamiento al Hinchamiento y retracción de suelos que tiene plasticidad, en algunos puntos de la carretera Longitudinal del Norte, en el tramo comprendido entre Metapán (Dpto. Santa Ana) y Sensuntepeque (Dpto. Cabañas)"</i>		
Ubicación :	Metapán km 104 , Santa Ana	Consolidómetro : 1
Ensayo No :	2	Anillo: 1
Muestra :	1	Ventaja Mecánica 10
		Fecha : 1 de Julio de 2015

DATOS DE LA PROBETA		DATOS GENERALES	
Peso del anillo 2 (g) :	63.67	Peso de la charola E-3(g) :	65.22
Peso de probeta + anillo (g) :	173.30	Peso de charola +probeta húmeda+anillo (g):	254.14
Peso probeta (g) :	109.63	probeta seca+charola (g):	157.32
Diámetro (cm) :	6.34		
Altura (cm) :	1.95		
Área (cm ²):	31.57		
Volumen (cm ³)	61.56		
Peso de la muestra seca (g)	92.10		

DATOS ANTES DE CONSOLIDACIÓN		DATOS DESPUES DE LA CONSOLIDACIÓN	
Peso húmedo (g) :	109.63	Peso húmedo (g) :	125.25
Peso seco (g) :	92.10	Peso seco (g) :	92.10
Peso de agua (g) :	17.53	Peso de agua (g) :	35.15
Volumen total _inicial (cm ³) :	61.56	Volumen total _final (cm ³)	66.19
Relación de vacíos _inicial :	0.68	Volumen de solidos (cm ³) :	36.69
Humedad inicial (%) :	19.03	Volumen de vacíos (cm ³) :	29.50
Grado de saturación (%):	70.49	Relación de vacíos _final :	0.80
		Humedad de saturación (%):	35.99
		Grado de saturación _final (final) :	112.37



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"

pág. 2/2

PRESION DE HINCHAMIENTO - ASTM D 4546

Proyecto:	<i>Trabajo de graduación: "Determinación del comportamiento al Hinchamiento y retracción de suelos que tiene plasticidad, en algunos puntos de la carretera Longitudinal del Norte, en el tramo comprendido entre Metapán (Dpto. Santa Ana) y Sensuntepeque (Dpto. Cabañas)"</i>				
Ubicación :	Metapán km 104 , Santa Ana	Consolidómetro :	1		
Ensayo No :	2	Anillo :	1		
Muestra :	1	Fecha :	1 de Julio de 2015		

Carga (Kg)	Presión (Kg/cm ²)	Lectura del micrómetro		ΔH (mm)	Hf(mm)	ΔH (%)
		Inicial	Final			
12.03285	3.812	10.0100	9.9325	0.0775	19.5775	0.40
16.03285	5.079	9.9325	10.0625	-0.1300	19.3700	-0.67
Descarga (Kg)						
12.03285	3.812	10.0625	10.0250	0.0375	19.5375	0.19
8.03285	2.544	10.0250	9.8575	0.1675	19.6675	0.85
4.00751	1.269	9.8575	9.6500	0.2075	19.7075	1.05
0.00000	0.000	9.6500	8.1825	1.4675	20.9675	7.00

