

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DETERMINACIÓN Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EXPANSIVO EN ARCILLAS, MEDIANTE LA VALIDACIÓN DE UN NUEVO DISPOSITIVO PARA LA MEDICIÓN DE LA PRESIÓN DE EXPANSIÓN EN SUELOS ARCILLOSOS**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por la Ing. Leal Vegas, Karellys Andreina  
Para optar al título de Magister en Ciencias Geológicas

Caracas, noviembre de 2019

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DETERMINACIÓN Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EXPANSIVO EN ARCILLAS, MEDIANTE LA VALIDACIÓN DE UN NUEVO DISPOSITIVO PARA LA MEDICIÓN DE LA PRESIÓN DE EXPANSIÓN EN SUELOS ARCILLOSOS**

Tutor académico: Prof. Duilio Marcial

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por la Ing. Leal Vegas, Karellys Andreina  
Para optar al título de Magister en Ciencias Geológicas

© Leal Vegas Karellys Andreina 2019.

Hecho el Depósito de Ley.

Depósito Legal lft. DC2020000139.



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
COMISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



VEREDICTO

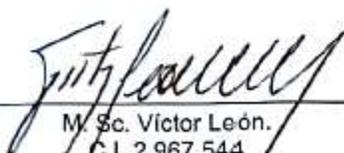
Quienes suscriben, miembros del jurado designado por el Consejo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el **Trabajo Especial de Grado** presentado por la **ING. KARELLYS LEAL**, portador de la Cédula de Identidad No V-18.786.910 , bajo el título **"DETERMINACIÓN Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EXPANSIVO EN ARCILLAS, MEDIANTE LA VALIDACIÓN DE UN NUEVO DISPOSITIVO PARA LA MEDICIÓN DE LA PRESIÓN DE EXPANSIÓN EN SUELOS ARCILLOSOS"**, a fin de cumplir con el requisito legal para optar al grado académico de Magister en Geofísica; dejan constancia de lo siguiente:

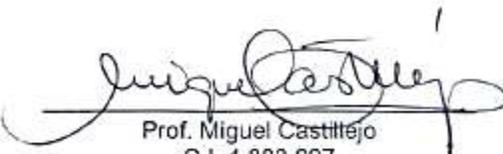
1.- Leído como fue dicho trabajo por cada uno de los miembros del jurado, se fijó el día 26 de noviembre de 2019, a las 02:30 p.m., para que la autora lo defendiera en forma pública, lo que éste hizo en el aula 312 de Postgrado de la Escuela de Geología, mediante un resumen oral de su contenido, luego de lo cual respondió a las preguntas que le fueron formuladas por el jurado, todo ello conforme con lo dispuesto en el Reglamento de Estudios de Postgrado.

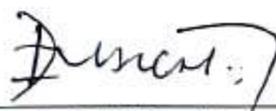
2.- Finalizada la defensa del trabajo, el jurado decidió aprobarlo, por considerar, sin hacerse solidario con la ideas expuestas por el autor, que se ajusta a lo dispuesto y exigido en el Reglamento de Estudios de Postgrado.

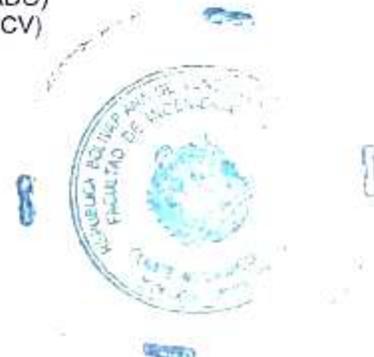
Para este veredicto, el Jurado, los profesores, estimaron que la obra examinada representa en su conjunto un aporte importante. Esta investigación presenta un enfoque novedoso y el jurado por unanimidad le asigna la calificación de "APROBADO".

En fe de lo cual se levanta la presente ACTA, a los VEINTISÉIS (26) días del mes de NOVIEMBRE del año 2019, conforme a lo dispuesto en el Reglamento de Estudios de Postgrado, actuó como Coordinador del Jurado el Dr. Duilio Marcial.

  
M. Sc. Víctor León.  
C.I. 2.967.544  
(JURADO)  
(CONS. EXTERNO)

  
Prof. Miguel Castillejo  
C.I. 4.883.097  
(JURADO)  
(FI-UCV)

  
Dr. Duilio Marcial  
C.I.7.992.995  
(TUTOR)  
(FI-UCV)



## **DEDICATORIA**

*A mis padres y mi compañero de vida quienes día a día me brindan apoyo incondicional para superar los retos profesionales y personales afrontados, y de quienes recibo cariño y amor en las buenas y no tan buenas*

*“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como la oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber”*

*Albert Einstein*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Al Doctor Duilio Marcial, quien, en calidad de tutor, me guió pacientemente y me prestó su apoyo incondicional durante el desarrollo de este trabajo.*

*Al Profesor José Romero, quien me brindo todos sus conocimientos, colaboración y tiempo, en la optimización del sistema automatizado de adquisición de datos. Al Profesor Leonel Rodríguez, en quien siempre pude encontrar orientación para la ejecución de los ensayos realizados en el Laboratorio de Suelos de IMME. A la Ing. Gelin Mejías y a la Profesora Anna Di Prinzio por su colaboración en la realización del análisis morfológico de las arcillas analizadas.*

*A los técnicos de los laboratorios utilizados Burgos (IMME) y Samuel García (Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales por su apoyo, tiempo y conocimientos a la hora de la ejecución de los ensayos realizados. Muy especialmente, al sr Ubaldo Sivira, quien me brindo un espacio de trabajo y equipos para la preparación de probetas.*

*Finalmente, un especial agradecimiento a Aracely y Enrique quienes nunca han dejado de confiar en mí y me animan a seguir mi camino día a día, son mi guía y mi refugio. A Luis, gracias infinitas, quien además de no dejarme caer y ofrecerme todo su cariño y apoyo me brindo conocimiento ganándose el título de “tutor personal”.*

*A todos ellos, mil gracias!!*

LEAL VEGAS, KARELLYS ANDREINA

# **DETERMINACIÓN Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EXPANSIVO EN ARCILLAS, MEDIANTE LA VALIDACIÓN DE UN NUEVO DISPOSITIVO PARA LA MEDICIÓN DE LA PRESIÓN DE EXPANSIÓN EN SUELOS ARCILLOSOS**

Tutor académico: Prof. Duilio Marcial. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de Geología. Año, 2019, 184p.

**Palabras claves:** Arcillas expansivas, Ensayos de caracterización geomecánica, Composición mineralógica y elemental, Presión de expansión, Edómetro y 3D BOX.

**Resumen:** La caracterización de la expansividad de los suelos arcillosos, para propósitos prácticos de la ingeniería, requiere de la determinación de la presión de expansión, la cual es obtenida usualmente mediante el uso del edómetro. Aunque se han ideado múltiples aparatos para medir la presión de expansión, en esta oportunidad se tiene como objetivo validar un nuevo dispositivo para la medición de la presión de expansión de suelos arcillosos, mediante la comparación del potencial expansivo obtenido a través del uso de un equipo convencional y el dispositivo 3D BOX propuesto.

Se seleccionaron tres materiales con distinto contenido de minerales arcillosos y propiedades intrínsecas variables, uno tomado en la localidad de Sierra Maestra en la Ciudad Universitaria de Caracas, Distrito Capital; otro tomado en la localidad Lomas de La Guadalupe en Ocumare del Tuy, Estado Miranda; y, adicionalmente, la de bentonita comercial de Wyoming tipo MX-80.

Se realizó la caracterización geomecánica y mineralógica-elemental de dichos materiales, mediante ensayos de límites de consistencia, azul de metileno, ensayos de expansión, rayos X, y microscopía electrónica de barrido. De esta forma, se confirmó la presencia de arcillas con potencial expansivo, donde la arcilla de Sierra Maestra (SM) compuesta principalmente por illita resultó ser normal o ligeramente activa mientras que las muestras de arcilla de la localidad de La Guadalupe (LG) y la bentonita comercial

(BENT) al contener minerales tipo esmectitas se componen de colides activos o nocivos y coloides activos o muy nocivos, respectivamente.

Los materiales fueron compactados de acuerdo a las siguientes densidades de referencia,  $1,6 \text{ g/cm}^3$  para SM,  $1,3 \text{ g/cm}^3$  para LG y  $1,0 \text{ g/cm}^3$  para la BENT, mediante capas de 1 cm a velocidad de 4 mm/min, a través del uso de una prensa mecánica, hasta alcanzar un total de 5 capas para poder obtener la muestra cúbica acorde a las dimensiones de la celda del 3D BOX, donde el sistema automatizado de adquisición de datos empleado en este estudio permitió llevar a cabo el monitoreo continuo de las presiones ejercidas por las muestras durante todo el ensayo.

De tal forma, SM mostró una cinética de hidratación progresiva con una rata de crecimiento rápido al inicio de la saturación y por consiguiente la deformación inicial del sistema es acentuada, debido a la alta densidad seca de la misma que reduce la proporción de macroporos, adicional a las humedades bajas que dan paso al predominio de la adsorción. Por su parte, para LG y BENT, la curva de presión de expansión mostró un comportamiento de dobles máximos, donde el primer pico indica el comienzo de la movilización de agua de la microporosidad hacia la macroporosidad, y al finalizar este reajuste la presión de expansión comienza nuevamente a aumentar para alcanzar el segundo máximo. En esta investigación se ha podido captar este comportamiento con un dispositivo sencillo y robusto como lo es la celda 3D BOX.

Al comparar los resultados obtenidos con ambos dispositivos, tomando en cuenta las ligeras diferencias de densidad seca en las dos muestras, los valores de presión de expansión arrojados por la celda de medición 3D BOX se encuentra muy cerca de la línea de tendencia exponencial definida de acuerdo a resultados procedentes del consolidómetro. Por su parte, la diferencia porcentual entre la presión de expansión experimental y presión de expansión obtenida por medio de la curva de mejor ajuste de las muestras ensayadas con la celda de medición es menor que el diferencial promedio y/o máximo derivado de los ensayos edométricos.

Lo anteriormente expuesto, permite sugerir que el dispositivo con control automatizado de deformación presenta la ventaja de ser muy confiable y arrojar resultados precisos, con poca supervisión humana tomando en cuenta el protocolo de adquisición de datos computarizado utilizado en el presente trabajo.

# ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	3
1.2. OBJETIVOS .....	6
1.2.1. Objetivo General .....	6
1.2.2. Objetivos Específicos .....	6
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	9
1.5. TRABAJOS PREVIOS .....	10
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>13</b>
<b>2. METODOLOGÍA .....</b>	<b>13</b>
2.1. RECOLECCIÓN DE DATOS .....	13
2.2. PROCESAMIENTO DE DATOS.....	13
2.2.1. Ensayos de Caracterización geomecánica .....	14
2.2.2. Ensayo con dispositivo 3D BOX.....	24
2.2.3. Ensayos de composición mineralógica y elemental .....	26
2.3. INTERPRETACIÓN DE DATOS .....	28
2.3.1. Caracterización de muestras .....	28
2.3.2. Sistema de Adquisición de datos.....	28
2.3.3. Comparación de resultados de ensayos de expansión .....	29
2.3.4. Establecimiento de conclusiones finales .....	30
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>31</b>
<b>3. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>31</b>
3.1. GENERALIDADES DE SUELOS ARCILLOSOS.....	31
3.1.1. Grupo de las arcillas .....	34
3.2. PROPIEDADES FISICO QUIMICAS DE LAS ARCILLAS .....	39
3.2.1. Capacidad de Intercambio Catiónico .....	39
3.2.2. Superficie Específica.....	39
3.2.3. Porosidad.....	40

3.2.4.	Absorción y Adsorción.....	41
3.2.5.	Expansividad o Hinchamiento.....	43
3.3.	CARACTERIZACION GEOMECANICA DE SUELOS ARCILLOSOS.....	46
3.3.1.	Sistema de clasificación de los suelos USCS.....	46
3.3.2.	Límites de Consistencia de Atterberg.....	46
3.3.3.	Índice de Nocividad de los coloides.....	48
3.3.4.	Actividad Coloidal.....	49
3.3.5.	Presión de Expansión.....	50
3.3.6.	Equipos utilizados para medir presión de expansión.....	50
3.4.	ANALISIS MINERALOGICO Y ELEMENTAL DE SUELOS ARCILLOSOS.....	55
3.4.1.	Difracción de Rayos-X.....	56
3.4.2.	Fluorescencia de Rayos X.....	57
3.4.3.	Microscopía electrónica.....	59
	<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>61</b>
	<b>4. GEOLOGÍA REGIONAL.....</b>	<b>61</b>
4.1.	GENERALIDADES AREA METROPOLITNA.....	61
4.2.	GENERALIDADES SECTOR VALLES DEL TUY.....	64
	<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>67</b>
	<b>5. GEOLOGÍA LOCAL.....</b>	<b>67</b>
5.1.	SIERRA MAESTRA DE LA CIUDAD UNIVERSITARIA DE CARACAS.....	67
5.2.	SECTOR LOMA DE LA GUADALUPE.....	68
	<b>CAPÍTULO VI.....</b>	<b>69</b>
	<b>6. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....</b>	<b>69</b>
6.1.	DESCRIPCION VISUAL.....	69
6.2.	CARACTERIZACION GEOMECANICA.....	70
6.2.1.	Humedad natural.....	70
6.2.2.	Peso específico y Peso Unitario.....	70
6.2.3.	Granulometría por tamizado e hidrómetro.....	71
6.2.4.	Límites de Consistencia de Atterberg.....	72
6.2.5.	Ensayo de la Mancha o Azul de Metileno.....	73
6.3.	CARACTERIZACION MINERALÓGICA Y ELEMENTAL.....	73
6.3.1.	Análisis De Fluorescencia De Rayos-X.....	74

6.3.2.	Análisis de Difracción de Rayos X .....	74
6.3.3.	Microscopia electrónica de barrido (MEB).....	75
6.4.	EVALUACION DE PROPIEDAES EXPANSIVAS MEDIANTE EQUIPO CONVENCIONAL Y EL 3D BOX.....	78
6.4.1.	Potencial de Expansión y Presión de Expansión con Edómetro .....	78
6.4.2.	Presión de Expansión con el dispositivo 3D BOX.....	80
6.4.3.	Protocolo de adquisición de datos del dispositivo 3D BOX .....	81
<b>CAPÍTULO VII .....</b>		<b>85</b>
<b>7. DISCUSIÓN E INTERPRETACION DE RESULTADOS .....</b>		<b>85</b>
7.1.	CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA Y MINERALOGICA-ELEMENTAL....	85
7.1.1.	Caracterización Geomecánica .....	85
7.1.2.	Caracterización Mineralógica-Elemental .....	89
7.2.	EVALUACION DE PROPIEDADES EXPANSIVAS MEDIANTE EQUIPO CONVENCIONAL Y EL 3D BOX.....	94
7.2.1.	Análisis de potencial de expansión .....	94
7.2.2.	Evaluación de la Presión de Expansión con dispositivo convencional y el 3D BOX.....	96
<b>CAPÍTULO VIII .....</b>		<b>117</b>
<b>8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>117</b>
<b>CAPÍTULO IX .....</b>		<b>121</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>121</b>
<b>APÉNDICE A. RESULTADOS EXPERIMENTALES .....</b>		<b>126</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación general del área de estudio Sierra Maestra, UCV. Modificado de Google Earth (2018) .....	4
Figura 1.2. Ubicación general del área de estudio Lomas de la Guadalupe. Modificado de Google Earth (2018) .....	5
Figura 2.1 Preparación de muestra para Ensayo de Casagrande Límite Líquido .....	19
Figura 2.2. Pasos realizados en el ensayo de Azul de Metileno .....	21
Figura 2.3. Equipo edométrico utilizado en ensayo de expansión.....	22
Figura 2.4. Preparación de la muestra y equipo utilizado para compactación mecánica .....	22
Figura 2.5. Muestra para ensayo edométrico .....	23
Figura 2.6. Preparación de la muestra para colocación en la celda de medición 3D BOX ...	25
Figura 2.7. Esquema de montaje experimental y sistema de adquisición de datos (Tomado de MARCIAL & LANDAETA, 2008) .....	25
Figura 2.8. Muestra ajustada a celda de medición 3D BOX .....	26
Figura 2.9. Preparación de la muestra y equipo utilizado en microscopia electrónica de barrido.....	27
Figura 2.10. Pulverizado de muestra para ensayo de difracción de rayos X.....	27
Figura 3.1. Balance de caras de las láminas por: a) cationes intercambiables; b) cationes interlaminaes en coordinación con grupos OH, formando una capa octaédrica dentro del espacio interlaminar. (FRANCO & MASPOCH, 2009) .....	33
Figura 3.2. (a) Diagrama de capa de Caolinita. (b) Esquema de la estructura cristalina de Caolinita según GRIM, 1968. (c) Fotografía bajo el microscopio electrónico de una muestra de caolinita (WELTON, 2003) .....	34
Figura 3.3. (a) Diagrama de capas de Esmectitas (BERRY & REID, 1993). (b) Esquema de la estructura cristalina de esmectitas según GRIM, 1968. (c) Fotografía bajo el microscopio electrónico de una muestra de esmectita (WELTON, 2003).....	36
Figura 3.4. (a) Diagrama de capas de Illita (BERRY & REID, 1993). (b) Esquema de la estructura cristalina de Illita (c) Fotografía bajo el microscopio electrónico de una muestra de Illita (WELTON, 2003).....	38

Figura 3.5. Esquema de la organización de un material arcilloso: tipos de porosidad y de agua (VILLAR, 2002).....	41
Figura 3.6. Ilustración de la disposición del adsorbente respecto al adsorbato (DROGUETT, 1983).....	42
Figura 3.7. Hidratos de bentonita. Expansión de la red de adsorción de moléculas de agua según trabajo de BRADLEY, CLARK & GRIM, (1935) en BESOAIN (1939).....	44
Figura 3.8. Formación de la doble capa difusa entorno a un cristal de arcilla sumergido en agua (BADILLO & RODRIGUEZ, 2008).....	44
Figura 3.9. Sistema Unificado de Clasificación de suelos (USCS). (En Lambe & Whitman, 1981).....	47
Figura 3.10. Carta de plasticidad de acuerdo al S.U.C.S., Norma ASTM D-2487-00. Tomado de DAS (2006).....	48
Figura 3.11. Representación esquemática del consolidómetro. Tomado de GRAUX (1975). 52	
Figura 3.12. Representación esquemática del aparato de Lambe. Tomado de Norma UNE 103-600/93.....	53
Figura 3.13. Representación esquemática del dispositivo de Komine & Ogata. Tomado de KOMINE & OGATA (1994).....	54
Figura 3.14. Dispositivo para medición de presión de expansión con control de la deformación vertical, según MARCIAL (2003).....	55
Figura 3.15. Reflexión de rayos X entre dos planos de átomos en un sólido. Ley de Bragg. Tomado de: HERNÁNDEZ (2006).....	56
Figura 3.16. Reemplazo de electrones ejemplificado por el bombardeo con rayos X de alta energía en un átomo de Fe determina la expulsión de uno o más electrones. El átomo excitado reemplaza los electrones eyectados, produciéndose en este proceso radiación de rayos X característicos, secundarios o fluorescentes. Estos rayos tienen una energía asociada a una longitud de onda peculiar al elemento y órbita implicada (Tomado de BESOAIN, 1985).....	59
Figura 4.1. Mapa de las fajas y terrenos de la Cordillera de la Costa. Los esquistos de Las Brisas, Las Mercedes y Chuspita se encuentran en la Faja Caracas. Adaptado de URBANI (2011).....	61
Figura 4.2. Mapa Geológico. Tomado de DENGGO, 1951.....	63

Figura 4.3. Mapa Geológico de la región de Ocumare del Tuy. Hoja 6846-III-NE. Edición 1-UCV-2003.....	65
Figura 6.1. Micrografías de MEB en las muestras estudiadas.....	76
Figura 6.2. Difractogramas, Composición química elemental y morfología en la muestra a través del análisis (EDX) (a) de la Illita en muestra SM, (b) Esmectita en muestra LG, (c) Esmectita en muestra BENT.....	77
Figura 6.3. Configuración general del Sistema de Adquisición de datos.....	82
Figura 6.4. Interfaz de programa de adquisición de datos mediante el uso del software Labview.....	84
Figura 7.1. Gráfico de plasticidad para clasificaciond e muestra locales.....	87
Figura 7.2. Micrografías típicas de minelales de arcillas según Atlas de MEB de WELTON (2003).....	93
Figura 7.3. Micrografías minerales arcillosos de muestras ensayadas.....	94
Figura 7.4. Gráfico Hinchamiento vs Densidad para las muestras locales SM y LG.....	95
Figura 7.5. Gráfico de Presión de Expansión vs Densidad Seca para Sierra Maestra.....	97
Figura 7.6. Gráfico de Presión de Expansión vs Densidad Seca para Lomas de La Guadalupe.....	98
Figura 7.7. Gráfico de Presión de Expansión vs Densidad Seca para bentonita comercial	100
Figura 7.8. Cambios de presión de expansión con especímenes de SM hidratados con fase líquida. $\rho_d(\text{SM-1}) = 1,55 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ; $\rho_d(\text{SM-2}) = 1,59 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ .....	104
Figura 7.9. Cambios de presión de expansión con especímenes de LG hidratados con fase líquida. $\rho_d(\text{LG-1}) = 1,36 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ; $\rho_d(\text{LG-2}) = 1,30 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ .....	106
Figura 7.10. Cambios de presión de expansión con especímenes de BENT hidratados con fase líquida. $\rho_d(\text{BENT-1}) = 0,98 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ; $\rho_d(\text{BENT-2}) = 0,88 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ .....	107
Figura 7.11. Presión de Expansión con Edómetro y Celda de Medición 3D BOX para LG. $\rho_d(\text{SM-1}) = 1,55 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ; $\rho_d(\text{SM-2}) = 1,59 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ .....	110
Figura 7.12. Presión de Expansión con Edómetro y Celda de Medición 3D BOX para LG. $\rho_d(\text{LG-1}) = 1,36 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ; $\rho_d(\text{LG-2}) = 1,33 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ .....	112
Figura 7.13. Presión de Expansión con Edómetro y Celda de Medición 3D BOX para BENT. $\rho_d(\text{BENT-1}) = 0,98 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ; $\rho_d(\text{BENT-2}) = 0,88 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ .....	114

Figura 7.14. Gráfico resumen de resultados obtenidos en cuanto a las presiones verticales y laterales de cada muestra ..... 115

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Aberturas de tamices utilizados para tamizado .....	16
Tabla 3.1. Minerales más comunes del grupo de la esméctita. ....	35
Tabla 3.2. Parámetros de identificación de la arcilla utilizada (MARCIAL et al, 2003) ..	37
Tabla 3.3. Valores típicos de superficie específica para los principales minerales. (Modificado de CHO & SANTAMARINA, 2004; DAS, 2008). ....	40
Tabla 3.4. Valores típicos de límites líquido y plástico para algunos materiales y suelos arcillosos (Modificado de DAS, 1999). ....	48
Tabla 6.1. Descripción visual de las muestras locales. ....	69
Tabla 6.2. Contenido de humedad natural en las muestras estudiadas. ....	70
Tabla 6.3. Peso específico o gravedad específica y peso unitario o densidad de las muestras extraídas. ....	71
Tabla 6.4. Proporción de agregados de partículas de acuerdo a ensayo granulométrico.	72
Tabla 6.5. Límites de Consistencia correspondientes a cada muestra. ....	73
Tabla 6.6. Resultados obtenidos del ensayo con azul de metileno en las muestras. ....	73
Tabla 6.7. Composición química elemental de la arcilla in situ. ....	74
Tabla 6.8. Minerales identificados por DRX. ....	75
Tabla 6.9. Potencial de expansión, según CHEN (1988). Tomado de DAS (2006). ....	78
Tabla 6.10. Resultados obtenidos de expansión libre y presión de expansión mediante el uso de Edómetro. ....	79
Tabla 6.11. Presión de expansión obtenida mediante dispositivo 3D BOX. ....	80
Tabla 6.12. Humedades de probetas ensayadas en dispositivo 3D BOX. ....	81
Tabla 7.1. Parámetro de las arcillas de coloides para muestras caracterizadas. ....	87
Tabla 7.2. Tabla de actividad coloidal según SKEMPTON (1953). ....	88
Tabla 7.3. Tabla de índice de nocividad según BULLETIN DE LIASSONS DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSSES (CENTENO, 2013). ....	89
Tabla 7.4. Semi-cuantificación mineralógica por DRX. ....	90
Tabla 7.5. Comparación entre parámetros experimentales y teóricos SM. ....	98
Tabla 7.6. Comparación entre parámetros experimentales y teóricos de LG. ....	99
Tabla 7.7. Comparación entre parámetros experimentales y teóricos de BENT. ....	101

Tabla 7.8. Parámetros utilizados en preparación de probetas ensayadas. ....	103
Tabla 7.9. Comparación entre parámetros experimentales y teóricos SM. ....	111
Tabla 7.10. Comparación entre parámetros experimentales y teóricos de LG. ....	113
Tabla 7.11. Comparación entre parámetros experimentales y teóricos BENT. ....	114
Tabla 7.12. Comparación la presión vertical vs presión lateral medidas con el dispositivo 3D BOX. ....	116

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro del marco de la Ingeniería Geotécnica y de Cimentaciones la interacción suelo-estructura constituye un aspecto de vital importancia debido a los efectos que puede generar el comportamiento derivado de las propiedades intrínsecas del suelo sobre la estructura o viceversa. El potencial expansivo de los suelos es uno de los tópicos de interés, estudiado desde comienzos del siglo XX, dadas las afectaciones visibles y demostradas ocurridas a un gran número de edificaciones alrededor del mundo, las cuales han sufrido deformaciones considerables, que ocasionaron agrietamiento de los componentes estructurales y no estructurales de las edificaciones, comprometiendo así su estabilidad.

La investigación del subsuelo debe permitir una discretización del terreno en zonas homogéneas, determinando los valores de los parámetros característicos que rigen su comportamiento (BARBIERO, 1999).

A grandes rasgos los suelos se pueden ser clasificados como granulares y finos, de los cuales estos últimos merecen especial atención ya que incluyen a los suelos arcillosos que tienen la capacidad de absorber agua en sus espacios interlaminares, lo que genera el hinchamiento del suelo, acompañado por una presión de expansión cuando no puede producirse el hinchamiento libremente.

Los factores que influyen en el potencial expansivo de suelos, incluyen algunas propiedades como la granulometría del material, la mineralogía, la plasticidad, la densidad y la relación de vacíos; asimismo, influyen los factores ambientales (clima, agua subterránea, vegetación y drenaje) y estados de esfuerzos presentes en el subsuelo (NELSON & MILLER, 1992). Un parámetro esencial en la caracterización de los suelos arcillosos es la presión de expansión, definida como el esfuerzo que ejerce una muestra del material arcilloso cuando es sometida a un incremento de su contenido de humedad en condiciones de volumen constante.

Para el estudio de ciertas propiedades de los suelos existen procedimientos y equipos estandarizados por organismos internacionales como la ASTM (American Society for Testing and Materials) que desarrolla normas técnicas para la evaluación convencional de los materiales. En el caso la expansividad, el primer aparato utilizado fue el edómetro construido por FRONTARD en 1910, posteriormente en 1921 TERZAGHI diseña otro que luego fue perfeccionado por Casagrande el cual hasta la actualidad es considerado como el instrumento convencional para estudiar la deformación unidimensional de las arcillas en laboratorio.

El Laboratorio de Mecánica de Suelos, del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME), Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela utiliza el edómetro como único dispositivo de medición de presión de expansión en suelos arcillosos, cuyo ensayo requiere de la supervisión continua de un operador para la aplicación de la carga o descarga, y realizar la lectura de las deformaciones registradas en los intervalos de tiempo establecidos por el ensayo de acuerdo a la norma ASTM 2435. Esto implica un costo por mano de obra asociado al tiempo que se debe estar supervisando el ensayo, el cual es variable, y puede extenderse por varios días, dependiendo de la permeabilidad de la muestra. Adicionalmente, la geometría de la celda con la cual se realiza el procedimiento es circular, pero con una relación ancho espesor elevada, lo que restringe la medición de esfuerzos solo en vertical, dificultando la posibilidad de realizar mediciones en el sentido horizontal.

Sin embargo, este Instituto en búsqueda de mejorar sus prácticas de laboratorio ha venido trabajando en el desarrollo de equipos alternativos que combinen las bases técnicas normadas con el uso de elementos tecnológicos, tal como es el caso de un dispositivo para la medición de la presión de expansión diseñado por CEDEÑO (2005) con geometría cúbica a fin de poder medir los esfuerzos tanto en sentido vertical y horizontal al cual se le adaptaría un sistema de adquisición de datos digital que permitiera reducir posibles errores de

registro del operador del ensayo. A este equipo le llamaremos dispositivo 3D BOX.

De tal manera, surge la necesidad de calibrar y validar el correcto funcionamiento de este nuevo equipo que podría representar un aporte significativo en el área de la mecánica de suelos, para lo cual se procederá a realizar la comparación de los resultados de ensayos de expansión llevados a cabo mediante el uso del dispositivo convencional (edómetro) y el dispositivo 3D BOX, utilizando diferentes muestras de suelo arcilloso de la Ciudad Universitaria de Caracas y el sector Lomas de La Guadalupe. Así mismo, se procederá a realizar un análisis comparativo de resultados de ensayar una muestra de bentonita de Wyoming cuyas propiedades han sido altamente estudiadas.

Además, se debe mencionar que, a pesar de contar con el dispositivo ya construido, se carece de un elemento accesorio que consiste en un molde cúbico para compactar la muestra, cuya función principal es evitar introducir un estado inicial de esfuerzos que afecte la respuesta volumétrica del material por efectos de roce lateral (MARCIAL, CUI & DELAGE, 2003). Este accesorio se pretende elaborar durante la realización del presente Trabajo Especial de Grado, a partir de una pieza de acero que será moldeada en el taller mecánico del IMME ajustada a ciertas especificaciones para su posterior utilización.

En consecuencia, se muestra la intención de migrar a un nuevo instrumento capaz de simplificar la metodología conocida hasta el momento, garantizando la optimización del tiempo y abriendo la posibilidad de obtener mayor cantidad de datos con una mejor precisión, y de manera automatizada.

### **1.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

Una de las muestras locales a utilizar en este estudio fueron tomadas dentro del perímetro de la Ciudad Universitaria de Caracas, hacia el área de Sierra Maestra, mediante una calicata realizada en un punto de coordenadas UTM-REGVEN 730.178 E- 1.160.107 N cercano a la fundación SW del Edificio de

Trasbordo, donde se encuentran las escuelas de Educación, Idiomas, Administración y Contaduría de la UCV (Figura 1.1).

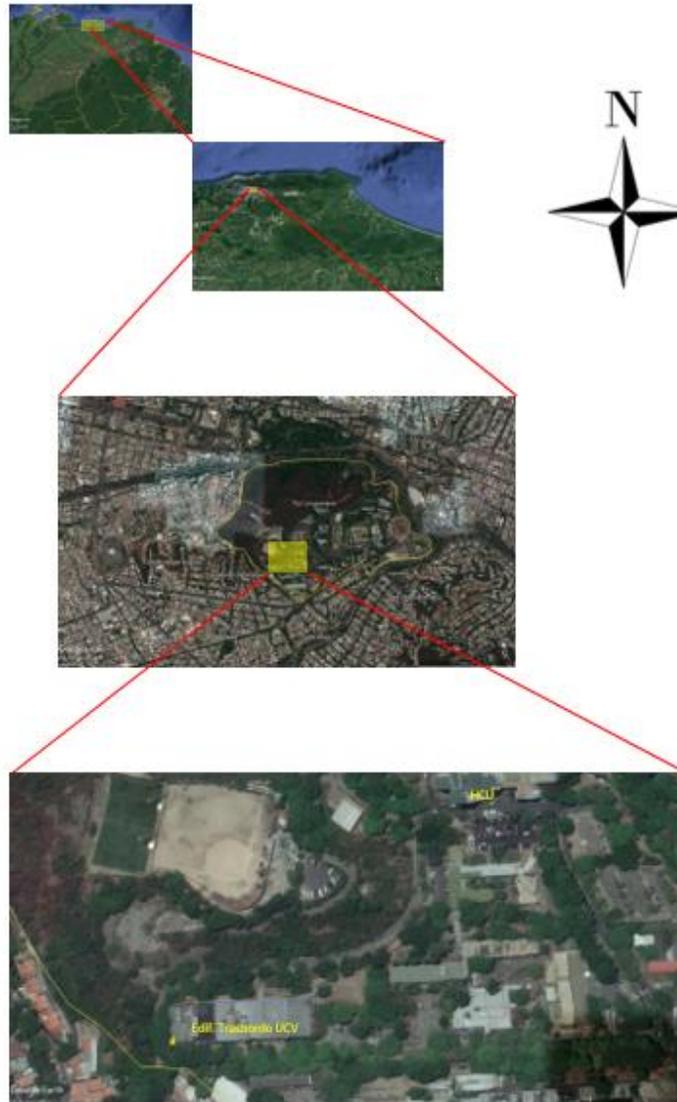


Figura 1.1. Ubicación general del área de estudio Sierra Maestra, UCV. Modificado de Google Earth (2018)

La segunda muestra local fue tomada dentro del área de implantación del Urbanismo Lomas de La Guadalupe, Ocumare del Tuy, Estado Miranda, mediante una calicata localizada hacia el NE del lindero de dicho urbanismo en coordenadas UTM- REGVEN 743.188 E- 1.122.977 N (Figura 1.2).

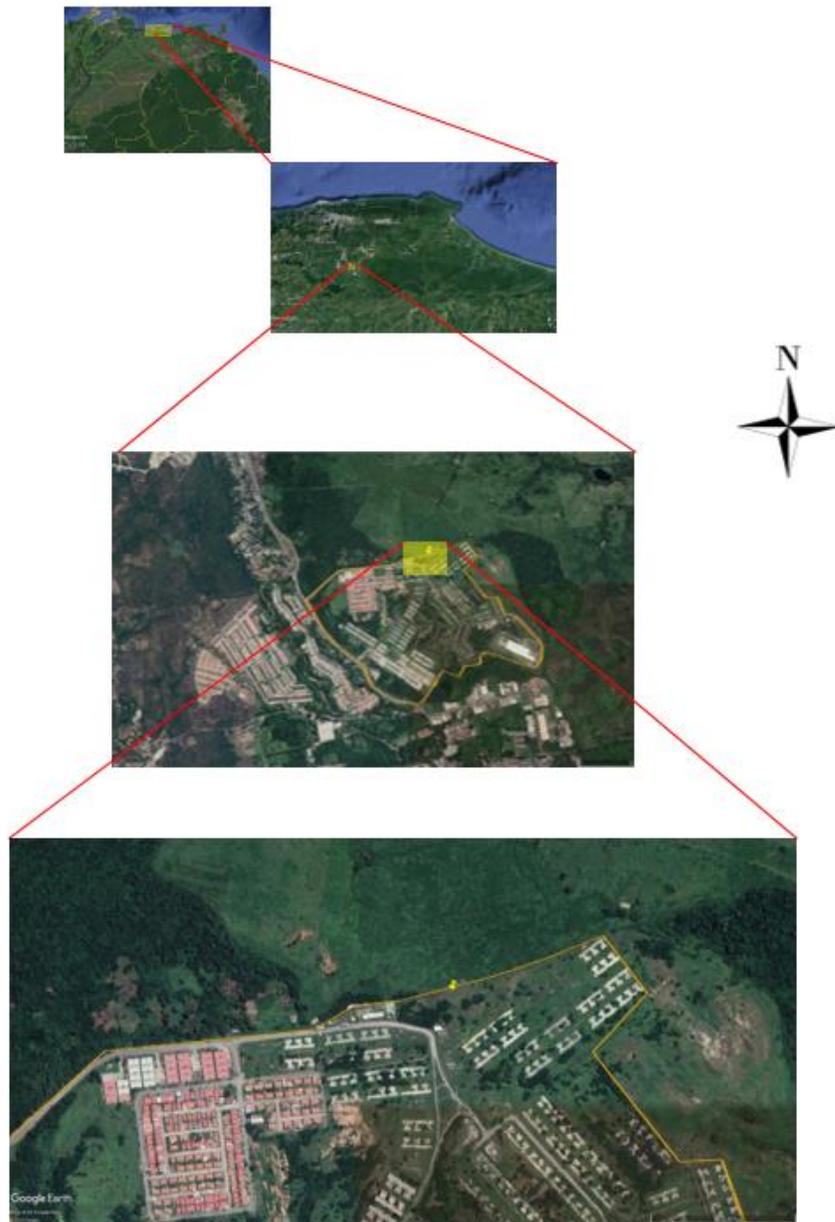


Figura 1.2. Ubicación general del área de estudio Lomas de la Guadalupe. Modificado de Google Earth (2018)

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo General**

Validar un nuevo dispositivo para la medición de la presión de expansión de suelos arcillosos, mediante la caracterización de materiales cohesivos de alta actividad y la comparación del potencial expansivo de cada uno obtenidos del uso de métodos de medición de presión de expansión convencional y el dispositivo 3D BOX propuesto.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar el material fino recolectado en las zonas de estudio, Sierra Maestra y Lomas de La Guadalupe, mediante ensayos de laboratorio tales como: humedad natural, granulometría por tamizado, hidrómetro, azul de metileno y límites de consistencia.
- Identificar los tipos de arcillas presentes en las zonas de estudio, Sierra Maestra y Lomas de La Guadalupe, mediante ensayos de difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X y microscopía electrónica de barrido (MEB).
- Establecer una rutina de adquisición de los datos registrados mediante el uso del software LabView, a fin de minimizar la intervención humana en el sistema.
- Analizar la respuesta de una muestra de suelo arcilloso recolectada en las zonas de estudio, Sierra Maestra y Lomas de La Guadalupe, evaluando la variación de la presión de expansión en el tiempo con densidad constante en el consolidómetro y el dispositivo 3D BOX.
- Analizar la respuesta de una muestra de suelo arcilloso conocida como la Bentonita de Wyoming, evaluando la variación de la presión de expansión en el tiempo con densidad constante en el consolidómetro y el dispositivo 3D BOX.

- Comparar los resultados de presión de expansión obtenidos inicialmente con el consolidómetro, junto con los obtenidos con el nuevo dispositivo 3D BOX, para la validación del mismo.

### **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El estudio de la interacción suelo-estructura constituye un foco de interés en áreas como la Ingeniería Estructural o la Geotecnia, debido a las diversas implicaciones que tiene el comportamiento del suelo sobre la respuesta otorgada por las estructuras fundadas sobre estos. Uno de los tópicos estudiados desde comienzos del siglo XX, se refiere al potencial expansivo de los suelos, dadas las afectaciones visibles y demostradas sobre muchas edificaciones alrededor del mundo, las cuales han sufrido deformaciones considerables, ocasionando agrietamiento de los componentes estructurales y no estructurales de las edificaciones, comprometiendo su integridad.

De las diferentes tipologías de suelos, los cohesivos y en especial, las arcillas, son las que pueden presentar expansividad, debido al comportamiento hidromecánico de este tipo de material; la composición mineralógica está reconocida como condicionante de dicho comportamiento, siendo las esmectitas las más activas (JONES & JEFFERSON, 2012); de allí el interés que sea incluido dentro de un informe de estudio de suelos la potencialidad de expansión que pueda experimentar el suelo sobre el que se pretende fundar la obra civil.

Un parámetro con el cual es posible inferir acerca del potencial expansivo en los suelos es la presión de expansión, que consiste en el esfuerzo que ejerce una muestra del material cuando es sometida a un aumento de su contenido de humedad en condiciones de volumen constante. Típicamente, el equipo utilizado para medir dicho parámetro es el edómetro, puesto que constituye una herramienta con diversas aplicaciones y de amplio conocimiento por parte de los profesionales del área.

Sin embargo, esta metodología supone la presencia de un operador que debe añadir peso sobre la muestra ensayada a fin de garantizar la invariabilidad de su

volumen cuando intenta expandirse, y a su vez debe llevar el registro de los cambios volumétricos medidos por el flexómetro. Esto implica un costo por mano de obra asociado al tiempo que se debe estar supervisando el ensayo, el cual es variable, y puede extenderse por varios días, dependiendo de la permeabilidad de la muestra.

Adicionalmente, la geometría de la celda utilizada en el ensayo edométrico es circular y permite una medición de esfuerzos totales unidimensional en el sentido vertical, y a su vez dificulta la posibilidad de realizarlo en el sentido horizontal.

Por ello, el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la Universidad Central de Venezuela (UCV), ha planteado la necesidad de construir un equipo propio capaz de mejorar la metodología de trabajo seguida hasta el momento, y que, además, minimizará la intervención humana sobre el funcionamiento del equipo; para ello, se desarrollaron dos Trabajos Especiales de Grado con el objeto de diseñar (CEDEÑO, 2005) y construir el dispositivo (PADRÓN, 2010). No obstante, actualmente es necesario calibrar el equipo y validar su aplicación para iniciar su operación, por lo que los esfuerzos del presente trabajo especial de grado están concentrados en la utilización del aparato mediante la realización de ensayos que permitan medir la presión de expansión en el tiempo bajo diferentes ciclos de hidratación, en una muestra de arcilla altamente activa, tomando en cuenta la programación de un control de medición automatizado que minimice la intervención de un operador en el equipo.

Además, se debe mencionar que, a pesar de contar con el dispositivo ya construido, se carece de un accesorio complementario del mismo como lo es el molde para compactar la muestra, cuya finalidad es evitar introducir un estado de esfuerzos inicial generado al realizar la compactación de la muestra directamente en el equipo de medición que a su vez podría incidir en la respuesta volumétrica, debido a los efectos de roce lateral (MARCIAL, CUI & DELAGE, 2006). Este accesorio se pretende elaborar durante la realización del

presente trabajo especial de grado, a partir de una pieza de acero que será moldeada en el taller mecánico del IMME ajustada a ciertas especificaciones para su posterior utilización.

En consecuencia, se muestra la intención de poder migrar a un nuevo instrumento capaz de simplificar la metodología conocida hasta el momento, garantizando la optimización del tiempo y abriendo la posibilidad de obtener mayor cantidad de datos con una mejor precisión, con la rutina de captación de datos automatizada.

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN**

El modelo de trabajo en ingeniería se basa en la aplicación de un conjunto de procedimientos y métodos, con base en principios físicos y matemáticos, para ofrecer soluciones a los problemas de la sociedad. En muchas ocasiones, este conocimiento es empírico, por lo que con el pasar del tiempo, el método de ensayo y error ha permitido afianzar la aplicación de muchos procedimientos, y proponer cambios en otros que se traducen en mejoras e incremento de su fiabilidad.

Partiendo de lo expresado en el párrafo anterior, la puesta en marcha de un nuevo equipo para evaluar la presión de expansión en suelos arcillosos, busca mejorar la metodología y los alcances desarrollados con procedimientos ya establecidos, permitiendo a los interesados en el estudio de este parámetro una concepción distinta de los criterios adoptados para su estudio y análisis, y además brindando un sistema de registro de datos con mayor comodidad.

Adicionalmente, la posibilidad de evaluar el nivel de esfuerzos en dos direcciones de forma simultánea con este equipo, se traduce en estudiar con mayor amplitud el comportamiento mecánico de este tipo de muestras, contrastando con el conocimiento teórico y siendo interesante para aquellos casos en los que el material es anisotrópico, permitiendo comparar su respuesta en ambas direcciones.

Desde el punto de vista industrial, la validación y posterior utilización del dispositivo permitirá la reducción considerable del número de horas-hombre dedicadas al monitoreo del ensayo, en vista que el sistema de captación de datos será automatizado, reduciendo el costo de mano de obra destinada a esta tarea, pudiendo emplearla en otras actividades que permitan elevar la productividad.

Para finalizar, se considera pertinente resaltar la necesidad para el cual se trabaja en ingeniería, y es que la aplicación de este nuevo equipo coadyuvará en la descripción y evaluación del material que servirá de fundación en las edificaciones, las cuales deben ser estables y seguras para los usuarios frente a la afectación por parte de agentes externos, y como material de sub-rasante en vialidad, para garantizar características estructurales y funcionales que permitan la movilidad de bienes y servicios por todo el territorio, colaborando con el desarrollo económico y social de la nación.

### **1.5. TRABAJOS PREVIOS**

En búsqueda de mejorar las prácticas de laboratorio, el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la Universidad Central de Venezuela (UCV), ha venido apoyando el desarrollo de proyectos para el diseño de equipos alternativos que combinen las bases los equipos convencionales con el uso de nuevos elementos tecnológicos. Estos estudios han servido de referencia para el desarrollo del presente trabajo y son descritos a continuación:

- MARCIAL *et al.* (2006), evalúan la respuesta volumétrica del suelo mediante dos ensayos de expansión libre a succión controlada sobre la bentonita MX-80, uno con la muestra compactada directamente en el anillo edométrico y otro con la muestra compactada en un molde y luego traspasada al anillo edométrico. Para ello toman en cuenta el estado inicial de esfuerzos en la muestra, así como su evolución durante la hidratación, obteniendo que la primera refleja un esfuerzo residual

importante medido luego de culminar el proceso de compactación, como consecuencia de la restricción impuesta por la fricción entre la pared del anillo edométrico y el suelo, lo cual contrasta con el esfuerzo lateral inicial prácticamente nulo y mayor deformación durante la fase de hidratación obtenida de la muestra preparada en un molde aparte. Estos resultados de ensayos de hidratación, sobre muestras de una arcilla expansiva compactada, permiten resaltar la importancia del protocolo de preparación de las muestras.

- CEDEÑO (2005), mediante el *estudio* comparativo de las ventajas y desventajas de equipos de medición de presión de expansión existentes, realiza el diseño conceptual de un dispositivo con geometría cúbica con sensores de esfuerzo total incorporadas que permitan realizar mediciones de esfuerzo tanto en sentido vertical y horizontal, cuya construcción fue propuesta en acero inoxidable para garantizar la resistencia del equipo ante los esfuerzos del material ensayado y a su vez evitar la corrosión del mismo. Por su parte, el espesor de pared, 16mm, fue definido mediante el uso del método de elementos finitos. En esta oportunidad también se recomienda que una vez construido el dispositivo de acuerdo a las especificaciones propuestas, adaptar un sistema de adquisición de datos digital que permitiera reducir posibles errores de registro del operador del ensayo.
- PADRÓN (2010), realiza la *caracterización* geotécnica de muestras de diferentes localidades de Venezuela (Elorza, Amuay y Ciudad Universitaria). Así mismo, intenta continuar con la iniciativa emprendida en el año 2005, realizando la construcción del dispositivo propuesto anteriormente y pruebas piloto del mismo, sin embargo, el dispositivo experimental no funcionó adecuadamente como se esperaba, debido a que la deformación (deflexión) de la membrana sensible del sistema de medidas de los sensores de esfuerzo total no se produjo. Por lo tanto, propone hacer una modificación al mecanizado de la membrana

sensible separándola del cuerpo rígido de la tapa del dispositivo y articularla de forma tal que pueda ser intercambiable. Esta condición imposibilita la realización de comparación de resultados de mediciones de presión de expansión entre el edómetro y el dispositivo experimental.

## **CAPÍTULO II**

### **2. METODOLOGÍA**

La metodología utilizada para realizar la validación del dispositivo experimental 3D BOX para medición de presión de expansión, comprende tres etapas fundamentalmente: recolección, procesamiento e interpretación de datos.

#### **2.1. RECOLECCIÓN DE DATOS**

Esta primera etapa comprende los siguientes aspectos:

La recopilación bibliográfica, consistió en la búsqueda y recopilación de información relacionada con el tema de estudio, tomando en cuenta toda la documentación publicada que contenga datos geológicos de interés para la investigación (trabajos especiales de grado, publicaciones, trabajos inéditos, entre otros).

Así mismo, se tramitaron los permisos pertinentes para el uso diversos laboratorios adscritos a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, en los cuales se realizaron los ensayos de caracterización de las muestras, y se presentan a continuación:

- Laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME).
- Laboratorio de Difracción y Fluorescencia de Rayos X de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.
- Laboratorio de Microscopia Electrónica, Escuela de Metalurgia.

Adicionalmente se contó con el apoyo del Laboratorio LABINCA para el uso de balanzas de precisión, equipo edométrico y prensa mecánica de 4 Ton.

#### **2.2. PROCESAMIENTO DE DATOS**

Esta etapa consiste en el tratamiento dado a las muestras mediante la ejecución de ensayos de laboratorio a escala micro y macro necesarios para la

evaluación del material arcilloso a utilizar en la validación el equipo 3D BOX, tal como se sintetiza a continuación:

- Caracterización geotécnica del material fino recolectado en la zona de estudio mediante ensayos: humedad natural, granulometría por tamizado, hidrómetro, azul de metileno, límites de consistencia.
- Identificación de los tipos de arcillas presentes en la zona de estudio mediante ensayos de difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, microscopía electrónica de barrido (MEB).
- Evaluar la presión de expansión de una muestra de suelo arcilloso conocida como la Bentonita de Wyoming, mediante el uso del consolidómetro y el dispositivo 3D BOX.
- Evaluar la presión de expansión de muestras del suelo arcilloso recolectadas en la zona de estudio, mediante el uso del consolidómetro y el dispositivo 3D BOX.

### **2.2.1. Ensayos de Caracterización geomecánica**

Se incluyen los diferentes ensayos de laboratorio aplicados a las muestras siguiendo las normas de la American Society for Testing Material (ASTM).

#### **2.2.1.1. Humedad Natural (ASTM D-2216):**

Consiste en determinar el porcentaje de agua contenido en la muestra en estado natural. Según UGAS (1985) es la relación entre el peso de agua libre más la absorbida en la muestra ( $W_w$ ) y el peso de la muestra seca ( $W_s$ ). La temperatura de secado utilizada es  $105 \pm 5$  °C, la cual evapora solamente el agua libre más la absorbida en los poros; el agua químicamente ligada (agua estructural) permanece en el suelo a esa temperatura lo cual indica que existe una cantidad apreciable de agua en el suelo después del secado en el horno a dicha temperatura.

Para obtener el porcentaje de humedad es necesario llevar a cabo el siguiente procedimiento:

Haciendo uso de un contenedor limpio y seco, se determinó el peso del mismo en una balanza calibrada. Luego, la fracción de la cantidad total de la muestra se dispuso en dicho contenedor para determinar la masa del contenedor y el espécimen húmedo en la balanza calibrada. Se colocó contenedor con el material en el horno de secado a  $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  durante 24 horas y una vez que la muestra alcanzó su masa seca constante se sacó del horno, permitiendo que el material y el recipiente se enfríen a la temperatura ambiente para que la lectura en la balanza de la masa final, del recipiente y el material seco, no se vea afectada por corrientes de convección o transmisión de calor.

Por último, se calcula el contenido de agua del material mediante la siguiente fórmula:

$$w = \frac{W(\text{cont} + sh) - W(\text{cont} + ss)}{W(\text{cont} + ss) - W(\text{cont})} * 100 = \frac{W(\text{agua})}{W(ss)} * 100$$

donde:

**W**: Contenido de agua (%); **W<sub>cont + sh</sub>**: Masa del contenedor más suelo húmedo (g); **W<sub>cont + ss</sub>**: Masa del contenedor más suelo seco (g); **W<sub>cont</sub>**: Masa del contenedor (g); **W<sub>agua</sub>**: Masa del agua; **W<sub>ss</sub>**: Masa de las partículas sólidas.

#### 2.2.1.2. Granulometría por tamizado (ASTM D-422-63):

La porción representativa de suelo, primeramente fue pesada en una balanza calibrada y dejada en un horno a temperatura constante de  $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  durante 24 horas. Por ser una muestra arcillosa, fue pulverizada y pasada por el tamiz n°200. El material retenido fue lavado hasta obtener agua clara, y fue puesto al horno durante 24 horas nuevamente. Luego, se tamizó dicho material por los tamices del N° 10 al N° 200 (Tabla 2.1) haciendo uso de un vibrador de mallas durante 10 minutos aproximadamente. Finalmente, se determinó el peso del material retenido en cada tamiz.

Tabla 2.1. Aberturas de tamices utilizados para tamizado

Tamiz	N° 10	N° 20	N° 40	N° 100	N° 200
Abertura mm	2.00	0.840	0.420	0.149	0.074

El porcentaje retenido sobre un tamiz se calcula de la siguiente manera:

$$\%Reti = \frac{\text{Peso ret en Tamiz } i}{\text{Peso inicial}} * 100$$

Al realizar los cálculos de: % retenido parcial, % retenido acumulado, % que pasa; se dibujó la curva granulométrica.

#### 2.2.1.3. Análisis por sedimentado, método del hidrómetro (ASTM D 422)

Este método es el más usado para hacer la determinación indirecta de los diámetros (d) y las fracciones (s) de las partículas que pasan a través de la malla N° 200 (0.074 mm).

Para ello, del material pasado por la malla N° 200 se tomó una muestra representativa de 50 g del material seco, la cual se colocó en un vaso de precipitados (beaker), se cubrió con agua destilada y añadió desfloculante (200 ml), dejándose en remojo durante 18 horas.

Luego se colocó el contenido del vaso de precipitado en el vaso de una agitadora eléctrica, evitando cualquier pérdida de material y se agita durante 15 minutos. La suspensión se vertió en un cilindro de sedimentación, enjuagando bien el vaso de la mezcladora hasta completar el volumen a 1000 ml con agua destilada. Seguidamente, se agitó la suspensión moviendo la probeta durante un minuto, se sumergió el hidrómetro poco a poco hasta flotar y se tomaron lecturas a los 0.5, 1 y 2 minutos después de los cuales se retiró el hidrómetro y se determinó la temperatura de la suspensión mediante el uso de un termómetro. Se repitió este último procedimiento por haciendo lecturas a los 5, 10, 15, 20, 25, 30 minutos, 1, 2, 4 y 24 horas, sumergiéndolo en la suspensión unos 20

segundos antes de cada lectura y registrando la temperatura después de cada operación.

Después de la lectura final del hidrómetro se vertió todo el material en un cilindro de sedimentación sobre un tamiz N° 200 lavándose con agua abundante. La fracción retenida se secó en una cápsula colocada en el horno a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  para posteriormente ser tamizado.

#### 2.2.1.4. Peso Específico (ASTM D854)

Es la relación entre el peso en el aire de un cierto volumen de sólidos a una temperatura dada y el peso en el aire del mismo volumen de agua destilada, a la misma temperatura. Se determina por la medida del volumen de agua desplazado por sus partículas sólida, mediante la relación entre el peso unitario de las partículas sólidas de suelo ( $\gamma_s$ ) y el peso unitario del agua destilada a una temperatura de referencia, generalmente  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ya que  $\gamma_{w4\text{ }^{\circ}\text{C}} = 1000\text{gr/cm}^3$ .

Para ello se colocó la muestra del material pasante del tamiz N°10 en el picnómetro y se añadió agua destilada hasta llenarlo a la mitad. Para remover el aire atrapado en el suelo se calentó hasta el punto de ebullición durante 10 minutos con movimiento continuo de matraz. Se deja enfriar a una temperatura contemplada dentro del rango de la curva de calibración del picnómetro para así determinar peso y temperatura del contenido para aplicar la siguiente fórmula:

$$G = \frac{W_s}{W_s + (W_2 - W_1)} * G_w$$

donde:

**W<sub>s</sub>**: Peso de suelo seco; **G<sub>w</sub>**: Peso específico del agua; **W<sub>1</sub>**: Peso del picnómetro con suelo y agua; **W<sub>2</sub>**: Peso del picnómetro con agua.

Teóricamente el peso específico de los suelos oscila entre 2,60 y 2,90.

#### 2.2.1.5. Peso Unitario (ASTM D-1188):

Es el peso de las partículas sólidas de un suelo por unidad de volumen de esa masa sólida (excluyendo los vacíos: aire y agua). Es decir, puede ser definido como la densidad del suelo:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

Se tomó una porción de suelo con peso debidamente determinado mediante una balanza. La muestra fue cubierta por parafina (densidad 0.87 gr/cm<sup>3</sup>) y se determinó nuevamente el peso. La diferencia entre ambos pesos constituye el peso de la parafina, y por consiguiente con la relación de densidad se tiene el volumen de parafina utilizado.

Luego, se sumergió la muestra impermeabilizada en el agua y se determinó su peso. Aplicando las relaciones de peso y volumen de un cuerpo parcial o totalmente sumergido, se obtuvo el volumen de la muestra más parafina, utilizando la expresión:

$$V_{mp} = P_{mpa} - P_{mph}$$

donde:

**V<sub>mp</sub>**: volumen de la muestra más parafina; **P<sub>mpa</sub>**: peso de la muestra más parafina en aire; **P<sub>mph</sub>**: peso de la muestra más parafina en agua.

Teniendo el volumen de la muestra más la parafina se restar el volumen de la parafina utilizada para obtener el volumen de la muestra sin parafina, y, por consiguiente, se tienen los valores necesarios para determinar la densidad de la muestra sin parafina.

### 2.2.1.6. Límites de Consistencia de Atterberg (ASTM D-4318)

Según UGAS (1985), se entiende por consistencia el grado de cohesión de las partículas de un suelo y su resistencia a aquellas fuerzas exteriores que tienden a deformar o destruir su estructura.

Atterberg definió las fronteras de cuatro estados de consistencia en términos de límites: el límite líquido, es la frontera entre los estados líquido y plástico; el límite plástico, la frontera entre los estados plástico y semisólido; y el límite de contracción, la frontera entre los estados semisólido y sólido.

Para determinar el límite líquido se colocó en un recipiente una porción de suelo de la fracción pulverizada pasante tamiz N° 40, se hidrató con agua destilada hasta obtener una pasta densa, moldeable. Esta mezcla fue pesada y colocada en la cuchara de Casagrande, previamente calibrada, de modo que no queden incluidas burbujas de aire, se realizó la incisión del material con el ranurador a lo largo de un plano vertical normal al eje de rotación de la taza, y se procedió a golpear la taza consecutivamente contra la base de la máquina, haciendo girar la manivela a razón de 2 vueltas/segundo hasta que el surco se cerró en una longitud de 12,7 mm (1/2"). Se tomó nota de este número (N), mezclar el material en la taza y repetir la operación de incisión y recuento de golpes hasta obtener aproximadamente el mismo resultado tres veces. Se tomó unos 10 g del material de la zona de la incisión al estar cerrada para pesar y determinar humedad (Figura 2.1).



Figura 2.1 Preparación de muestra para Ensayo de Casagrande Límite Líquido

Posteriormente se colocó en el diagrama,  $w$  (ordenadas) y  $\log N$  (abscisas), e interpolando los puntos obtenidos con una recta se obtiene el valor de LL en  $N=25$ .

Por otra parte, el límite plástico, se determinó con las siguientes operaciones, se tomó alrededor de  $1 \text{ cm}^3$  del material debidamente humedecido y, girándolo entre la palma de la mano y una hoja de papel, se hicieron cilindritos de 3 mm de diámetro y 25-30 mm de longitud. Una vez obtenido el cilindro, se volvió a aglomerar formando una pequeña bola y se repitió la operación una y otra vez hasta que, el cilindro se rompió fragmentos de 1 cm de longitud aproximadamente durante el amasado. Se determinó el peso de los fragmentos del cilindrito para posteriormente colocarlos en el horno a  $105^\circ$  durante 24 horas y determinar el peso final para calcular humedad.

#### 2.2.1.7. Azul de Metileno (AASHTO TP 57-01)

Este ensayo es utilizado para determinar la superficie específica de un suelo y el índice de nocividad de los coloides.

Se tomaron 10 g de material pasante del tamiz N° 200, seco, en un vaso volumétrico, se adicionaron 50 ml de agua destilada, se agito y dejó reposar de 18 a 24 horas para humedecer la totalidad de la muestra, para poder agregar 50 ml más y agitar.

Por otra parte, se preparó una solución de azul de metileno agregando 1 gr del compuesto por cada 100 ml la cual es vertida en una bureta de precisión. A la mezcla de suelo, constantemente agitada por un agitador magnético, se le fue agregando 5 ml de solución azul de metileno, se mezclaba durante un minuto y posteriormente se sacaba con una varilla agitadora de vidrio una gota de solución que se dejaba caer sobre un papel filtro tipo Whatman # 40 (Figura 2.2).

Este procedimiento se repitió hasta que se observaba el aro azul alrededor de la gota. Después de alcanzar este punto se continuaba el agitado durante 5 minutos y se repetía la prueba en el papel filtro, como método de confirmación.



Figura 2.2. Pasos realizados en el ensayo de Azul de Metileno

Si se continuaba presentando el aro azul se daba por terminada la titulación y se procedía a realizar el cálculo de Valor de Azul. Si, por el contrario, desaparece el aro, se debe continuar con la titulación.

$$VA = \frac{C * V}{W}$$

donde:

**VA:** valor de azul de metileno en mg de azul por gramo de material seco pasa el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No 200); **C:** concentración de la solución de azul de metileno, en mg de azul por ml de solución; **V:** ml de solución de azul de metileno requerida en la titulación; y **W:** gramos de material seco utilizado en la prueba.

#### 2.2.1.8. Ensayo edométrico (ASTM D-4546):

Primeramente, se realizó la calibración del edómetro (Figura 2.3) mediante le montaje de los elementos a utilizar en la realización del ensayo, utilizando una pastilla, de la misma altura que la muestra con que se trabaja habitualmente y de diámetro 1mm menor, no deformable bajo las cargas aplicadas, de acero, se tomaron las lecturas del flexómetro en un ciclo de carga y uno de descarga mediante los cuales se construyó la curva de calibración el equipo. Este

procedimiento permitió discernir entre la deformación propia del equipo y la correspondiente la muestra durante el ensayo.



Figura 2.3. Equipo edométrico utilizado en ensayo de expansión

La preparación de la muestra consistió en la colocación de la porción del material pasante tamiz N° 10 en un anillo de cobre de diámetro mayor al del anillo de confinamiento del edómetro para ser compactada mediante la aplicación de una carga de hasta 10 Ton, haciendo uso de una prensa electromecánica tratando de obtener un valor de densidad igual o similar a la densidad estimada para ensayar cada material (Figura 2.4).



Figura 2.4. Preparación de la muestra y equipo utilizado para compactación mecánica

La pastilla fue desmontada del molde de compactación y fue tallada mediante el uso de un cortador circular, al cual se ajustó el anillo de confinamiento de edómetro en el extremo de un vástago que baja permitiendo penetrar la muestra (Figura 2.5).



Figura 2.5. Muestra para ensayo edométrico

Mediante el uso de una porción de material auxiliar se determinó la humedad inicial del material, el peso de la porción a ensayar, la altura inicial de la pastilla y diámetro del anillo.

Para el montaje del ensayo en el consolidómetro se colocaron las piedras porosas en ambos extremos del anillo de confinamiento para posteriormente saturar la muestra con agua destilada y se ajustó el flexómetro de mediciones para definir una lectura inicial. Posteriormente se realiza la medición de los cambios volumétricos experimentados por la muestra en intervalos de tiempo 0, ¼, ½, 1, 2, 4, 8, 15 y 30 minutos, 1, 2, 4, 8, 24 horas hasta que la lectura se estabilizara. Así se pudo calcular el porcentaje de expansión de la muestra aplicando la siguiente fórmula:

$$\%Exp = \frac{H_{inc} - H_{fin}}{H_{fin}} * 100$$

donde:

**H<sub>inic</sub>**: altura inicial de la muestra; **H<sub>fin</sub>**: altura final de la muestra.

Posteriormente, se aplicaron incrementos de carga para producir presión sobre el suelo de la siguiente manera ½, 1, 2, 4, 8 y 16 kg. Se efectuaron lecturas de altura de la muestra en los siguientes intervalos de tiempo: 0, ¼, ½, 1, 2, 4, 8, 15 y 30 minutos, 1, 2, 4, 8, 24 horas medidas a partir del momento de aplicación de la carga.

Por último, la descarga se realiza en forma inversa, se inicia reduciendo la carga máxima aplicada a la mitad y así sucesivamente hasta obtener una presión nula sobre la pastilla. Con los datos obtenidos se calcula la presión de expansión mediante la siguiente expresión:

$$P \text{ exp} = 10 * \frac{Q}{A}$$

donde:

**Q:** carga aplicada; **A:** área de la muestra.

### **2.2.2. Ensayo con dispositivo 3D BOX**

La preparación de las probetas para los ensayos en este equipo, consistió en la compactación de cinco capas de 1 cm de altura, cada una, en un molde cúbico de acero inoxidable mediante el uso de la prensa mecánica de 4 Ton y una velocidad constante de 4 mm/min hasta obtener la densidad de referencia seleccionada para cada uno de los materiales analizados.

Una vez compactada la muestra con la densidad de referencia se desmonta del molde, el cual fue diseñado de forma tal que sus paredes son unidades independientes separables a fin de minimizar efectos de roce lateral residual al colocar la probeta dentro de dispositivo de medición. Seguidamente se talla muestra mediante uso de una lija hasta ajustar las dimensiones de la probeta a las medidas de la celda de expansión y se determina el peso del material a ser ensayado (Figura 2.6).



Figura 2.6. Preparación de la muestra para colocación en la celda de medición 3D BOX

Al fondo del dispositivo se coloca la piedra porosa y el filtro tipo Whatman 40, se introduce la muestra tallada y se sella la celda mediante el ajuste de tornillos de la tapa a fin de garantizar hermeticidad, para luego abrir la válvula de la bureta para iniciar la saturación del material. Cabe destacar que antes de iniciar a medición de las deformaciones se realiza la purga del equipo. Finalmente se da inicio a programa de medición y almacenamiento de datos (Figura 2.7 y 2.8).

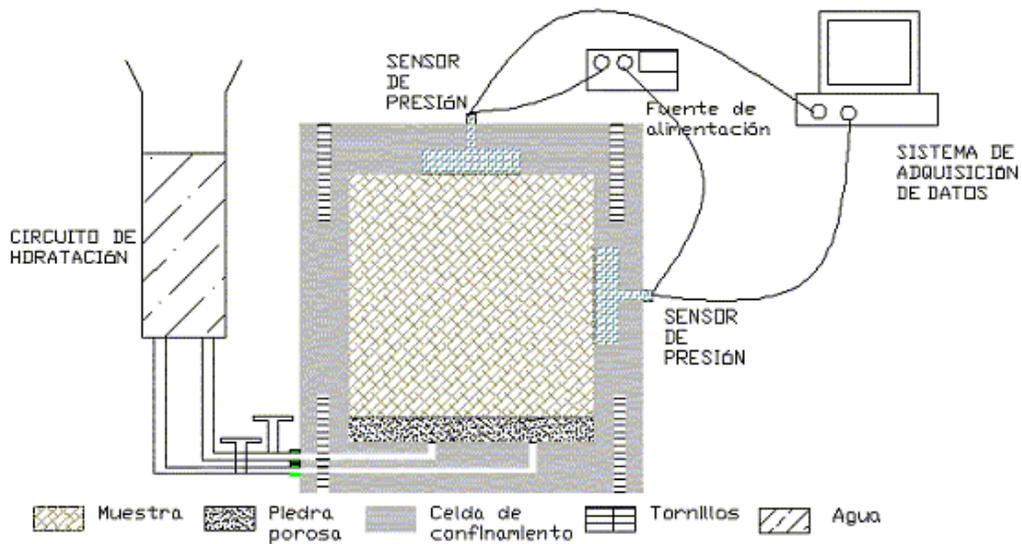


Figura 2.7. Esquema de montaje experimental y sistema de adquisición de datos (Tomado de MARCIAL & LANDAETA, 2008)



Figura 2.8. Muestra ajustada a celda de medición 3D BOX

### 2.2.3. Ensayos de composición mineralógica y elemental

A fin de realizar una caracterización más detallada de la composición mineralógicas y elementales de las porciones de suelo se hizo uso de la combinación siguientes métodos cualitativos y cuantitativos:

#### 2.2.3.1. Microscopia electrónica de barrido

El equipo usado fue un microscopio Hitachi S-2400 facilitado por la Escuela de Metalurgia y Ciencia de los Materiales de la de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela. Las observaciones se realizaron en la superficie normal de las muestras a 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  o 250  $\mu\text{m}$  con el fin de observar la morfología de minerales de las muestras.

Se verificó que las muestras a ser analizadas se encontrarán debidamente secas, para posteriormente proceder a la colocación de una fina capa de material sobre un portamuestras cilíndrico provisto de una cinta adhesiva de grafito (Figura 2.9). Una vez colocado en el portamuestras el material fue recubierto con un elemento conductor (oro) y llevado a un equipo de vacío para la fijación del mismo. Este procedimiento mejora la visualización de la morfología de las partículas de la porción de suelo mediante le microscopio electrónico.

Por último, se realizó el análisis de las imágenes por medio de la auto correlación en 2D en catálogos que muestran la apariencia microscópica y promedio de los cristales de diferentes minerales.



Figura 2.9. Preparación de la muestra y equipo utilizado en microscopia electrónica de barrido

#### 2.2.3.2. Difracción de Rayos X

Para la preparación de las muestras se utilizó el Método del Polvo, mediante el cual se obtuvo un material homogéneo con tamaños de granos entre 10 y 50  $\mu\text{m}$ , luego de triturar y pulverizar la muestra seca en un mortero manual de ágata. Luego se colocaron en el porta muestras del difractómetro con una distribución al azar (Figura 2.10) y se introdujeron en el equipo donde las muestras fueron procesadas para obtener el difractograma que contiene las diferentes redes cristalinas contenidas en la muestra.



Figura 2.10. Pulverizado de muestra para ensayo de difracción de rayos X

Las facies mineralógicas fueron identificadas mediante el uso de tablas especiales que permitieron la correlación de los valores angulares con las distancias interplanares e intensidades correspondientes del diagrama.

#### 2.2.3.3. Fluorescencia de rayos-X

Para la realización de este ensayo fue necesario pulverizar la muestra, de forma manual, utilizando un mortero de ágata hasta obtener partículas pasantes al tamiz # 120. Posteriormente se montó la muestra en el portamuestras para luego introducirla en el equipo. Los resultados obtenidos del procesamiento de este equipo muestran cuantitativamente el contenido de elementos mayoritarios y traza expresado en forma de óxidos presentes en las muestras sólidas.

### 2.3. INTERPRETACIÓN DE DATOS

Esta etapa se lleva a cabo una vez realizada la etapa de laboratorio, y comprende:

#### 2.3.1. Caracterización de muestras

Consistió en la clasificación de las porciones de suelo a utilizarse en para la comparación experimental de los ensayos de expansión del equipo edométrico y el 3D BOX. Para ello se hizo uso de los diversos parámetros geotécnicos determinados en la fase de laboratorio, lo cual permitió realizar la categorización del mismo dentro del Sistema de Clasificación Unificada de Suelos de acuerdo a su granulometría y características geomecánicas.

Así mismo, se correlacionó dicha caracterización con la composición mineralógica y elemental que conforman las partículas de suelo analizado.

#### 2.3.2. Sistema de Adquisición de datos

Este sistema consiste en el registro de la presión de expansión de forma continua en el tiempo hasta la estabilización de la misma, momento en el que se considera terminado el ensayo.

La fuente de alimentación suministra un voltaje (5 voltios) a los sensores de esfuerzos que generan una señal de salida directamente proporcional al esfuerzo aplicado por el suelo sobre los sensores. Dicha señal, en voltios, va directamente a la tarjeta de adquisición de datos de la cual el software toma una muestra de la medida y luego la almacena en un archivo de datos. Esto genera un registro de datos que se procesa para obtener la variación de la presión de expansión durante el ensayo.

Para la programación de adquisición de datos se utilizó el software de programación gráfica LabView mediante el cual se pudo realizar la transformación de las señales eléctricas (voltios) registradas por los sensores de esfuerzos totales adheridas a las paredes del dispositivo 3D BOX a datos de salida en función de la presión ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) y tiempo (s).

Incluyó la generación de algoritmo gráfico para el almacenamiento de datos registrados en voltaje, fundamentado en la propuesta de MARCIAL & LANDAETA (2008), que contiene el bloque de configuración de las entradas analógicas (número de datos a ser adquiridos, frecuencia de muestreo, canales de entrada y dispositivo) y el bloque de lectura donde se extraen los datos adquiridos el canal del sensor respectivo para su posterior conversión a unidades de esfuerzo de acuerdo a los factores de equivalencia propios de cada galga. Así como la creación de la interfaz gráfica para la presentación de los datos de salida de interés y almacenamiento en formato extraíble (.txt).

Se realizó la calibración del sistema mediante la inyección de aire comprimido al dispositivo 3D BOX a través de un compresor de capacidad de hasta 120 psi. En esta práctica la inyección de presión se realizó de forma gradual haciendo uso de un manómetro de precisión para los ciclos de carga y descarga a razón de 0,5 bar.

### **2.3.3. Comparación de resultados de ensayos de expansión**

Se realizan ensayos de expansión controlada (presión de expansión) en el edómetro, para diferentes tipos de suelos con muestras de baja, mediana y alta

actividad. Estos ensayos se realizan sobre especímenes compactados a diferentes densidades, y humedades muy bajas, para verificar la sensibilidad de la presión de expansión a los cambios de densidad.

#### **2.3.4. Establecimiento de conclusiones finales**

Esta etapa correspondió a la compilación de los datos obtenidos durante el desarrollo de este proyecto, los cuales fueron procesados y analizados con el fin de dilucidar las interrogantes planteadas al inicio de la investigación.

## **CAPÍTULO III**

### **3. MARCO TEÓRICO**

#### **3.1. GENERALIDADES DE SUELOS ARCILLOSOS**

Desde el punto de vista de su origen, la arcilla no tiene significado genético unitario ya que puede ser un depósito sedimentario, un producto de meteorización, un producto hidrotermal o ser el resultado de una síntesis (BESOAIN, 1985).

De acuerdo a la geomecánica, la palabra arcilla se emplea con referencia a un material de grano fino, terroso, que se hace plástico al ser mezclado con algo de agua (HURBULT, 1974). Están formados por partículas con tamaños inferiores a los 0,002mm, son clasificados como suelos de grano fino según clasificación de suelos USCS de la norma ASTM D-2487-11. Debido al tamaño de las partículas este tipo de suelos requieren de métodos especiales para su clasificación como lo es el hidrométrico.

Los suelos arcillosos son típicamente cohesivos, propiedad que permite a las partículas adherirse unas con otras en presencia de humedad, en una combinación de atracción intermolecular, para formar una masa no desintegrable (FRATELLI, 1993).

La cohesión es el resultado de una compleja interacción de fuerzas de atracción y repulsión entre las partículas, actuando como cargas eléctricas con intensidad variable, según la distancia entre ellas. Cuando el contenido de humedad es bajo, las arcillas forman un sólido a semisólido coherente con masa muy compacta. Por ello las aristas de sus partículas se mantienen en contacto. Ello incrementa las cargas eléctricas locales de atracción y el movimiento potencial entre las partículas se reduce, otorgándole características de plasticidad. Por el contrario, cuando el contenido de humedad aumenta, las partículas en suspensión se alejan unas de otras incrementando su movilidad y creando un sistema disperso que disminuye la fuerza de atracción

intermolecular. Todas las fuerzas alrededor de las partículas de arcilla, incluyendo las fuerzas exteriores, deben estar en equilibrio estas aumentan, se expulsa el agua de los conductos capilares formados por los poros interconectados y se reduce el contenido de humedad (FRATELLI, 1993).

Eso conlleva a un nuevo acercamiento de las partículas y un incremento de los campos electrostáticos, en un proceso reversible que depende del contenido de humedad. El comportamiento estructural de las arcillas puede verse afectado por diversas propiedades físicas y químicas, así como el tamaño de sus partículas, la presencia de materias orgánicas o el contenido de agua (FRATELLI, 1993).

Según (BESOAIN, 1985), los suelos arcillosos son un producto natural, originado a partir de la meteorización de las rocas, cuyas partículas son generalmente de tamaño inferior a  $2\mu$ , constituido principalmente por aluminosilicatos de origen secundario (minerales propios de la arcilla) y componentes accesorios, primarios, secundarios u orgánicos, en el cual radica gran parte de la actividad fisicoquímica del suelo. También pueden contener materia orgánica coloidal y a veces cristales de cuarzo y otros minerales. Sus partículas tienen forma laminada y de listones alargados.

Por mineral de arcilla se comprende esencialmente "a los aluminosilicatos hidratados cristalinos, algunos con sustitución parcial o total del aluminio por magnesio o hierro y que incluyen como constituyentes, en ciertos casos, elementos alcalinos o alcalinotérreos". Estas partículas son de tamaño muy fino y se clasifican en grupos definidos según su estructura (BESOAIN, 1985). El cristal típico de las arcillas es una estructura compleja de aluminosilicatos, el cual muestra sustituciones irregulares e interposiciones entre las capas (LAMBE & WHITMAN, 1972).

Cuando se produce la descomposición de los silicatos de aluminio complejos como los feldspatos, las micas y los minerales ferromagnésicos, se obtiene sílice, bicarbonato potásico y silicatos de aluminio hidratados (FRATELLI, 1993). Constituidos por elementos de cadenas de elementos tetraédricos y octaédricos

(Figura 3.1), unidas por enlaces covalentes débiles, pudiendo entrar moléculas de aguas entre las cadenas (VALLEJO, 2002).

Según GRIM (1968) el principal factor de esta alteración físico-química es el agua. La estructura cristalina de las arcillas está conformada básicamente de láminas de dos tipos: Una constituida por tetraedros de sílice y oxígeno ( $\text{SiO}_4$ ), con tres átomos de oxígeno en cada tetraedro compartiendo con los tetraedros adyacentes, formando una estructura o retículo de forma hexagonal. La segunda lámina está formada por iones de  $\text{Al}^{3+}$  e iones de  $\text{O}^{2-}$  y  $\text{OH}^-$  en coordinación octaédrica como se aprecia en la siguiente figura:

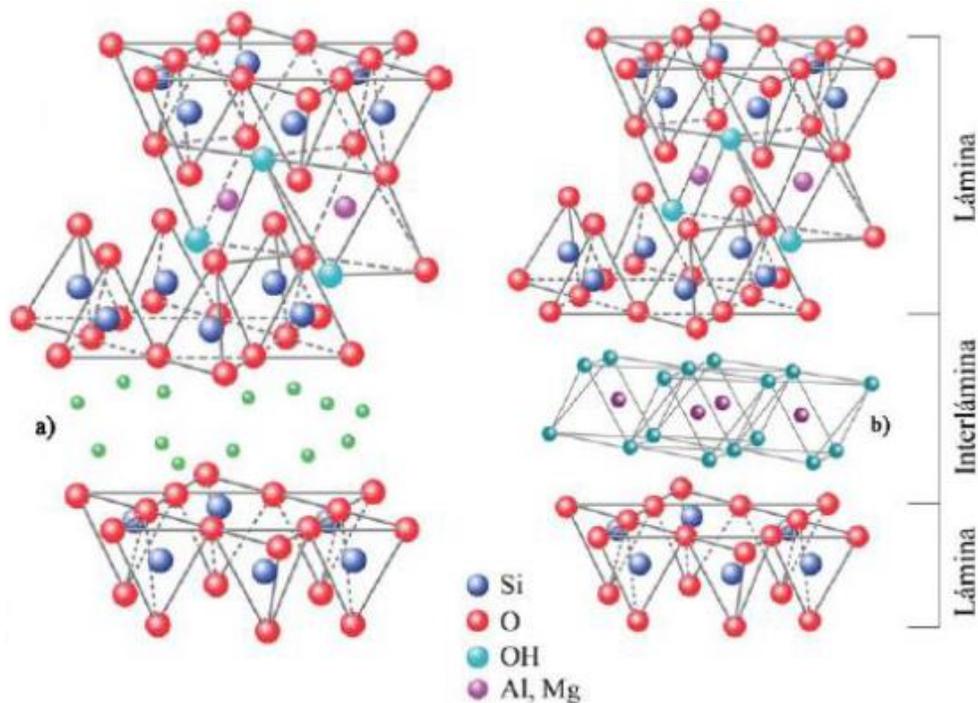


Figura 3.1. Balance de caras de las láminas por: a) cationes intercambiables; b) cationes interlaminales en coordinación con grupos OH, formando una capa octaédrica dentro del espacio interlaminares. (FRANCO & MASPOCH, 2009)

El arreglo de estas láminas junto con la sustitución de  $\text{Si}^{4+}$  y  $\text{Al}^{3+}$  por otros elementos, es lo que determina prácticamente el tipo de mineral de arcilla presente en un sedimento o roca sedimentaria.

### 3.1.1. Grupo de las arcillas

#### 3.1.1.1. Caolinita

Fórmula Química:  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$

Es un mineral de origen supergénico, producido por alteraciones debidas a oxidaciones directas o indirectas causadas por la meteorización y por la infiltración de aguas atmosféricas superficiales en los minerales aluminicos, que ocasionan principalmente la descomposición de los feldespatos alcalinos; en la estructura cristalina cada capa tiene un espacio aproximado de 7.2 Å de espesor los cuales se mantienen unidos entre sí por enlaces hidrogénicos (Figura 3.2).

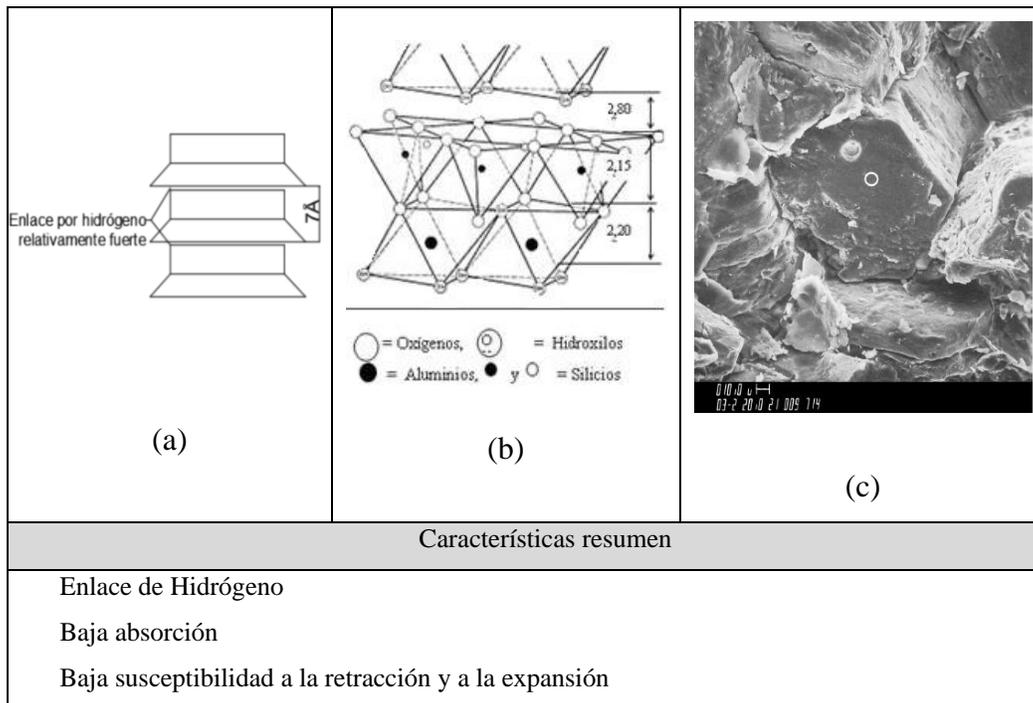


Figura 3.2. (a) Diagrama de capa de Caolinita. (b) Esquema de la estructura cristalina de Caolinita según GRIM, 1968. (c) Fotografía bajo el microscopio electrónico de una muestra de caolinita (WELTON, 2003)

El mineral arcilloso de la caolinita tiene una menor expansión intercapa, esto es producto de la ausencia de sustituciones iónicas en ninguna de las capas tetraédricas u octaédricas, lo que resulta en una neutralidad eléctrica y en la

ausencia de cationes de compensación; también las estructuras individuales de dos capas están más estrechamente unidas entre sí por las cargas eléctricas opuestas en capas tetraédricas y octaédricas y puentes de hidrogeno, por ello el cambio de volumen mostrado por estos minerales es básicamente por la absorción de agua en el perímetro de los granos individuales. Tiene baja plasticidad, baja cohesión y es de difícil dispersión incluso con ataque ácido (SNETHEN et al., 1975).

### 3.1.1.2. Grupo de la Esmectita

Fórmula Química:  $A_{0,3}D_{2-3}[T_4O_{10}]_Z \cdot nH_2O$

A: Cationes inter-capas intercambiables; D: Cationes en la hoja octaédrica; T: Cationes en las hojas tetraédricas; Z: Aniones en las hojas octaédricas;  $nH_2O$ : Agua molecular inter-capas, intercambiable.

La esmectita es un grupo de minerales (Tabla 3.1), con estructura cristalina dioctaédrica y trioctaédrica de tipo (2:1), ellas tienen la propiedad de expandir o contraer su estructura manteniendo sus propiedades cristalográficas intactas. La expansión tiene lugar con moléculas de agua o algún compuesto orgánico (ARIAS, 1999).

Tabla 3.1. Minerales más comunes del grupo de la esmectita

Nombre	Fórmula
Beidellita	$(Na, Ca_{0.5})_{0.3}Al_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$
Hectorita	$Na_{0.3}(Mg, Li)_3Si_4O_{10}(F, OH)_2$
Montmorillonita	$(Na, Ca)_{0.3}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$
Nontronita	$Na_{0.3}Fe_3 + 2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$
Saponita	$(Ca/2, Na)_{0.3}(Mg, Fe_{2+})_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$
Sauconita	$Na_{0.3}Zn_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$

Según GRIM (1968) el espaciamiento basal típico de los minerales del grupo de la esmectita es de 14Å, pero debido a que este grupo mineralógico tiene la capacidad de adsorber moléculas de agua, este espaciamiento puede variar de 9,6 Å (sin la presencia de agua) hasta los 21,4 Å (Figura 3.3).

La montmorillonita es la más común de este grupo de arcillas, pudiendo ocurrir sustitución del  $Al^{3+}$  por  $Fe^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  o  $Zn^{2+}$ , como resulta una carga

negativa con tal sustitución, esta se compensa con otros cationes como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ . Según SNETCHEN *et al.* (1975) es un filosilicato del grupo de las esmectitas, aunque es dioctaédrico este puede contener magnesio sustituyendo al aluminio en la capa octaédrica, esta sustitución resulta en una deficiencia de carga, la cual es neutralizada por la presencia de cationes como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$  en posiciones entre las capas, aunque estos iones poseen un radio iónico que puede permitir la ocupación de estos espacios en las capas tetraédricas, son hidratados y como resultado del incremento del radio iónico ocupan espacios en y por encima de las capas tetraédricas, esta posición adyacente, permite el acceso de partículas de agua entre las capas, como hay un balance de cargas deficiente entre las capas octaédricas, los iones son débilmente sostenidos y por lo tanto pueden removerse mediante intercambio iónico.

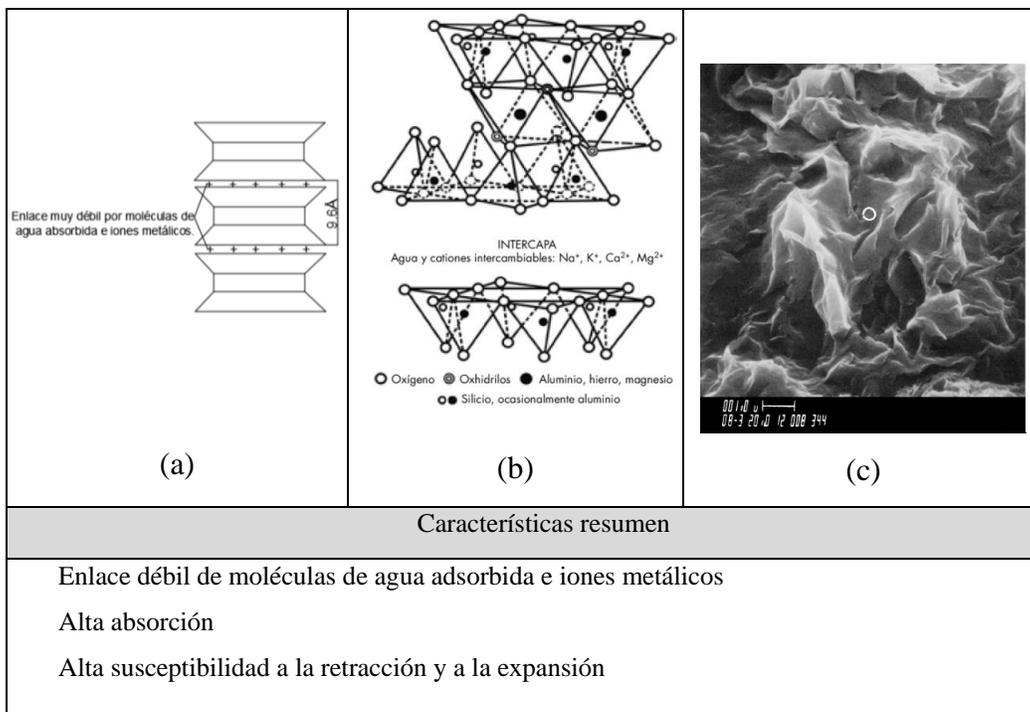


Figura 3.3. (a) Diagrama de capas de Esmectitas (BERRY & REID, 1993). (b) Esquema de la estructura cristalina de esmectitas según GRIM, 1968. (c) Fotografía bajo el microscopio electrónico de una muestra de esmectita (WELTON, 2003)

Por lo general, la montmorillonita son partículas extremadamente pequeñas con dimensiones del orden de unas pocas decenas de unidades Angstrom, muy expansiva, de alta plasticidad, muy baja permeabilidad.

Particularmente, la montmorillonita sódica es explotada comercialmente ya que se usa como aditivo para el lodo de perforación. Uno de los más grandes depósitos y populares de este tipo de mineral, se produjo hace más de 60 millones de años en ciertas regiones de Norteamérica, conocidas hoy como las Black Hills de Wyoming y Dakota del Sur, y las Big Horn Mountains de Wyoming, y es caracterizado por ser arcillas derivadas de ceniza volcánica. La arcilla bentonítica explotada en otras áreas del mundo pueden provenir de otros tipos de depósitos geológicos (KAGAYA *et al.*, 2012).

Es este orden de ideas se toma como ejemplo de referencia la bentonita MX-80, la cual es la arcilla expansiva de referencia internacional, cuyos parámetros son mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 3.2. Parámetros de identificación de la arcilla utilizada (MARCIAL ET AL, 2003)

Propiedades Arcilla MX80	
Mineralogía	82 % montmorillonita (Na/Ca=5,5) *
C.I.C (meq/100g)	69,6 <sup>(1)</sup>
w <sub>L</sub> (%)	520
w <sub>P</sub> (%)	42
ρ <sub>s</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	2,65 *
Actividad	5,8
S (m <sup>2</sup> /g)	800 **

\* SAUZEAT et al. (2000) \*\* PUSCH (1982)

### 3.1.1.3. Illita:

Fórmula Química:  $K_{0,65}[Al_{0,65}Si_{3,35}O_{10}](OH)_2$

La illita es un filosilicato del grupo de las micas que viene en tres capas (relación 2:1). Su sistema cristalino es monoclinico y sus cristales no son distinguibles, es típicamente encontrada como masas de grano muy fino de colores blancuzcos o grisáceos, se forma por meteorización o alteración hidrotermal de la moscovita-fengita; pero algunos son autigénicos o pueden

derivar de la alteración de feldespatos potásicos o recristalización de esmectitas, es común en arcillas, lutitas y algunas pizarras.

La celda unitaria es la misma que la de la montmorillonita excepto que algunos silicios están siempre reemplazados por aluminio y que la deficiencia de carga está balanceada por iones  $K^+$ . El grosor de la capa unitaria de la illita tiene un valor ligeramente superior a 9Å, pero como existen iones potasio entre las capas se produce una expansión adicional entre éstas, de modo que el grosor es de aproximadamente 10 Å (BESOAIN, 1985).

Las illitas se diferencian de las micas por tener menos silicio sustituido por aluminio, contener más agua y tener parte del potasio sustituido por calcio y magnesio (DANA, 1974). b. En las illitas la compensación de la carga se efectúa por iones  $K^+$  por lo que las capas unitarias de la illita se encuentran en posición más o menos rígida, sin que haya acceso a moléculas polares que puedan expandir estas capas o lo hagan en forma lenta. Los iones  $K^+$  situados entre capas unitarias no son cambiables, o son difícilmente cambiables (Figura 3.4).

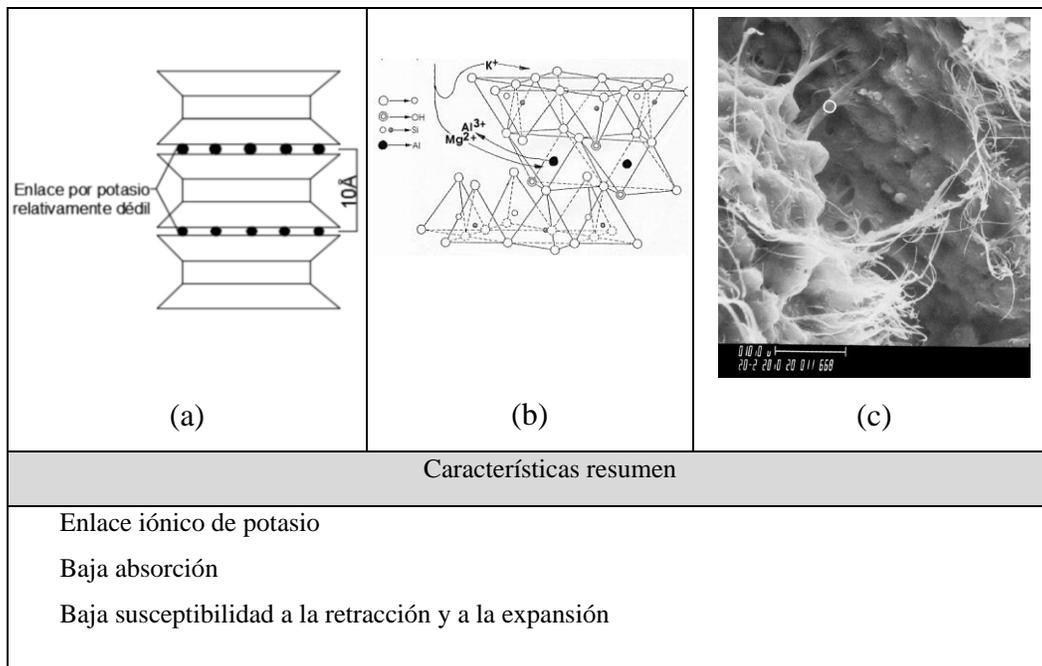


Figura 3.4. (a) Diagrama de capas de Illita (BERRY & REID, 1993). (b) Esquema de la estructura cristalina de Illita (c) Fotografía bajo el microscopio electrónico de una muestra de Illita (WELTON, 2003)

## 3.2. PROPIEDADES FISICO QUIMICAS DE LAS ARCILLAS

### 3.2.1. Capacidad de Intercambio Catiónico

La existencia de carga en las láminas se compensa con la entrada en el espacio interlaminar de cationes débilmente ligados y con estado variable de hidratación, que pueden ser intercambiados fácilmente mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes, a esta propiedad se la conoce como capacidad de intercambio catiónico. Se mide como la cantidad de cationes por peso unitario de la arcilla, está expresada en meq/100 g de arcilla seca (KAGAYA *et al.*, 2012).

Las substituciones suelen implicar cambios de Si por otros cationes de menor valencia (Al) o del Al de la hoja octaédrica por cationes divalentes. Ello conduce a la circunstancia de que casi todas las arcillas poseen un déficit estructural de carga positiva que es compensado con otros cationes como Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> y Ca<sup>+2</sup>. En este orden de ideas, los cationes que reemplazarán a otros cationes en las posiciones de intercambio, se acepta generalmente la siguiente secuencia, disponiéndola en orden de preferencia decreciente: H<sup>+</sup> > Al<sup>+3</sup> > Ca<sup>+2</sup> > Mg<sup>+2</sup> > K<sup>+</sup> > NH<sup>+4</sup> > Na<sup>+</sup> > Li<sup>+</sup> (CADENA, 2013)

### 3.2.2. Superficie Específica

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como la relación entre la superficie de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m<sup>2</sup> /g (DAS, 2008). Cuanto más pequeña es una partícula mayor será su superficie específica, y a su vez mayor carga eléctrica (LAMBE & WHITMAN, 1972).

SANTAMARINA (2002) sugiere el cálculo de esta propiedad en suelos expansivos mediante el método de absorción de moléculas de una solución (Azul de Metileno) y el uso de la siguiente expresión:

$$S_e = \frac{1gr}{319,87gr/mol} \cdot \frac{1}{200mL} \cdot (N \cdot 0,5mL) \cdot N_{Av} \cdot A_{AM} \cdot \frac{1}{10gr}$$

Algunos autores como SANTAMARINA *et al.* (2002), CHO & SANTAMARINA (2004) y DAS (2008) muestran tablas con valores típicos de superficie específica para diversos minerales, principalmente arcillosos (Tabla 3.2).

Tabla 3.3. Valores típicos de superficie específica para los principales minerales. (Modificado de CHO & SANTAMARINA, 2004; DAS, 2008)

ARCILLA MINERAL	SUPERFICIE ESPECÍFICA (m <sup>2</sup> /g)
Limos y Arenas	< 0,1
Caolinita	10 – 30
Clorita	5 – 50
Haloisita	30 – 50
Illita	80 – 100
Atapulgita	140 – 170
Paligorskita	100 – 200
Sepiolita	100 – 240
Vermiculita	200 – 400
Montmorillonita cálcica	300 – 350
Montmorillonita ferrosa	400 – 450
Montmorillonita sódica	700 – 900

### 3.2.3. Porosidad

Según STEPKOWSKA & JEFFERS (1992), a organización de láminas, partículas y agregados en un material arcilloso da lugar a diferentes tipos de porosidad, asociada un tipo de agua con propiedades diferentes (Figura 3.5), tal como se describe a continuación:

Porosidad interláminar o interfoliar, a la que sólo acceden las moléculas polares, y cuyos espaciados están comprendidos entre 2 y 10 Å (aunque para las esmectitas sódicas hidratadas pueden ser mayores). Constituye el agua de solvatación de los cationes que, por estar influenciada por el campo eléctrico, sus propiedades son muy diferentes a las del agua libre y tiene menor movilidad. Algunos autores señalan que esta agua se puede mover libremente sobre la superficie de la lámina, pero no perpendicularmente a ella.

Porosidad intra-agregados, comprende poros diámetros inferiores a 0.002 μm, aunque en estado de saturación elevados pueden llegar hasta 0.0035 μm en el interior de las partículas primarias. El agua que forma parte de las capas

difusas también está adsorbida, y no puede separarse de las partículas arcillosas por acciones.

Porosidad inter-agregados, mayor de  $0.002 \mu\text{m}$ , en estos poros el agua está retenida por fuerzas capilares o gravitacionales, y se denomina externa. La porosidad de agua externa en la esmectitas disminuye al aumentar la densidad del material y al disminuir la humedad, pudiendo llegar a ser inferior al 20 % para esmectitas cálcicas compactadas a densidad seca de  $1,60 \text{ g/cm}^3$  (PUSCH, 2001). Sin embargo, para una pasta de montmorillonita cálcica sin confinamiento sometida a una succión muy baja ( $0,032\text{bar}$ ), dan un porcentaje de agua externa del 85 % (BEN RHAJEM *et al.*, 1996).

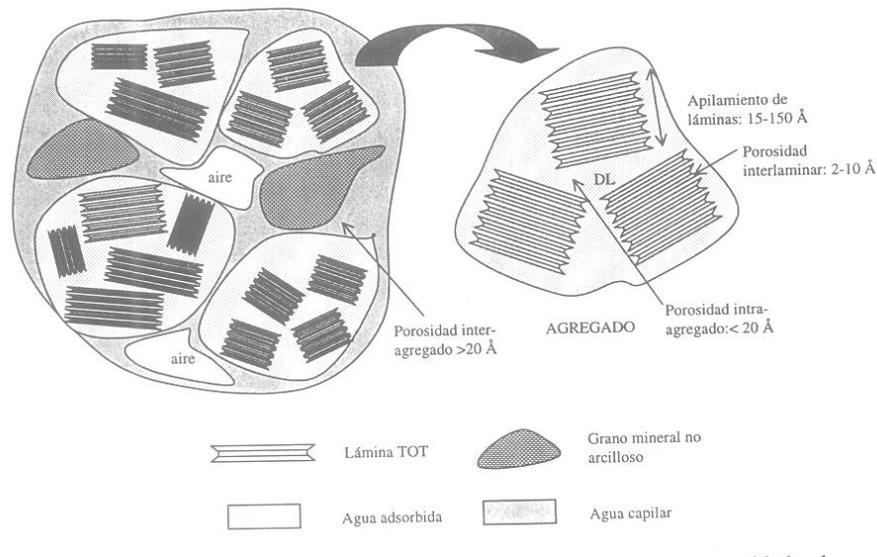


Figura 3.5. Esquema de la organización de un material arcilloso: tipos de porosidad y de agua (VILLAR, 2002)

### 3.2.4. Absorción y Adsorción

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción, cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad; y adsorción se trata del agua adherida a la superficie del sólido por

medio de fuerzas puramente físicas (Fuerzas de Van der Waals), o en algunos casos, enlaces químicos débiles. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso (ROMERO & BARRIOS, 1997).

La adsorción es la acumulación preferencial de una sustancia sobre la superficie de un sólido normalmente poroso. Por lo tanto, es un fenómeno superficial ya que el adsorbato se acumula en la superficie del sólido gracias a las interacciones entre la superficie y el adsorbato. Las fuerzas intermoleculares desequilibradas que existen en la superficie de un sólido provocan la atracción o repulsión entre las moléculas que se encuentran en una solución líquida y la superficie del sólido. En la Figura 3.6, se observa que en el proceso de la adsorción (LITTER, SANCHA & INGALLINELLA, 2010).

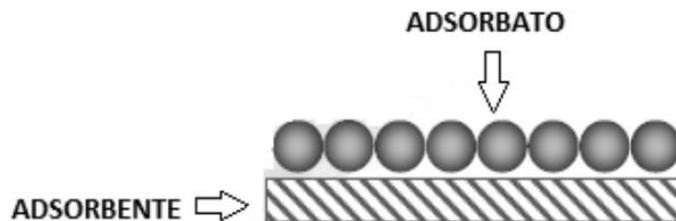


Figura 3.6. Ilustración de la disposición del adsorbente respecto al adsorbato (DROGUETT, 1983)

La retención del agua en el suelo se produce según diferentes mecanismos, siendo predominante uno u otro según la humedad del suelo (es decir, la actividad del agua), para humedades bajas predomina el mecanismo de la adsorción, que es función de la superficie específica, y que tiene lugar en los microporos; y para humedades más altas la condensación capilar, que es función de la forma y disposición de las partículas y tiene lugar en los mesoporos y macroporos (EVERETT & HAYNES 1973). La adsorción crea pilares alrededor de los cationes intercambiables y una película de agua en las superficies externas de partículas o agregados, procesos ambos que inducen el aumento del espaciado entre las láminas y la distancia entre partículas, es decir el hinchamiento. Estas fuerzas de adsorción que inducen el hinchamiento se ven equilibradas por las fuerzas de condensación capilar (PROST *et al.*, 1998).

El agua absorbida, que es un agua móvil con densidad y viscosidad mayores que la del agua normal. Rodea las partículas individuales y está bajo el efecto de las fuerzas polares y eléctricas y de los enlaces iónicos. Mientras que el agua adsorbida, no puede ser impulsada por las fuerzas hidrodinámicas puesto que las fuerzas de adsorción son muy grandes, rodea la superficie exterior de los minerales también las superficies interiores, en caso de estructura reticular, con una capa extraordinariamente delgada (UGAS, 1985).

### **3.2.5. Expansividad o Hinchamiento**

Una arcilla expansiva es aquella arcilla susceptible a producir grandes cambios de volumen, en directa relación con los cambios en la humedad del suelo. Tienen la capacidad de incluir agua en su estructura lo cual genera un ensanchamiento o expansión de la estructura cristalina original. Es decir, esta propiedad está íntimamente relacionada con las condiciones iniciales de humedad y densidad en que se encuentren, así, como de muchos otros factores que inciden en el desarrollo del potencial expansivo de estos suelos como composición química, mineralogía, estructura y fábrica del suelo, presión de confinamiento, permeabilidad, temperatura y tiempo. De esta forma, en los suelos con alto contenido arcilloso activo, los cambios de humedad originan alteraciones volumétricas, a veces bastantes severas. La pérdida de humedad del suelo produce contracciones críticas, y el humedecimiento, expansión o hinchamiento (ARANCIBIA, 2003).

La expansión de la arcillas puede ser intercapa o interpartícula (Figura 3.7), donde el primero, es causado por la interacción de fuerzas de rango corto entre las capas de minerales de arcillas expansibles o entre superficies planares del dominio de cristales minerales individuales, la energía de hidratación del mineral de arcilla determina el grado de hinchamiento; el segundo, es causado por fuerzas de rango largo que producen ensanchamiento osmótico el cual es una expresión de la repulsión entre estructuras doble capa, el equilibrio se da cuando la repulsión es balanceada por fuerzas reticulares derivadas de la

atracción entre bordes positivos y caras negativas de los minerales de arcillas, este tipo de hinchamiento genera una presión considerable (BAVER *et al.*, 1972).

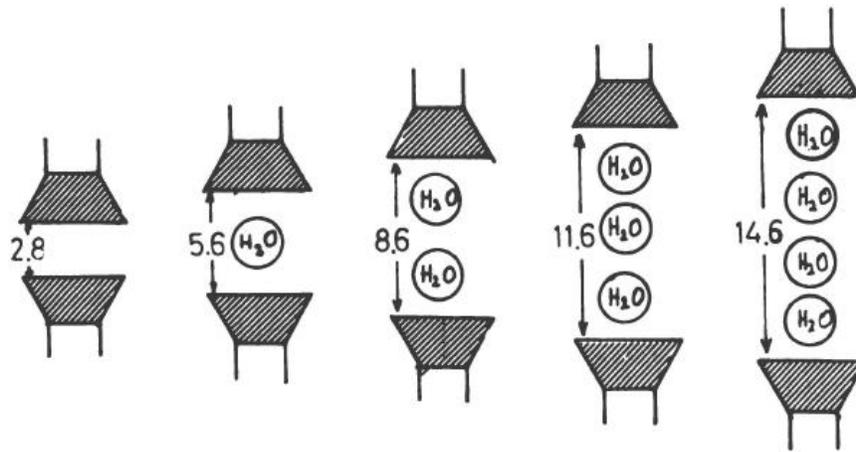


Figura 3.7. Hidratos de bentonita. Expansion de la red de adsorción de moléculas de agua según trabajo de BRADLEY, CLARK & GRIM, (1935) en BESOAIN (1939)

La arcilla está cargada negativamente, que en estado seco es balanceada por diferentes cationes. Pero al agregar agua, estos cationes y aniones flotarán alrededor de la partícula atrayendo una capa de agua que se adhiere fuertemente a la arcilla logrando alcanzar la resistencia del hielo. Esta capa es llamada doble capa difusa (Figura 3.8) y decrece al aumentar la distancia desde la partícula (DAS, 1999).

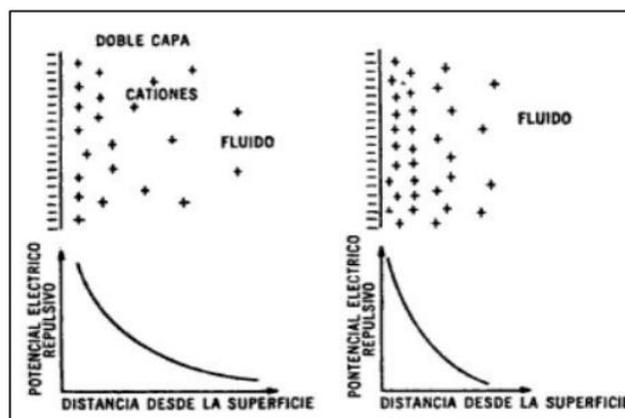


Figura 3.8. Formación de la doble capa difusa entorno a un cristal de arcilla sumergido en agua (BADILLO & RODRIGUEZ, 2008)

A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Siendo el grupo de la esmectita la de mayor actividad expansiva. Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación o separación de las láminas, teniendo un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si, por el contrario, tienen  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$  como cationes de cambio, su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

Según (MITCHELL, 1993) existen tres mecanismos que intervienen en la expansión del suelo:

- Atracción del agua por las partículas de arcilla. La carga negativa de la superficie de la partícula de arcilla se compensa con cationes y con moléculas bipolares como las del agua. A su vez, la atracción y fijación de las moléculas de agua se realiza a través de dos mecanismos: 1) el enlace de hidrógeno de las moléculas de agua a la superficie del mineral de arcilla y 2) la atracción dipolo-dipolo de las moléculas de agua entre sí, que da lugar a que más de una capa de moléculas de agua pueda ser adsorbida. Estas moléculas de agua tienen una orientación respecto a la partícula arcillosa que decrece con la distancia.
- Hidratación de cationes. A medida que se hidratan los cationes de cambio que se encuentran unidos a las superficies de las láminas, aumenta su radio iónico, dando lugar al aumento de volumen del suelo.
- Repulsión osmótica. Los gradientes de concentración desarrollados en las capas difusas de iones asociadas a la arcilla inducen un intercambio con el agua libre, que intenta pasar hacia el interior de la capa difusa de iones (DL), que actúa como una membrana semipermeable, provocando su aumento de volumen.

### **3.3. CARACTERIZACION GEOMECANICA DE SUELOS ARCILLOSOS**

#### **3.3.1. Sistema de clasificación de los suelos USCS**

El Sistema Unificado de Clasificación de suelos (USCS) fue propuesto por Casagrande en 1942 (Figura 3.9) y posteriormente avalado por la norma ASTM D-2487-11 para ser utilizado por el cuerpo de ingenieros, especialmente en el área de la geotecnia (DAS, 2006).

En general, el estudio de suelos arcillosos se realiza mediante los ensayos de caracterización y evaluación de propiedades índice, descritos a continuación.

#### **3.3.2. Límites de Consistencia de Atterberg**

Se define la consistencia o grado de cohesión de las partículas del suelo y su resistencia a ser deformada en función a su contenido de agua. Los límites se basan en el concepto de que un suelo de grano fino solamente puede existir en cuatro estados de consistencia según su humedad sólido, semisólido, plástico y líquido (LAMBE & WHITMAN, 2004). Para lo cual Atterberg definió tres límites:

- a) Retracción o consistencia que separa el estado sólido seco y el semisólido
- b) Límite plástico que separa el estado semisólido del plástico. Es el mínimo contenido de humedad que permite amasarlo en cilindros de 3 mm de diámetro, sin que se rompa o desmorone.
- c) Límite líquido que separa el estado plástico del semilíquido. Es el contenido de humedad de un suelo, por el cual, dos secciones de una muestra moldeada del mismo, separadas por una ranura de dimensiones estándar, alcanzan apenas a tocarse, sin unirse, al someterlas al impacto de 25 golpes bien definidos en la cuchara Casagrande.

Mientras que el índice de Plasticidad: es el valor numérico de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, es decir, es una medida de su capacidad de desarrollar cohesión (Figura 3.10).

Identificación en el campo (excluyendo las partículas mayores de 7,6 cm y basando las fracciones en pesos estimados)				Simbolo del grupo	Nombres típicos					
Suelos de grano grueso-Más de la mitad del material es retenido por el tamiz N.º 200	Gravas-más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz N.º 4	Gravas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Amplia gama de tamaños y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios	<b>GW</b>	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con pocos finos o sin ellos					
			Predominio de un tamaño o un tipo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios	<b>GP</b>	Gravas mal graduadas, mezclas de arena y grava con pocos finos o sin ellos					
		Gravas con finos (cantidad apreciable de finos)	Fración fina no plástica (para la identificación ver el grupo <i>ML</i> más abajo)	<b>GM</b>	Gravas limosas, mezclas mal graduadas de grava, arena y limo					
			Finos plásticos (para identificación ver el grupo <i>CL</i> más abajo)	<b>GC</b>	Gravas arcillosas, mezclas mal graduadas de grava, arena y arcilla					
		Arenas-más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz N.º 4	Arenas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Amplia gama de tamaños y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios	<b>SW</b>	Arenas bien graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos				
				Predominio de un tamaño o un tipo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios	<b>SP</b>	Arenas mal graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos				
	Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)		Finos no plásticos (para identificación ver el grupo <i>ML</i> más abajo)	<b>SM</b>	Arenas limosas, mezclas de arena y limo mal graduadas					
			Finos plásticos (para identificación ver el grupo <i>CL</i> más abajo)	<b>SC</b>	Arenas arcillosas, mezclas mal graduadas y arenas y arcillas					
	Métodos de identificación para la fracción que pasa por el tamiz N.º 40									
	Suelos de grano fino-Más de la mitad del material pasa por el tamiz N.º 200 (La abertura del tamiz N.º 200 corresponde aproximadamente al tamaño de la menor partícula apreciable a simple vista)		Limos y arcillas con limite liquido menor de 50	Resistencia en estado seco (a la disgregación)	Distancia (reacción a la agitación)	Tenacidad (consistencia)				
		Nula a ligera					Rápida a lenta	Nula	<b>ML</b>	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas con ligera plasticidad
		Media a alta					Nula a muy lenta	Media	<b>CL</b>	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas
Ligera a media		Lenta		Ligera	<b>OL</b>	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad				
Limos y arcillas con limite liquido mayor de 50		Ligera a media	Lenta a nula	Ligera a media	<b>MH</b>	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o con diatomeas, suelos limosos				
		Alta a muy alta	Nula	Alta	<b>CH</b>	Arcillas inorgánicas de plasticidad elevada, arcillas grasas				
		Media a alta	Nula a muy lenta	Ligera a media	<b>OH</b>	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta				
Suelos altamente orgánicos			Fácilmente identificables por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa	<b>Pt</b>	Turba y otros suelos altamente orgánicos					
Los suelos que poseen características de dos grupos se designan con la combinación de los dos símbolos. P. ej., GW-GC, mezcla bien graduada de arena y grava. Todos los tamaños de tamices se refieren al U.S. Standard.										

Figura 3.9. Sistema Unificado de Clasificación de suelos (USCS). (En Lambe & Whitman, 1981)

DAS (1999) muestra valores representativos de los límites de consistencia para algunos suelos arcillosos (Tabla 3.2); sin embargo, los límites de Atterberg podrían variar considerablemente, dependiendo del origen del suelo y de la naturaleza y cantidad de minerales arcillosos.

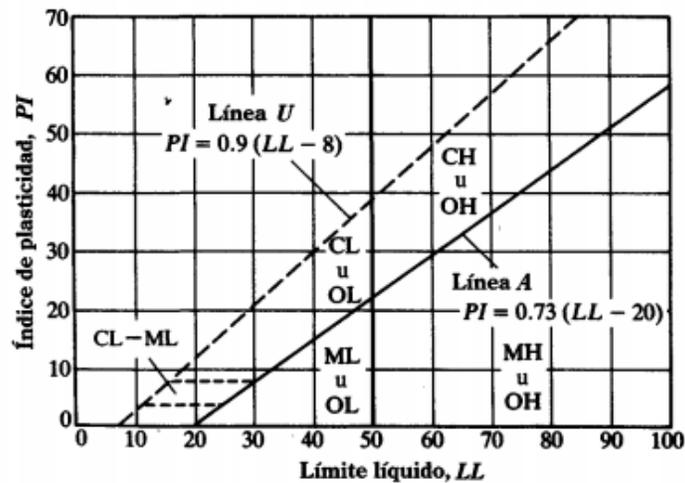


Figura 3.10. Carta de plasticidad de acuerdo al S.U.C.S., Norma ASTM D-2487-00. Tomado de DAS (2006)

Tabla 3.4. Valores típicos de límites líquido y plástico para algunos materiales y suelos arcillosos (Modificado de DAS, 1999)

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO (LL)	LÍMITE PLÁSTICO (LP)
CAOLINITA	35 - 100	25 - 35
ILLITA	50 - 100	30 - 60
MONTMORILLONITA	100 - 800	50 - 100
ARCILLA AZUL BOSTON	40	20
ARCILLA CHICAGO	60	20
ARCILLA LOUISIANA	75	25
ARCILLA LONDRES	66	27
ARCILLA CAMBRIDGE	39	21
ARCILLA MONTANA	52	18
LODO MISSISSIPPI	25	32
SUELOS LOESIANOS DEL NORTE Y NOROESTE DE CHINA	25 - 35	15 - 20

### 3.3.3. Índice de Nocividad de los coloides

El comportamiento de los coloides de un suelo arcilloso ante la presencia de agua, también puede ser determinado mediante un parámetro llamado Índice de Nocividad coloidal, el cual se obtiene a través del ensayo de la mancha y

relaciona el valor azul con el porcentaje de coloides (partículas menores a 0.002 mm de acuerdo a MIT y menor a 0.001 mm de acuerdo a la clasificación Internacional) mediante la expresión:

$$\text{Índice de Nocividad (IN)} = \frac{\text{Valor Azul}}{\% \text{ de coloides}}$$

donde: % de coloides debe ser expresado en su valor decimal.

En el ensayo de la mancha el consumo de solución de azul de metileno será mayor a medida que sea mayor el contenido de coloides activos y que la montmorillonita consume más solución que la illita y esta última más que la caolinita. Como se conoce la concentración de azul de metileno, es posible determinar cuánto es el consumo de azul en polvo, es decir, de azul de metileno por cada 100 gramos de suelo. Así mismo, es posible calcular con gran precisión la superficie específica de los coloides, pues el azul es un compuesto químico sumamente estable en cuanto a peso molecular se refiere (BARBIERO, 1999).

#### 3.3.4. Actividad Coloidal

La actividad de las arcillas de SKEMPTON (1953) evalúa el comportamiento de los coloides ante la presencia de agua, relacionando los límites de Atterberg y el contenido de coloides presentes en el suelo.

$$\text{Actividad (Ac)} = \frac{\text{Índice de plasticidad}}{\% \text{ de coloides}}$$

Donde los valores de coeficiente inferior a 0.75 corresponde a arcillas inactivas, entre 0.75 y 1.25 para arcillas normales y superior a 1.25 para arcillas activas (CASSAN, 1982).

### **3.3.5. Presión de Expansión**

La presión de expansión, definida como la máxima presión vertical que es capaz de desarrollar una muestra de arcilla al colocarse en condición sumergida en el consolidómetro dentro de un anillo rígido e impedírsele su expansión mediante un incremento progresivo de la carga vertical aplicada sobre la muestra (UGAS, 1985).

La expansión potencial, definida como el máximo hinchamiento vertical, expresado en porcentaje, que sufre una muestra colocada en el consolidómetro en condición de inmersión en agua bajo una presión de 1 Ton/m<sup>2</sup>.

La expansión que puede sufrir un suelo, especialmente aquellos que contienen gran cantidad de minerales de arcilla, están íntimamente relacionado con las condiciones iniciales de humedad y densidad en que se encuentren, así, como de muchos otros factores que inciden en el desarrollo del potencial expansivo de estos suelos como composición química, mineralogía, estructura y fábrica del suelo, presión de confinamiento, permeabilidad, temperatura y tiempo. De esta forma, en los suelos con alto contenido arcilloso activo, los cambios de humedad originan alteraciones volumétricas, a veces bastantes severas. La pérdida de humedad del suelo produce contracciones críticas, y el humedecimiento, expansión o hinchamiento (ARANCIBIA, 2003).

La medida más usual, para predecir en parte el comportamiento expansivo de los suelos, se designa con el nombre de Índice de Expansión y representa la presión alcanzada por el suelo, al variar principalmente sus condiciones de humedad. Este también puede estar representado como porcentaje, indicando la expansión experimentada por el suelo con respecto a un espesor inicial de este, antes de que ocurra una variación en su condición normal o estado original (PATRONE & PREFUMO, 2002; ARANCIBIA, 2003).

### **3.3.6. Equipos utilizados para medir presión de expansión**

La caracterización de la expansividad de los suelos arcillosos, para propósitos prácticos de la ingeniería, requiere de la determinación de la presión

de expansión. Aunque se han ideado múltiples aparatos para medir la presión de expansión, el edómetro sigue siendo el de uso más generalizado, mejorado por Casagrande. Otros, de desarrollo más reciente representan generalmente una adaptación del método edométrico a deformación controlada, incorporando dispositivos de medición y control. A continuación, se presentan los dispositivos y métodos más conocidos y otros de desarrollo más reciente (MARCIAL & LANDAETA, 2008)

#### 3.3.6.1. Consolidómetro o Edómetro

El funcionamiento de este dispositivo es sencillo, en vista que se constituye de una celda circular donde se coloca la muestra, y posteriormente es saturada por medio de dos placas porosas situadas en la parte superior e inferior. La celda impide la deformación lateral, por lo que la muestra de arcilla intentará expandirse en sentido vertical, donde la piedra porosa superior se encuentra unida a un pistón junto a un comparador que mide el desplazamiento vertical, consistente en la deformación de la arcilla. La idea consiste en evitar dicha variación de volumen, por lo que se colocan pesas para contrarrestar el esfuerzo ejercido por la muestra, en forma progresiva hasta que la muestra se equilibre y no experimente deformaciones, en cuyo caso se dará por finalizado el ensayo y la presión de expansión será resultante de toda la carga impuesta para contrarrestar el cambio volumétrico, dividida entre el área de aplicación, también normalizada (FRATELLI, 1993).

El consolidómetro es un equipo tradicional de vasto conocimiento y aplicación para el estudio de las propiedades mecánicas de los suelos, lo cual le confiere una gran ventaja frente a otros métodos. Sin embargo, para la realización de este ensayo particular se requiere de mano de obra que este al pendiente de la realización del ensayo, cuyo fundamento es el de restringir cambios volumétricos; de allí que, por las noches, al no existir supervisión alguna, se generen deformaciones importantes que necesiten de incrementos de

cargas mayores para contrarrestar, tomando en cuenta que se podría inducir cierta fricción entre la muestra y la celda (Figura 3.11).

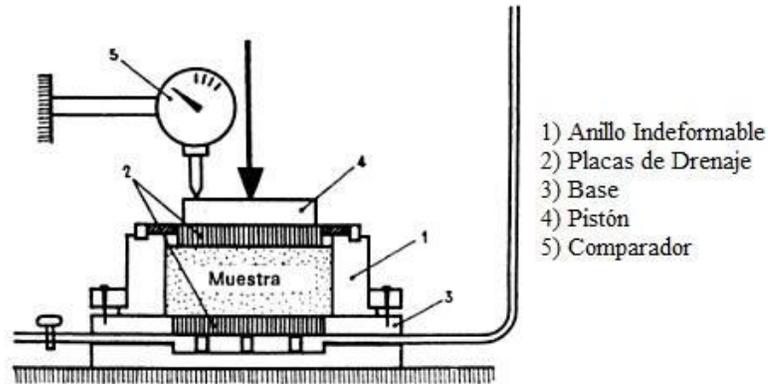


Figura 3.11. Representación esquemática del consolidómetro. Tomado de GRAUX (1975)

### 3.3.6.2. Aparato de Lambe

Este equipo tiene un objetivo un poco más práctico, debido a que realiza una estimación del potencial de expansión que puede tener una muestra del suelo, con la inversión de un par de horas. En este caso, el dispositivo se compone de un marco de reacción, la celda donde se coloca la muestra y un mecanismo para medir la carga inducida (Figura 3.12).

La metodología del ensayo se basa en inducir un esfuerzo sobre la muestra de 1 Ton/m<sup>2</sup>, para posteriormente inundarla y registrar, al transcurrir dos horas, la presión ejercida por el material (RICO & DEL CASTILLO, 2005). Con esto se determina el índice de expansividad de dicho suelo, como medida cualitativa de la actividad del material, en base a unos ábacos desarrollados por el autor.

Si se realiza una comparación con el edómetro, esta metodología resulta más práctica y rápida, permitiendo obtener una idea de que tan peligroso es el suelo desde el punto de vista geotécnico. Sin embargo, el anillo posee una especie de resorte, y las condiciones de volumen no serán constantes, otorgándole deformabilidad a la muestra, y en la medida que la presión de expansión sea mayor, la deformabilidad sobre el resorte también crecerá, distando en mayor proporción de condiciones de volumen constante.

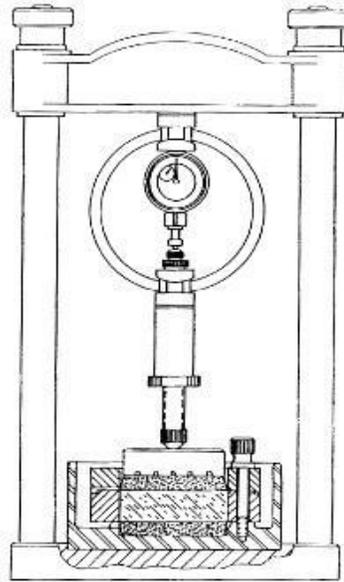


Figura 3.12. Representación esquemática del aparato de Lambe. Tomado de Norma UNE 103-600/93

### 3.3.6.3. Dispositivo de Komine y Ogata (1994)

Este equipo tiene un enfoque más moderno partiendo del funcionamiento del aparato de Lambe, pero sustituyendo el anillo de carga por un componente menos deformable, e incorporando al conjunto un sistema de adquisición de datos automatizado (Figura 3.13), para minimizar la intervención humana sobre el ensayo (MARCIAL & LANDAETA, 2008).

En este caso, también se inunda el material y se van registrando los valores de presión de expansión, pero las muestras tienen un espesor relativamente bajo, con el objeto de reducir la duración del ensayo.

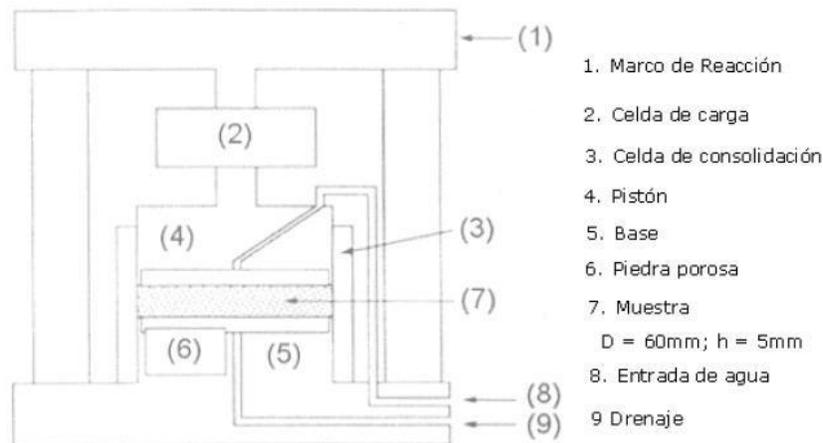


Figura 3.13. Representación esquemática del dispositivo de Komine & Ogata. Tomado de KOMINE & OGATA (1994)

#### 3.3.6.4. Dispositivo de Marcial (2003)

Permite mantener razonablemente la condición de volumen constante sin la supervisión de un operador, introduciendo medidas automatizadas de deformación, en conjunto con un sistema de compensación. Toma en cuenta la influencia de la deformación del sistema de ensayo durante la determinación de la presión de expansión. Algunos resultados presentados por el autor muestran que el control de deformación es un aspecto de mayor interés en este tipo de mediciones.

En el montaje experimental el pistón es simplemente instrumentado con un indicador de desplazamiento digital, con una precisión de 0,001 mm, que permite un monitoreo continuo de la deformación vertical de la muestra de suelo. El montaje experimental está basado en el uso de una prensa electromecánica de 5 toneladas, controlada digitalmente. El plato de la prensa puede desplazarse a una velocidad controlada, comandada por un computador que compensa el desplazamiento registrado por el indicador digital. Adicionalmente, la celda de consolidación está especialmente diseñada para incorporar la medición de esfuerzos laterales (Figura 3.14).

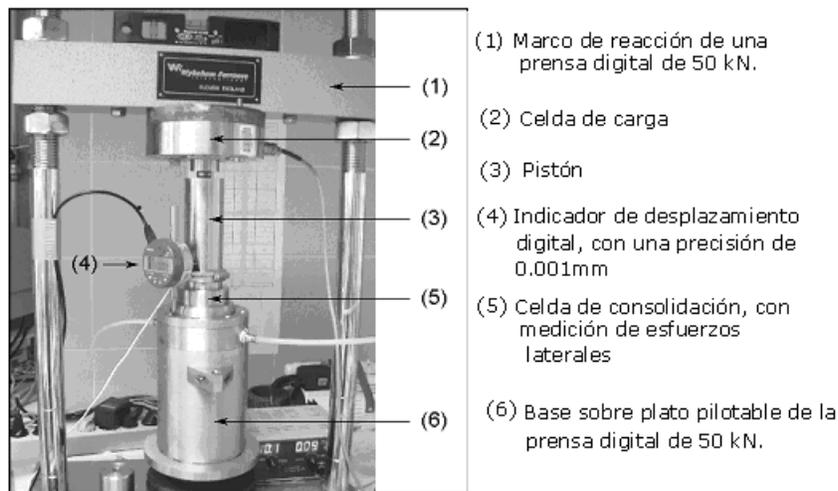


Figura 3.14. Dispositivo para medición de presión de expansión con control de la deformación vertical, según MARCIAL (2003)

Los dispositivos con control automatizado de deformación presentan la ventaja de ser muy confiables y arrojar resultados precisos, con poca supervisión humana. Sin embargo, la principal desventaja es que son dispositivos muy costosos para poder ser implementados masivamente por la mayoría de los laboratorios de suelos.

### 3.4. ANALISIS MINERALOGICO Y ELEMENTAL DE SUELOS ARCILLOSOS

No existe una técnica de análisis universal, cualitativa o cuantitativa, que permita la caracterización de estos minerales. Los métodos son complementarios y sólo la combinación de diferentes métodos posibilita una identificación segura. e

Los métodos físicos que se utilizan en el análisis de arcilla son fundamentalmente los térmicos, incluyendo análisis térmico diferencial, análisis termogravimétrico y termogravimetría diferencial; los métodos electrónicos, incluyendo la microscopía y difracción de electrones, la difracción de rayos X, espectrometría (fluorescencia) de rayos X, espectrometría infrarroja se emplean con frecuencia (BESOAIN, 1985).

### 3.4.1. Difracción de Rayos-X

Es la técnica de análisis más ampliamente utilizada para la identificación de fases o materiales cristalinos por medio de sus características bandas espectrales de difracción de los Rayos X, es un método semi destructivo ya que requiere de la pulverización de la muestra, pero no afecta a su composición de fases cristalinas ni a su composición en elementos químicos. Los parámetros de caracterización son el ángulo de difracción y la intensidad, realmente impulsos detectados de difracción, detectados con el difractómetro de polvo cristalino, del que se obtiene un registro gráfico de las señales que los haces difractados originan en detectores cuánticos de radiación (BRAGE, 2010).

La difracción de Rayos-X permite la Identificación de especies constituyentes en sustancias simples y complejas, a partir de la comparación con patrones típicos de difracción. La longitud de onda ( $\lambda$ ) usada en esta técnica se encuentra aproximadamente entre 0,5 y 2,5 Å.

Cuando el haz de rayos-X pasa por un átomo, su campo eléctrico acelera los electrones y les comunica un modo vibracional. Una carga eléctrica en oscilación, induce una serie de ondas electromagnéticas. Las ondas que irradia cada electrón, tiene la misma frecuencia ( $\nu$ ) y longitud de onda ( $\lambda$ ) que el haz de rayos-X que la origina (BARBIERA, 1999).

El ángulo en el cual los rayos X son difractados por la superficie de un cristal es deducido por medio del uso de la Ley de Bragg (Figura 3.15), definida de la siguiente forma:

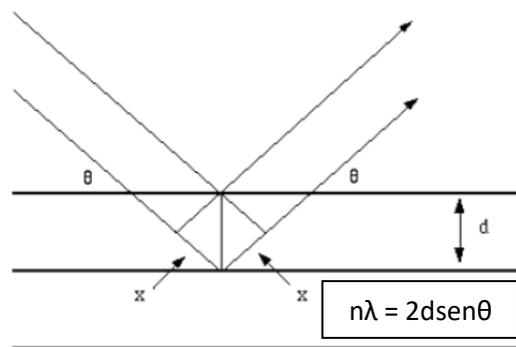


Figura 3.15. Reflexión de rayos X entre dos planos de átomos en un sólido. Ley de Bragg.  
Tomado de: HERNANDEZ (2006)

Entonces el análisis del patrón de difracción, permite conociendo  $\lambda$  y el ángulo de incidencia ( $\theta$ ), determinar el espaciado ( $d$ ) entre los planos que forman el cristal, lo que corresponde a las distancias y geometría de la celda unidad.

Una vez que se tienen todos los datos respectivos de la muestra se puede proceder a la identificación utilizando fichas de compilados por la Comisión Internacional para datos de difracción de rayos X (ICDD, 1974), disponibles en libros o de manera computarizada. El procedimiento es el siguiente (AGUILAR & CARABALLO, 2007):

1. Se toman los picos de mayor porcentaje relativo de intensidad con su respectiva distancia interplanar “ $d$ ”.
2. Se ordenan los picos en orden de intensidad según los porcentajes relativos.
3. Las distancias interplanares respectivas a los mayores porcentajes de intensidad son comparadas con las tablas o patrones existentes. En dichas tablas pueden ser objetos de comprobación todos los picos del difractograma de acuerdo a su distancia interplanar y a su intensidad relativa. Si no se logra identificar la muestra con el ordenamiento construido deben permutarse los valores y repetirse el mismo procedimiento hasta conseguir el ordenamiento que se ajuste con los picos de alguno de los patrones.

### **3.4.2. Fluorescencia de Rayos X**

Según ROLLINSON (1993), es la técnica analítica más ampliamente usada en la determinación de elementos químicos mayoritarios y traza en muestras de rocas. Es una técnica versátil en la cual se pueden analizar más de 80 elementos sobre un amplio rango de sensibilidades, detectando concentraciones de 100% hasta unos pocas partes por millón. Esta técnica, está basada en la excitación de una muestra. La intensidad producida por los rayos X secundarios es usada para determinar las concentraciones de los elementos presentes en la muestra ya que estos presentan longitudes de onda característicos de cada elemento químico.

Por tanto, cuando una muestra sólida o líquida se bombardea con rayos X de energía apropiada, los átomos de los elementos constitutivos emiten un espectro de rayos X heterogéneo; se dice que la muestra fluoresce. Esta radiación secundaria contiene varias longitudes de onda, cada una de las cuales es característica y representativa de cada uno de los elementos componentes de la muestra. Las radiaciones componentes del espectro, de longitudes de onda diferente, se separan mediante un cristal analizador cuyo espaciado  $d$  es conocido. La energía de los rayos X fluorescentes dispersados por el cristal analizador, cada una a un ángulo diferente, se mide con un detector de radiaciones y se registra automáticamente. Del análisis de estos valores (posición angular, energía) se puede obtener información cualitativa y cuantitativa de los elementos presentes en un compuesto (BESOAIN, 1985).

Al irradiar una muestra, los rayos-X fuente pueden sufrir dispersión o absorción de los átomos. Este proceso posterior es conocido como *efecto fotoeléctrico*. Cuando un átomo absorbe los rayos-X de la fuente, la radiación incidente desaloja electrones de las capas más internas del átomo, creando vacantes. Los electrones vacantes son rellenados por electrones provenientes de las conchas electrónicas externas en forma de cascada (Figura 3.16). Los electrones en las capas externas tienen mayores estados energéticos que los electrones de las conchas internas, y los electrones de las capas externas emiten energías hacia las capas internas vacantes. Este reajuste de electrones es lo que resulta en la emisión de los rayos X característico de un átomo dado (NITON CORPORATION, 1998).

El análisis por fluorescencia de rayos X implica la medición de intensidades de líneas características específicas de un elemento y la reducción de estas intensidades a concentraciones de masa. Al igual que en las técnicas de fotometría de llama o espectroscopia visible, el método espectrométrico de rayos X es casi siempre comparativo, basado en el uso de curvas analíticas preparadas con estándares adecuados. La evaluación de las intensidades de la radiación fluorescente en mezclas de componentes múltiples sin el concurso de

curvas estándar es compleja aun recurriendo a programación con computadores (BESOAIN, 1985).

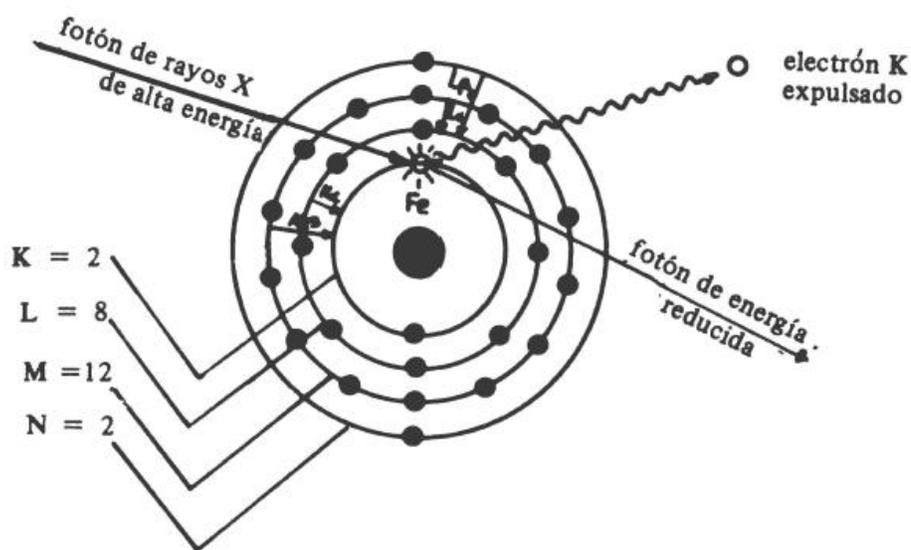


Figura 3.16. Reemplazo de electrones ejemplificado por el bombardeo con rayos X de alta energía en un átomo de Fe determina la expulsión de uno o más electrones. El átomo excitado reemplaza los electrones eyectados, produciéndose en este proceso radiación de rayos X característicos, secundarios o fluorescentes. Estos rayos tienen una energía asociada a una longitud de onda peculiar al elemento y órbita implicada (Tomado de BESOAIN, 1985)

### 3.4.3. Microscopía Electrónica

En la microscopía electrónica, se utiliza un haz de electrones, enfocado magnéticamente. Los microscopios electrónicos permiten alcanzar una capacidad de aumento muy superior a los microscopios convencionales debido a que la longitud de onda de los electrones es mucho menor que la de los fotones "visibles" (HERNÁNDEZ, 2006).

Según BESOIAN (1985) el propósito del microscopio electrónico es aumentar la capacidad de visión del ojo humano para ver objetos pequeños. Esto se logra mediante el uso de electrones en lugar de luz y de lentes eléctricas o magnéticas en reemplazo de las lentes de vidrio. Con ello se logra observar la imagen de

partículas o registrarlas en fotografías. Existen microscopios electrónicos de transmisión (TEM) y de reflexión (SEM).

El microscopio electrónico funciona con un haz de electrones generados por un cañón electrónico, acelerados por un alto voltaje y focalizados por medio de lentes magnéticas (todo ello al alto vacío ya que los electrones son absorbidos por el aire). Los electrones atraviesan la muestra (debidamente deshidratada) y la amplificación se produce por un conjunto de lentes magnéticas que forman una imagen sobre una placa fotográfica o sobre una pantalla sensible al impacto de los electrones que transfiere la imagen formada a la pantalla de un ordenador (GUZMÁN, 2008).

## CAPÍTULO IV

### 4. GEOLOGÍA REGIONAL

#### 4.1. GENERALIDADES AREA METROPOLITNA

Según ACERO & DOMÍNGUEZ (2005), han definido la Geología Regional del área de estudio como una zona que está ubicada en uno de los principales valles del tramo central de la cordillera de la costa, Sistema Montañoso del Caribe.

Geomorfológicamente esta cordillera es muy compleja, debido en parte a que las secuencias volcánicas y metamórficas se asocian con unidades sedimentarias cuya combinación influye sobre la complejidad topográfica del sistema. Debido a esto, la zona cuenta con diferentes tipos litológicos, los cuales han sufrido diferentes procesos de deformación y metamorfismo (Figura 4.1).

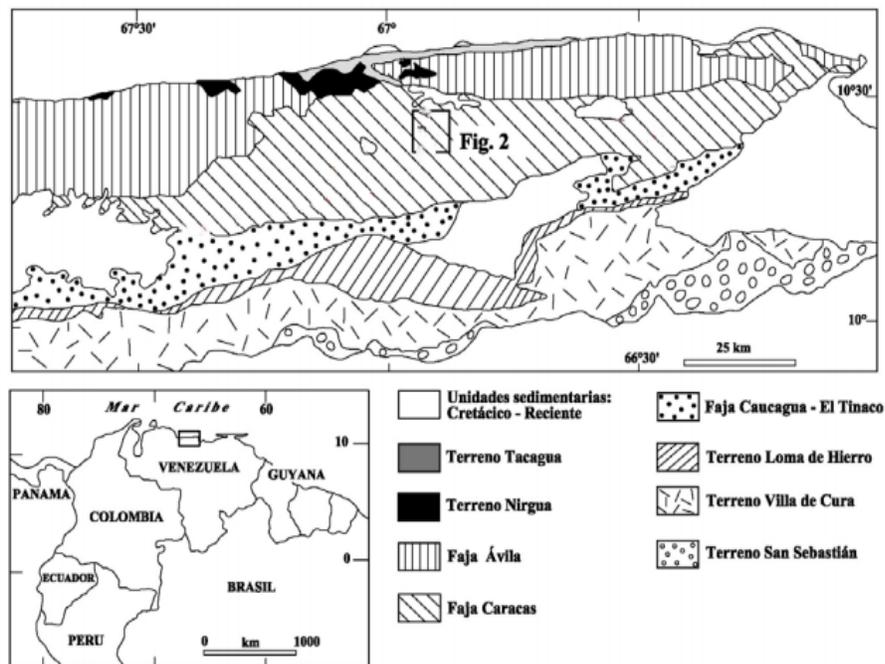


Figura 4.1. Mapa de las fajas y terrenos de la Cordillera de la Costa. Los esquistos de Las Brisas, Las Mercedes y Chuspita se encuentran en la Faja Caracas. Adaptado de URBANI (2011)

En el caso particular el área de estudio, se puede decir que la unidad litodémica aflorante es Esquisto de Las Mercedes, aunque la zona se ubica en un sedimento cuaternario (Figura 4.2).

Según WEHRMANN (1972) y la revisión de GONZÁLEZ DE JUANA *et al.* (1980) la litología predominante consiste en esquisto cuarzo-muscovítico-calcítico-grafitoso con intercalaciones de mármol grafitoso en forma de lentes. AZUARTE (2005) hace una cuantificación en la autopista entre Guatire y Caucagua, resultando que el Esquisto de Las Mercedes está constituido por 40% de fillita/esquisto grafitoso, 35% de metarenisca y 25% de mármol. Las rocas presentan buena foliación y grano de fino a medio, el color característico es el gris parduzco. La mineralogía promedio consiste en cuarzo 40% en cristales dispuestos en bandas con la mica, moscovita 20%, calcita 23%, grafito 5%, y cantidades menores de clorita, óxidos de hierro, epidoto y ocasionalmente plagioclasa sódica. El mármol intercalado con esquisto se presenta en capas delgadas usualmente centimétricas a decimétricas, son de color gris azulado, cuya mineralogía es casi en su totalidad calcita, escasa dolomita y cantidades accesorias de cuarzo, moscovita, grafito, pirita y óxido de hierro.

También, menciona la presencia de metaconglomerado en su base, esquistos cloríticos y una sección en el tope de fillita negra, con nódulos de mármol negro, de grano muy fino. Este mismo autor indica que la unidad se hace más cuarcífera y menos calcárea en su transición hacia su tope con el esquisto de Chuspita. El contacto entre ambas unidades ha sido descrito como concordante y transicional. SEIDERS (1965) indica, además, metarenisca pura, feldespática y cuarcífera, de estratificación de grano variable, a veces gradada.

Característico de la unidad es la presencia de pirita, que, al meteorizar, infunde una coloración rojiza en sus alrededores, en afloramientos al menos algo meteorizados existe la constante presencia de vetas de calcita blanca, pero también de colores pardo a marrón claro

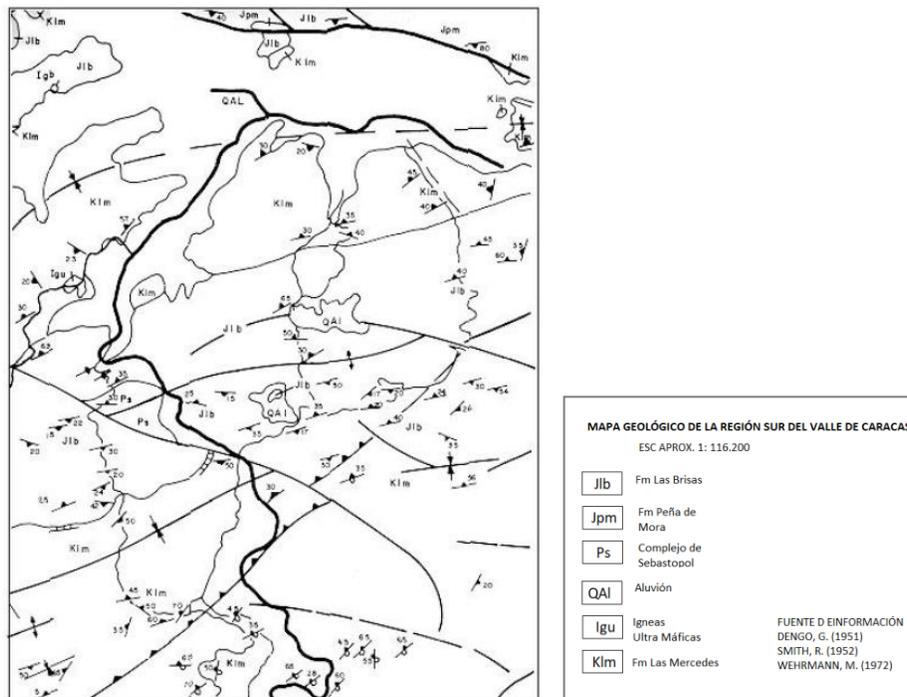


Figura 4.2. Mapa Geológico. Tomado de DENGO, 1951

Las asociaciones de fósiles encontrados, son poco diagnosticas solo permiten sugerir una edad mesozoica, sin diferenciar, sin embargo, han sido muchos los autores que agrupan la edad del esquisto en muchas tendencias. AGUERREVERE & ZULOAGA (1937) proponen la correlación de este complejo metamórfico con rocas no metamorizadas, pero con edades Cretácicas bien establecidas en el occidente del país. WOLCOTT (1943) con base en la identificación de varios macrofósiles (conchas de Pelecípodos y Gasterópodos) encontrados en algunos lentes de calizas interstratificados con los esquistos de la Formación Las Mercedes, sugiere edad Jurásico-Cretácico. BUCHER (1952), planteó correlacionar a la Formación Las Mercedes con la Formación La Luna (Turoniense-Coniaciense). SMITH (1952) estableció una correlación que pone en contacto a las formaciones Las Brisas y Las Mercedes cerca del tope del Albiense (Cretácico Medio), además propuso que esta última prolongo su depositacion hasta Turoniense Inferior (a finales del Cretácico Medio), cuando

la secuencia fue parcialmente levantada, y las rocas se vieron afectadas por el primer metamorfismo.

En su geología estructural, según DENGÓ (1951), la franja de esquistos entre la Sierra del Ávila y la costa del Mar Caribe presenta una estructura muy compleja. Al sur y al oeste de Caracas existen varios pliegues grandes y asociados a ellos hay algunas estructuras menores. Los tres pliegues principales son el Anticlinal del Junquito, el Sinclinal del Cementerio y el Anticlinal de Baruta. Las secciones en dirección norte-sur, muestran las estructuras principales de la región de Caracas (Figura 4.1). Para el caso de la zona de estudio, la estructura que domina la zona es el anticlinal del Cementerio; el cual se encuentra al norte del anticlinal de Baruta.

El esquisto de Las Mercedes se encuentra en el fondo del sinclinal, plegado y fallado en menor escala en una forma compleja. El rumbo general de su eje es N60E, y el declive es en esa misma dirección. El eje está en gran parte cubierto por el aluvión del valle de Caracas, pero a juzgar por los afloramientos del esquisto de Las Mercedes al este de Petare, parece que cambia de rumbo, tomando uno E-W, paralelo a la zona de fallas del Ávila.

En la región de Caracas han sido encontrados tres tipos principales de fallas, a saber: • Fallas inversas con buzamiento hacia el sur. • Fallas con rumbo aproximado de N60W y buzamiento hacia el suroeste. • Fallas con rumbo E-W y buzando al norte en ángulos fuertes. Estas fallas siguen un orden cronológico relativo, por lo que las fallas inversas con buzamiento al sur son las más antiguas.

#### **4.2. GENERALIDADES SECTOR VALLES DEL TUY**

Se conforma por material sedimentario aluvial Cuaternario que descansa sobre rocas sedimentarias pertenecientes a la Formación Tuy.

PICARD & PIMENTEL (1968), establecen que la Formación Tuy representa una sedimentación fluvio-lacustre con tres facies: una facies terrestre, con ambientes de abanicos aluviales piemontinos, cerca de una fuente de

levantamiento, formada por conglomerados de peña y cantos que caracteriza al Miembro Pichao. Las facies distales de los abanicos aluviales se interdigitan con una facies lacustre, que abarca el 50% de la formación, la cual se caracteriza por la intercalación de gravas y arcillas en capas gruesas; y una facies fluvial, expuesta en el borde sur de la cuenca con gravas y arcillas guijarrosas, con estratificación cruzada y huellas de erosión y relleno (Figura 4.3).

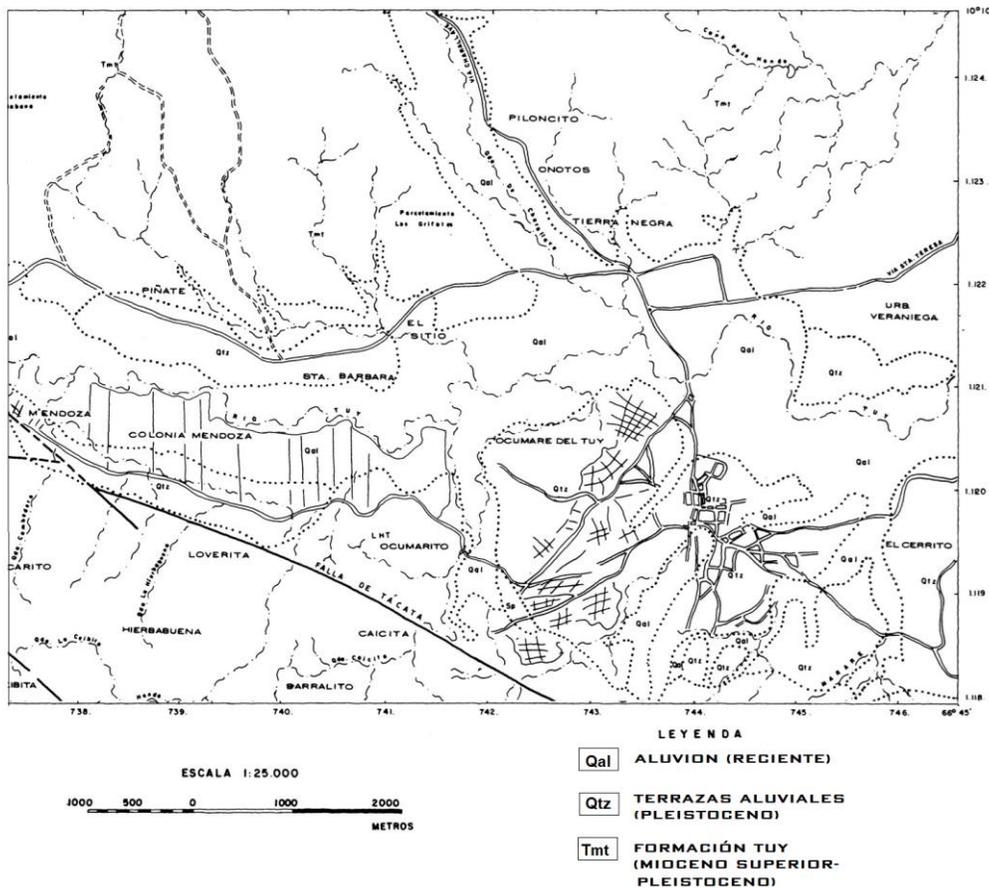


Figura 4.3. Mapa Geológico de la región de Ocumare del Tuy. Hoja 6846-III-NE. Edición 1-UCV-2003

BERMÚDEZ (1966) de acuerdo a los fósiles descritos, asignó una edad de Mioceno Superior a la Formación Tuy, mientras que MACSOTAY (1968), la ubica una edad de Mioceno tardío-Plioceno. PICARD & PIMENTEL (1968), indican una edad probable de Mioceno tardío-Plioceno. GONZÁLEZ DE JUANA *et*

*al.* (1980), indican que los sedimentos de la Formación Tuy sugieren un desarrollo coeval con cambios climáticos drásticos durante el Plioceno tardío - Pleistoceno. BECK (1985) con base en la identificación de ostrácodos de la Formación Siquire, infrayacente a la cual asignó una edad Mioceno tardío - Plioceno, sugirió que la Formación Tuy es de edad Plioceno-Pleistoceno.

La configuración espacial de los rasgos tectónicos activos cuaternarios en el Caribe meridional sugiere que esta región está sujeta a un régimen tectónico transcurrente compresivo. La aplicación de métodos de inversión a datos microtectónicos determinados sobre planos de fallas afectando rocas sedimentarias esencialmente de edad plio-cuaternarias confirma este régimen tectónico. Consecuentemente, este régimen es responsable por la cinemática y actividad cuaternaria de seis familias de estructuras tectónicas frágiles a lo largo del norte de Venezuela, desde Colombia en el oeste hasta Trinidad en el este (AUDEMARD, 2006).

El contexto geológico regional de la zona Nor-central del país implica una génesis muy complicada estructuralmente, correspondientes a sistemas de fallas asociadas a fallas principales, entre las que se encuentran: Valera, La Victoria, Tacagua – El Ávila y Urica (SCHUBERT, 1984; GRASES, 1994; BARRETO, 2010).

Las trazas del sistema de falla de La Victoria correspondiente a la zona entre el Aeropuerto Caracas y El Placer de Siquire yuxtapone unidades de rocas metamórficas Mesozoicas y rocas sedimentarias Plio-Pleistocenas correspondientes a la cuenca del Tuy medio. Este sistema ejerce control estructural en la geometría actual y en la generación de dicha cuenca controlando todo el borde norte de la misma (ORTA, 2003).

## **CAPÍTULO V**

### **5. GEOLOGÍA LOCAL**

#### **5.1. SIERRA MAESTRA DE LA CIUDAD UNIVERSITARIA DE CARACAS**

ACERO Y DOMÍNGUEZ (2005), enmarcan la geología local dentro de los depósitos lacustres detectados en la Plaza Venezuela, en la zona Rental de la Universidad Central de Venezuela y los acuíferos contra las estrías de las colinas de la Ciudad Universitaria. Estos están constituidos por sedimentos finamente laminados, rítmicos-recurrentes, en dos facies litocromas de varvas lacustres: una más antigua con capas arcillosas de colores altamente ocre y café; otra con binomios de arcillas limosas grises y arenas finas o limos rojizos. En los lechos arcillosos analizados se ha detectado caolinita, illita, clorita e ilmenita (MUÑOZ & SINGER, 1977).

La sucesión de estos sedimentos varvados alcanza espesores de 6 a 15 metros. El tope y la base aparentes del material lacustre no parecen definir un horizonte continuo de sedimentación lacustre, sino más bien ambientes erráticos locales ubicados en sitios de confinamiento aluvial de los ríos Guaire y Valle. Estos depósitos de varvas se ocultan bajo mantos de arenas grises del holoceno reciente, atribuidas a terrazas de obturación fluvio-torrenciales de origen sísmico (SINGER, 1977). La sedimentación errática de horizontes de varvas, de probable edad Pre-Holoceno, se cree responde también a mecanismos de represamiento análogos, integrados en un complejo “sísmico-lacustre”.

ACERO Y DOMÍNGUEZ (2005) definen cinco unidades litológicas en la Ciudad Universitaria de Caracas representadas por: (a) Unidad de gravas, (b) Unidad de arenas, (c) Unidad de limos, (d) Unidad de arcillas y una unidad rocosa la cual está representada por las laderas del Jardín Botánico y de Sierra Maestra. De la unidad de arcillas mencionan que representa un 21% del área total de la Ciudad Universitaria y que se encuentra bordeando a la unidad de limos. El material presente en la zona, está caracterizado por arcillas de baja plasticidad y arcillas de

baja plasticidad arenosa. Este material fino se encuentra representado por coluviones, debido a que son materiales sueltos y heterogéneos, de suelos depositados por derrubios de gravedad formados por cantos de matriz arcillosa, ubicado en la zona de penillanura más próxima al pie del Jardín Botánico.

## **5.2. SECTOR LOMA DE LA GUADALUPE**

La Formación Tuy aflorante en la zona, se caracteriza por una intercalación constante y monótona de capas gruesas, generalmente de 1 a 3 metros de espesor de gravas heterogéneas y conglomerados líticos mal consolidados, con matriz limo arcillosa abundante y a veces con cemento calcáreo, intercaladas con arcillas, lutitas y cantidades menores de margas y areniscas. El tamaño de los guijarros es variable entre 1 a 50 cm, según la proximidad de la fuente de sedimentos. El escogimiento es de moderado a malo. Los cantos son redondeados y sub-redondeados de rocas metamórficas, algunos granos subangulares de rocas de color verde, más duras y menos esquistosas, y cantos grandes de cuarzo angular. Los cantos provienen de las formaciones Las Mercedes, Chuspita y Las Brisas hacia el norte de Suapire y Santa Lucía; Rocas de Conoropa, Formación Urape, conglomerado de Charallave, Formación Paracotos y Grupo Villa de Cura en el resto de la cuenca (PICARD & PIMENTEL, 1968).

SCREMIN (2014), en la zona de estudio identifica una secuencia de origen fluvio-lacusre principalmente, caracterizada hacia su base por una intercalación de arcillas calcáreas litificadas de color gris verdoso con intervalos blanquecinos y limos arcillosos color marrón grisáceo; sobre la cual se encuentran depósitos in situ de espesor variable entre 4 y 8 metros, de arcillas de alta plasticidad, con limos areno-arcillosos y arenas finas calcáreas con lentes de arenas de grano medio a grueso, suprayacidos por limos-arenosos y arenas muy fina limosas, calcárea y algo friable de color marrón con tonalidades blanquecinas y un espesor variable entre 2 y 4 metros.

## CAPÍTULO VI

### 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización geomecánica, mineralógico- elemental y de validación de dispositivo, realizados con las muestras identificadas como SM, LG, y BENT correspondientes a las localidades de estudio, Sierra Maestra de la Ciudad Universitaria de Caracas y Sector Lomas de la Guadalupe; y la muestra de Bentonita de Wyoming, respectivamente. Para esta última se utilizó, una bentonita comercial que viene suministrada en sacos de 25 kg, en forma de granulado, con un tamaño máximo de aproximadamente 2  $\mu\text{m}$ .

#### 6.1. DESCRIPCION VISUAL

Primeramente, se realizó una aproximación visual de las características texturales del material objeto de estudio. En la zona de Sierra Maestra de la Ciudad Universitaria de Caracas el material está caracterizado por arcilla limosa alta plasticidad, color marrón a rojizo y olor natural, con contenido carbonatico nulo (No reacciona al HCl) y materia orgánica ausente (No reacciona al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>); mientras que en el sector de Lomas de la Guadalupe se tiene una arcilla de alta plasticidad, color marrón ocre, olor natural y reactiva ante la presencia de HCl y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Tabla 6.1).

Tabla 6.1. Descripción visual de las muestras locales

Muestra	Descripción visual	Consistencia	Reacción al HCl	Reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
SM	Arcilla limosa de alta plasticidad, color marrón rojizo, olor natural	Media	-	-
LG	Arcilla de alta plasticidad, color marrón ocre, olor natural y presencia de raíces en posición	Media	+	+

La caracterización geomecánica es complementada con ensayos de laboratorio para establecer contenido de humedad natural, peso unitario,

gravedad específica, granulometría, límites de consistencia, ensayo de la mancha y expansión libre.

## 6.2. CARACTERIZACION GEOMECANICA

### 6.2.1. Humedad natural

La humedad natural del suelo depende de la capacidad de retención del agua entre los macro y micro poros del suelo. Este ensayo permitió determinar el porcentaje de humedad contenida en la muestra mediante la comparación del peso inicial y el peso final luego de ser sometida al proceso de secado indicado en el capítulo 2. Los resultados obtenidos del ensayo se muestran en la tabla 6.2.

Tabla 6.2. Contenido de humedad natural en las muestras estudiadas

Muestra	% humedad natural ( $\omega$ )
SM	10,25
LG	18,70
BENT*	7,60

\*Se realizó el cálculo de humedad a muestra de bentonita comercial procesada

### 6.2.2. Peso específico y Peso Unitario

Se realiza la cuantificación de estas propiedades elementales a cada una de las porciones de suelo estudiada (Tabla 6.3) ya que sirven de base para la determinación de otros parámetros de caracterización del material arcilloso como, % de coloides, % de expansión, índice de nocividad y superficie específica entre otros.

El peso específico se realizó para determinar la densidad de los granos que componen el suelo y es una medida adimensional. Debido a que los suelos están compuestos principalmente por silicatos, donde la magnitud de la gravedad específica generalmente varía entre 2,50 a 2,80; existe una tendencia a

que este valor sea menor en suelos arenosos debido a su alto contenido en cuarzo y mayor en los suelos de granos más finos, debido a que en estos se componen de minerales más pesados.

El ensayo de peso unitario se realizó para obtener el peso por unidad de volumen de las muestras de suelo (Tabla 6.3), es decir la densidad natural del mismo y es expresado en ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ). Este valor fue determinado a partir de las porciones cilíndricas del suelo natural, y permite hacer inferencias sobre el grado de compactación in situ, ya que a menor densidad menos compacto y viceversa.

Tabla 6.3. Peso específico o gravedad específica y peso unitario o densidad de las muestras extraídas

Muestra	Peso Específico (Gs)	Pesos unitarios ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	
		( $\gamma_w$ )	( $\gamma_s$ )
SM	2,71	1,84	1,67
LG	2,66	1,97	1,66
BENT	2,70	**	**

\*\*Muestra en forma de polvo

### 6.2.3. Granulometría por tamizado e hidrómetro

Se realizó la granulometría por tamizado de las muestras naturales a fin de cuantificar la proporción de los diferentes tamaños de partículas que componen la totalidad de cada una de las porciones de suelo estudiadas, obteniéndose un alto porcentaje de material granular fino pasante tamiz N°10 (2 mm).

Por consiguiente, motivado a que el presente estudio se enfoca en la características y evaluación del comportamiento del material granular como fracción fina, este fue pulverizado hasta obtener partículas pasantes por el tamiz N° 40 (0,420 mm).

El material pasante del tamiz N° 200, obtenidos en el tamizado, se evaluó por decantación mediante el ensayo hidrométrico, que, a su vez, permitió determinar el % de coloides presentes.

Los valores obtenidos se pueden observar en la tabla 6.4 mostrada a continuación:

Tabla 6.4. Proporción de agregados de partículas de acuerdo a ensayo granulométrico

Muestra	Grava (%)	Arena (%)			Finos (%)	
		Gruesa	Media	Fina	Totales	%C $\leq 2 \mu$
SM	0	0	6	13	81	33
SM*	0	0	0	1	99	44
LG	0	0	0	2	98	34
LG*	0	0	0	1	99	43
BENT*	0	0	0	1	99	55

(\*) Muestras pulverizadas

#### 6.2.4. Límites de Consistencia de Atterberg

La determinación de los límites de consistencia es uno de los ensayos más importantes a la hora de evaluar o trabajar con suelos cohesivos, debido a que son indicativos del potencial de hinchamiento o expansividad del material arcilloso que compone la porción de suelo. De tal forma, estos parámetros permiten determinar la variación de comportamiento de la fracción fina del suelo ante la presencia de agua y representan el contenido máximo de humedad admitido por el material para pasar de un estado plástico a líquido (Límite Líquido, LL) o de un estado semisólido a plástico (Límite Plástico, LP).

La tabla 6.5 muestra los resultados obtenidos al realizar los ensayos de consistencia a las muestras objeto de estudio.

Tabla 6.5. Límites de Consistencia correspondientes a cada muestra

Muestra	Límite Líquido (LL %)	Límite Plástico (LP %)	Índice de Plasticidad (IP)
SM	67	35	32
LG	80	37	43
BENT	608	51	557

### 6.2.5. Ensayo de la Mancha o Azul de Metileno

Este es un procedimiento de titulación química que permite cuantificar el Valor Azul (VA) de las muestras objeto de estudio, con el cual se calculan propiedades como la superficie específica e índice de nocividad.

En el ensayo de la mancha la mano del operador no tiene tanta significación como en el caso de los Límites de Atterberg.

La tabla 6.6 muestra los datos usados en este ensayo de la mancha y el valor obtenido del volumen de azul de metileno consumido por cada 100 g de cada muestra.

Tabla 6.6. Resultados obtenidos del ensayo con azul de metileno en las muestras

Muestra	Suelo Seco Ws (g)	% Coloides <0.002mm	Volumen Azul V (c.c)	Valor Azul Va (g/100g)
SM	9,65	44	20	2,07
LG	9,93	31	44	4,43
BENT	10,0	51	240	24

## 6.3. CARACTERIZACION MINERALÓGICA Y ELEMENTAL

La caracterización geoquímica de las muestras de arcillas seleccionadas, Sierra Maestra (SM), Lomas de la Guadalupe (LG) y la bentonita comercial (BENT), se realizó mediante las técnicas de Difracción de Rayos X,

Fluorescencia de Rayos X y Microscopia Electrónica de Barrido con los equipos y reactivos disponibles.

### 6.3.1. Análisis De Fluorescencia De Rayos-X

El ensayo de FRX permitió evaluar la composición química elemental de las muestras, mediante la determinación del porcentaje de óxidos de elementos mayoritarios ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{P}_2\text{O}_3$ ). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7. Composición química elemental de la arcilla in situ

Muestra	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_3$
SM	50,2	30,3	10,0	< 0,1	2,7	0,4	0,4	4,5	1,4	0,1
LG	58,1	18	11,6	0,069	5,3	3,8	0,5	0,9	1,2	0,3
BENT	50,942	14,092	2,927	0,009	3,170	4,289	3,299	0,301	0,223	0,219

### 6.3.2. Análisis de Difracción de Rayos X

Este ensayo permitió evaluar la composición mineralógica del material estudiado mediante la identificación de las facies mineralógicas presentes. La preparación de las muestras se realizó mediante el método del polvo. El DRX se basa en las interferencias ópticas generadas cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de espesor similar a la longitud de onda de la radiación X, ya que la difracción ocurre cuando el haz de rayos X incide sobre un cristal en forma especular, en el cual ocurre la dispersión de los rayos. A continuación, se muestran las facies minerales identificadas en cada una de las muestras (Tabla 6.8).

Tabla 6.8. Minerales identificados por DRX

MINERAL	FÓRMULA QUÍMICA	MUESTRAS		
		SM	LG	BENT
CUARZO	SiO <sub>2</sub>	X	X	X
ALBITA	Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )		X	X
MONTMORILLONITA SÓDICA	Na <sub>0.3</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O		X	X
MONTMORILLONITA SÓDICA-CÁLCICA	(Na,Ca) <sub>0.3</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O		X	X
BEIDELITA	Na <sub>0.3</sub> Al <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O		X	X
NONTRONITA	Na <sub>0.3</sub> (Fe <sup>+3</sup> ) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O		X	X
CAOLINITA	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	X	X	X
GOETHITA	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O		X	X
CALCITA	CaCO <sub>3</sub>		X	X
CARPHOSIDERITE	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>5</sub> (H <sub>2</sub> O)			X
PHOSPHOSIDERITE	Fe <sup>+3</sup> PO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O			X
MAGNESITA	MgCO <sub>3</sub>			X
MUSCOVITA	KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	X		
ILLITA	(K,H <sub>3</sub> O) Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	X		
TOSUDITA	(K,Ca) <sub>0.8</sub> Al <sub>6</sub> (Si,Al) <sub>8</sub> O <sub>20</sub> (OH) <sub>10</sub> ·4H <sub>2</sub> O	X		

### 6.3.3. Microscopia electrónica de barrido (MEB)

La MEB se utilizó para identificar los principales minerales arcillosos determinados con la DRX, basándose en la morfología de los granos que conformaban las muestras. Estos minerales son illita, esmectita (Figura 6.1, Figura 6.2). La caracterización de los minerales de la arcilla se ha realizado a partir del análisis químico puntual semicuantitativo, de manera que el criterio morfológico no fue determinante.

La illita, semicuantitativamente es la arcilla predominante en la muestra de Sierra Maestra (SM). Se identificó por presentar una morfología generalmente planar, aunque existen variedades de este mineral con morfología del tipo fibroso.

Por otra parte, la porción de suelo de La Guadalupe (LG) analizada en este estudio, presenta predominio semicuantitativo de la esmectita como arcilla, la cual suelen presentarse como escamas en agregados cristalinos irregulares más que en cristales aislados, estos suelen estar poco desarrollados, la morfología principalmente está dada por hábitos rómbicos, tabulares o fibrosos; se suelen encontrar dos texturas características tipo panal de miel y el tipo la cual es escamosa.

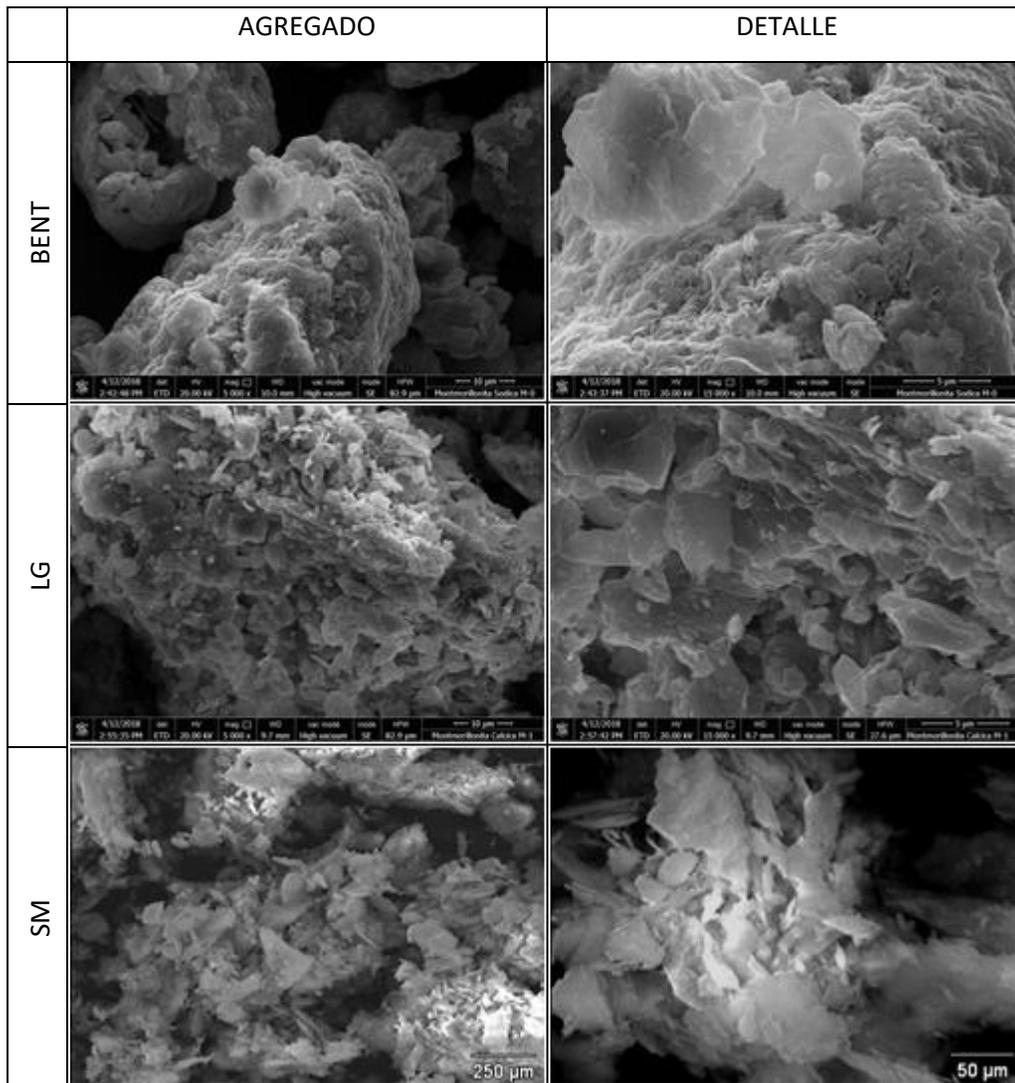


Figura 6.1. Micrografías de MEB en las muestras estudiadas

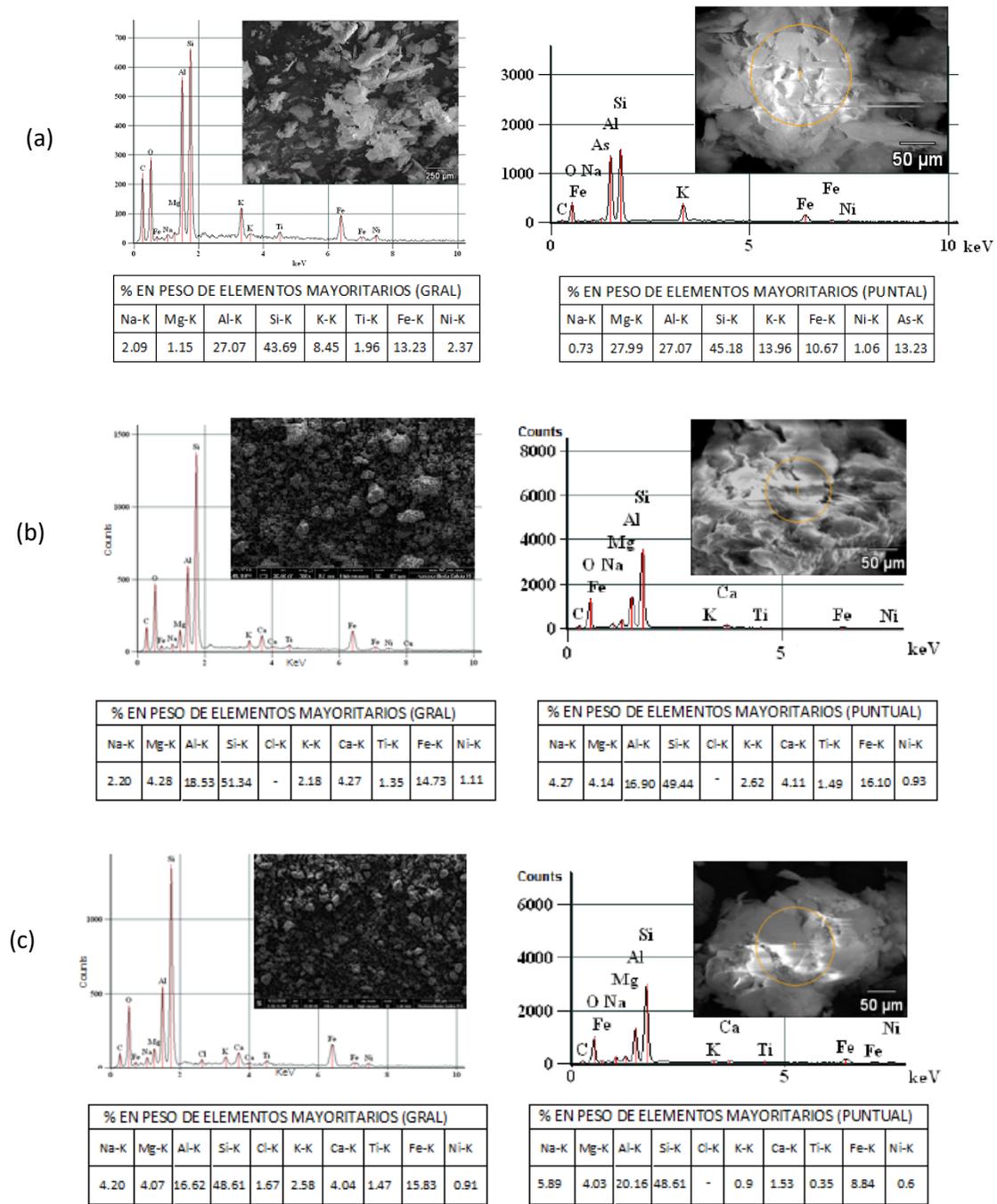


Figura 6.2. Difractogramas, Composición química elemental y morfología en la muestra a través del análisis (EDX) (a) de la Illita en muestra SM, (b) Esmeclita en muestra LG, (c) Esmeclita en muestra BENT

## 6.4. EVALUACION DE PROPIEDADES EXPANSIVAS MEDIANTE EQUIPO CONVENCIONAL Y EL 3D BOX.

### 6.4.1. Potencial de Expansión y Presión de Expansión con Edómetro

La fuerza de enlace entre las capas de sílice en las arcillas es tan débil que las moléculas de agua penetran entre estos planos, proceso que conlleva a la hidratación y expansión de las mismas.

El ensayo de expansión libre consiste en medir el aumento de volumen de un suelo arcilloso al ser saturado con agua, comparando el diferencial de altura inicial de la muestra y la altura final tomada al momento de estabilización de las lecturas del flexómetro, determinando así el % de expansión de las muestras ensayadas. Para ello se realizó la calibración de cada uno de los dispositivos edométricos utilizados a partir de las cuales se pudo hacer la corrección de las medidas tomadas por el flexómetro (Apéndice B).

Tomando en consideración el potencial de expansión de las muestras según el criterio basado en el Índice de Plasticidad (Tabla 6.9) se establecieron las densidades secas iniciales de cada material a ensayar de forma tal que a mayor potencial de expansión menos densidad seca inicial (Tabla 6.10).

Tabla 6.9. Potencial de expansión, según CHEN (1988). Tomado de DAS (2006)

Potencial de Expansión (PE)	Índice de Plasticidad (%)
Bajo	$IP \leq 15$
Medio	$10 \leq IP \leq 35$
Alto	$20 \leq IP \leq 55$
Muy Alto	$IP \geq 35$

Por otro lado, la presión de expansión se define como la presión que ejerce un suelo arcilloso sobre una superficie al hidratarse en condiciones de volumen constante.

Tradicionalmente se determina mediante la medición de la máxima presión vertical desarrollada por una muestra de arcilla al colocarse en una condición sumergida en el consolidómetro sin permitir su expansión, mediante un incremento progresivo de la carga vertical aplicada sobre la muestra. Para ello se realizó la calibración de cada uno de los dispositivos edométricos utilizados a partir de las cuales se pudo hacer la corrección de las medidas tomadas por el flexómetro (Apéndice B).

La siguiente tabla, resume los resultados obtenidos del ensayo de expansión libre con uso del edómetro, indicando % de expansión, densidad y humedad de cada porción de suelo. Así como también, muestra la variación de la presión de expansión respecto a la densidad seca de las muestras estudiadas con diferentes densidades:

Tabla 6.10. Resultados obtenidos de expansión libre y presión de expansión mediante el uso de Edómetro

Muestra	Humedad inicial (%)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )		% de Expansión	Presión de Expansión (kg/cm <sup>2</sup> )
		Inicial	Final		
E-SM1	4,52	1,69	1,30	18,20	4,60
E-SM2	4,49	1,79	1,43	29,10	6,18
E-SM3	3,61	1,72	1,35	23,00	5,75
E-SM4	3,23	1,67	1,35	16,40	4,25
E-SM5	4,27	1,59	1,33	16,00	3,29
E-SM6	4,90	1,46	1,32	10,40	1,60
E-SM7	4687	1,26	1,05	1,00	0,20
E-LG1*	7,54	1,58	1,32	8,70	1,60
E-LG2*	8,04	1,51	1,27	4,70	1,00
E-LG3*	6,07	1,66	1,55	28,50	3,00
E-LG4	7,84	1,38	1,37	3,80	0,50
E-LG5	6,90	1,61	1,58	12,50	2,50
E-BENT1	10,17	1,11	0,93	53,40	2,10
E-BENT2	13,92	0,96	0,80	13,30	0,85

\*Datos tomados de resultados obtenidos por SCREMIN (2014)

Para fines de análisis de resultados para las muestras de Lomas de la Guadalupe se complementó la información obtenida en este trabajo con los

datos mostrados por SCREMIN (2014). Así mismo, para la bentonita comercial, los datos fueron complementados con información tomada del estudio realizado por DIXON et al. (1996).

#### 6.4.2. Presión de Expansión con el dispositivo 3D BOX

Para realizar el monitoreo de la presión de expansión mediante el dispositivo de medición 3D BOX se seleccionó una densidad de referencia para cada material, en función a la cual se realizó la conformación de dos probetas por cada densidad seleccionada obteniendo un total de seis (6) muestras para ser ensayadas. Cabe destacar que las probetas fueron compactadas manteniendo el contenido de humedad similar al utilizado en la conformación de las pastillas del ensayo edométrico, tal como se puede apreciar en la tabla 6.11:

Tabla 6.11. Presión de expansión obtenida mediante dispositivo 3D BOX

Localidad	Densidad húmeda de referencia (g/cm <sup>3</sup> )	Muestra	% Humedad	Densidad húmeda obtenida (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Presión Lateral (kg/cm <sup>2</sup> )	Presión Vertical (kg/cm <sup>2</sup> )
SM	1,6	D-SM1	4,40	1,61	1,55	2,00	1,41
		D-SM2	3,25	1,64	1,59	2,64	2,04
LG	1,4	D-LG1	6,90	1,45	1,36	0,43	0,31
		D-LG2	8,06	1,40	1,33	0,32	0,24
BENT	1,0	D-BENT1	11,98	1,09	0,98	0,78	0,55
		D-BENT2	12,28	0,99	0,88	0,53	0,27

Según PATRONE & PREFUMO (2005), 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 1,75 g/cm<sup>3</sup> generalmente exhiben altos potenciales de expansión). 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).

Tomando en consideración lo anteriormente expuesto se escogieron densidades de referencia de valores medios para las muestras de Sierra Maestra y La Guadalupe, cuyo potencial de expansión es medio y alto respectivamente de acuerdo a la tabla 6.9; mientras que la para la bentonita comercial se usó una densidad baja ya que su potencial expansivo es muy alto.

Tales premisas permitieron optimizar el tiempo de ejecución de los ensayos de validación y garantizar que los resultados obtenidos no superen el máximo de medición y tolerancia de los sensores de esfuerzo total que componen el equipo 3D BOX.

Una vez concluido el ensayo se procedió a calcular las humedades de las probetas, tomando muestras a cada centímetro desde el tope hasta la base para verificar el grado de saturación de la muestra (Tabla 6.12).

Tabla 6.12. Humedades de probetas ensayadas en dispositivo 3D BOX

Muestra/ Profundidad (cm)	%Humedad					% Humedad Promedio
	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	
D-SM1	30,13	30,15	30,43	31,52	33,16	31,08
D-SM2	31,57	31,82	32,31	35,12	36,09	33,38
D-LG1	32,40	33,30	33,38	35,80	38,58	35,37
D-LG2	34,07	33,76	33,74	33,18	36,97	34,35
D-BENT1	32,64	42,72	49,61	52,49	71,19	49,73
D-BENT2	31,1	40,64	49,77	62,52	75,80	51,98

#### 6.4.3. Protocolo de adquisición de datos del dispositivo 3D BOX

A fin de que el funcionamiento del dispositivo 3D BOX requiera de una intervención mínima de personal, se emplea un sistema de adquisición automatizada de los registros de esfuerzos producidos durante hidratación de la muestra de suelo.

Dicho sistema es sumamente sencillo, ya que no se requieren procesos de control y consiste en el registro continuo de la presión de expansión hasta la completa estabilización en el tiempo de esta variable, momento en el que se considera terminado el ensayo.

Se compone de dos sensores de esfuerzo total o captorees marca *Kyowa* de capacidad nominal 1.5 MPa, los cuales por estar llenos de mercurio se deforman muy poco y permiten mantener la condición de presión constante; además cuenta con una fuente de alimentación la cual permite suministrar el voltaje de entrada a los captorees de presión, un computador dotado de una tarjeta de adquisición de datos *National Instrument* y un software (en este caso se hizo uso el Labview 2010) para el ordenamiento de los datos en la memoria del computador para su posterior procesamiento.

En general, según MARCIAL & LANDAETA (2008) los elementos básicos para el programa son (Figura 6.13):

- Un bloque de configuración de las entradas analógicas a ser utilizadas: número de datos a ser adquiridos, frecuencia de muestreo, canales de entrada y dispositivo.
- Bloques de lectura donde se extraen los datos previos y los adquiridos por cada uno de los canales. En este caso el dispositivo tiene dos canales de entrada correspondiente a cada sensor de esfuerzo total.
- Procesamiento de los datos en términos del filtraje, ajuste de cero y conversión de voltaje a las unidades correspondientes a las variables medidas (kg/cm<sup>2</sup>).
- Definición de intervalos de tiempo para registro de datos.
- Finalmente se debe proceder a presentar en pantalla los datos de interés y su almacenamiento en el disco bien sea extraíble o permanente.

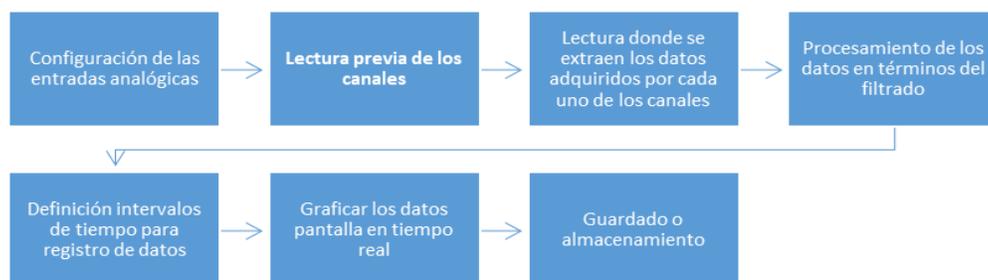


Figura 6.3. Configuración general del Sistema de Adquisición de datos

En la Figura 6.4 se muestra la interfaz obtenida del programa de adquisición desarrollado.

Este programa se debe operar de la siguiente manera:

- Primeramente, se debe colocar el nombre del archivo de registro de datos, los cuales serán almacenados en la unidad C del ordenador.
- Se define el intervalo de tiempo en minutos para la toma de datos, a ser colocado en el recuadro de entrada “Tiempo”.
- Se toman los valores mostrados en los recuadros de cada canal identificados como “Ceros” y se copian en los recuadros de cada canal identificados como “Voltaje”, a fin de garantizar continuidad de registros de medición en caso de algún tipo de falla en la energía eléctrica.
- Una vez realizado el montaje de la muestra y puesto en marcha el sistema de hidratación, se oprime el botón 
- Se coloca en ON en botón de registro. En caso de querer detener el ensayo se pulsa el botón “Stop”
- En caso de querer realizar un registro adicional a los correspondientes al intervalo de tiempo establecido se oprime el botón “Guardar”
- Finalmente, esto genera un registro de datos en formato “.txt” que luego será procesado para obtener la evolución de la presión de expansión durante todo el ensayo.

De tal forma, la configuración experimental de laboratorio para determinar la presión de hinchamiento mediante este dispositivo, tiende a estar compuesta básicamente por un marco de reacción, una celda de edómetro y una celda de carga que permite el monitoreo continuo de los cambios de presión de hinchamiento durante cambios de humedad. Esto, por supuesto, viene de un completo sistema de adquisición de datos que permite evaluar cambios de esfuerzos (verticales y laterales) con un mínimo de supervisión humana.

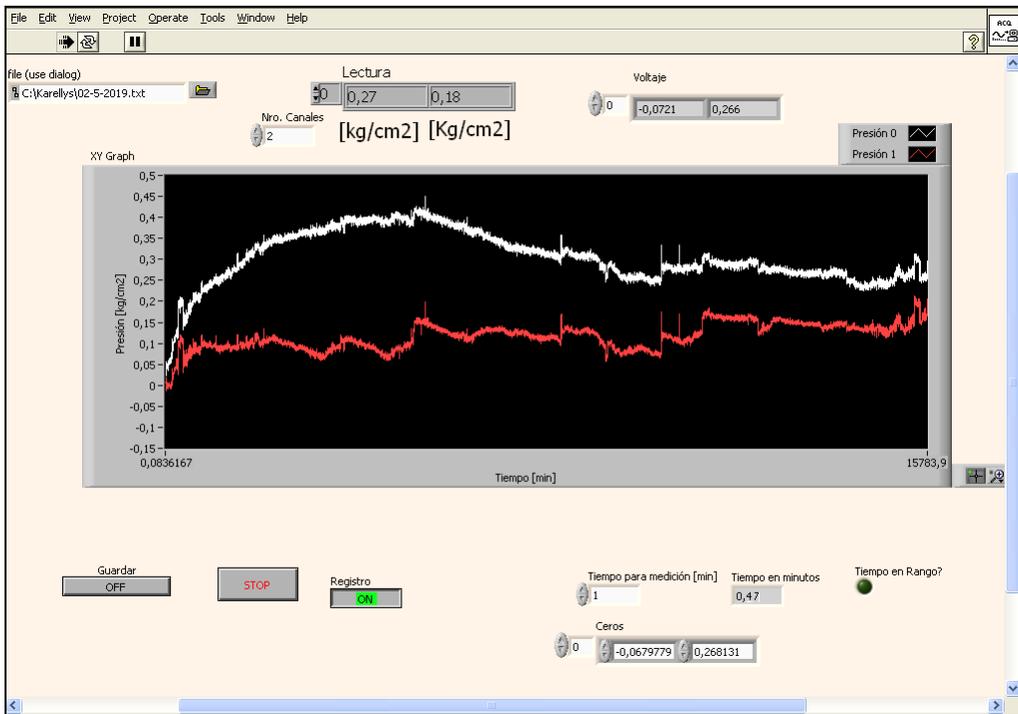


Figura 6.4. Interfaz de programa de adquisición de datos mediante el uso del software Labview

## **CAPÍTULO VII**

### **7. DISCUSIÓN E INTERPRETACION DE RESULTADOS**

Con los resultados de los ensayos a nivel geomecánico, mineralógico y de química elemental realizados tanto en el sedimento in situ como en el pulverizado, se procedió al procesamiento de los datos con el fin de caracterizar cada una de las muestras, para luego hacer énfasis en la interpretación de resultados obtenidos de la medición de presión de expansión con el dispositivo de uso convencional en ensayos de laboratorios de suelo, edómetro, y los obtenidos mediante el uso del nuevo dispositivo fabricado en el IMME, 3D BOX. En esta fase se compararon los resultados de las arcillas locales, Sierra Maestra (SM) y La Guadalupe (LG), obtenidos en ambos dispositivos y los obtenidos para arcilla de uso comercial, Bentonita Canadiense explotada en Wyoming (BENT), con propiedades ampliamente estudiada, con la finalidad de validar los datos registrados por el nuevo equipo de medición con uso de avances tecnológicos.

#### **7.1. CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA Y MINERALOGICA-ELEMENTAL**

La evaluación y definición de los parámetros geomecánicos, mineralogía principal y composición elemental, se realizó mediante un conjunto de ensayos físicos y análisis químicos básicos sobre las muestras de suelo.

##### **7.1.1. Caracterización Geomecánica**

Los parámetros obtenidos mediante la clasificación visual, % de humedad, análisis granulométrico y límites de consistencia permitieron clasificar el sedimento según el USCS.

De tal forma, la muestra extraída de Sierra Maestra se trata de limos inorgánicos (MH), color marrón claro amarillento, de alta plasticidad y compresibilidad. Mientras que la porción de Lomas de la Guadalupe se puede

clasificar como una arcilla inorgánica (CH), color marrón claro a gris verdoso, de alta plasticidad y compresibilidad, con cantidades menores de materia orgánica (Figura 7.1). Ambas con valores de gravedad específica propia de suelos granulares inorgánico, superior a 2,65. Sin embargo en cuanto a sus condiciones in situ, de acuerdo al peso unitario determinado para cada una, el material de LG se encontraba ligeramente más compacto en condiciones naturales que el de SM.

En general, en cuanto a la distribución granulométrica por tamizado, las muestras, tanto imperturbadas como las pulverizadas, arrojaron que más del 90% de sus granos son pasante tamiz #200, lo que corresponde a sedimentos finos tipo limos y arcillas. Así mismo, mediante el ensayo de sedimentación, se puede observar que, dentro de la totalidad de las partículas finas de las muestras, la material in situ contiene un promedio de 33% de coloides, mientras que para el material pulverizado dicha fracción coloidal superara el 43%, lo que indica que el pulverizado del material in situ permitió aumentar 10 puntos porcentuales en el contenido de coloides. Debido a que la relación área/masa extremadamente grande de este tipo de partículas favorece la plasticidad del material se procedió a evaluar las propiedades geomecánicas y químicas de SM y LG bajo dichas condiciones obtenidas. En cuanto a la bentonita comercial, se obtuvo un 55% de contenido de coloides, que por ser excelentes adsorbentes le confieren alta actividad expansiva a esta arcilla de referencia internacional.

El límite líquido también representa un parámetro importante a la hora de evaluar el comportamiento de una fracción arcillosa, pues no solo representa el contenido de humedad límite para que el material pase de estado plástico a semilíquido, sino que también constituye la medida de resistencia al corte del suelo a un determinado contenido de humedad. De tal forma, las arcillas locales presentaron límites líquidos altos, con valores que van desde 67%, para Sierra Maestra, y 80%, para Lomas de la Guadalupe. Mientras que para la bentonita comercial se obtuvo un valor de 608%.

A continuación, se muestra una gráfica en la que se relaciona el Índice de Plasticidad (IP) vs el Límite Líquido (LL) de las muestras locales. Esta gráfica es conocida como la Carta de Plasticidad para el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos propuesto por A. Casagrande en 1942. En esta carta se

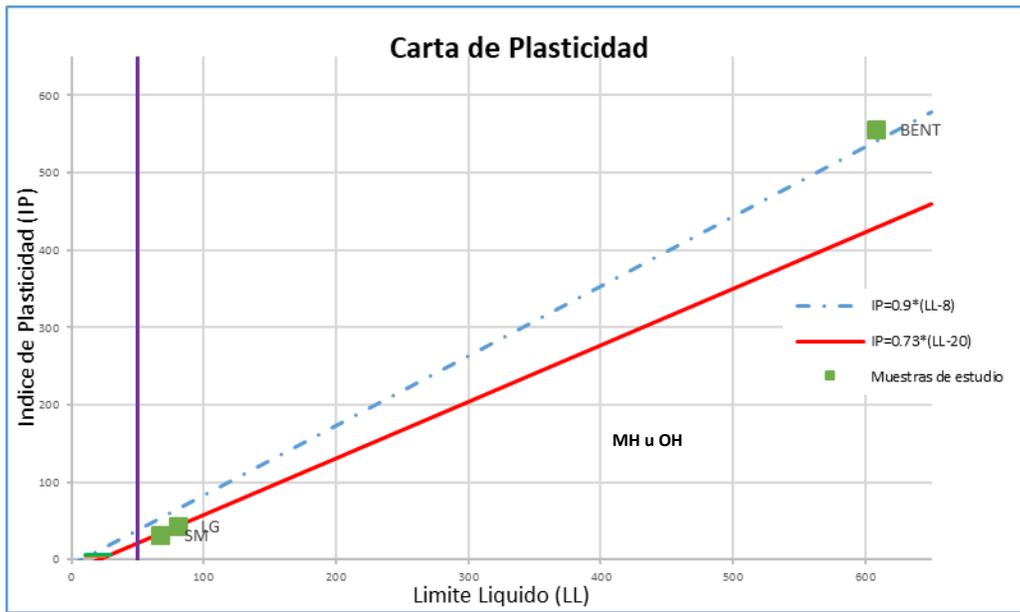


Figura 7.1. Gráfico de plasticidad para clasificaciond e muestra locales

Posteriormente, con el ensayo de a mancha o azul de metileno se obtuvo información complementaria para el cálculo de algunos parámetros de las arcillas asociados a los coloides (Tabla 7.1) como la superficie específica, índice de nocividad y la actividad coloidal.

Tabla 7.1. Parámetro de las arcillas de coloides para muestras caracterizadas

Muestra	% Coloides <0.002mm	Volumen Azul V (c.c)	Valor Azul Va (g/100g)	Índice de Plasticidad (IP)	Actividad Coloidal	Índice de Nocividad	Superficie específica (m <sup>2</sup> /g)
SM	44	20	2,07	31,99	0,98	4,70	115,38
LG	43	44	4,43	43,45	1,27	14,29	348,29
BENT	55	240	24	557,11	10,54	47,06	1151,05

La superficie específica puede ser utilizada para determinar el tipo de mineral que domina en la muestra. Por su parte, el índice de nocividad y la actividad coloidal son utilizados para evaluar el comportamiento de los coloides ante la presencia de agua, sin embargo, el primero utiliza los límites de consistencia y el segundo utiliza el volumen de azul de metileno consumido por cada 100g de muestra.

Así pues, en función al valor azul obtenido y el contenido coloidal la superficie específica de 115 m<sup>2</sup>/gr definida para SM sugieren que está conformada por una mezcla de minerales de arcilla tipo illita/vermiculita. Por su parte, la porción de suelo de LG con 348 m<sup>2</sup>/g muestra un predominio de montmorillonitas, principalmente cálcicas-ferrosas cuyos valores de referencia varían de 300 a 450 m<sup>2</sup>/g, mientras las montmorillonitas sódicas superan los 700 m<sup>2</sup>/g, caso de la bentonita comercial.

De tal forma, la superficie específica de las esmectitas es enorme. La primaria (excluyendo las zonas interlaminares) oscila entre 50 y 120 m<sup>2</sup>/g mientras que la secundaria (aquella expuesta cuando la estructura se expande y el agua puede penetrar en la región interlaminares) puede alcanzar valores de hasta 840 m<sup>2</sup>/g.

Adicionalmente, las tablas 7.2 y 7.3 sirvieron de base para calificar según el índice de nocividad y la actividad coloidal cada una las muestras ensayadas, resultando SM normal (AC) o ligeramente activa (IN); LG activa (AC) o con coloides nocivos (IN); y la bentonita comercial activa (AC) o con coloides muy nocivos (IN), tal como ha sido estudiado en la caracterización de múltiples estudios previos.

Tabla 7.2. Tabla de actividad coloidal según SKEMPTON (1953)

<b>CLASIFICACION DE LAS ARCILLAS DE ACUERDO A SU ACTIVIDAD (AC)</b>	
ARCILLA	RANGO (Ac)
INACTIVA	< 0.75
NORMAL	0.75 - 1.25
ACTIVA	> 1.25

Tabla 7.3. Tabla de índice de nocividad según BULLETIN DE LIASSONS DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSSES (CENTENO, 2013)

INDICE DE NOCIDIDAD (IN)	NOCIVIDIDAD
> 18	COLOIDES MUY NOCIVOS (SUELO EXTREMADAMENTE EXPANSIVO)
12 – 18	COLOIDES NOCIVOS (SUELO MUY EXPANSIVO)
8 – 12	COLOIDES MUY ACTIVOS (SUELO EXPANSIVO)
5 – 8	COLOIDES ACTIVOS (SUELO ALGO EXPANSIVO)
3 – 5	COLOIDES LIGERAMENTE ACTIVO (SUELO NO EXPANSIVO)
1 – 3	COLOIDES INACTIVOS (SUELO NO AFECTADO POR HUMEDAD)
< 1	SUELO NO ARCILLOSO (LIMO, ARENAS, GRAVAS O FINOS)

Al comparar las propiedades mencionadas anteriormente es posible inferir el que las muestras estudiadas tienen potencial expansivo. De tal forma, al ensayar arcillas con diferentes grados de actividad se puede evaluar la sensibilidad del nuevo dispositivo de medición de presión de expansión.

### 7.1.2. Caracterización Mineralógica-Elemental

Debido a que la naturaleza de la muestra cumple un rol fundamental en el potencial expansivo de la misma, se determinó la composición mineralógica y química elemental mediante la técnica de rayos X a fin de estimar el porcentaje de los minerales arcilloso (illita, caolinita y montmorillonita) presentes en las muestras. De esta forma se pudo observar cierta similitud en contenido mineral entre la LG y la bentonita comercial tal como lo es la presencia de montmorillonita (Tabla 7.4) en condición sódico-cálcica, combinadas con otras especies minerales como cuarzo, albita, nontronita, caolinita, goethita y calcita. En el caso de la montmorillonita y la nontronita, ambas pertenecen al grupo de las esmectitas. En contraste la SM mostró contenido de Illita como mineral del

grupo de las arcillas, cuya susceptibilidad volumétrica tienden a ser de menor magnitud, conjuntamente con otros minerales inertes (cuarzo, caolinita, moscovita).

Con fines de estimar la proporción de cada mineral identificado dentro de las muestras, se realizó una semicuantificación de componentes mayoritarios mediante el método de MARTIN-POZAS *et al.* (1969) donde dependiendo de la reflexión del mineral se le da una constante (poder reflectante). Finalmente, la relación porcentual entre estos minerales se calcula según las siguientes ecuaciones:

$$M = \frac{I}{PR}; \quad \%M = \frac{M}{\sum M} * 100$$

Tabla 7.4. Semi-cuantificación mineralógica por DRX

MUESTRA	MINERAL	REFLEXION (Å)	PICO (CTS)	PR	PICO/PR	RELACION (%)
SM	Cuarzo	3,4	334,16	6	55,69	23,18
	Illita/Moscovita	10	69,68	0,5	139,36	58,01
	Caolinita	7	45,175	1	45,18	18,81
LG	Cuarzo	3,4	677,68	6	112,95	39,61
	Albita	3,2	178,48	2	89,24	31,29
	Esmectitas	14,8	86	2	43,00	15,08
	Caolinita	7	39,99	1	39,99	14,02
BENT	Cuarzo	3,4	138,49	6	23,08	5,20
	Albita	3,2	29,51	2	14,76	3,33
	Esmectitas	14,8	471,51	2	235,76	53,14
	Caolinita	7	57,62	1	18,00	4,06
	Calcita	3,03	152,02	1	152,02	34,27

\*Los valores de Reflexión y PR fueron tomados de la calibración realizada en el estudio de POZAS ET AL., 1969. \*\*Para la calcita los valores de Reflexión y PR fueron tomados de la calibración realizada en el estudio de GALÁN & VIVALDI., 1974

De acuerdo a la semicuantificación mineralógica realizada (Tabla 7.4) se pudo estimar el contenido de fracción arcillosa en las muestras. Por tanto, SM está compuesta por un 76% de minerales de arcillas, identificadas como caolinita e illita/moscovita, donde la caolinita debido a su estructura T-O (1:1)

con cargas relativamente bien equilibradas y limitadas sustituciones isomorfas le confiere una capacidad de absorción de agua o cambio volumétrico bajo a nulo; por su parte la illita con una estructura T-O-T (2:1), tiene limitadas sustituciones isomorfas en la lámina de alúmina, pero puede haber algunas sustituciones de silicio por el aluminio, en la lámina de sílice, por lo que la compensación de la carga se efectúa por iones  $K^+$  haciendo que las capas unitarias de la illita se encuentran en posición más o menos rígida, sin que haya acceso a moléculas polares que puedan expandir estas capas o lo hagan en forma lenta. Los iones  $K^+$  situados entre capas unitarias no son cambiables, o son difícilmente cambiables, lo que le confiere cierta capacidad de absorción de agua o cambio volumétrico bajo.

Por otra parte, en LG la fracción arcillosa constituye el 29%, de los cuales el 15% corresponde a minerales de esmectitas con estructura dioctaédrica T-O-T, con enlaces débiles y cationes hidratados intercambiables que admiten con mayor facilidad cambios volumétricos.

En la naturaleza es relativamente raro encontrar estas especies minerales como fases estrictamente puras. Dado el tipo de estructura que presentan los filosilicatos, es muy habitual que se formen lo que se denominan interestratificados de filosilicatos, es decir paquetes de grosor variable formados por fragmentos de estructura asimilable a la de diversas micas y/o arcillas. Se trata en realidad de una mezcla de minerales y ello condiciona que las propiedades del conjunto sean mixtas y no la de las fases puras. Por ejemplo, es normal que la esmectita no se encuentre en forma pura, sino que en realidad sea un interestratificado de la fase illita con la fase esmectita. La expansividad del conjunto, es inferior a la que tendría si fuera una esmectita pura.

En los espectros de la composición química elemental característicos de dichas arcillas, se detectó la presencia de silicio (Si) como componente mayoritario, atribuido a las fases silicatadas. En la muestra SM, los cationes de aluminio (Al), hierro (Fe), potasio (K) y magnesio (Mg) mantienen una relación cuantitativa decreciente, fijando especial atención en los valores de aluminio

(Al) y potasio (K) ya que son los elementos principales en la estructura de la illita y moscovita, minerales mayoritarios en la composición de dicha muestra. En cuanto al material de LG se observó un aumento relativo en los valores de calcio (Ca) y disminución de aluminio (Al) y potasio (K), siendo la de este último bastante significativa, lo cual puede ser producto del intercambio catiónico en las esmectitas presentes en dicha muestra. De tal forma, la composición química sugiere que los sedimentos estudiados provienen de rocas de naturaleza silicatada alumínica en la que los elementos mayoritarios son: silicio, aluminio, hierro, magnesio, potasio y calcio.

Por otro lado, el análisis morfológico de los granos mediante la microscopía electrónica de barrido permitió identificar, aunque visiblemente alteradas la presencia de montmorillonitas en las muestras LG, e illita en SM, en concordancia con los resultados de difracción de RX. Esto se evidenció mediante el estudio de imágenes de alta resolución (Figura 7.2), que permitieron examinar con detalle la forma y disposición de los cristales para compararlos con las imágenes características recopiladas en los atlas de MEB de WELTON (2003).

De esta manera, se logró identificar la illita detrítica masiva, caracterizada por una forma de láminas puntiagudas; mientras que la presencia de esmectitas (nontronita, montmorillonita) o caolinita se observa, aunque un poco difusa. Resaltando la visualización de la esmectita, mediante láminas muy finas e irregulares, parcialmente dobladas, con tendencia a exhibir asociación borde a borde, de morfología escamosa tipo “corn flakes”. Esto se debe a que dichos minerales resultan de la transformación de materiales primarios, en este caso albita, los cuales van alterando su composición química de acuerdo con la secuencia de meteorización (Figura 7.3).

Según BEUTELSPACHER & VAN DER MAREL (1968), las especies de suelos no tienen una morfología característica y están mezcladas, a menudo, con cierta proporción de componentes amorfos, los cuales en las microfotografías electrónicas se ven como agregados de gránulos pequeños de apariencia suelta.

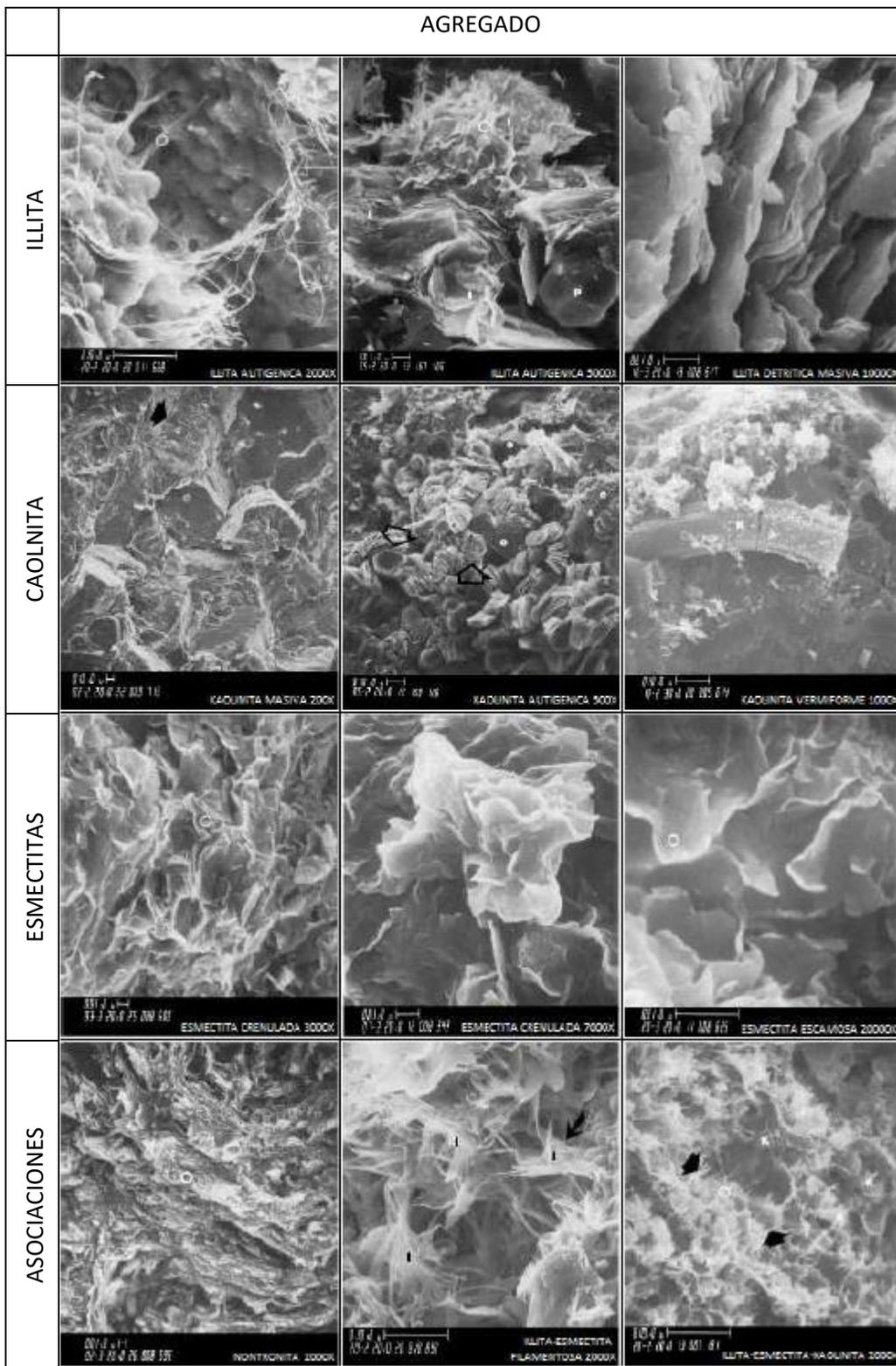


Figura 7.2. Micrográficas típicas de minerales de arcillas según Atlas de MEB de WELTON (2003)

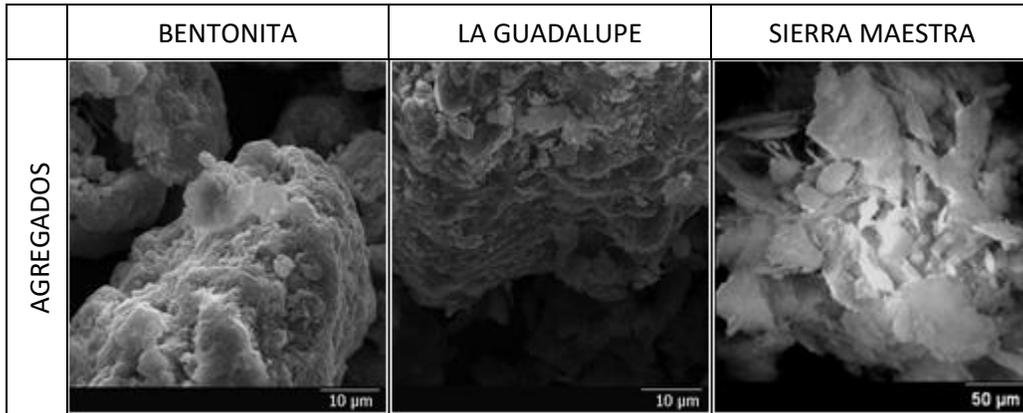


Figura 7.3. Micrografías minerales arcillosos de muestras ensayadas

De acuerdo a las condiciones de meteorización, la evolución de los feldespatos tomará un curso diferente. En la formación de illita y/o esmectitas a partir de feldespatos potásicos o plagioclasas respectivamente, los cationes liberados por meteorización juegan un papel muy especial por su significación como cationes de cambio o de entrecapas.

Según, PEDRO *et al.* (1969), la estabilidad de los constituyentes distingue dos categorías: minerales estables, arcillas 1:1, (tipo caolinita) y minerales 2:1 (tipo esmectitas), menos estables y transformables en períodos de tiempo relativamente breves. De esta forma, la morfología analizada, muestra cristales principalmente alterados que evidencian la inestabilidad estructural de los minerales presentes bajo las condiciones de meteorización físico-químicas predominantes en el ambiente de formación.

## **7.2. EVALUACION DE PROPIEDADES EXPANSIVAS MEDIANTE EQUIPO CONVENCIONAL Y EL 3D BOX.**

### **7.2.1. Análisis de potencial de expansión**

Tal como ha sido señalado en PATRONE & PREFUMO (2002) y otros autores, uno de los factores que intervienen en el fenómeno de la expansión en suelos arcillosos es la densidad del material y la humedad inicial del mismo al momento de ser expuesto al aumento de la humedad. De tal manera, al graficar

los datos de hinchamiento medido en cada una de las muestras locales (Figura 7.4), se evidencian ciertas relaciones entre los parámetros mencionados.

Al evaluar el comportamiento de las muestras ensayadas para el rango de valores bajos de densidad seca se observa una tendencia general a que la arcilla de Sierra Maestra arroja un hinchamiento mayor que las muestras de Lomas de la Guadalupe, cuya composición consta de arcillas de mayor actividad (esmectitas). Esta respuesta puede atribuirse al contenido de humedad inicial, cuyo valor es considerablemente menor en las muestras de Sierra Maestra y, por lo tanto, la variación del contenido de humedad en la estructura de la referida arcilla fue mayor ocasionando cambios volumétricos más considerables. Sin embargo, para el rango de valores altos de densidad seca, esta tendencia parece tender a revertirse a medida que se evaluaron muestras con densidad mayor, cercanas a  $1,7 \text{ g/cm}^3$ , donde la densidad es el parámetro que muestra mayor influencia sobre el desarrollo del hinchamiento ya que para valores de densidad cercanos a dicha referencia las muestras con humedades iniciales mayores mostraron mayor variación volumétrica.

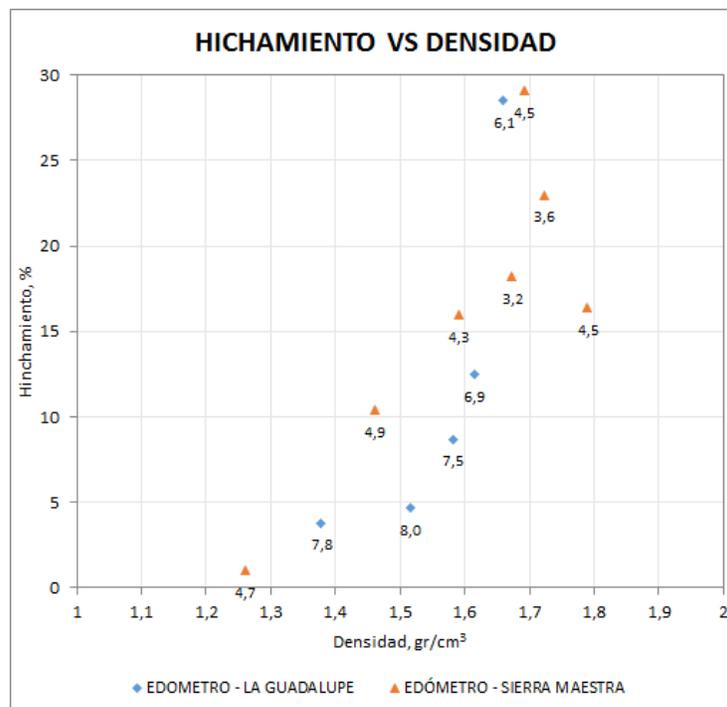


Figura 7.4. Gráfico Hinchamiento vs Densidad para las muestras locales SM y LG

## **7.2.2. Evaluación de la Presión de Expansión con dispositivo convencional y el 3D BOX**

### 7.2.2.1. Presión de expansión con edómetro

Tomando en cuenta la premisa del estudio de MARCIAL *et al* (2006) que indica que la compactación directa de las muestras en el anillo del edómetro introduce tensiones laterales residuales no deseables, que generan efectos de fricción que influyen significativamente en los resultados de las pruebas del edómetro, se buscó reducir este fenómeno al compactar en un molde rígido de diámetro ligeramente mayor al del anillo edométrico para luego ser tallado e introducido dentro de dicho elemento con una ligera presión (aproximadamente 25 kPa), asegurando, a su vez, el contacto entre las paredes anulares del edómetro y la muestra compactada, antes de comenzar con la hidratación.

El conjunto de ensayos realizados, resumidos en la tabla 6.10, para los tres tipos de materiales arcillosos (una de baja, otra de mediana y una última de alta actividad) compactados a diferentes densidades, y humedades muy bajas, permite estudiar de forma experimental e ilustrar la sensibilidad de la presión de expansión a los cambios de densidad.

En este orden de ideas, analizando el comportamiento de la curva de mejor ajuste a la distribución de valores obtenidos de las 7 muestras ensayadas de SM (Figura 7.5), se puede observar una tendencia de mayor correspondencia a medida que aumenta la densidad seca (superior a 1,6 g/cm<sup>3</sup>). Así mismo, tomando como referencia que el grado de asociación o coeficiente de correlación de Pearson muestra un valor superior a 0,9, se considera que los datos evaluados exponen una correlación positiva muy fuerte, por lo que queda ilustrada la sensibilidad de la presión de expansión ante las variaciones de densidad y por consiguiente a mayor densidad seca mayor presión de expansión.

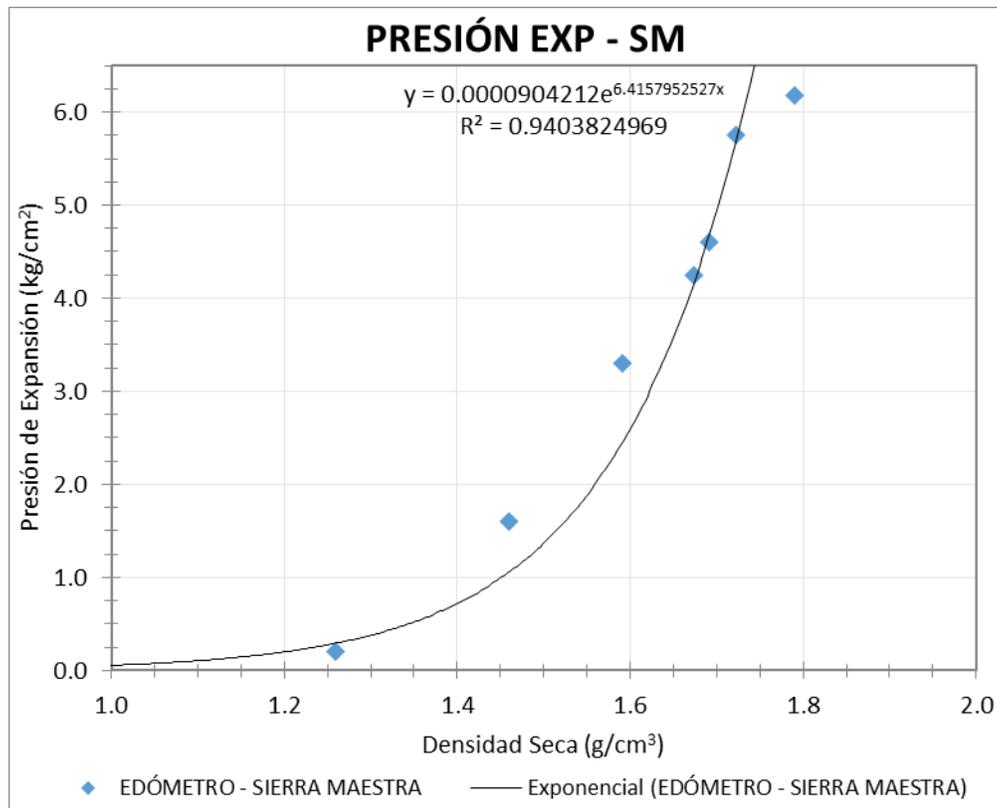


Figura 7.5. Gráfico de Presión de Expansión vs Densidad Seca para Sierra Maestra

Para evaluar la sensibilidad de los datos obtenidos mediante el edómetro, se tomó la ecuación de la curva de tendencia y se evaluaron los datos ("ρd T" y "P. EXP T") que se obtendrían al variar los valores de densidad seca (ρd) y presión de expansión obtenidos del ensayo realizado. En cuanto a la dependencia de la presión respecto a la densidad, existe una relación exponencial y por consiguiente pequeñas diferencias porcentuales en el valor de la densidad ≈1%, pueden ocasionar variaciones de ≈10% en la magnitud de la presión de expansión resultante (Tabla 7.5).

Tabla 7.5. Comparación entre parámetros experimentales y teóricos SM

MUESTRA	$\rho_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d T$ (gr/cm <sup>3</sup> )	DIF (%)	P.EXP (kg/cm <sup>2</sup> )	P. EXP T (kg/cm <sup>2</sup> )	DIF (%)
E-SM-1	1,692	1,689	0,18	4,603	4,686	1,78
E-SM-2	1,790	1,735	3,12	6,185	8,787	34,76
E-SM-3	1,723	1,724	0,06	5,753	5,717	0,63
E-SM-4	1,673	1,677	0,24	4,249	4,148	2,41
E-SM-5	1,591	1,637	2,85	3,294	2,451	29,35
E-SM-6	1,460	1,525	4,36	1,602	1,058	40,94
E-SM-7	1,260	1,202	4,71	0,202	0,293	36,81

$\rho_d$ : densidad seca experimental;  $\rho_d T$ : densidad seca teórica; P.EXP: presión de expansión experimental; P. EXP T: presión de expansión teórica.

En el mismo orden de ideas, la figura 7.6 agrupa los datos obtenidos en trabajo realizado por SCREMIN (2014) y los resultados de los dos ensayos de presión de expansión de LG realizados en la presente investigación.

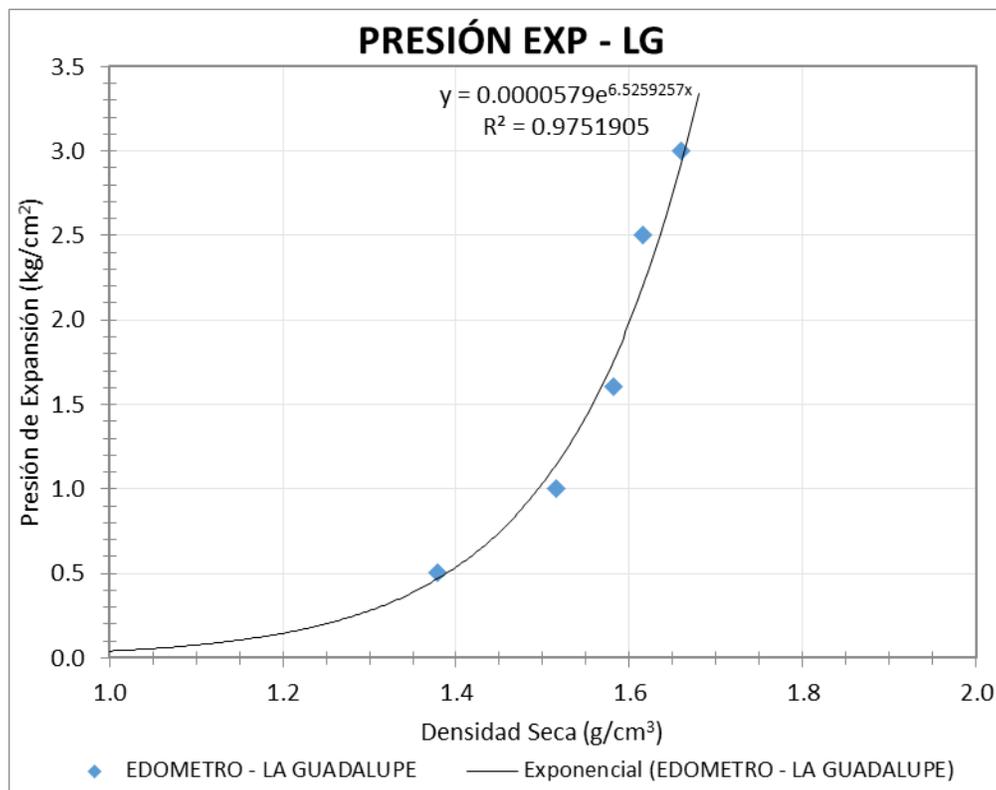


Figura 7.6. Gráfico de Presión de Expansión vs Densidad Seca para Lomas de La Guadalupe.

De tal forma, se puede observar que los datos evaluados exponen una correlación positiva muy fuerte ya que su grado de asociación o coeficiente de correlación de Pearson muestra un valor de 0,99, por lo que queda ilustrada la sensibilidad de la presión de expansión ante las variaciones de densidad y por consiguiente a mayor densidad seca mayor presión de expansión.

En lo que se refiere a la correlación entre la presión de expansión respecto a la densidad, al igual que para SM, los resultados de LG muestran que existe una relación exponencial entre ellos y por consiguiente pequeñas diferencias porcentuales en el valor de la densidad  $\approx 1\%$ , representan variaciones de hasta 10% en la magnitud porcentual de la presión de expansión resultante (Tabla 7.6).

Tabla 7.6. Comparación entre parámetros experimentales y teóricos de LG

MUESTRA	$\rho_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d T$ (gr/cm <sup>3</sup> )	DIF (%)	P.EXP (kg/cm <sup>2</sup> )	P. EXP T (kg/cm <sup>2</sup> )	DIF (%)
E-LG-1*	1,582	1,567	0,95	1,604	1,763	9,47
E-LG-2*	1,516	1,495	1,39	0,999	1,146	13,73
E-LG-3*	1,660	1,663	0,18	3,001	2,934	2,27
E-LG-4	1,378	1,389	0,80	0,502	0,466	7,49
E-LG-5	1,615	1,636	1,29	2,502	2,187	13,43

pd: densidad seca experimental; pd T: densidad seca teórica; P.EXP: presión de expansión experimental; P. EXP T: presión de expansión teórica. \*Datos referenciales de SCREMIN (2014).

La figura 7.7, permite comparar los resultados obtenidos por PUSCH (1982) y GRAY *et al* (1984) en los ensayos de presión de expansión realizados a muestras de la bentonita MX-80 (bentonita comercial) con los obtenidos en este estudio. Se observa que ambos trabajos muestran curvas de tendencia exponencial con correlación positiva fuerte (coeficiente  $R^2= 0,97$ ), sin embargo, las incompatibilidades mostradas entre estos dos autores son atribuidas a las diferencias dentro de los tamaños de las muestras y la rigidez de las configuraciones experimentales correspondientes (MARCIAL, 2003). Así mismo, queda ilustrado que los resultados obtenidos en este estudio para densidades secas efectivas alrededor de 1,0 g/cm<sup>3</sup> de la bentonita comercial se ajustan muy bien a la curva derivada del comportamiento obtenido por GRAY *et al* (1984).

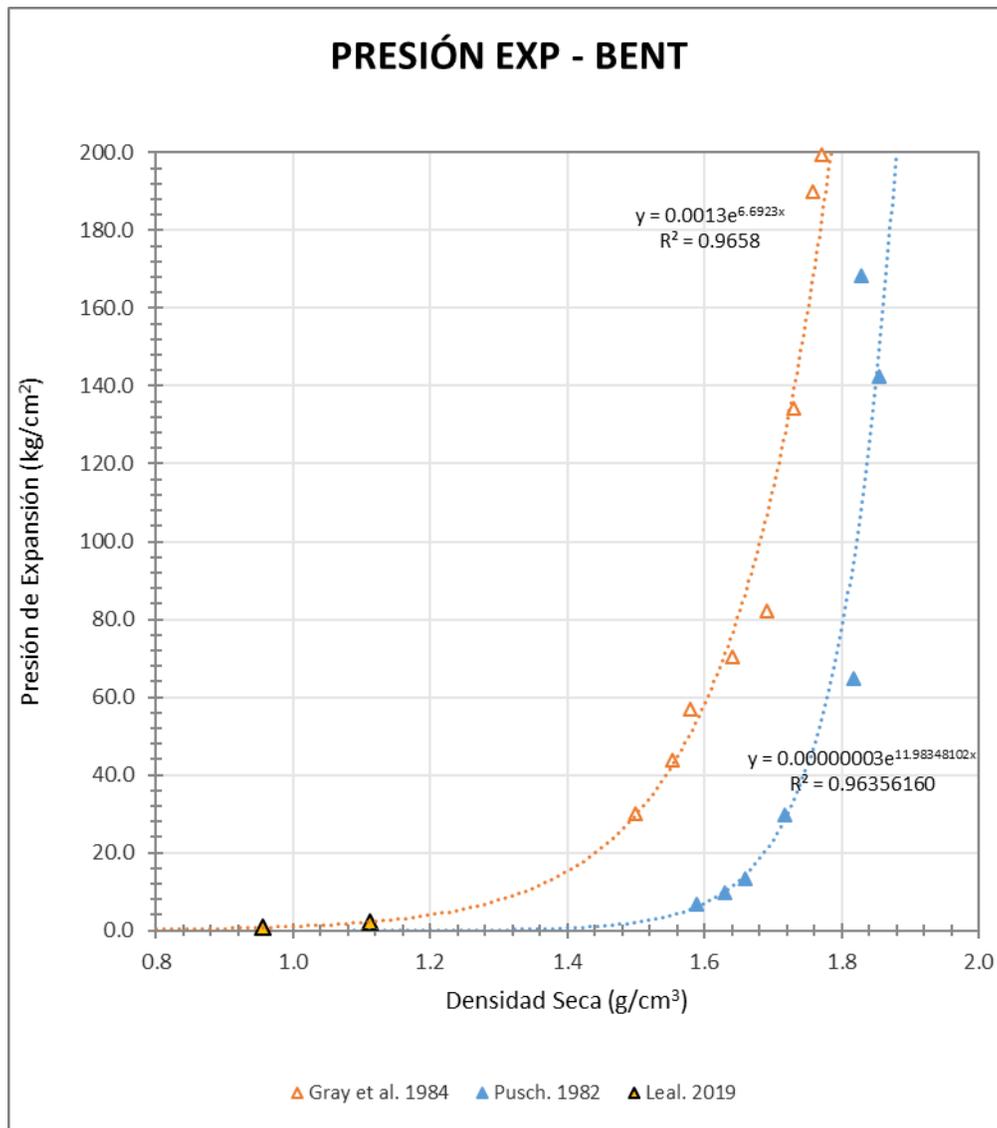


Figura 7.7. Gráfico de Presión de Expansión vs Densidad Seca para bentonita comercial

Respecto a la sensibilidad mostrada entre la presión de expansión y la densidad, debido al mejor ajuste de resultados que mostraron las dos muestras ensayadas, en este estudio, con respecto a los obtenidos por GRAY *et al* (1984), se realizó el análisis comparativo de dicha relación tomando en cuenta solo los datos mencionados. De esta manera, se puede observar que persiste la condición de que pequeñas diferencias porcentuales en el valor de la densidad pueden representar errores de hasta 10% en el valor de la presión de expansión

resultante por unidad porcentual de variación de densidad. Sin embargo, para las muestras ensayadas en este estudio el promedio de la variación porcentual de la presión de expansión se reduce casi a la mitad (Tabla 7.6). De tal forma queda evidenciada la alta influencia de la densidad en la presión de hinchamiento.

Tabla 7.7. Comparación entre parámetros experimentales y teóricos de BENT

MUESTRA	$\rho_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d T$ (gr/cm <sup>3</sup> )	DIF (%)	P.EXP (kg/cm <sup>2</sup> )	P. EXP T (kg/cm <sup>2</sup> )	DIF (%)
GRAY-BENT1	1,500	1,502	0,13	29,757	30,10	1,15
GRAY-BENT2	1,553	1,558	0,32	42,426	43,88	3,36
GRAY-BENT3	1,580	1,597	1,07	50,828	56,94	11,34
GRAY-BENT4	1,640	1,629	0,67	75,943	70,41	7,56
GRAY-BENT5	1,690	1,652	2,27	106,123	82,14	25,47
GRAY-BENT6	1,730	1,725	0,29	138,696	134,18	3,31
GRAY-BENT7	1,757	1,777	1,13	166,165	190,00	13,38
GRAY-BENT8	1,771	1,784	0,73	182,486	199,49	8,90
E-BENT-1	1,112	1,104	0,72	2,218	2,096	5,64
E-BENT-2	0,955	0,985	3,09	0,776	0,847	8,81

$\rho_d$ : densidad seca experimental;  $\rho_d T$ : densidad seca teórica; P.EXP: presión de expansión experimental; P. EXP T: presión de expansión teórica

### 7.2.2.2. Presión de Expansión con dispositivo 3D BOX

Terzaghi decía que la deformación o el movimiento lateral de un suelo blando, estaba impedida por la alternancia de estratos de suelo no deformables dentro de la masa de suelo. Este fundamento ha sido utilizado en el diseño de equipos edométricos para la medición de la expansión en suelos arcillosos mediante una muestra confinada lateralmente, donde, partiendo de una condición inicial particular en términos de contenido de humedad y densidad seca, si el material se satura a volumen constante y su deformación es impedida, las partículas ejercerán una presión sobre la estructura confinante que se denomina presión de expansión (MARCIAL & LANDAETA, 2008).

Por su parte, el equipo 3D BOX considera tener una condición de volumen constante real, debido al control de presión vertical, con lo cual la respuesta de la muestra en términos de esfuerzos estaría condicionada por su historial de trayectoria de presión (compactación + desmontaje + hidratación de volumen constante). Así mismo, la muestra busca tener una geometría isométrica con altura  $h = 5$  cm, ya que la influencia de las configuraciones experimentales se vuelve menos importante a medida que aumenta la altura de los especímenes.

Para comprobar el funcionamiento de este nuevo dispositivo de medición se realizaron una serie de pruebas (Figuras 7.8, 7.9 y 7.10), que consistieron en el monitoreo de la presión de expansión desarrollada por dos especímenes de cada muestra a estudiar (SM, LG y BENT). Cada uno de ellos con condiciones iniciales de humedad baja y densidades secas efectivas determinadas (en función de los datos obtenidos mediante el edómetro) para no sobrepasar el máximo de medición de los sensores de esfuerzo total del dispositivo (SM y LG inferior a  $1,8 \text{ g/cm}^3$  (tomando  $1,6$  y  $1,4 \text{ g/cm}^3$  para SM y LG respectivamente); BENT inferior a  $1,3 \text{ g/cm}^3$ ). Estos datos fueron almacenados de forma continua mediante el programa de adquisición de datos que resulta del mejoramiento del algoritmo propuesto por MARCIAL & LANDAETA (2008).

Tal como se indicó en capítulo 2, correspondiente al marco metodológico, la compactación de las muestras se realizó estáticamente en una prensa a una velocidad de  $4 \text{ mm/min}$  hasta obtener la densidad deseada, de  $1,6 \text{ g/cm}^3$ ,  $1,3 \text{ g/cm}^3$  y  $1,0 \text{ g/cm}^3$  para las muestras de Sierra Maestra, Lomas de la Guadalupe y la bentonita comercial respectivamente. Aunque se fijó el esfuerzo de compactación durante la preparación de la primera de cada pareja de muestras, se observó una diferencia en términos de densidad entre estas dos pruebas de cada tipo de material. En la tabla 7.8 se muestran los parámetros de preparación de las probetas ensayadas.

Tabla 7.8. Parámetros utilizados en preparación de probetas ensayadas

MUESTRA	Esfuerzo vertical aplicado (kg)	Humedad inicial (%)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )
D-SM-1	3342	4,4	1,55
D-SM-2	3400	3,3	1,59
D-LG-1	272	6,9	1,36
D-LG-2	269	8,1	1,30
D-BENT-1	112	12,0	0,98
D-BENT-2	93	12,3	0,88

La primera prueba fue realizada sobre dos ejemplares de SM (Figura 7.8), cuyos registros muestran un valor máximo de  $\sigma_v$  y  $\sigma_h$  posterior al cual se estabiliza la curva. Para SM-1, el incremento de las presiones tanto vertical como lateral tienen tendencia escalonada progresiva, resaltando que para  $t=6000$  min, la curva muestra la inflexión en  $\sigma_v=1,77$  kg/cm<sup>2</sup> y  $\sigma_h=1,10$  kg/cm<sup>2</sup> que marca el inicio de la estabilización de la curva hasta que llega a alcanzar el máximo de  $\sigma_v= 2,00$  kg/cm<sup>2</sup> en  $t=19000$  min y  $\sigma_h= 1,10$  kg/cm<sup>2</sup> en  $t=17000$  min. Sin embargo, para SM-2 el patrón escalonado no se observó; en contraste a la otra muestra, se registra un ascenso muy rápido hasta  $t= 1350$  min con  $\sigma_v= 2,37$  kg/cm<sup>2</sup> y  $\sigma_h= 1,78$  kg/cm<sup>2</sup>, posterior al cual la tasa de incremento disminuye hasta que la muestra alcanza su valor máximo de expansión ( $\sigma_v= 2,64$  kg/cm<sup>2</sup> y  $\sigma_h= 2,04$  kg/cm<sup>2</sup>) y luego se estabilizan alrededor de  $t= 20000$  min.

Este comportamiento corresponde al hecho de que la porosidad en las arcillas disminuye al aumentar la densidad del material y la humedad, lo cual sumado a la baja permeabilidad facilitan el desarrollo de altas presiones en los materiales. Por lo tanto, al compactar las muestras a una densidad seca alta (superior a 1,5 g/cm<sup>3</sup>), la proporción de macroporos es menor por lo que la reorganización de los componentes en las arcillas se realiza de forma progresiva. Adicionalmente, para humedades bajas, como las de estas muestras, predomina el mecanismo de adsorción, que es función de la superficie específica, y que tiene lugar en los microporos, presentándose de esta forma una

cinética de hidratación progresiva con una tasa de crecimiento rápido al inicio de la saturación y por consiguiente la deformación inicial del sistema es acentuada.

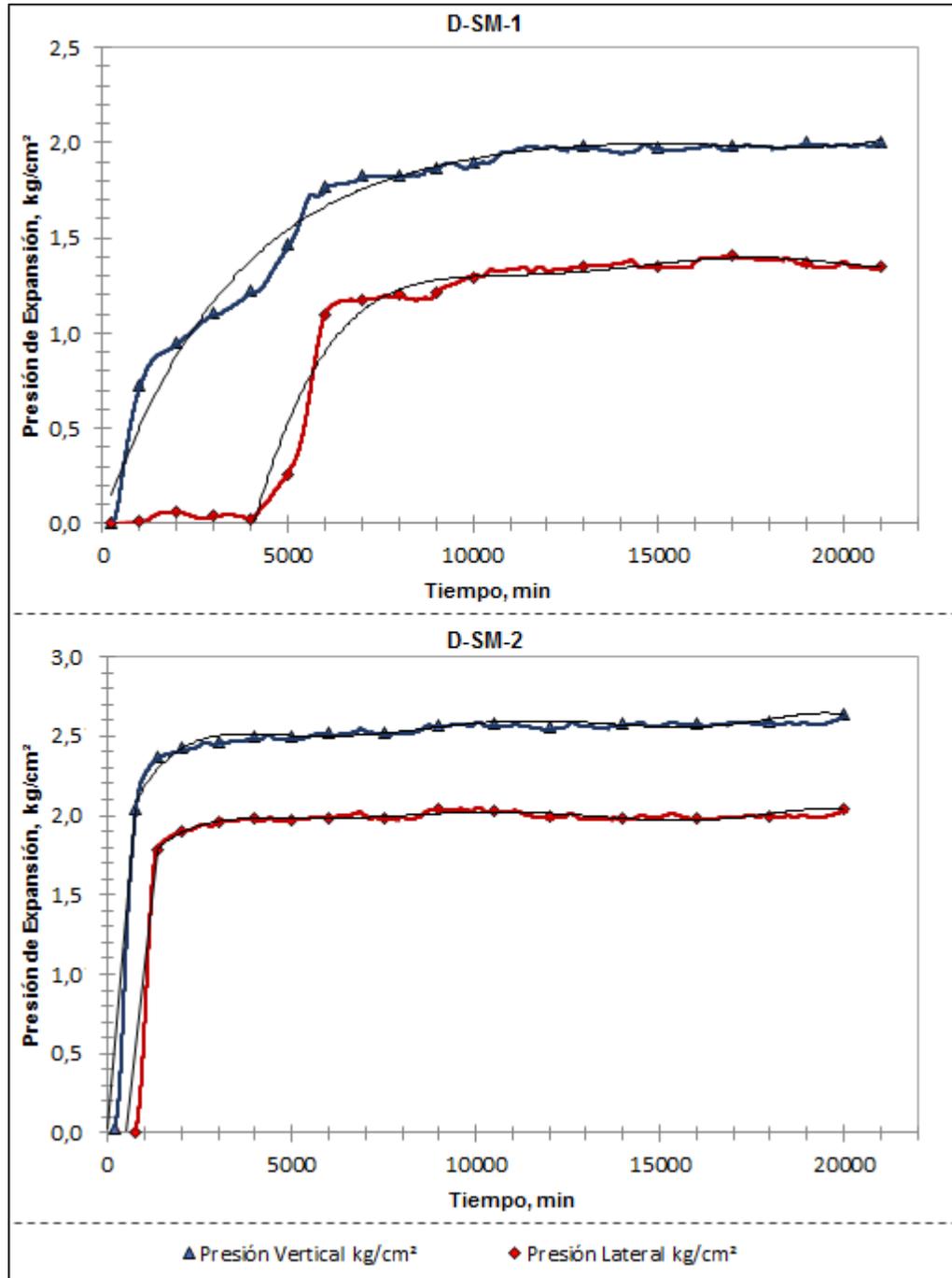


Figura 7.8. Cambios de presión de expansión con especímenes de SM hidratados con fase líquida.  $\rho_d(\text{SM-1}) = 1,55 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ;  $\rho_d(\text{SM-2}) = 1,59 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

MARCIAL *et al.* (2003) estudio los cambios de  $k_o$  en el tiempo, observando que inicialmente aumenta rápidamente, luego disminuye y se estabiliza, donde el pico se debe a la deformación inicial del sistema de confinamiento y al estabilizarse sus cambios mantienen la misma tendencia que las variaciones de  $\sigma_h$ . Cuando se hidrata por fase líquida, el suelo se hincha muy rápido en comparación con la respuesta del sistema que es relativamente lenta.

Cabe destacar que el desfase de la respuesta de  $\sigma_h$  en SM-1, puede estar relacionado con las dimensiones de la muestra en la dirección de medición de la presión lateral, ya que si el moldeado realizado a la muestra para ser introducida en el dispositivo cubico fue excesivo, al hidratar el material este inicia su hinchamiento el cual solo será registrado por los sensores al hacer contacto con la pared del equipo.

Por otro lado, tal como se observa en la figura 7.9, en las muestras de La Guadalupe se pueden notar dos máximos para presiones de expansión. Para LG-1 se observa una primera (0,38 y 0,25 kg/cm<sup>2</sup> para  $\sigma_v$  y  $\sigma_h$  respectivamente) en el momento  $t= 2500$  min. Luego, la presión de expansión cae ligeramente y continúa aumentando para estabilizarse en un segundo máximo y más alto (0,43 y 0,31 kg/cm<sup>2</sup> para  $\sigma_v$  y  $\sigma_h$  respectivamente).

De igual forma LG-2 mostró dos máximos, sin embargo, en el primer incremento máximo se puede notar un desfase temporal ya que el de  $\sigma_v$  se produjo para el mismo intervalo de tiempo que en LG-1 (0,25 kg/cm<sup>2</sup>), pero el de  $\sigma_h$  se registró a un momento de  $t= 6000$  min (0,24 kg/cm<sup>2</sup>). Luego se evidencia una caída de la presión de expansión y se registra un segundo pico que en el caso de  $\sigma_v$  es superior al primero (0,32 kg/cm<sup>2</sup>) y en el caso de  $\sigma_h$  el ascenso no llego a superar el pico inicial al momento de finalizar el ensayo y aún no se había estabilizado en el segundo máximo.

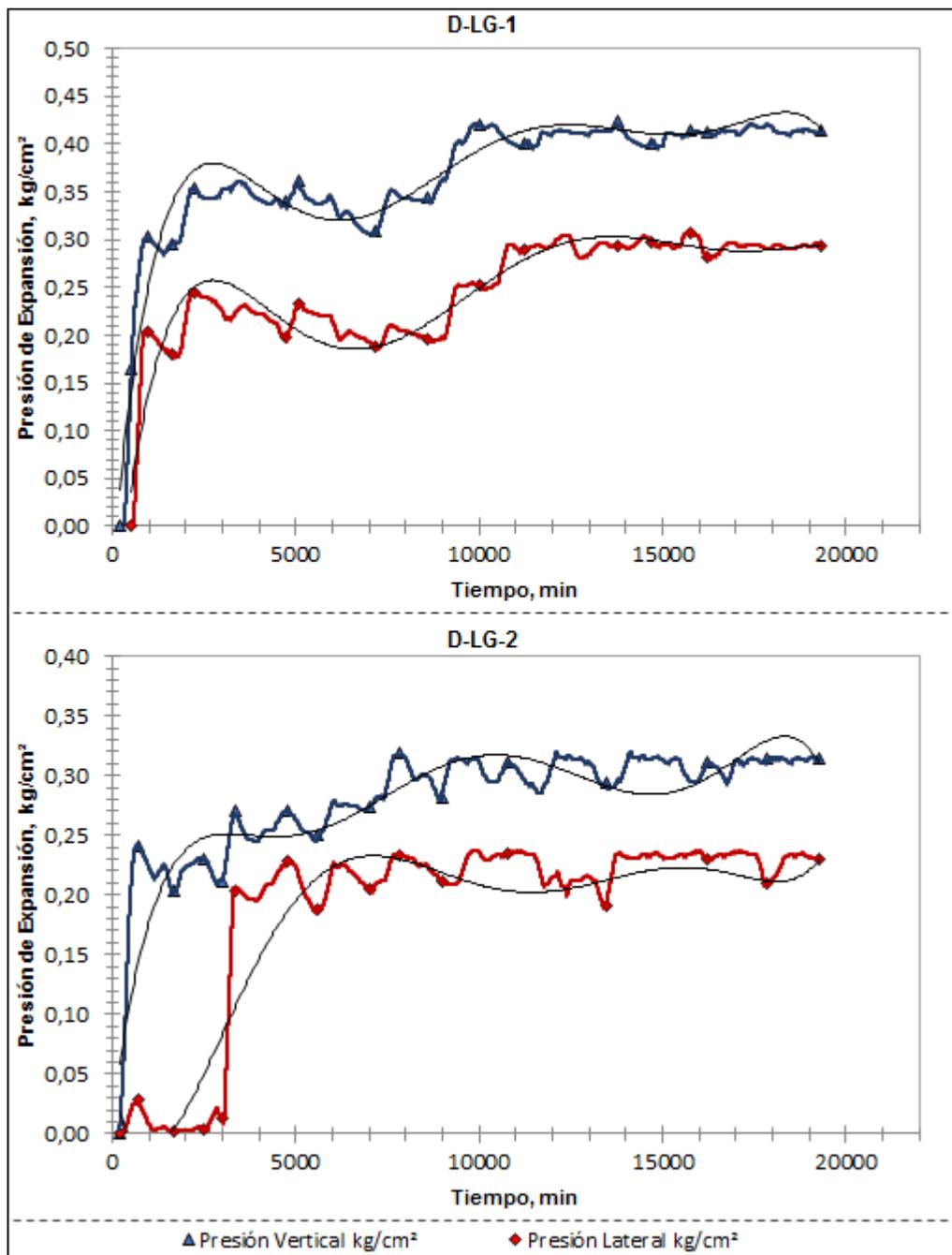


Figura 7.9. Cambios de presión de expansión con especímenes de LG hidratados con fase líquida.  $\rho_d(\text{LG-1}) = 1,36 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ;  $\rho_d(\text{LG-2}) = 1,30 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

Así mismo, en la figura 7.10, se observa que ambas muestras presentan doble pico de máximos de presión de expansión en el caso de la bentonita comercial, donde la caída de esos valores es más evidente.

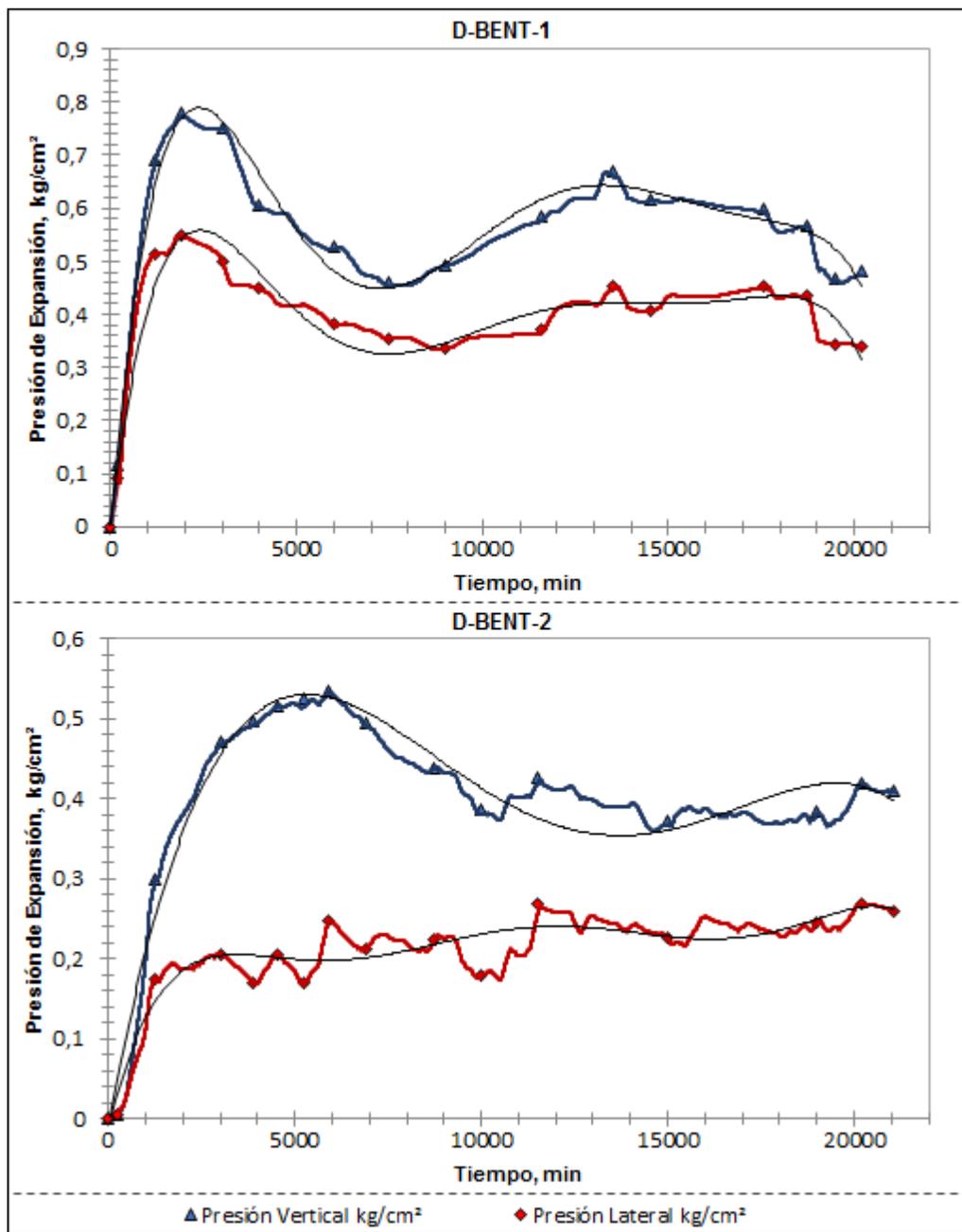


Figura 7.10. Cambios de presión de expansión con especímenes de BENT hidratados con fase líquida.  $\rho_d(\text{BENT-1}) = 0,98 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ;  $\rho_d(\text{BENT-2}) = 0,88 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

De esta manera, para BENT-1 se observa un primer pico (0,78 y 0,55 kg/cm<sup>2</sup> para  $\sigma_v$  y  $\sigma_h$  respectivamente) en el momento  $t = 2500 \text{ min}$ . Igualmente, BENT-2 mostró dos máximos, donde el primer incremento, de 0,53 y 0,27 kg/cm<sup>2</sup> para  $\sigma_v$  y  $\sigma_h$  respectivamente, se registró en un periodo de tiempo mayor en el

momento  $t = 6000$  min. Para ambos especímenes, el segundo pico no logra superar el valor máximo del primer ascenso de la presión.

El patrón de dos máximos de presión de expansión ha sido notado previamente por PUSCH (1982), quien indica que el primer pico se debe al ablandamiento de los agregados de arcilla, inducido por la hidratación de las partículas de arcilla que se reorganizan a una estructura agregada más estable. Luego, se alcanza un segundo máximo cuando se alcanza la altura máxima de expansión admitida. Posteriormente, MARCIAL (2003) en su estudio sobre los cambios de porosidad durante la hidratación de los materiales agregados del ECB en condiciones de volumen constante obtuvo resultados similares en el estudio de la presión de expansión.

Es importante resaltar que luego de alcanzar el segundo máximo la expansión tiende a estabilizarse. Sin embargo, en el gráfico obtenido se pueden observar ciertas fluctuaciones de periodos cortos las cuales podrían ser atribuidas a efectos externo sobre el acero de la celda producto de las variaciones de temperatura experimentadas dentro del laboratorio, las cuales son registradas por el equipo debido a la alta sensibilidad de los sensores de medición.

Por lo tanto, las observaciones realizadas en el presente estudio (para LG y BENT), resultan relativamente compatible con lo expuesto anteriormente por PUSCH (1982) y MARCIAL *et al.* (2003), por lo cual la respuesta mostrada puede ser atribuida a que el primer pico indica el comienzo de la movilización de agua de la microporosidad hacia la macroporosidad, correspondiente al ablandamiento de los agregados de arcilla. Según EVERETT & HAYNES (1973), para humedades más altas el mecanismo actuante para retención del agua en el suelo es la condensación capilar, que es función de la forma y disposición de las partículas y tiene lugar en los mesoporos y macroporos. Una vez, el agua se acumula en la macroporosidad, la reorganización de la porosidad de la microporosidad a la macroporosidad no puede continuar y la presión de expansión comienza nuevamente a aumentar para alcanzar el segundo máximo.

Adicionalmente, al culminar los ensayos se determinaron los perfiles de humedad de las muestras, a cada centímetro desde el punto de hidratación ubicado en la base de la celda hasta el tope. Es importante mencionar que, al analizar los valores de humedades en cada probeta, se obtuvo una tendencia ligeramente decreciente hacia el tope, sin embargo, el conjunto de cada muestra exhibe humedades superiores al 30%, lo cual es indicativo que para el momento de finalización de los ensayos las arcillas habían experimentado la mayor parte de su expansión ya ha tenido lugar y sólo es esperable algún leve hinchamiento remanente (PATRONE & PERFUMO, 2002).

Por último, teniendo en cuenta la ligera diferencia en términos de densidad entre estas dos pruebas de cada tipo de material (SM: 1,55 y 1,59 g/cm<sup>3</sup>; LG: 1,36 y 1,30 g/cm<sup>3</sup>; BENT: 0,98 y 0,88 g/cm<sup>3</sup>), cabe señalar que las diferencias en este parámetro, obtenidas para las diversas muestras analizadas, pueden deberse a ligeras variaciones en el contenido de agua inicial del polvo de arcilla, considerando que la presión de compactación se mantuvo constante en todos los casos.

#### 7.2.2.3. Comparación de resultados obtenidos por medio del Edómetro y el 3D BOX

El equipo de medición diseñado en el IMME (3D BOX) fue concebido con el objeto de poder obtener la presión de expansión máxima, logrando mantener la condición de volumen constante sin la supervisión continua de un operador mediante un sistema de adquisición de datos automatizado. De igual forma, permite obtener información del campo de esfuerzos derivado de los cambios volumétricos inducidos en el material arcilloso por la saturación del mismo, tomando en cuenta los esfuerzos desarrollados en la dirección de compactación de las muestras y los desarrollados perpendicular a la misma, mostrando así un marco globalizado del comportamiento del material.

Por tanto, para validar el correcto funcionamiento de este dispositivo, es necesario comparar los resultados experimentales realizados al mismo material

en el equipo de medición convencional aceptado y utilizado internacionalmente para la medición de propiedades expansivas en suelos arcillosos, con los obtenidos mediante la celda de medición 3D BOX. De tal manera, se ponen en contraste los resultados obtenidos mediante los gráficos de densidad seca vs presión de expansión presentados en la sección 7.2.2.1, a fin de verificar el grado de dispersión o ajuste respecto a los valores derivados del ensayo edométrico.

En la figura 7.11, se puede notar que, tomando en cuenta las ligeras diferencias de densidad seca en las dos muestras, los valores de presión de expansión se encuentran muy cerca de la línea de tendencia exponencial definida de acuerdo a resultados procedentes de las muestras de SM ensayadas en el consolidómetro.

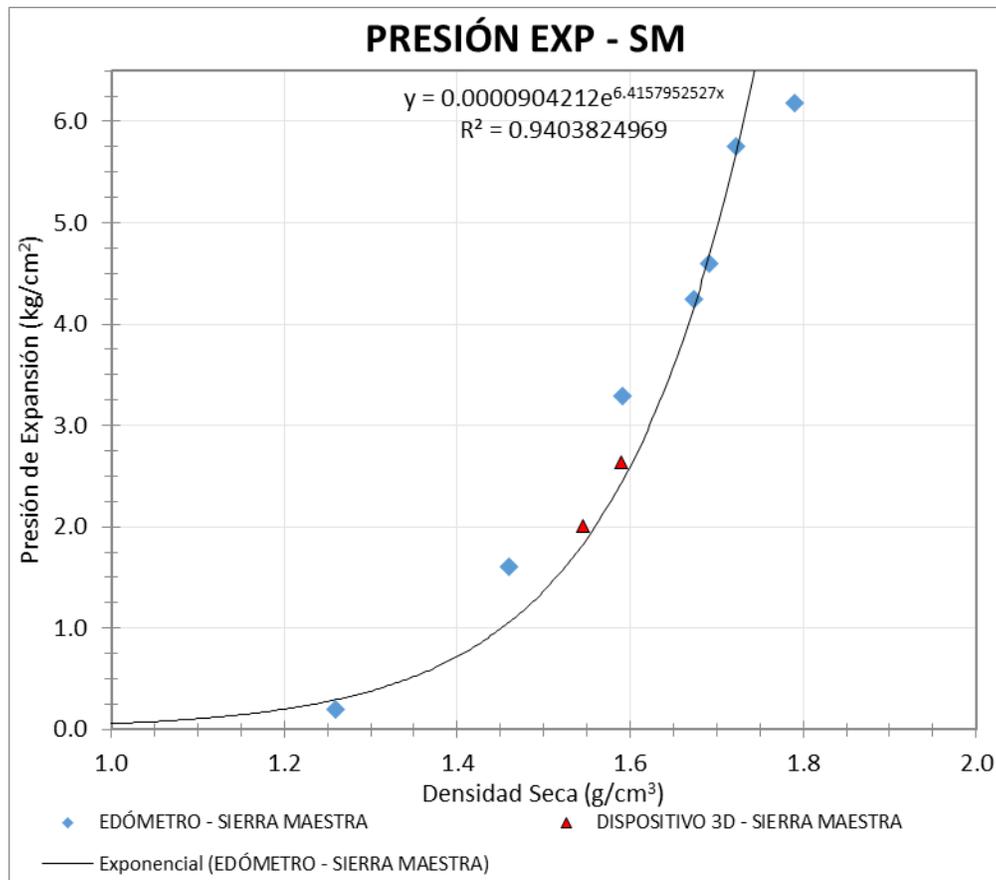


Figura 7.11. Presión de Expansión con Edómetro y Celda de Medición 3D BOX para LG.  
 $p_d(SM-1) = 1,55(g/cm^3)$ ;  $p_d(SM-2) = 1,59(g/cm^3)$

Al evaluar la sensibilidad de los datos obtenidos mediante la celda de medición 3D BOX, se tomó la ecuación de la curva de tendencia referida en el párrafo anterior y se evaluaron los datos ("pd T" y "P. EXP T") que se obtendrían al variar los valores de densidad seca ( $\rho_d$ ) y presión de expansión obtenidos del ensayo realizado, observándose que, de igual forma que en el análisis de los datos edométricos, pequeñas diferencias porcentuales en el valor de la densidad representan variaciones de hasta 10 veces, en promedio, respecto a la magnitud porcentual de la presión de expansión resultante (Tabla 7.8).

Por su parte, al comparar la diferencia porcentual entre P.EXP y P. EXP T de las muestras SM-1 y SM-2 de la tabla 7.5 con los mostrados en la tabla 7.8, resulta importante destacar que el promedio de dicha diferencia así como el valor más alto en la tabla 7.9 de 8,82% y 8,93% respectivamente se encuentra por debajo del promedio resultante y el mayor valor obtenido de la tabla 7.5 (20,95 y 40,94). Al igual que para los datos edométricos, pequeñas diferencias porcentuales en el valor de la densidad  $\approx 1\%$ , pueden generar variaciones de  $\approx 10\%$  en la magnitud de la presión de expansión resultante.

Tabla 7.9. Comparación entre parámetros experimentales y teóricos SM

MUESTRA	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d T$ (g/cm <sup>3</sup> )	DIF (%)	P.EXP (kg/cm <sup>2</sup> )	P. EXP T (kg/cm <sup>2</sup> )	DIF (%)
D-SM-1	1,546	1,560	0,90	2,008	0,172	8,93
D-SM-2	1,589	1,603	0,88	2,640	0,220	8,71

pd: densidad seca experimental; pd T: densidad seca teórica; P.EXP: presión de expansión experimental; P. EXP T: presión de expansión teórica.

De igual forma que para SM, los datos la celda de medición 3D BOX para LG se acoplan con gran correspondencia en el gráfico de densidad seca vs presión de expansión construido con los resultados edométricos para estas muestras (Figura 7.12).

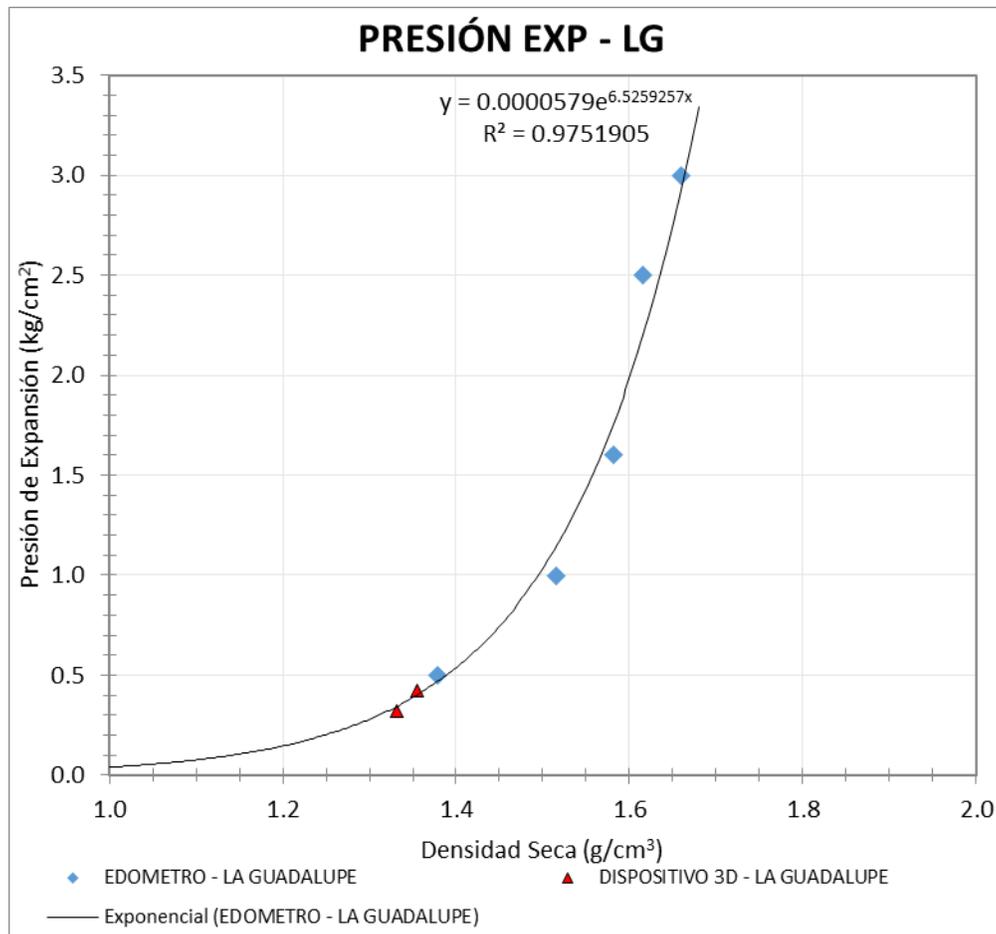


Figura 7.12. Presión de Expansión con Edómetro y Celda de Medición 3D BOX para LG.  
 $\rho_d$  (LG-1) = 1,36 (g/cm³);  $\rho_d$  (LG-2) = 1,33 (g/cm³)

Así mismo, al evaluar la sensibilidad de la presión de expansión respecto a las diferencias de densidad seca del material, desde el punto de vista porcentual, se obtiene que la variación resultante de la presión de expansión disminuyó a 9 veces respecto a la desviación de la densidad seca obtenida (Tabla 7.9). Adicionalmente, la diferencia porcentual entre P.EXP y P. EXP T de las muestras LG-1 y LG-2 indicadas en la tabla 7.10, con promedio de 6,56% y valor máximo de 7,44% al ser contrastada con el promedio y el máximo valor resultante de la tabla 7.6 (9,28% y 13,73%) se puede observar que los datos obtenidos por el nuevo equipo resultan ser menores. De tal forma, a pesar de que pequeñas diferencias porcentuales en el valor de la densidad  $\approx 1\%$  afectan la

magnitud de la presión de expansión resultante, para este caso, la diferencia se reduce a  $\approx 9\%$ , mostrando así mayor precisión que el dispositivo convencional.

Tabla 7.10. Comparación entre parámetros experimentales y teóricos de LG

MUESTRA	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d T$ (g/cm <sup>3</sup> )	DIF (%)	P.EXP (kg/cm <sup>2</sup> )	P. EXP T (kg/cm <sup>2</sup> )	DIF (%)
D-LG-1	1,355	1,355	0,64	0,401	0,425	5,69
D-LG-2	1,331	1,331	0,86	0,344	0,319	7,44

$\rho_d$ : densidad seca experimental;  $\rho_d T$ : densidad seca teórica; P.EXP: presión de expansión experimental; P. EXP T: presión de expansión teórica.

Así mismo, a pesar de que los valores de densidad seca resultantes para la evaluación de la muestra de bentonita comercial fueron bajos respecto a los tomados en consideración por otros autores en estudios previos de esta arcilla de referencia internacional, se puede observar la correspondencia con alta aproximación a la curva de tendencia derivada de los valores de los ensayos edométricos considerados en el apartado 7.2.2.2 (Figura 7.13).

La relación de dependencia de la presión de expansión respecto a las diferencias de densidad seca de esta bentonita, desde el punto de vista porcentual, muestra que la variación de la presión de expansión resultante disminuyó a 6% respecto a la desviación de la densidad seca que se pueda presentar (Tabla 7.11). En cuanto a la diferencia porcentual entre P.EXP y P. EXP T de las muestras BENT-1 y BENT-2 indicados en la tabla 7.10 y las mostradas en la tabla 7.7, el promedio de los resultados obtenidos para el dispositivo 3D BOX (12,43) es ligeramente superior al promedio de los datos edométricos; sin embargo, se mantiene inferior al máximo valor de diferencia porcentual (13,38) dentro del conjunto de datos utilizados para construir la curva (excluyendo el valor significativamente diferente dentro del conjunto).

Resulta importante mencionar que la mayoría de los valores manejados en la tabla 7.7 para construir la curva de tendencia mostrada en las figuras 7.7 y 7.13, corresponde a datos suministrados por el trabajo de GRAY *et al* (1984), por lo que el tratamiento dado a las muestras utilizadas pudo haber sido diferente al utilizado en el presente trabajo.

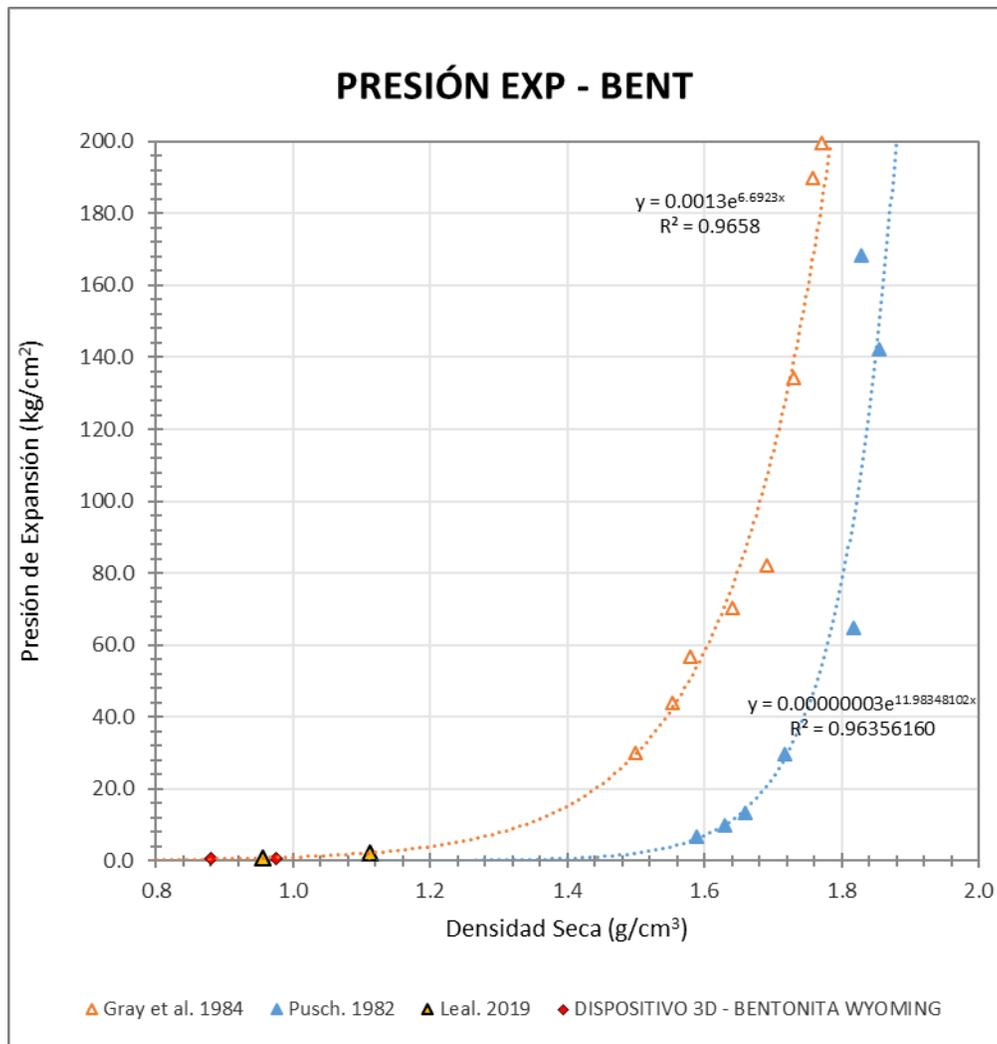


Figura 7.13. Presión de Expansión con Edómetro y Celda de Medición 3D BOX para BENT.  
 $\rho_d(\text{BENT-1}) = 0.98 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ;  $\rho_d(\text{BENT-2}) = 0.88 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

Tabla 7.11. Comparación entre parámetros experimentales y teóricos BENT

MUESTRA	$\rho_d \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$\rho_d T \text{ (g/cm}^3\text{)}$	DIF (%)	P.EXP (kg/cm <sup>2</sup> )	P. EXP T (kg/cm <sup>2</sup> )	DIF (%)
D-BENT-1	0,975	0,956	1,97	0,781	0,887	12,66
D-BENT-2	0,881	0,899	2,02	0,534	0,473	12,20

$\rho_d$ : densidad seca experimental;  $\rho_d T$ : densidad seca teórica; P.EXP: presión de expansión experimental; P. EXP T: presión de expansión teórica.

Estos últimos resultados, en concordancia con lo mencionado por MARCIAL *et al.* (2003), pueden sugerir que los dispositivos con control automatizado de deformación presentan la ventaja de ser muy confiables y arrojar resultados precisos, con poca supervisión humana. Además, que valida la operatividad del dispositivo de medición y funcionamiento del protocolo de adquisición de datos automatizado descrito en la sección 6.4.3.

Por otra parte, al comparar los registros de presión vertical ( $\sigma_v$ ) respecto a los de la presión lateral ( $\sigma_h$ ) medidos con la celda de medición 3D BOX, en la figura 7.14 queda ilustrada la similitud de tendencia en el comportamiento de las presiones de los materiales objeto de estudio, lo cual es reflejado en la pendiente de las rectas, resaltando que se puede establecer una relación promedio de  $\sigma_h = 0,7 \sigma_v$  aproximadamente (Tabla 7.12).

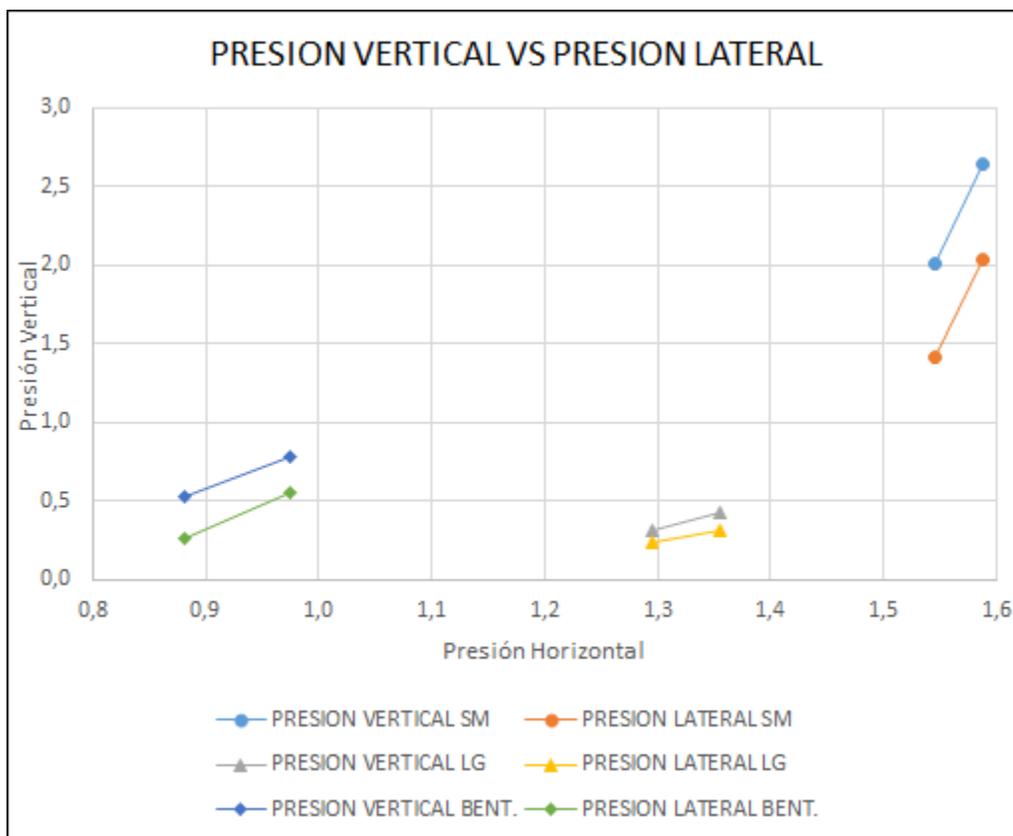


Figura 7.14. Gráfico resumen de resultados obtenidos en cuanto a las presiones verticales y laterales de cada muestra

Tabla 7.12. Comparación la presión vertical vs presión lateral medidas con el dispositivo 3D BOX

MUESTRA	DENS. SECA	PRESION VERTICAL	PRESION LATERAL	RELACION PRESIONES (%)
D-SM-1	1,546	2,008	1,410	70,22
D-SM-2	1,589	2,640	2,040	77,27
D-LG-1	1,355	0,425	0,308	72,47
D-LG-2	1,295	0,319	0,235	73,67
D-BENT-1	0,975	0,781	0,550	70,42
D-BENT-2	0,881	0,534	0,269	50,37

Dicha relación de esfuerzos resulta congruente ya que  $\sigma_v$  se desarrolla en la dirección de compactación de las muestras, por lo cual es un esfuerzo reactivo de la preconsolidación del material y en esta dirección se obtienen los mayores valores de presión de expansión. Es decir, la respuesta de las arcillas en términos de la presión de expansión está en concordancia con la anisotropía generada durante el proceso de compactación de las probetas ensayadas.

## CAPÍTULO VIII

### 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Recientemente, en el campo de la mecánica de suelos se han desarrollado dispositivos de laboratorio que permiten mantener razonablemente la condición de volumen constante sin la supervisión de un operador, introduciendo medidas automatizadas de deformación, en conjunto con un sistema de compensación. En tal sentido el laboratorio de mecánica de suelos del IMME de la Universidad Central de Venezuela ha tomado la iniciativa de diseñar y construir un equipo alternativo al edómetro, a fin de mejorar la práctica de este tipo de ensayos, el cual debía ser validado mediante ejecución de ensayos de presión de expansión con ambos dispositivos a las muestras arcillosas seleccionadas: Sierra Maestra (SM), Lomas de La Guadalupe (LG), Bentonita de Wyoming (BENT), debidamente caracterizadas.

La caracterización física del material fino indica la presencia de arcillas potencialmente expansivas con un porcentaje de coloides superior al 40% en ambos suelos locales y 55% para la bentonita comercial, con un índice de nocividad y una actividad de Skempton de diferentes rangos 4,7- 47,06 y 0,98-10,5 respectivamente; por lo que dentro de las muestras analizadas se identificaron materiales que variaron desde normales o ligeramente activos (SM); activos o con coloides nocivos (LG); y activos o con coloides muy nocivos (BENT), proporcionando muestras con diferentes grados de actividad, que permiten evaluar la sensibilidad del nuevo dispositivo de medición de presión de expansión.

Así mismo, la superficie específica, el porcentaje de expansión y los límites de consistencia evidenciaron el predominio de illitas de baja susceptibilidad a cambios volumétricos en SM, y esmectitas en LG y BENT con un alto grado de plasticidad y una importante capacidad de absorción de agua que permiten el aumento de su volumen hasta en un 26%.

De igual forma los análisis químicos realizados permitieron complementar la caracterización de cada muestra. A través de la DRX se identificaron los minerales presentes, semicuantificandolos en términos de porcentaje, tomando en consideración, las relaciones con el porcentaje de óxidos presentes en cada uno de ellos y obtenidos a través de los análisis de FRX. Así, los porcentajes de minerales presentes corresponden con la siguiente distribución: SM cuarzo 23,18%, illita/moscovita 58,01%, caolinita 18.81%; LG cuarzo 39.61%, albita 31,29%, esmectitas 15,08% y caolinita 14,02%; BENT cuarzo 5,2%, albita 3,33%, esmectitas 53,14%, caolinita 4,06% y calcita 34,27%.

Cabe acotar que cada muestra fue analizada mediante MEB, no obstante, la forma y disposición de los cristales se vieron afectados producto de los cambios físico-químicos por transformación de feldespatos y/o plagioclasas en dichos minerales, los cuales van alterando su composición química de acuerdo con la secuencia de meteorización. Pudiendo generar la apariencia difusa de especies minerales que no se encuentran como fases estrictamente puras.

Por otra parte, en la evaluación del potencial expansivo de los materiales mediante el uso del dispositivo convencional, se logró reducir el efecto del roce lateral en la respuesta volumétrica mediante un protocolo de preparación de las muestras, basado no compactar el material directamente en el anillo edométrico. Igualmente, se pudo verificar que la presión de expansión de suelos arcillosos es una variable altamente dependiente de la densidad del suelo, sin embargo, la humedad también influye en la presión de expansión para densidades bajas.

Posteriormente, el sistema automatizado de adquisición de datos empleado en este estudio permitió llevar a cabo el monitoreo continuo de los cambios volumétricos de las muestras durante todo el ensayo con una intervención mínima de personal, mediante una rutina sencilla y sin procesos de control.

De esta forma, al evaluar el potencial expansivo de en el tiempo mediante el uso de la celda de medición 3D BOX, SM mostró una cinética de hidratación progresiva con una rata de crecimiento rápido al inicio de la saturación y por consiguiente la deformación inicial del sistema es acentuada, debido a la alta

densidad seca de la misma que reduce la proporción de macroporos, adicional a las humedades bajas que dan paso al predominio de la adsorción, que es función de la superficie específica, y que tiene lugar en los microporos.

No obstante, para LG y BENT, la curva de presión de expansión mostró un comportamiento de dobles máximos, donde el primer pico indica el comienzo de la movilización de agua de la microporosidad hacia la macroporosidad, correspondiente al ablandamiento de los agregados de arcilla y, una vez el agua se acumula en la macroporosidad, la reorganización de la porosidad de la microporosidad a la macroporosidad no puede continuar y la presión de expansión comienza nuevamente a aumentar para alcanzar el segundo máximo. Es importante resaltar que este comportamiento con dobles máximos sólo ha sido observado por pocos autores (PUSCH, 1982 y MARCIAL, 2003) utilizando métodos sofisticados de ensayo. En esta investigación se ha podido captar este tipo de comportamiento con un dispositivo sencillo y robusto como lo es la celda 3D BOX.

Adicionalmente, las muestras al finalizar el ensayo mostraron humedades superiores al 30%, lo cual es indicativo que, para el momento de finalización de los ensayos, las arcillas habían experimentado la mayor parte de su expansión.

Al comparar los resultados obtenidos con ambos dispositivos, tomando en cuenta las ligeras diferencias de densidad seca en las dos muestras, los valores de presión de expansión arrojados por la celda de medición 3D BOX se encuentran muy cerca de la línea de tendencia exponencial definida de acuerdo a resultados procedentes del consolidómetro. Por su parte, la diferencia porcentual entre  $P_{EXP}$  y  $P_{EXP T}$  de las muestras ensayadas con la celda de medición 3D BOX es menor que el diferencial promedio y/o máximo derivado de los ensayos edométrico.

Lo anteriormente expuesto, permite sugerir que los dispositivos con control automatizado de deformación presentan la ventaja de ser muy confiables y arrojar resultados precisos, con poca supervisión humana tomando en cuenta el protocolo de adquisición de datos automatizado utilizado en el presente trabajo.

Por otra parte, la relación de esfuerzos  $\sigma_v > \sigma_h$  observada responde a que  $\sigma_v$  se desarrolla en la dirección de compactación de las muestras mostrando así mayores valores de presión de expansión.

A fin de evitar desfases en el registro de respuestas de presiones entre las direcciones de medición, se recomienda ajustar las medidas del molde de compactación o mejorar el protocolo de tallado de las muestras a ser ensayadas en la celda de medición 3D BOX, debido al diferencial de dimensiones entre el molde de compactación y el dispositivo cúbico.

Motivado a que, con los datos de entrada, utilizados en esta investigación, solo se alcanzaron valores de presión de expansión que representan apenas 1/3 de la capacidad máxima de los sensores de esfuerzo total, Se recomienda realizar nuevos ensayos en el 3D BOX usando un material altamente expansivo, como la bentonita comercial, compactado a mayor densidad, a fin de verificar el ajuste de los resultados obtenidos con el dispositivos ante el desarrollo de mayores presiones de expansión.

## CAPÍTULO IX

### 9. BIBLIOGRAFÍA

- ACERO, B. Y DOMINGUEZ, J., 2005. *Estudio Geológico – Geotécnico y Evaluación de las Condiciones del Terreno que constituye el Campus de la Ciudad Universitaria de Caracas (CUC)*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- AGUERREVERE, S Y ZULOAGA, G., 1937. *Observaciones Geológicas en la parte Central de la Cordillera de La Costa*, Venezuela. Boletín Geológico y Minero. Caracas, 1(2 – 4): 8 – 24 p.
- AGUILAR, I. & CARABALLO, E., 2007. *Caracterización geoquímica e los abanicos aluviales del Valle de Caracas a partir de los pozos Sebucán, los Chorros y Parque del este*. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito. 138-139 p.
- ARANCIBIA, C., 2003. Arcillas expansivas: Comportamiento, identificación y su correlación mediante ensayos de fácil ejecución. Tesis para optar al título de consultor civil. *Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Construcción Civil, Universidad Austral de Chile. Cap. IV. p 1-22*.
- ARIAS, I. 1999. Estudio de minerales de arcilla presentes en muestras de sedimentos superficiales y núcleos de la fachada atlántica venezolana. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*.
- AUDEMARD, F., SINGER, A. & SOULAS, J., 2006. Quaternary faults and stress regime of Venezuela. *Revista de la Asociación Geológica Argentina 61 (4)*, p 480-491.
- BARBIERO, J., 1999. Análisis de cargas y deformaciones en la construcción del túnel Pitahaya del ferrocarril Caracas-Cúa en arcillas expansivas. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*.
- BARRETO, J., 2010. Caracterización geológica de la cantera Mume ubicada en el municipio Cristobal Rojas de los Valles del Tuy estado Miranda. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*, p 24.
- BAVER, L., GARDNER, W. & GARDNER, W., 1972. Soil physics. 4.ed. *John Wiley & Sons, New York*. 498p.
- BECK, C., 1985. La chaîne Caraïbe au merideien de Caracas: geologie, tectogenese, place dans l'evolution geodynamique Mesozoique-Cenozoique des Caraïbes Meridionales. *L'Universite des Sciences et Techniques de Lille, Tesis de doctorado de estado*, 462 p.
- BEN RHAÏEM H., TESSIER D. & PONS C.H., 1986. Comportement hydrique et e'volution structurale et texturale des montmorillonites au cours d'un cycle de dessication-humectation. Partie I. Cas des montmorillonites calciques. *Clay Miner.* 21,9-29.

- BERMUDEZ, P., 1966. Consideraciones sobre los sedimentos del Mioceno Medio al Reciente de las costas central y oriental de Venezuela. Primera Parte: *Bol. Geol.*, 7(14): 333-412.
- BERRY, P. & REID, D., 1993. Mecánica de Suelos. *McGraw-Hill, Santafé de Bogotá*, 415p.
- BESOAIN, E., 1986. *Mineralogía de arcillas de suelos*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, IICA. Serie de libros y materiales educativos, No. 60. ISBN 92-9039-067-0. San José, Costa Rica, 1205 p.
- BRAGE, F., 2010. La paleo metalurgia del poblado de Punta de Muros (Arteixo, A Coruña) en el contexto de la transición Bronce final- Primera edad de hierro. En: cuaternario y arqueología. *ASPHA. Diputación de Cadiz*, 253-261.
- CADENA, A., 2013. Estudio químico de la presencia de montmorillonita en arcillas de la cuenca sedimentaria miocénica de Loja mediante técnicas de espectroscopia molecular. *Trabajo Especial de Grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador*, p 123.
- CASSAN, M., 1982. Los Ensayos in situ en la Mecánica del Suelo. Su ejecución e interpretación. *Editores encos Asociados, Barcelona*.
- CEDEÑO, C., 2005. Diseño de un dispositivo para la medición de la presión de expansión en suelos arcillosos. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela*.
- CHO, G. & SANTAMARINA, C. (2004). Soil behaviour: The role of particle shape. *Ponencia presentada en la Conferencia Skempton. Londres, Reino Unido*.
- DAS, B., 2001. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. *Editorial Thomson Learning, 4ta Edición, México*, 880 p.
- DAS, B., 2008. Advanced Soil Mechanics, 4ta Edición. *Taylor & Francis Group Publishing, Londres, Reino Unido*.
- DENGO, G., 1951. *Geología de la región de Caracas*. Boletín Geológico. Caracas, 1(1): 43 – 115 p.
- DIXON D. A. GRAY M. N. AND GRAHAM J., 1996. SWELLING AND HYDRAULIC PROPERTIES OF BENTONITES FROM JAPAN, CANADA AND THE USA. *ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS* 1, 43-48.
- DROGUETT, S., 1983. Elementos de Catalisis Heterogenea. *Editorial OEA, Washington DC*. 116p.
- EVERETT, D. & HAYNES, J., 1973. Specialist Periodical Reports: Colloid Science. *The Chemical Society, London*. 123p.
- FRATELLI, M., 1993. Suelos, fundaciones y muros. *Bonalde Editores, Caracas* 570p.
- GARCÍA, E. & BARRIOS, M., 1997. Las Arcillas: Propiedades u Usis. Disponible en: [https://previa.uclm.es/\\_users/higueras/yymm/Arcillas.htm](https://previa.uclm.es/_users/higueras/yymm/Arcillas.htm). Consulta diciembre 2018.
- GALÁN, E. & VIVALDI, J.L., (1973-1975). Caolines españoles: geología, mineralogía y génesis. *Soc. Esp. Cerámica y Vidrio, vols. 12,13,14, Madrid*.

- GONZÁLEZ DE JUANA, C., ITURRALDE J. & PICARD X., 1980. *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas* (1ª ed.). Ediciones FONINVES, Caracas. 1031 p.
- GONZALEZ DE VALLEJO, L., 2002. Ingeniería Geológica. *Editorial Prentice-Hall, México*, pp. 18-22.
- GRASES, J., (1994). Venezuela. amenazas naturales: terremotos, maremotos, huracanes, Caracas : *Gráficas Monfort*, 162 p.
- GRAUX, D., 1975. Fundamentos de Mecánica del Suelo, Proyecto de Muros y Cimentación. *Editores Técnicos Asociados, Barcelona*.
- GRIM, R.E. 1968. Clay Mineralogy. *McGraw-Hill, New York*.
- GUZMÁN, J., 2008. Obtención y caracterización de la capa de óxido crecida sobre la aleación Fe22%wtCr5%wtAl. *Tesis de grado para obtener el título de maestro en ciencias, Instituto politécnico Nacional, México*, pp. 20-34.
- HERNANDEZ, M., 2006. Estudio geológico y reconocimiento de arcillas expansivas en suelos de una zona al sur de Maracay, estado Aragua. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*, pp. 28-30.
- JEFFERSON, I. Y JONES, L., 2012. *Expansive Soils*. ICE Manual of Geotechnical Engineering. Londres: ICE Publishing.
- JUÁREZ, E., 2005. Mecánica de Suelos. *Limusa, Mexico*. 644p.
- KAGAYA, M., IKEYA, T., TANIGAWA, T. & OSAGA, H., 2012. *SmartPlant P&ID Setup Procedure (CONFEEED)*. RPLC Deep Conversion Project. Cap. 4.
- KOMINE, H. Y OGATA, N., 1994. Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite. *Canadian Geotechnical Journal*, 31 (4), 478-490.
- LAMBE, T. W., & WHITMAN, R. V., 1972. *Mecánica de suelos*. Instituto tecnológico de Massachusetts, *Ed. Limusa S.A. Mexico, D.F.*, 582 p
- LITTER, SANCHA & INGALLINELLA, (2010). Tecnologías económicas para el abastecimiento de arsénico en agua. *CYTED, Argentina*, 27pp.
- MACSOTAY, O., 1968-b. Edad y paleoecología de las formaciones Tuy y Siquire a base de su fauna de moluscos fósiles. *Bol. Geol.*, 10(19), pp 297-308.
- MARCIAL D., CUI J. & DELAGE P., 2003. Introducing vertical strain control to measure swelling pressure of clayed soils by using reaction frame techniques. *4th International Conference on Unsaturated Soils*. Arizona, EE.UU.
- MARCIAL D., CUI J. & DELAGE P., 2006. Efecto del roce lateral en la respuesta volumétrica de muestras de suelo sometidas a ensayos edométricos. *Boletín técnico IMME, Vol. 44, N° 3*.
- MARCIAL, D & LANDAETA, R., 2008. Design of a device for the measurement of the swelling pressure of clayey soils. *IMME [online]*, vol.46, n.1. 35-48 pp.
- MITCHELL, J., 1993. Fundamental of soil behavior. 2nd. Edition. *John Wiley and Sons, Inc., New York*. 473 p.

- MUÑOZ, N. & SINGER, A., 1977. Varvas lacustres pre-holocenas con índices de asentamientos y deformaciones tectónicas recientes del Valle de Caracas. *Memorias I Seminario de Riesgo Geológico. Caracas. 3 p. CEDIFUNVISIS.*
- NELSON, J. & MILLER, D., 1992. Expansive soils problems and practice in foundation and pavement engineering, *John Wiley and Sons, NY.*
- NITON CORPORATION, 1998. *Field Portable X-ray Fluorescence Spectrometry for the Determinations in Soil and Sediment.* USA, 25 p.
- ORTA, M., 2003. Integración geológica de la región Caracas – Charallave – Santa Teresa del Tuy. Distrito Capital y estado Miranda. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*, pp 182-185.
- PATRONE J. & PREFUMO J., 2002. *La acción de los suelos Expansivos sobre las cimentaciones. Métodos de prevención y control.* UM Jornadas de Ing. de Cimentaciones. Uruguay.
- PEDRO, G., JAMAGNE, M. & BEGON, J., 1969. Mineral interaction and transformation in relation to pedogenesis during the Quaternary. *Soil Sci. 107(6)*, pp 462-469.
- PICARD, X. & PIMENTEL, N., 1968. Geología de la cuenca de Santa Lucia-Ocumare del Tuy. *Bol. Geol., 10(19)*, pp 263-296.
- POZAS, M; VIVALDI M. Y RODRÍGUEZ, M: Análisis cuantitativo de filosilicatos de la arcilla por difracción de rayos X. *Anal. Real. Soc. Esp. Fis. y Quím. Serie B. 55 (1969)*, 109-112.
- PROST, R., KOUTIT, T., BENCHARA, A. Y HUARD., 1998. State and location of water adsorbed on clay minerals: Consequences of the hydration and swelling-shrinkage phenomena. *Clays and Clay Minerals 46*, pp 117-131.
- PUSCH, R., 2001. Experimental study of the effect of high porewater salinity on the physical properties of a natural smectitic clay. *SKB Technical Report TR-01-07.* 35 pp. Stockholm.
- RICO, A. Y DEL CASTILLO, H., 2005. La ingeniería de suelos en las vías terrestres 2: Carreteras, Ferrocarriles y Autopistas. *Limusa, Ciudad de México.*
- ROLLINSON H., 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, presentation, interpretation.* New York: Longman Scientific & Technical. 352 p.
- SAUZEAT E., VILLIERAS T. F., FRANÇOIS M., PELLETIER M., BARRES O., YVON J., GUILLAUME D., DUBBESSY J., PFEIFFERT C., RUCK R. AND CATHELINÉAU M., 2000. Caractérisation minéralogique, cristalochimique et texturale de l'argile MX-80. LEM-CREGU. ANDRA Technical Report. France.
- SCHUBERT, C., (1984). Los terremotos en Venezuela y su origen, *Editorial Cuadernos Lagoven*, 72 p.
- SCREMIN, L., 2014. Proyecto de agua potable del Urbanismo Lomas de La Guadalupe, ubicado en Ocumare del Tuy, Estado Miranda. *Fienca-2014-MINVIH-LG-AP. Venezuela.* 73 p.
- SEIDERS, V., 1965. Geología de Miranda central, Venezuela. *Bol. Geol., Caracas, 6(12):298-461.*

- SINGER, A., 1977. Tectónica reciente, morfogénesis sísmica y riesgo geológico en el graben de Caracas, Venezuela. *Memorias V Congreso Venezolano de Geología, IV*: 1861-1902.
- SKEMPTON, A. W., 1953, The colloidal activity of clays; in, Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: Zurich, Switzerland, *ICOSOMEF*, p. 57-61.
- SKEMPTON, A. W., 1953, The colloidal activity of clays; in, Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: Zurich, Switzerland, *ICOSOMEF*, p. 57-61.
- SMITH, R., 1952. Geología de la región de Los Teques – Cúa. *Bol. Geol., Caracas*, 2(6): 333-406. (Versión en inglés: “Geology of the Los Teques - Cúa Region, Venezuela”. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 64(1): 41-64, 1953).
- SNETCHEN, D., TOWNSEND, F., JOHNSON, L., PATRICK, D. & VEDROS, P., 1975. A review of engineering experiences with expansive soils in highway subgrades”. *Federal Highway Administration, Offices of Research and Development, Estados Unidos*, pp 27- 30.
- STĘPKOWSKA, E. & JEFFERIS, S., 1992. Influence of microstructure on firing color of clays. *Applied Clay Science*, 6(4): 319-342.
- UGAS, C., 1985. Ensayos de Laboratorio en Mecánica de Suelo. Discusión-Evaluación y Procedimiento. *Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, IMME, 3ra edición, Caracas*.
- UNE 103-600/93. Determinación de la expansividad de un suelo en el aparato Lambe. *AENOR, Madrid*. 9 p.
- URBANI F., 2011. Review of terranes, belts and nappes of the Cordillera de la Costa, northern Venezuela. *Geológica Acta, España, manuscrito aceptado*.
- WEHRMANN, M., 1972. *Geología de la Región de Guatire – Colonia Tovar*. Memoria III Congreso Geológico Venezolano. Tomo IV. Caracas, Venezuela.
- WELTON, J., 2003. *SEM Petrology Atlas. AAPG Methods in Exploration Series, 4*. The American Association of Petroleum Geologists Tulsa, Oklahoma 74101, U.S.A. 247 p.
- WOLCOTT P., 1943. Fossils from metamorphic rocks of the Coast Range of Venezuela. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 27: 1632.

## APÉNDICE A. RESULTADOS EXPERIMENTALES

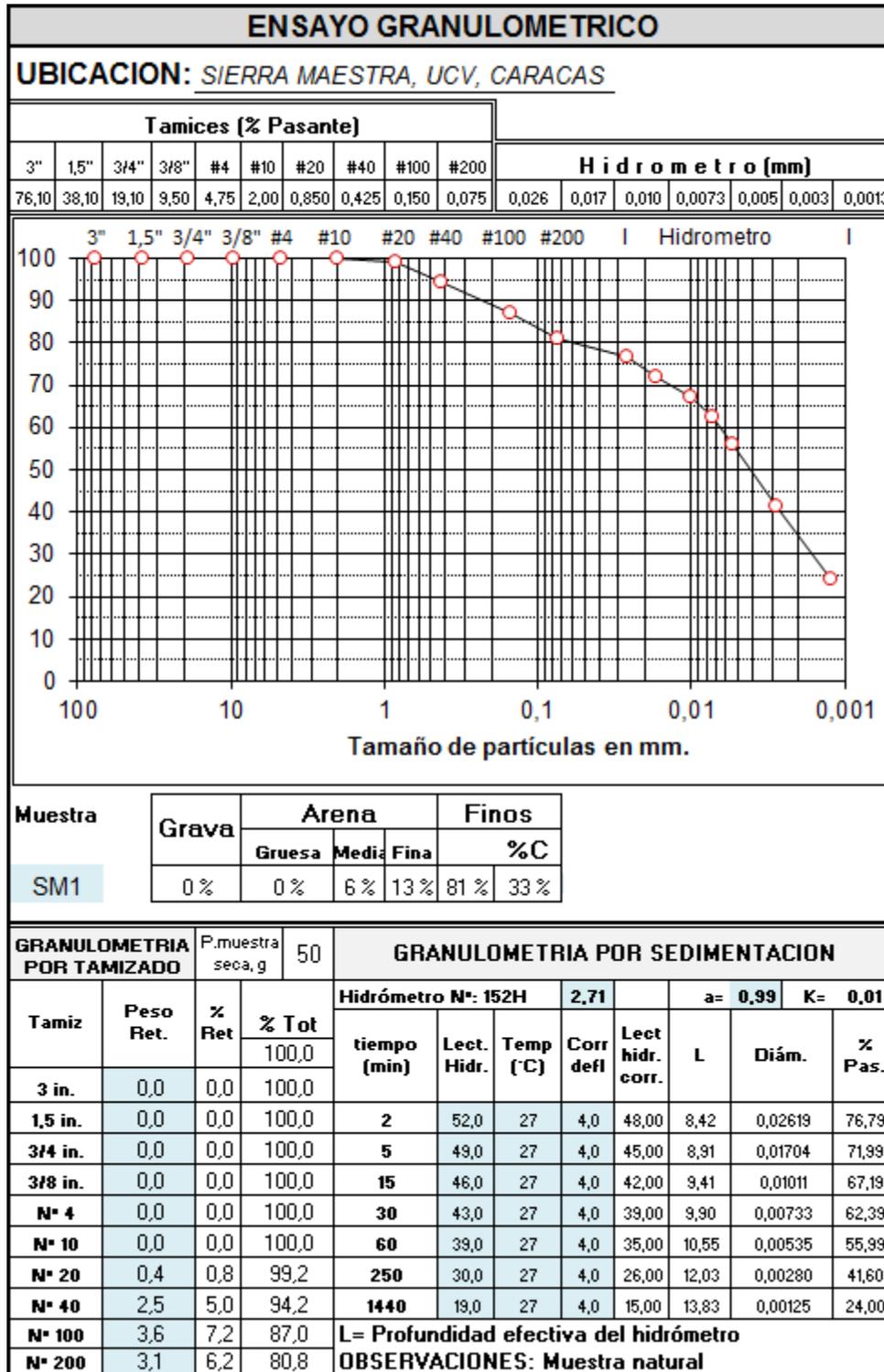
La respuesta del terreno ante la acción de fenómenos naturales o antrópicos, depende estrictamente de la composición o tipo de suelo afectado. Esto es debido a que el material in situ tiene una estructura, composición y antecedente geológico intrínseca. Por lo tanto, en el campo de la ingeniería es de suma importancia definir cada uno de los parámetros característicos del terreno sobre el cual se implantará la obra civil.

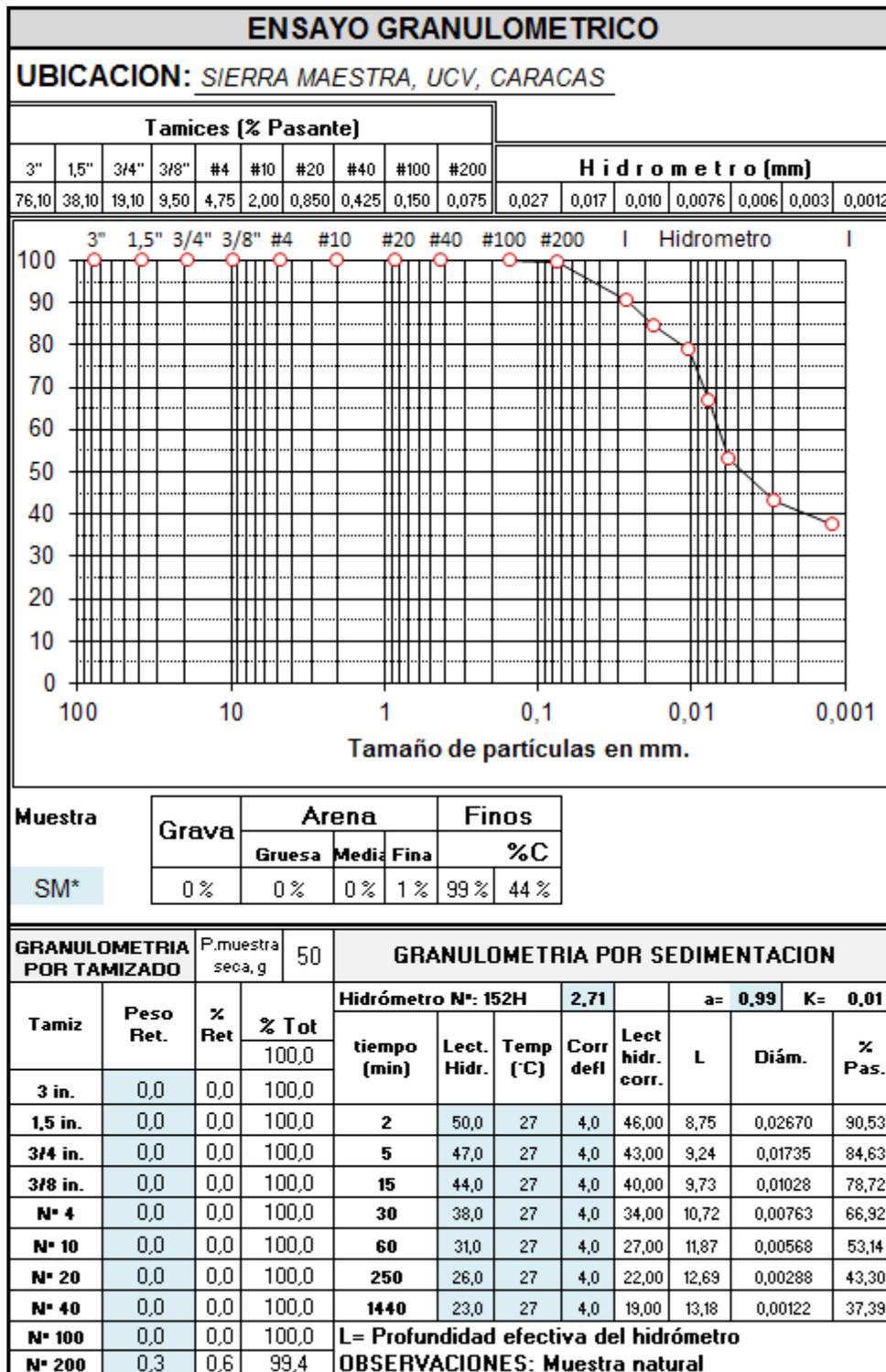
Particularmente, desde un punto de vista geotécnico, algunos suelos arcillosos son capaces de deformarse en forma anómala produciendo daños a las obras construidas sobre estos materiales. Ensayos como los límites de consistencia, azul de metileno, expansión libre y/o controlada, entre otros, ayudan a definir las propiedades físicas y mecánicas de una arcilla, permitiendo diferenciar arcillas inertes de aquellas potencialmente expansivas.

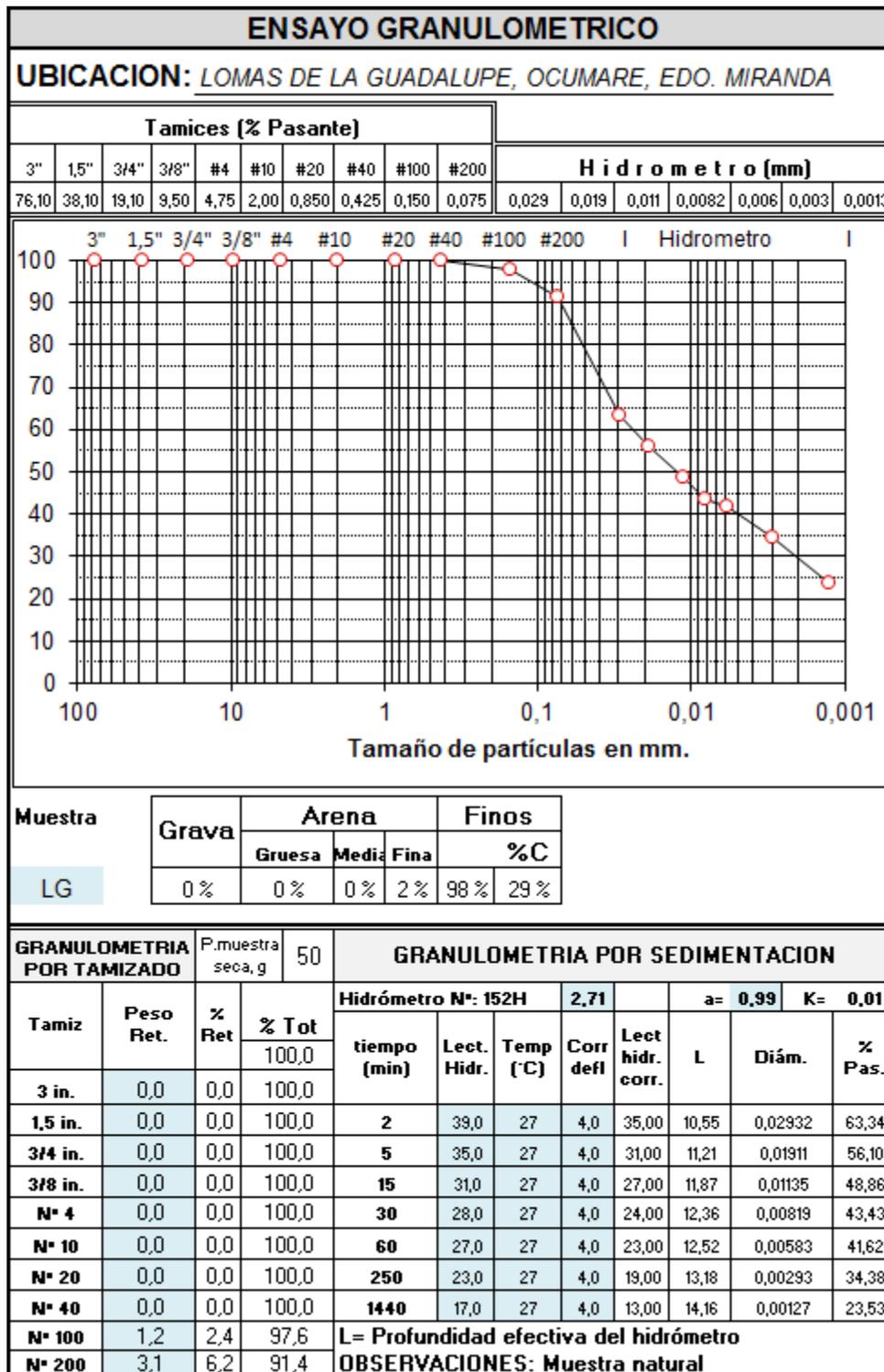
Debido a la heterogeneidad que puede existir en la mineralogía (contenido de minerales amorfos o interestratificados) de este tipo de suelos, es necesario complementar la caracterización con otro tipo de ensayos que hacen referencia a la composición química y estructura de los mismos, tales como los métodos de rayos X, análisis de microscopía electrónica, entre otros.

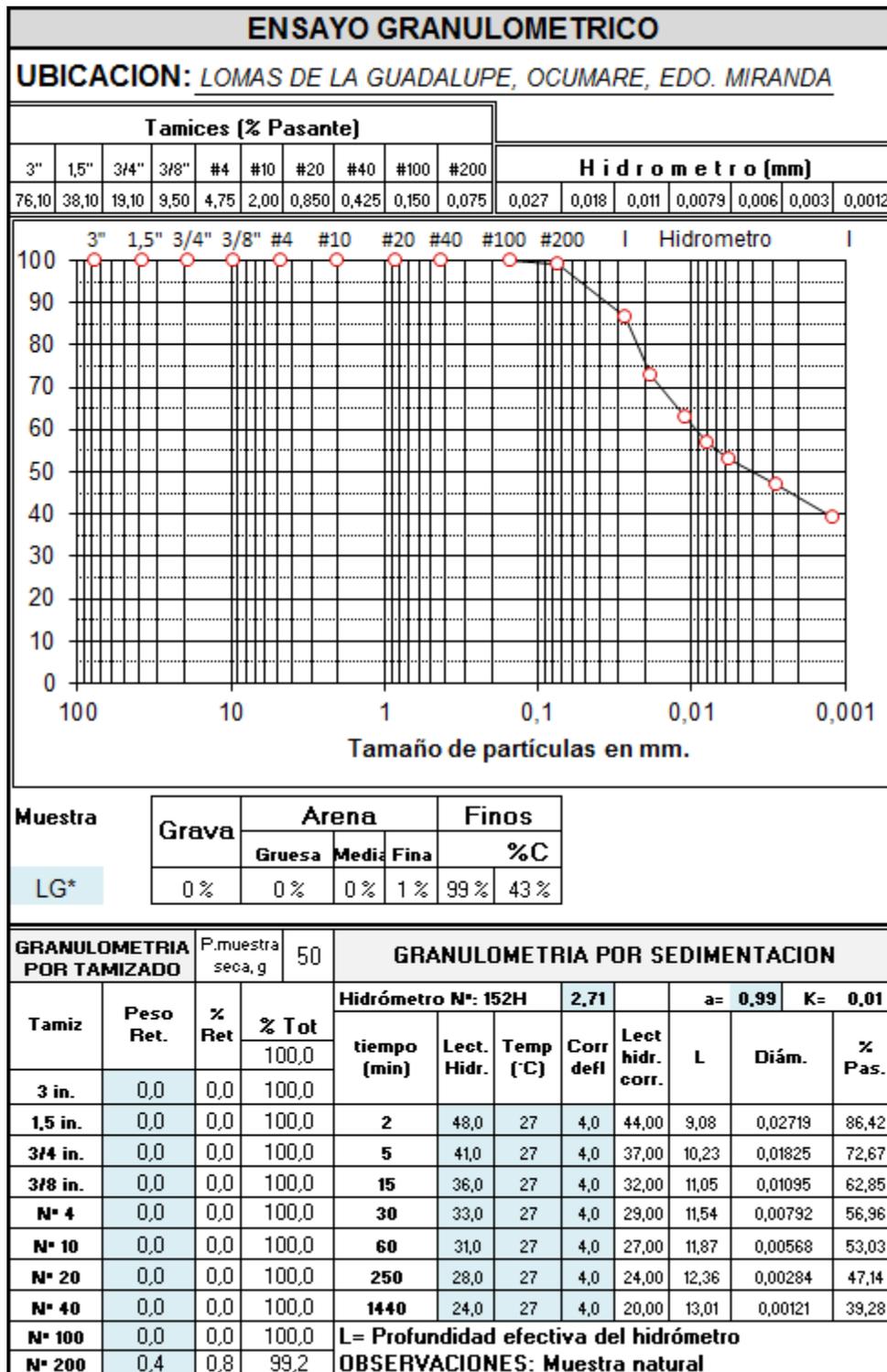
A continuación, se muestran las planillas de los ensayos de caracterización física, química y morfológica de las muestras objeto de estudio

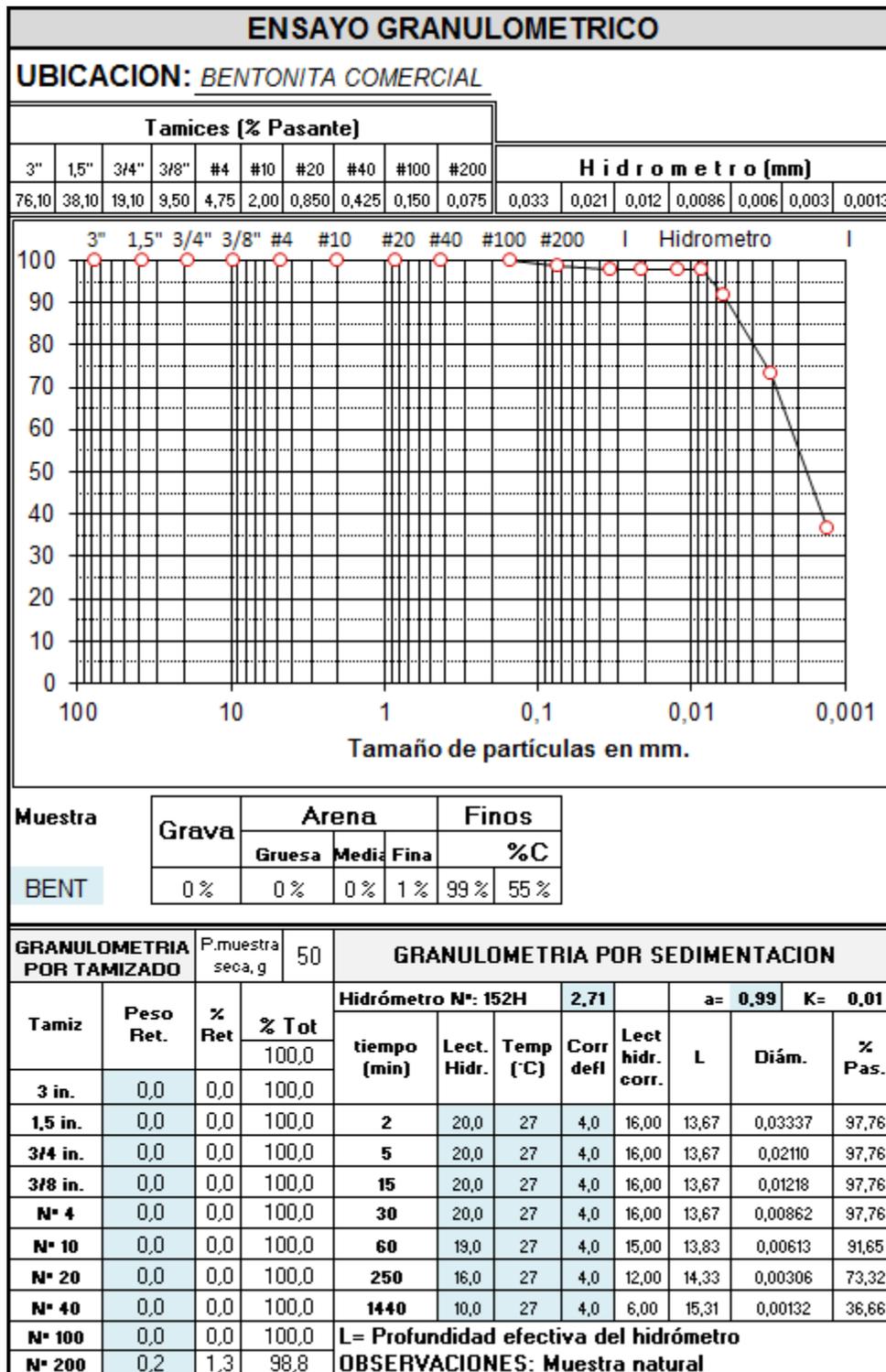
A.1. Ensayo Granulométrico











**A.2. Ensayo Peso Específico, Peso Unitario y Límites de Consistencia**

<b>ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO Y PESO UNITARIO</b>																											
MUESTRA: <u>SM</u>		UBICACIÓN: <u>Sierra Maestra, UCV, Caracas</u>																									
PESO ESPECIFICO		PESO UNITARIO																									
$G_s = W_o / ((W_o - (W_1 - W_2)))$ $G_s 20^{\circ}C = G_s \cdot \text{Factor K}$		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">DATOS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PESO HUMEDO, gr</td> <td>48,4</td> </tr> <tr> <td>PESO SECO, gr</td> <td>43,9</td> </tr> <tr> <td>PESO SECO+ PARAFINA, gr.</td> <td>55,00</td> </tr> <tr> <td>PESO EN AGUA+PARAFINA, gr.</td> <td>29,23</td> </tr> <tr> <td>PESO PARAFINA, gr.</td> <td>3,25</td> </tr> <tr> <td>VOLUMEN PARAFINA, cm3.</td> <td>2,40</td> </tr> <tr> <td>VOLUMEN TOTAL, cm3.</td> <td>28,70</td> </tr> <tr> <td>VOLUMEN MUESTRA, cm3.</td> <td>26,3</td> </tr> </tbody> </table>		DATOS		PESO HUMEDO, gr	48,4	PESO SECO, gr	43,9	PESO SECO+ PARAFINA, gr.	55,00	PESO EN AGUA+PARAFINA, gr.	29,23	PESO PARAFINA, gr.	3,25	VOLUMEN PARAFINA, cm3.	2,40	VOLUMEN TOTAL, cm3.	28,70	VOLUMEN MUESTRA, cm3.	26,3						
DATOS																											
PESO HUMEDO, gr	48,4																										
PESO SECO, gr	43,9																										
PESO SECO+ PARAFINA, gr.	55,00																										
PESO EN AGUA+PARAFINA, gr.	29,23																										
PESO PARAFINA, gr.	3,25																										
VOLUMEN PARAFINA, cm3.	2,40																										
VOLUMEN TOTAL, cm3.	28,70																										
VOLUMEN MUESTRA, cm3.	26,3																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">DATOS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PICNOMETRO Nº</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>CAPACIDAD PICNOMETRO, cm3</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>PESO PICNOMETRO, gr.</td> <td>63,55</td> </tr> <tr> <td>PESO PICNOMETRO + SUELO SECO, gr.</td> <td>77,36</td> </tr> <tr> <td>PESO SUELO SECO (W<sub>o</sub>), gr.</td> <td>13,81</td> </tr> <tr> <td>PESO PICNOMETRO + AGUA + SUELO (W<sub>1</sub>)</td> <td>171,93</td> </tr> <tr> <td>PESO PICNOMETRO + AGUA A CAP. TOTAL (W<sub>2</sub>)</td> <td>163,20</td> </tr> <tr> <td>TEMPERATURA DE ENSAYO, °C</td> <td>27</td> </tr> </tbody> </table>		DATOS		PICNOMETRO Nº	4	CAPACIDAD PICNOMETRO, cm3	100	PESO PICNOMETRO, gr.	63,55	PESO PICNOMETRO + SUELO SECO, gr.	77,36	PESO SUELO SECO (W <sub>o</sub> ), gr.	13,81	PESO PICNOMETRO + AGUA + SUELO (W <sub>1</sub> )	171,93	PESO PICNOMETRO + AGUA A CAP. TOTAL (W <sub>2</sub> )	163,20	TEMPERATURA DE ENSAYO, °C	27	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>HUMEDAD, %</td> <td><b>10,25</b></td> </tr> <tr> <td>PESO UNITARIO HUMEDO, gr/cm3</td> <td><b>1,84</b></td> </tr> <tr> <td>PESO UNITARIO SECO, gr/cm3</td> <td><b>1,67</b></td> </tr> </tbody> </table>		HUMEDAD, %	<b>10,25</b>	PESO UNITARIO HUMEDO, gr/cm3	<b>1,84</b>	PESO UNITARIO SECO, gr/cm3	<b>1,67</b>
DATOS																											
PICNOMETRO Nº	4																										
CAPACIDAD PICNOMETRO, cm3	100																										
PESO PICNOMETRO, gr.	63,55																										
PESO PICNOMETRO + SUELO SECO, gr.	77,36																										
PESO SUELO SECO (W <sub>o</sub> ), gr.	13,81																										
PESO PICNOMETRO + AGUA + SUELO (W <sub>1</sub> )	171,93																										
PESO PICNOMETRO + AGUA A CAP. TOTAL (W <sub>2</sub> )	163,20																										
TEMPERATURA DE ENSAYO, °C	27																										
HUMEDAD, %	<b>10,25</b>																										
PESO UNITARIO HUMEDO, gr/cm3	<b>1,84</b>																										
PESO UNITARIO SECO, gr/cm3	<b>1,67</b>																										
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>PESO ESPECIFICO S/ TEMP. ENSAYO, G<sub>s</sub></td> <td>2,72</td> </tr> <tr> <td>PESO ESPECIFICO S/ 20 °C</td> <td><b>2,71</b></td> </tr> </tbody> </table>		PESO ESPECIFICO S/ TEMP. ENSAYO, G <sub>s</sub>	2,72	PESO ESPECIFICO S/ 20 °C	<b>2,71</b>																						
PESO ESPECIFICO S/ TEMP. ENSAYO, G <sub>s</sub>	2,72																										
PESO ESPECIFICO S/ 20 °C	<b>2,71</b>																										

<b>ENSAYO DE CASAGRANDE PARA LIMITES DE CONSISTENCIA</b>										
MUESTRA: <u>SM</u>					UBICACION: <u>Sierra Maestra, UCV, Caracas</u>					
Límite líquido										
n° Golpes	Envase n°	Peso en gramos					Humedad (w, %)	(%) LL		
		Tara (T) envase	T + suelo húmedo	T + suelo seco	Agua	Suelo Seco (W <sub>s</sub> )				
23	25	23,34	33,84	29,53	4,31	6,19	69,63	68,93		
25	14	22,67	34,02	29,45	4,57	6,78	67,40	67,40		
29	12	21,18	30,96	27,16	3,80	5,98	63,55	64,69		
							$LL = (N/25)^{0.12} \cdot w$		<b>67,01</b>	
VALORES DE $(N/25)^{0.12}$										
N	$(N/25)^{0.12}$	N	$(N/25)^{0.12}$	N	$(N/25)^{0.12}$	N	$(N/25)^{0.12}$	N	$(N/25)^{0.12}$	
20	0,974	23	0,99	25	0,979	27	0,99	29	0,979	
21	0,979	24	0,974	26	0,985	28	0,974	30	0,985	
Límite plástico										
Envase n°	Peso en gramos					w Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	IP INDICE PLASTICO		
	(T) Tara envase	T + suelo húmedo	T + suelo seco	Agua	Suelo Seco					
54	11,09	21,28	18,5	2,78	7,41	37,52	37,52	31,96		
97	10,67	22,43	19,45	2,98	8,78	33,94	33,94			
66	10,93	20,85	18,35	2,50	7,42	33,69	33,69			
							<b>35,05</b>			
OBSERVACIONES: _____										

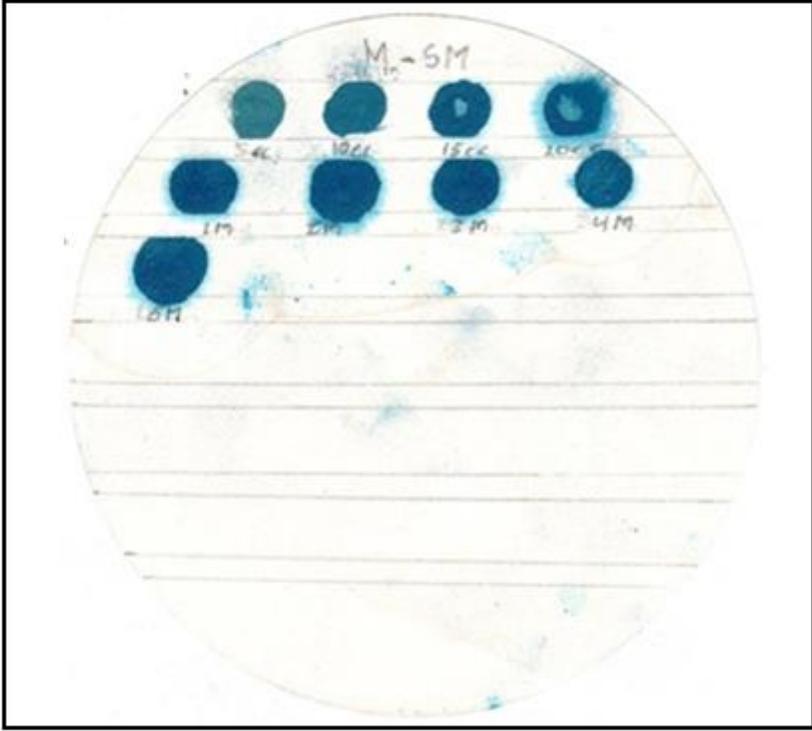
ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO Y PESO UNITARIO																											
MUESTRA: <u>LG</u>		UBICACIÓN: <u>Lomas de la Guadalupe, Ocumare</u>																									
PESO ESPECIFICO		PESO UNITARIO																									
$G_s = W_o / ((W_o - (W_1 - W_2)))$ $G_s 20^{\circ}C = G_s \cdot \text{Factor K}$	Correccion por Temp.		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">DATOS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PESO HUMEDO, gr</td> <td>73,01</td> </tr> <tr> <td>PESO SECO, gr</td> <td>61,51</td> </tr> <tr> <td>PESO SECO+ PARAFINA, gr.</td> <td>77,39</td> </tr> <tr> <td>PESO EN AGUA+PARAFINA, gr.</td> <td>35,31</td> </tr> <tr> <td>PESO PARAFINA, gr.</td> <td>4,38</td> </tr> <tr> <td>VOLUMEN PARAFINA, cm3.</td> <td>5,03</td> </tr> <tr> <td>VOLUMEN TOTAL, cm3.</td> <td>42,08</td> </tr> <tr> <td>VOLUMEN MUESTRA, cm3.</td> <td>37,05</td> </tr> <tr> <td>HUMEDAD, %</td> <td><b>18,70</b></td> </tr> <tr> <td>PESO UNITARIO HUMEDO, gr/cm3</td> <td><b>1,97</b></td> </tr> <tr> <td>PESO UNITARIO SECO, gr/cm3</td> <td><b>1,66</b></td> </tr> </tbody> </table>	DATOS		PESO HUMEDO, gr	73,01	PESO SECO, gr	61,51	PESO SECO+ PARAFINA, gr.	77,39	PESO EN AGUA+PARAFINA, gr.	35,31	PESO PARAFINA, gr.	4,38	VOLUMEN PARAFINA, cm3.	5,03	VOLUMEN TOTAL, cm3.	42,08	VOLUMEN MUESTRA, cm3.	37,05	HUMEDAD, %	<b>18,70</b>	PESO UNITARIO HUMEDO, gr/cm3	<b>1,97</b>	PESO UNITARIO SECO, gr/cm3	<b>1,66</b>
	DATOS																										
	PESO HUMEDO, gr	73,01																									
PESO SECO, gr	61,51																										
PESO SECO+ PARAFINA, gr.	77,39																										
PESO EN AGUA+PARAFINA, gr.	35,31																										
PESO PARAFINA, gr.	4,38																										
VOLUMEN PARAFINA, cm3.	5,03																										
VOLUMEN TOTAL, cm3.	42,08																										
VOLUMEN MUESTRA, cm3.	37,05																										
HUMEDAD, %	<b>18,70</b>																										
PESO UNITARIO HUMEDO, gr/cm3	<b>1,97</b>																										
PESO UNITARIO SECO, gr/cm3	<b>1,66</b>																										
Temp. °C	F. K																										
19	0,99843																										
20	0,99823																										
DATOS																											
PICNOMETRO Nº	7																										
CAPACIDAD PICNOMETRO, cm3	100																										
PESO PICNOMETRO, gr.	68,30																										
PESO PICNOMETRO + SUELO SECO, gr.	99,49																										
PESO SUELO SECO (W <sub>o</sub> ), gr.	31,19																										
PESO PICNOMETRO + AGUA + SUELO (W <sub>1</sub> )	187,50																										
PESO PICNOMETRO + AGUA A CAP. TOTAL (W <sub>2</sub> )	168																										
TEMPERATURA DE ENSAYO, °C	27																										
PESO ESPECIFICO S/ TEMP. ENSAYO, G <sub>s</sub>	2,67																										
PESO ESPECIFICO S/ 20 °C	<b>2,66</b>																										

ENSAYO DE CASAGRANDE PARA LIMITES DE CONSISTENCIA									
MUESTRA: <u>LG</u>		UBICACION: <u>Lomas de la Guadalupe, Ocumare</u>							
Límite líquido									
n° Golpes	Envase n°	Peso en gramos					Humedad (w, %)	(%) LL	
		Tara (T) envase	T + suelo húmedo	T + suelo seco	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	66	10,43	21,38	16,39	4,99	5,96	83,72	82,47	
25	25	14,60	24,82	20,29	4,53	5,69	79,61	79,61	
28	97	10,67	21,87	16,99	4,88	6,32	77,22	78,30	
$LL = (N/25)^{0.12} \cdot w$								<b>80,13</b>	
VALORES DE (N/25) <sup>0.12</sup>									
N	(N/25) <sup>0.12</sup>	N	(N/25) <sup>0.12</sup>	N	(N/25) <sup>0.12</sup>	N	(N/25) <sup>0.12</sup>	N	(N/25) <sup>0.12</sup>
20	0,974	23	0,99	25	0,979	27	0,99	29	0,979
21	0,979	24	0,974	26	0,985	28	0,974	30	0,985
Límite plástico									
Envase n°	Peso en gramos					w Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	IP INDICE PLASTICO	
	(T) Tara envase	T + suelo húmedo	T + suelo seco	Agua	Suelo Seco				
197	75,52	86,02	82,96	3,06	7,44	41,13	41,13	43,45	
88	75,35	83,41	81,22	2,19	5,87	37,31	37,31		
79	75,93	81,22	79,95	1,27	4,02	31,59	31,59		
								<b>36,68</b>	
OBSERVACIONES: _____									

ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO Y PESO UNITARIO				
MUESTRA: <u>BENT</u>		UBICACIÓN: <u>Bentonita Comercial</u>		
PESO ESPECIFICO		PESO UNITARIO		
$G_s = W_o / ((W_o - (W_1 - W_2)))$ $G_s 20^{\circ}C = G_s \cdot \text{Factor K}$	Correccion por Temp.	DATOS		
	Temp. °C	F. K	PESO HUMEDO, gr	69,88
	19	0,99843	PESO SECO, gr	64,94
	20	0,99823	PESO SECO+ PARAFINA, gr.	72,00
DATOS		PESO EN AGUA+PARAFINA, gr.	23,14	
PICNOMETRO N°	31	PESO PARAFINA, gr.	2,12	
CAPACIDAD PICNOMETRO, cm3	250	VOLUMEN PARAFINA, cm3.	2,44	
PESO PICNOMETRO, gr.	83,50	VOLUMEN TOTAL, cm3.	48,86	
PESO PICNOMETRO + SUELO SECO, gr.	99,49	VOLUMEN MUESTRA, cm3.	46,42	
PESO SUELO SECO (W <sub>o</sub> ), gr.	16,01	HUMEDAD, %	7,61	
PESO PICNOMETRO + AGUA + SUELO (W <sub>1</sub> )	733,20	PESO UNITARIO HUMEDO, gr/cm3	1,51	
PESO PICNOMETRO + AGUA A CAP. TOTAL (W <sub>2</sub> )	723,10	PESO UNITARIO SECO, gr/cm3	1,40	
TEMPERATURA DE ENSAYO, °C	27			
PESO ESPECIFICO S/ TEMP. ENSAYO, G <sub>s</sub>	2,71			
PESO ESPECIFICO S/ 20 °C	2,70			

ENSAYO DE CASAGRANDE PARA LIMITES DE CONSISTENCIA										
MUESTRA: <u>BENT</u>		UBICACION: <u>Bentonita Comercial</u>								
Límite líquido										
n° Golpes	Envase n°	Peso en gramos					Humedad (w, %)	(%) LL		
		Tara (T) envase	T + suelo húmedo	T + suelo seco	Agua	Suelo Seco (Ws)				
20	97	10,67	19,58	11,85	7,73	1,18	655,08	638,05		
25	66	10,43	20,40	11,87	8,53	1,44	592,36	592,36		
30	25	14,60	23,05	15,84	7,21	1,24	581,45	594,24		
								LL= (N/25) <sup>0.12</sup> *w		608,22
VALORES DE (N/25) <sup>0.12</sup>										
N	(N/25) <sup>0.12</sup>	N	(N/25) <sup>0.12</sup>	N	(N/25) <sup>0.12</sup>	N	(N/25) <sup>0.12</sup>	N	(N/25) <sup>0.12</sup>	
20	0,974	23	0,99	25	0,979	27	0,99	29	0,979	
21	0,979	24	0,974	26	0,985	28	0,974	30	0,985	
Límite plástico										
Envase n°	Peso en gramos					w Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	IP INDICE PLASTICO		
	(T) Tara envase	T + suelo húmedo	T + suelo seco	Agua	Suelo Seco					
100	34,43	41,73	38,96	2,77	4,53	61,15	61,15	557,11		
24	120,73	128,9	126,28	2,62	5,55	47,21	47,21			
13	120,37	127,3	125,15	2,15	4,78	44,98	44,98			
								51,11		
OBSERVACIONES: _____										

**A.3. Ensayo de la Mancha o Azul de Metileno**

<b>ENSAYO DE AZUL DE METILENO</b>																							
CONCENTRACIÓN=0,01 N (10 g/1000 ml)																							
MUESTRA: <u>SM</u>	UBICACION: <u>Sierra Maestra, UCV, Caracas</u>																						
<b>DATOS</b>																							
Peso Seco (Ws, gr)	<b>9,65</b>																						
Fracción arcillosa (<0.002 mm, %)	<b>32,507</b>																						
IP	<b>31,99</b>																						
																							
<b>REACCIÓN POR DOSIFICACIÓN</b>																							
Dosis (c.c.)	5	10	15	20	1m	2m	3m	4m	5m														
Reacción	-	-	-	+	+	+	+	+	+														
Dosis (c.c.)																							
Reacción																							
<table border="1" style="display: inline-table; margin-right: 20px;"> <tr><td>V (c.c.)</td><td>20</td></tr> <tr><td>VA (gr/100g)</td><td>2,07</td></tr> <tr><td>Mo (mol)</td><td>0,02</td></tr> <tr><td>IN</td><td>6,48</td></tr> <tr><td>SE (m2/g)</td><td>155,95</td></tr> <tr><td>AC</td><td>0,98</td></tr> </table> <table border="1" style="display: inline-table;"> <caption>Tabla comparativa según SE</caption> <tr><td>Montmorillonita (Ca)</td><td>300</td></tr> <tr><td>Montmorillonita (Na)</td><td>800</td></tr> <tr><td>Vermiculita</td><td>200-300</td></tr> <tr><td>Illita</td><td>40-60</td></tr> <tr><td>Caolinita</td><td>5-20</td></tr> </table>		V (c.c.)	20	VA (gr/100g)	2,07	Mo (mol)	0,02	IN	6,48	SE (m2/g)	155,95	AC	0,98	Montmorillonita (Ca)	300	Montmorillonita (Na)	800	Vermiculita	200-300	Illita	40-60	Caolinita	5-20
V (c.c.)	20																						
VA (gr/100g)	2,07																						
Mo (mol)	0,02																						
IN	6,48																						
SE (m2/g)	155,95																						
AC	0,98																						
Montmorillonita (Ca)	300																						
Montmorillonita (Na)	800																						
Vermiculita	200-300																						
Illita	40-60																						
Caolinita	5-20																						
<p>V: Volumen consumido de azul de metileno</p> <p>Mo: # Moles de azul de metileno por gramo de coloide</p>																							
<p>VA:Azul de metileno en polvo por 100 g de Ws</p> <p>IN: Indice de nocividad de los coloides</p>																							

**ENSAYO DE AZUL DE METILENO**  
 CONCENTRACIÓN=0,01 N (10 g/1000 ml)

MUESTRA: LG UBICACION: Lomas de La Guadalupe, Ocumare, Edo. Miranda

DATOS	
Peso Seco (Ws, gr)	9,93
Fracción arcillosa (<0.002 mm, %)	28,883
IP	43,45

REACCIÓN POR DOSIFICACIÓN											
Dosis (c.c.)	5	10	15	20	25	30	1 m	32	34	36	38
Reacción	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+
Dosis (c.c.)	1 m	40	42	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	44	1 m	2 m
Reacción	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+

Dosis (c.c.)	3 m	4 m	5 m
Reacción	+	+	+

V (c.c.)	44
VA (gr/100g)	4,43
Mo (mol)	0,05
IN	15,34
SE (m2/g)	375,24
AC	1,50

Tabla comparativa según SE	
Montmorillonita (Ca)	300
Montmorillonita (Na)	800
Vermiculita	200-300
Illita	40-60
Caolinita	5-20

V: Volumen consumido de azul de metileno

Mo: # Moles de azul de metileno por gramo de coloide

VA: Azul de metileno en polvo por 100 g de Ws

IN: Índice de nocividad de los coloides

**ENSAYO DE AZUL DE METILENO**  
 CONCENTRACIÓN=0,01 N (10 g/1000 ml)

MUESTRA: BENT                      UBICACION: Bentonita Comercial

DATOS	
Peso Seco (Ws, gr)	<b>10</b>
Fracción arcillosa (<0.002 mm, %)	<b>54,748</b>
IP	<b>577,11</b>

REACCIÓN POR DOSIFICACIÓN											
Dosis (c.c.)	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Reacción	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dosis (c.c.)	205	210	215	220	225	230	235	240	1 m	2 m	3 m
Reacción	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+

Dosis (c.c.)	4 m	5 m	
Reacción	+	+	

V (c.c.)	240
VA (gr/100g)	24,00
Mo (mol)	0,14
IN	43,84
SE (m2/g)	1072,26
AC	10,54

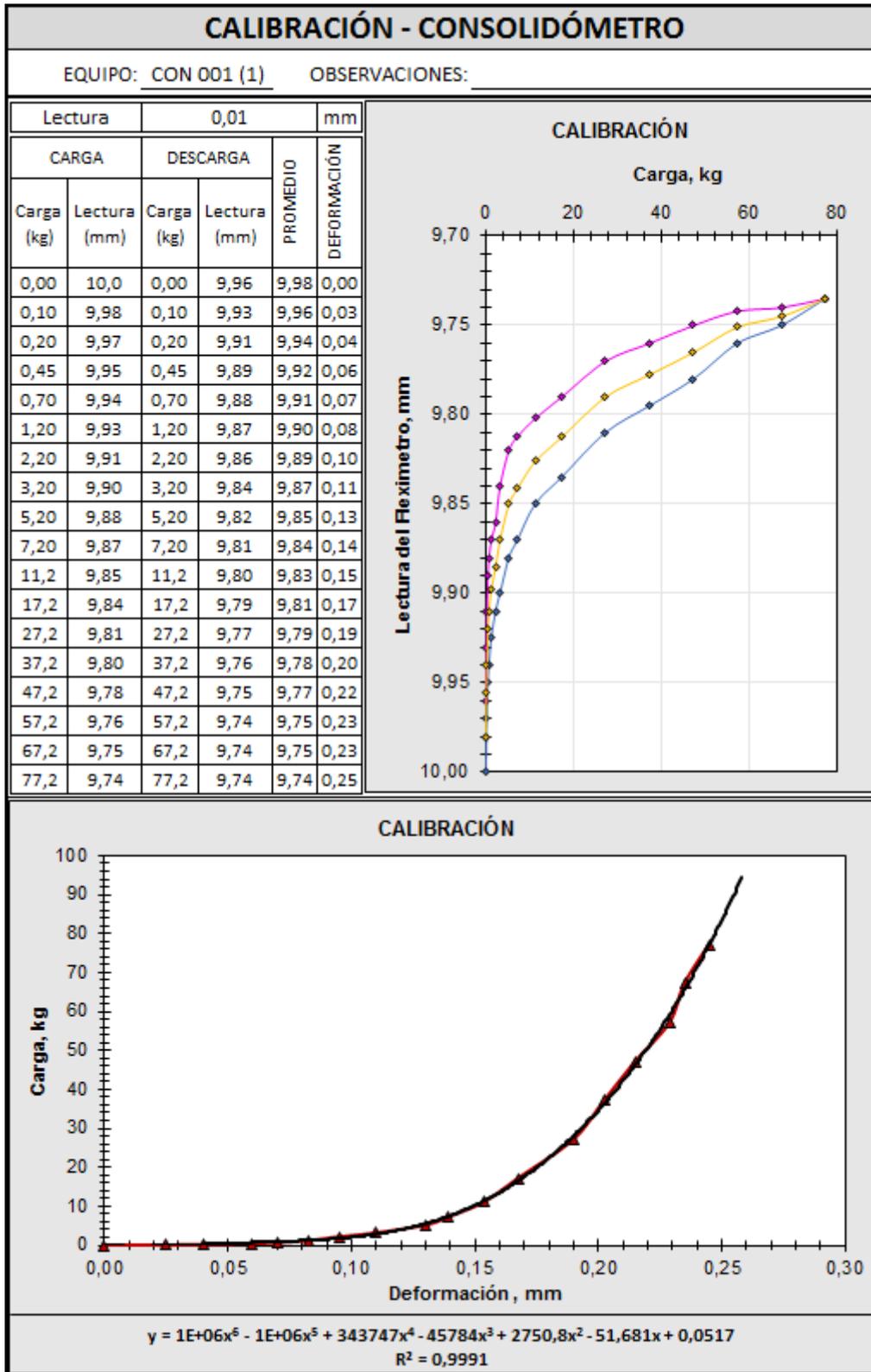
**Tabla comparativa según SE**

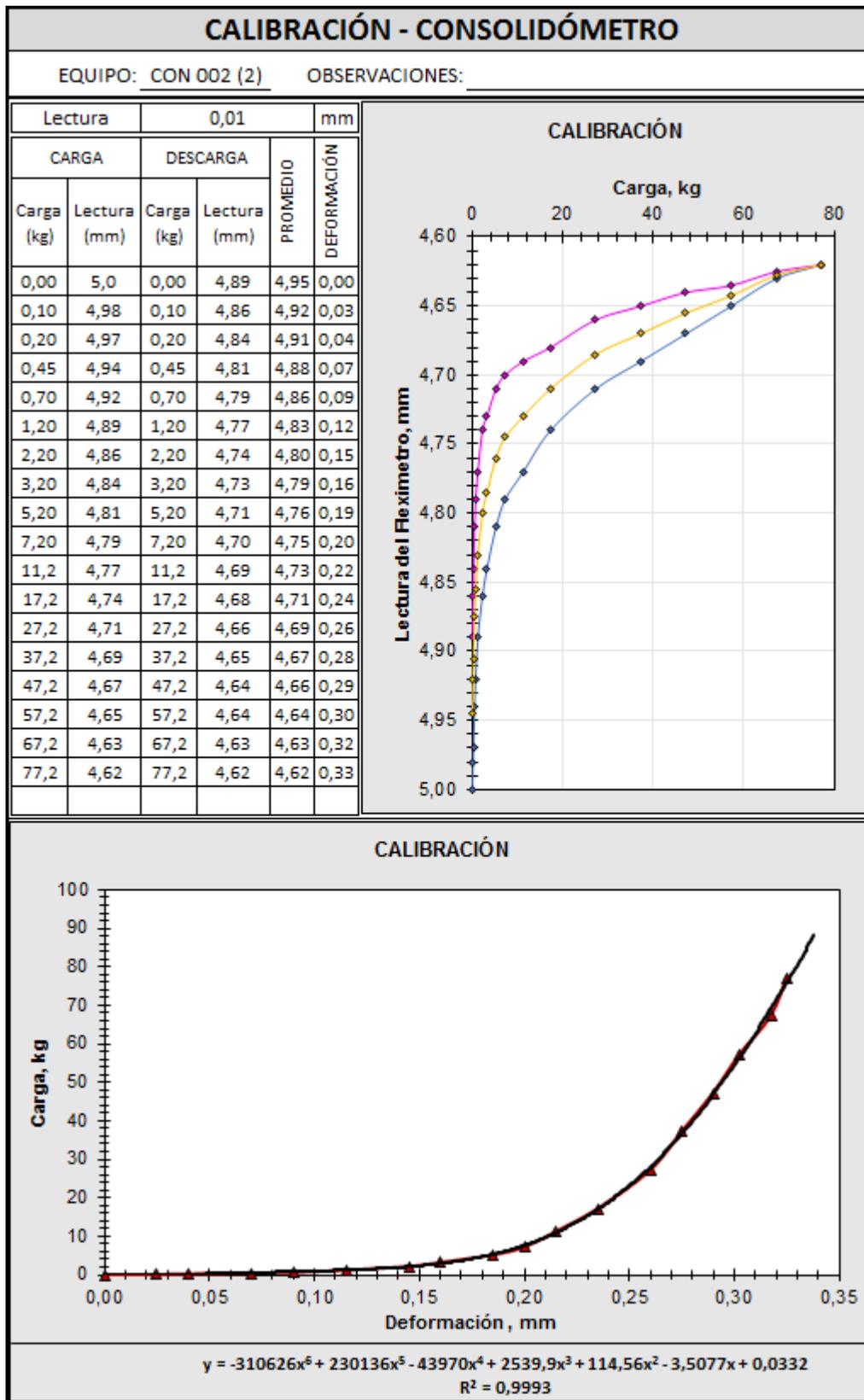
Montmorillonita (Ca)	300
Montmorillonita (Na)	800
Vermiculita	200-300
Illita	40-60
Caolinita	5-20

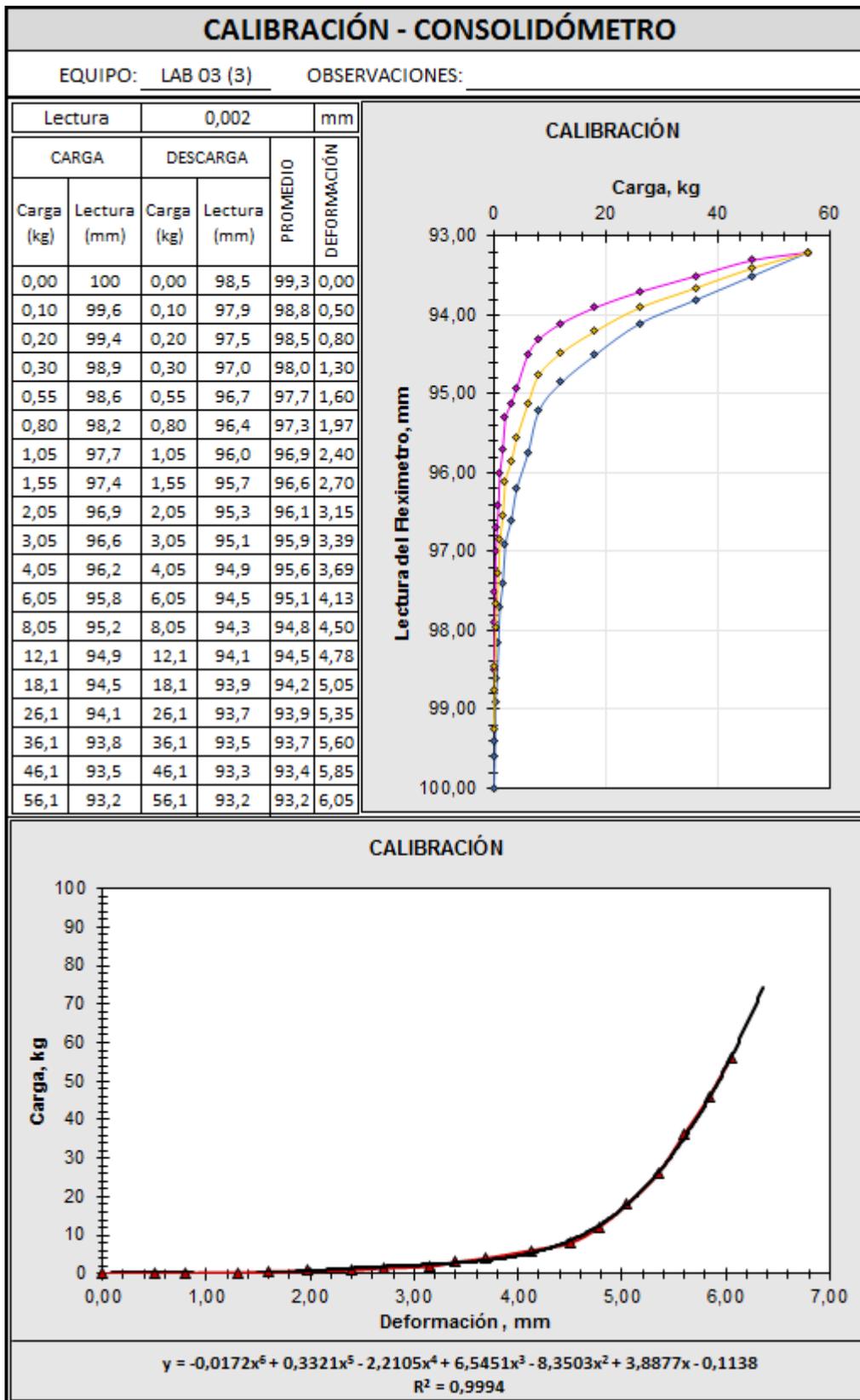
V: Volumen consumido de azul de metileno                      VA: Azul de metileno en polvo por 100 g de Ws

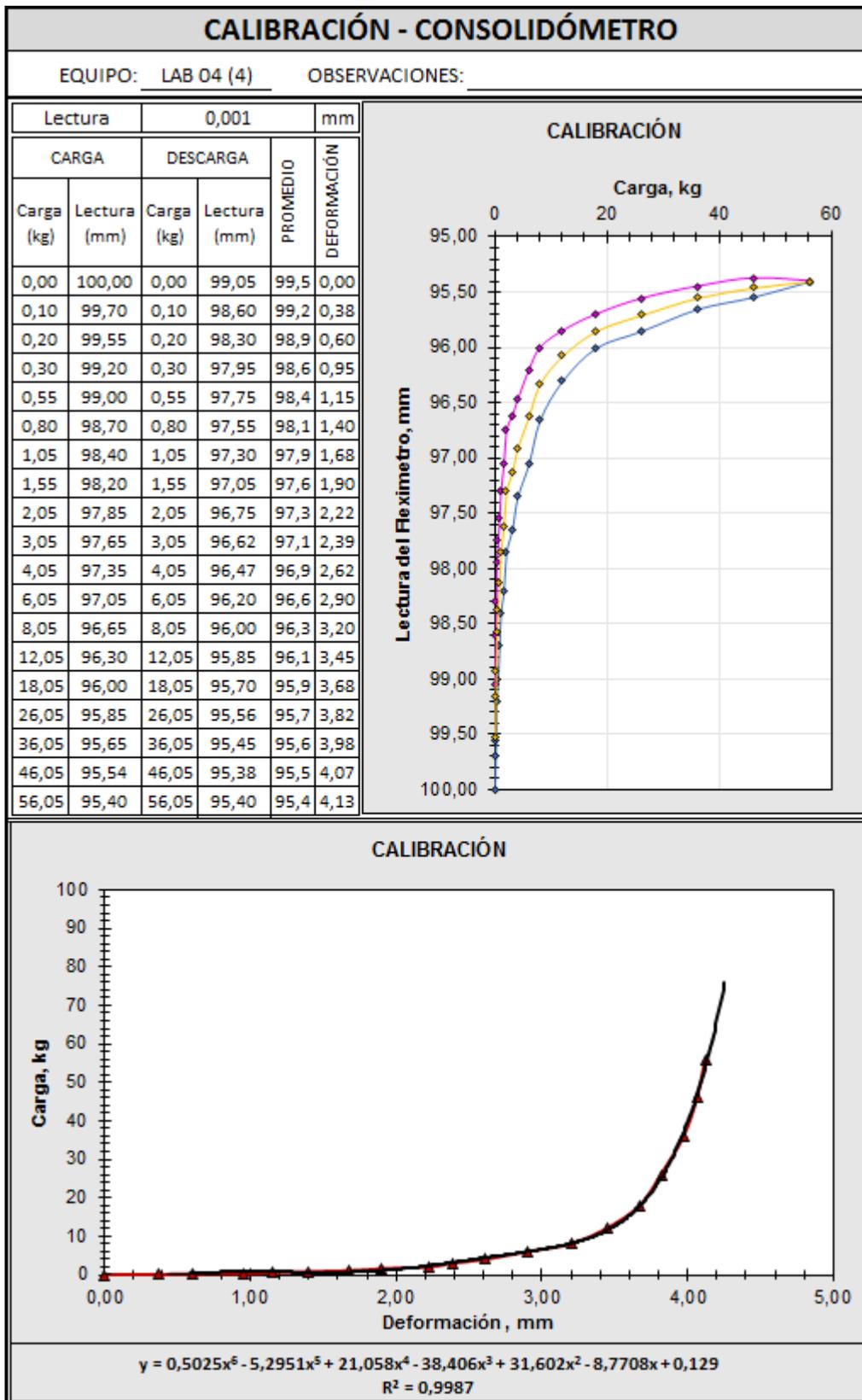
Mo: # Moles de azul de metileno por gramo de coloide                      IN: Índice de nocividad de los coloides

A.4. Calibración de Edómetros









**A.5. Ensayos con Edómetro**

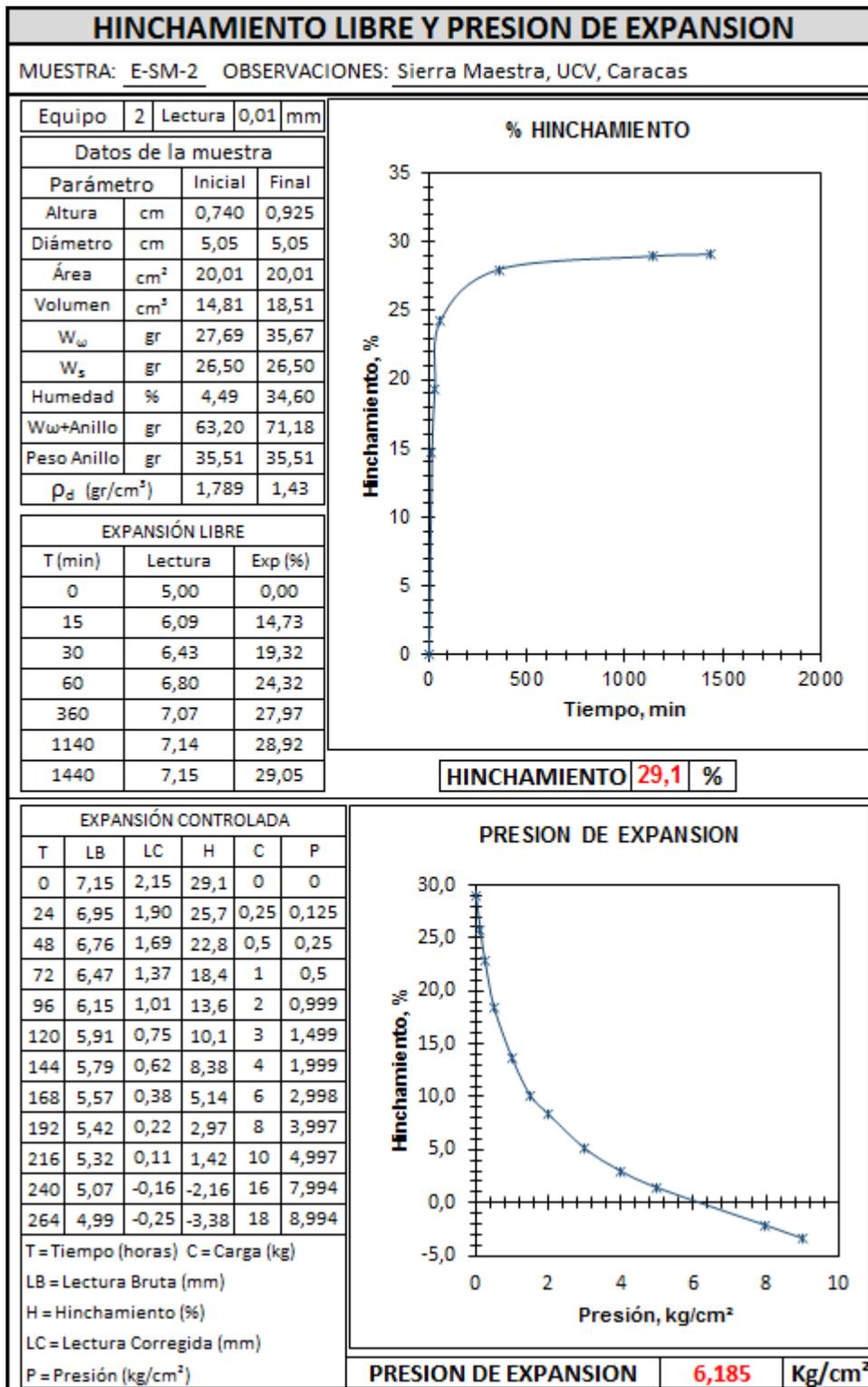
<b>HINCHAMIENTO LIBRE Y PRESION DE EXPANSION</b>			
MUESTRA: <u>E-SM-1</u> OBSERVACIONES: <u>Sierra Maestra, UCV, Caracas</u>			
Equipo	1	Lectura	0,01 mm
Datos de la muestra			
Parámetro	Inicial	Final	
Altura	cm	0,803	1,049
Diámetro	cm	5,06	5,06
Área	cm <sup>2</sup>	20,11	20,11
Volumen	cm <sup>3</sup>	16,15	21,09
W <sub>ω</sub>	gr	28,56	36,06
W <sub>s</sub>	gr	27,33	27,33
Humedad	%	4,52	31,97
W <sub>ω</sub> +Anillo	gr	65,56	73,06
Peso Anillo	gr	37,00	37,00
ρ <sub>d</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )		1,692	1,30
EXPANSIÓN LIBRE			
T (min)	Lectura	Exp (%)	
0	10,00	0,00	
15	10,79	9,84	
30	11,14	14,20	
60	11,33	16,56	
360	11,44	17,93	
1140	11,46	18,18	
1440	11,46	18,18	

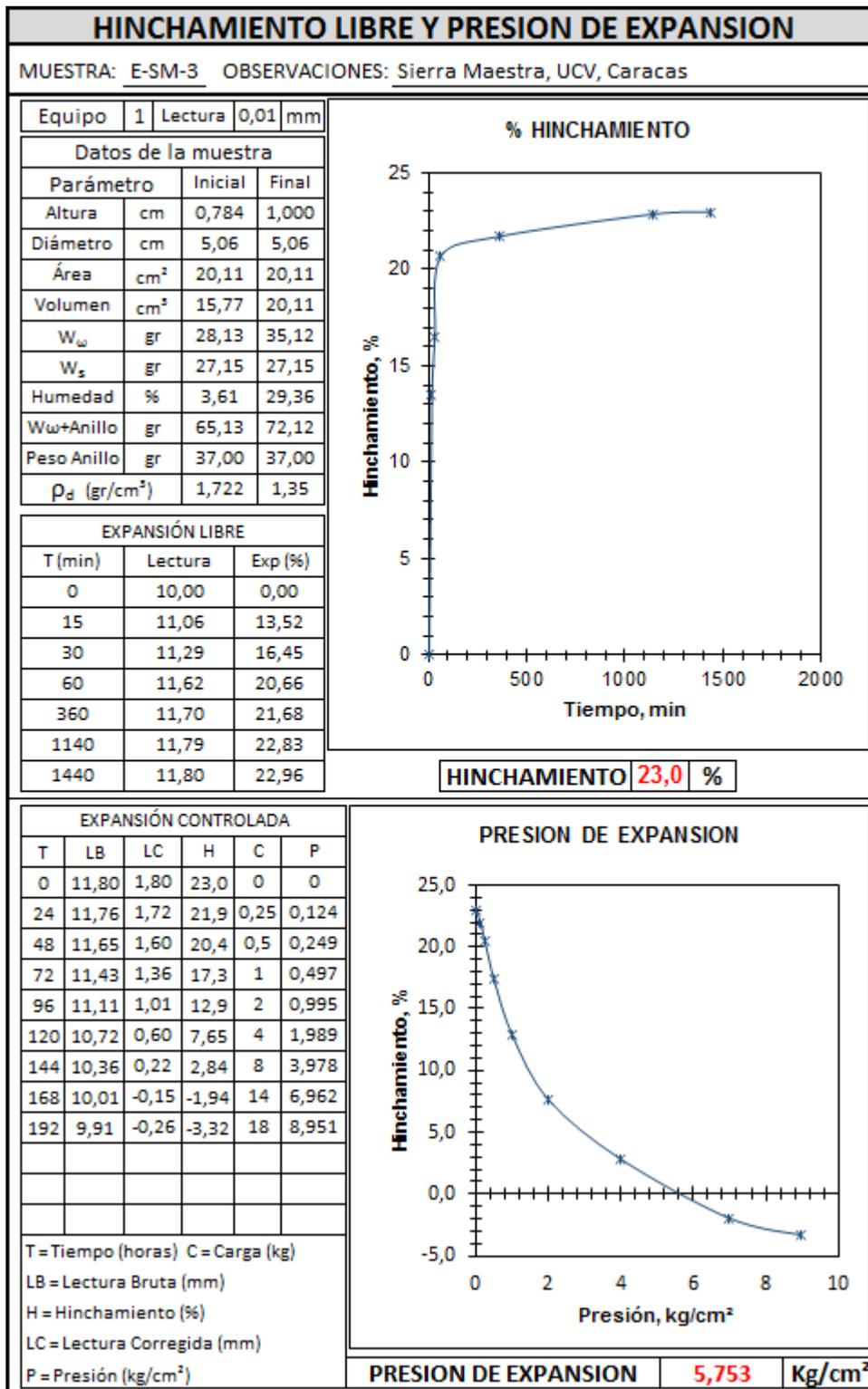
**HINCHAMIENTO 18,2 %**

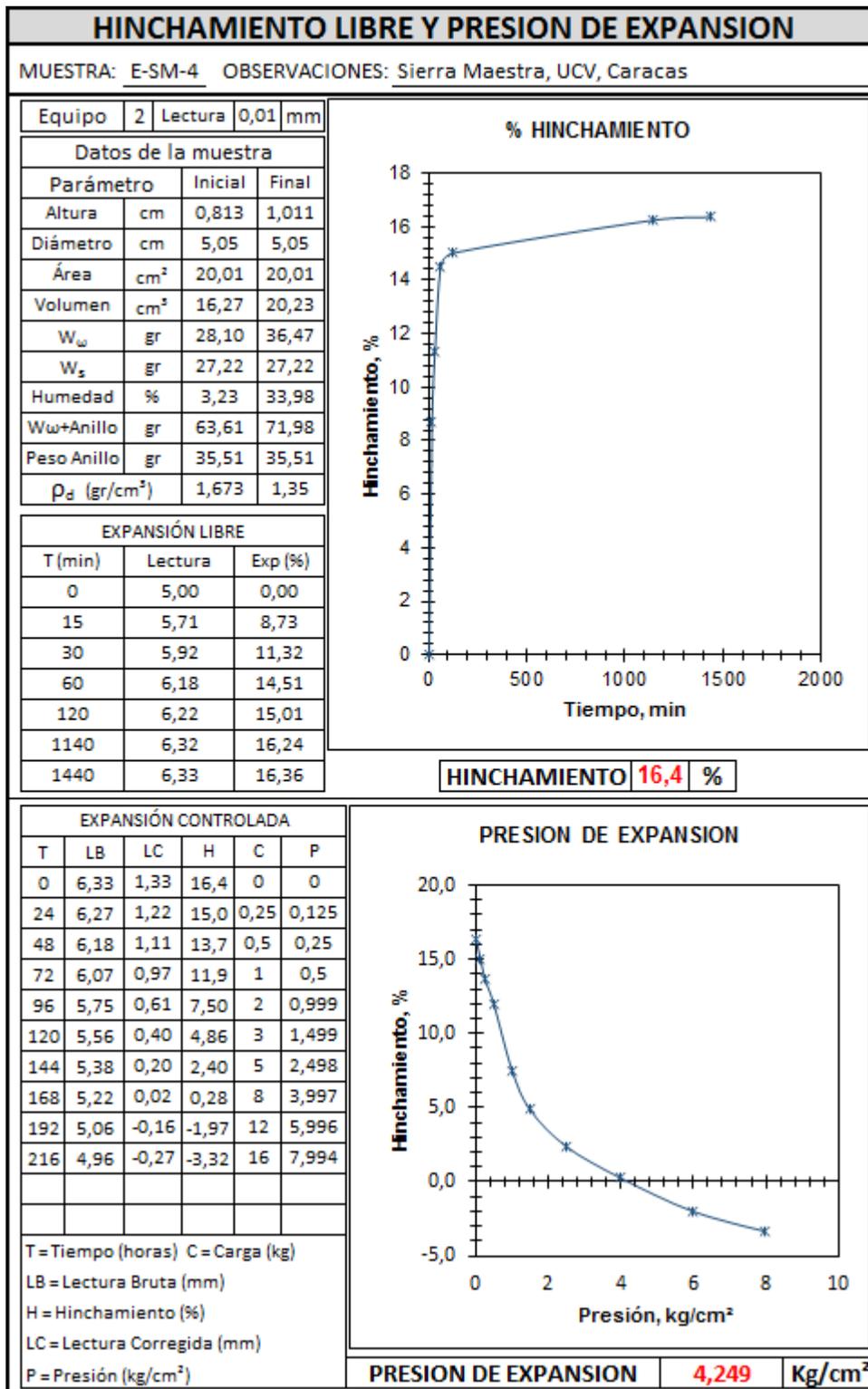
EXPANSIÓN CONTROLADA					
T	LB	LC	H	C	P
0	11,46	1,46	18,2	0	0
24	11,04	1,00	12,5	0,25	0,124
48	10,87	0,82	10,2	0,5	0,249
72	10,68	0,61	7,53	1	0,497
96	10,52	0,42	5,23	2	0,995
120	10,40	0,29	3,61	3	1,492
144	10,35	0,23	2,86	4	1,989
168	10,28	0,15	1,87	6	2,984
192	10,21	0,07	0,87	8	3,978
216	10,16	0,01	0,12	9	4,476
240	9,94	-0,22	-2,79	15	7,459

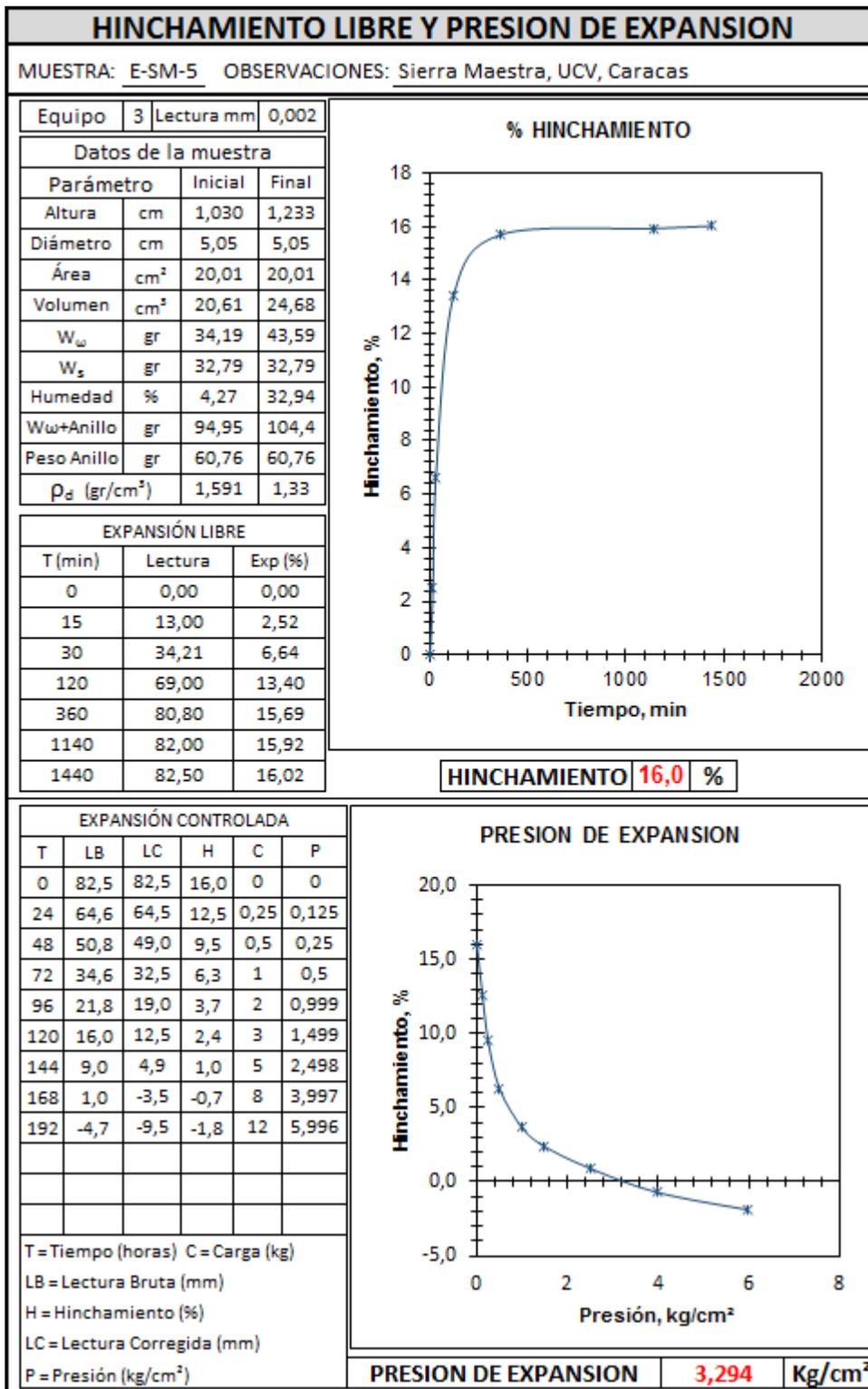
**PRESION DE EXPANSION 4,603 Kg/cm<sup>2</sup>**

T = Tiempo (horas) C = Carga (kg)  
 LB = Lectura Bruta (mm)  
 H = Hinchamiento (%)  
 LC = Lectura Corregida (mm)  
 P = Presión (kg/cm<sup>2</sup>)



























**A.6. Ensayos con dispositivo 3D BOX**

<b>PRESION DE EXPANSION DE EXPANSIÓN VERTICAL Y LATERAL</b>													
MUESTRA: <u>D-SM-1</u>			OBSERVACIONES: <u>Sierra Maestra, UCV, Caracas</u>										
Equipo	Dispositivo 3D		Datos de la muestra				Cálculo de humedades						
Datos del dispositivo			Parámetro	Inicial	Final	Prof	PT	PI	PF	H <sub>2</sub> O	Ws	%H	
Largo	cm	4,935	W <sub>w</sub>	gr	198,40	249,10	Inicial	9,69	14,91	14,69	0,22	5,00	4,40
Ancho	cm	4,895	W <sub>s</sub>	gr	190,04	190,04	1 cm	6,05	13,09	11,46	1,63	5,41	30,13
Prof	cm	5,090	Humedad (%)		4,40	31,08	2 cm	7,59	17,7	15,4	2,34	7,76	30,15
Volumen	cm <sup>3</sup>	122,96	ρ	(gr/cm <sup>3</sup> )	1,614	2,026	3 cm	6,34	15	13	2,03	6,67	30,43
			ρ <sub>d</sub>	(gr/cm <sup>3</sup> )	1,546	1,546	4 cm	7,5	16,4	14,3	2,14	6,79	31,52
						5 cm	7,37	17,5	15	2,53	7,63	33,16	

PRESIÓN DE EXPANSIÓN			PRESIÓN DE EXPANSIÓN		
T (min)	Presión Vertical (kg/cm <sup>2</sup> )	Presión Lateral (kg/cm <sup>2</sup> )	T (min)	Presión Vertical (kg/cm <sup>2</sup> )	Presión Lateral (kg/cm <sup>2</sup> )
250	0,000	0,000	8000	1,830	1,200
1000	0,730	0,010	9000	1,870	1,210
2000	0,950	0,060	10000	1,900	1,295
3000	1,110	0,040	13000	1,980	1,350
4000	1,220	0,020	15000	1,970	1,350
5000	1,470	0,260	17000	1,980	1,410
6000	1,770	1,100	19000	2,008	1,370
7000	1,830	1,176	21000	2,000	1,350

**D-SM-1**

Presión de Expansión, kg/cm<sup>2</sup>

Tiempo, min

▲ Presión Vertical kg/cm<sup>2</sup>    ◆ Presión Lateral kg/cm<sup>2</sup>

PRESIÓN DE EXPANSIÓN		
VERTICAL	<b>2,008</b>	Kg/cm <sup>2</sup>
LATERAL	<b>1,410</b>	Kg/cm <sup>2</sup>

PRESION DE EXPANSION DE EXPANSIÓN VERTICAL Y LATERAL													
MUESTRA: D-SM-2			OBSERVACIONES: Sierra Maestra, UCV, Caracas										
Equipo	Dispositivo 3D		Datos de la muestra				Cálculo de humedades						
Datos del dispositivo			Parámetro	Inicial	Final	Prof	PT	PI	PF	H <sub>2</sub> O	Ws	%H	
Altura	cm	4,935	W <sub>w</sub>	gr	201,69	266,14	Inicial	9,89	14,97	14,81	0,16	4,92	3,25
Ancho	cm	4,895	W <sub>s</sub>	gr	195,34	195,34	1 cm	9,87	21,29	18,55	2,74	8,68	31,57
Prof	cm	5,090	Humedad (%)		3,25	36,25	2 cm	10,4	21,43	18,8	2,66	8,36	31,82
Volumen	cm <sup>3</sup>	122,96	ρ (gr/cm <sup>3</sup> )		1,640	2,164	3 cm	10,1	21,69	18,9	2,83	8,76	32,31
			ρ <sub>d</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )		1,589	1,589	4 cm	7,58	18,93	15,6	3,36	7,99	42,05
							5 cm	7,5	22,81	18,2	4,64	10,67	43,49
PRESIÓN DE EXPANSIÓN					PRESIÓN DE EXPANSIÓN								
T (min)	Presión Vertical (kg/cm <sup>2</sup> )	Presión Lateral (kg/cm <sup>2</sup> )	T (min)	Presión Vertical (kg/cm <sup>2</sup> )	Presión Lateral (kg/cm <sup>2</sup> )								
200	0,030	0,000	7500	2,526	1,982								
750	2,040	0,000	9000	2,573	2,037								
1350	2,369	1,784	10500	2,580	2,024								
2000	2,425	1,904	12000	2,562	1,992								
3000	2,465	1,962	14000	2,584	1,982								
4000	2,495	1,984	16000	2,580	1,986								
5000	2,495	1,975	18000	2,586	2,000								
6000	2,524	1,982	20000	2,640	2,040								
<p style="text-align: center;"><b>D-SM-2</b></p> <p style="text-align: center;">▲ Presión Vertical    ◆ Presión Lateral kg/cm<sup>2</sup>                      kg/cm<sup>2</sup></p>													
<b>PRESIÓN DE EXPANSIÓN</b>													
VERTICAL		<b>2,640</b>				Kg/cm <sup>2</sup>							
LATERAL		<b>2,040</b>				Kg/cm <sup>2</sup>							

PRESION DE EXPANSION DE EXPANSIÓN VERTICAL Y LATERAL													
MUESTRA: <u>D-LG-1</u>			OBSERVACIONES: <u>Lomas de la Guadalupe, Ocumare, Edo. Miranda</u>										
Equipo	Dispositivo 3D		Datos de la muestra				Cálculo de humedades						
Datos del dispositivo			Parámetro	Inicial	Final	Prof	PT	PI	PF	H <sub>2</sub> O	Ws	%H	
Altura	cm	4,935	W <sub>w</sub>	gr	178,14	224,45	Inicial	10,40	17,37	16,92	0,45	6,52	6,90
Ancho	cm	4,895	W <sub>s</sub>	gr	166,64	166,64	1 cm	7,58	27,03	22,27	4,76	14,69	32,40
Prof	cm	5,090	Humedad (%)		6,90	34,69	2 cm	9,87	23,3	20	3,36	10,09	33,30
Volumen	cm <sup>3</sup>	122,96	ρ (gr/cm <sup>3</sup> )		1,449	1,825	3 cm	10,4	30,5	25,5	5,02	15,04	33,38
			ρ <sub>d</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )		1,355	1,355	4 cm	10,1	26,1	21,9	4,21	11,76	35,80
							5 cm	7,5	17,8	14,9	2,87	7,44	38,58

PRESIÓN DE EXPANSIÓN			PRESIÓN DE EXPANSIÓN		
T (min)	Presión Vertical kg/cm <sup>2</sup>	Presión Lateral kg/cm <sup>2</sup>	T (min)	Presión Vertical kg/cm <sup>2</sup>	Presión Lateral kg/cm <sup>2</sup>
200	0,000	0,000	8600	0,345	0,195
500	0,164	0,000	10000	0,420	0,253
950	0,304	0,204	11250	0,401	0,290
1650	0,295	0,180	13800	0,425	0,294
2250	0,353	0,245	14700	0,400	0,298
4750	0,340	0,198	15750	0,415	0,308
5100	0,361	0,233	16250	0,412	0,281
7200	0,309	0,188	19350	0,415	0,294

**D-LG-1**

Presión de Expansión, kg/cm<sup>2</sup>

Tiempo, min

▲ Presión Vertical kg/cm<sup>2</sup>    ◆ Presión Lateral kg/cm<sup>2</sup>

PRESIÓN DE EXPANSIÓN		
VERTICAL	<b>0,425</b>	Kg/cm <sup>2</sup>
LATERAL	<b>0,308</b>	Kg/cm <sup>2</sup>

PRESION DE EXPANSION DE EXPANSIÓN VERTICAL Y LATERAL																			
MUESTRA: <u>D-LG-2</u>			OBSERVACIONES: <u>Lomas de la Guadalupe, Ocumare, Edo. Miranda</u>																
Equipo	Dispositivo 3D		Datos de la muestra				Cálculo de humedades												
Datos del dispositivo			Parámetro	Inicial	Final	Prof	PT	PI	PF	H <sub>2</sub> O	Ws	%H							
Altura	cm	4,935	W <sub>w</sub>	gr	172,12	214,66	Inicial	10,40	17,37	16,85	0,52	6,45	8,06						
Ancho	cm	4,895	W <sub>s</sub>	gr	159,28	159,28	1 cm	10,10	22,22	19,40	2,82	9,30	30,32						
Prof	cm	5,090	Humedad (%)		8,06	34,77	2 cm	7,58	23,2	19,3	3,85	11,72	32,85						
Volumen	cm <sup>3</sup>	122,96	ρ (gr/cm <sup>3</sup> )		1,400	1,746	3 cm	7,5	20,5	17,3	3,29	9,75	33,74						
			ρ <sub>d</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )		1,295	1,295	4 cm	9,87	21,8	18,7	3,13	8,79	35,61						
							5 cm	10,4	26,1	21,5	4,59	11,12	41,33						
PRESIÓN DE EXPANSIÓN						PRESIÓN DE EXPANSIÓN													
T (min)	Presión Vertical kg/cm <sup>2</sup>		Presión Lateral kg/cm <sup>2</sup>		T (min)	Presión Vertical kg/cm <sup>2</sup>		Presión Lateral kg/cm <sup>2</sup>											
200	0,000		0,000		7000	0,274		0,205											
700	0,241		0,028		7850	0,319		0,233											
1700	0,204		0,002		9000	0,281		0,212											
2500	0,230		0,004		10800	0,311		0,235											
3000	0,211		0,013		13500	0,294		0,191											
3350	0,271		0,204		16250	0,311		0,230											
4800	0,270		0,229		17850	0,314		0,210											
5600	0,250		0,188		19300	0,314		0,230											
D-LG-2																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">PRESIÓN DE EXPANSIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>VERTICAL</td> <td style="color: red;">0,319</td> <td>Kg/cm<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>LATERAL</td> <td style="color: red;">0,235</td> <td>Kg/cm<sup>2</sup></td> </tr> </tbody> </table>											PRESIÓN DE EXPANSIÓN			VERTICAL	0,319	Kg/cm <sup>2</sup>	LATERAL	0,235	Kg/cm <sup>2</sup>
PRESIÓN DE EXPANSIÓN																			
VERTICAL	0,319	Kg/cm <sup>2</sup>																	
LATERAL	0,235	Kg/cm <sup>2</sup>																	

PRESION DE EXPANSION DE EXPANSIÓN VERTICAL Y LATERAL														
MUESTRA: <u>D-BENT-1</u> OBSERVACIONES: <u>BENTONITA COMERCIAL WYOMING, CANADA</u>														
Equipo	Dispositivo 3D			Datos de la muestra				Cálculo de humedades						
Datos del dispositivo				Parámetro	Inicial	Final	Prof	PT	PI	PF	H <sub>2</sub> O	Ws	%H	
Altura	cm	4,935		W <sub>w</sub>	gr	134,20	179,44	Inicial	10,40	15,54	14,99	0,55	4,59	11,98
Ancho	cm	4,895		W <sub>s</sub>	gr	119,84	119,84	1 cm	7,51	17,67	15,17	2,50	7,66	32,64
Prof	cm	5,090		Humedad (%)		11,98	49,73	2 cm	10,4	25,8	21,2	4,61	10,79	42,72
Volumen	cm <sup>3</sup>	122,96		ρ (gr/cm <sup>3</sup> )		1,091	1,459	3 cm	8,6	25,9	20,2	5,74	11,57	49,61
				ρ <sub>d</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )		0,975	0,975	4 cm	9,89	26,1	20,5	5,59	10,65	52,49
								5 cm	10,1	27,6	20,4	7,29	10,24	71,19
PRESIÓN DE EXPANSIÓN						PRESIÓN DE EXPANSIÓN								
T (min)	Presión Vertical kg/cm <sup>2</sup>		Presión Lateral kg/cm <sup>2</sup>		T (min)	Presión Vertical kg/cm <sup>2</sup>		Presión Lateral kg/cm <sup>2</sup>						
0	0,000		0,000		9000	0,494		0,335						
200	0,115		0,090		11600	0,585		0,371						
1200	0,690		0,514		13500	0,670		0,452						
1900	0,781		0,550		14500	0,616		0,407						
3000	0,752		0,500		17550	0,600		0,452						
4000	0,605		0,451		18750	0,568		0,435						
6000	0,528		0,381		19500	0,469		0,345						
7500	0,461		0,355		20200	0,481		0,340						
<p style="text-align: center;"><b>D-BENT-1</b></p> <p style="text-align: center;">Presión de Expansión, kg/cm<sup>2</sup></p> <p style="text-align: center;">Tiempo, min</p> <p style="text-align: center;">▲ Presión Vertical kg/cm<sup>2</sup>    ◆ Presión Lateral kg/cm<sup>2</sup></p>														
<b>PRESIÓN DE EXPANSIÓN</b>														
VERTICAL		<b>0,781</b>		Kg/cm <sup>2</sup>										
LATERAL		<b>0,550</b>		Kg/cm <sup>2</sup>										

PRESION DE EXPANSION DE EXPANSIÓN VERTICAL Y LATERAL													
MUESTRA: D-BENT-2 OBSERVACIONES: BENTONITA COMERCIAL WYOMING, CANADA													
Equipo	Dispositivo 3D		Datos de la muestra				Cálculo de humedades						
Datos del dispositivo			Parámetro	Inicial	Final	Prof	PT	PI	PF	H <sub>2</sub> O	Ws	%H	
Altura	cm	4,935	W <sub>w</sub>	gr	121,66	164,68	Inicial	10,42	15,54	14,98	0,56	4,56	12,28
Ancho	cm	4,895	W <sub>s</sub>	gr	108,35	108,35	1 cm	9,88	16,99	15,30	1,69	5,42	31,18
Prof	cm	5,090	Humedad (%)		12,28	51,98	2 cm	7,5	18,1	15	3,06	7,53	40,64
Volumen	cm <sup>3</sup>	122,96	ρ (gr/cm <sup>3</sup> )		0,989	1,339	3 cm	10,1	26,4	21	5,40	10,85	49,77
			ρ <sub>d</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )		0,881	0,881	4 cm	7,59	24,3	17,9	6,44	10,30	62,52
							5 cm	10,4	23,6	17,9	5,70	7,52	75,80
PRESIÓN DE EXPANSIÓN					PRESIÓN DE EXPANSIÓN								
T (min)	Presión Vertical (kg/cm <sup>2</sup> )	Presión Lateral (kg/cm <sup>2</sup> )	T (min)	Presión Vertical (kg/cm <sup>2</sup> )	Presión Lateral (kg/cm <sup>2</sup> )								
0	0,000	0,000	6900	0,494	0,212								
250	0,005	0,005	8750	0,438	0,224								
1250	0,298	0,175	10000	0,385	0,180								
3000	0,472	0,204	11500	0,425	0,269								
3900	0,497	0,170	15000	0,371	0,227								
4550	0,515	0,204	19000	0,384	0,245								
5250	0,524	0,170	20200	0,420	0,269								
5900	0,534	0,248	21050	0,410	0,260								

**D-BENT-2**

Presión de Expansión, kg/cm<sup>2</sup>

Tiempo, min

▲ Presión Vertical kg/cm<sup>2</sup>    ◆ Presión Lateral kg/cm<sup>2</sup>

PRESIÓN DE EXPANSIÓN		
VERTICAL	0,534	Kg/cm <sup>2</sup>
LATERAL	0,269	Kg/cm <sup>2</sup>

**A.7. ENSAYOS DE RAYOS X Y MEB****Condiciones de medición:**

Sample: Exported by X'Pert SW, Generated by Laboratorio in project Proj

Measurement Date / Time: 18/07/2018 12:41:00 p.m.

Raw Data Origin: PHILIPS-binary (scan) (RD)

Scan Axis: Gonio

Start Position [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]: 5,0100

End Position [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]: 74,9900

Step Size [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]: 0,0200

Scan Step Time [s]: 0,5000

Scan Type: Continuous

Offset [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]: 0,0000

Divergence Slit Type: Fixed

Divergence Slit Size [ $^{\circ}$ ]: 1,0000

Specimen Length [mm]: 10,00

Receiving Slit Size [mm]: 0,1000

Measurement Temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]: 0,00

Anode Material: Cu

K-Alpha1 [ $\text{\AA}$ ]: 1,54060

K-Alpha2 [ $\text{\AA}$ ]: 1,54443

K-Beta [ $\text{\AA}$ ]: 1,39225

K-A2 / K-A1 Ratio: 0,50000

Generator Settings: 10 mA, 10 kV

Diffractionmeter Type: PW3710

Diffractionmeter Number: 1

Goniometer Radius [mm]: 173,00

Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]: 91,00

Incident Beam Monochromator: No

Spinning: No

