

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA EXPANSIVIDAD EN SUELOS
BENTONÍTICOS**

**JENNY CONSTANZA PÉREZ ROJAS
JOHN ALEXANDER ORJUELA ORTIZ**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, D. C
2018**

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA EXPANSIVIDAD EN SUELOS
BENTONÍTICOS**

**JENNY CONSTANZA PÉREZ ROJAS
JOHN ALEXANDER ORJUELA ORTIZ**

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil

**DIRECTOR
JUAN CARLOS RUGE CARDENAS
INGENIERO CIVIL**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, D. C
2018**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación

Director de Investigación
Ingeniero Juan Carlos Ruge

Jurado

Bogotá D.C, 31 de octubre de 2018

DEDICATORIA

A Dios

Por guiarme y permitirme llegar a este punto dándome paciencia y tenacidad para nunca desistir. A mi papá por sus buenos deseos, apoyo académico y moral. A Constanza porque siempre creyó, es la razón de todo.

A Dios por devolverme mi salud y permitirme cumplir este sueño que hace unos años comenzó con el ímpetu de convertirme en una excelente ingeniera.

A mis padres, a toda mi familia por brindarme su apoyo incondicional en este proceso de aprendizaje y formación. A John por ser mi compañero incondicional profesional y de vida.

CONTENIDO

1. GENERALIDADES	6
1.1. ANTECEDENTES.....	6
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
1.3. OBJETIVOS	9
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	10
1.5. ALCANCE Y LIMITACIÓN	11
1.5.1 ALCANCE	11
1.5.2 LIMITACIONES	11
2. MARCO TEORICO	12
2.1. EL SUELO	12
Suelos colapsables	14
2.2. ARCILLAS	18
2.2.1. Minerales de arcilla	19
2.2.2. Caracterización de los suelos expansivos	24
2.2.3. Clasificación de los suelos expansivos.....	27
3. METODOLOGÍA.....	31
3.1. ENSAYO DE LAMBE.....	32
3.2. ENSAYO DE EXPANSIÓN LIBRE	36
3.3. ENSAYO DE CONSOLIDÓMETRO.....	38
4. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	41
4.1. GANULOMETRÍA POR HIDROMETRO	41
4.2. LIMITES DE ATTERBERG	43
4.3. LIMITE DE CONTRACCIÓN.....	44
4.4. GRAVEDAD ESPECÍFICA	44
4.5. DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)	45
4.6. IMÁGENES SEM.....	45
5. RESULTADOS	50
5.1. LAMBE	50
5.2. EXPANSIÓN LIBRE	52
5.3. CONSOLIDÓMETRO	52
6. ANALISIS DE RESULTADOS.....	60

6.1.	LAMBE	60
6.2.	EXPANSIÓN LIBRE	63
6.3.	CONSOLIDÓMETRO	66
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
8.	BIBLIOGRAFIA.....	82

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 .Predicción de la expansividad a partir del LL e IP	6
Tabla 2 .Predicción de la expansividad a partir de otras metodologías	7
Tabla 3 .Rango de CVP (Lambe 1960)	7
Tabla 4 .Índice de expansión- Potencial de expansión	8
Tabla 5 Expansión libre	8
Tabla 6 Grado de expansión de acuerdo al ensayo de Consolidómetro.	8
Tabla 7 Clasificación de suelos.	12
Tabla 8 Clasificación de suelos expansivos basada en pruebas índice (modificado de Meza, 2005).	27
Tabla 9 Clasificación de suelos expansivos basada en pruebas índice (modificado de Holtz & Gibbs, 1956).	28
Tabla 10 Clasificación de suelos expansivos basado en el Índice Plástico. Kansas Highway Commission (1974) y Chen (1988)	28
Tabla 11 Potencial expansivo del suelo (Ranganatham & Satyanarayana, 1965; Raman, 1967	29
Tabla 12 Dosificaciones de las muestras y ensayos a realizar	32
Tabla 13 Resultados granulometría 75% Bentonita.	41
Tabla 14 Resultados granulometría 50% Bentonita.	41
Tabla 15 Resultados granulometría 75% Bentonita	42
Tabla 16 Resultados granulometría 100% Bentonita	42
Tabla 17 Resultados Límites de Atterberg para cada dosificación de material	43
Tabla 18 Datos y Resultados Límites de Contracción	44
Tabla 19 Gravedad específica de cada muestra	44
Tabla 20 Distribución de micrografías y área porosa para la muestra de Bentonita	47
Tabla 21 Análisis de minerales arcillosos	49
Tabla 22 Resultados Ensayo de determinación del potencial de cambio volumétrico de un suelo empleando el aparato de Lambe	51
Tabla 23 Resultados Ensayo de determinación de suelos expansivos	52
Tabla 24 Resultados del método para medir el potencial de asentamiento o expansión unidimensional de suelos cohesivos	53
Tabla 25 Resultados relaciones de vacíos y altura 25% Bentonita	54
Tabla 26 Resultados etapa de consolidación 25% Bentonita- Deformaciones muestra 1	54
Tabla 27 Resultados etapa de consolidación 25% Bentonita- Deformaciones muestra 2	54
Tabla 28 Resultados etapa de consolidación 25% Bentonita- Deformaciones muestra 3	55
Tabla 29 Resultados relaciones de vacíos y alturas 50% Bentonita	55

Tabla 30 Resultados etapa de consolidación 50% Bentonita- Deformaciones muestra 1	55
Tabla 31 Resultados etapa de consolidación 50% Bentonita- Deformaciones muestra 2	56
Tabla 32 Resultados etapa de consolidación 50% Bentonita- Deformaciones muestra 3	56
Tabla 33 Resultados relaciones de vacíos y alturas 75% Bentonita	56
Tabla 34 Resultados etapa de consolidación 75% Bentonita- Deformaciones muestra 1	57
Tabla 31 Resultados etapa de consolidación 75% Bentonita- Deformaciones muestra 2	57
Tabla 36 Resultados etapa de consolidación 75% Bentonita- Deformaciones muestra 3	57
Tabla 37 Resultados relaciones de vacíos y alturas 100% Bentonita	58
Tabla 38 Resultados etapa de consolidación 100% Bentonita- Deformaciones muestra 1	58
Tabla 39 Resultados etapa de consolidación 100% Bentonita- Deformaciones muestra 2	58
Tabla 40 Resultados etapa de consolidación 100% Bentonita- Deformaciones muestra 3	59
Tabla 41 Resultado índice de expansión para la muestra uno	60
Tabla 42 Resultado índice de expansión para la muestra dos	60
Tabla 43 Resultado índice de expansión para la muestra tres	61
Tabla 42 Resultados índice de expansión promedio de las tres muestras para cada dosificación	61
Tabla 45 Análisis de CVP con base en la Norma INV-132	63
Tabla 46 Análisis de índice de expansión con base en Beltrán Martínez	63
Tabla 46 Análisis de promedio de índice de expansión con base en Norma INV	64
Tabla 48 Análisis de promedio de índice de expansión (Chen)	64
Tabla 49 Análisis del de índice de expansión (Chen)	65
Tabla 50 Análisis del comparativo de Lambe y expansión Libre (González de Vallejo)	65
Tabla 51 Expansión método de Consolidómetro	66
Tabla 52 Análisis Expansión método de Consolidómetro	67
Tabla 53 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 25% Bentonita muestra 1	72
Tabla 54 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 25% Bentonita muestra 2	73
Tabla 55 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 25% Bentonita muestra 3	73
Tabla 56 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 50% Bentonita muestra 1	73

Tabla 57 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 50% Bentonita muestra 2	74
Tabla 58 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 50% Bentonita muestra 3	74
Tabla 59 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 75% Bentonita muestra 1	74
Tabla 60 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 75% Bentonita muestra 2	75
Tabla 61 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 75% Bentonita muestra 3	75
Tabla 62 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 100% Bentonita muestra 1	75
Tabla 63 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 100% Bentonita muestra 2	76
Tabla 64 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 100% Bentonita muestra 3	76

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Diagrama conceptual de niveles de estructura en un mineral de arcilla.	5
Ilustración 2. Distribución de suelos expansivos en el mundo. (Modificado de G.W. Donaldson, 1969)	10
Ilustración 3. Índice de precipitación efectiva.	17
Ilustración 3. Diagrama de estructura de la montmorillonita.	20
Ilustración 5. (a) Láminas de sílice octaédrica, (b) Lámina de Sílice. (c) Lamina de aluminio (d) Lamina octaédrica (gibbsite), (e) Lamina de sílice gibbsite elemental (Después de Grim 1959) (Brajada Das).....	21
Ilustración 6. Estructura cristalina de la montmorillonita (modificado de Grim, 1968 (9))	22
Ilustración 7. Doble capa difusa. (Brajada Das)	23
Ilustración 8. Clasificación de la expansividad (McKeen & Hamberg, 1981; Hamberg, 1985)	30
Ilustración 9. Aparato de Lambe	32
Ilustración 10 Índice de expansión Vs Cambio Volumétrico Potencial (CVP)	34
Ilustración 11 Difractograma muestra de Bentonita utilizada.	45
Ilustración 12 Micrografía con área porosa coloreada de rojo.	46
Ilustración 13 Área porosa coloreada de rojo y medidas de longitud de porosidad	47
Ilustración 14 Composición mineralógica	48

GLOSARIO

Adsorción. La adsorción es un proceso en el cual las moléculas o átomos de una fase interpenetran casi uniformemente en los de otra fase constituyéndose una "solución" con esta segunda. Se puede decir que la capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales de las arcillas (superficie específica y porosidad). Proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida). (Barbosa, 2003).

Bentonita. Es un tipo de arcilla de amplia aplicación en diferentes industrias. Esencialmente está constituida por esmectitas (del grupo de las montmorillonitas), que se han formado a partir de la alteración y desvitrificación de rocas volcánicas, generalmente toba o ceniza volcánica. (Instituto Tecnológico Geominero de España).

Evapotranspiración. La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo (Allen, 2006).

Expansividad. Proceso de aumento de volumen de la masa de suelo debido al aumento de una carga vertical; el suelo sufre un proceso inverso que supone una distribución de partículas, por esta razón se genera un incremento de volumen (Lambe, 1972).

Lixiviación. Desplazamiento de sustancias solubles o dispersables (arcilla, sales, hierro, humus) causado por el movimiento de agua en el suelo, y es, por lo tanto, característico de climas húmedos. Esto provoca que algunas capas del suelo pierdan sus compuestos nutritivos, se vuelvan más ácidas y a veces, también se origine toxicidad. (Glosario de Conservación de suelos y Aguas 1963).

Montmorillonita. Tipo de mineral de arcilla esméctica que tiende a dilatarse si se expone al agua. La montmorillonita se forma a través de la alteración de los minerales de silicatos en condiciones alcalinas, en las rocas ígneas básicas, tales como la ceniza volcánica que puede acumularse en los océanos (glossary Oilfield).

Doble capa difusa: Describe la variación del potencial eléctrico próximo a una superficie. Hay una capa eléctrica negativa y rígida en la superficie de los coloides la cual esta equilibrada por una capa difusa de iones. Cuando el suelo se

humedece, la capa que rodea las partículas crece y la superficie no retiene tan fuertemente a los cationes. (Gouy – Chapman, 1913)

Consolidómetro: llamado también edómetro u odómetro; instrumento utilizado en el laboratorio para evaluar las características de compresibilidad, consolidación y de potencial de expansión del suelo. Consiste en un anillo de bronce en el que se coloca la muestra de suelo y un conjunto de mecanismos de aplicación y medición de carga, y de medición de las deformaciones resultantes. (Normas ASTM D2435 y D4186)

Propiedad índice: conjunto de características de un suelo que permiten diferenciarlo de otros de su misma clase. Las propiedades índice pueden dividirse en propiedades de las partículas y propiedades de la masa de suelo. Las propiedades índice de las partículas son tamaño, forma, densidad o gravedad específica y mineralogía; las propiedades índice de la masa del suelo son granulometría, densidad o peso unitario, porosidad, relación de vacíos, humedad, saturación, plasticidad (Hoyos, 2001)

Potencial de expansión: Cambio volumétrico de un suelo inalterado, secado al aire, cuando se le satura bajo una presión de 7 kPa. (Holtz, 1959). Expansión experimentada por una muestra de suelo compactado con su contenido de humedad óptima y su densidad seca máxima estándar, expresada como un porcentaje de su volumen original, cuando se le coloca en un edómetro y se anega bajo una presión vertical de 7 kPa (Seed, 1962; Normas ASTM D3877 y D4829)

Microscopio electrónico de barrido o SEM: instrumento que permite la observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos, entregando información morfológica del material analizado. A partir de él se producen distintos tipos de señal que se generan desde la muestra y se utilizan para examinar muchas de sus características. (Boletín Virtual IIES)

RESUMEN

El estudio de la actividad fisicoquímica de las arcillas es esencial para determinar su comportamiento en una masa de suelo ya que este puede influir de forma eficaz o inadecuada de acuerdo al uso ingenieril que se le vaya a dar al suelo, información indispensable para los estudios geotécnicos en cualquier proyecto de construcción civil.

La presente investigación, basada en estudios bibliográficos analiza experimentalmente la expansividad de suelos con diferente contenido de montmorillonita conocida comercialmente como Bentonita. Para esto se realizaron ensayos petrográficos, ensayos índices y microestructura mediante imágenes SEM, (*Scanning Electron Microscope*). De los cuales se obtuvieron importantes resultados del potencial de expansión de este tipo de suelos con un alto porcentaje en contenido de la partícula de la montmorillonita.

Los ensayos índices, indican que, a mayor índice plástico y límite de contracción, el suelo posee un potencial de expansión alto. El potencial de cambio de volumen arroja un peligro de expansión crítico, cuando este es mayor a seis. De ahí la importancia en este tipo de estudios para lograr una detección a tiempo de la presencia de este tipo de suelos en los estudios previos a un proyecto de ingeniería.

Palabras Claves: Arcilla, Montmorillonita, petrográficos, expansión, índices.

ABSTRACT

The study of the physicochemical activity of clays is essential to determine their behavior in a soil mass as this can influence effectively or inadequately according to the engineering use that is going to give the soil, indispensable information for geotechnical studies in any civil construction project.

The present investigation, based on bibliographic studies, experimentally analyzes the expansiveness of soils with different montmorillonite content commercially known as Bentonite. For this, petrographic tests, index tests and microstructure were performed using SEM images (*Scanning Electron Microscope*). Of which important results were obtained of the expansion potential of this type of soil with a high percentage of the montmorillonite particle content.

The tests indices, indicate that, with higher plastic index and limit of contraction, the soil has a high expansion potential. The potential for volume change throws a danger of critical expansion, when this is greater than six. Hence the importance in this type of studies to achieve a timely detection of the presence of this type of soil in the studies prior to an engineering project.

Key Words: Clay, Montmorillonite, petrographic, expansion, index

INTRODUCCIÓN

Los suelos expansivos de acuerdo con su configuración estructural presentan cambios volumétricos importantes cuando son sometidos a ciclos de humedecimiento y secado. Cuando estos suelos funcionan como material de fundación, (en especial de estructuras livianas) pueden ocasionar daños cercanos a los 2.3 billones de dólares anuales, solamente en los Estados Unidos, este valor es superior a los daños ocasionados por inundaciones, huracanes, tornados y terremotos, incluso si se analizan de manera combinada¹. El daño a la infraestructura (cimentación de una determinada construcción) por los suelos expansivos cuesta cerca de 9 mil millones de dólares por año².

Por tal razón estudiar el mecanismo de acción que ocurre estructuralmente en la masa de suelo expansiva, ha sido hasta hoy día un reto importante dentro del ámbito de la geotecnia. Se han desarrollado diferentes ensayos de laboratorio, estabilizantes químicos, metodologías, modelos constitutivos, matemáticos, entre otras técnicas para identificar y entender el comportamiento mecánico de este tipo de materiales.

El desbalance de electronegatividad que originalmente presenta una lámina de arcilla cuando se encuentra en un estado sólido, se equilibra cuando cationes de agua o incluso de otros iones de intercambio, rodean la lámina de arcilla generando una capa con cierta atracción electroquímica, conocida como doble capa difusa. Debido al valor elevado de la superficie específica de las arcillas, particularmente en suelos montmorilloníticos, los cuales hacen parte de este estudio, el agua puede localizarse y rodear el área disponible entre las láminas de arcilla, que puede ser de cientos de metros cuadrados en solo un gramo de material. Por esta razón las arcillas son susceptibles de hincharse cuando el agua penetra su estructura, y contraerse en el caso contrario.

En los materiales arcillosos con potencial expansivo de acuerdo a análisis micromecánicos recientes es posible definir una configuración doble, una macroestructura que ilustra el ensamble entre partículas de limo y arcilla y una microestructura que reproduce la estructura interna de estas agregaciones (Ver Figura 1)³.

La investigación en curso pretende analizar el cambio volumétrico dado por la expansividad en diferentes contenidos de materiales bentoníticos, mediante diferentes técnicas experimentales normalizadas bajo estándares internacionales. Se espera correlacionar los datos obtenidos entre los resultados de cada ensayo y extrapolarlos a problemáticas reales.

¹ Kerrane, 2004. What Are Expansive Soils? (Post). Benson, Kerrane, Storz & Nelson, P.C. available in <http://www.bensonpc.com/blog/post/what-are-expansive-soils>

² Mitigation of expansive soils damage <http://www.uta.edu/ce/nsf/reu/docs/expansive%20soils%20pp.pdf>

³ Mašín, D.2017. Coupled Thermohydromechanical Double-Structure Model for Expansive Soils. J. Eng. Mech., 2017, 143(9): 04017067.

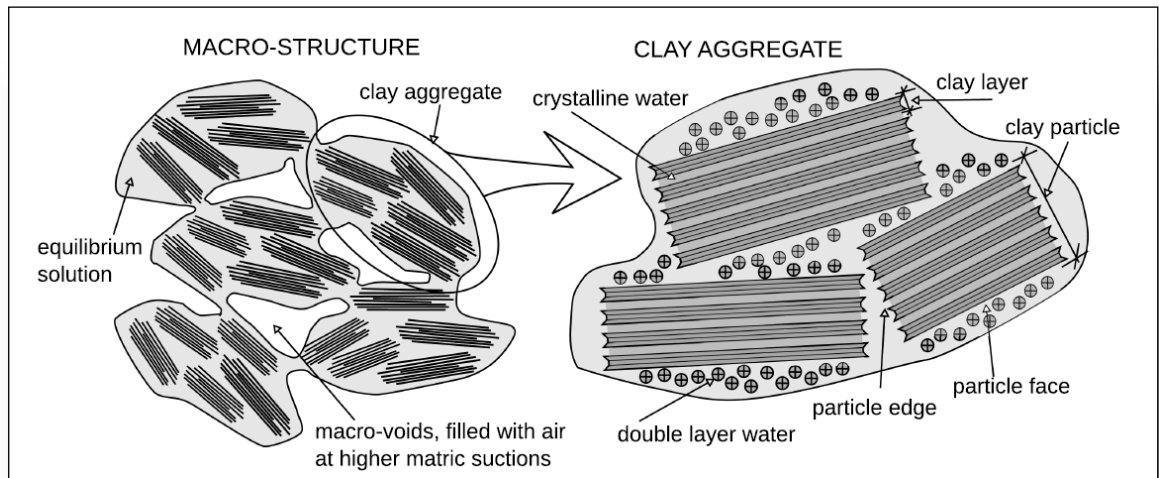


Ilustración 1. Diagrama conceptual de niveles de estructura en un mineral de arcilla.⁴

⁴ Mašín, D.2017. Coupled Thermohydromechanical Double-Structure Model for Expansive Soils. J. Eng. Mech., 2017, 143(9): 04017067.

1. GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

Entender la manera como se obtiene cualitativa o cuantitativamente la expansividad de un suelo, permite contextualizar la actual propuesta dentro de los antecedentes relacionados directamente con el alcance de la investigación. Tal vez el ensayo más difundido en el mundo geotécnico para analizar la expansión del suelo es conocido como “Determinación del potencial del cambio volumétrico del suelo empleando el aparato de Lambe” regido localmente mediante la norma INV E-120-13⁵ y el *Standard Test Method for Expansion Index of Soils* normalizado por la ASTM D4829–11⁶.

El método seguido por la norma INV E-130-13 básicamente consiste en estimar la presión de expansión que se produce en un espécimen de suelos compactado bajo ciertas especificaciones, cuando es inmerso en el aparato utilizado para tal efecto⁷. Esta estimación es importante, ya que dependiendo del mineral arcilloso que conforme el suelo fino, los cambios volumétricos ocasionados por diferentes contenidos de humedad, puede causar patologías en algunas estructuras. Es esencial para estos suelos problemáticos poder detectarlos en etapas tempranas del proyecto geotécnico, puesto que es difícil conocer la presencia de suelos expansivos mediante ensayos índice o simple inspección.

Otro medio para determinar los cambios volumétricos de un suelo fino por alteraciones en su humedad es a través del índice de expansión libre. Este ensayo permite medir el aumento de volumen experimentado en un suelo cuando no existen confinamientos al sumergir la muestra en agua. La norma que rige el ensayo en Colombia es la INV E-132-13⁸.

Además de los métodos expuestos existen otras técnicas para predecir la expansividad de un suelo a partir de ensayos índice (Tabla 1).

Tabla 1 .Predicción de la expansividad a partir del LL e IP⁹

Grado de expansión	Límite Líquido		Índice de Plasticidad		
	Chen (1975) ¹⁰	Norma IS - 1948 ¹¹	Holtz y Gibbs	Chen (1975)	Norma IS - 1948
Bajo	< 30	20 – 35	< 20	0 - 15	< 12

⁵ Norma INVIAS. 2013. INV E-120-13: Determinación del potencial del cambio volumétrico del suelo empleando el aparato de Lambe

⁶ ASTM. 2011. Standard Test Method for Expansion Index of Soils

⁷ T.W. Lambe. 1960. The Character and Identification of Expansive Soils, Soil PVC Meter, A Technical Studies Report F.H.A.-701, Federal Housing Administration, Washington 25 D.C

⁸ Norma INVIAS. 2013. INV E – 132 – 13. Determinación de suelos expansivos

⁹ Idem a referencia 5.

¹⁰ F.H. Chen. 1975. Foundations on Expansive Soils 1st Edition. ISBN: 9780444601667. Elsevier. p.p. 295

¹¹ IS:2720 (Part 40) 1977

Medio	30 – 40	35 – 50	12 - 34	10 - 35	12 – 33
Alto	40 – 60	50 – 70	23 - 45	20 - 55	23 – 32
Muy alto	> 60	70 – 90	> 32	> 35	> 32

En la revisión bibliográfica realizada se describen otras metodologías para hallar la expansividad, mostradas en la Tabla 2. Donde LC es el límite de contracción, IC el índice de contracción igual a la diferencia entre el límite plástico y el límite de contracción. Los ensayos realizados en condiciones edométricas deben ser realizados para sobrecargas de 7 kPa, en diferentes condiciones que se describirán con detalle en la metodología. Para más detalles consultar (Puvvadi et al, 1987¹²; Sridharan & Prakash, 2000¹³).

Tabla 2 .Predicción de la expansividad a partir de otras metodologías¹⁴

Grado de expansión	Contenido de coloides (% <0.001 mm)	LC	IC	Índice de expansión libre	% de expansión en odómetro (Holts y Gibbs)	% de expansión en edómetro (Seed et al)
Bajo	< 17	>13	< 15	< 50	< 10	0 – 1.5
Medio	12 – 27	8 – 18	15 – 30	50 – 100	10 – 20	1.5 – 5.0
Alto	18 – 37	6 - 12	30 – 60	100 – 200	20 – 30	5.0 – 25
Muy alto	> 27	< 10	> 60	> 200	> 30	> 25

Como método indirecto existe la determinación del *Potencial de cambio volumétrico* (CVP) del suelo esta fue desarrollada por Lambe (1960) bajo los auspicios de la Federal Housing Administration (USA). Las muestras son primeramente compactadas en el Consolidómetro de anillo fijo con energías específicas de 2,638 kJ/m³ (26,87 kgcm/cm³). Después se aplica una presión inicial de 1,380 kN/m² y se agrega agua la muestra la cual está parcialmente restringida de la expansión vertical por un anillo de carga. La lectura del anillo de carga se toma después de dos horas y se convierte a presión, siendo designada índice de expansión. Lambe (1960) estableció las siguientes categorías:

Tabla 3 .Rango de CVP (Lambe 1960)

Rango de CVP	Peligro de expansión
Menos de 2	No crítico
2-4	Marginal
4-6	Crítico
Mayor de 6	Muy crítico

¹² V. Puvvadi, V. Sivapullaia, G. Thallak, G. Sitharam & S. Kanakapura. 1987. Modified free swell index for clays. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 10, No. 2, pp 80–85.

¹³ A. Sridharan & K. Prakas. 2000. Classification procedures for expansive soils. Proc. Institution of Civil Engineers, 143, pp 235–240.

¹⁴ Idem a referencia 5.

El método CVP no mide en sí mismo el potencial de expansión. El verdadero potencial medido para una arcilla puede ser mucho mayor. El método del CVP puede utilizarse únicamente en forma comparativa entre varios suelos expansivos.

La prueba de Índice de expansión (ASTM D4829), Anderson y Lade, 1981. En esta prueba una muestra de suelo es remoldeada dentro de un anillo con un diámetro estándar de 4" (102 mm) y 1" (25 mm) de alto con un grado de saturación cerca de 50%. Una sobrecarga de 1lb/in² (6,9 kPa) es aplicada, y entonces la muestra es saturada y no se permite moverla hasta alcanzar un cierto valor o después de 24 horas. La cantidad de expansión es expresada en términos del índice de expansión como indica la siguiente tabla:

Tabla 4 .Índice de expansión- Potencial de expansión

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

Fuente: Beltrán Martínez

De acuerdo a la norma INV-132-13, el potencial de expansión por medio del ensayo de expansión libre se pueden obtener resultados de la siguiente forma:

Tabla 5 Expansión libre¹⁵

Grado de expansión	Índice de expansión libre (%)
Bajo	<50
Medio Alto	50-100
Alto	100-200
Muy Alto	>200

El índice de potencial de expansión con base en la norma INVIAS 132- 13 para el ensayo de Consolidómetro, presenta la siguiente tabla:

Tabla 6 Grado de expansión de acuerdo al ensayo de Consolidómetro.

Grado de expansión	Porcentaje de expansión Odómetro (Holtz Gibbs)	Porcentaje de expansión Odómetro (Seed)
Bajo	<10	0-1.5
Medio	10-20	1.5-5
Alto	20-30	5-25

¹⁵<http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/ensayos-laboratorio-suelos-expansivos/>

Grado de expansión	Porcentaje de expansión Odómetro (Holtz Gibbs)	Porcentaje de expansión Odómetro (Seed)
Muy alto	>30	>25

Fuente: INV- 132-13

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como se ha planteado en los apartes anteriores, la identificación detallada y temprana de suelos problemáticos como los expansivos, colapsables, dispersivos, entre otros, implica una serie de ensayos especializados, debido a que los parámetros índice existentes y la simple inspección, no son herramientas certeras a la hora de decidir si un suelo tiene carácter expansivo. Por esta razón se torna importante conocer desde el pregrado, en este caso experimentalmente, cual es el comportamiento de este tipo de suelos, cubriendo la mayoría de ensayos que se conocen en la literatura, que permiten detectar la potencialidad expansiva y su aplicación en proyectos geotécnicos reales.

De acuerdo con las ideas principales expuestas, la pregunta de investigación del problema que mejor puede englobar el alcance del proyecto es: ¿Considerando el espectro completo de ensayos para estimar la expansividad en arcillas, es posible detectar de manera temprana y entender el comportamiento problemático de este tipo de suelos?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la susceptibilidad a cambios volumétricos de suelos bentoníticos mediante diferentes ensayos de laboratorio.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar mediante ensayos índices y petrográficos los materiales involucrados en la investigación.
- Realizar los ensayos de laboratorio necesarios para estimar la expansividad de los suelos preparados con diferentes porcentajes de material montmorillonítico.
- Determinar la expansividad de las arcillas por medio del análisis de los resultados de ensayos de laboratorio.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Como se ha mencionado hasta el momento detectar de manera sencilla un suelo expansivo no es una tarea fácil, se debe tener una amplia experiencia en la temática para que partir de ensayos índice, un ingeniero geotecnista pueda identificar un suelo expansivo. Por tal razón familiarizarse con los ensayos especializados que estiman el cambio volumétrico es este tipo de suelos es una herramienta importante o la que debe contar un ingeniero, debido a la incertidumbre que puede generar la presencia de este tipo de suelos problemáticos en un proyecto geotécnico.

Como se puede analizar en la Figura 1, generalmente los suelos expansivos están relacionados con zonas de clima tropical semiáridas en la mayoría de los casos, esto no excluye hallar suelos expansivos en otras situaciones. De acuerdo con Méndez & Pineda (2011)¹⁶ en sitios donde existe pocos niveles de precipitación, sumada a procesos de evapotranspiración elevados pueden contribuir a tener arcillas con estructuras especiales como la montmorillonita, debido a la escasa lixiviación.



Ilustración 2. Distribución de suelos expansivos en el mundo. (Modificado de G.W. Donaldson, 1969)¹⁷

¹⁶ A. Mendez & V.M. Pineda. 2011. Comportamiento de cimentaciones en suelos expansivos. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.

¹⁷ G.W. Donaldson. 1969. The occurrence of problems on heave and the factor affecting its nature. Proceeding of 2nd international Research and Engineering Conference on Expansive Soils. A.E.M. Press, Texas, pp. 25-36-

1.5. ALCANCE Y LIMITACIÓN

1.5.1 ALCANCE

El alcance se limita a la caracterización e identificación del potencial expansivo de suelos con contenidos de montmorillonita, mediante la aplicación de diferentes ensayos de laboratorio revisados en la literatura como los idóneos para este tipo de trabajo. Se usarán material bentónicos de uso industrial.

1.5.2 LIMITACIONES

En el momento las limitaciones están en no poder realizar todos los ensayos que el estado del arte recomienda para la investigación abordada. NO existen los equipos en la universidad para desarrollar todos los ensayos.

No se encuentra una amplia base que contenga descripción y zonificación de suelos expansivos en Colombia. La información encontrada y que hace parte de este documento es un estudio de expansión de suelos arcillosos, producto del primer encuentro nacional de ingenieros de suelos y de estructuras en el año 1991. En cuanto a estudios de investigación realizados a través de equipos de Consolidómetro no existen referencias puntuales que ayuden al objetivo de esta investigación.

2. MARCO TEORICO

2.1. EL SUELO

El suelo se origina principalmente del ciclo de las rocas, con base en su origen las rocas pueden clasificarse en: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Los granos minerales que forman la fase sólida de un agregado del suelo son el producto de la intemperización y la erosión de la roca. El tamaño de los granos individuales varía en un amplio intervalo. Muchas de las propiedades físicas del suelo son dictadas por el tamaño, la forma y la composición química de los granos¹⁸.

Producto de la meteorización y del transporte de la roca intemperizada se generan los suelos transportados, dentro de los que encontramos:

Suelos glaciales: formados por el transporte y la deposición de los glaciares.

Suelos aluviales: transportados por corrientes de agua y depositados a lo largo de los arroyos.

Suelos lacustres: formados por deposición en los lagos.

Suelos marinos: formados por deposición en los mares.

Suelos eólicos: transportados y depositados por el viento¹⁹.

Conforme en lo expuesto Por Braja Das, dependiendo del tamaño de la partícula de suelo estos se dividen en: gravas, arenas, limos y arcillas, obedeciendo a la organización por la que asigne su clasificación granulométrica, estos también reciben tamaño y nombre. A continuación, se presenta una tabla de clasificación por diferentes organizaciones por su tamaño.

Tabla 7 Clasificación de suelos.

Nombre de la organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT)	≥ 2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	≤ 0.002
Departamento de agricultura de EU (USDA)	≥ 2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	≤ 0.002
Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del transporte (AASHTO)	76 .2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	≤ 0.002

¹⁸ Das, Braja. Fundamentos de ingeniería geotécnica: Origen de los depósitos del suelo, tamaño de grano y forma. Cuarta edición. México D.F. Cenage Learning. 2013. Página 16.

¹⁹ Das, Braja. Fundamentos de ingeniería geotécnica: Origen de los depósitos del suelo, tamaño de grano y forma. Cuarta edición. México D.F. Cenage Learning. 2013. Página 20.

Nombre de la organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de E.U., Oficina de Reclamación de E.U., Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (Limos y arcillas \leq 0.075)	

Fuente: Baraja Das

Los componentes mineralógicos de los diferentes tipos de suelos, que se encuentran generalmente de acuerdo a su tamaño de partícula se describen a continuación²⁰:

Grava: son fragmentos de rocas con partículas ocasionales de cuarzo, feldespato y otros minerales²⁰.

Arena: predominan el cuarzo y el feldespato. A veces también pueden estar presentes granos de otros minerales²⁰.

Limo: son las fracciones microscópicas del suelo que consisten en fragmentos de cuarzo muy finos y algunas partículas en forma laminar que son fragmentos de minerales micáceos²⁰.

Arcilla: son en su mayoría partículas en forma de láminas microscópicas y submicroscópicas de mica, minerales de arcilla y otros minerales. Las arcillas se definen generalmente como partículas menores de 0.002 mm. En algunos casos las partículas de maño entre 0.002 y 0.005 mm también. Las partículas se clasifican como arcilla sobre la base de su tamaño, ya que no pueden contener necesariamente minerales de arcilla. Las arcillas se definen como aquellas partículas “que desarrollan plasticidad cuando se mezclan con una cantidad limitada de agua” (Grim, 1953)²⁰.

Otro tipo de suelos de gran importancia que se debe mencionar y describir son los suelos expansivos, este tipo de suelos generan varios inconvenientes a la hora de cimentar cualquier proyecto de ingeniería civil, puede ocasionar asentamientos diferenciales y actividad de acuerdo a la temporada climática que se está atravesando.

²⁰ Das, Barja. Fundamentos de ingeniería geotécnica: Origen de los depósitos del suelo, tamaño de grano y forma. Cuarta edición. México D.F. Cenage Learning, 2013.

Suelos metaestables: Suelos expansivos y suelos colapsables

Los suelos metaestables son los suelos cuyo comportamiento no solo está en dirección directa con las sollicitaciones mecánicas si no también con agentes externos al suelo, como, por ejemplo, variaciones ambientales y factores químicos²¹.

Suelos colapsables

Determinados tipos de suelos pueden sufrir una disminución de volumen a la que se asocia un asentamiento sin necesidad de que les sea aplicada ninguna carga vertical, siendo debido el proceso a una saturación ocurrida.

Este tipo de suelos presenta las siguientes características comunes:

Estructura macroporosa, con índice de relación de vacíos entre relativamente alto, a muy alto.

Granulometría predominantemente fina, con predominio de fracciones de limos y de arcilla. El tamaño de los granos es generalmente poco distribuido y con los granos más grandes escasamente meteorizados. La mayoría de las veces, la cantidad de la fracción arcilla es relativamente escasa, sin embargo, tiene una influencia importante en el comportamiento mecánico de la estructura intergranular²².

Estructura mal acomodada, con partículas de mayor tamaño separadas por espacios abiertos, y unidas entre sí por acumulaciones o "puentes" de material predominantemente arcilloso. En muchos casos existen cristales de sales solubles insertados en tales puentes o uniones arcillosas. (Reginatto 1977)

Suelos expansivos:

La definición de suelo expansivo se hace clara y concisa del autor Beltrán M de 1991:

“Un suelo expansivo puede definirse, como un tipo de suelo que se hincha y contrae causando daños, frecuentemente presenta un contenido coloidal alto, con valores altos de límite líquido, altos índices de plasticidad y de actividad. Pueden ser de origen variado, duros en estado seco, pero se vuelven blandos cuando se les permite absorber agua y pueden ejercer grandes presiones de expansión. La

²¹ Redolfi. 2007. Suelos colapsables. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de ciencias exactas, Físicas y naturales. Área de geotecnia

²²<http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/suelos-expansivos-colapsables>

permeabilidad es muy baja salvo cuando el suelo esta fisurado, seco y el agua puede circular por las grietas abiertas”

Se considera un suelo expansivo aquel que mediante alguna modificación de su estado presenta un incremento en su volumen como consecuencia de la generación de una tensión vertical en el seno de su estructura interna. El principal agente causante de este proceso es el agua. Los componentes del suelo que son susceptibles a presentar este tipo de fenómenos son algunos minerales componentes de las arcillas²².

Los inconvenientes que presentan los suelos expansivos, son sus variaciones en diferentes temporadas climáticas; cuando hay un periodo de lluvia estos suelos tienden a exhibir elevada actividad, en esta temporada tiende a adsorber el agua que aparece en el incremento de nivel freático, por lo cual sufre un incremento en su volumen. En etapa de sequía, puede revelar gran disminución en su volumen, ya que si existen arboles cercanos, estos adsorben toda el agua depositada en el suelo, lo secan abruptamente ocasionando hundimientos y por con siguiente a las construcciones cercanas. Esta actividad es llamada estacionaria por lo que depende directamente de la temporada climática por la que se está atravesando²³.

Por la actividad estacionaria, en el país se llevó a cabo un estudio en el año 1991 durante el primer encuentro nacional de ingenieros de suelos y de estructuras en por el ingeniero Lisandro Beltrán Moreno, en el que se permitió establecer el estudio por el daño que se puede generar en las construcciones livianas existentes en el país, este también evidencio que en las zonas áridas es menor este riesgo por las bajas temporadas de lluvia que se presentan en el año²³.

De la investigación anterior se extrajeron los siguientes aspectos más relevantes que aplican para nuestro país²³:

En un suelo denso se encuentran más partículas de arcillas por unidad de volumen que en un suelo suelto, por lo tanto, cuando se saturan muestras de los dos tipos, se presenta un mayor cambio en el más denso. (Holtz y Gibbs, 1954) y (Holtz, 1959)²⁴.

De los factores ambientales Donaldson (1969) estableció de una manera muy adecuada el papel de los factores ambientales, señalando que los principales son el climático, fundamentales la precipitación y la evaporación. Estos se encuentran muy relacionados en el proceso de cambio de volumen con la humedad existente

²³ Beltrán ML, Expansión de los suelos arcillosos I encuentro nacional de ingenieros de suelos y estructuras 1991 Bogotá. Colombia

²⁴ Beltrán ML, Expansión de los suelos arcillosos I encuentro nacional de ingenieros de suelos y estructuras 1991 Bogotá. Colombia

en el suelo. Donaldson explica la importancia en la relación precipitación versus expansión. Si la precipitación anual sobre el sitio excede la evaporación, bajo estas condiciones el contenido de humedad de los suelos se encontrará por encima del límite de cambio de volumen y los movimientos se generarán solo en épocas de sequía. En las regiones semi áridas y árida donde la evaporación excede la precipitación la humedad natural de la mayoría de los suelos se encuentra por debajo del límite superior de cambio de volumen, de tal forma que cualquier cambio de volumen estará acompañado de un cambio de humedad. Donde existe una diferencia marcada entre la época seca y la época humedad también presentara fluctuaciones estacionales considerables. En zonas desérticas el contenido de humedad se presenta virtualmente constante todo el año.

De otra parte, Gromoko (1974) menciona que la oficina del clima de los Estados Unidos asigno un parámetro climático a todas las regiones de los Estados Unidos encontrando la incidencia desfavorable de las condiciones climáticas en los problemas relacionados con los suelos expansivos, este parámetro se estimó considerando las siguiente cinco variables meteorológicas:

Precipitación anual

Grado de uniformidad de distribución de precipitación

Numero de ocurrencias de la precipitación

Duración de cada ocurrencia

Cantidad de precipitación durante cada ocurrencia.

Cadena y Palomino aplicaron el índice de precipitación efectiva de Thornthwite a los datos meteorológicos disponibles en nuestro país de precipitación, vaporación y temperatura y obtuvieron el mapa preliminar del índice de precipitación efectiva de Colombia:

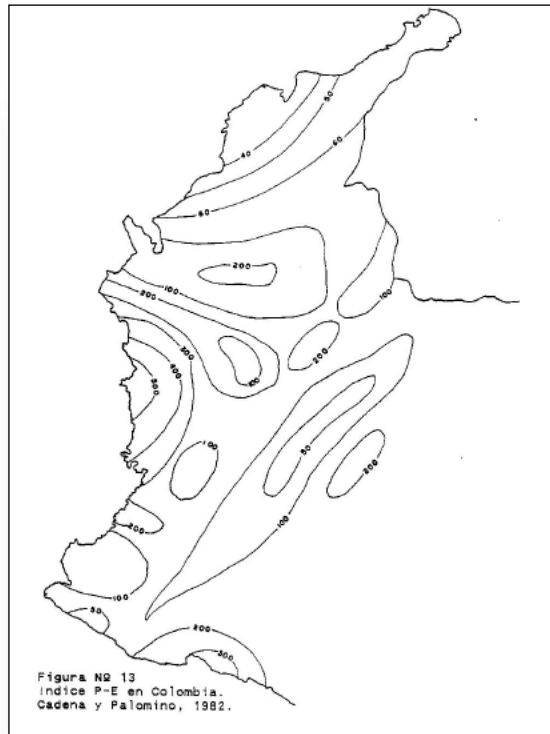


Ilustración 3. Índice de precipitación efectiva.²⁵

Las líneas se trazaron teniendo en cuenta la orografía y las estaciones donde se poseía la información completa, se encontraron que las siguientes poblaciones poseen las características de un clima semi árido con un índice de precipitación efectiva menor de 60, el cual combinado con suelos arcillosos superficiales pueden inducir en serios daños en construcciones livianas²⁵:

- Cúcuta (norte de Santander)
- Soledad (Atlántico)
- Santa Catalina (Bolívar)
- Mosquera (Cundinamarca)
- Flandes (Tolima)
- Tuluá (Valle del Cauca)
- Palmira (Valle del Cauca)
- Corozal (Sucre)
- Riohacha (Guajira)
- Ciénaga de oro (Córdoba)

²⁵ Beltrán ML, Expansión de los suelos arcillosos I encuentro nacional de ingenieros de suelos y estructuras 1991 Bogotá. Colombia.

Santa Marta (Magdalena)
Bucaramanga (Santander)

De lo datos anteriores se puede concluir la alta importancia de realizar estudios en suelos expansivos en el país, ya que estos generan daños en construcciones livianas y también pueden generar sobre costo en las cimentaciones de construcciones nuevas y de mayor carga sobre los suelos que se está proyectando actualmente²⁶.

El grado de expansión de estos suelos depende del tipo de minerales arcillosos activos, que son los causantes de la atracción de agua. Estos minerales se caracterizan por tener partículas de tamaños muy pequeños, grandes superficies específicas y cargas eléctricas desbalanceadas. El mineral arcilloso más activo es la montmorillonita (Casadiegos, 2010).

2.2. ARCILLAS

Las arcillas se definen como aquellas partículas “que desarrollan plasticidad cuando se mezclan con una cantidad limitada de agua” (Grim, 1953)

Las arcillas se pueden clasificar de acuerdo a su contenido de minerales y su estructura reticular, en tres grupos caolinitas, ilitas y montmorillonitas.

Caolinitas:

Es el principal constituyente del caolín se deben a la meteorización del feldespato ortoclasa que proviene del granito, generalmente se encuentra en suelos compuestos de sedimento, siendo de color blanco utilizada para la fabricación de porcelanas, cuando su estado es muy puro, se usa en la fabricación de papel. Por otra parte, está formada por una lámina de silicio y una d aluminio, son arcillas estables debido a que las moléculas que las constituyen no dejan penetrar el agua.²⁷

Ilitas:

Son minerales de silicatos, según la clasificación pertenece al grupo de las micas, por esta razón, cuando se meteorizan tiene menos potasio y más agua en su composición, presentándose en forma de hojuelas, micácea y no es expansiva.

Además, es una arcilla no tan expansiva como la bentonita, pertenecen al grupo de las ilitas, las cuales tienen una estructura similar a las montmorillonitas, pero la

²⁶ Beltrán ML, Expansión de los suelos arcillosos I encuentro nacional de ingenieros de suelos y estructuras 1991 Bogotá. Colombia.

²⁷ Parrado Breidy y Toloza Julieth. Determinación de la superficie específica en suelos caoliniticos y Bentoníticos mediante la técnica de adsorción de agua destilada aplicando diferentes gradientes térmicos. Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingenierías. Programa de Ingeniería civil.

separación entre laminas es menor, lo que permite una menor absorción de agua, siendo una arcilla relativamente estable ante la presencia de agua²⁷.

Montmorillonitas:

Es di-octaédrica con sustituciones de capa octaédrica, es un mineral del grupo de los silicatos, y del subgrupo de filosilicatos. Tiene elementos como hidrosilicato de magnesio y aluminio, con otros posibles elementos, es inconsistente ya que se expande al contacto con agua y se vuelve soluble en ácido²⁷.

2.2.1. Minerales de arcilla

J. W. Gruner siguiendo las ideas de Pauling descubrió la estructura de la caolinita. Hoffmann (1933) sugirió un modelo para la montmorillonita, la cual estaba caracterizada por poseer una estructura expansiva.²⁸

Es importante mencionar que el alcance el estudio del proyecto es con arcillas de bentoníticas de mayor porcentaje de contenido de partículas de montmorillonitas, por esta razón se hace a descripción mineralógica de este mineral.

La estructura de la montmorillonita tiene una lámina de gibsita (formada de hidróxido de aluminio), intercalada entre dos láminas de sílice. En la montmorillonita existe sustitución isomorfa de magnesio y hierro para el aluminio en láminas octaédricas, esta estructura no contiene iones de potasio. La partícula de montmorillonita tiene dimensiones laterales de 1000 a 5000 Å (angstrom) y espesores de 10 a 50 Å, la superficie específica es de aproximadamente 800 m²/g. Las partículas de arcilla tienen una carga neta negativa en su superficie, este es el resultado de la sustitución isomorfa y de una ruptura en la continuidad de la estructura en sus bordes²⁰.

²⁸ Garay, Rene y Mena, Miguel. Clasificación de arcillas presentes en los bancos de Guatajiagua, Departamento de Morazán, y facultad multidisciplinaria oriental. Universidad del Salvador. Facultad de ingeniería y arquitectura. Escuela de ingeniería civil.

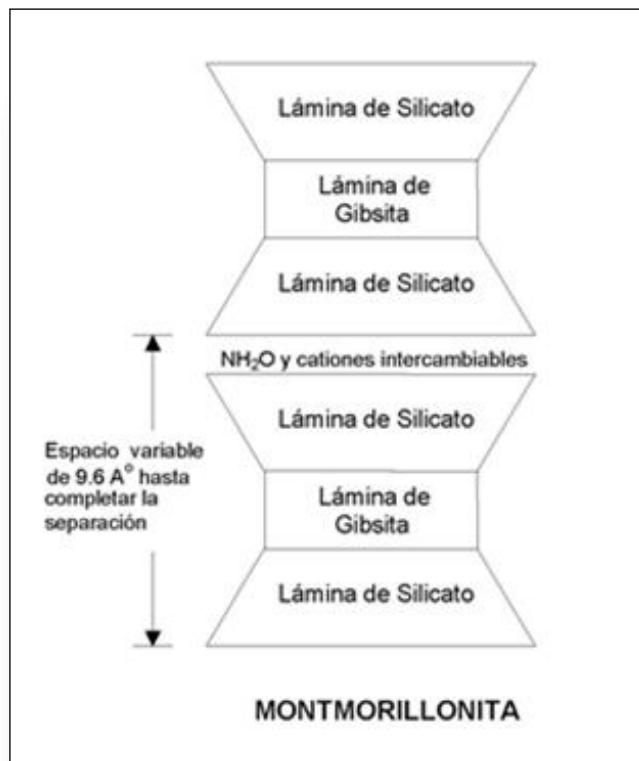


Ilustración 4. Diagrama de estructura de la montmorillonita.²⁹

El bloque estructural de las montmorillonitas está formado por la superposición indefinida de una octaédrica entre dos capas tetraédricas, pero con una unión débil entre sí, permitiendo la penetración de agua con facilidad, como se puede observar en la imagen anterior.

La estructura cristalina de la montmorillonita se caracteriza por tener parecido con la illita, es decir, una lámina de gipsita intercalada entre dos láminas de sílice. En la montmorillonita existe sustitución isomorfa de magnesio y hierro por el aluminio en las láminas octaédricas. Aquí no están presentes los iones de potasio, como en el caso de la illita, y una gran cantidad de agua es atraída al espacio entre las capas. Las partículas de montmorillonita tienen dimensiones laterales de 1000 a 5000 Å y espesores de 10 a 50 Å . La superficie específica es de aproximadamente 800 m^2/g .²⁰

²⁹ <http://www.uta.edu/ce/nsf/reu/docs/expansive%20soils%20pp.pdf>

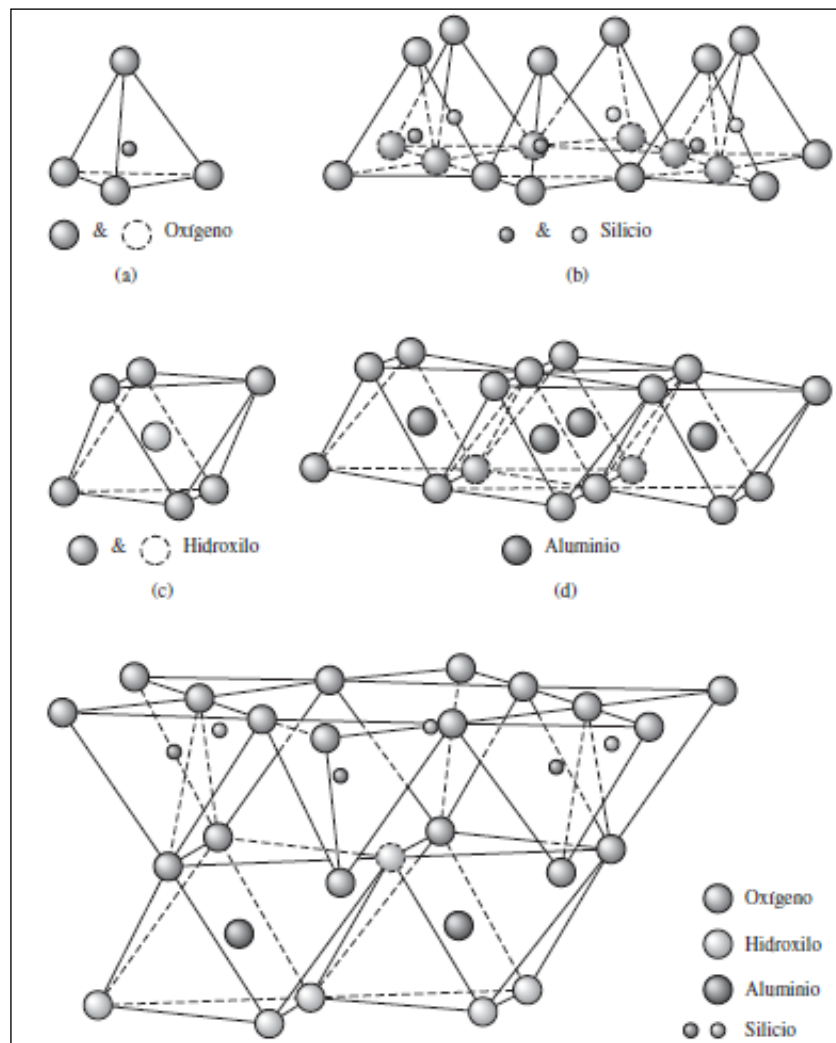


Ilustración 5. (a) Láminas de sílice octaédrica, (b) Lámina de Sílice. (c) Lamina de aluminio (d) Lamina octaédrica (gibbsite), (e) Lamina de sílice gibbsite elemental (Después de Grim 1959) (Braja Das).

De esa forma se obtiene que la estructura cristalina de la montmorillonita sea de la siguiente forma:

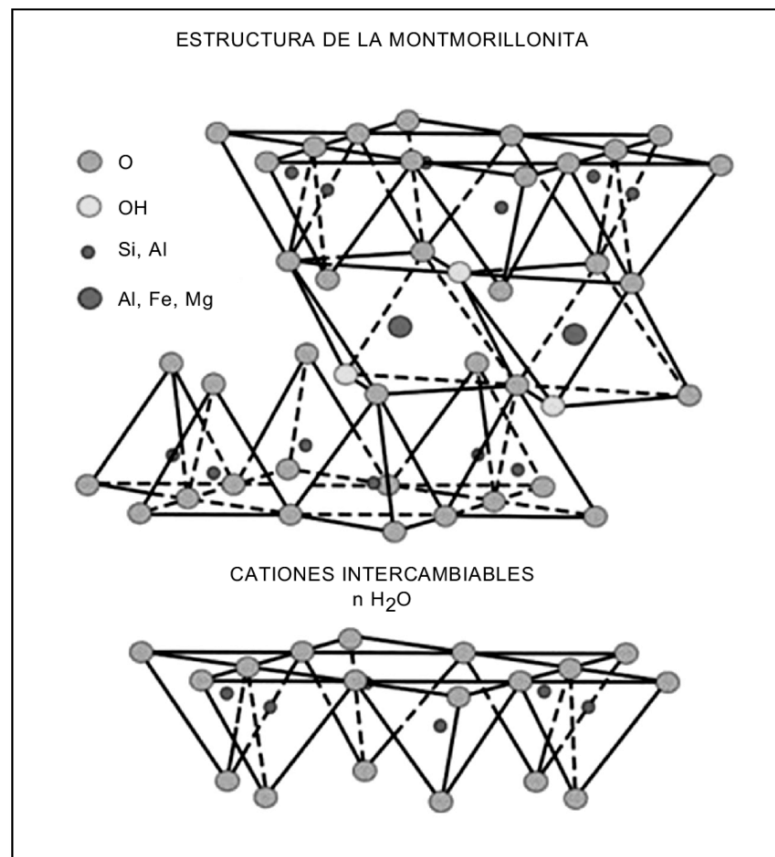


Ilustración 6. Estructura cristalina de la montmorillonita (modificado de Grim, 1968 (9))

La atracción de agua a la montmorillonita a grandes cargas negativas se deriva de superficies específicas mayores. También se producen algunos sitios cargados positivamente en los bordes de las partículas.

En arcilla seca la carga negativa se compensa con cationes intercambiables como Ca^{++} , Mg^{+} , Na^{+} , y K^{+} , rodeando las partículas sostenidas por atracción electrostática, cuando se añade agua a la arcilla estos cationes y un pequeño número de aniones flotan alrededor de las partículas de arcilla, esto es lo que se conoce como la doble capa difusa. La concentración de cationes disminuye con la distancia desde la superficie de la partícula²⁰.

Las moléculas de agua son polares. Los átomos de hidrógeno no están dispuestos de una manera simétrica alrededor de un átomo de oxígeno, si no que se produce en un ángulo de enlace de 105. Como resultado de ello, una molécula de agua

actúa como una pequeña varilla con una carga positiva en un extremo y una carga negativa en el otro, esto se conoce como un dipolo plásticos³⁰.

El agua dipolar es atraída por la superficie cargada negativamente de las partículas de arcilla y por los cationes en la doble capa. Los cationes a su vez son atraídos hacia las partículas del suelo. Un tercer mecanismo por el cual el agua es atraída por las partículas de arcilla es el enlace de hidrógeno en las moléculas de agua son compartidos con los átomos de oxígeno en la superficie de arcilla. Algunos cationes de los poros parcialmente hidratados en el agua son también atraídos a la superficie de las partículas de arcilla. Estos cationes atraen moléculas de agua dipolares. La fuerza de atracción entre el agua y la arcilla disminuye con la distancia desde la superficie de las partículas. Toda el agua que se unió a las partículas de arcilla por la fuerza de atracción se conoce como agua de capa doble. A la capa más interna del agua de capa doble, que está unida con mucha fuerza por la arcilla se le conoce como agua adsorbida esta agua es más viscosa que el agua común. La orientación de agua alrededor de las partículas de arcilla da a los suelos arcillosos sus propiedades plásticas³¹.

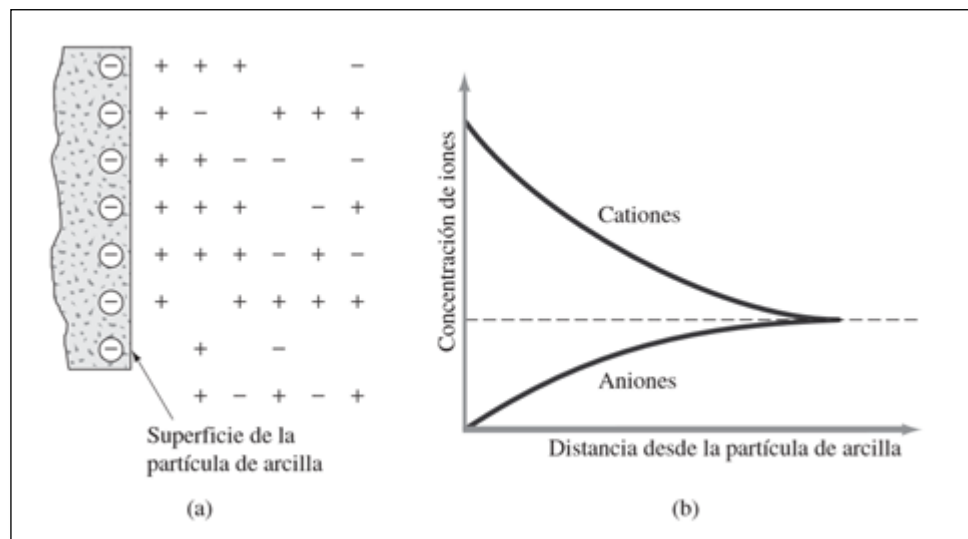


Ilustración 7. Doble capa difusa. (Braja Das)

Es esencial conocer el funcionamiento de desbalance de electronegatividad en una lámina de arcilla cuando se encuentra en un estado sólido, cómo se equilibra cuando cationes de agua o incluso de otros iones de intercambio rodean la lámina formando una capa con cierta atracción electroquímica, conocida como doble capa difusa en suelos montmorilloníticos.

³⁰ Braja M Das

³¹ Braja M Das

2.2.2. Caracterización de los suelos expansivos

La caracterización de los suelos expansivos se realiza por medio de ensayos que permitan evidenciar características específicas de la fracción de suelo y así concluir que la fracción ensayada es un suelo fino y expansivo. El ensayo que permite caracterizar el tamaño de las partículas de suelo es el ensayo de granulometría. Los Límites de Atterberg revelan el comportamiento de los suelos finos en diferentes estados de humedad. Por medio de gravedad específica se puede evaluar la relación de masa de un volumen de una porción de suelo y la masa del mismo volumen en agua destilada.

Ensayo de granulometría:

Este ensayo puede ser realizado por medio de dos métodos; por tamizado que se realiza a partículas de suelo mayores de 75 μm y por medio de hidrómetro que se practica a partículas de suelo menores de 75 μm .

Ensayo de granulometría por hidrómetro:

El ensayo de granulometría por hidrómetro se basa en que las partículas tienen una velocidad de sedimentación que se relaciona con el tamaño de las partículas.

La ley fundamental para realizar análisis granulométrico por hidrómetro es formulada por Stokes, en esta ley se enuncia que si una partícula esférica cae dentro del agua adquiere pronto una velocidad uniforme que depende del diámetro de la partícula, de su densidad y de la viscosidad del agua.

Para la realización del ensayo no se usa una suspensión compuesta de agua y suelo, porque se precipitaría, en muy poco tiempo casi todo el suelo, debido a la formación de flóculos originados por la presencia de diferentes cargas eléctricas en las partículas del suelo, algunas sustancias utilizadas son más ácidas lo que permite tener mayor eficacia en los suelos alcalinos. Se utiliza un agente defloculante que neutralice las cargas eléctricas, permitiendo que las partículas se precipiten de forma individual.

Para el ensayo de hidrómetro existe corrección dependiendo del tipo de hidrómetro empleado, la corrección se hará con la diferencia de la lectura del hidrómetro y un coeficiente que depende del tipo de hidrómetro, para 151 H es la unidad y para 152 H es cero.

Los hidrómetros están calibrados para hacer la lectura al nivel libre del líquido. Al formarse el menisco alrededor del vástago, la lectura correcta no puede hacerse,

ya que las suspensiones de suelo son transparentes, por lo que se necesita leer donde termina el menisco y corregir la lectura sumando la altura del menisco. Esta corrección se hace sumergiendo el hidrómetro en agua destilada y haciendo dos lecturas en la escala; una en la parte superior del menisco (para que el menisco se forme completo, el cuello debe limpiarse con alcohol para eliminar la grasa) y otra siguiendo la superficie horizontal del agua. La diferencia de las dos lecturas nos da la corrección que debe sumarse a las lecturas hechas al estar operando³².

Gravedad específica:

La gravedad específica es la relación entre la masa de un cierto volumen de sólidos a una temperatura dada y la masa del mismo volumen de agua destilada y libre de gas a igual temperatura. La temperatura generalmente usada como referencia es 20° C. Norma 128-13.

Para realizar este ensayo se utiliza un picnómetro y se forma una lechada del suelo a ensayar, es importante realizar la extracción del aire atrapado en la lechada para obtener de forma consistente el valor de la gravedad específica del suelo.

Este ensayo hace relación a las partículas de minerales que aparecen naturalmente y que prácticamente no son solubles en agua. Por lo tanto, la gravedad específica de materiales que contengan sustancias extrañas (como cemento, cal, etc.), materiales solubles en agua (como cloruro de sodio) y suelos que contengan sustancias con gravedad específica menor de uno, requieren un tratamiento especial o una definición diferente de la gravedad específica³³.

Limites

Originalmente, Albert Atterberg definió seis “límites de consistencia” para los suelos finos: el límite superior del flujo viscoso, el límite líquido, el límite de pegajosidad, el límite de cohesión, el límite plástico y el límite de contracción. En el uso actual de la ingeniería el término se aplica solamente a los límites líquido y plástico y, en algunas referencias, también al límite de contracción. Estos límites representan las fronteras entre diversos estados de consistencia de los suelos plásticos. (INV-126-13)

Límite Plástico

Contenido de agua del suelo, expresado en porcentaje, cuando se halla en el límite entre los estados plástico y semisólido. (INV-126-13)

³² <http://suelosyestudio.blogspot.com/2010/06/ensayo-de-granulometria-por-hidrometro.html>

³³ Norma INVIAS. 2013.. INV E-128: determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua.

Índice de plasticidad

Índice de Rango de contenidos de agua, dentro del cual un suelo se comporta plásticamente. Numéricamente, es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. (INV-126-13)

Límite de contracción

Es el contenido máximo de agua, por debajo del cual un secado adicional no causa una disminución de volumen de la muestra de suelo, pero al cual un incremento en el contenido de agua sí produce un aumento en el volumen de la masa de suelo. (INV-127-13)

Microscopio electrónico de barrido (SEM)

SEM (Scanning Electron Microscope) Instrumento que permite la observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos, entregando información morfológica del material analizado. A partir de él se producen distintos tipos de señal que se generan desde la muestra y se utilizan para examinar muchas de sus características. Con él se pueden realizar estudios de los aspectos morfológicos de zonas microscópicas de los distintos materiales³⁴.

El microscopio electrónico de barrido puede estar equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar: un detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secondary Electron Image), un detector de electrones retrodispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image), y un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis e imágenes de distribución de elementos en superficies pulidas³⁵.

³⁴ https://www.ecured.cu/Microscopio_electr%C3%B3nico_de_barrido

³⁵ https://www.ecured.cu/Microscopio_electr%C3%B3nico_de_barrido

2.2.3. Clasificación de los suelos expansivos

En principio si se cita el estudio de Snethen *et al.*, (1975)³⁶, ellos clasificaron en cinco grupos los modos de identificación y clasificación de la expansividad de materiales arcillosos, entre ellos la composición, fisicoquímica, propiedades índice y clasificación del suelo. Por otra parte, la identificación se limita a conocer las propiedades físicas y cambios de volumen relacionadas con la mineralogía y química de la arcilla (Meza, 2005)³⁷

En la Tabla 3 se analizan diferentes técnicas para identificar un suelo expansivo.

Tabla 8 Clasificación de suelos expansivos basada en pruebas índice (modificado de Meza, 2005).

Ensayo	Standard	Propiedad	Parámetro
Límites de Atterberg: LL, LP, LC	ASTM D4308, D4318, D427	Plasticidad, Contracción	IP, Relación de contracción
Contenido de partículas tamaño arcilla	ASTM D-422	Distribución de tamaños de partículas fino-granulares	Porcentaje de finos menor a 2 µm
Difracción de rayos X (XRD)	ASTM STP 479 (1970)	Dimensión de cristales	Espaciamiento basal
Análisis Termodiferencial	Barshad (1965), Mackenzie (1970)	Reacción a tratamientos de calor	Área y amplitud de los picos en la curva térmica
Microscopio Electrónico de barrido	McCrone & Delly (1973)	Tamaño y forma de partículas de arcilla	Imagen visual de las partículas
Espectroscopia infrarroja	Farmer (1974)	Absorción de la radiación infrarroja	Bandas de absorción en el espectro infrarrojo
Capacidad de intercambio catiónico (CEC)	Chapman (1965)	Deficiencia de carga y actividad superficial de partículas de arcilla	CEC (meq/100 g)
Expansión libre	Holtz & Gibbs (1956)	Expansión de una muestra de suelo seco al aire no confinada, no consolidada, en condición saturada.	Expansión libre (%)
Potencial de cambio de volumen	Lambe (1960)	Expansión unidimensional bajo condiciones de deformación controlada de una muestra reconstituida	Índice Lambe (kPa) Índice PVC
Índice de expansión (psi) de una muestra compactada con la	Uniform Building Code	Expansión unidimensional bajo sobrecarga de 7 kPa (1 psi) de una muestra compactada con la humedad correspondiente al 50% de saturación.	Índice de expansión (EI)
Coeficiente de expansión lineal (COLE)	Brasher et al., (1966)	Deformación lineal de un suelo natural secado	COLE y LE (%)

³⁶ D.R. Snethen, F.C. Townsend, L.D. Johnson, D.M. Patrick & P.J. Vedros. 1975. A Review of engineering experience with expansive soils in highway subgrades. FHWA-RD-75-48, Federal Highway administration. Washington, D. C.

³⁷ V.E. Meza. 2005. Influencia de la succión matricial en el comportamiento deformacional de dos suelos expansivos. MS Thesis. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Ensayo	Standard	Propiedad	Parámetro
		desde 33 kPa hasta 1000 MPa (succión de secado al horno)	

En cuanto a la caracterización de los materiales expansivos mediante la clasificación de los mismos, esta presenta limitaciones ya que amalgaman aspectos de la identificación y no miden directamente el potencial de expansión, generando unos rangos de clasificación que en algunos casos no pueden ser aplicables a suelos expansivos en general. En la Tabla 4 se ilustra un tipo de clasificación de suelos basado en pruebas índice usando una precarga de 7 kPa.

Tabla 9 Clasificación de suelos expansivos basada en pruebas índice (modificado de Holtz & Gibbs, 1956)³⁸.

Ensayos índice			Expansión probable (% total de cambio de volumen)	Grado de expansividad
Contenido de coloides (% < 1 µm)	Índice plástico	Límite de contracción		
>28	>35	< 11	>30	Muy alto
20 – 31	25 – 41	7 – 12	20 – 30	Alto
12 – 23	15 – 28	10 – 16	10 – 20	Medio
< 15	< 18	>15	< 10	Bajo

Otra clasificación basada en pruebas índice fue propuesta por la comisión de vías de Kansas y Chen, la cual es muy útil en caso de urgencia, pero poco certera para identificar cualquier suelo expansivo generalizado.

Tabla 10 Clasificación de suelos expansivos basado en el Índice Plástico. Kansas Highway Commission (1974)³⁹ y Chen (1988)⁴⁰

IP Kansas Highway Commission (1974)	Potencial de expansión	IP Chen (1988)	Potencial de expansión
< 15	Bajo a nulo	0 - 15 10 - 35 20 – 55 >35	Bajo Medio Alto Muy Alto
15 – 35	Medio		
>35	Alto		

Ranatham & Satyanarayana, y Raman, también trabajaron en clasificación de suelos expansivos basados en la contracción del material.

³⁸ W.G. Holtz & H.J. Gibbs. 1956. Engineering properties of expansive clays. ASCE 121, Transact. pp:641-677.

³⁹ D.R. Snethen. 1974. Visit to Kansas Highway Commission. Memorandum for record, 26 Sept 1974. Soil Mechanics Division, Soils and Pavements Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, CE, Vicksburg, Miss.

⁴⁰ F.H. Chen. 1988. Foundation on Expansive soils. American Elsevier Science Pub. New York

Tabla 11 Potencial expansivo del suelo (Ranganatham & Satyanarayana, 1965⁴¹; Raman, 1967⁴²

Índice de Contracción (Ranganatham & Satyanarayana)	Potencial de expansión	IP (Raman, 1967)	Índice de Contracción	Potencial de expansión
< 20	Bajo	< 12	< 15	Bajo
20 – 30	Medio	12 – 33	15 – 30	Medio
30 – 60	Alto	23 – 32	30 – 40	Alto
>60	Muy Alto	>32	>40	Muy Alto

Mineralógicamente es posible generar clasificaciones de suelos expansivos basados en la Actividad y la Actividad de intercambio catiónico (CEAc), según lo propuesto por Pearring (1963)⁴³ & Holt (1969)⁴⁴. Posteriormente McKeen & Hamberg (1981)⁴⁵ y Hamberg (1985)⁴⁶ sobre el trabajo de Pearring-Holt generaron una clasificación de la expansividad del suelo (Figura1).

⁴¹RANGANATHAM, B.V. & SATYANARAYANA, B., 1965. A rational method of predicting swelling potential for compacted expansive clays. Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 1:92-96

⁴²V. Raman. 1967. Identification of expansive soils from the plasticity index and shrinkage index data. Indian Eng., Calcuta 11:7-22.

⁴³PEARRING, J.R., 1963. A study of basic mineralogical, physical-chemical, and engineering index properties of laterite soil. Dissertation. Texas A&M Univ., College Station, TX.

⁴⁴J.H. Holt. 1969. A study of physical-chemical, mineralogical and engineering index properties of fine-grained soils in relation to their expansive characteristics. PhD. Dissertation. Texas A&M Univ., College Station, TX

⁴⁵G.R. Mc Keen & D.J. Hamberg. 1981. Characterization of expansive soils. Trans Res. Tec. 790, Trans. Res. Board 73-78.

⁴⁶D.J. Hamberg. 1985. A simplified method for predicting heave in expansive soils. M.S. thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO.

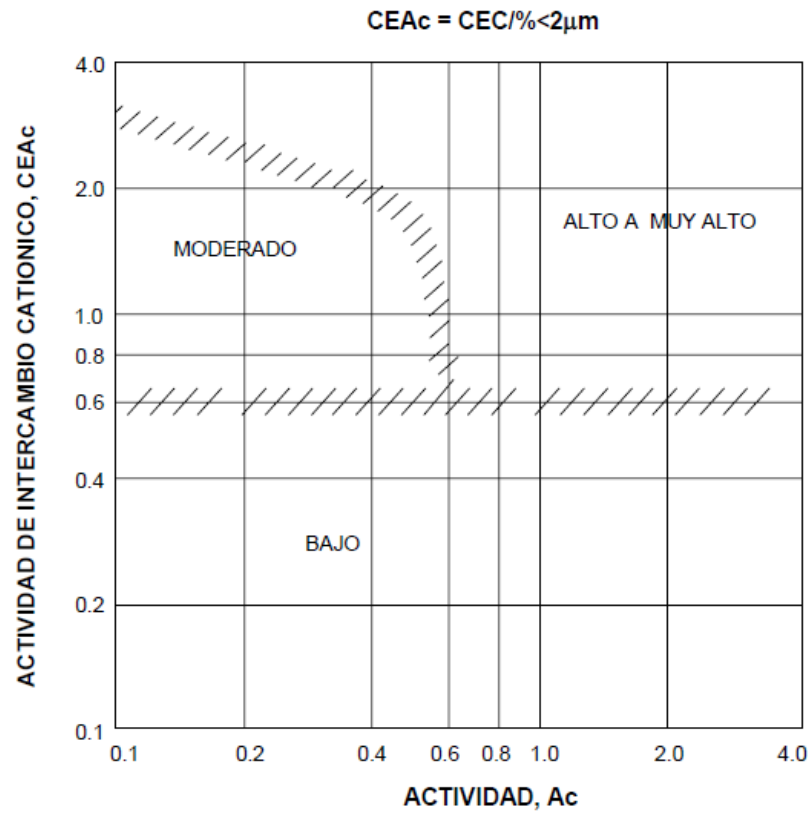


Ilustración 8. Clasificación de la expansividad (McKeen & Hamberg, 1981; Hamberg, 1985)

3. METODOLOGÍA

La caracterización de las muestras se realizó mediante los siguientes ensayos:
Tamaño de las partículas: granulometría por hidrómetro.

Caracterización de fracción fina y consistencia relativa: Límites de Atterberg.

Evaluación del potencial de contracción: Limite de contracción.

Relación de densidad: Gravedad específica.

Morfología: Microestructura mediante SEM

Para analizar de manera correcta y completa la susceptibilidad a cambios volumétricos de suelos bentónicos, se ejecutaron los ensayos para determinar el potencial de expansión por medio de diferentes métodos y en diferentes dosificaciones de bentonita, el cual es el material objetivo de estudio.

Las diferentes dosificaciones que se ensayaron se muestran a continuación:

1. 100% de Bentonita
2. 75% Bentonita 25% Arena del Guamo
3. 50% Bentonita 50% Arena del Guamo
4. 25% Bentonita 75% Arena del Guamo

Teniendo en cuenta que se seleccionó la arena del Guamo sabiendo que su origen de formación proviene del periodo Cuaternario, su formación es procedente de los abanicos del Guamo los cuales son depósitos de arenas puzolánicas de origen volcánico. Su origen parte de erupciones explosivas del volcán cerro Machín, que generaron depósitos de piroclastos de caída y flujos piroclásticos conformando flujos de lodo que se canalizaron a través del río Coello. Los tamaños encontrados de este material son de fino a medio⁴⁷. Las partículas de arena están conformadas principalmente por cuarzo y feldespatos y su composición química se basa en dióxido de silíceo (Berry et al, 1993). Se utilizó esta arena por poseer características similares a la arena de Ottawa, sus curvas granulométricas son paralelas entre sí, lo que permite demostrar su similitud entre el tamaño de las partículas, su gravedad específica y la relación de vacíos es semejante entre otras características. Por este motivo se decide trabajar con arena de Guamo, sabiendo que posee un alto grado de calidad y permite evaluar el comportamiento de la arcilla, ya que esta permite el desarrollo de las propiedades expansivas de la Bentonita.

⁴⁷ Bermudez Cuervo John Freddy (2015)

Tabla 12 Dosificaciones de las muestras y ensayos a realizar

Muestra	Lambe	Expansión Libre	Consolidómetro
100% bentonita	3	3	3
75% bentonita – 25% arena del Guamo	3	3	3
50% bentonita – 50% arena del Guamo	3	3	3
25% bentonita – 75% arena del Guamo	3	3	3

3.1. ENSAYO DE LAMBE

El título de la Norma INVIAS E-120-13 que rige el presente ensayo es determinación del potencial de cambio volumétrico de un suelo empleando el aparato de Lambe. Donde se describe de forma detalla, como se hace el ensayo completo y cuáles son las expresiones matemáticas que se utilizan para calcular el Cambio Volumétrico Potencial (CVP), como consecuencia de variaciones en su contenido de humedad.

Este ensayo cuenta con la principal característica que se ejecuta con el aparato desarrollado por el Ingeniero William Lambe en el instituto de tecnología de Massachussets en mayo de 1960.

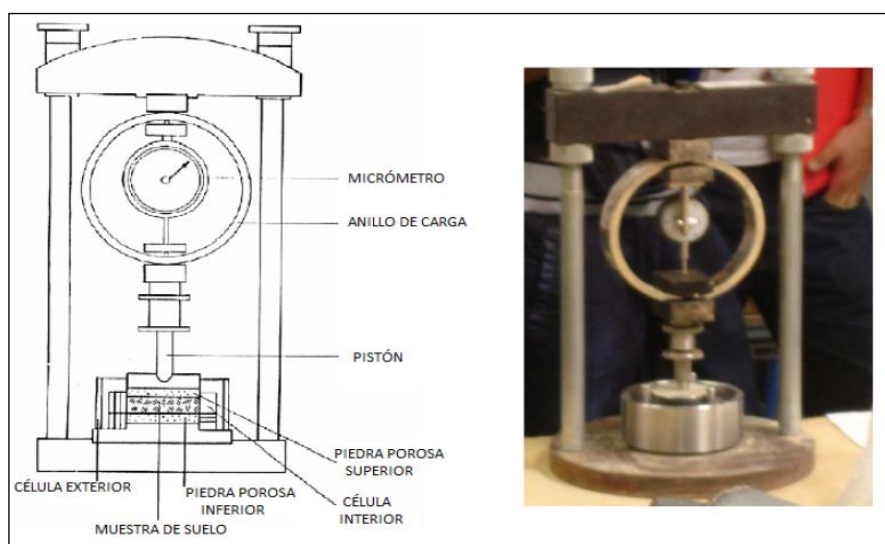


Ilustración 9. Aparato de Lambe⁴⁸

⁴⁸ Norma INVIAS. 2013. INV E-120-13: Determinación del potencial del cambio volumétrico del suelo empleando el aparato de Lambe

De los cálculos se obtiene:

El valor de la fuerza, producto de la lectura del anillo dinamométrico; se establece el valor de la fuerza en Newton.

El índice de expansión que se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Índice de expansión} = \frac{\text{Fuerza (N)}}{\text{Área de la sección transversa de la probeta (mm}^2\text{)}} = (\text{Mpa})$$

Ecuación 1. Índice de expansión Método de Lambe

Posteriormente a obtener el valor del índice de expansión se ubica en las ordenadas del siguiente gráfico, se traza una horizontal hasta cortar la curva correspondiente a las condiciones iniciales de humedad del suelo ensayado.

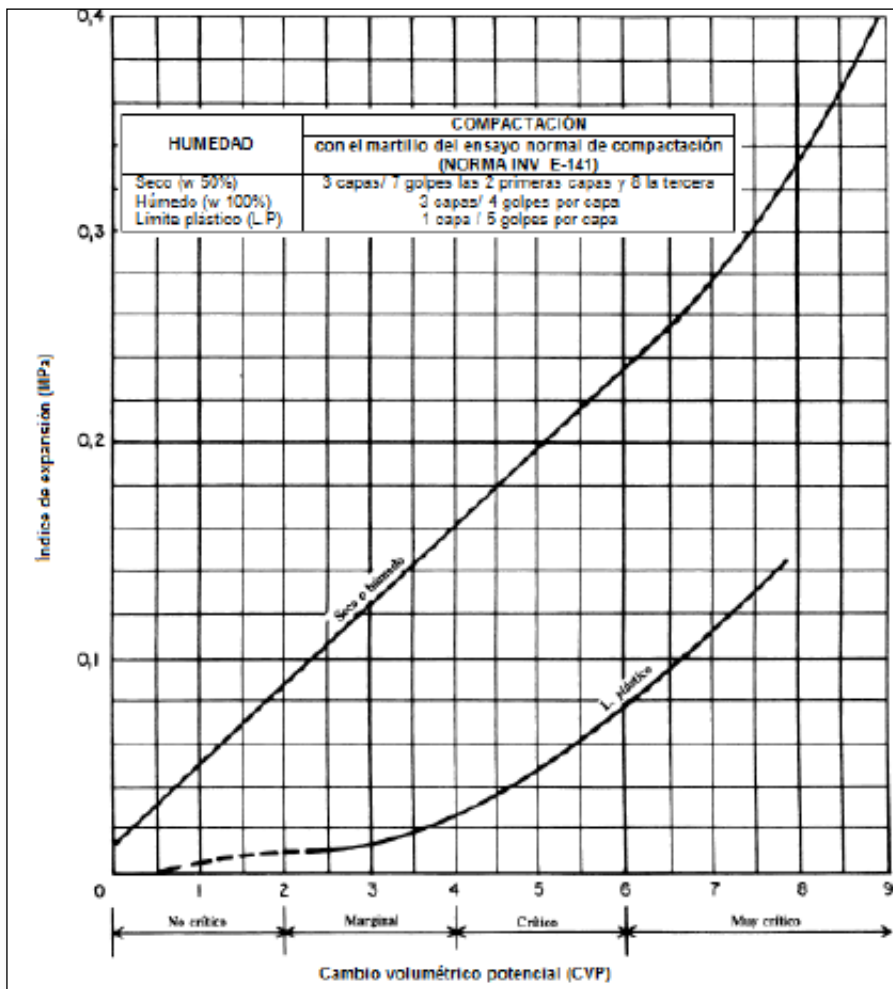


Ilustración 10 Índice de expansión Vs Cambio Volumétrico Potencial (CVP) ⁴⁹

El procedimiento que se llevó a cabo para el desarrollo del ensayo se evidencia por medio de la descripción de los siguientes pasos y del registro fotográfico.

Primero se elaboró la mezcla de material, seguido se procedió con la compactación de la muestra en el anillo. Luego se realizó la fijación de la muestra en el equipo, se saturó la muestra (inundando la cámara de acrílico). Al cabo de dos horas se tomó la lectura y finalmente se hizo el desmonte de la muestra.

⁴⁹ Norma INVIAS. 2013. INV E-120-13: Determinación del potencial del cambio volumétrico del suelo empleando el aparato de Lambe

En el siguiente cuadro se relaciona el registro fotográfico del ensayo de Lambe realizado a las muestras:

REGISTRO FOTOGRAFICO ENSAYO DE LAMBE	
 A photograph showing a manual compaction tool with a white handle and a metal rod, positioned over a small, reddish-brown circular sample on a white surface. A metal spoon and other debris are visible in the background.	 A photograph of a circular metal mold containing a reddish-brown porous stone sample. The mold has several small holes around its perimeter.
 A photograph showing the reddish-brown sample being compressed by a metal rod within a larger metal mold assembly.	 A photograph showing the metal mold assembly with the sample inside, mounted on a larger metal base or frame.

REGISTRO FOTOGRAFICO ENSAYO DE LAMBE



Muestra montada para el ensayo



Desmante de la muestra

Fuente: (Orjuela y Pérez, 2018)

3.2. ENSAYO DE EXPANSIÓN LIBRE

El índice de expansión libre se define como el aumento de volumen que sufre un suelo sin restricciones externas, cuando se sumerge en agua; esta es la definición que brinda la norma INVIAS 132-13, por la que se determina este índice en suelos expansivos en Colombia.

El procedimiento del ensayo es el siguiente:

Se debe tomar una porción de 5 gramos de suelo, posteriormente se colocan dos muestras cada una en una probeta graduada de 100 ml de capacidad, con precaución se llenan los cilindros con agua destilada y kerosene hasta completar los 100 ml de la probeta, con una varilla de vidrio se remueve el aire atrapado en la probeta. Se deja reposar la muestra por un lapso de 24 horas para permitir el equilibrio volumétrico de las muestras. La norma hace una nota aclaratoria donde se describe que el kerosene es un fluido no polar, por lo cual puede no generar variaciones volumétricas en el suelo.

Luego de pasadas las 24 horas se toma lectura del volumen alcanzado en el cilindro por cada probeta. Obtenidas las lecturas de datos se procede con los cálculos para obtener el índice de expansión libre (IEL), este índice se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$IEL = \frac{V_w - V_k}{V_k} * 100$$



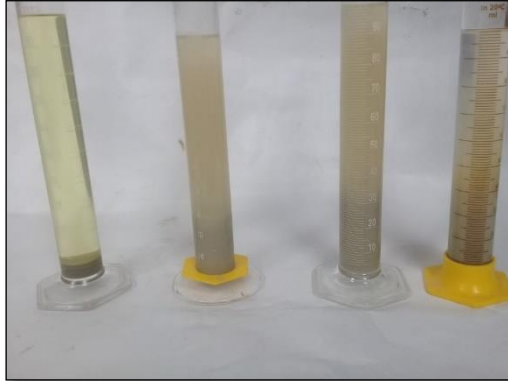
Ecuación 2. Índice de expansión Libre

Dónde:

V_w = Volumen de la muestra leído de la probeta que contiene agua.

V_k = Volumen de la muestra leído de la probeta que contiene kerosene.

Por medio del siguiente registro fotográfico se muestra el procedimiento del ensayo realizado a algunas de las muestras:

REGISTRO FOTOGRAFICO ENSAYO DE EXPANSIÓN LIBRE	
 <p>Material utilizado</p>	 <p>Colocación de la muestra en la probeta.</p>
 <p>Lectura de la muestra con 50% de bentonita después de 24 horas.</p>	 <p>Lectura de la muestra con 25% de bentonita después de 24 horas.</p>

Fuente: (Orjuela y Pérez, 2018)

3.3. ENSAYO DE CONSOLIDÓMETRO

Este ensayo se rige por la norma INV-173-07, las normas de desarrollo de ensayos tuvieron una actualización en el año 2013, la norma de este ensayo no tuvo actualización ni modificación alguna, por este motivo, la norma por la que de desarrollo el ensayo fue la del año 2007.

El ensayo de Consolidómetro se puede realizar por medio de tres métodos, cada método determina diferentes indicadores de hinchamiento o asentamiento en diferentes condiciones de las muestras. A continuación, se hace una breve descripción del método A el cual se utilizó para el desarrollo de esta investigación. Método A: Este método de prueba mide a) la expansión libre, b) porcentaje de levantamiento para presiones verticales de confinamiento hasta la presión de expansión, y c) la presión de expansión.

El procedimiento de este método es:

Se arma la cámara de consolidación con el anillo y se coloca la muestra seca seguido se coloca la cámara en el Consolidómetro y se instala el comparador de caratula (deformímetro) permitiendo que quedé en contacto con el bloque de carga, dejándolo en un valor inicial. Se coloca en el brazo del equipo un peso, que nos garantice un esfuerzo de 0.01kg/cm^2 . Inmediatamente se inunda la muestra y se empiezan a tomar deformaciones en los siguientes tiempos 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos, 1, 2, 4, 8, 24 y 72 horas. Se miden las deformaciones que presenta la muestra en esos tiempos, obteniéndose de estas deformaciones las expansiones libres de la muestra. Posteriormente se realiza el proceso de consolidación del espécimen, se aplica una presión vertical de aproximadamente 5, 10, 20, 40, 80, etc., kPa (0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, etc., kgf/cm^2), con cada presión mantenida constante se realiza la lectura de la deformación. Se mantiene la presión hasta que el espécimen sea recomprimido a su relación inicial de vacíos/altura. Finalmente se procede con la etapa de descarga de la etapa de consolidación.

REGISTRO FOTOGRAFICO ENSAYO DE CONSOLIDÓMETRO



Equipo utilizado



Montaje de la muestra



Montaje de la muestra



Montaje de la muestra



Montaje de la muestra

REGISTRO FOTOGRAFICO ENSAYO DE CONSOLIDÓMETRO



Montaje de la muestra



Montaje de la muestra



Montaje de la muestra en el Consolidómetro



Montaje de la muestra en el Consolidómetro

Fuente: (Orjuela y Pérez, 2018)

4. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

4.1. GANULOMETRÍA POR HIDROMETRO

En la tabla No.13 se muestran los resultados obtenidos para la dosificación 25% Bentonita 75% Arena del Guamo.

Tabla 13 Resultados granulometría 75% Bentonita.

TIEMPO min	TEMP °C	R' g/l	T' g/l	Ct g/l	Cd g/l	R g/l	R-Cd+Ct g/l	L cm	K	D mm	PASA %
0											100,00
1	20	18	7	0	8	19	11	13,30	0,01431	0,052	41,07
2	20	17	7	0	8	18	10	13,50	0,01431	0,037	38,91
5	20	15	7	0	8	16	8	13,80	0,01431	0,024	34,59
15	20	15	7	0	8	16	8	13,80	0,01431	0,014	34,59
30	20	15	7	0	8	16	8	13,80	0,01431	0,010	34,59
60	20	15	7	0	8	16	8	13,80	0,01431	0,007	34,59
120	20	15	7	0	8	16	8	13,80	0,01431	0,005	34,59
240	20	15	7	0	8	16	8	13,80	0,01431	0,003	34,59
1440	20	14	7	0	8	15	7	14,00	0,01431	0,001	32,42

Fuente: (Orjuela y Pérez, 2018)

En la tabla No. 14 se muestran los resultados obtenidos para la dosificación 50% Bentonita 50% Arena del Guamo.

Tabla 14 Resultados granulometría 50% Bentonita.

TIEMPO min	TEMP °C	R' g/l	T' g/l	Ct g/l	Cd g/l	R g/l	R-Cd+Ct g/l	L cm	K	D mm	PASA %
0											100,00
1	20	30	7	0	8	31	23	11,40	0,01431	0,048	67,61
2	20	28	7	0	8	29	21	11,70	0,01431	0,035	63,24
5	20	27	7	0	8	28	20	11,90	0,01431	0,022	61,06
15	20	26	7	0	8	27	19	12,00	0,01431	0,013	58,88
30	20	26	7	0	8	27	19	12,00	0,01431	0,009	58,88
60	20	26	7	0	8	27	19	12,00	0,01431	0,006	58,88
120	20	26	7	0	8	27	19	12,00	0,01431	0,005	58,88
240	20	25	7	0	8	26	18	12,20	0,01431	0,003	56,70
1440	20	24	7	0	8	25	17	12,40	0,01431	0,001	54,52

Fuente: (Orjuela y Pérez, 2018)

En la tabla No. 15 se muestran los resultados obtenidos para la dosificación 75% Bentonita 25% Arena del Guamo.

Tabla 15 Resultados granulometría 75% Bentonita

TIEMPO min	TEMP °C	R' g/l	T' g/l	Ct g/l	Cd g/l	R g/l	R-Cd+Ct g/l	L cm	K	D mm	PASA %
0											100,00
1	20	41	7	0	8	42	34	9,60	0,01386	0,043	95,03
2	20	40	7	0	8	41	33	9,70	0,01386	0,031	92,77
5	20	39	7	0	8	40	32	9,90	0,01386	0,020	90,51
15	20	39	7	0	8	40	32	10,10	0,01386	0,011	90,51
30	20	38	7	0	8	39	31	10,10	0,01386	0,008	88,24
60	20	38	7	0	8	39	31	10,10	0,01386	0,006	88,24
120	20	38	7	0	8	39	31	10,10	0,01386	0,004	88,24
240	20	38	7	0	8	39	31	10,10	0,01386	0,003	88,24
1440	20	38	7	0	8	39	31	10,10	0,01386	0,001	88,24

Fuente: (Orjuela y Pérez, 2018)

En la tabla No.16 se muestran los resultados obtenidos para la dosificación 100% Bentonita.

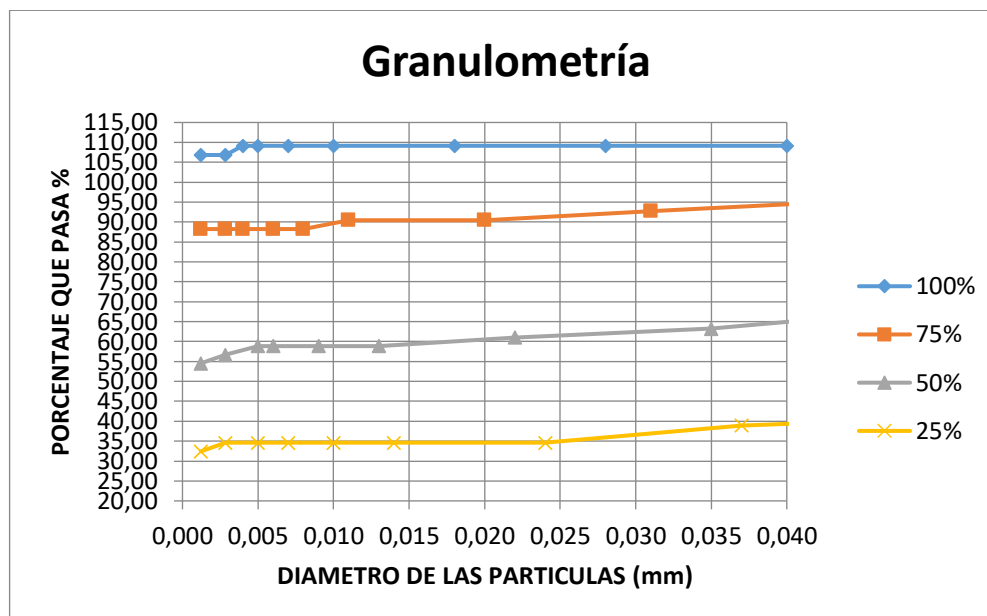
Tabla 16 Resultados granulometría 100% Bentonita

TIEMPO min	TEMP °C	R' g/l	T' g/l	Ct g/l	Cd g/l	R g/l	R-Cd+Ct g/l	L cm	K	D mm	PASA %
0											100,00
1	20	46	7	0	8	47	39	8,80	0,01344	0,040	109,15
2	20	46	7	0	8	47	39	8,80	0,01344	0,028	109,15
5	20	46	7	0	8	47	39	8,80	0,01344	0,018	109,15
15	20	46	7	0	8	47	39	8,80	0,01344	0,010	109,15
30	20	46	7	0	8	47	39	8,80	0,01344	0,007	109,15
60	20	46	7	0	8	47	39	8,80	0,01344	0,005	109,15
120	20	46	7	0	8	47	39	8,80	0,01344	0,004	109,15
240	20	45	7	0	8	46	38	8,90	0,01344	0,003	106,83
1440	20	45	7	0	8	46	38	8,90	0,01344	0,001	106,83

Fuente: (Orjuela y Pérez, 2018)

A continuación, se encuentra el análisis granulométrico de las diferentes dosificaciones de bentonita:

Gráfica 1 Análisis granulométrico de las diferentes dosificaciones



Fuente: (Orjuela y Pérez, 2018)

En la gráfica No. 1 se demuestra la diferencia de tamaño de partículas para cada dosificación de bentonita; a mayor cantidad de bentonita, el porcentaje de partículas que pasa puede pasar el 100% de la muestra, las partículas son de menor tamaño. La pendiente de la curva es leve porque hay uniformidad en las partículas sin importar la cantidad de bentonita que contenga la muestra.

4.2. LÍMITES DE ATTERBERG

En la tabla No. 17 se resumen los resultados del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad que se obtuvo de este ensayo efectuado a las diferentes dosificaciones de bentonita.

Tabla 17 Resultados Límites de Atterberg para cada dosificación de material

ENSAYO	100% BENTONITA	75% BENTONITA	50% BENTONITA	25% BENTONITA
LÍMITE LÍQUIDO	413,0	352,0	210,0	110,0
LÍMITE PLÁSTICO	30,7	31,9	40,0	45,9
ÍNDICE DE PLÁSTICIDAD	382,3	320,1	170,0	64,1

De acuerdo a la clasificación de suelos expansivos por los diferentes autores los suelos con un índice de plasticidad mayor a 32% o 35%, el suelo es potencialmente expansivo, como se muestra en la tabla anterior en suelos que contengan un porcentaje mayor al 24% de montmorrillonita, pueden arrojar valores superiores al 35% en el índice de plasticidad, por esta razón este ensayo se convierte en un ensayo de caracterización para suelos arcillosos pero no clasificación de un suelo potencial mente expansivo.

4.3. LIMITE DE CONTRACCIÓN

En la tabla No. 18 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos a cada una de las muestras de límite de contracción:

Tabla 18 Datos y Resultados Límites de Contracción

MUESTRA	MEZCLA DE BENTONITA CON ARENA				
	HUMEDAD	PESO SECO	VOLUMEN INICIAL	VOLUMEN FINAL	LIMITE DE CONTRACCIÓN
	ml	g	ml	ml	%
100% Bentonita	397,5	3,14	14,7	3,4	52,6
75% Bentonita	225,4	6,29	18,33	6,3	34,8
50% Bentonita	161	8,85	18,47	7,1	28,1
25% Bentonita	86,4	11,39	15,57	7,1	11,8

Los resultados del ensayo de límite de contracción nos permiten hacer una estimación cualitativa del potencial de expansión de algunos suelos permitiendo valorar de un modo característico, si el suelo es potencialmente expansivo, sin ser concluyente. Dando lugar a una alta incertidumbre en la clasificación por medio de este ensayo.

4.4. GRAVEDAD ESPECÍFICA

En la tabla No. 19 se presenta el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de gravedad específica a cada una de las muestras

Tabla 19 Gravedad específica de cada muestra

ENSAYO	100% BENTONITA	75% BENTONITA	50% BENTONITA	25% BENTONITA
GRAVEDAD ESPECÍFICA	2,69	2,59	2,52	2,50

Teniendo en cuenta que la gravedad específica es una relación de volúmenes de suelo y agua, ese ensayo posee varias predicciones para los diferentes minerales que compone el suelo, cuando está altamente compuesto por montmorillonita, la gravedad específica oscila entre 2.65 y 2.80; verificándose en los resultados obtenidos que los valores son acordes, mientras que el contenido de bentonita sea superior al 75% esta gravedad específica siendo calculada a partir de la estructura cristalina.

Adicional a los ensayos de tamaño de partículas, límites y gravedad específica, se realizaron análisis mineralógicos por DRX y SEM para garantizar un contenido mayor al 90% del mineral montmorillonita a las muestras ensayadas.

4.5. DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

A continuación, se presentan los difractogramas obtenidos de la bentonita a analizada.

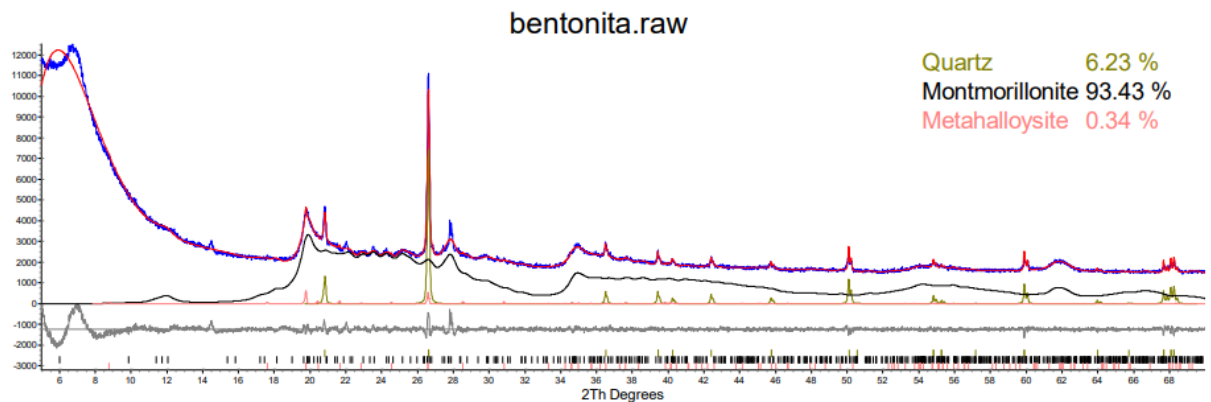


Ilustración 11 Difractograma muestra de Bentonita utilizada.

En el anterior difractograma se demuestra que la bentonita utilizada contiene un 93.43% de montmorillonita, porcentaje que constata que las muestras ensayadas están compuestas por el mineral que está afectado por la doble capa difusa y por una composición de elementos químicos que permiten la adsorción de agua por su característica dipolar.

4.6. IMÁGENES SEM

Por medio de las siguientes imágenes obtenidas de microscopio electrónico de barrido se señalan los resultados de porosidad obtenidos para la bentonita:

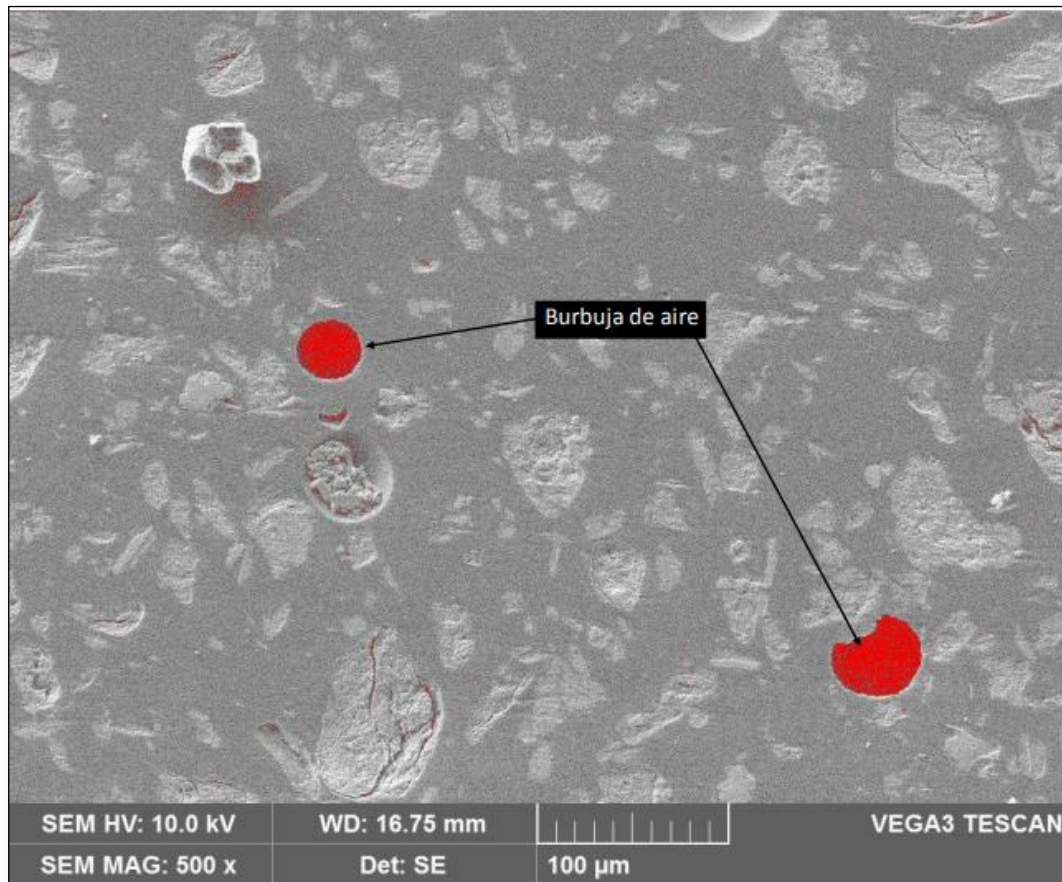


Ilustración 12 Micrografía con área porosa coloreada de rojo.

En la micrografía anterior se observa que las áreas porosas de la bentonita oscilan entre 25 y 50 μm , estas áreas porosas son las que hacen a la Bentonita una arcilla expansiva.

Tabla 20 Distribución de microfotografías y área porosa para la muestra de Bentonita

	B1	
B2		B3
	B4	
B5		B6
	B7	

Imagen	%Porosidad
B1	0.13
B2	0.75
B3	0.82
B4	0.91
B5	0.97
B6	0.41
B7	0.29
Promedio	0.61

Como se Observa en la tabla No. 19 el promedio de áreas porosas de la muestra son del 0.61%, mayor al 0.50 % de la muestra lo que indica que una gran parte de su área es porosa y representa un riesgo de expansión para el material.

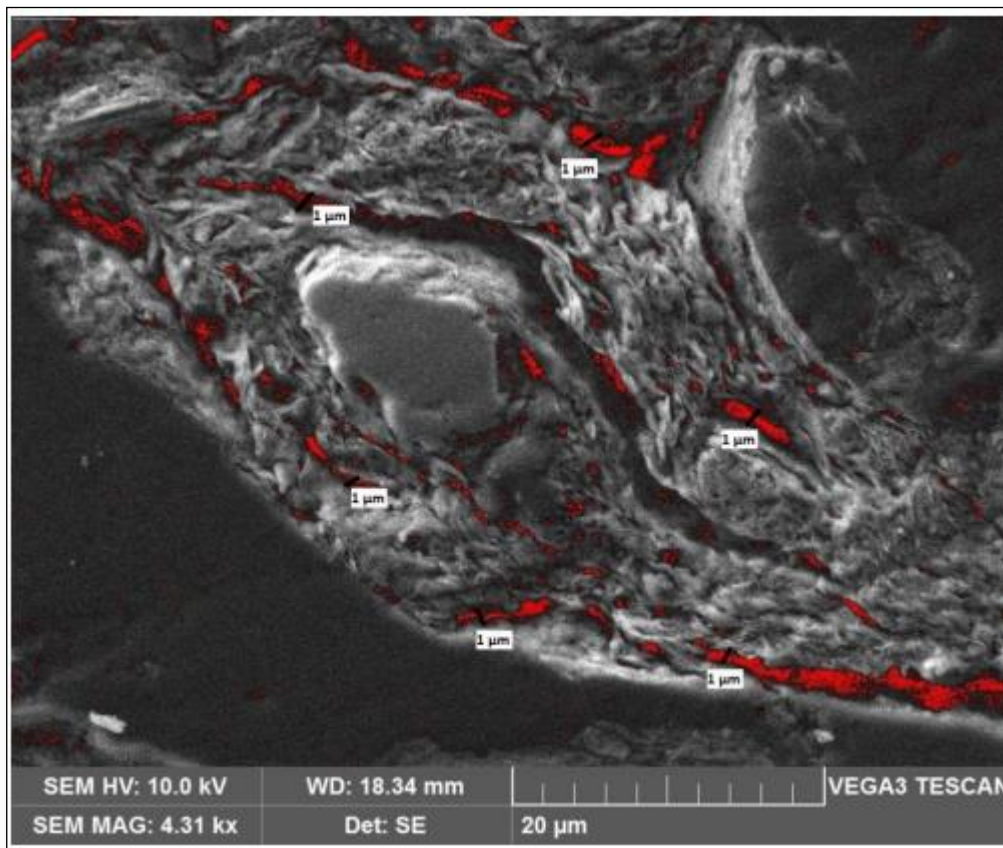


Ilustración 13 Área porosa coloreada de rojo y medidas de longitud de porosidad

Área porosa coloreada de rojo y medidas de longitud de porosidad. En esta imagen se presenta un detalle de los granos de Montmorillonita y la porosidad asociada a su estructura fibrosa.

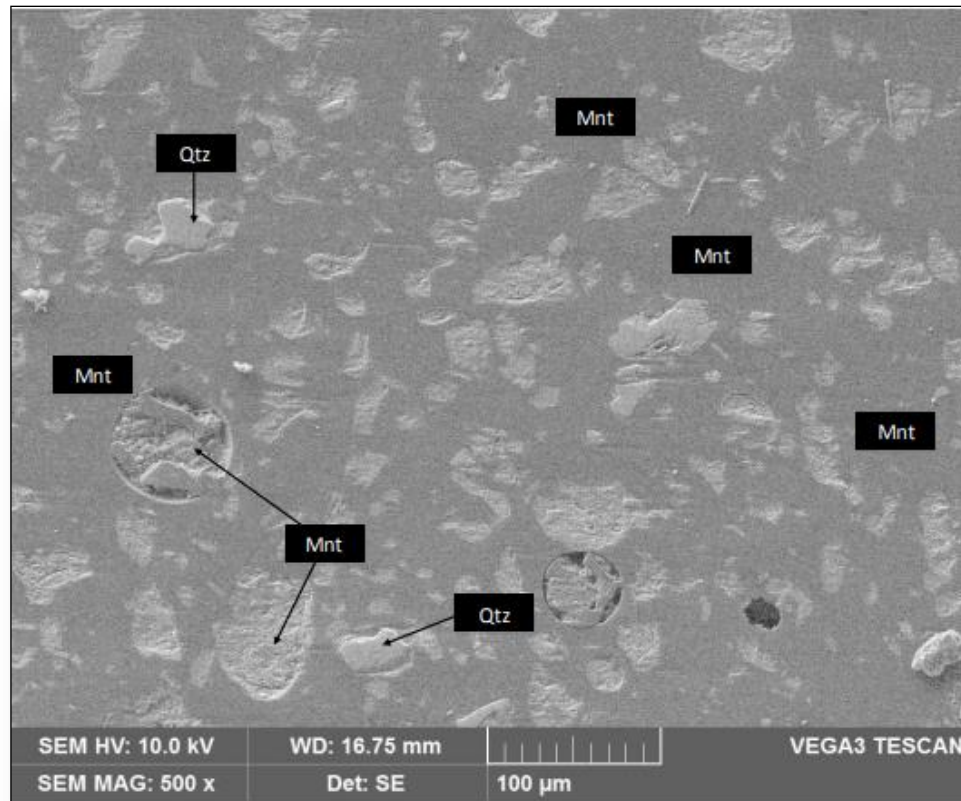


Ilustración 14 Composición mineralógica

Se observa una matriz arcillosa compuesta por Montmorillonita. El material granular está compuesto principalmente por fragmentos muy finos de Montmorillonita y algunos pocos granos de cuarzo.

Detalle de la superficie de la muestra con detección de electrones secundarios. Se observa un fragmento granular con estructuras fibrosas características de arcillas como la Montmorillonita. En el centro se observa una partícula no granular maciza que corresponde a un fragmento de cuarzo.

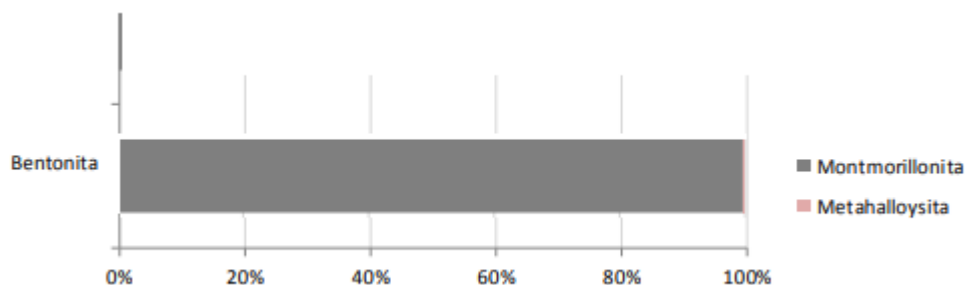
Finalmente se muestra en la tabla No. 21 donde se identifican la cantidad de mineral de montmorillonita presente en la muestra de Bentonita:

Tabla 21 Análisis de minerales arcillosos

Mineral (% Peso recalculado)	Bentonita
Montmorillonita	99.64
Metahalloysita	0.36

Fuente: Orjuela y Pérez

Con este montaje se identificaron los minerales de la arcilla presentes en la muestra, donde su mayor porcentaje en peso es de Montmorillonita y en un porcentaje muy bajo Metahalloysita, lo que nos permite demostrar que la arcilla seleccionada y analizada esta principalmente compuesta por montmorillonita, el mineral objeto de este estudio.



Gráfica 2 Análisis de minerales presentes en la muestra de bentonita.

5. RESULTADOS

Los resultados de los ensayos realizados en laboratorio para los dos materiales (arena del guamo y Bentonita) en las diferentes dosificaciones propuestas y sometidos a tres diferentes metodologías para el análisis del potencial de expansión se presentan a continuación.

5.1. LAMBE

En la tabla No. 22 se encuentran los resultados de la determinación del potencial de cambio volumétrico de las diferentes dosificaciones de Bentonita empleando el aparato de lambe.

Tabla 22 Resultados Ensayo de determinación del potencial de cambio volumétrico de un suelo empleando el aparato de Lambe

ENSAYO DE EXPANSION					
EQUIPO DE LAMBE I.N.V.E-120-13					
Mezcla	%	100 bentonita	75 bentonita	50 bentonita	25 bentonita
Condiciones del material		seco	seco	seco	seco
Numero de capas	No.	3	3	3	3
Número de golpes	No.	7 para la primera y segunda capa y 8 para la ultima	7 para la primera y segunda capa y 8 para la ultima	7 para la primera y segunda capa y 8 para la ultima	7 para la primera y segunda capa y 8 para la ultima
Diámetro de la muestra	mm	70	70	70	70
Área	mm ²	3848,5	3848,5	3848,5	3848,5
Altura de la muestra	mm	21	21	21	21
Ecuación del anillo	0,00209X = kN	2,09	2,09	2,09	2,09
Peso de la muestra	g	90,5	110	116	122
Lectura después de 2 horas	Ensayo 1 lectura de anillo (X)	202	220	172	125
Lectura después de 2 horas	Ensayo 2 lectura de anillo (X)	201	215	165	126
Lectura después de 2 horas	Ensayo 3 lectura de anillo(X)	201	217	166	119
Esfuerzo (índice de expansión)	MPa (ensayo1) N/mm ²	0,10970	0,11948	0,09341	0,06788
Esfuerzo (índice de expansión)	MPa (ensayo2)N/mm ²	0,10916	0,11676	0,08961	0,06843
Esfuerzo (índice de expansión)	MPa (ensayo3) N/mm ²	0,10916	0,11785	0,09015	0,06463
Promedio índice de expansión	MPa (N/mm ²)	0,11	0,12	0,09	0,07

5.2. EXPANSIÓN LIBRE

En la tabla No.23 se encuentran los resultados de la determinación del potencial de expansión de cada una de las dosificaciones seleccionadas.

Tabla 23 Resultados Ensayo de determinación de suelos expansivos

RESULTADOS EXPANSIÓN LIBRE			
Muestra	Volumen de agua (ml)	Volumen de Kerossene (ml)	Índice de expansión libre (%)
Bentonita 100% (muestra 1)	84	11	663,6
Bentonita 100% (muestra 2)	80	11	627,3
Bentonita 100% (muestra 2)	82	11	645,5
Bentonita 75% área 25% (muestra 1)	52	10	420
Bentonita 75% área 25% (muestra 2)	48	10	380
Bentonita 75% área 25% (muestra 3)	55	10	450
Bentonita 50% área 50% (muestra 1)	35	8	337,5
Bentonita 50% área 50% (muestra 2)	38	8	375
Bentonita 50% área 50% (muestra 3)	38	8	375
Bentonita 25% área 75% (muestra 1)	29	7	314,3
Bentonita 25% área 75% (muestra 2)	27	7	285,7
Bentonita 25% área 75% (muestra 3)	27	7	285,7

5.3. CONSOLIDÓMETRO

En la tabla No. 24 se encuentran los resultados de la expansión y consolidación del cambio volumétrico obtenido a partir del ensayo por Consolidómetro:

EXPANSIÓN:

Con el fin de encontrar el potencial relativo de hinchamiento de la masa objeto de estudio confinado lateralmente y cargado de manera axial por el método "A" conforme a la normatividad INV-173-07, se presentan los resultados de expansión para las diferentes muestras:

Muestra	Lectura inicial	0,1	0,2	0,5	1	2	4	8	15	30	60	120	240	480	1440	2880	4320
	X10 ⁻⁴ (in)	min	min	min	min	min	min	min	min	min	min	min	min	min	min	min	min
BENTONITA 100%		X10 ⁻⁴ "	X10 ⁻⁴ "	X10 ⁻⁴ "	X10 ⁻⁴ "	X10 ⁻⁴ "	X10 ⁻⁴ "	X10 ⁻⁴ "	X10 ⁻⁴ "	X10 ⁻⁴ "	X10 ⁻⁴ "	X10 ⁻⁴ "	X10 ⁻⁴ "	X10 ⁻⁴ "	X10 ⁻⁴ "	X10 ⁻⁴ "	X10 ⁻⁴ "
Muestra 1	21	24	40	52	76	107	161	202	321	498	655	683	718	820	958	1107	1122
Muestra 2	145	148	151	162	171	185	200	236	280	475	601	805	962	1052	1088	1203	1212
Muestra 3	6	8	12	20	35	56	91	220	405	510	623	785	846	972	1109	1178	1185
BENTONITA 75%																	
Muestra 1	130	142	150	159	170	185	199	225	282	397	500	619	810	1014	1221	1259	1270
Muestra 2	144	156	172	184	193	209	220	271	385	480	593	745	901	1056	1173	1304	1312
Muestra 3	118	145	159	170	187	210	231	254	272	401	518	699	823	999	1105	1245	1259
BENTONITA 50%																	
Muestra 1	97	110	116	120	124	130	142	160	200	245	399	488	682	801	935	1087	1095
Muestra 2	198	205	209	215	219	227	241	255	281	372	501	589	701	832	915	1016	1028
Muestra 3	75	82	88	90	98	101	112	140	161	218	301	420	561	685	811	1002	1011
BENTONITA 25%																	
Muestra 1	84	49	91	96	101	118	133	142	170	195	238	291	402	462	525	601	612
Muestra 2	69	72	73	75	77	85	96	114	156	204	267	310	376	328	371	443	465
Muestra 3	150	153	155	158	165	179	191	225	268	315	376	419	481	563	609	622	630

Tabla 24 Resultados del método para medir el potencial de asentamiento o expansión unidimensional de suelos cohesivos

CONSOLIDACIÓN:

De la etapa de consolidación se obtuvieron los siguientes datos de relaciones de vacíos, diferencias de altura y deformaciones de acuerdo a las cargas impuestas en cada tiempo siguiendo el procedimiento indicado en la norma INV-173-07.

25% Bentonita

Tabla 25 Resultados relaciones de vacíos y altura 25% Bentonita

Hs (cm)	0,898
e ₀₁	1,375
e ₀₂	1,338
e ₀₃	1,362

Tabla 26 Resultados etapa de consolidación 25% Bentonita- Deformaciones muestra 1

MUESTRA NO. 1						
ETAPA DE CARGA		ETAPA DE DESCARGA			ETAPA DE CARGA	
ESFUERZO	DEFORMACIÓN	ESFUERZO	DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACIÓN	
kg/cm ²	kPa	x10 ⁻⁴	kg/cm ²	x10 ⁻⁴	kg/cm ²	cm
0,01	1					
0,05	5	57	0,4	265	0,05	0,01448
0,1	10	52	0,2	284	0,1	0,01321
0,2	20	78	0,1	301	0,2	0,01981
0,4	40	81	0,05	322	0,4	0,02057
0,8	80	95			0,8	0,02413

Tabla 27 Resultados etapa de consolidación 25% Bentonita- Deformaciones muestra 2

MUESTRA NO. 2						
ETAPA DE CARGA		ETAPA DE DESCARGA			ETAPA DE CARGA	
ESFUERZO	DEFORMACIÓN	ESFUERZO	DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACIÓN	
kg/cm ²	kPa	x10 ⁻⁴	kg/cm ²	x10 ⁻⁴	kg/cm ²	cm
0,01	1					
0,05	5	54	0,4	94	0,05	0,01372
0,1	10	74	0,2	115	0,1	0,01880
0,2	20	89	0,1	132	0,2	0,02261
0,4	40	86	0,05	150	0,4	0,02184
0,8	80	92			0,8	0,02337

Tabla 28 Resultados etapa de consolidación 25% Bentonita- Deformaciones muestra 3

MUESTRA NO. 3						
ETAPA DE CARGA			ETAPA DE DESCARGA		ETAPA DE CARGA	
ESFUERZO		DEFORMACIÓN	ESFUERZO	DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACIÓN
kg/cm ²	kPa	x10 ⁻⁴ "	kg/cm ²	x10 ⁻⁴ "	kg/cm ²	cm
0,01	1					0,0206
0,05	5	81	0,4	202	0,05	0,0236
0,1	10	93	0,2	225	0,1	0,0213
0,2	20	84	0,1	250	0,2	0,0259
0,4	40	102	0,05	271	0,4	0,0218
0,8	80	86			0,8	

50 % Bentonita

Tabla 29 Resultados relaciones de vacíos y alturas 50% Bentonita

H (cm)	0,922
e₀₁	1,445
e₀₂	1,399
e₀₃	1,428

Tabla 30 Resultados etapa de consolidación 50% Bentonita- Deformaciones muestra 1

MUESTRA NO. 1						
ETAPA DE CARGA			ETAPA DE DESCARGA		ETAPA DE CARGA	
ESFUERZO		DEFORMACIÓN	ESFUERZO	DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACIÓN
kg/cm ²	kPa	x10 ⁻⁴ "	kg/cm ²	x10 ⁻⁴ "	kg/cm ²	cm
0,01	1					
0,05	5	71	0,4	656	0,05	0,0180
0,1	10	84	0,2	680	0,1	0,0213
0,2	20	91	0,1	709	0,2	0,0231
0,4	40	93	0,05	733	0,4	0,0236
0,8	80	122			0,8	0,0310

Tabla 31 Resultados etapa de consolidación 50% Bentonita- Deformaciones muestra 2

MUESTRA NO. 2						
ETAPA DE CARGA			ETAPA DE DESCARGA		ETAPA DE CARGA	
ESFUERZO		DEFORMACIÓN	ESFUERZO	DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACIÓN
kg/cm ²	kPa	x10 ⁻⁴ "	kg/cm ²	x10 ⁻⁴ "	kg/cm ²	cm
0,01	1					
0,05	5	88	0,4	445	0,05	0,0224
0,1	10	115	0,2	470	0,1	0,0292
0,2	20	98	0,1	489	0,2	0,0249
0,4	40	113	0,05	507	0,4	0,0287
0,8	80	192			0,8	0,0488

Tabla 32 Resultados etapa de consolidación 50% Bentonita- Deformaciones muestra 3

MUESTRA NO. 3						
ETAPA DE CARGA			ETAPA DE DESCARGA		ETAPA DE CARGA	
ESFUERZO		DEFORMACIÓN	ESFUERZO	DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACIÓN
kg/cm ²	kPa	x10 ⁻⁴ "	kg/cm ²	x10 ⁻⁴ "	kg/cm ²	x10 ⁻⁴ "
0,01	1					
0,05	5	71	0,4	563	0,05	0,0180
0,1	10	79	0,2	585	0,1	0,0201
0,2	20	99	0,1	610	0,2	0,0251
0,4	40	105	0,05	635	0,4	0,0267
0,8	80	114			0,8	0,0290

75 % Bentonita

Tabla 33 Resultados relaciones de vacíos y alturas 75% Bentonita

H (cm)	0,885
e ₀₁	1,587
e ₀₂	1,595
e ₀₃	1,588

Tabla 34 Resultados etapa de consolidación 75% Bentonita- Deformaciones muestra 1

MUESTRA NO. 1						
ETAPA DE CARGA			ETAPA DE DESCARGA		ETAPA DE CARGA	
ESFUERZO		DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACION
kg/cm ²	kPa	x10 ⁻⁴	kg/cm ²	x10 ⁻⁴	kg/cm ²	cm
0,01	1				0,05	0,0094
0,05	5	37	0,4	781	0,1	0,0173
0,1	10	68	0,2	810	0,2	0,0251
0,2	20	99	0,1	842	0,4	0,0312
0,4	40	123	0,05	859	0,8	0,0483
0,8	80	190				

Tabla 35 Resultados etapa de consolidación 75% Bentonita- Deformaciones muestra 2

MUESTRA NO. 2						
ETAPA DE CARGA			ETAPA DE DESCARGA		ETAPA DE CARGA	
ESFUERZO		DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACION
kg/cm ²	kPa	x10 ⁻⁴	kg/cm ²	x10 ⁻⁴	kg/cm ²	cm
0,01	1				0,05	0,0122
0,05	5	48	0,4	689	0,1	0,0229
0,1	10	90	0,2	738	0,2	0,0284
0,2	20	112	0,1	759	0,4	0,0478
0,4	40	188	0,05	790	0,8	0,0564
0,8	80	222				

Tabla 36 Resultados etapa de consolidación 75% Bentonita- Deformaciones muestra 3

MUESTRA NO. 3						
ETAPA DE CARGA			ETAPA DE DESCARGA		ETAPA DE CARGA	
ESFUERZO		DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACION
kg/cm ²	kPa	x10 ⁻⁴	kg/cm ²	x10 ⁻⁴	kg/cm ²	cm
0,01	1				0,05	0,0168
0,05	5	66	0,4	652	0,1	0,0302
0,1	10	119	0,2	675	0,2	0,0427
0,2	20	168	0,1	691	0,4	0,0351
0,4	40	138	0,05	719	0,8	0,0363
0,8	80	143				

100 % Bentonita

Tabla 37 Resultados relaciones de vacíos y alturas 100% Bentonita

H (cm)	0,820
e ₀₁	1,781
e ₀₂	1,770
e ₀₃	1,805

Tabla 38 Resultados etapa de consolidación 100% Bentonita- Deformaciones muestra 1

MUESTRA NO. 1						
ETAPA DE CARGA			ETAPA DE DESCARGA		ETAPA DE CARGA	
ESFUERZO		DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACIÓN
kg/cm ²	kPa	x10 ⁻⁴	kg/cm ²	x10 ⁻⁴	kg/cm ²	cm
0,01	1					
0,05	5	77	0,4	271	0,05	0,0196
0,1	10	154	0,2	319	0,1	0,0391
0,2	20	166	0,1	360	0,2	0,0422
0,4	40	188	0,05	402	0,4	0,0478
0,8	80	305			0,8	0,0775

Tabla 39 Resultados etapa de consolidación 100% Bentonita- Deformaciones muestra 2

MUESTRA NO. 2						
ETAPA DE CARGA			ETAPA DE DESCARGA		ETAPA DE CARGA	
ESFUERZO		DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACIÓN
kg/cm ²	kPa	x10 ⁻⁴	kg/cm ²	x10 ⁻⁴	kg/cm ²	cm
0,01	1					
0,05	5	72	0,4	465	0,05	0,0183
0,1	10	88	0,2	502	0,1	0,0224
0,2	20	151	0,1	551	0,2	0,0384
0,4	40	226	0,05	605	0,4	0,0574
0,8	80	247			0,8	0,0627

Tabla 40 Resultados etapa de consolidación 100% Bentonita- Deformaciones muestra 3

MUESTRA NO. 3						
ETAPA DE CARGA			ETAPA DE DESCARGA		ETAPA DE CARGA	
ESFUERZO		DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACIÓN
kg/cm ²	kPa	x10 ⁻⁴	kg/cm ²	x10 ⁻⁴	kg/cm ²	cm
0,01	1					
0,05	5	34	0,4	409	0,05	0,0086
0,1	10	111	0,2	455	0,1	0,0282
0,2	20	190	0,1	499	0,2	0,0483
0,4	40	224	0,05	543	0,4	0,0569
0,8	80	257			0,8	0,0653

6. ANALISIS DE RESULTADOS

Conforme a los resultados de los ensayos de manera general se evidenció que este tipo de arcilla presenta una sensibilidad al cambio volumétrico de acuerdo al contenido en porcentaje del mineral montmorrillonita.

Así mismo es preciso tener en cuenta que para el análisis sus resultados que este material cuenta con una capacidad de adsorción lo cual le permite la ampliación de la doble capa difusa.

De acuerdo a la metodología propuesta, a continuación, se presentan los diferentes análisis de cada uno de los resultados obtenidos:

6.1. LAMBE

En las siguientes tablas se encuentran los resultados de cada una de las muestras del cambio volumétrico potencial obtenido a partir del ensayo de lambe:

Tabla 41 Resultado índice de expansión para la muestra uno

MUESTRA No. 1	
Mezcla (%)	Promedio índice de expansión MPa (N/mm ²)
100 bentonita	0,11
75 bentonita	0,12
50 bentonita	0,09
25 bentonita	0,07

Tabla 42 Resultado índice de expansión para la muestra dos

MUESTRA No. 2	
Mezcla (%)	Promedio índice de expansión MPa (N/mm ²)
100 bentonita	0,11
75 bentonita	0,12
50 bentonita	0,09
25 bentonita	0,07

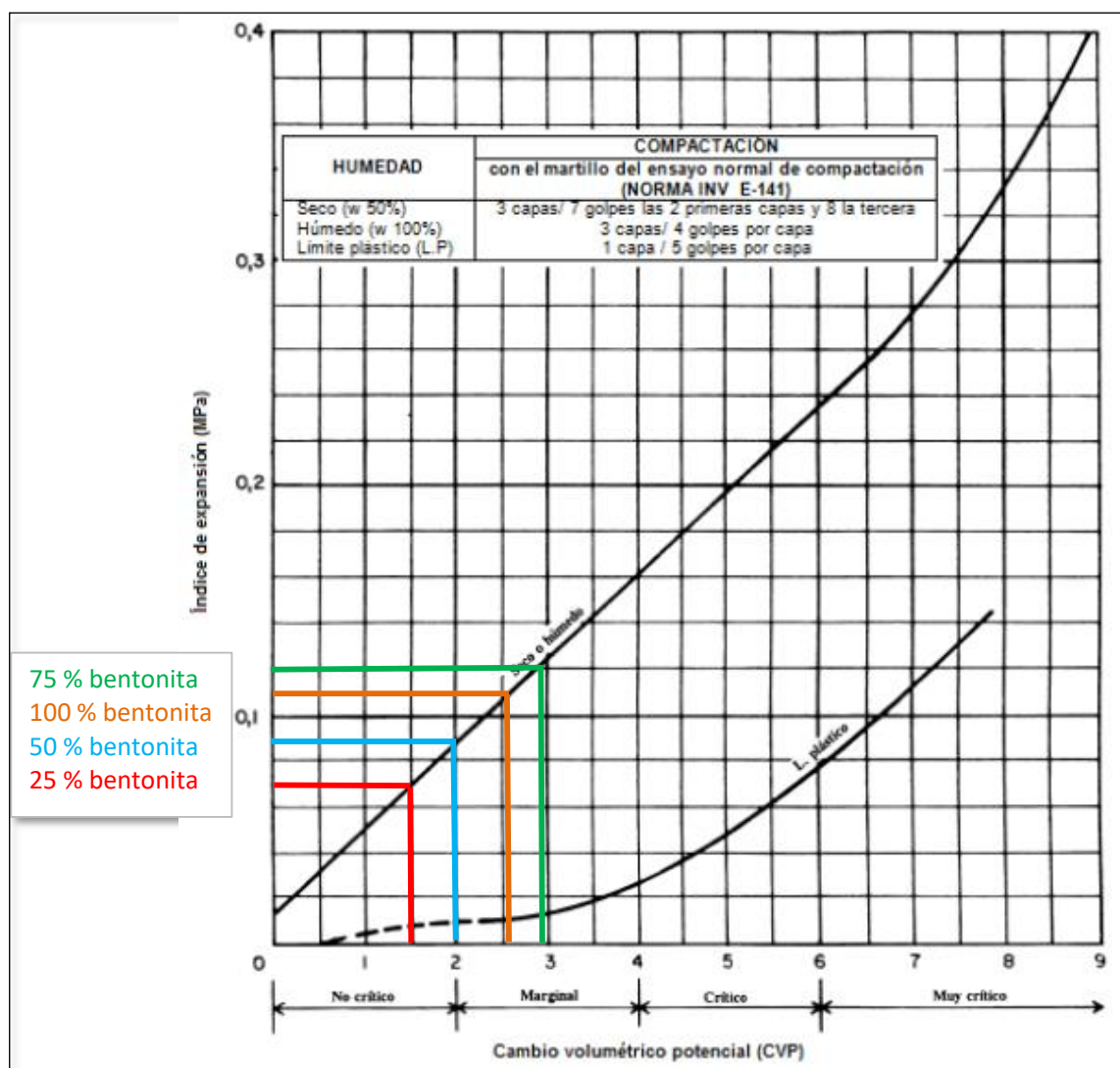
Tabla 43 Resultado índice de expansión para la muestra tres

MUESTRA No. 3	
Mezcla (%)	Promedio índice de expansión MPa (N/mm ²)
100 bentonita	0,11
75 bentonita	0,12
50 bentonita	0,09
25 bentonita	0,06

Tabla 44 Resultados índice de expansión promedio de las tres muestras para cada dosificación

Mezcla (%)	Promedio índice de expansión MPa (N/mm ²)
100 bentonita	0,11
75 bentonita	0,12
50 bentonita	0,09
25 bentonita	0,07

Con los valores promedio para las diferentes mezclas se ubicó el índice de expansión en las ordenadas de la gráfica “Figura 120-1 Índice de expansión vs. Cambio Volumétrico Potencial (CVP)” al trazar una horizontal hasta cortar con las curvas para suelo seco o húmedo que corresponden a las condiciones de humedad iniciales de la masa de suelo ensayada.



Gráfica 3 Índice de expansión Vs. Cambio volumétrico potencial (CVP) (INV-120-13)

En la componente de las abscisas se encuentra las categorías de cambio potencial de volumen para cada suelo donde el corte horizontal se proyecta a ellas para determinar si el cambio volumétrico potencial (CVP) corresponde a “No Crítico”, “Marginal”, “Crítico” o “Muy Crítico”.

La muestra con 25% de bentonita se encuentra con un CVP no crítico, la de 50% de bentonita está en el límite de frontera entre no crítico y marginal, y tienen presiones de hinchamiento inferiores a 0.1 MPa. Tanto la muestra con 75% y 100% de bentonita se encuentran en la categoría Marginal y cuentan con

presiones mayores a 0.1 MPa siendo las más altas de los ensayos realizados en el estudio.

Conforme a la tabla No. 3 citada en los antecedentes, donde nos dan el rango del CVP y un peligro de expansión, ingresando los datos obtenidos del ensayo realizado a cada muestra, se obtienen los siguientes peligros de expansión.

Tabla 45 Análisis de CVP con base en la Norma INV-132

Muestra	CVP	Peligro de expansión
25% Bentonita	1.5	No crítico
50% Bentonita	2	Marginal
75% Bentonita	3	Marginal
100% Bentonita	2.5	Marginal

La tabla anterior confirma que por medio de este ensayo se obtiene un peligro de expansión bajo, para este tipo de arcilla, su comportamiento podría no ser peligroso, por esa razón el resultado y análisis de este ensayo se debe cotejar con más ensayos que midan este mismo índice. Estos resultados obtenidos, confirman que el ensayo de Lambe es un ensayo de carácter cualitativo, de ninguna forma se debe utilizar como único ensayo de identificación de suelos expansivos.

6.2. EXPANSIÓN LIBRE

Como se mencionó anteriormente este método busca el valor de la diferencia entre el volumen final e inicial de la expansión libre, expresado en porcentaje. De acuerdo a la tabla del autor Beltrán Martínez que se cita en los antecedentes del presente documento, en comparación con los resultados obtenidos se consiguió:

Tabla 46 Análisis de índice de expansión con base en Beltrán Martínez

Muestra	Promedio del Índice de expansión	Potencial de expansión (Beltrán Martínez)
25% Bentonita	295,23	Muy Alto
50% Bentonita	362,50	Muy Alto
75% Bentonita	416,67	Muy Alto
100% Bentonita	645,47	Muy Alto

De acuerdo al estudio realizado por Beltrán Martínez, se observa en la tabla No. 46, que en comparación con nuestras muestras que, aunque poseen una diferente dosificación de Bentonita, su potencial de expansión que arroja este ensayo es muy alto, lo que implica que la variación en el porcentaje de bentonita sea menor no afecta a que esta muestra tenga variaciones de comportamiento por menor que sea su cantidad. Finalmente, una muestra que tenga un valor pequeño de arcilla bentoníticas, se debe tener presente por su alto potencial de expansión.

A continuación, en la tabla No.46 se muestran los resultados obtenidos en comparación con los valores de potencial de expansión que brinda la Norma INV de este ensayo:

Tabla 47 Análisis de promedio de índice de expansión con base en Norma INV

Muestra	Promedio del Índice de expansión	Potencial de expansión (INV-132-13)
25% Bentonita	295,23	Muy Alto
50% Bentonita	362,50	Muy Alto
75% Bentonita	416,67	Muy Alto
100% Bentonita	645,47	Muy Alto

Como se analiza en la tabla anterior, el potencial de expansión respecto a la norma, todos los resultados obtenidos de este ensayo arrojan como resultado un potencial de expansión muy alto, de igual forma que por la tabla No. 4 (Beltrán Martínez). El porcentaje de bentonita menor o mayor no es significativo para un cambio en el resultado de este ensayo, al ejecutarse en un estudio de suelos, este siempre será de análisis especial y de complementar por medio de otros ensayos que permitan concluir si el suelo, sigue mostrando un comportamiento de cambio volumétrico significativo.

Adicionalmente Chen, F.H (1988) "Foundations on expansive soils", New York USA, emite la siguiente tabla de análisis de resultado de expansión libre:

Tabla 48 Análisis de promedio de índice de expansión (Chen)

Potencial de Expansión	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Hinchamiento libre	< 10	10 a 20	20 a 30	>30

Tabla 49 Análisis del de índice de expansión (Chen)

Muestra	Promedio del Índice de expansión	Chen, F.H (1988)
25% Bentonita	295,23	Muy Alto
50% Bentonita	362,50	Muy Alto
75% Bentonita	416,67	Muy Alto
100% Bentonita	645,47	Muy Alto

Analizando los resultados obtenidos y el análisis presentado por Chen se observa que continúan con la misma tendencia de las tablas anteriores, lo que permite argumentar; que este tipo de suelos posiblemente no habían sido ensayados por este método y por eso los autores que tienen análisis de este ensayo índice, valores muy bajos respecto a los obtenido en este estudio. De ahí que siempre nuestro potencial de expansión siempre sea muy alto.

Análisis comparativo con el ensayo de Lambe y Expansión Libre

En la tabla que se presenta a continuación se observan el grado de expansividad de acuerdo al porcentaje de finos, a su límite líquido, al índice PVC e Hinchamiento libre, esta tabla fue elaborada por González Vallejo (2002).

Tabla 50 Análisis del comparativo de Lambe y expansión Libre (González de Vallejo)

Grado	Expansividad	% Finos	Límite Líquido	Índice PVC Lambe (kPa)	Presión de hincha (KPa)	Hinchamiento libre (%)
I	Baja	<30	<35	<80	<25	<1
II	Baja a media	30-60	35-50	80-150	25-125	4-1
III	Media a alta	60-95	50-65	150-230	125-300	4-10
IV	Muy alta	>95	>65	>230	>300	>10

Fuente: Grados de expansividad y valores medios de parámetros geotécnicos. González de Vallejo (2002).

Como se mencionó anteriormente esta tabla tiene como variables mayores características de las muestras, el porcentaje de finos, en este caso de estudio esa columna se vuelve irrelevante para las comparaciones de nuestros resultados sin embargo pueden llegar a ser parámetros de análisis de los resultados de los diferentes ensayos en un solo grado de expansión.

De acuerdo al límite líquido, todas las muestras ensayadas, se obtiene, grado de expansión IV, muy alto. Del ensayo de Lambe se concluye que para 25% de Bentonita, su grado es I, expansividad baja, para 50% Bentonita grado II expansividad baja media, 75% Bentonita grado II expansividad baja media y para

100 % grado II expansividad baja media, esto indica que para el ensayo de Lambe la muestra ensayada podría no ser potencialmente expansiva, resultado que se debería correlacionar y complementar con los demás ensayos que se presentan en este trabajo de investigación.

Respecto al índice de expansión el valor de comparación indica que cuando es mayor a 10 su grado de expansión es IV, expansividad muy alta. Lo que confirma lo descrito anteriormente, el ensayo de Lambe se debe correlacionar con otros resultados de ensayos índice de potencial de expansión por esa alta diferencia entre un ensayo y otro.

6.3. CONSOLIDÓMETRO

Etapa de Expansión

De la etapa de expansión del ensayo una vez completada la toma de lecturas que indica la norma se procedió a realizar el cálculo de la expansión de la siguiente manera:

Tabla 51 Expansión método de Consolidómetro

EXPANSIÓN				
	h_e	h_o	Expansión	Expansión
Bentonita 100%	cm	cm	cm	%
Muestra1	0,280	2,0	2,280	13,98
Muestra2	0,271	2,0	2,271	13,55
Muestra3	0,299	2,0	2,299	14,97
Bentonita 75%				
Muestra1	0,290	2,0	2,290	14,48
Muestra2	0,297	2,0	2,297	14,83
Muestra3	0,290	2,0	2,290	14,49
Bentonita 50%				
Muestra1	0,253	2,0	2,253	12,67
Muestra2	0,211	2,0	2,211	10,54
Muestra3	0,238	2,0	2,238	11,89
Bentonita 25%				
Muestra1	0,134	2,0	2,134	6,71
Muestra2	0,101	2,0	2,101	5,03
Muestra3	0,122	2,0	2,122	6,10

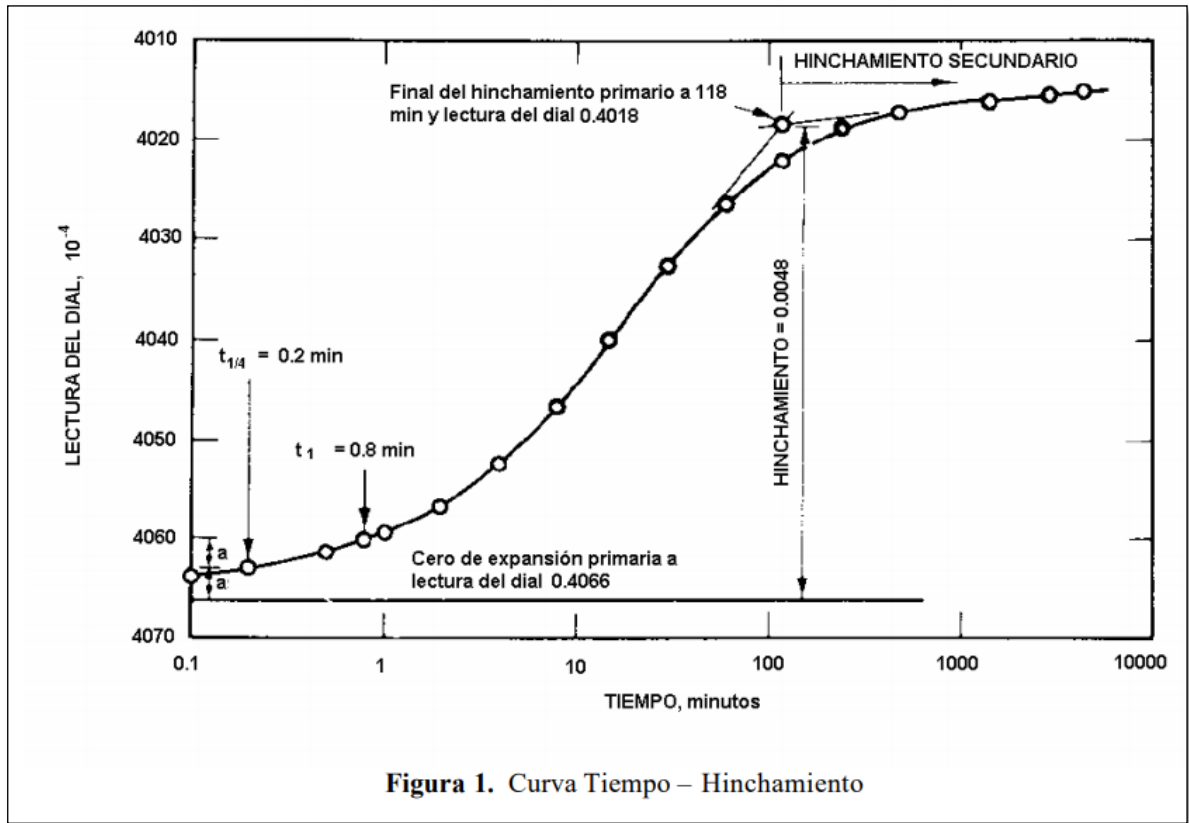
Tabla 52 Análisis Expansión método de Consolidómetro

Dosificación muestra	% De expansión	Holtz Gibbs
BENTONITA 100%		
Muestra 1	13,98	Medio
Muestra 2	13,55	Medio
Muestra 3	14,97	Medio
BENTONITA 75%		
Muestra1	14,48	Medio
Muestra 2	14,83	Medio
Muestra 3	14,49	Medio
BENTONITA 50%		
Muestra1	12,67	Medio
Muestra 2	10,54	Medio
Muestra 3	11,89	Medio
BENTONITA 25%		
Muestra1	6,71	Bajo
Muestra 2	5,03	Bajo
Muestra 3	6,1	Bajo

Con la diferencia de lecturas la lectura inicial y final se halló la lectura de expansión; con este valor se calculó la altura (h_e), la cual se sumó con la altura inicial (h_o) para determinar la altura total de expansión de la muestra. Así mismo se reportan los valores de la expansión vertical expresados en porcentaje como indica el método "A" de la norma.

En la tabla No. 52 se encuentran los análisis comparativos de acuerdo a la tabla 132- 13 de la norma INV-132-13 por los diferentes autores que tienen intervalos de valores de resultados del ensayo de Consolidómetro, como se observa en la tabla, para Holtz y Gibbs el grado de expansión para los porcentajes de 25% en adelante, su grado de expansión es medio y para la dosificación de 25 % su grado es bajo, este resultado teniendo en cuenta que la condición de la muestra es seca y para una sobre carga de 7Kpa, cotejando los valores obtenidos y el grado de expansión de Holtz y Gibbs, se consiguen grados bajo y medio, lo que simbolizaría una alerta de suelo expansivo.

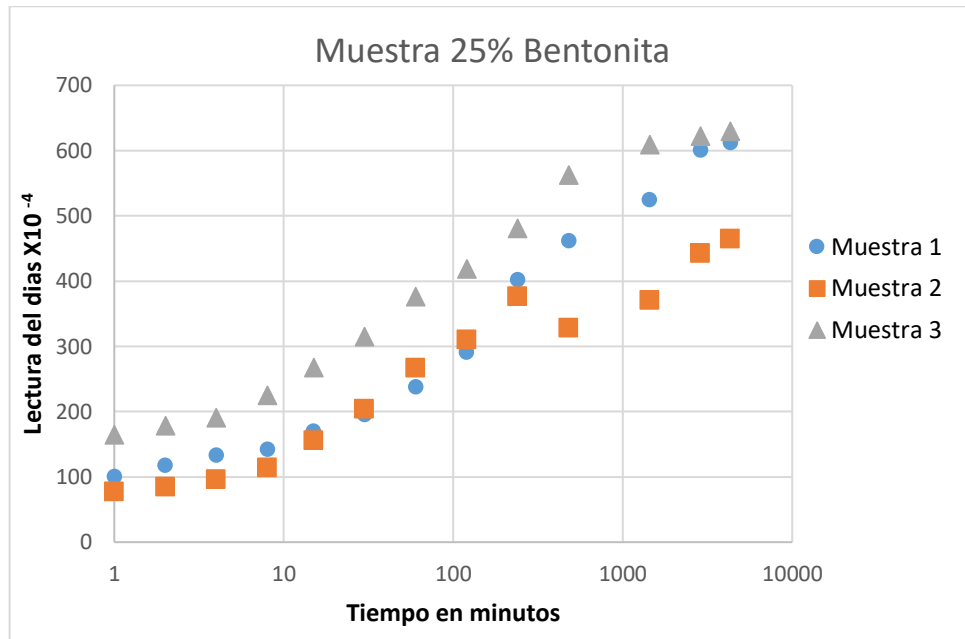
En la norma INV-173-07 se muestra la gráfica curva tiempo hinchamiento al completar la expansión de corto plazo o conocida como hinchazón primaria. A continuación, se muestra el ejemplo de la gráfica de la norma y su tendencia:



Gráfica 4 Curva Tiempo Hinchamiento Norma INV-173-07

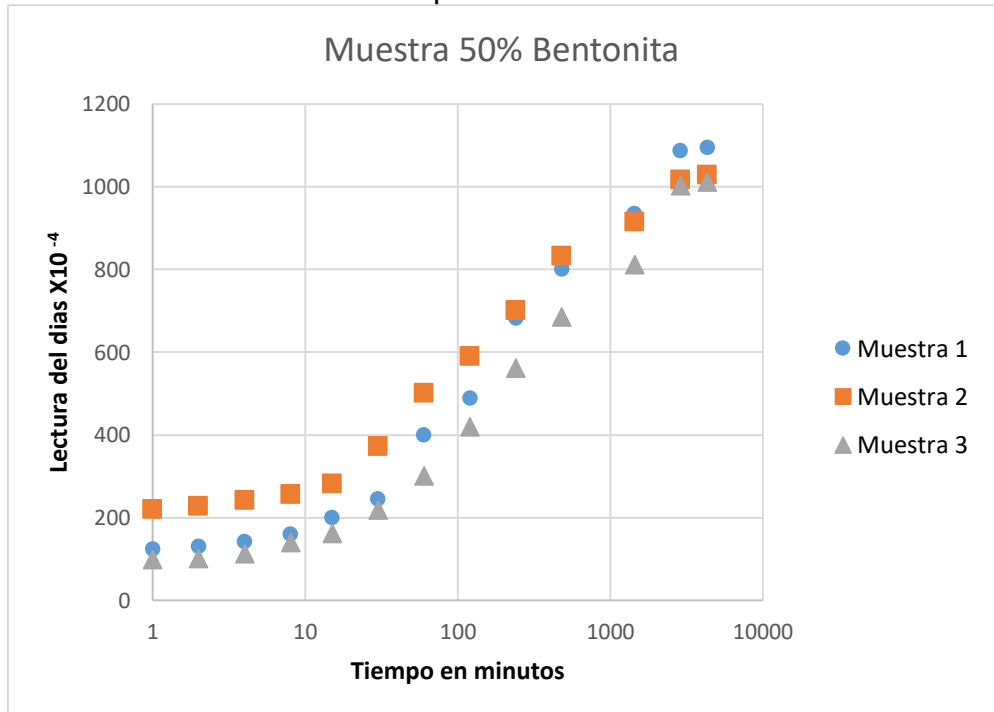
De acuerdo a los datos obtenidos posteriores a la expansión de la muestra, se procedió a generar, esta grafica para cada muestra y cada dosificación de bentonita, obteniendo las siguientes gráficas:

Gráfica 5 Curva Tiempo hinchamiento 25 % Bentonita

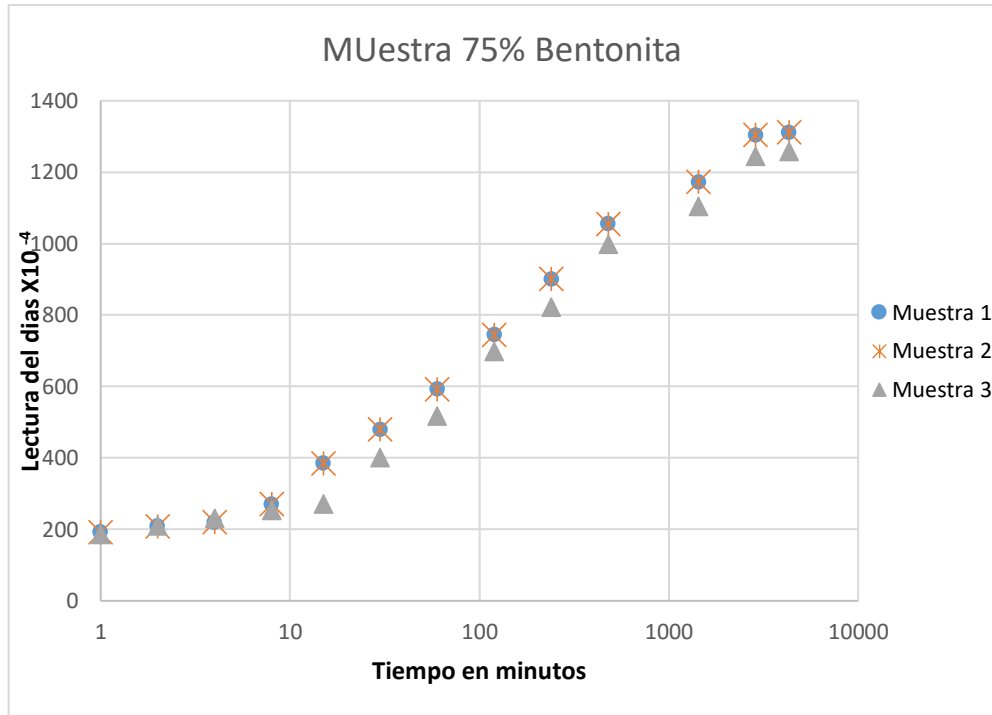


Fuente: Orjuela y Pérez, 2018

Gráfica 6 Curva Tiempo hinchamiento 50 % Bentonita

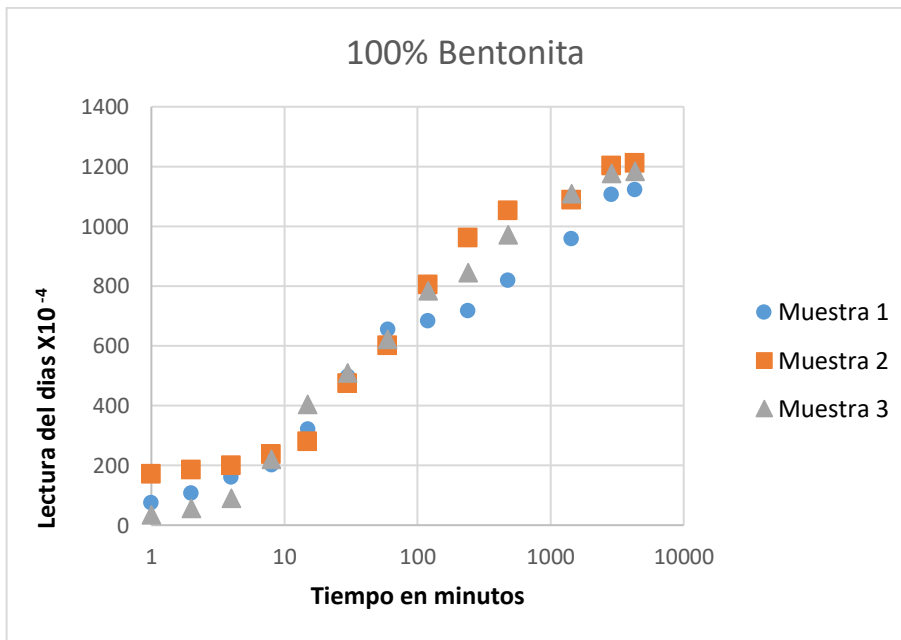


Gráfica 7 Curva Tiempo hinchamiento 75 % Bentonita



Fuente: Orjuela y Pérez, 2018

Gráfica 8 Curva Tiempo hinchamiento 100 % Bentonita



De acuerdo a los datos obtenidos de expansión en pulgadas por diez a la menos 4 ($\times 10^{-4}$) y el logaritmo del tiempo expresado en minutos, se procedió a realizar cuatro gráficas, una para cada dosificación de Bentonita, encontrándose que a pesar que la muestra 2 del 25% de bentonita presentan un comportamiento atípico, en general la tendencia de las curvas de todas las muestras presenta una tendencia conforme a lo mostrado en la figura 1 de la norma INV-173-13.

En cuanto a la dosificación del 75% de bentonita, las muestras 1 y 3, tienen el mismo comportamiento y la misma curva, por eso se observan solo dos curvas, lo que indica que a dosificación y su comportamiento de expansión es exactamente el mismo.

Etapas de Consolidación

Durante el proceso de consolidación se obtuvieron los resultados de deformación en la fase de carga y descarga de las diferentes dosificaciones y muestras. Con estos datos se procedió con el análisis de estos resultados.

Por medio de las relaciones gravimétricas y volumétricas se obtuvieron las diferentes aturas de suelos y las relaciones de vacíos con base en la gravedad específica de cada dosificación. La gravedad específica está asociada a los valores de los minerales constituyentes de la fase solida del suelo y no cuenta con una unidad de medida, por lo cual fue la base de los cálculos de los datos necesarios para obtener las relaciones de vacíos, en las diferentes presiones ejercidas durante el ensayo.

A continuación se relacionan las ecuaciones utilizadas en el proceso.

Para hallar la altura del suelo:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = G_s = \frac{W_s}{V_s} \quad G_s = \frac{W_s}{AH_s} \gamma_w$$

Ecuación 3. Ecuación base para obtener la altura del suelo

De la ecuación No. 3 se despeja la altura del suelo obteniendo:

$$H_s = \frac{W_s \gamma_w}{AG_s}$$

Ecuación 4. Ecuación utilizada para el cálculo de altura del suelo

Las relaciones de vacíos se calcularon por medio de:

$$e_0 = \frac{V_v}{V_s} = \frac{H_v}{H_s} = \frac{H - H_s}{H_s}$$

Ecuación 5. Ecuación utilizada para el cálculo de relación de vacíos inicial

Teniendo en cuenta que la etapa de consolidación del suelo se realiza posteriormente a la de hinchamiento de la muestra, se tomaron como alturas iniciales del suelo, las obtenidas luego de la etapa de hinchamiento.

Las operaciones mostradas se ejecutaron con todas las dosificaciones y todas muestras ensayadas.

En las siguientes tablas se indican los resultados obtenidos para cada dosificación y cada muestra.

25% Bentonita

Tabla 53 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 25% Bentonita muestra 1

MUESTRA NO. 1			
Δo	Δh	H	e_{se}
cm	cm	-	
2,11963	0,01448	2,11963	1,375
2,12090	0,01321	2,10643	1,3593
2,11430	0,01981	2,08661	1,3446
2,11354	0,02057	2,06604	1,3226
2,10998	0,02413	2,04191	1,2997
			1,2728

Tabla 54 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 25% Bentonita muestra 2

MUESTRA NO. 2			
Δo	Δh	H	e_{se}
cm	cm	-	
2,0869	0,0137	2,0869	1,3381
2,0818	0,0188	2,0681	1,3229
2,0780	0,0226	2,0455	1,3020
2,0787	0,0218	2,0236	1,2768
2,0772	0,0234	2,0003	1,2525
			1,2265

Tabla 55 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 25% Bentonita muestra 3

MUESTRA NO. 3			
Δo	Δh	H	e_{se}
cm	cm	-	
2,1013	0,0206	2,1013	1,3619
2,0983	0,0236	2,0777	1,3390
2,1006	0,0213	2,0564	1,3127
2,0960	0,0259	2,0305	1,2890
2,1001	0,0218	2,0086	1,2601
			1,2358

50 % Bentonita

Tabla 56 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 50% Bentonita muestra 1

MUESTRA NO. 1			
Δo	Δh	H	e_{se}
cm	cm	-	
2,2355	0,0180	2,2355	1,4452
2,2322	0,0213	2,2141	1,4257
2,2304	0,0231	2,1910	1,4025
2,2299	0,0236	2,1674	1,3774
2,2225	0,0310	2,1364	1,3518
			1,3182

Tabla 57 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 50% Bentonita muestra 2

MUESTRA NO. 2			
Δo	Δh	H	e_{se}
cm	cm	-	
2,1885	0,0224	2,1885	1,3989
2,1816	0,0292	2,1593	1,3747
2,1859	0,0249	2,1344	1,3430
2,1821	0,0287	2,1057	1,3160
2,1621	0,0488	2,0569	1,2848
			1,2319

Tabla 58 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 50% Bentonita muestra 3

MUESTRA NO. 2			
Δo	Δh	H	e_{se}
cm	cm	-	
2,1885	0,0224	2,1885	1,3989
2,1816	0,0292	2,1593	1,3747
2,1859	0,0249	2,1344	1,3430
2,1821	0,0287	2,1057	1,3160
2,1621	0,0488	2,0569	1,2848
			1,2319

75 % Bentonita

Tabla 59 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 75% Bentonita muestra 1

MUESTRA NO. 1			
Δo	Δh	H	e_{se}
cm	cm	-	
2,2802	0,0094	2,2802	1,5874
2,2723	0,0173	2,2629	1,5768
2,2644	0,0251	2,2377	1,5573
2,2583	0,0312	2,2065	1,5289
2,2413	0,0483	2,1582	1,4936

1,4390

Tabla 60 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 75% Bentonita muestra 2

MUESTRA NO. 2			
Δo	Δh	H	e_{se}
cm	cm	-	
2,2845	0,0122	2,2845	1,5955
2,2738	0,0229	2,2616	1,5817
2,2682	0,0284	2,2332	1,5559
2,2489	0,0478	2,1854	1,5237
2,2403	0,0564	2,1290	1,4697
			1,4060

Tabla 61 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 75% Bentonita muestra 3

MUESTRA NO. 3			
Δo	Δh	H	e_{se}
cm	cm	-	
2,2731	0,0168	2,2731	1,5877
2,2596	0,0302	2,2428	1,5688
2,2471	0,0427	2,2002	1,5346
2,2548	0,0351	2,1651	1,4864
2,2535	0,0363	2,1288	1,4468
			1,4057

100 % Bentonita

Tabla 62 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 100% Bentonita muestra 1

MUESTRA NO. 1			
Δo	Δh	H	e_{se}
cm	cm	-	
2,2601	0,0196	2,2601	1,7808
2,2405	0,0391	2,2210	1,7569

MUESTRA NO. 1			
Δo	Δh	H	e_{se}
cm	cm	-	
2,2375	0,0422	2,1788	1,7092
2,2319	0,0478	2,1311	1,6578
2,2022	0,0775	2,0536	1,5995
			1,5050

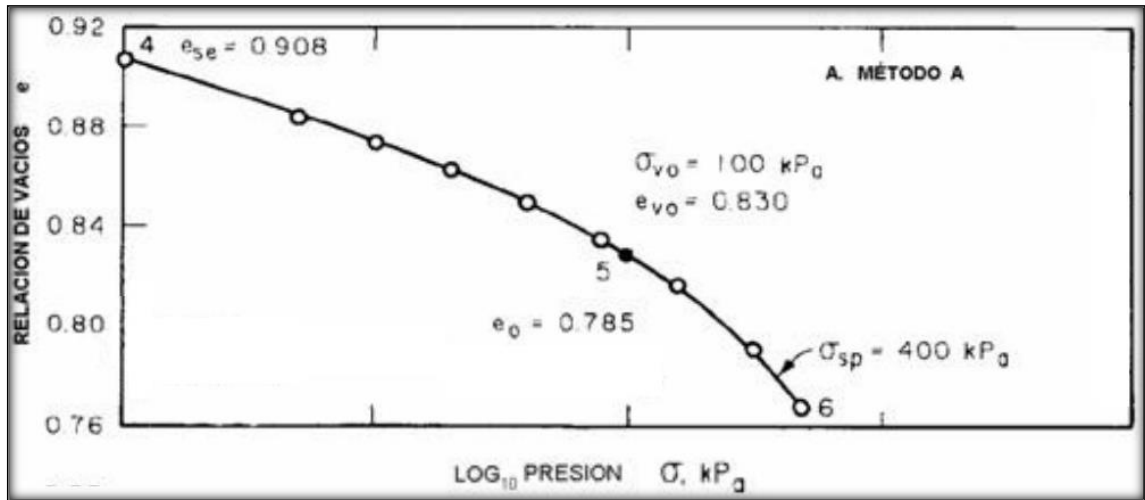
Tabla 63 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 100% Bentonita muestra 2

MUESTRA NO. 2			
Δo	Δh	H	e_{se}
cm	cm	-	
2,2527	0,0183	2,2527	1,7702
2,2487	0,0224	2,2304	1,7479
2,2327	0,0384	2,1920	1,7207
2,2136	0,0574	2,1346	1,6739
2,2083	0,0627	2,0719	1,6038
			1,5273

Tabla 64 Análisis diferencias de alturas y relación de vacíos 100% Bentonita muestra 3

MUESTRA NO. 3			
Δo	Δh	H	e_{se}
cm	cm	-	
2,2908	0,0086	2,2908	1,8049
2,2713	0,0282	2,2626	1,7944
2,2512	0,0483	2,2144	1,7600
2,2426	0,0569	2,1575	1,7011
2,2342	0,0653	2,0922	1,6317
			1,5521

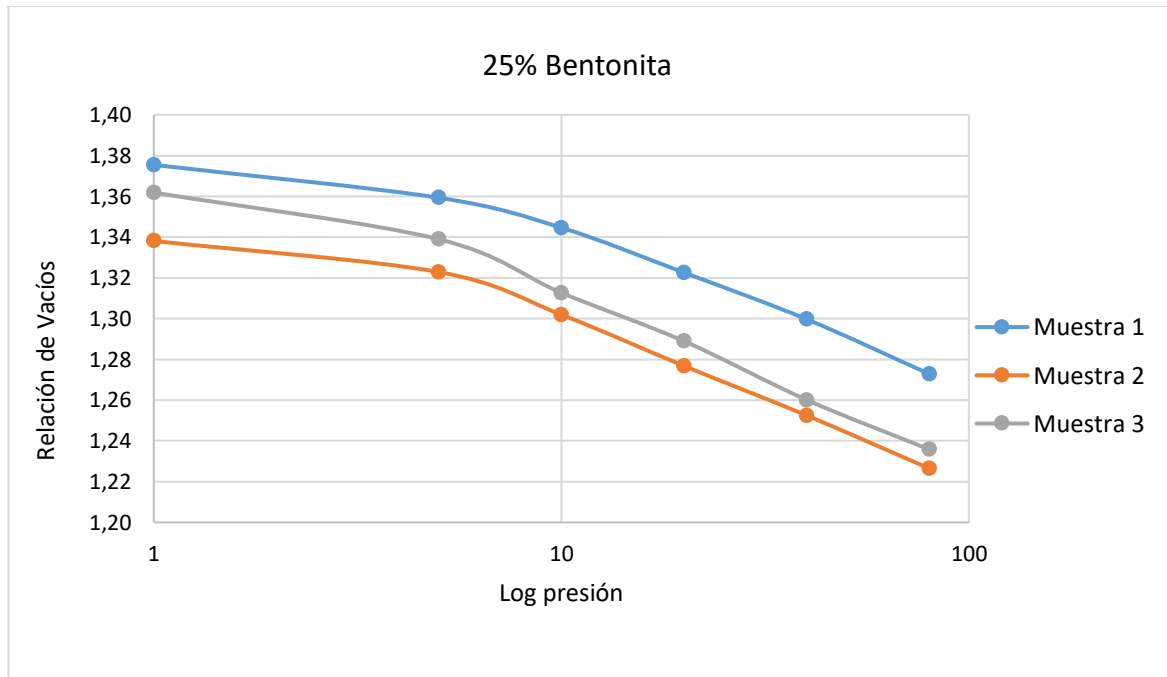
Con los cálculos de las tablas anteriores y conforme lo indicado en la Figura 2, método A de la norma INV-E-173-07, relacionada a continuación:



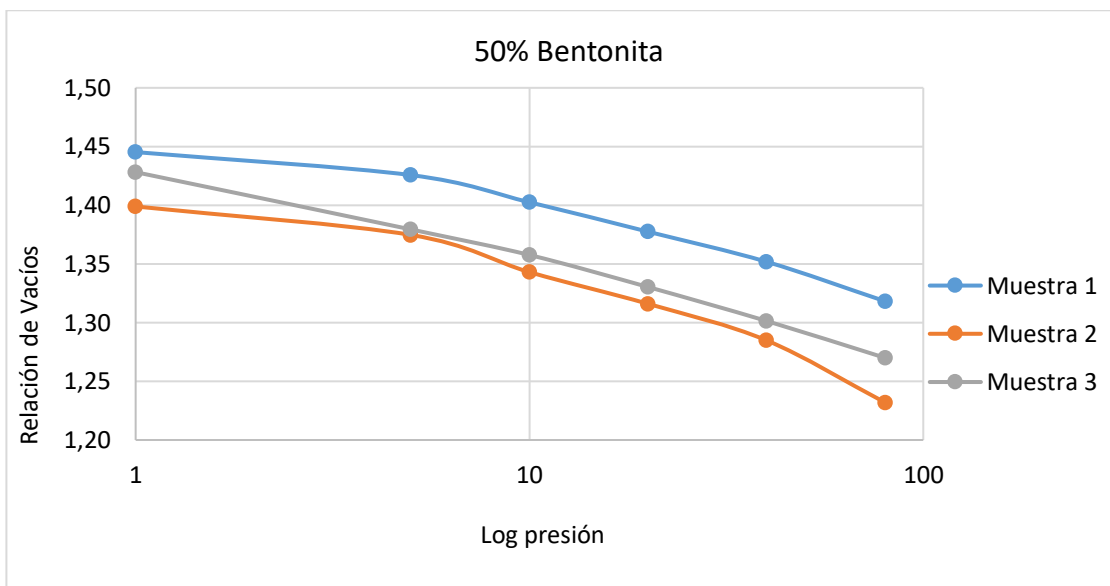
Fuente: Norma INV-13-07

Se procedió a generar las gráficas de relación de vacíos versus el logaritmo de presión, para cada dosificación y cada muestra relacionadas a continuación:

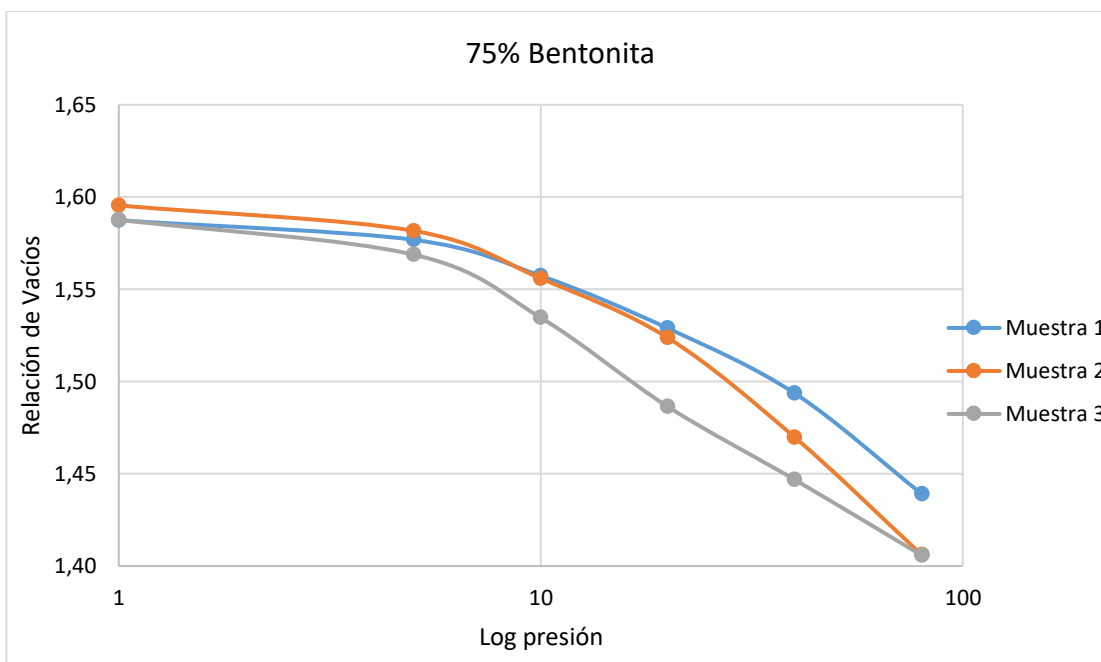
Gráfica 9 Relación vacíos Logaritmo de presión - 25% Bentonita



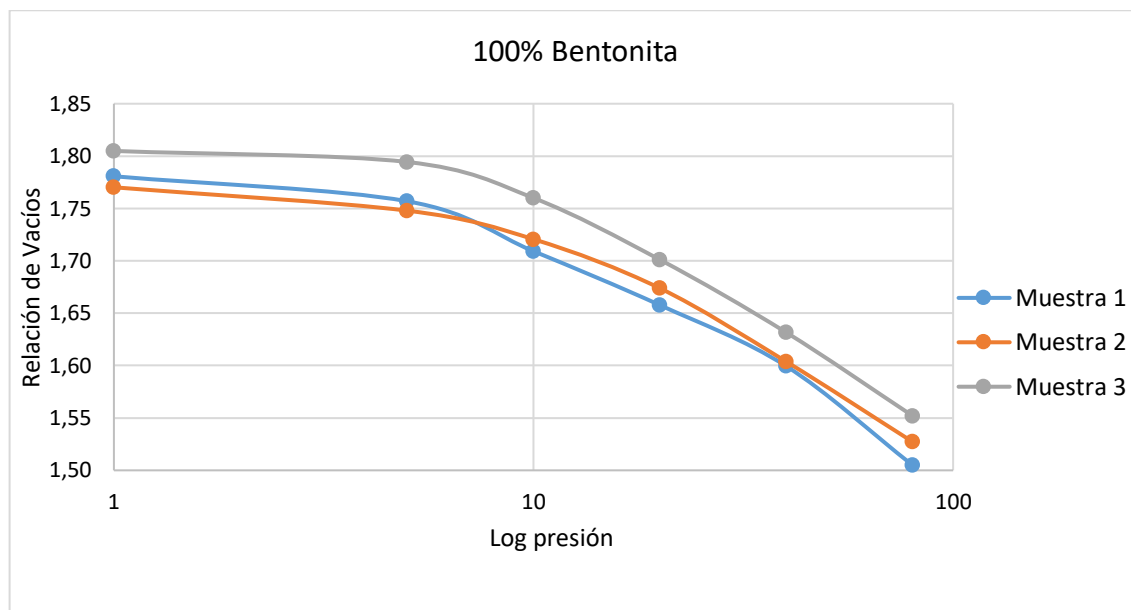
Gráfica 10 Relación vacíos Logaritmo de presión - 50% Bentonita



Gráfica 11 Relación vacíos Logaritmo de presión - 75% Bentonita



Gráfica 12 Relación vacíos Logaritmo de presión - 75% Bentonita



En las gráficas se puede observar que la tendencia para las diferentes dosificaciones de material Bentonítico en sus distintas muestras es coherente conforme a lo indicado en la norma para el método A. A su vez el logaritmo del esfuerzo es cercano a los 100 kPa, es decir, para ninguna muestra de las diversas mezclas se supera este valor.

Así mismo, para la relación de vacíos se pudo evidenciar que a mayor cantidad de material Bentonítico su relación de aumenta, así: para el 25% de Bentonita la relación de vacíos se encuentra aproximadamente entre 1,34 y 1,38, para el 50% entre 1,40 y 1,45, para el 75% entre 1,58 y 1,60 y finalmente para el 100% de Bentonita su rango es de 1,77 a 1,80.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Por la predicción de la expansión de la tabla No. 1, de Chen, Holtz y Gibbs, los valores de límite líquido que se obtuvieron por medio del estudio, para el 25 % de Bentonita, el límite líquido arroja un grado de expansión muy alto, y revisando el valor del índice de plasticidad, el índice de expansión es muy alto. Para el porcentaje de 50% continua la tendencia de muy alto para estas privas índice. Para los valores de 75% y 100% continua con un índice de expansión muy alto, ya que a mayor bentonita mayor Límite líquido e índice de plasticidad. Estos resultados fueron los esperados, ya que acorde a los resultados de límites e Índice de plasticidad ya se puede manifestar un suelo expansivo, sin ser una prueba determinante para clasificar un suelo con estos ensayos.

En la tabla No. 50 donde se analizó de forma comparativa los resultados obtenidos de Cambio Volumétrico Potencial y la expansión libre, se puede concluir que el ensayo de Lambe se debe correlacionar y revisar con resultados de otros ensayos para poder clasificar con este ensayo si el suelo es potencialmente expansivo o leve expansivo, con base en el ensayo de expansión y de Consolidómetro se encontraron datos de mayor confiabilidad ya que son de carácter cualitativo, lo que nos permite concluir si se tienen este tipo de suelos en un proyecto.

Teniendo en cuenta que tanto los límites de Atterberg como el índice de plasticidad son ensayos base y típicos para el desarrollo de una construcción civil, sumado a estos, el límite de contracción. A través de ciertas propiedades de estos son ensayos es posible determinar un grado de potencial de expansión del suelo.

A pesar que estos ensayos son de relativa facilidad su realización y de equipos disponibles en la mayoría, si no todos los laboratorios sus valores no son 100% confiables, considerando que los suelos con elevadas plasticidades sean necesariamente expansivos. Además de esto los límites de Atterberg e índice de plasticidad indican valores de medida cualitativos categorizados. Por lo cual se hace necesario realizar ensayos que brinden información cuantitativa de preferencia mayor a uno y poder realizar comparaciones más certeras; ensayos como la expansión libre con ensayos como potencial de expansión por el método de Lambe y ensayos de Consolidómetro pueden llegar a tener esa certeza que busca la posible presencia de un suelo potencialmente expansivo.

De acuerdo con el análisis de resultados obtenidos en el método de Lambe donde ninguna de las muestras se encuentra en rango de crítico o muy crítico, se procedió a una revisión del procedimiento ejecutado y nuevamente a un análisis de los resultados los cuales se encuentran dentro de los parámetros normales del desarrollo del ensayo; sin embargo se encontró que la muestra no se satura por completo, por lo que en el momento de realizar el ensayo la muestra no se

expande totalmente. Por lo anterior se recomienda que, en el momento de realizar el ensayo, la lectura se tome transcurrida más tiempo de dos horas, ya que durante este tiempo la muestra no logra su frente de saturación total.

Conforme con los resultados y posterior análisis del ensayo de Consolidómetro en sus etapas de expansión o hinchamiento y consolidación o asentamiento de la masa de suelo, se evidenció que esta metodología brinda información certera en cuanto a valores de esfuerzo en términos de presión del suelo respecto a su relación de vacíos; con información de este tipo en los proyectos de construcciones livianas, (como por ejemplo los proyectos viales), es posible determinar la presión en términos de empuje del suelo a la estructura.

En la actualidad este tipo de ensayos comercialmente son de fácil acceso y de equipamiento accesible donde no se provocaría una afectación considerable al presupuesto de una obra de construcción civil ni un retraso en la programación, por el contrario la información que brindaría puede llegar a evitar a largo plazo posibles daños a construcciones livianas que se traducen en costos que como se mencionó en este documento pueden llegar a ser mayores a costos propiciados por huracanes, tornados y terremotos impactando en cualquier economía, pública o privada.

Debido a la importancia ya descrita referente a la detección temprana de suelos expansivos, es recomendable se pueda continuar con la investigación por otros autores considerando otro tipo de masa de suelo con contenido arcilloso de diferente mineralogía, de preferencia que se caracterice por contar con una doble capa difusa, y realizarle a esta masa los ensayos desarrollados en este documento, de ser posible, incluir otros como: Análisis termo diferencial, capacidad de intercambio catiónico (CEC) y/o coeficiente de expansión lineal (COLE) con el fin de continuar realizando comparaciones y metodologías que continúen brindando información a la detección veraz de los suelos potencialmente expansivos.

8. BIBLIOGRAFIA

1. Kerrane, 2004. What Are Expansive Soils? (Post). Benson, Kerrane, Storz & Nelson, P.C. available in <http://www.bensonpc.com/blog/post/what-are-expansive-soils>.
2. Mašín, D.2017. Coupled Thermohydronechanical Double-Structure Model for Expansive Soils. J. Eng. Mech., 2017, 143(9): 04017067.
3. Norma INVIAS. 2013. INV E-120-13: Determinación del potencial del cambio volumétrico del suelo empleando el aparato de Lambe
4. ASTM. 2011. Standard Test Method for Expansion Index of Soils
5. T.W. Lambe. 1960. The Character and Identification of Expansive Soils, Soil PVC Meter, A Technical Studies Report F.H.A.-701, Federal Housing Administration, Washington 25 D.C
6. Norma INVIAS. 2013. INV E – 132 – 13. Determinación de suelos expansivos
7. Idem a referencia 5.
8. F.H. Chen. 1975. Foundations on Expansive Soils 1st Edition. ISBN: 9780444601667. Elsevier. p.p. 295
9. IS:2720 (Part 40) 1977
10. V. Puvvadi, V. Sivapullaia, G. Thallak, G. Sitharam & S. Kanakapura. 1987. Modified free swell index for clays. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 10, No. 2, pp 80–85.
11. A. Sridaharan & K. Prakas. 2000. Classification procedures for expansive soils. Proc. Institution of Civil Engineers, 143, pp 235–240.
12. Idem a referencia 5.
13. A. Mendez & V.M. Pineda. 2011. Comportamiento de cimentaciones en suelos expansivos. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.
14. G.W. Donaldson. 1969. The occurrence of problems on heave and the factor affecting its nature. Proceeding of 2nd international Research and Engineering Conference on Expansive Soils. A.E.M. Press, Texas, pp. 25-36
15. D.R. Snethen, F.C. Townsend, L.D. Johnson, D.M. Patrick & P.J. Vedros. 1975. A Review of engineering experience with expansive soils in highway subgrades. FHWA-RD-75-48, Federal Highway administration. Washington, D. C.

16. V.E. Meza. 2005. Influencia de la succión matricial en el comportamiento deformacional de dos suelos expansivos. MS Thesis. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
17. W.G. Holtz & H.J. Gibbs. 1956. Engineering properties of expansive clays. ASCE 121, Transact. pp: 641-677.
18. D.R. Snethen. 1974. Visit to Kansas Highway Commission. Memorandum for record, 26 Sept 1974. Soil Mechanics Division, Soils and Pavements Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, CE, Vicksburg, Miss.
19. F.H. Chen. 1988. Foundation on Expansive soils. American Elsevier Science Pub. New York
20. RANGANATHAM, B.V. & SATYANARAYANA, B., 1965. A rational method of predicting swelling potential for compacted expansive clays. Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 1:92-96
21. V. Raman. 1967. Identification of expansive soils from the plasticity index and shrinkage index data. Indian Eng., Calcuta 11:7-22.
22. PEARRING, J.R., 1963. A study of basic mineralogical, physical-chemical, and engineering index properties of laterite soil. Dissertation. Texas A&M Univ., College Station, TX.
23. J.H. Holt. 1969. A study of physical-chemical, mineralogical and engineering index properties of fine-grained soils in relation to their expansive characteristics. PhD. Dissertation. Texas A&M Univ., College Station, TX
24. G.R. Mc Keen & D.J. Hamberg. 1981. Characterization of expansive soils. Trans Res. Tec. 790, Trans. Res. Board 73-78.
25. D.J. Hamberg. 1985. A simplified method for predicting heave in expansive soils. M.S. thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO.
26. Masin, D
27. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/879>
28. <http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/ensayos-laboratorio-suelos-expansivos/>
29. https://oicolombia.com.co/upload/pisotecho/Cimientos/Arcillas_expansivas.pdf
30. Barbosa, R. 2003. Análisis y evaluación de los procesos de adsorción y desorción sobre carbón activado. Manizales: s.n., 2003.
31. Abrego, P., 2000, Rocas y minerales industriales de Iberoamérica, Editorial Instituto Tecnológico Geominero de España, Página 75.

32. Allen, Richard. Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos., Editorial estudio FAO riego y drenaje. Página 2.
33. Lambe, William. Mecánica de suelos. Limusa Noriega editores. Página 32.
34. Glosario de Conservación de suelos y Aguas,. 1963 Soil Quality. Vocabulary. Terms and Definitions relating to the•Protection and pollution of the soil. Draft International Standard ISO/DIS 11074/1
35. Garrett, Robert. Schlumberger Oilfield Glossary en Español. Gretchen Gillis.
36. Tuñón, Iñaki, La interface electrizada. {15 de noviembre de 2018}. . Disponible en: (https://www.uv.es/tunon/pdf_doc/Tema_Interfase2008.pdf).
37. American Society for Testing and Materials D2435 y D4186
38. Diccionario de Geotecnia. {15 de noviembre de 2018} disponible en: (<https://diccionario.geotecnia.online/diccionario/propiedad-indice/>)
39. American Society for Testing and Materials D3877 y D4829
40. Bolaños, Gustavo. Instituto de investigaciones en estratigrafía {Universidad de Caldas Colombia} {15 de noviembre de 2018} Disponible en: (<http://iies.ucaldas.edu.co/es/eventos/conferencia-microscopio-electrico-de-barrido>).
41. Redolfi. 2007. Suelos colapsables. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de ciencias exactas, Físicas y naturales. Área de geotecnia.
42. Das, Barja. Fundamentos de ingeniería geotécnica: Origen de los depósitos del suelo, tamaño de grano y forma. Cuarta edición. México D.F. Cenage Learning. 2013.
43. Casadiegos, Flor Giovanna Navia. 2010. Influencia de gradientes térmicos en la estabilización de suelos. Bogotá D.C. : s.n., 2010
44. Parrado Breidy y Toloza Julieth. Determinación de la superficie específica en suelos caolínicos y Bentoníticos mediante la técnica de adsorción de agua destilada aplicando diferentes gradientes térmicos. Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingenierías. Programa de Ingeniería civil.
45. Norma INVIAS. 2007. INV E-173-07: Método para medir el potencial de asentamiento o expansión unidimensional de suelos expansivos.