

*Universidad de Matanzas
Facultad de Ingenierías*



“Aproximación al estudio de la capacidad de cambio de volumen de las arcillas en el sector Oeste de Cárdenas”

Trabajo de Diploma en presentado en opción al Título de Ingeniero Civil.

Autor: Lazaro Eliecer Díaz Ruiz

Tutor: MSc. Ing. Ovidio Darío Rodríguez Rodríguez

Matanzas, 2019

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Por medio de la presente declare que soy el único autor de este trabajo de diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas a darle el uso que estime más conveniente.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

Presidente

Secretario

Vocal

**“EL HOMBRE SE HACE VIEJO MUY
PRONTO, PERO SABIO DEMASIADO TARDE”**

Anónimo

DEDICATORIA

El siguiente trabajo es el resultado de años de estudio, noches sin dormir, días tristes, días felices, pero lo importante es que llegué y en muchas ocasiones gracias a personas que me tendieron la mano y me ayudaron a seguir adelante. Es por eso que si alguien lee y cree que por que su nombre no yace en el documento no le recuerdo, está equivocado porque en mi mente siempre estarán aquellos que me ayudaron y aquellos que me quisieron ver derrotado porque esos también me impulsaron a seguir para demostrarles que cuando se quiere se puede.

Este trabajo de diploma va dedicado primeramente a mi madre que siempre creyó en mí, en que podía lograr lo que me propusiera y se sintió orgullosa en cada prueba que aprobé y me ayudo a superar la que suspendí.

Como olvidar a mi padre el cual sin expresar una palabra era capaz de decirme: ¡Sigue, tu puedes! porque sé que siempre está orgulloso de mi, de como soy y de lo que poco a poco me fui convirtiendo.

Este documento lo dedico a mi amiga del alma, mi compañera inseparable, aquella que siempre está ayudándome a mejorar y ser mejor persona cada día, pase lo que pase siempre te estaré agradecido de que hallas estado en mi vida y me ayudaras como lo hiciste: Yelién.

Como olvidar a mis locos del cuarto 108 Yasmany y Michel que desde el principio estuvieron ahí, con las noches sin dormir muchas veces jugando, hablando, llegando a convertirse en amigos inseparables e insustituibles y a Colina por supuesto que, aunque te uniste al club de los Leones tarde poco a poco te buscaste tu espacio.

Tampoco se pude dejar atrás a las becas Neikys, Bety, Hany, Lía, Lorenys y Yanet que desde el principio siempre estuvieron hay para estudiar y ayudarnos entre nosotros sacar adelante cualquier problema de forma incondicional, convirtiéndose en parte fundamental de mi etapa de universitario, la cual siempre recordaré con una sonrisa gracias a ellas.

No puedo olvidar a mi tutor Ovidio que con sus años de experiencia y su gran paciencia supieron buscar tiempo para atenderme y ayudarme para llegar a lograr esta gran investigación.

Como olvidar a mi ori que me guió por el buen camino, a mis orishas, a mi Ángel de la Guarda y Orula por sus sabios consejos.

AGRADECIMIENTOS

A todos mis tíos, en especial a mi tío Fermín que me sirvió como chofer y consejero personal siempre y a mi tía Pilar que siempre me brindo un hogar cuando lo necesité.

A mis abuelos que siempre me ayudaron.

A mi hermana y mi sobrina que siempre estuvieron al tanto de lo que necesité.

A los compañeros del Laboratorio de Materiales que supieron buscar un espacio para ayudarme en tan poco tiempo en especial Yare.

Al profesor Manuel Pedroso que no se pude quedar atrás siempre tratándonos como sus hijos ayudándonos en cada problema.

A todos los profesores que de una forma u otra tuvieron algún vínculo conmigo durante estos años de universidad, en especial a Mariamne de la Torre que fue una de las primeras personas en enseñarme verdadera ingeniería.

RESUMEN

Los suelos arcillosos son conocidos por adquirir plasticidad al mezclarse con agua, provocando deterioro en taludes, rotura de las instalaciones, asentamientos diferenciales y deformaciones en los pavimentos. El hinchamiento por hidratación y el agrietamiento por retracción son los causantes de muchos fallos estructurales, siendo características principales de las arcillas expandibles. Evitar dichos efectos constituye un verdadero desafío ingenieril, resultando en la mayoría de los casos en altos costos para la solución. La no existencia de mapas ingeniero-geológicos que delimiten dichos suelos para la construcción y/o planificación física constituye una gran problemática. A partir de la información conservada en el archivo técnico de la ENIA Matanzas, además del trabajo de campo realizado por el autor permitió realizar una investigación donde a partir de tablas basadas en investigaciones de suelos y aplicadas a la estadística se clasificó el potencial expansivo de una zona específica posibilitando a su vez la entrega de los trabajos a los clientes garantizando su calidad en pro de la estabilidad y durabilidad de las obras ya que las tabulaciones utilizadas ofrecen resultados de forma muy rápida . Entre los métodos de trabajos utilizados están la revisión de documentos cartográficos y normativos, los ensayos de suelos en laboratorio y trabajos de campo, avalando el rigor científico de los resultados obtenidos.

Palabras claves: arcillas expandibles; plasticidad; mapa ingeniero-geológicos; hinchamiento.

ABSTRACT

Clayey grounds are known to acquire plasticity when it blends with water provoking deterioration at slope, breaking of facilities, differential settlements and deformations at pavement. The swelling for hydration and the cracking for retraction are the cause of many structural failures, being characteristic principal of expandable clay. Avoiding the aforementioned effects constitutes a true defiance for the engineers, clause for the most part in tall cost for the solution. The nonexistence of maps engineers geological that they delimit the aforementioned grounds for the construction and or a great problem constitutes physical planning. As from the preserved information in the ENIA's technical file Matanzas, in addition to the fieldwork accomplished by the author permitted accomplishing an investigation where use tables based on investigation of land an applicate to statistical was classify the expansive potential of a specific zone making possible in turn the delivery of works to the clients guaranteeing his quality in behalf of stability and durability of work since utilized tabulation offer results of very fast from. Enter the methods of utilized work the revision of cartographic document and sets of rules, the essays of grounds are in laboratory and farms works, vouching for the scientific rigor of obtained results.

Key words: Expandable clays, plasticity, map engineer geological, swelling.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
Capítulo 1 Revisión Bibliográfica	6
1.1 Conceptualización.....	6
1.2 Composición de las arcillas.....	7
1.3 Formación de las arcillas.....	14
1.3.1 Meteorización Física.....	15
1.3.2 Meteorización química.....	16
1.4 Factores que influyen en el proceso de expansión.....	19
1.5 Identificación de minerales arcillosos.....	21
1.5.1 Métodos indirectos.....	22
1.6 Métodos directos.....	25
1.7 Otros métodos.....	25
1.8 Otros métodos para determinar hinchamiento en el suelo.....	26
1.9 Afectaciones producto a las arcillas expansivas.....	28
Conclusiones parciales:	32
Capítulo 2 Materiales y métodos.....	33
2.1 Localización.....	33
2.2 Caracterización de la zona de estudio.....	34
2.3 Ensayos.....	36
2.4 Validación del Método.....	36
2.5 Trabajos de Campo.....	39
2.5.1 Metodología de investigación.....	40
2.5.2 Etapa de Laboratorio.....	40
2.5.3 Determinación de la distribución granulométrica en las partículas menores de 2 mm (No. 10) a partir del Hidrómetro.....	41
Aparatos, utensilios, medios de medición y reactivos.....	41
Preparación de la muestra.....	42
2.5.4 Determinación de la distribución granulométrica en las partículas menores de 2 mm (No. 10).....	43
Expresión de los resultados.....	44
2.5.5 Determinación del Límite Líquido.....	44
Aparatos, utensilios y medios de medición.....	44
Procedimiento.....	46
2.5.6 Determinación del Límite Plástico.....	47
Procedimiento.....	47
2.5.7 Determinación del índice de plasticidad.....	48
2.6 Expresión de los resultados.....	49
2.6.1 Determinación del Límite Líquido.....	49
2.6.2 Determinación del límite plástico.....	49
2.7 Resultados finales.....	49

Conclusiones parciales.	50
Capítulo 3 Resultados de la investigación	51
3.1 Expresión de los resultados obtenidos en los ensayos.....	51
3.1.1 Peso específico.	51
3.1.2 Límite Líquido.....	52
3.1.3 Límite Plástico.....	53
3.1.4 Granulometría a través del Hidrómetro.	53
3.2 Expresión de los resultados a través de las tabulaciones.....	54
3.3 Expresión de los resultados aplicados al Software 11.....	55
3.4 Comentario crítico a estos métodos.....	57
Conclusiones parciales	58
Conclusiones.....	59
Recomendaciones.....	60
Referencias Bibliográficas	61
Anexos.....	63

INTRODUCCIÓN

El suelo constituye el material principal para el Ingeniero Civil, sirviendo de soporte para toda obra: puentes, edificaciones, canales; constituyendo el material de relleno para las obras de movimiento de tierra o conformación de taludes. Es el encargado de brindar estabilidad a la estructura por lo que es sometido en muchas ocasiones a varios procesos para lograr su buen comportamiento haciéndose imprescindible un buen estudio de sus características, partiendo de la información existente y reflejada en los mapas ingeniero-geológicos donde intervienen diversas disciplinas, principalmente la Ingeniería Geológica. Esta disciplina estudia y analiza todos aquellos factores que pueden afectar las estructuras, desde su planificación hasta su mantenimiento por lo que a esta se refieren todas las actividades relacionadas con la clasificación e identificación de suelos y rocas, así como sus propiedades lo que posibilita comprender el comportamiento de las mismas bajo la influencia de las construcciones.

Con la información obtenida en los ensayos que se les realizan a los suelos pueden confeccionarse mapas ingeniero-geológicos los cuales, según un colectivo de autores de la Universidad de Coruña en su libro *“Prácticas de Geología. Mapas Geológicos y Problemas”* (2014): “Un mapa geológico es la representación, sobre un mapa topográfico, de los diferentes tipos de unidades geológicas que afloran en la superficie terrestre, así como de sus respectivos contactos”. Para distinguir las rocas se emplean diferentes tonalidades de colores. En un mapa geológico se reflejan también las estructuras tectónicas (pliegues, fallas.), los yacimientos de fósiles, aspectos hidrogeológicos (fuentes, red de drenaje), recursos minerales, etc.”. Para facilitar la caracterización de los estratos y el trabajo en campo estos son confeccionados con el objetivo de mejorar el conocimiento geológico general de una zona determinada, agrupar formaciones geológicas por edades (mapas cronoestratigráficos), determinar zonas de peligro (mapas de riesgo). El trabajo de campo para la confección de cada uno de ellos es común, solo se diferencia en la metodología aplicada en dependencia del objetivo que se persiga.

Muchas construcciones realizadas en Cuba se basan en criterios donde las características geológicas y geotécnicas de la zona del emplazamiento escasean producto de la ausencia de

la documentación necesaria. Estas situaciones conllevan a daños críticos en un futuro no muy lejano para la estructura, desde hundimientos hasta asentamientos diferenciales, disminuyendo considerablemente el tiempo de vida útil de la estructura considerándose un derroche de presupuesto y recursos materiales.

Según los ingenieros Julio Patrone y José Enrique Prefumo a partir de su trabajo "*La acción de los suelos expansivos sobre las cimentaciones. Métodos de prevención y control*" (2010), a nivel mundial se estima que los daños en las construcciones sobre suelos expansivos superan los dos billones de dólares. Producto de esta alarmante cifra la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería formó un Comité Técnico para realizar investigaciones acerca de los suelos expansivos ya que, en ocasiones, los derrumbes y colapsos no muestran señales claras cuando las afectaciones son producidas por el suelo, lo que puede provocar el fallo estructural de forma repentina. No fue hasta 1930 cuando muchos ingenieros se percataron de que los daños que las estructuras sufrían eran producto del potencial expansivo del estrato en el que se encontraban, partiendo de esto se comenzó a reconocer que muchas de las patologías de las estructuras eran causadas por asentamientos. Uno de los principales causantes son las arcillas expandibles las cuales se estructuran mayormente por silicatos de aluminio hidratados y silicatos de magnesio y hierro en proporciones menores. Estos, a su vez, poseen una estructura cristalina definida cuyos átomos se disponen en láminas y su interacción con el agua hace que constituyan un peligro para toda edificación ya que provoca el hinchamiento por hidratación y el agrietamiento por retracción.

Existe poca información sobre los estudios de las arcillas en la provincia de Matanzas. El Ingeniero Geólogo Ricardo Mayet Hechavarría realizó en el año 2005 para su trabajo de diploma un análisis de la zona occidental que titula "*Depósitos de arcillas abigarradas en Cuba Occidental*". En esa investigación se realiza el análisis de diversas asociaciones estructuro-formacionales, así como formaciones geológicas, incluyendo la Formación Güines que abarca gran parte de nuestro territorio, pero no se delimitan las zonas con arcillas expandibles ya que no entra dentro del objetivo de su investigación al igual que la mayoría de los trabajos referentes a estos tipos de suelo que se han realizado para la construcción en otras zonas del país. La Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas

(ENIA) realiza la toma de muestra de las zonas donde son contratados clasificando los suelos pudiendo determinarse la presencia de arcillas, pero no llega a realizar estudios de expansibilidad.

Justificación del Problema: La construcción sobre suelos arcillosos con propiedades expansivas puede generar graves afectaciones a las estructuras, desde rotura de instalaciones hasta asentamientos diferenciales por lo que se convierte en prioridad el conocimiento de las características del emplazamiento de la obra a fin de evitar fallos por esta causa.

Desde el año 1986 la ENIA de Matanzas fue la entidad encargada de confeccionar los mapas ingeniero-geológicos de la provincia, aunque la tarea comenzó hace 33 años, todavía existen varios municipios que no cuentan con esa información. Esto hace difícil la ubicación de estratos arcillosos a la hora de proyectar por lo que se concibe como:

Problema Científico: No existe ninguna referencia sobre el potencial expansivo de las arcillas en la zona de estudio.

Estableciendo de esta forma como hipótesis que: Hipótesis: Si se conociera el potencial expansivo de las arcillas del sector Oeste de Cárdenas se facilitarían a las entidades correspondientes la conformación de un criterio en cuanto a la aceptación de la parcela para la construcción y tomar las medidas necesarias para contrarrestar los efectos de este fenómeno.

A partir del planteamiento anterior queda establecido como

Objetivo General: Caracterizar la expansividad de las arcillas de la zona de estudio.

Objetivo específico:

- Revisar el estado del arte referente al tema.
- Realizar un diagnóstico del área de estudio.
- Caracterizar la expansividad de las arcillas de la zona de estudio.

Tareas de Investigación:

- Revisión del estado del arte referente al tema.
- Realización de un diagnóstico del área de estudio.
- Caracterización de la expansividad de las arcillas de la zona de estudio.

Existe un gran cúmulo de entidades que pueden ser beneficiadas con los resultados obtenidos por esta investigación: desde la propia ENIA, el Gobierno, el Instituto de Planificación Física, entre muchos otros organismos encargados de la inversión, proyección y construcción en la provincia, otorgándole gran valor metodológico, por su necesario uso, sirviendo como guía para la ubicación de obras.

Métodos Teóricos

Análisis-Síntesis: para poder procesar la información con el fin de determinar los criterios necesarios para la resolución del problema.

Histórico-Lógico: Posibilita revisar los antecedentes de la situación de los mapas ingeniero-geológicos que faciliten al estudio, así como la evolución de los estratos, partiendo de la edad geológica de la zona de estudio.

Inducción-Deducción: Aplicado para generalizar los datos obtenidos por la documentación permitiendo analizar las investigaciones realizadas

Método Empírico

Revisión de la documentación: posibilita la revisión de toda la documentación necesaria para determinar la ubicación para la toma de muestras, así como los parámetros a determinar.

Medición: producto que esta investigación se basa en la medición de parámetros y basados en ellos clasificar el suelo.

El trabajo queda estructurado de la siguiente forma: Resumen, Introducción, Desarrollo: El Capítulo 1 Revisión bibliográfica, Capítulo 2 Materiales y Métodos, Capítulo 3 Resultados de la investigación, Conclusiones, Recomendaciones, Bibliografía y Anexos.

Capítulo 1 Revisión Bibliográfica

En el presente capítulo se realiza una explicación sobre diversos temas de interés para la investigación. Para poder entender el proceso de expansión de las arcillas se deben dominar conceptos, así como conocer su estructura sin olvidar el proceso de formación de las mismas. Para la obtención de los resultados es de vital importancia la realización de ensayos que nos permitan tomar un criterio sobre las características del firme, por lo que es necesario conocer las diversas formas de obtención de muestras para mantenerlas lo más inalteradas posibles.

1.1 Conceptualización.

Se llaman “arcillas expansivas” a aquellas que presentan cambio de volumen con los cambios de humedad, cuando la arcilla se humedece sufre fuerte expansión que produce daños considerables en paredes y pisos sobre todo en climas de largos o intermitentes períodos de humedad, debido a los cambios de volumen con los cambios de humedad (Armos, 2016).

Una arcilla expansiva es aquella susceptible de producir grandes cambios de volumen en directa relación con los cambios en la humedad del suelo: se expanden con la humedad y se contraen al secarse (Viera, 2013).

Por lo que se puede plantear que una arcilla expansiva es un tipo específico de arcilla que sufre cambios de volumen en dependencia de la humedad que presenta, ocurriendo expansión o retracción.

De forma general, las arcillas expandibles constituyen un riesgo para la construcción partiendo de su reacción incontrolable con el agua y, por ende, del desencadenamiento que se produce con esfuerzos capaces de fracturar principalmente pequeñas zapatas que soportan pequeñas cargas siendo las más propensas a ser levantadas. Hay que tener en cuenta que cuando la arcilla se sitúa a una gran distancia por debajo del nivel de la rasante se dificulta el efecto que producen.

Partiendo de que los cambios de humedad son los que dan origen a las reacciones, la ubicación y uso de las edificaciones juega un papel fundamental para la prevención de sus efectos negativos ya que existen ciertos tipos de plantas capaces de extraer rápidamente el agua del suelo, así como la presencia de hornos y calderas que calientan el suelo a altas temperaturas, de igual forma puede suceder con filtraciones de tuberías y regadíos (Suarez , 2016)

1.2 Composición de las arcillas.

Desde épocas pasadas comenzó la investigación de las propiedades mineralógicas de las arcillas siendo de gran importancia para la construcción ya que el comportamiento que presenta este tipo de suelo está influenciado por su estructura y composición.

Las arcillas que se encuentran de forma natural están constituidas por varios minerales separados en dos grupos: primario y secundario. Producto de la descomposición de las rocas ígneas y metamórficas que dan origen a las arcillas surgen los denominados minerales primarios y como resultado de procesos químicos y físicos ocurren cambios en su estructura original formándose los minerales secundarios. La composición de estos suelos se debe principalmente al tipo de roca que fue afectada por la meteorización (Hecheverría, 2005).

Desde el punto de vista químico, los minerales arcillosos son silicatos de aluminio, hierro y magnesio formados, a su vez, por dos elementos fundamentales: un tetraedro en el que los átomos de oxígeno rodean a un átomo de silicio y el segundo es un octaedro en el que un átomo de aluminio, hierro y magnesio están rodeados por seis átomos de oxígeno o iones hidroxilo (Alpañes, 1991). Estos dos elementos combinados entre si dan lugar a la formación de una gran variedad de minerales arcillosos agrupados en forma de láminas las cuales pueden ser de tipo alumínico y tipo silícico. Las láminas alumínicas está constituida por un átomo de aluminio rodeado de oxígeno e hidrógeno, formando octaedros los cuales, al repetirse en grupos, dan lugar a la redícula laminar de tipo alumínico (Espinoza, 2015).

Los silicatos son el grupo más importante constituyendo el 25% de los minerales conocidos y cerca del 45% de los más comunes (Espinoza, 2015). Esto ocurre producto a que poseen grandes cantidades de silicio y oxígeno recibiendo el nombre de “formadores de roca”.

Según su estructura reticular, los minerales de las arcillas se encuentran en tres grandes grupos: montmorillonita, ilitas y caolinitas.

La estructura de los tres principales grupos se encuentra caracterizada por:

- Las caolinitas se encuentran formadas por una lámina silícica y otra alumínica que se superponen indefinidamente. La unión entre todas las retículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua entre ellas. En consecuencia, estas arcillas son relativamente estables en presencia de agua (ENIA, 2006).
- Las montmorillonitas están formadas por una lámina alumínica entre dos silícicas, superponiéndose indefinidamente. En este caso, la unión entre las partículas del mineral es débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en las estructuras con relativa facilidad a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar. Lo anterior produce un incremento en el volumen de los cristales, lo que se traduce macrofísicamente en una expansión.
- Las ilitas están estructuradas análogamente a las montmorillonitas, pero su constitución interna manifiesta tendencia a formar grumos de materia lo que reduce el área expuesta al agua por unidad de volumen, por ello, su expansividad es menor que las anteriores y, en general, las arcillas ilitias se comportan mecánicamente en forma más desfavorable para el ingeniero (Rodríguez, 2005).

Tabla 1.1 Clasificación de minerales arcillosos más comunes según su estructura

(Rodríguez, 2005).

<i>Minerales arcillosos cristalinos más comunes</i>					
<i>Tipo de estructura particular</i>					
<i>Dos capas (1:1)</i>		<i>Tres capas (2:1)</i>		<i>Compuesta</i>	<i>Unidimensional</i>
<i>Forma Laminar</i>	<i>Forma alargada</i>	<i>Expansivas</i>	<i>Poco expansivas</i>		
Caolinita	Halloysita	Montmorillonita	Illita	Clorita	Atapulgita
		Nontronita			Sepiolita

		Vermiculita			
--	--	-------------	--	--	--

Tabla 1.2 Propiedades de las arcillas más comunes (Potes, 2016).

<i>Espacio Interlaminar</i>	<i>Angosto (2.8 Å)</i>	<i>Amplio y variable (10-30 Å)</i>
Superficie	Solo externa	Interna considerablemente
Capacidad de agua	Escasa	Grande
Imbibición intercrystalina	No	Si
Capacidad de adsorción	5 ml	100 ml
Reacciones de cambio de (bases) cationes	Muy rápida (solo externa)	Muy lenta
Dispersión	Difícil	Fácil
Disolución de Sales	Con escasa viscosidad	Con alta viscosidad
Tipotropía	Confusa	Marcada
Numero de Plasticidad	Pequeño	Grande

Las arcillas laminares como la montmorillonita, clorita o illita, están compuestas por varias capas apiladas paralelas a semejanza de un emparedado ya que se encuentra una hoja tetraédrica acompañada a cada lado por dos hojas tetraédricas gracias a la superposición indefinida de una lámina de alúmina entre dos de sílice con una unión muy débil posibilitando la entrada del agua (Vallejo, 2002). No solamente estos grupos ocasionan expansión ya que existen otros como la vermiculita y la nontronita, pero su presencia es muy baja.

Una de las teorías más comunes que han sido desarrolladas para explicar la estructura interna de las arcillas se presenta a continuación:

“La superficie de cada partícula de suelo posee carga eléctrica negativa, según se desprende de la estructura iónica de la misma. La intensidad de la carga depende de la estructuración y composición de la arcilla. Así, la partícula atrae a los iones positivos del agua (H+) y a cationes de diferentes elementos químicos tales como Na+, K+, Ca++, Mg++, Al+++, Fe+++, etc. Lo anterior conduce, en primer lugar, al hecho de que cada partícula individual de arcilla se ve rodeada de una capa de moléculas de agua orientadas en forma definida y ligadas a su estructura (agua absorbida)” (Rodríguez, 2005).

Dentro del estudio de las arcillas hinchables existe un aspecto fundamental y es la capacidad de intercambio catiónico. El catión absorbido puede ser un ion de simple carga como el sodio o un ion de doble carga como el magnesio o el calcio. Partiendo de lo expuesto anteriormente, conociendo que en el caso de la montmorillonita sin presencia de agua tiene un espacio entre capa de 9,8 Å si es sódica y 12.1 Å si es calcio por lo que, cuando entra en contacto con el agua el espacio entre capas aumenta pues, según investigaciones realizadas en Perú, la montmorillonita a base de calcio se expande hasta 17 Å, mientras que la montmorillonita sódica se expande hasta 40 Å (Alban, 2015). Por lo tanto, según la cantidad de cationes asociados con la arcilla variará el espesor de la película. La montmorillonita sódica es conocida por su alta expansividad, alta plasticidad y baja permeabilidad. Siempre se debe recordar que a mayor capacidad de intercambio catiónico mayor es su inestabilidad.

Tabla 1.3 Capacidad de intercambio catiónico de las arcillas (Viera, 2016).

<i>Arcilla</i>	<i>Capacidad de intercambio catiónico en miliequivalentes por cien gramos</i>
Caolinita	3 - 15
Aloisita-2H ₂ O	5- 10
Alosita-4H ₂ O	10 – 40
Illita	10 - 40
Montmorillonita	8 - 150

La presencia de cationes monovalentes como el sodio producen una fuerza de atracción más débil permitiendo que más agua penetre entre las láminas, sin embargo, la presencia de cationes que provocan mayor fuerza de atracción entre las laminillas como los divalentes calcio y magnesio, reducen la cantidad de agua que se puede absorber (Tucker, 1991).

Los cristales de las arcillas pueden verse modificados si circula por su masa agua con sales de sodio en disolución u otro compuesto ocurriendo un intercambio de cationes entre el agua y los compuestos absorbidos. La capacidad que tengan los compuestos de intercambio depende del grado de acidez, es decir, a medida que el pH del suelo disminuye, mayor será el intercambio dependiendo, además, de la concentración de la solución. Esto es, generalmente, usado para modificar las propiedades de las arcillas al modificar los cationes ya que modifica las propiedades de plasticidad y resistencia, constituyendo una vía para el mejoramiento del suelo, por ejemplo, cuando se ejecutan estabilizaciones con cloruro cálcico o cloruro sódico disueltos en agua mediante riego sobre caminos no pavimentados al comienzo de la temporada seca para controlar el polvo pues las características higroscópicas de estas sustancias ayudan a mantener la humedad en la superficie de la vía. En zonas costeras, el tratamiento puede simplificarse regando agua de mar.

Las arcillas presentan diferentes estructuras debido a que las láminas constitutivas de las arcillas posean cargas negativas de diferente intensidad, estas estructuras quedan resumidas como las siguientes:

- Simple: Esta es donde se encuentra la disposición típica de los suelos como las gravas producto de la acción de la gravedad donde las partículas se encuentran apoyándose unas sobre otras y cada una tiene varios puntos de apoyo. (Roja, 2018)

- Panaloide: En este caso la acción de la gravedad hace que el material, en partículas pequeñas con 0.02 mm de diámetro o menores, sedimente en ambiente acuoso. Debido a esto, durante la sedimentación, estas pequeñas partículas son atraídas por otras formando celdas semejantes a panales con gran cantidad de espacios vacíos.
- Floculenta: Es similar a la panaloide solo que sus cadenas de partículas son dobles.
- Compuesta: En raros casos la sedimentación ocurre solamente con pequeñas partículas, normalmente interviene una gran variedad de tamaños y formas, frecuentemente ocurre en zonas donde el contenido de sales es apreciable como el mar.
- Dispersa: Como resultado de la variación del contenido de agua la cual con sus iones orienta las láminas de arcilla, en sus aristas puede ocurrir en ocasiones una separación y orientación de la estructura interna.
- Castillo de naipes: Goldschmidt y Lambe proponen una interpretación diferente para los flóculos de la estructura ya que las partículas de las arcillas son láminas con diferente intensidad de carga y magnitud en la superficie como en las aristas, por ello las partículas tienen un acomodo parecido a un castillo de naipes o floculada.

A partir de una investigación realizada en Villa Clara se obtuvieron como resultados de ensayos como la fluorescencia de rayos x (espectrómetro Philips PW1400, tubo de Rh, 30 kV, 60 mA) (Pino, 2016) una caracterización de dicha arcilla en estado natural.

Tabla 1.4. Composición de arcilla de Villa Clara (Pino, 2016).

<i>Componente</i>	<i>%</i>	<i>Componente</i>	<i>%</i>
SiO ₂	43.89	K ₂ O	1.10
Fe ₂ O ₃	11.13	MnO	0.14
Al ₂ O ₃	24.73	Na ₂ O	1.99

CaO	1.38	Otros	3.11
MgO	2.63	P.I.	9.81
SO3	0.08		

Las arcillas son minerales que pueden variar sus propiedades a partir de factores externos. En una investigación realizada en La Habana, Cuba, sobre una bentonita natural de Managua se obtuvieron los siguientes resultados (Linnet Santa Cruz 2008):

Tabla 1.5. Caracterización de arcilla de la Habana (Santa Cruz, 2008).

<i>Compuestos</i>	<i>%</i>
SiO2	47,56
Al2O3	16,73
Fe2O3	9,75
TiO2	0,79
CaO	3,92
MgO	1,72
MnO	0,31
Na2O	0,35
K2O	0,15
P2O5	<0,01
Cr2O3	<0,01
SO3	0,08
PPI	18,2
Total	99,55

Con las dos investigaciones que se realizaron en el territorio nacional el autor pudo llegar a la conclusión de que a pesar de estar separados por largas distancias e incluso pertenecer a diferentes formaciones las arcillas presentan, aunque no en su totalidad, similar composición y proporción referente a sus componentes, aunque existan ausencia de algunos de sus compuestos.

De forma general, los silicatos son formados por apilamiento de capas hexagonales y de capas compuestas teniendo un número constante de capas denominadas “hoja”.

1.3 Formación de las arcillas.

En pleno siglo XXI el hombre no ha sido capaz de explorar la corteza terrestre más allá de 5 km a partir de la superficie. Sin embargo, existen métodos indirectos que muestran la estructura interna de la Tierra, formada por capas que semejan a una cebolla (Verduch, 2014). Antes de llegar al centro de todas las capas existe una denominada SIAL la cual emite, a través de las fallas en la superficie, material fundido formando rocas ígneas como los granitos. En lo más profundo de nuestro globo terráqueo se encuentra una capa denominada SIMA que es considerada el origen de todos los minerales que afloran a la superficie por lo que es muy probable que las primeras rocas que existieron fueron el resultado de procesos como el enfriamiento del magma que surge de esta capa como resultado de las erupciones volcánicas o su intrusión en la corteza terrestre. La expulsión de magma caliente con su correspondiente erosión y transportación dieron origen a nuevos minerales como magnetitas, mármoles y cuarcitas.

Todos estos minerales que fueron consecuencia de procesos químicos producto de la emisión de gases que alteraron su estructura, dieron paso a la formación de mezclas finas que resultaron transportadas por los ríos y el aire para ser depositadas por lo que se puede aceptar que existe una gran presencia de silicatos en nuestra corteza terrestre. Las arcillas son una rama del gran árbol que desprenden los silicatos y su formación fue a través de tres mecanismos principales: por herencia, por neoformación y por transformación. El primer mecanismo indica que el material arcilloso fue una derivación de una roca madre y los otros dos son resultados de procesos químicos que requieren de procesos más complejos y mayor gasto de energía.

Los factores exógenos, son en muchos casos, los que tratan de allanar el relieve de la tierra, estos procesos son: meteorización, erosión y la remoción de masa. Como resultado de procesos que vienen intrínsecos en la meteorización como la acción de la lluvia y la temperatura, se obtiene la descomposición de rocas formando los suelos residuales (Park, 1986).

Por otra parte, la descomposición y desintegración de las rocas forma capas sueltas consolidadas llamadas “regolito” que no es más que el conjunto de materiales producto directo de la meteorización de un sustrato. Se trata de un conjunto de materiales relativamente homogéneo, formado por los fragmentos de la roca original y de minerales neoformados (arcillas, carbonatos) durante el proceso (Tucker, 1991). Estos productos son transportados por el agua, el viento y el hielo para formar depósitos de suelos transportados que se diferencian entre si según el agente de transporte.

1.3.1 Meteorización Física.

Expansión y contracción térmica: ocurren por cambios bruscos de temperatura (enfriamiento y calentamiento), los minerales, tras la expansión y contracción, dan paso a la desintegración de rocas. Esto sobreviene comúnmente en zonas desérticas donde la roca se encuentra sometida al intemperismo con variaciones de temperatura desde 45 °C hasta 85 °C (Potes, 2016).

Alivio por descarga: Muchas rocas que se encuentran en afloramientos estuvieron sepultadas a más de 20000 m de profundidad disminuyendo la presión de confinamiento sufriendo la fractura de las rocas como respuestas al alivio por descarga. Lo que da origen a las diaclasas de tipo no tectónico. Estas diaclasas son abiertas encontrándose en la cara de las laderas con gran pendiente.

En las masas graníticas aliviadas de carga por denudación, a la vez que se alivian de carga, se expanden diferencialmente debido a que la parte más expuestas se descomponen e incrementa su volumen. Es decir que la roca de superficie, más expuesta a la descomposición, se expande y se separa de la sana; de esta manera termina por exfoliarse como una cebolla. El mismo fenómeno se presenta en los bloques individuales de granito en un proceso conocido como “meteorización esferoidal”.

Acción de plantas y organismos: Las raíces de los árboles penetran en las rocas a través de cualquier abertura, ya sean grietas o fisuras. Al pasar el tiempo, el grosor de la raíz se incrementa acrecentando la separación de la hendidura y posiblemente originando otras nuevas debido a su acción de cuña.

Desintegración por hidro-fracturación: Esto es característico de las zonas más frías del planeta y las zonas montañosas donde el agua, al penetrar por los poros o grietas, al llegar las temperaturas a 0 °C el volumen se incrementa un 9 % originando expansiones aproximadamente de 200 MPa (Viera, 2016).

Humedecimiento-secado cíclico: La alternancia de la lluvia y la insolación provocan desprendimientos y que se deslíen a causa de los cambios cíclicos. Al aumentar la humedad que rodea los materiales estos se expanden y cuando se secan por la acción del sol se agrietan.

1.3.2 Meteorización química.

Este proceso comprende la formación de nuevos minerales a través de la descomposición de otros siendo los primeros más livianos y débiles que los segundos. En las regiones tropicales el efecto del clima favorece la formación de suelos espesos y bien desarrollados.

Oxidación: el agua porta oxígeno en solución que reacciona con algunas rocas que contienen minerales con altas cantidades hierro como la augita dando lugar a minerales como la hematina [Fe_2O_3]. En presencia del agua ocurre la oxidación de los minerales que contienen altas dosis de hierro formando limonita [$\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$] (Viera, 2016).

Hidratación: ocurre al adicionar agua a la estructura de minerales como el sulfato de calcio que da origen al yeso.(Herrera, 2014)

Hidrólisis: es el proceso más importante en la formación de las arcillas en zonas tropicales. El agua, en forma ionizada (H^+ OH^-), muy activa químicamente, ataca minerales como los feldspatos y otros silicatos disolviéndolos. Los iones de hidrógeno H^+ reemplazan los cationes metálicos en la red cristalina y los iones OH^- se combinan con estos cationes desplazados para formar carbonatos y bicarbonatos que son evacuados en disolución en el proceso de lixiviación (drenaje). El carácter de los productos resultantes depende del

ambiente de meteorización, en particular de la facilidad con que son removidos los cationes en virtud de la efectividad del drenaje y del índice de acidez (pH) del agua que, en regiones tropicales, oscila entre 5 y 7 aproximadamente (Viera, 2016).

En base a varios estudios se obtuvo (Viera, 2016):

- (1) Mayor movilidad Ca^{++} Na^{+} Mg^{++} K^{+}
- (2) Movilidad media K^{+} Mg^{++} Si^{++++} Fe^{++} (ferroso)
- (3) Movilidad mínima Fe^{+++} (férrico) Al^{+++}

Los cationes de movilidad alta se evacuan con muy poco drenaje, sin embargo, los de movilidad intermedia se mantienen un tiempo en disolución y se vuelven a asentar formando los minerales arcillosos del tipo montmorillonita.

El proceso de hidrólisis afecta principalmente a los feldespatos donde, además de formarse caolinita, el agua subterránea extrae minerales de la roca para ser transportados en muchos casos al mar.

El clima es un parámetro decisivo, al igual que la humedad que controla el proceso de formación a través de los silicatos, ya que los procesos de hidrólisis por los cuales se forman las arcillas pueden desarrollarse durante la formación de un depósito mineral o por procesos exógenos. El agua de lluvia puede desencadenar procesos a través con el CO_2 formando ácido carbónico [H_2CO_3] reaccionando con los feldespatos formando de esta manera minerales del grupo de la arcilla (Alejandro, 1994). En zonas de altas temperaturas y humedad la hidrólisis dará lugar a arcillas caoliníticas, sin embargo, en climas áridos la arcilla resultante es la illita-esmectita.

La diagénesis es otro proceso de alteración de minerales hacia formas más estables. Esto ocurre cuando un mineral estable es sometido a otro enterramiento y compactación, ejemplo de ello son muchos feldespatos, vidrio volcánico y óxidos de hierro que son transformados durante la diagénesis en las arcillas más estables mediante disolución y recristalización (tomado de <http://pubs.usgs.gov/info/clays/>).

Se puede resumir de forma general que los minerales de formación que dieron origen a las arcillas se encuentran en dos grupos. Uno está compuesto por las rocas ígneas como los gabros, noritas y demás. El otro consiste en las rocas sedimentarias que se componen de minerales montmorilloníticos que constituyen el material básico para la formación de suelos expansivos (Mijangos, 2015).

Tabla 1.6 Caracterización de roca sedimentaria (Mijangos, 2015).

<i>Roca</i>	<i>Componente</i>	<i>Característica</i>
Conglomerado	Partículas grandes redondeadas de roca y fragmentos de minerales	Más del 50% de los granos mayores de 2 mm y menos del 25% de arcilla
Breccia	Partículas angulares de roca y fragmentos de minerales	Más del 50% de los granos mayores de 2 mm y menos del 25% de arcilla
Arenisca	Partículas redondeadas menores de roca	Más del 50% de los granos mayores de 2 y 0.06 mm y menos del 25% de arcilla
Limolita	Partículas del tamaño de limos	Más del 50% de los granos mayores de 2 y 0.06 mm y menos del 25% de arcilla
Arcillonita	Partículas de arcilla	Más del 50% de arcilla
Lodolita	Rocas arcillosas con alto contenido de limos	Más del 50% de los limos
Caliza	Granos de calcitas	Más del 50% de calcita y menos del 25% de arcilla

Tabla 1.7 Características de rocas (Sides, 1970)

<i>Roca</i>	<i>Componente</i>	<i>Característica</i>
Conglomerado	Partículas grandes redondeadas de roca y fragmentos de minerales	Más del 50% de los granos mayores de 2 mm y menos del 25% de arcilla
Breccia	Partículas angulares de roca y fragmentos de minerales	Más del 50% de los granos mayores de 2 mm y menos del 25% de arcilla
Arenisca	Partículas redondeadas menores de roca	Más del 50% de los granos mayores de 2 y 0.06 mm y menos del 25% de arcilla
Limolita	Partículas del tamaño de limos	Más del 50% de los granos mayores de 2 y 0.06 mm y menos del 25% de arcilla
Arcillonita	Partículas de arcilla	Más del 50% de arcilla
Lodolita	Rocas arcillosas con alto contenido de limos	Más del 50% de los limos
Caliza	Granos de calcitas	Más del 50% de calcita y menos del 25% de arcilla

1.4 Factores que influyen en el proceso de expansión.

Para entender este aspecto se debe conocer la composición mineralógica del suelo, determinando la cantidad de caolinitas, montmorillonita o illita que posee la muestra. Si el suelo está compuesto por una gran cantidad de minerales arcillosos expansivos será más propenso a variar su volumen, sin olvidar que el tamaño de las partículas es otro aspecto decisivo en el proceso ya que a menor tamaño más probabilidad existe que contenga minerales arcillosos.

Densidad seca: El proceso de expansión en un suelo se manifiesta a medida que el valor de la densidad seca inicial aumenta siendo la humedad inicial lo menor posible ya que si la

humedad aumenta el suelo se satura por lo que la expansión ocurriría en un suelo poco saturado pero en mayor índole.

Estado de esfuerzo: El proceso de expansión puede verse afectado cuando las presiones que se le ejercen se incrementan llegando a ser nula la expansión e inclusive negativa, generando un colapso. De igual forma ocurre cuando se le aplica humedecimiento y secado a un suelo en proceso de expansión conllevando a la disminución del proceso por cada humedecimiento.

Succión: Se puede definir de forma simple como la capacidad de absorber agua. Este aspecto está relacionado con el proceso de expansión ya que a mayor succión mayor será el cambio de volumen.

Tiempo y permeabilidad: El tiempo de incidencia que presenta el agua sobre el suelo depende de la geometría del terreno, las condiciones de filtración, su naturaleza. La baja permeabilidad es una característica intrínseca de las arcillas expandibles. No siempre una arcilla impermeable se expande más que una con mejores propiedades de permeabilidad ya que depende de varios factores como: el tiempo de exposición, el contacto con el agua y la incidencia de la lluvia.

Humedad: Es el factor decisivo para que una arcilla logre expandirse viéndose variar a partir de:

- El clima: Factor muy importante principalmente en zonas donde existen estaciones marcadas con periodos de lluvia y sequia por varios meses.
- Vegetación: Este factor se manifiesta en la acción que tienen las raíces de los árboles absorbiendo el agua, estas raíces en ocasiones pueden superar los 3 m de longitud, por ello la plantación de árboles altera la humedad del firme.
- Uso de estructuras: Este aspecto se ve influenciado principalmente en el uso de las edificaciones ya que los hornos, calderas, plantas de refrigeración en la planta baja puede generar considerables cambios de humedad en el suelo de la cimentación.

1.5 Identificación de minerales arcillosos.

En la actualidad existen diversos métodos que posibilitan la identificación de este suelo que va desde una compleja identificación de campo hasta el uso de la más actualizada tecnología.

Identificación de campo: Para la identificación de campo se debe tener gran experiencia y sobre todo apoyarse en aspectos puntuales como las grietas por secado ya que en períodos de sequía aparecen en zonas agrupadas (Olaya, 2012). La textura en suelos expansivos se torna resbaladiza cuando existe humedad logrando gran adherencia. Otro aspecto de interés es lograr realizar un rollo de suelo en las manos sin que se desmorone o en caso de las estructuras la presencia de grietas, el levantamiento de superficies. Para un mejor análisis pueden realizarse diversos procedimientos:

Calicatas: Consiste en diversas excavaciones como pozos y zanjas realizadas manualmente o mediante equipos, posibilitando la observación directa del terreno a una profundidad determinada para poder realizar la toma de muestra, en muchos casos de gran tamaño. Este tipo de excavación presenta las siguientes limitaciones:

- Profundidad de reconocimiento moderada (de 4 a 5 m).
- Los terrenos han de ser excavables con medios manuales o mecánicos.
- Ausencia de nivel freático o, al menos, aportaciones de agua moderada en terrenos de baja permeabilidad.
- Ausencia de instalaciones, conducciones, cables, etc.
- Debe evitarse deteriorar el terreno de apoyo de las futuras cimentaciones o cuando puedan crearse problemas de inestabilidad en estructuras próximas (Alpañes, 1991).

Métodos mineralógicos: este método facilita una mayor seguridad a la hora de dar un veredicto sobre el tipo de suelo ya que, al conocer la composición mineralógica, se hace más fácil el trabajo. Siempre se debe recordar que la eficiencia y seguridad tiene altos costos ya que los métodos que ahora se explicaran utilizan equipamiento muy costoso:

- **Análisis térmico diferencial:** Este realiza una comparación entre la muestra y un material de referencia donde se aumenta la temperatura para detectar los cambios que sufre dicha muestra, en el caso de la arcilla hay contracciones, reacciones endotérmicas y transformaciones mineralógicas. La alta temperatura en las arcillas provoca la extracción del agua en sus capas laminares provocando cambios en la estructura mineral capaces de convertirlo en otro elemento como es el caso de la caolinita que, al ser extraída el agua completamente, puede transformarse en óxido de aluminio amorfo y sílice.
- **Difracción de rayos X:** Determina los porcentajes de minerales arcillosos en la muestra de suelo, pero en ocasiones puede llegar a ser una información no muy específica ya que el pequeño tamaño de los cristales, junto a su desorientación, provoca que la difracción se distinga de forma no muy precisa. Los rayos X se difractan a su paso a través de una muestra de arcilla constituyendo cada trayectoria de difracción una imagen de los distintos planos atómicos.
- **Análisis químico:** En minerales como la montmorillonita este análisis logra determinar el origen y localización que tienen las cargas en las superficies arcillosas. Este método activa mediante la aplicación de un tratamiento químico termo-ácido una arcilla para luego analizar los cambios que se produzcan en su composición y estructura (Morocho, 2015). El análisis que se obtiene es muy útil, aunque no informa como se encuentran distribuidos sus componentes.
- **Microscopio electrónico:** Este método es muy eficaz debido a que define la composición mineralógica, estructura y textura a través de su observación de forma directa. Se basa en ir observando variaciones a partir del conocimiento de su composición, dimensión y morfología.

1.5.1 Métodos indirectos.

Estos métodos son resultados cualitativos, pero se obtienen con gran facilidad los datos necesarios ya que los equipos necesarios son muy accesibles.

Para la determinación de propiedades en el laboratorio es preciso tener muestras (alteradas o inalteradas). Por tanto, para una correcta obtención de los resultados es necesario realizar

un correcto muestreo. Una muestra es alterada cuando no mantiene las condiciones originales que tenía en el terreno, es inalterada en el caso contrario.

Para obtener una muestra inalterada de la pared de un sondeo, a cielo abierto o de la pared de un corte el procedimiento será:

- Se limpia la superficie y se marca el contorno
- Utilizando un cuchillo se excava alrededor dando la forma.
- Se corta la sección excavada retirándola del suelo y marcando la cara superior
- Para mantener sus propiedades se sella con parafina.

1.5.2 Parámetros y propiedades.

Los suelos arcillosos son conocidos por su alta plasticidad y cohesión. Los estados de consistencia en los que un suelo puede encontrarse: sólido, semisólido, plástico y líquido.

Conociendo el Límite Líquido y el Índice de Plasticidad podemos conocer la capacidad que tiene el suelo de absorber agua sin cambiar de consistencia.

Tabla 1.8. Relación de parámetros como resultados de los ensayos (Romero, 2014).

<i>Clasificación del potencial</i>	<i>Sp (%)</i>	<i>LL (%)</i>	<i>IP (%)</i>	<i>Succión natural del suelo</i>
Bajo	<0,5	<50	<25	<1,5
Medio	0,5-1,5	50-60	25-35	1,5-4,0
alto	>1,5	>60	>35	>4,0

Límite Líquido (LL): Para la determinación del límite es utilizado el conocido aparato de Casagrande.

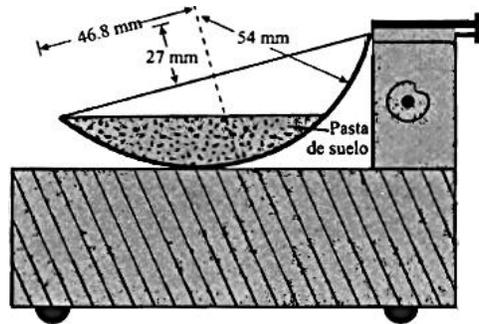


Figura. 1.1 Equipo para determinación del Límite Líquido (Alpañes, 1984).

Consiste primeramente en colocar la muestra de suelo sobre la copa cortándose una ranura en el centro de la misma usando una herramienta de corte estándar para posteriormente dejar caer la copa de bronce sobre la base por una leva operada por una manivela a una altura de 10 mm.

El contenido de agua en porcentaje requerido para cerrar una distancia de 12,7 mm a lo largo del fondo de la ranura a los 25 golpes se define como Límite Líquido que representa la cantidad máxima de agua que puede contener un suelo (en porciento) sin pasar al estado líquido (fluido).

Límite Plástico (LP): Es el límite inferior de la etapa plástica del suelo. La prueba no consta de gran complejidad y se lleva a cabo enrollando repetidamente a mano sobre una placa de vidrio una masa de suelo de forma elipsoidal. Representa la frontera entre el estado plástico y semisólido.

Al tener estos valores podemos obtener el Índice de Plasticidad que define el comportamiento moldeable de un suelo por la relación entre ellos.

Contenido de Coloide, partículas menores a 0.002 mm: La cantidad de partículas menores a 0.002 mm influye directamente sobre el comportamiento del suelo ya que a mayor contenido de partículas coloidales (menores a 2 micras) será mayor la posibilidad de que el suelo mantenga un potencial expansivo pues mientras mayor sea el índice de plasticidad mayores propiedades coloidales existirán en la arcilla.

1.6 Métodos directos.

Estos métodos son los que nos brindan información real al realizarse con muestras inalteradas obteniéndose la expansión o el hinchamiento libre.

Para la evaluación del potencial expansivo de un suelo se debe seguir una metodología:

- Identificación y clasificación del problema: De esta forma se determina si el suelo es expansivo o no.
- Determinación del espesor de la capa activa: Se realiza un análisis del perfil dinámico de succiones y las variaciones de humedad.
- Cuantificación de los índices de hinchamiento: Al conocer si en el suelo de análisis puede sufrir cambios de volumen se determina cual es el valor numérico más racional de sus propiedades deformacionales.
- Cálculo del levantamiento de la capa activa: Mediante este aspecto se conoce el movimiento vertical que se debe esperar.
- Elección y cálculo de la solución: A partir de los resultados alcanzados se evalúa y comparar todas las posibles soluciones para contrarrestar los efectos (Quevedo, 2013).

1.7 Otros métodos.

Método de Holtz y Gibbs: determina el grado de expansión a través del índice de plasticidad, contenido de coloide y límite de contracción.

Tabla 1.9. Método de Holtz y Gibbs (Das, 2012).

<i>Contenido Coloidal (%)</i>	≤15	13-23	20-31	>28
<i>Índice Plástico (%)</i>	≤18	15-28	25 - 41	>35
<i>Límite de contracción (%)</i>	≥15	16-10	12-7	<11
<i>Grado de expansión</i>	bajo	Medio	Alto	Muy Alto

Método de Chen (1988): Este sencillo método analiza el grado de expansión por el índice de plasticidad.

Tabla 1.10. Método Chen (Das, 2012)

<i>Índice Plástico (%)</i>	≤18	15-28	25-41	>35
<i>Límite de Contracción</i>	≥15	16-10	12-7	<11
<i>Grado de expansión</i>	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto

Método de Elvin F. Henry (1965): Este método, al igual que el anterior, se basa en los valores de índice de plasticidad que se obtengan.

Tabla 1.11. Método de Henry (Das, 2012).

<i>Índice de Plasticidad (%)</i>	0-14	14-25	25-40	>40
<i>Grado de expansión (%)</i>	No crítica	Marginal	Crítica	Altamente Crítico

1.8 Otros métodos para determinar hinchamiento en el suelo.

Ensayo Lambe: valora el cambio de volumen que ocurre en la muestra de suelo bajo condiciones establecidas como la variación de humedad. Los resultados del ensayo se clasifican como no críticos, marginales, críticos o muy críticos, por lo que podemos llegar a conclusiones cualitativas ya que no brinda un valor de presión de hinchamiento. La importancia de este ensayo reside particularmente en los parámetros de expansividad que proporcionan una ayuda para gestionar las soluciones en muchos casos.

Ensayo de volumen de cimentación. Índice de expansión libre: Este ensayo fue desarrollado por Holtz y Gibbs en 1954 y posibilita conocer, a través de un ensayo de volumen de sedimentación, el grado de expansión que posea un suelo. Con esta prueba se obtiene un valor de expansión libre al permitir la expansión libre del suelo sumergido. La mezcla con

la que se realiza el ensayo debe ser secada en un horno, pasar por el tamiz No. 40 y ser mezclada teniéndose como resultado dos muestras de suelo de 10 g cada una (Holtz, 1954).

Para el análisis de las muestras se colocan en dos probetas de 100 ml para después llenarla con agua destilada completamente, se agitará para eliminar el aire atrapado y se deja reposar por 24 horas. Pasado este tiempo se toma la lectura de la muestra sedimentada de suelo expandida y se calcula el índice de expansión libre como un porcentaje del aumento de volumen respecto al inicial.

*Tabla 1.12 Clasificación según el Índice de expansión libre
(Whitman, 1960).*

<i>Grado de expansión</i>	<i>Índice de expansión Libre (%)</i>
Bajo	>50
Medio	50-100
Alto	100-200
Muy alto	>200

Según Holtz y Gibbs a través de una investigación realizada en el estado de California, Estados Unidos, con muestras inalteradas califican las arcillas con alto grado de expansividad si al ser inundadas ocurre un aumento del volumen del 30 %. Sin embargo, Chen en su estudio de los suelos de Rocky Mountain presenta un incremento del 10 % de su volumen al ser saturadas. Dado que los resultados no son completamente concluyentes se propone la interpretación conjunta de los mismos en base a las siguientes tablas

Tabla 1.13 Estimación de los probables cambios de volumen de suelos expansivos

(Hambas, 2013)

Contenido coloidal % 0,001 mm	Índice de Plasticidad	Límite de retracción	Expansión Probable. Cambio Volumétrico en % (seco a saturado)	Grado de expansión :
> 28	>35	<11	>30	Muy alto
20-13	25-41	7-12	20-30	alto
13-23	15-28	10-16	10-30	medio
<15	<18	>15	<10	bajo

Tabla 1.14. Según Chen (Hambas, 2013).

% que pasa por tamiz 200	Límite Líquido	S.P.T.	Expansión Probable. Cambio Volumétrico en % (seco a saturado)	Presión de Hinchamiento (kg/cm ²)	Grado de Hinchamiento
>35	>60	>30	>10	>10	Muy alto
60-95	40-60	20-30	03-10	2,5-10	alto
30-60	30-40	oct-20	01-5	1,5-2,5	Medio
<30	<30	<30	<1	0,5	Bajo

Ambas investigaciones le permitieron al autor llegar a la conclusión de que existen parámetros que, por muy sencillos que parezcan, permiten por su relación con el agua, realizar una valoración de estado del suelo ya que estas tabulaciones pueden utilizarse en cualquier región para poder obtener el grado de expansión.

1.9 Afectaciones producto a las arcillas expansivas.

La relación que guarda el agua con las arcillas expandibles es perjudicial para toda edificación en la que se encuentre. Es muy conocida su expansibilidad al aumentar la humedad y su retracción al disminuirla.

Estas variaciones provocan graves afectaciones en diferentes obras como pavimentos, losas, cimientos, estructuras como casa y edificios donde la pérdida de estabilidad puede conllevar al colapso de la misma; esto viene ligado al grado de expansión que posea el suelo ya que es directamente proporcional a las afectaciones que este provoque.

Los deslizamientos son propios de movimientos de suelos principalmente en una ladera o zona montañosa donde se ve favorecido por la filtración del agua. En dependencia del movimiento realizado por la masa de suelos y la velocidad con que esta ocurra los daños pueden ser muy serios, pudiendo quedar enterrado todo elemento que se encuentre en su radio de acción, en ocasiones incluso pequeños poblados. Los deslizamientos más comunes son la caída de rocas desde los escapes de macizos rocosos muy fracturados, los deslizamientos de tierra en laderas y taludes, los flujos y avalanchas de lodo y escombros que pueden transitar grandes distancias por valles y cauces y la reptación de laderas que puede abarcar grandes superficies. Las caídas de rocas, flujos y avalanchas afectan solamente a las obras dispuestas en la superficie, mientras que los deslizamientos afectan también los elementos soterrados. Los eventos de esta índole más peligrosos lo constituyen aquellos que ocurren de forma rápida, aunque en ocasiones, existen signos que nos advierten sobre el posible evento.

Los asentamientos diferenciales constituyen a nivel mundial un gran problema para la construcción terminando en muchas ocasiones en altos gastos de reparación. Un asentamiento diferencial entre dos fundiciones continuas de una misma edificación puede producir el vuelco, una parte de la edificación desciende más que la otra por lo que se provoca fisuras y grietas. Estas fisuras por lo general son en diagonal siguiendo las juntas de la obra, estas fisuras pueden ir acompañadas de fisuras horizontales bajo los forjados, incluso fisuras verticales en los cambios de material. Muchas de las manifestaciones de la expansión lo constituyen las deformaciones cóncavas las cuales surgen predominantemente en zonas de climas secos o existan equipos de altas temperaturas como calderas donde, al ocurrir precipitaciones, el terreno cercano a la vivienda que no se encuentra debajo de ella se humedece y expande mientras el que queda resguardado por la estructura se mantiene inactivo.

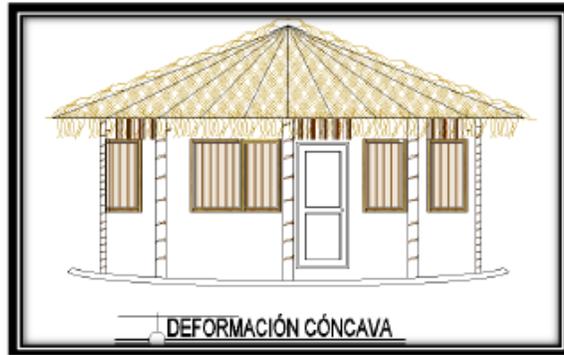


Figura 1.2 Deformación cóncava (Mijangos, 2006).

En los climas más húmedos ocurre lo contrario ya que la estructura mantiene la humedad en el suelo que se encuentra bajo ella restringiendo los cambios de humedad, no así en las zonas aledañas donde puede evaporarse o verse influida por las plantas. Esto desencadena la denominada deformación convexa (Estéban, 2017).



Figura 1.3 Deformación convexa (Mijangos, 2006).

En ocasiones los cambios de humedad no solamente se deben al clima, sino a mal uso de la estructura o los defectos que en ella existan: filtraciones por las juntas o grietas, rotura de instalaciones hidro-sanitarias, mal encausamiento del agua. Todo esto conlleva a derrames de agua en zonas específicas de las estructuras donde ocurre la expansión localizada.



Figura 1.4 Deformación por expansión localizada (Mijangos, 2006).

La expansión no es el único factor que provoca afectaciones ya que en muchos casos grandes árboles pueden llegar con sus raíces a eliminar el agua contenida en el suelo debajo de la estructura, disminuyendo la humedad en una zona localizada provocando la contracción del suelo.



Figura 1.5 Deformación por contracción localizada (Mijangos, 2006)

Conclusiones parciales:

- Existe poca información sobre las arcillas expandibles en la provincia.
- Se sentaron las bases para una correcta realización de la metodología de trabajo.
- Hay escasas investigaciones realizadas sobre el tema en nuestro país.
- Existe escasa referencia en mapas de las arcillas expansivas en nuestro país.

Capítulo 2 Materiales y métodos

Este capítulo tiene como objetivo delimitar la zona de estudio, así como especificar a través de las normas referidas a los ensayos que se realizan la metodología que se va a realizar y los posibles resultados. Se tendrán en cuenta la utilización de las tablas que Gibbs y Holtz, Chen y otros autores, crearon para evaluar el potencial expansivo a través diversos parámetros ejemplificando su utilización en varias investigaciones a nivel internacional.

2.1 Localización.

El creciente desarrollo que ha alcanzado Cárdenas como municipio y su cercana ubicación al polo turístico de Varadero, han provocado un inminente crecimiento de la población siendo necesario un mayor aprovechamiento de zonas aún no construidas para la fabricación de viviendas.



Figura 2.1 Ciudad de Cárdenas (Google Maps, 5 de junio del 2019).

Tabla 2.1 Crecimiento poblacional del municipio de Cárdenas

(Anuario Estadístico de Matanzas, 2017).

2011	2012	2013	2014	2015	2016
139 889	143 652	145 997	147 419	149 381	151 960

Esto ha provocado la necesidad de aprovechar todas las áreas posibles, pero en ocasiones los suelos no cumplen con los requisitos necesarios para su utilización como firme, encausándose esta investigación en determinar, a través de parámetros sencillos, la determinación del grado de expansión de estos suelos siendo de gran necesidad por las características que presentan los estratos de la zona ubicada.

Una de las nuevas zonas por aprovechar por el sector de la construcción se encuentra ubicada entre la calle Tenería y Minerva, por la otra sección se encuentra delimitada entre la calle Phinney hasta la calle Salva como indica la figura 2.2.



Figura 2.2 Zona de estudio (Google Maps, 7 de junio del 2019).

2.2 Caracterización de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en la calle Tenería desde Phinney hasta Salva ocupando un área de 30000 m² siendo cubierta por áreas verdes y microvertederos.



Fig. 2.3 Situación actual del área de estudio (Foto del autor, 15 de mayo del 2019).

Esta zona se encuentra dentro de la Formación Güines en la que se encuentra calizas biodetríticas de grano fino a medio, fosilíferas, calizas biohémicas, calizas dolomíticas, dolomitas, calizas micríticas sacaroidales y lentes ocasionales de margas calcáreas y calcarenitas. La dolomitización es secundaria. Son por lo general masivas, más raramente estratificadas. Coloración blanca, amarillenta, crema o gris (Geológicas, 2014).

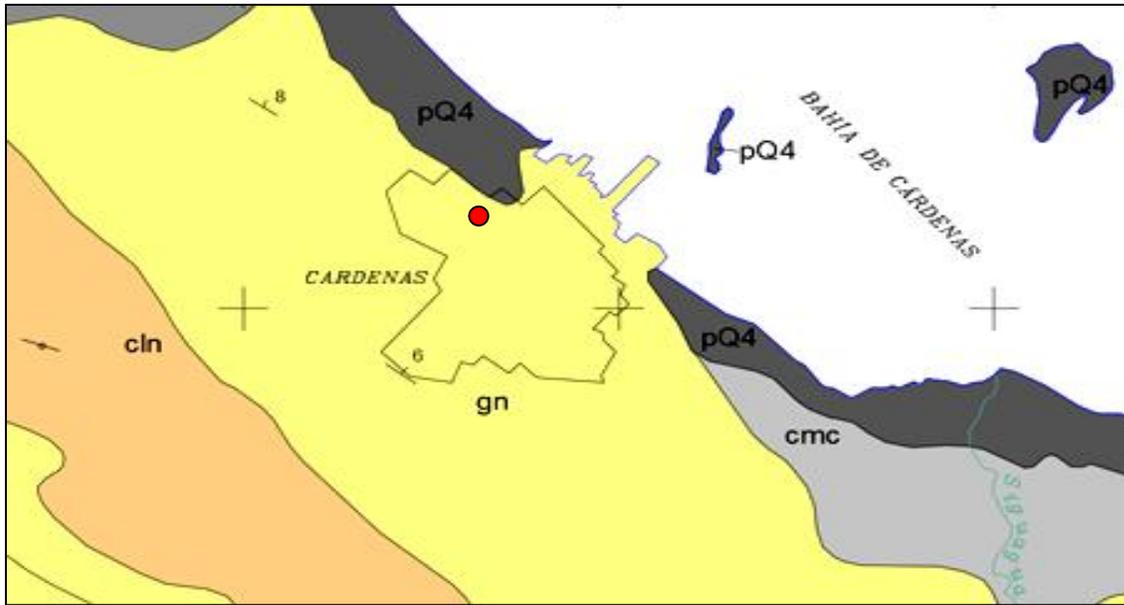


Figura 2.4 Mapa geológico de la zona de Cárdenas. El color amarillo corresponde al área de distribución de la Formación Güines (Tomado del Mapa Geológico elaborado por el Instituto de Geología y Paleontología, 2014).

2.3 Ensayos.

La realización de la investigación se basa en las tablas ofrecidas por Gibbs y Holtz principalmente donde, a partir del límite líquido y límite plástico de una muestra de suelo, podemos determinar el grado de expansión que presenta. Para ello se hace necesario la utilización de ensayos básicos que regularmente se hacen en todos los suelos antes de construir para ello se utilizará la NC 58:2000 *Determinación del límite líquido, Límite Plástico e índice de plasticidad de los suelos*, así como la NC 20:1999 *Geotecnia. Determinación de la granulometría de los suelos*.

2.4 Validación del Método.

El laboratorio de la ENIA Matanzas no presenta el equipamiento necesario para poder realizar una valoración de la expansividad que presente una muestra de suelo a partir de las normas NC 54-306-1985 *Hinchamiento libre* y NC 54-350-1986 *Hinchamiento controlado* por ello constituye una necesidad conocer estas características pues en la provincia se encuentran formaciones como Bellamar, Canímar y más importante aún, la Formación Güines que abarca toda la zona de estudio las cuales presentan en su estratigrafía, arcillas

que pueden presentar características expansivas, siendo necesario la utilización de un método que pueda arrojar información confiable sobre este tema.

La forma en que se obtienen los valores cualitativos o cuantitativos en cuanto a la expansividad de los suelos, permite contextualizar la actual propuesta. Tal vez el ensayo más utilizado en nuestro país para determinar el grado de expansión de un suelo consiste en la aplicación de las ya mencionadas normas NC 54-306:1985, NC 54-350:1986. A nivel mundial es conocido como “Determinación del potencial del cambio volumétrico del suelo empleado en el aparato de Lambe” recogido en el Standard Test Method for Expansion Index of Soils normalizado por la ASTM D4829–11. No en todas las provincias se encuentran los recursos necesarios para poder realizar estos ensayos ya que muchos de los equipos que se utilizan son muy específicos, en el caso de la zona de estudio el laboratorio no cuenta con ellos por lo que no pueden obtener o decidir si el suelo es expansivo o no lo cual, como anteriormente se explicó, constituye un peligro y más aún cuando estos resultados son utilizados para construcciones de diversas obras. Para ello existe una solución muy rápida y sencilla a través de los ensayos de índices que permiten predecir la expansividad del suelo.

Tabla 2.2. Predicción de la expansividad a partir del Límite Líquido e Índice de Plasticidad (INVIAS, 2013)

<i>Grado de expansión</i>	<i>Chen (1975)</i>	<i>Norma IS-1948</i>	<i>Holtz y Gibbs</i>	<i>Chen (1975)</i>	<i>Norma IS-1948</i>
Bajo	< 30	20-35	< 20	0-15	< 12
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

La tabla anterior fue utilizada por Jenny Constanza Pérez Rojas y Hohn Alexander Orjuela Ortiz en su Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil “*Análisis experimental de la expansividad en suelos*” (Universidad Católica de Colombia, 2018) obteniéndose

resultados esperados para nada lejos de la realidad ya que realizaron otros ensayos de mayor complejidad y los resultados no fueron muy diferentes.

Existen otras metodologías, pero requiere de parámetros más complicados como límite de contracción.

El índice de plasticidad y el límite líquido resultan ser de utilidad para determinar las características expansivas que presentan las arcillas debido a que el límite líquido y la expansión de las arcillas dependen de la cantidad de agua que la arcillas trate de absorber constituyendo un vínculo que relaciona a estos parámetros (Holtz, 1956).

En 1965 Holtz y Gibbs determinaron un ensayo que consiste en la obtención de la expansión libre a través del cálculo entre los volúmenes secos y húmedos de la muestra investigándose de esta forma la expansión de humedades de suelos sueltos o no confinados. Como resumen de la investigación realizada por ellos se creó el Método del Bureau of Reclamation que correlaciona el contenido de partículas menores de 1 μm con el índice de plasticidad y el límite de contracción (Holtz, 1956). El porcentaje de cambio volumétrico se determina usando el consolidómetro, sobrecargando la muestra con una presión de 0.07 kg/cm² y llevándola de un estado seco al aire al de saturación. Las correlaciones obtenidas son las siguientes:

Tabla 2.3 Relación entre tamaño de partícula y grado de expansión(Armos, 2016).

<i>% partículas < I_u</i>	<i>I_p</i>	<i>L_c %</i>	<i>Expansión Probable</i>	<i>Grado de expansión</i>
<15	<18	>15	<10	Bajo
13-23	15-28	10-16	10-20	medio
20-31	25-41	07-12	20-30	alto
>28	>35	<11	>30	muy alto

Hermosilla M. y Cárdenas J., como parte del Departamento de Obras Civiles de la Universidad de la Frontera de Chile en su "Evaluación e identificación del potencial de

colapso en suelos derivados de cenizas volcánicas al Sur de ese país utilizaron algunos de los gráficos ofrecidos por Holtz en relación al colapso con respecto al límite líquido (Cárdenas, 2014).

Raúl Beltrán Martínez, en su tesis para optar por el grado de Maestro en Ingeniería (Geotecnia) de la Universidad Nacional Autónoma de México mediante el título de “*Diseño geotécnico y estructural de una cimentación en arcilla expansiva*” (2013), aclara que muchas de las técnicas más avanzadas para la identificación de los minerales de las arcillas como el análisis térmico diferencial, en ocasiones no llega a definiciones concretas ya que los suelos tienen casi siempre diversas especies, sin embargo, Holtz y Gibbs (1956) demostraron que el índice de plasticidad y el límite líquido son valores de utilidad para determinar las características expansivas de las arcillas (Martínez, 2016).

El potencial de expansión se define como el porcentaje de aumento de volumen en una muestra confinada lateralmente, la cual se satura bajo una sobrecarga de 6.9 kN/m^2 (0.07 kg/cm^2), después de ser compactada a su peso volumétrico máximo con humedad óptima de acuerdo a la prueba AASHTO estándar.

En el año 2009 la Concesionaria San Simón S.A y el Instituto Nacional de Concesiones de Colombia utilizaron muchas de sus variantes para el estudio geotécnico en el diseño de pavimentos en el tramo 4 El Diamante - La Miguelera como parte del alcance progresivo del proyecto vial Área Metropolitana de Cúcuta y Norte de Santander, emplearon las tablas ofrecidas por Holtz y Gibbs como parte de la caracterización del suelo.

La utilización de la investigación sobre la relación de los límites líquido y plástico se encuentra referenciada en la norma colombiana INVE-132-07.

2.5 Trabajos de Campo.

Para la realización de los ensayos se tomarán 6 muestras para la zona de estudio mediante extracción manual y se realizará la eliminación de la capa vegetal para después tomar directamente la muestra la cual el autor cubrirá en tela y parafina para conservar su humedad.

2.5.1 Metodología de investigación.

Preparación de la etapa de campo y reconocimiento general de la zona.

El primer paso consistió en realizar un reconocimiento previo por la zona para localizar puntos favorables para la realización de las calicatas, la revisión previa de la topografía y la búsqueda de cortes.

Con la ayuda de la ENIA se realizaron la búsqueda del perfil preliminar del subsuelo de la zona de estudio con la finalidad de estimar la máxima profundidad para obtener las muestras. Finalmente se utilizó el Léxico de Formaciones Estratigráficas (2014) en conjunto con la información ofrecida por la entidad ya que en algunas de las zonas aledañas ya se habían realizado perforaciones para algunos estudios ingeniero-geológicos siendo más sencilla la obtención de los parámetros conociendo las características del terreno.

Recolección de muestras.

Se tomaron un total de 6 muestras, aprovechando para ello zonas donde exista la menor vegetación posible. Las calicatas se excavaron hasta una profundidad de 1.5 m. Para la recolección del espécimen se realizaron un muestreo en cada calicata que consistirá en la obtención de una muestra del tope y otra de la base con cada parte bien definida llegando a obtenerse porciones de 2 kg. Una vez tomadas se procedieron a la realización del método de “cuarteo” para homogeneizar la muestra y reducir su peso a 1kg.

2.5.2 Etapa de Laboratorio.

Preparación de muestras.

Las muestras, una vez que fueron obtenidas, fueron trasladadas al Laboratorio de la ENIA en Matanzas en el cual se sometieron a una correcta preparación para su tratamiento. Para su procesamiento se hace necesario realizar los siguientes pasos:

- Analizar granulométricamente las muestras.
- Analizar la humedad.

- Realizar los ensayos de Límite Líquido y Límite Plástico.
- Realizar el ensayo del Hidrómetro.

Disgregación y pulverización.

Se removieron manualmente los elementos ajenos al suelo como raíces, restos vegetales. Las muestras se extendieron sobre láminas de papel de 70 x 90 cm disgregándose los terrones de suelo utilizando la fuerza de los dedos y evitar variar los resultados del análisis granulométrico.

Se dejaron en reposo durante 24 horas para permitir la evaporación natural de la humedad contenida en el material.

Las muestras ya secas se tamizaron utilizando un vibrador y las mallas No. 8, 10, 20, 40, 60, 100 y 200. En la bandeja de la base queda el pasante 200 el cual representa la proporción de finos en el suelo. Este pasante 200 es almacenado para los análisis correspondientes.

2.5.3 Determinación de la distribución granulométrica en las partículas menores de 2 mm (No. 10) a partir del Hidrómetro.

Este procedimiento constituye la sección 5.4 de la NC 20:1999 *Geotecnia. Determinación de la granulometría de los suelos.*

Aparatos, utensilios, medios de medición y reactivos.

- Batidora eléctrica de alta velocidad no menor de 10 000 r.p.m.
- Equipo de dispersión por aire.
- Balanza con valor de división de 0,01 g.
- Balanza con valor de división de 0,1 g.
- Estufa con control de la temperatura de hasta $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Areómetro con escala graduada desde 0 g/L hasta 60 g/L o con escala graduada desde 1000 g/cm^3 hasta 1038 g/cm^3 .
- Probetas aforadas en 1000 mL con una altura de 45,7 cm y un diámetro de 6,35 cm.
- Termómetro de hasta $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ con valor de división de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

- Tanque o depósito de temperatura constante.
- Beakel de 250 mL de capacidad.
- Agitador de vidrio.
- Vidrio de reloj.
- Bandejas.
- Frasco lavador de 500 mL o pera de goma.
- Cronómetro.
- Recipientes de aluminio con tapas.
- Pincel fino y brocha plana de 2,54 cm de ancho.
- Cápsula de porcelana de 10 cm de diámetro.
- Tamizadora manual
- Juego de tamices de 75 mm (3"), 50 mm (2"), 37.5 mm (1 ½"), 25 mm (1"), 19 mm (¾"), 9.5 mm (3/8"), 4.75 mm (No. 4), 2 mm (No. 10), 850 µm (No. 20), 425 µm (No. 40), 250 µm (No. 60), 106 µm (No. 140) y 75 µm (No. 200).
- Agua destilada(Normalización, 1999).

Preparación de la muestra.

La muestra se preparó según lo establecido en la NC 10 :1998.Geotécnia .Preparación de muestras de suelos. La cantidad de suelo retenido en el tamiz de 2 mm (No. 10) para la determinación de las partículas gruesas en este caso no se realizó ya que el suelo es muy fino ejecutándose el procedimiento para las partículas finas.(Normalización, 1998)

Para determinar la humedad higroscópica se tomó una parte representativa del suelo que se retiene y del que pasa por el tamiz de 2 mm (No. 10), se mezcló bien y se colocó en dos pesafiltro.

Después de extraer el suelo para la determinación de la humedad, se determinó la masa al conjunto de suelo que pasa y que se retiene en el tamiz de 2 mm (No. 10) y se anotó el valor en el reporte "Masa húmeda total (WhT)" en este caso se utilizó un reporte digital programado que se utiliza en el Laboratorio de Materiales de Matanzas.

Para la determinación de la distribución de las partículas del material que pasa el tamiz de 2 mm (No. 10) se toma aproximadamente 110 g por ser un suelo arcilloso.

2.5.4 Determinación de la distribución granulométrica en las partículas menores de 2 mm (No. 10).

Este procedimiento será utilizando la NC 20:1999 Apéndice 5.4.

Como el suelo es arcilla se toma para el ensayo aproximadamente 50 g y se anota el valor tomado en el modelo donde dice “Masa húmeda del hidrómetro” (Wh). Se introduce la muestra en un beakel de 250 mL y se agrega 125 mL de solución defloculante preparada en 40 g/L de suspensión. Se mezcla el suelo con el defloculante y se deja reposar como mínimo 16 h tapado con un vidrio reloj. Pasado este tiempo, para realizar la dispersión del suelo, se traslada al vaso de la batidora eléctrica y se limpia cualquier residuo que pudiera quedar en el beakel para lo cual se emplea el frasco lavador o la pera de goma. Se añade agua destilada, si fuera necesario, hasta pasar la mitad del vaso. Se conecta el motor y se agita la muestra durante 1 min. Al terminar el tiempo, se transfiere el suelo a una probeta de cristal. A la probeta con suelo con los equipos utilizados se le adiciona agua destilada hasta la marca de 1000 mL. El agua a añadir tendrá que estar a la misma temperatura que la del tanque o depósito de temperatura constante.

Seguidamente se coloca la palma de la mano en la boca de la probeta o se le coloca un tapón de goma y se gira la probeta hacia arriba, hacia abajo y hacia atrás durante 1 min.

A continuación, se colocará la probeta en el tanque o depósito de temperatura constante y se toman lecturas con el areómetro a los 2 min, 5 min, 15 min, 30 min, 60 min, 240 min y 1,440 min. El areómetro se introducirá dentro de la suspensión de 20 a 25 s antes de registrar cada lectura. Una vez tomada la lectura, se retira el areómetro de la suspensión y después de cada lectura se introduce en la suspensión el termómetro y se lee la temperatura, se anotan estos valores en el informe. Las lecturas en el areómetro se registrarán en la parte superior del menisco.

Terminadas las lecturas se vierte el suelo sobre un tamiz de 75 μm (No. 200) y se lava hasta que el agua salga limpia. El suelo se coloca en una cápsula o bandeja y se seca en la estufa a una temperatura de 110 °C durante 16 h como mínimo.

Una vez seco el suelo se pasa por los tamices siguientes: 850 μm (No. 20), 425 μm (No. 40), 250 μm (No. 60), 106 μm (No. 140) y 75 μm (No. 200).

Lo retenido en cada tamiz se pesa y se anota en el modelo en la columna de “Retenido” (en gramos). Se verifica que la suma de lo retenido en todos los tamices sea aproximadamente igual a la masa total del suelo antes de tamizarlo, generalmente hasta un 0.5 % de

diferencia, para ello lo retenido en cada tamiz se une y se determina la masa para hacer la comparación.

Expresión de los resultados.

Para la expresión de los resultados fueron utilizadas las Hojas de Microsoft Excel utilizadas en el Laboratorio de Materiales de la ENIA Matanzas. Para más detalle sobre el procedimiento debe verse la NC 20:1999.

2.5.5 Determinación del Límite Líquido.

El límite líquido se define como el contenido de humedad con el cual una masa de suelo colocada en un recipiente en forma de cuchara (aparato de Casagrande), se separa con una herramienta patrón (ranurador), se deja caer desde una altura de 1 cm y sufre el cierre de la ranura en 1 cm después de 25 golpes de la cuchara contra una base de caucho dura o similar.

Según los ingenieros Julio Patrone y José Enrique Prefumo de la Universidad de Montevideo en una investigación realizada para la Primera Jornada de Ingeniería de Cimentaciones titulado *“La acción de los suelos expansivos sobre las cimentaciones. Métodos de prevención y control”*, los Investigadores como Seed, Woodward y Lundgren demostraron que las características plásticas de los suelos pueden ser usadas como un indicador primario de la característica expansiva de las arcillas. (Prefumo, 2015)

Aparatos, utensilios y medios de medición.

- Equipo de límite líquido manual o eléctrico (véase Figura 1) con una base de goma de dureza durométrica D de 80 a 90 y una copa una masa de 185 a 215 g.
- Ranurador plano de plástico o metal no corrosivo.

- Alambre rígido de 3 mm de diámetro y 40 a 60 mm de longitud.
- Estufa con control de la temperatura de hasta $110^{\circ} \text{C} \pm 5^{\circ} \text{C}$.
- Balanza de capacidad 311 g o semejante y valor por división de 0.01 g.
- Calibrador de metal en forma de bloque de 25 mm de ancho, 50 mm de largo y $10 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ de altura.
- Espátula rígida de aproximadamente 20 mm de ancho y de 100 a 130 mm de longitud. Cápsulas de porcelana de 100 a 150 mm de diámetro.
- Humidífero.
- Desecadora.
- Vaso de precipitado plástico o de cristal de 300 mL a 500 mL de capacidad.
- Pipeta o pera de goma.
- Recipientes de aluminio (pesafiltros) con tapa, ambos identificados de forma indeleble con el mismo símbolo.
- Cristal esmerilado no menor de 30 cm con un espesor aproximado de 10 mm.
- Un recipiente para lavar, redondo, con una profundidad de por lo menos 7,6 cm, ligeramente mayor que el diámetro de los tamices.
- Agua destilada o desmineralizada.

Para consultar parámetros más exactos y valores que sean necesarios con el fin de facilitar el entendimiento de la investigación se recomienda consultar la NC 58:2000

Determinación del Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad de los suelos.

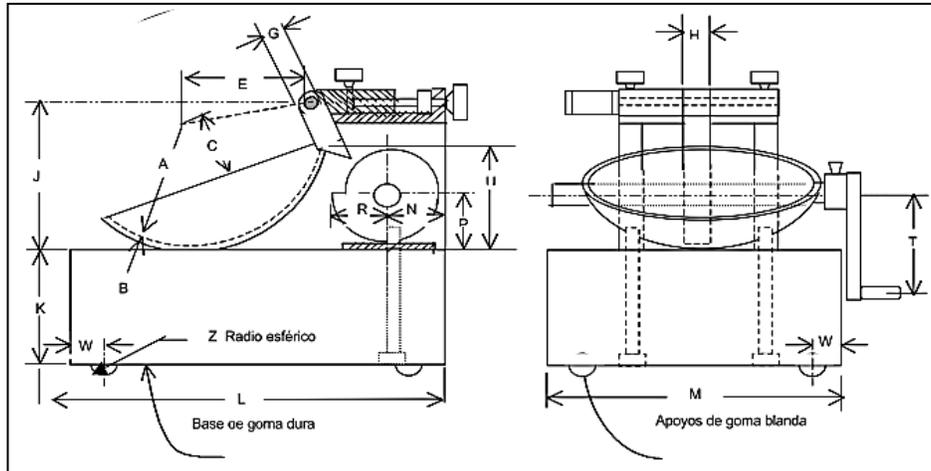


Figura 2.2 Detalle del equipo para determinar Límite Líquido (NC 58:2000).

Procedimiento.

Se coloca entre 150 y 200 g en una cápsula de porcelana, se le agrega agua destilada con la pipeta o pera de goma hasta que el suelo tenga una humedad tal que permita la unificación con la espátula y facilite que el cierre de la ranura que produzca el ranurador esté entre 25 y 35 golpes. Se extrae la cápsula de porcelana del humidífero y se mezcla nuevamente el material con la espátula. Se coloca una porción de suelo en la copa del equipo y se enrasa con la espátula de forma que tenga una profundidad aproximada de 10 mm en su parte más profunda y una superficie plana horizontal. Al enrasar el suelo hay que tener el cuidado de eliminar las burbujas de aire que pudieran crearse. El suelo de la cápsula que no se utilizó se cubre con un paño húmedo.

Se coloca la punta del ranurador en el punto más alto de la copa y se hace una ranura en el suelo, haciendo un arco hasta la parte más baja de esta, manteniendo siempre el ranurador perpendicular a su superficie.

Como el ranurador no puede correr a través del suelo sin rajar los bordes para las arcillas arenosas, limos con poca plasticidad y algunos suelos orgánicos, primero se debe cortar la ranura con la espátula a una dimensión menor que la requerida y después, pasar el ranurador .

Observaciones.

Existen diversas variables que pueden afectar el resultado, ejemplo de ellos:

- Utilizar una porción mayor de suelo a ensayar en la cuchara, no cumplir con la frecuencia de golpes especificada (2 golpes/s), el tiempo en realizar la prueba y la humedad del laboratorio.
- La altura de caída de la cuchara debe ser verificada antes de comenzar un ensayo, utilizando el mango de calibre 10 mm adosado al ranurador. En caso de no tener la altura especificada (1 cm.), se aflojan los tornillos de fijación y se mueve el de ajuste hasta obtener la altura requerida.
- El tiempo de curado varía según el tipo de suelo. En suelos de alta plasticidad se requerirá de por lo menos 24 horas mientras que en suelos de baja plasticidad, este plazo puede ser mucho menor e incluso en ciertos casos puede eliminarse.
- En suelos arcillosos el acanalador será pasado una vez, en cambio para limos se requerirán 2 a 3 pasadas limpiando cada vez el acanalador.

2.5.6 Determinación del Límite Plástico.

El límite plástico se define como el contenido de humedad del suelo al cual un cilindro de éste, se fractura o rompe al amasado con un diámetro aproximado de 3 mm.

Esta prueba es bastante subjetiva ya que depende del operador, el cual debe ayudarse con un alambre u otro material de 3 mm de diámetro para hacer la comparación estableciendo el momento en que el suelo se fractura con el diámetro determinado.

El equipamiento necesario ya fue reflejado en el ensayo anterior, para más detalle consultar la NC 58:2000.

Procedimiento.

Del resto del material sobrante del ensayo del Límite Líquido se toman alrededor de 20 g divididos en dos porciones. Se coloca cada una en un pesafiltro y ambas se introducen

dentro del humidífero durante 18 a 24 h. Se reduce el contenido de humedad a una consistencia en la cual se pueda enrollar el suelo sin que se pegue en las manos, extendiéndolo y mezclándolo continuamente en la placa de vidrio; si fuera necesario se puede acelerar el secado exponiéndolo a la corriente de aire de un ventilador o secándolo con un papel que no añada alguna fibra al suelo.

Se le da al suelo forma cilíndrica, enrollándolo entre la palma de la mano, los dedos y la placa de vidrio, con una presión suficiente para obtener un cilindro de diámetro uniforme a través de su longitud hasta alcanzar $3,2 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ de diámetro.

Se rompe el cilindro en varias partes cuando el diámetro del mismo haya alcanzado los $3,2 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$. Se vuelve a unir los cilindros, se amasan y se enrollan tantas veces como sea necesario hasta que se alcance el diámetro de $3,2 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, se agrieten o desmoronen, lo que indicará que el suelo se encuentra en su límite plástico. Después se verifica el diámetro con el alambre rígido.(Normalización, 2000)

Se reúnen todos los cilindros agrietados o desmoronados, se colocan dentro de un pesafiltro tarado y se tapa inmediatamente (Para más detalles ver la NC 58:2000).

2.5.7 Determinación del índice de plasticidad.

El índice de plasticidad (IP) se obtiene por la siguiente expresión:

$$IP = LL - LP \quad (2.1)$$

donde:

LL es el límite líquido en números enteros, en porcentaje;

LP es el límite plástico en números enteros, en porcentaje.

Algo a tener en cuenta en el momento de realizar el ensayo es que para producir la falla no es necesario reducir la velocidad de amasado y/o la presión de la mano cuando se llega a 3 mm de diámetro. Los suelos de muy baja plasticidad son una excepción en este sentido, en estos casos, la bolita inicial debe ser del orden de 3 mm antes de empezar a enrollar con la mano

2.6 Expresión de los resultados.

La expresión de los resultados se realizará según la metodología de la Norma Cubana referente al ensayo utilizándose en su gran mayoría una tabla programada de Microsoft Excel para la realización de los cálculos necesarios utilizada por el Laboratorio de Materiales de la ENIA.

2.6.1 Determinación del Límite Líquido.

El porcentaje de humedad (ω) se calcula según la NC 67:2000. En un gráfico semilogarítmico se exponen los números de golpes en el eje de las abscisas en escala logarítmica y en el eje de las ordenadas en escala aritmética el porcentaje de las humedades correspondientes. Se dibuja la línea recta de mejor ajuste.

El límite líquido del suelo se toma por el contenido de humedad correspondiente a la intersección de la recta con la abscisa en el número de golpes 25.

2.6.2 Determinación del límite plástico.

Las humedades se calculan según la NC 67:2000. El valor del límite plástico será el promedio de dos valores de humedades, siempre que la diferencia entre las mismas no sea mayor del 2 %. De exceder este valor se repite el ensayo.

Si el límite plástico es igual o mayor que el límite líquido, se reporta el suelo como no plástico.

2.7 Resultados finales.

Después de haber realizado los ensayos pertinentes se realizará una tabulación en una hoja de Microsoft Excel por separado con cada ensayo y sus correspondientes resultados. En esta hoja están programados los parámetros establecidos por Gibbs y Holtz para formular el resultado final.

Conclusiones parciales.

- Las tablas ofrecidas por Gibbs y Holtz han sido utilizadas por diversas empresas e instituciones a nivel internacional demostrando su validez.
- No se encuentran referencias de la utilización de las tablas ofrecidas por Gibbs y Holtz a nivel Nacional.
- Existe muy poca información sobre los estratos de los municipios.

Capítulo 3 Resultados de la investigación

El presente capítulo tiene como objetivo mostrar los resultados obtenidos a través de todos los ensayos y posibilitar llegar a conclusiones referentes al grado de expansión de las arcillas del sector de análisis y determinar la validación y necesidad del uso de las tablas utilizadas para proyectos.

3.1 Expresión de los resultados obtenidos en los ensayos.

La expresión de los resultados se realizará con cada ensayo por individual y finalmente se expresará la tabulación de los resultados con el fin de identificar el potencial expansivo que presenta el suelo.

3.1.1 Peso específico.

Tabla 3.1 Resultados obtenidos en la determinación del Peso Específico de los suelos. Método del Picnómetro para partículas menores que el tamiz No. 10.

<i>EMP balanza (g)</i>	0.01	
<i>Picnómetro no:</i>	4	5
<i>Temperatura (T, °c)</i>	26.0	26.0
<i>Densidad del agua (gw)</i>	0.99679	0.99679
<i>Constante (k)</i>	0.99858	0.99858
<i>Pesafiltro no.</i>	71	104
<i>Masa seca + Masa del pesafiltro (Wsp, g)</i>	57.36	56.20
<i>Masa del pesafiltro (Wp, g)</i>	37.36	36.20
<i>Masa seca (Ws, g)</i>	20.00	20.00
<i>Masa del picnómetro con agua (Wpw, g)</i>	348.00	349.50
<i>Masa del picnómetro + Agua + Suelo (Wpsw, g)</i>	361.00	362.50
<i>Peso específico del suelo que pasa</i>	2.85	2.85
PESO ESPECÍFICO PROMEDIO (gs2)	2.85	

Con los resultados obtenidos y utilizando una Hoja de Cálculo de Microsoft Excel el autor obtuvo el siguiente gráfico:

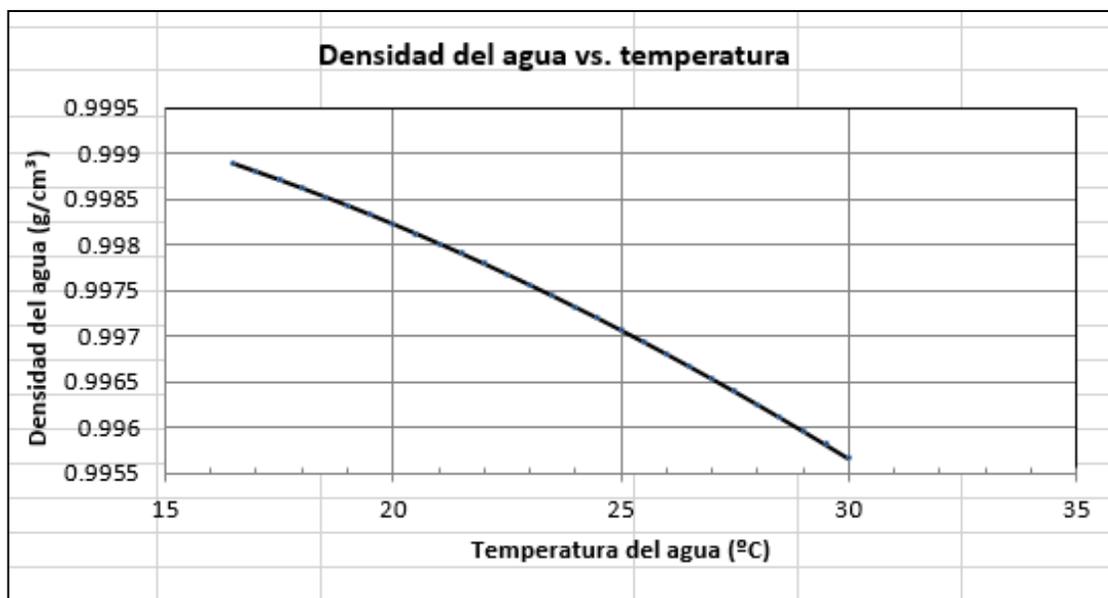


Figura 3.1 Gráfico de Densidad vs. Temperatura.

Este resultado muestra la disminución de la densidad al incrementarse la temperatura. Estos resultados son solo de la muestra número 1, los demás resultados se encuentran en los anexos.

3.1.2 Límite Líquido.

Tabla 3.2 Resultados del ensayo.

<i>No. de golpes</i>	35	32	28	24	20
<i>Recipiente</i>	72	17	16	55	109
<i>Masa húmeda más recipiente (g)</i>	46.78	40.19	41.04	41.42	47.96
<i>Masa seca más recipiente (g)</i>	43.45	38.75	39.01	39.35	44.70
<i>Masa del recipiente</i>	36.50	35.86	35.33	35.80	38.70
<i>% Humedad</i>	47.9	49.8	55.2	58.3	54.3

A través de la Hoja de cálculo de Microsoft Excel el autor obtuvo para la muestra número 1 un valor del Límite Líquido de 59.

3.1.3 Límite Plástico.

La plasticidad no es una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua. Una arcilla muy seca puede tener la consistencia de un ladrillo, con plasticidad nula, y esa misma, con gran contenido de agua, puede presentar las propiedades de un lodo semilíquido o, inclusive, las de una suspensión líquida. Entre ambos extremos, existe un intervalo del contenido de agua en que la arcilla se comporta plásticamente. Existen suelos que al ser remoldeados, combinado su contenido de agua si es necesario, adaptan una consistencia característica, que desde épocas antigua se ha denominado plástica. Para medir la plasticidad de las arcillas se han desarrollado varios criterios de los cuales uno solo era utilizado según la NC 58:2000.

El creador de uno de los más utilizados criterios con respecto a la plasticidad, Atterberg hizo ver que la plasticidad no era una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancias y dependientes del contenido de agua siendo así que el Límite Plástico constituye la frontera convencional entre los estados plásticos semisólidos.

Tabla 3.3 Resultado del ensayo de Límite Plástico

<i>Recipiente No.</i>	13	29
<i>Masa húmeda más recipiente (g)</i>	42.62	37.5
<i>Masa seca más el recipientes (g)</i>	35.79	31.40
<i>Masa del recipiente (g)</i>	17.50	17.76
<i>% Humedad</i>	37.3	42.9
<i>% Humedad promedio</i>	40.1	40.1

Obteniéndose un Límite Plástico de 40% y por consiguiente un índice de plasticidad de 18%.

3.1.4 Granulometría a través del Hidrómetro.

Tabla 3.4 Determinación de la Humedad Higroscópica.

	<i>Suelo total</i>		<i>Hidrómetro</i>	
Recipiente No			19	63
Masa húmeda más tara (g)			83.51	83.58
Masa seca más tara (g)			74.20	74.25
Tara (g)			35.55	35.13
Humedad (%)	0	0	24.09	23.85
Humedad promedio (%)	0.0		24.0	

3.2 Expresión de los resultados a través de las tabulaciones.

A partir de las tablas encontradas elaboradas para la clasificación del potencial expansivo de un suelo el autor elaboró una tabla con los campos principales usados por varios autores para dicha clasificación, para ello se emplea la tabla 1.9, 1.10, 1.11 y 2.2 de la presente investigación.

Tabla 3.5 Resultados de la aplicación de las tabulaciones

<i>Muestra</i>	<i>Contenido de Coloide (%)</i>	<i>Índice de Plasticidad</i>	<i>Grado de Expansión</i>
1	0.407	10	Bajo
2	0.365	13	Bajo
3	0.45	13	Bajo
4	0.348	12	Bajo
5	0.37	11	Bajo
6	0.27	12	bajo

Esta tabulación posibilitó que el autor llegara a la conclusión de que el suelo de la zona de estudio no presenta características expansivas alarmantes, no queriendo decir que sea apto

para la construcción ya que es necesario conocer datos como la resistencia del suelo el Nspt que pueden todos juntos facilitar una toma de decisión al proyectista .

3.3 Expresión de los resultados aplicados al Software 11.

La utilización del software a partir de una base de datos existente en la ENIA basada en años de investigación donde se reunió información de todas las perforaciones, resultados de ensayos de varios municipios de la provincia ya que todavía no se encuentra la información necesaria para agregar los ausentes posibilitó que el autor clasificara las arcillas a partir de los resultados haciendo uso de las tabulaciones de igual forma que en epígrafe anterior.

X	Y	MATERIAL	LIM. LIQ.	IND. PLA.	GRADO DE EXPANSION
478900	356657	Arcilla	68,9	34,5	ALTO
478905	356670	Arcilla Margosa	65,2	30,8	ALTO
482321	350193	Arcilla	50,2	24,3	MEDIO
482309	350166	Arcilla	49,2	27,9	ALTO
482313	350194	Arcilla	50,2	24,3	MEDIO
482326	350188	Arcilla	68,0	32,8	ALTO
480600	356824	Arcilla margosa	89,1	58,5	MUY ALTO
480642	356868	Arcilla	72,8	41,5	MUY ALTO
480655	356880	Arcilla	78,8	47,2	MUY ALTO
480670	356895	Arcilla con fragmentos	47,8	27,6	MEDIO
506255	346956	Arcilla roja macroporosa	56,0	29,6	MEDIO

Figura 3.2 Sección de la base de datos

La Figura 3.2 no es más que una sección de la base de datos la cual está subdividida por municipios ubicada por coordenadas mostrando resultados de ensayos resultados, código de la obra, cala, muestra y profundidad a la que fue tomada cada muestra, todos los campos anteriormente mencionados no se encuentran en la Figura 3.2 por una cuestión de formato |de la imagen que abarca más allá de los márgenes.

La sección mostrada corresponde al municipio de Cárdenas, según los resultados en muchas muestras donde los valores de Límite Líquido y Límite Plástico el grado de expansividad de las arcillas es muy alto por lo que es inaceptable que se hallan construido sobre suelos con alto potencial expansivo sin haberlo tenido en cuenta para el diseño de la

estructura ya que cada muestra posee un código referente a una perforación realizada para cada obra. Esto sucede en su mayoría por no verificar este parámetro ya que al no poder realizarse los ensayos correspondientes a partir de NC 54-306-1985 Hinchamiento libre y NC 54-350-1986 Hinchamiento controlado y desconocer la presencia o no de arcillas con alto poder expansivo hacen caso omiso, por ello la investigación tiene un alto valor ya que proporciona una herramienta para proyectar en una zona, conocer las posibles repercusiones que puede tener el suelo sobre la estructura, ya que de forma fácil y sencilla se pudo conocer en casi toda la provincia las zonas con arcillas de alto poder expansivo.

La utilización del software Surfer 11 permitió reunir toda la información y llevarla a un mapa de la provincia de Matanzas.

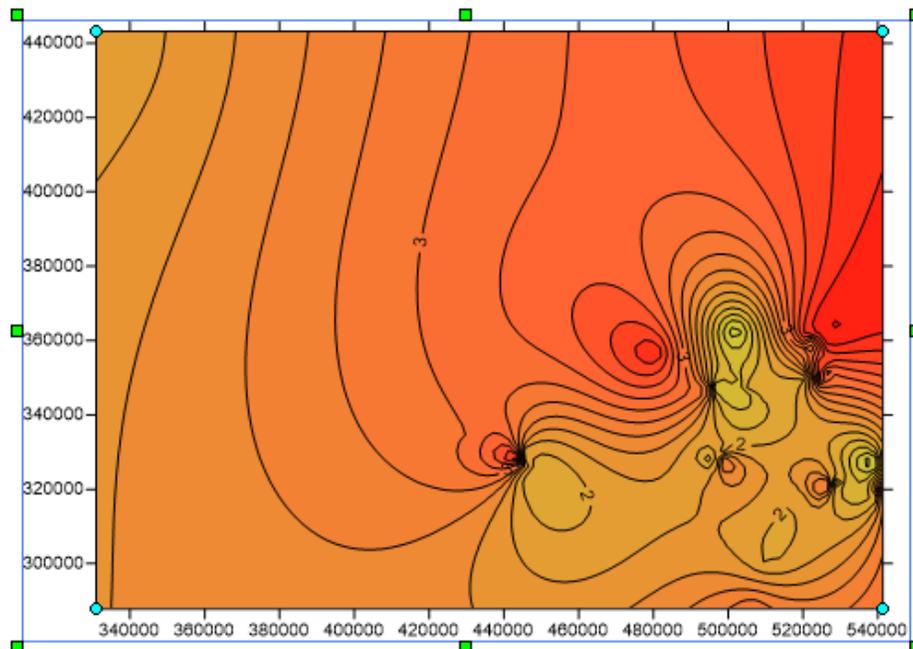


Figura 3.3 Aplicación de la base de datos al software Surfer 11

Fuente: Surfer 11

Este gráfico muestra la aplicación de la base de datos donde las zonas de color más claros corresponden a zonas con arcillas con bajo poder expansivo y las zonas con colores más oscuros todo lo contrario.

La figura 3.4 aplicada a un mapa de la Provincia de Matanzas proporciona localizar fácilmente las zonas y resultados que sean necesarios.

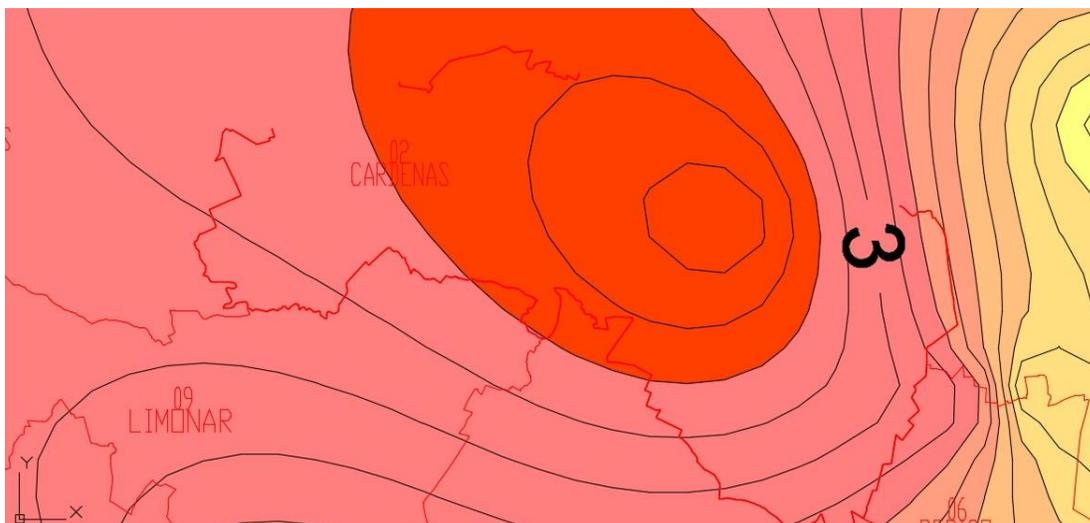


Figura 3.4 Sección del mapa de la Provincia aplicado al resultado obtenido del Surfer 11

Fuente: Surfer 11

3.4 Comentario crítico a estos métodos.

Realizando mediciones de forma directa sobre el terreno en condiciones naturales no resulta fácil predecir el comportamiento del terreno ante el esfuerzo de una construcción ya que las modificaciones del relieve natural de la zona de explanaciones y de las condiciones hidrogeológicas en excavaciones y obras subterráneas la plantación de árboles o tala de los mismos influyen de forma decisiva en la modificación del equilibrio de humedad del suelo. Si resulta difícil predecir el comportamiento de terreno en ensayos in situ considerablemente más arduo será reproducir las condiciones lo más exactas posibles en el laboratorio.

Evidentemente a mayor contenido de coloide mayor proporción de algunos compuestos arcillosos, mayor densidad seca y mayor será las probabilidades en un principio de que un suelo sea expansivo, pero por otra parte puede ser un suelo ser clasificado de expansivo por las tabulaciones y no presentar un peligro para algunas estructuras.

Conclusiones parciales

- Las clasificaciones por tabulaciones constituyen una notable ventaja para algunas empresas y proyectistas a la hora de elaborarse un juicio con respecto a un suelo, siendo rápido y sencillo.
- El suelo de la zona de estudio no presenta características que lo conlleven a un posible cambio de volumen de forma extrema.
- Es necesario realizar siempre ensayos que respalden estos resultados y no dejar solo al juicio de la estadística.
- La obtención del mapa de la provincia demuestra la presencia de arcillas con alto grado de expansividad en varias zonas de Matanzas.
- Que el suelo no haya sido catalogado de expansivo no infiere que pueda ser utilizado para todo tipo de estructura ya que es necesario la realización de ensayos para la elaboración de un criterio mejor fundamentado.

CONCLUSIONES

- Los suelos de la zona de estudio al Oeste de la ciudad de Cárdenas presentan un grado de expansividad bajo.
- Existe muy poca información sobre investigaciones de arcillas en el territorio de la Provincia de Matanzas.
- La no realización de los ensayos de Hinchamiento Libre y Controlado en los suelos de la provincia constituye un riesgo potencial para las estructuras.
- La utilización de las tablas elaboradas por Gibbs y Holtz (1965) y Chen (1988) son una vía fácil y sencilla para formularse un primer criterio sobre el firme en construcción.
- El contenido de coloides es un parámetro a observar en los ensayos ya que es un gran indicador de la presencia de arcillas expansivas.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar la investigación con respecto a la posibilidad de utilización de las tabulaciones en territorio nacional.
- Se hace necesario la realización de los ensayos de Hinchamiento Libre y Controlado y comparar con las tablas utilizadas para de esta forma ver cuán lejos está de la realidad los resultados alcanzados.
- Es una necesidad que se profundice en el estudio de los estratos arcillosos de la provincia para enriquecer la escasa información que existe sobre su capacidad de cambio de volumen y facilitar la toma de decisiones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACOSTA, H. T. 2017. *Fracturas por arcillas expandibles* [Online]. <http://pubs.usgs.gov/info/clays/>.
- ALBAN, E. D. A. 2015. *Mejoramiento de la estabilidad de pozos en las secciones productoras de la selva peruana*. Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.
- ALEMÁN, E. G. 2015. Las arcillas : propiedades y usos. 25.
- ALONSO, E. E. 1998. *Suction and moisture regimes in road way bases and subgrades. International symposium on pavement and subgrades*, Granada.
- ALPAÑES, J. A. J. S. Y. J. L. D. 1991. *Propiedades de los suelos y de las rocas*.
- ALPAÑES, J. A. J. S. Y. J. L. D. J. 1984. *Geotecnia y cimientos . Propiedades de los suelos y de las rocas*.
- ARMOS, J. W. 2016. Clay and Construction.
- BARDEN, L. 1965. Consolidation of compacted and unsaturated clays. *Géotechnique*.
- BISHOP, A. W. 1959. The principle of effective stress. *Teknik Ukeblad*.
- CÁRDENAS, M. H. J. 2014. *Evaluación e identificación del potencial de colapso en suelos derivados de cenizas volcánicas del Sur de Chile* Universidad de la Frontera de Chile
- CHEN, F. H. 1988. Foundation on Expansive soils. *American Elsevier Science Pub* [Online].
- D.R. SNETHEN, F. C. T., L.D. JOHNSON, D.M. PATRICK & P.J. VEDROS 1975. *A Review of engineering experience with expansive soils in highway subgrades.*, Washington, D. C. .
- DAS, B. M. 2012. *Principios de ingeniería en cimentaciones* México D.F.
- ENIA 2006. Diagnóstico Ambiental Viales de interés nacional. 2, 36.
- ESTÉBAN, A. D. 2017. Predicción de deformaciones a largo plazo en arcillas sensitivas GEOLÓGICAS, C. D. L. D. F. 2014. *Léxico de Formaciones Geológicas* 191.
- HECHEVERRÍA, R. M. 2005. *Depósitos de arcillas abigarradas en Cuba Occidental*. Universidad de Pinar del Rio.
- HERRERA, J. M. A. 2014. *Constitución mineralógica de las arcillas Estados Unidos* , Oviedo: Universidad de Oviedo.
- HOLTZ, H. J. G. W. G. 1954. *Engineering Properties of Expansive Clays*.
- HOLTZ, H. J. G. W. G. 1956. *Engineering Properties of Expansive Clays*.
- INVIAS, N. 2013. Determinación de suelos expansivos. *I.N.V.E.-132-07*.
- LINNET SANTA CUZ , D. C., NATALIA VEGA Y OLIVIA SARDIÑAS 2008. Factibilidad de aplicación de arcilla cubana para el enriquecimiento en minerales de agua potable. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, V.
- MARTÍNEZ, R. B. 2016. *Diseño geotécnico y estructural de una cimentación en arcilla expansiva* Universidad Nacional Autónoma de México
- MOROCHO, Á. O. E. 2015. *The geology of ore deposits.*, Universidad Técnica Particular de Loja.
- NORMALIZACIÓN, O. N. D. 1998. NC 20 -1998 Geotecnia. Preparación de muestras de suelo. . Habana.
- NORMALIZACIÓN, O. N. D. 1999. NC 20: 1999 Geotecnia. Determinación de la Granulometría de los suelos. . Habana.

- NORMALIZACIÓN, O. N. D. 2000a. NC 58: 2000 Geotécnia. Determinación del Límite Líquido , Líaminamite Plástico e Índice de Plasticidad de los suelos. . Havana.
- NORMALIZACIÓN, O. N. D. 2000b. NC 67: 2000 Geotécnia. Determinación del Contenido de Humedad de los suelos y rocas de laboratorio. Habana.
- OLAYA, K. A. A. 2012. *Control óptimo de la inhibición y estabilización de las lutitas y arcillas en los fluidos de perforación base agua*. Universidad Nacional de Ingeniería
- PARK, J. M. G. C. F. 1986. *The geology of ore deposits*.
- PINO, L. 2016. Arcilla cubana para su potencial uso como refuerzo en un material compuesto. *Monografía*.
- POTES, G. D. E. Y. C. E. E. 2016. Origen Formación y constitución del suelo , físicoquímica de las arcillas. 1 Geomecánica para ingenieros.
- PREFUMO, J. P. Y. J. E. 2015. *La acción de los suelos expansivos sobre las cimentaciones. Métodos de prevención y control*. Universidad de Montevideo.
- QUEVEDO, D. Y. 2013. Aplicación y validación de una metodología integral para la evaluación de la expansividad de suelos arcillosos. *Ingeniería*, II.
- RODRIGUEZ, E. J. B. Y. A. R. 2005. *Mecánica de Suelos*.
- ROJA, J. C. P. 2018. *Análisis experimental de la expansividad en suelos*. Universidad Católica de Colombia
- ROMERO, J. E. R. 2014. Expansividad. Pistas que dan los suelos. *Desde el Murete* [Online].
- SIDES, L. B. A. G. R. 1970. Engineering behaviour and structure of compacted clay.
- SUAREZ, C. V. 2016. *Fallo de cimentaciones por el cimiento* [Online]. <http://www.arqhys.com/construccion/cimientos-arcillas.html>.
- TUCKER, M. E. 1991. Sedimentary petrology. *Blackwell Science*, 260.
- VALLEJO, L. I. G. D. 2002. *Ingeniería geológica*.
- VERDUCH, A. G. 2014. Origen y composición de las arcillas cerámicas 24.
- VIERA, E. A. 2016. Litología y Estructura Geológica de suelos arcillosos. v.
- VIERA, L. R. 2013. Todo Sobre la Maldición de las Arcillas Expansivas. *Ciencia & Cemento* [Online].
- WHITMAN, R. B. 1960. *A mechanistic picture of shear strength in clay*. *Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils*, Colorado.

ANEXOS

Anexo 1 Tabla resumen de la muestra 2 del ensayo de Límite Líquido.

<i>DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO</i>					
No. de golpes	35	32	28	24	20
Recipiente No.	45	17	66	44	107
Masa húmeda más recipiente (g)	45.94	40.14	39.07	42.50	40.60
Masa seca más recipiente (g)	44.12	38.95	37.99	39.14	38.15
Masa del recipiente (g)	36.14	35.10	35.34	33.45	34.10
% Humedad	22.8	30.9	40.8	59.1	60.5

Anexo 2 Tabla resumen de la muestra 3 del ensayo de Límite Líquido.

<i>DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO</i>					
No. de golpes	35	32	28	24	20
Recipiente No.	24	55	65	49	104
Masa húmeda más recipiente (g)	47.66	40.14	42.33	41.45	47.96

Masa seca más recipiente (g)	45.55	38.45	39.66	39.66	43.86
Masa del recipiente (g)	36.45	33.55	34.12	36.99	39.40
% Humedad	23.2	34.5	48.2	67.0	91.9

Anexo 3 Tabla resumen de la muestra 4 del ensayo de Límite Líquido.

<i>DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO</i>					
No. de golpes	35	33	29	21	18
Recipiente No.	72	19	16	66	109
Masa húmeda más recipiente (g)	47.85	40.19	42.50	41.55	48.66
Masa seca más recipiente (g)	45.05	38.75	39.85	39.20	43.95
Masa del recipiente (g)	36.50	36.01	35.33	35.80	38.70
% Humedad	32.7	52.4	58.6	69.1	89.7

Anexo 4 Tabla resumen de la muestra 5 del ensayo de Límite Líquido.

<i>DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO</i>					
No. de golpes	35	30	27	24	18
Recipiente No.	72	78	16	48	109
Masa húmeda más recipiente (g)	48.99	41.66	38.55	41.42	47.96
Masa seca más recipiente (g)	45.66	39.55	37.55	39.45	43.55
Masa del recipiente (g)	36.50	34.55	35.33	36.58	38.70
% Humedad	36.4	42.2	45.0	68.6	90.9

Anexo 5 Tabla resumen de la muestra 6 del ensayo de Límite Líquido.}

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO					
No. de golpes	35	30	26	21	18
Recipiente No.	74	45	16	78	15
Masa húmeda más recipiente (g)	49.66	41.55	39.44	57.55	49.55

Masa seca más recipiente (g)	48.12	39.56	38.12	47.55	44.89
Masa del recipiente (g)	37.55	34.66	35.34	35.80	39.75
% Humedad	14.6	40.6	47.5	85.1	90.7