

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CAUSAS, DAÑOS Y MITIGACIÓN DEL FENÓMENO DE COLAPSO DEL SUELO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Br:

Vielma Serrano, Rafael José.

C.I: 12.686.884

Para optar al Título de
Ingeniero Civil

Caracas, Octubre de 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CAUSAS, DAÑOS Y MITIGACIÓN DEL FENÓMENO DE COLAPSO DEL SUELO

TUTOR ACADÉMICO: Profa. Bernarda Romero.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Br:

Vielma Serrano, Rafael José.

C.I: 12.686.884

Para optar al Título de
Ingeniero Civil

Caracas, Octubre de 2009

ACTA

El día 9 - 11 - 2009 se reunió el jurado formado por los profesores:

Bernarda Romero
Ruben Benarroch
Monica Pereira

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado: "**CAUSAS, DAÑOS Y MITIGACIÓN DEL FENÓMENO DE COLAPSO DEL SUELO**".

Presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al Título de **INGENIERO CIVIL**.

Una vez oída la defensa oral que el Bachiller hizo de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió las siguientes calificaciones:

NOMBRE	CALIFICACIÓN	
	Números	Letras
Br. Rafael Vielma Serrano	20	Veinte

Recomendaciones:

Continuar trabajos Prácticos

FIRMAS DEL JURADO

Bernarda Romero
Ruben Benarroch
Monica Pereira

Caracas, 9 de 11 de 2009

DEDICATORIA

A DIOS por suministrarme la fuerza y la constancia necesaria para poder alcanzar tan importante logro en mi vida personal.

A mi Padre José Rafael Vielma Sosa, por ser mi principal inspiración, mi ejemplo de vida, mi ídolo, mi ejemplo de lucha, y sobretodo, de amor a la vida. Papaito lindo espero que alla arriba junto a Dios estes muy orgulloso de tu hijo Rafael José (PITO)! Este Título es para ti. TQM

A mi abuelita María, mi primo Julio Cesar, mi tía María Antonia y a mi abuelito Ramón, quienes también seguramente desde alla arriba desde el cielo, están muy contentos por el logro que estoy alcanzando.

A mi madre quien con mucho sacrificio, trabajo, dedicación, esfuerzo y amor, ha sabido llenar el vacío dejado por mi padre. TQM MAMI.

A mis hermanos Elizabeth y José Alberto por su apoyo incondicional para la consecución de esta meta. Gracias por ser tan especiales! Los amo.

A lo más bello de la familia, mi sobrina Alejandra Isabella, te quiero mucho mi niñita bella.

A la mujer con quien quiero compartir el resto de mi vida, Damarys Karina Paredes Alvarez. Gracias por tantos años de paciencia, gracias por quererme tanto y por haber hecho de mí, una mejor persona. TE AMO MI NEGRITA BELLA !

A mi Familia Vielma Serrano por ser tan especiales y por apoyarme incondicionalmente en todo momento para la consecución de este logro tan importante en mi vida, especialmente a mi tío Santos y a mi tía Gladys. Gracias por pertenecer a mi vida, a mis primos, especialmente Santos Aquiles y Hector José por ser tan especiales y por ser parte importante de mi vida. Espero que siempre sigamos así de unidos, los quiero mucho.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer muy especialmente al Profesor Rubén Benarroch, por su valiosa colaboración, ya que sin su ayuda no hubiese sido posible la realización de este Trabajo Especial de Grado.

Al Ingeniero José Amundaray, por haberme facilitado de manera muy gentil parte de su valiosa bibliografía relacionada al tema de suelos colapsables, los cuales fueron de mucha ayuda para la realización de este Trabajo de Grado.

A mi Tutora, la Profesora Bernarda Romero por su valiosa colaboración, y por haberme permitido desarrollar un tema tan importante como es el de los suelos colapsables.

Gracias a la Lic. Gladys Serrano (mi tía) y a la Lic. Egería Bernal, por su valiosísima ayuda y orientación durante el desarrollo de los aspectos metodológicos.

A mis queridos Profesores de esta casa de estudio, especialmente a los Profesores Rebeca Sánchez, Abraham Salcedo, Carlos Zerpa, María Korody, Javier Lopez, quienes me ayudaron en mi formación como Ingeniero Civil.

A mis primeros amigos en esta casa de estudio, Felix Alfredo, Juan José y Helvin, quienes me enseñaron a conocer la importancia de pertenecer a esta máxima casa de estudio, a las amistades que hice a través del deporte, Miguel, ZETA, Felix Gómez y Yorangel, quienes finalmente resultaron ser mis mejores amigos dentro de la Universidad, a mis compañeros de estudio, José Tomas, Efren, Oliver, Victor, Eduardo, Alberto, Daniel, Simón, Alí, Luis Mariano, Noel, Luisa, Zulimar, Veronica, Yraidis y algunos que ya se graduaron que igualmente me ayudaron a conseguir esta meta.

Finalmente a mi Grandiosa ALMA MATER, la Universidad Central de Venezuela, me siento orgulloso de haber pertenecido a la casa que vence la sombra UU UCV UU UCV UU UCV.

Ucevista hoy, Ucevista siempre!

Vielma S, Rafael J.

CAUSAS, DAÑOS Y MITIGACIÓN DEL FENÓMENO DE COLAPSO DEL SUELO

Tutor Académico: Profa. Bernarda Romero

Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil. 2009, n° pág. (126)

**Palabras clave: Suelos colapsables, grado de saturación, mitigación de
daños**

Resumen: el presente Trabajo de Grado esta basado en analizar el fenómeno de colapso y las principales causas que lo originan, lo cual ocurre en suelos particulares llamados problema, y en consecuencia, proponer los tratamientos más apropiados de mejoramiento de suelos capaces de mitigar los daños ocasionados por la aparición de este fenómeno. Los suelos colapsables pueden definirse como aquellos suelos parcialmente saturados que experimentan una brusca disminución de volumen cuando son sometidos a humedecimiento. La información mostrada en este Trabajo de investigación es de tipo documental la cual permite establecer un criterio de identificación y caracterización de estos suelos, los cuales representan actualmente un verdadero problema en el área de la Ingeniería Civil. Esta investigación consta de cuatro (4) capítulos, los cuales se basan en describir la problemática que dio origen a este estudio, los distintos postulados teóricos que expresan las características que identifican a estos suelos, los resultados obtenidos del análisis realizado durante el proceso de investigación, y finalmente las conclusiones, destacandose, los principales causantes de la aparición del fenómeno de colapso, así como, la escogencia de una determinada medida de mitigación de daños, la cual dependerá principalmente del espesor del estrato colapsable, además del factor costo,

teniendo en cuenta que para espesores menores de cuatro (4) metros existen ciertos métodos y para espesores mayores de cuatro (4) metros otros métodos.

ÍNDICE GENERAL

	Pp
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	VI
ÍNDICE GENERAL	VIII
LISTA DE TABLAS	XIII
LISTA DE FIGURAS	XIV
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
OBJETIVOS	
Objetivo General	6
Objetivos Específicos	6
JUSTIFICACIÓN Y APORTES	7
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	10
ANTECEDENTE Nº 1	13
ANTECEDENTE Nº 2	16
ANTECEDENTE Nº 3	17
ANTECEDENTE Nº 4	23
ANTECEDENTE Nº 5	29
ANTECEDENTE Nº 6	30

2.2	SUELOS COLAPSABLES	
2.2.1	Definición de suelos colapsables	31
2.2.2	Estructura típica de los suelos colapsables	33
2.2.3	Características físicas de los suelos colapsables	35
2.2.4	Causas que originan la aparición del fenómeno de Colapso de un suelo	37
2.2.4.1	Relación de vacíos	38
2.2.4.2	Contenido de humedad	39
2.2.4.3	Grado de saturación	39
2.2.4.4	Límites de Atteberg	40
2.2.4.5	Límite líquido	41
2.2.4.6	Límite plástico	41
2.2.4.7	Límite de contracción	42
2.2.4.8	Densidad del suelo	43
2.2.4.9	Ascenso del nivel freático	44
2.2.4.10	Tensión capilar.....	44
2.2.5	Origen y tipos de suelos colapsables	44
2.2.5.1	Origen geológico de los suelos colapsables	47
2.2.6	Localización de los suelos colapsables	48
2.2.7	Clima	49
2.2.8	Reconocimiento del problema de colapso en campo y en el laboratorio	50
2.2.8.1	Microscopio electrónico de barrido	52
2.2.9	Ensayos para la identificación del colapso	
2.2.9.1	Ensayo de consolidación	53
2.2.9.2	Ensayo triaxial	54
2.2.9.3	Ensayos de campo	55
2.2.10	Ensayos de reconocimiento de suelo	
2.2.10.1	Ensayo de penetración estándar (SPT)	55
2.2.11	Ensayos de colapso	

2.2.11.1	Ensayo de doble odómetro	56
2.2.11.2	Ensayo de odómetro simple	57
2.2.12	Procedimiento para calcular el asentamiento debido al colapso	58
2.3	CIMENTACIONES EN TERRENOS COLAPSABLES	61
2.3.1	Pilotes	62
2.3.2	Pilotes de compactación de arena	64
2.4	MEJORAMIENTO DE SUELOS COLAPSABLES	65
2.4.1	Inyecciones de lechadas o de estabilizadores químicos	66
2.4.2	Pre-humedecimiento	66
2.4.3	Compactación con vehículos o rodillos	67
2.4.4	Compactación dinámica	68
2.4.5	Vibroflotación	68
2.4.6	Explosión profunda combinada con pre-humedecimiento	69
2.4.7	Humedecimiento controlado	69
2.4.8	Precarga	70
2.5	MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE DAÑOS Y RIESGOS EN SUELOS COLAPSABLES	
2.5.1	Remoción del estrato de suelo colapsable	72
2.5.2	Evitar o minimizar el humedecimiento	72
2.5.3	Transferencia de la carga a un suelo estable por debajo del suelo colapsable	72
2.5.4	Diseño de estructuras capaces de tolerar asentamientos Asentamientos diferenciales	73
2.6	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	76

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

3.1	DISEÑO, TIPO DE INVESTIGACIÓN Y FUENTES DOCUMENTALES	78
3.2	ETAPAS PARA LA REALIZACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO	
3.2.1	Recopilación de la información bibliográfica	80

3.2.2	Análisis exhaustivo de fundamentos teóricos relacionados al fenómeno de colapso	81
3.2.3	Análisis de los métodos de identificación para determinar el potencial de colapso del suelo	81
3.2.4	Análisis de métodos de mitigación de daños ocasionados por los suelos colapsables	82
3.2.5	Integración de resultados de la exploración documental y elaboración del documento final	82

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1	Suelos colapsables	84
4.2	Características de los suelos colapsables	85
4.3	Causas que originan el colapso del suelo	
4.3.1	Aumento del grado de saturación	87
4.3.2	Rompimiento de los enlaces entre las partículas de suelo	87
4.3.3	Otras causas	88
4.4	Métodos de identificación para determinar el potencial de colapso	
4.4.1	Métodos basados en parámetros físicos de suelos	88
4.4.2	Ensayos para la identificación del fenómeno de colapso	89
4.4.3	Ensayos de colapso	90
4.5	Técnicas de mejoramiento de suelos para mitigación de daños ocasionados por los suelos colapsables	
4.5.1	Remoción del estrato colapsable	91
4.5.2	Pre-humedecimiento	91
4.5.3	Compactación con peso apisonador o compactación dinámica	91
4.5.4	Compactación con vehículos o rodillos	92
4.5.5	Precarga	92
4.5.6	Humedecimiento controlado	92
4.5.7	Evitar o minimizar el humedecimiento	93
4.5.8	Pilotes	93

4.5.9	Soluciones ingenieriles en suelos colapsables	
4.5.9.1	Edificios	94
4.5.9.2	Presas	94
4.5.9.3	Canales, tuberías y obras afines	94
4.5.9.4	Puentes	94
	 CONCLUSIONES	 96
	RECOMENDACIONES	100
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
	ANEXOS	
	ANEXO A	108
	ANEXO B	109
	ANEXO C	110
	ANEXO D	111
	ANEXO E	112

LISTA DE TABLAS

TABLA	pp.
Tabla N° 1: Valores indicativos del potencial de colapso	15
Tabla N°2: Comparación del colapso medido según Abeljev, y Jennings y Knight para una carga de inundación de 2,0 kg/cm ²	19
Tabla N°3: Tabla representativa de valores de relación de vacíos, obtenidos según carga aplicada para cada ensayo	21
Tabla N°4: Propiedades Índices obtenidas de las diversas muestras de suelos de la región lacustrina de Maracay	22
Tabla N°5: Tabla representativa de los valores del índice de Colapso, obtenidos según ensayos de carga realizados a cada muestra estudiada	23
Tabla N°6: Tabla representativa de valores de cargas aplicadas, Según el diámetro del pilote a utilizar	30
Tabla N°7: Valores críticos de grado de saturación para distintos tipos de suelo para que ocurra el colapso crítico	40
Tabla N°8: Tabla representativa de la actividad de la arcilla en suelos colapsables	43
Tabla N°9: Tabla representativa de países que presentan suelos colapsables, con su respectivo clima y el tipo de suelo	49
Tabla N°10: Clasificación de las medidas de mitigación de acuerdo al resultado buscado	75

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		pp.
Figura 1:	Curva granulometrica de suelos colapsables Proyecto Sisor Planta Ciudad Bolívar	14
Figura 2:	Gráfico de Granulometría por tamizado e Hidrometría correspondiente al estudio del fenómeno de colapso en la Región Lacustrina de Maracay	18
Figura 3:	Extensión Geográfica de las Formaciones Quebradón y Quaimare	24
Figura 4:	Comparación de valores de resistencia a la penetración del ensayo SPT realizado con muestras secas y con inyección de agua	26
Figura 5:	Curva granulométrica de tendencia promedio de suelos colapsables de Jose	27
Figura 6:	Estructura típica de los suelos colapsables	35
Figura 7:	Meseta de suelo loesico ubicado en China	45
Figura 8:	Suelos loesicos ubicados en Hungría	46
Figura 9:	Suelos Eólicos susceptibles al Colapso	51
Figura 10:	Micrografía de una muestra de suelo colapsable de Jose en condición natural	52
Figura 11:	Resultado típico de una prueba de doble odómetro con muestra saturada y muestra parcialmente saturada	57
Figura 12:	Resultado típico de una prueba de simple odómetro para determinar el índice de colapso	58
Figura 13:	Cálculo del asentamiento con prueba de odómetro doble con muestra de suelo normalmente consolidado	61
Figura 14:	Cálculo del asentamiento con prueba de odómetro doble con muestra de suelo preconsolidado	62
Figura 15:	Fundaciones corridas con vigas de carga	75

INTRODUCCIÓN

Muchos de los fenómenos que determinan el comportamiento de los suelos son complejos y no pueden reducirse únicamente a causas mecánicas, ya que otras veces intervienen factores de otra índole, tales como, origen geológico, factores climáticos, composición química, entre otros, causando importantes cambios dentro de la composición del suelo.

Los profesionales del área de la Geotecnia, deben estar en capacidad de comprender dicho comportamiento, con el fin de prevenir o minimizar algunos accidentes naturales que pueden ocurrir durante la ejecución de determinada obra civil, por ejemplo, la inestabilidad de taludes, asentamientos diferenciales mayores de los permitidos, procesos de erosión, entre otros, con un objetivo único que no es más, que el de prevenir la vida útil de las estructuras y el de la vida humana.

Cuando se está trabajando en campo, pueden encontrarse diversos fenómenos que afecten la estructura y la composición del suelo sobre el que se esté realizando una determinada obra, sin importar el uso que se le vaya a dar a la misma.

Uno de los principales fenómenos que afectan a los diferentes tipos de suelo, y sobre el cual estará basada la investigación durante el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado, es el colapso brusco de la estructura de un suelo, denominándose a los suelos que presentan estas características: Suelos Colapsables.

Los Suelos colapsables, son suelos potencialmente no saturados; es decir, suelos que disminuyen su volumen bruscamente al estar saturados, y que están sujetos a cambio de humedad, bien sea por variaciones climáticas o actividades artificiales realizadas por el hombre.

Adicionalmente, los mismos representan uno de los suelos más complejos para cimentar, debido a que hacen que la construcción de algunas cimentaciones resulte sumamente dificultosa porque llegan a ocasionar

grandes movimientos diferenciales en las estructuras debido a un asentamiento diferencial no permitido.

No todos los problemas causados por este tipo de suelo pueden resolverse en su totalidad; por lo tanto, la identificación oportuna de los suelos colapsables durante la fase de exploración de campo (en condición natural y en condición saturada) es crucial para la adopción de medidas preventivas durante su construcción y el análisis de la escogencia de la fundación, orientadas a evitar la falla de las mismas, situación que compromete el comportamiento estructural de instalaciones y/o edificaciones y pone en riesgo, como se mencionó anteriormente, la vida útil de las estructuras, al igual que la vida humana.

Este fenómeno de colapso, es un hecho conocido en muchas partes del mundo, no obstante, constituye un tema relativamente novedoso en el país.

El interés despertado recientemente por este fenómeno, tiene su causa principal en la gran demanda existente de terrenos para construcción de nuevas industrias, grandes urbanizaciones, nuevos centros comerciales, entre otros, que hace necesaria la utilización de zonas áridas asociadas con la aparición de este fenómeno de colapso.

En vista de lo antes expuesto, el siguiente Trabajo Especial de Grado tiene como propósito, conocer el significado teórico de los suelos colapsables, estudiar y analizar los diversos ensayos que permitirán determinar las características de estos suelos, conocer cuando ha ocurrido el fenómeno de colapso, cuales son las principales causas que originan la aparición de dicho fenómeno, así como, los diversos tratamientos que se deben aplicar cuando estamos en presencia de suelos colapsables, teniendo en cuenta que el comportamiento de estos suelos es distinto para cada caso en particular, bien sea, por la profundidad del estrato colapsable, el costo de la técnica a ser empleada, entre otros.

Para lograr dicho propósito, la investigación se apoyará en diversas bibliografías de especialistas de la materia, los diferentes tratamientos que se

deben aplicar para la mitigación de los daños ocasionados por estos suelos, además de algunas experiencias directas de profesionales del área de la Geotecnia las cuales reforzarán los resultados que se obtengan en este Trabajo de Grado.

La estructura del presente Trabajo Especial de Grado consta de cuatro (4) capítulos:

En el Capítulo I se presenta el planteamiento del problema. En él se describe la problemática y los argumentos que dieron origen a este estudio. Asimismo, se formularon los objetivos (general y específicos), que facilitarán la direccionalidad del proceso de investigación.

El Capítulo II comprende el marco teórico, el cual se inicia con una serie de antecedentes de la investigación, los cuales permiten tener una visión mucho más amplia relacionada con las diversas características que definen a los suelos colapsables. Por último se esbozan los fundamentos teóricos considerados pertinentes para la fundamentación de este Trabajo Especial de Grado.

El Capítulo III está conformado por el marco metodológico, en el cual se explica detalladamente los pasos seguidos para la realización de este Trabajo Especial de Grado, se describe el modelo de investigación y las fases necesarias para el desarrollo de la investigación.

El Capítulo IV está conformado por el análisis de los resultados, en el se presentan los resultados obtenidos de la ejecución de la metodología y la discusión de los factores que fueron determinantes para la obtención de los mismos.

Finalmente las Conclusiones y Recomendaciones, en esta sección se presentan de forma puntual y concisa afirmaciones y observaciones que resultan a partir de los resultados obtenidos y su respectivo análisis; así como también sugerencias destinadas a superar las eventuales limitaciones observadas durante el desarrollo de esta investigación.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Por lo general, los Ingenieros Civiles y Geotécnicos deben estar capacitados para identificar los principales problemas que se puedan presentar en un determinado tipo de suelo con el que estén trabajando y conocer sus distintas propiedades; bien sean, físicas, mecánicas, o de su capacidad portante. Dicha problemática puede ocurrir en suelos donde el nivel freático se encuentra a gran profundidad, pudiendo observarse en zonas de localidades semi-áridas y, más frecuentemente, cuando la humedad del suelo es mayor a la que prevalece en la zona.

A lo largo y ancho de todo el mundo, ciertos tipos de suelos hacen la construcción de diversas obras civiles extremadamente difíciles, como son aquellos suelos que presentan una composición colapsable la cual es la base de análisis de este Trabajo Especial de Grado. Los suelos que presentan como características fundamentales las mencionadas anteriormente, al igual que otras características que serán explicadas más adelante durante la elaboración del presente Trabajo Especial de Grado, se denominan “Suelos Colapsables”.

En muchas ocasiones, estos suelos han sido obviados durante las investigaciones geotécnicas, lo cual ha traído como consecuencia la ocurrencia de inesperados asentamientos del terreno sobre el cual se esté trabajando.

Dadas las consideraciones anteriores, esta investigación está dirigida a analizar las diversas causas que originan el fenómeno de colapso de un suelo y plantear la posible alternativa que permitirá mitigar el daño causado por el mismo, haciendo énfasis específicamente en la construcción de obras.

En este sentido, el método de trabajo está enfocado a responder las siguientes interrogantes:

1.- ¿Qué es un suelo colapsable y cuáles son sus características físicas y mecánicas?

2.- ¿Cuales son las diversas causas que originan el colapso de un suelo?

3.- ¿Cuales son los métodos de identificación existentes que permiten determinar el potencial de colapso de un suelo?

4.- ¿Cuáles son las técnicas de mejoramiento de suelos existentes, capaces de minimizar el daño causado por este tipo de suelo durante la construcción de obras civiles?

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar las principales causas que originan el fenómeno de colapso de un suelo, para proponer los tratamientos más apropiados de infraestructura para suelos colapsables y su mitigación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.-** Documentar proposiciones teóricas sobre suelos colapsables, sus características físicas y mecánicas
- 2.-** Identificar las principales causas que originan el colapso de un suelo
- 3.-** Analizar los diversos métodos de identificación existentes para determinar el potencial de colapso de un suelo
- 4.-** Analizar las distintas técnicas de mejoramiento de suelos aplicables para la mitigación de daños ocasionados por suelos colapsables para determinar las más adecuadas desde el punto de vista de la Ingeniería Civil.

JUSTIFICACIÓN Y APORTES

Muchas veces, los Ingenieros Geotécnicos, encuentran suelos que no poseen suficiente resistencia para soportar las cargas de determinadas estructuras, representando un problema en el área de la Ingeniería Civil.

Por lo general, este problema ocurre en algunos suelos en donde no se pueden fundar directamente determinadas estructuras o alguna otra obra civil, debido a que las mismas podrían sufrir asentamientos repentinos bruscos, lo que traería como consecuencia, fallas en el comportamiento estructural de las instalaciones y/o edificaciones construidas en él, poniendo en riesgo la vida de los trabajadores, habitantes, o demás personas que hagan uso de estas obras.

Uno de los suelos encontrados en campo que presentan características de asentamientos repentinos bruscos son los Suelos Colapsables. Según diversos investigadores del área consultados para la elaboración de esta Investigación, tales como, Lupini (†) y Amundaray, este tipo de suelo, por lo general, es obviado durante las investigaciones geotécnicas, a pesar de que pueden encontrarse con frecuencia en depósitos de grava, arena, limo y arcilla, ocasionando daños inesperados. La razón de ello se debe a que estos suelos aparentan una alta resistencia a las diversas actividades realizadas por el hombre, sin embargo, su estructura se destruye ante una combinación de carga y saturación, esto debido a que los suelos colapsables suelen ser de estructura blanda.

La mayoría de los investigadores consultados en el presente Trabajo de Grado (Amundaray, Carrillo, Beltrán, Ríos y Ospina, entre otros), han observado que el fenómeno de colapso de un suelo se ha convertido en un problema que se ha venido incrementando paulatinamente durante los últimos años. El descubrimiento de este tipo de suelo, se remonta a mediados del siglo pasado, siendo un hecho conocido en muchas partes del mundo, constituyendo un tema relativamente nuevo en nuestro país.

Resulta de suma importancia, la identificación oportuna de los suelos colapsables durante la fase de exploración de campo, ya que es crucial para la adopción de medidas de mitigación durante el proceso de construcción.

Estas medidas de mitigación consisten en la aplicación de diversas técnicas de mejoramiento de suelo, las cuales permitirán obtener una solución viable cuando se quiere trabajar sobre este tipo de suelo problema como son los suelos colapsables; no obstante, muchos de los investigadores mencionados anteriormente, señalan que por lo general, dicha solución no siempre es la más adecuada ya que muchas veces la misma no brinda el resultado esperado.

Tomando en cuenta, las distintas soluciones o alternativas planteadas en el marco teórico por los especialistas consultados en el área de la Geotecnia, tales como: pilotes, remoción y compactación del estrato colapsable, pre-humedecimiento, entre otros, se hará un especial énfasis en la exposición de estos métodos o técnicas que permitirán minimizar los daños ocasionados por este tipo de suelo problema, teniendo en cuenta, que estos no siempre tendrán el mismo resultado, ya que dependerán de las características propias del suelo a estudiar.

Entre los principales aportes que proporcionará la elaboración de este Trabajo Especial de Grado se encuentran:

- Enriquecer, consolidar y complementar las bases para futuras investigaciones del área de la Geotecnia, particularmente en la mitigación de daños ocasionados a diversas estructuras y obras civiles debido a la presencia de suelos colapsables, con la finalidad de preservar la vida de todos los individuos que hacen uso de dichas obras.

- Continuar la línea de Investigación desarrollada en la Universidad Central de Venezuela relacionado al estudio de suelos colapsables, iniciada en el año de 1984 por los tesisistas Julia Ríos y Carlos Ospina, la cual continuó en el año de 1987 por Ivonne Martínez y Livia Millán, y posteriormente retomada en el año 2009 por este Trabajo Especial de Grado, lo cual reforzará la evolución histórica que ha tenido esta problemática, no solo a los estudiantes de Ingeniería Civil de nuestra casa de estudios, sino que también servirá de consulta a diversos estudiantes de otras casas de estudio, y a especialistas del área que deseen obtener información relevante acerca de esta problemática novedosa en el país.

- A nivel personal la elaboración de este Trabajo Especial de Grado, me permitió consolidar y enriquecer los conocimientos adquiridos en el área de la Mecánica de suelos, específicamente, en el tema de suelos colapsables.

Dichos conocimientos se pueden aplicar durante el desempeño futuro en el campo laboral; básicamente, cuando el profesional se tope con este tipo de suelo problema.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

A mediados del siglo pasado, específicamente en el año de 1953, el colapso de los suelos fue identificado al Sur del Continente Africano por el Ingeniero K. Knight, quien conjuntamente con J. Jennings, han sido de los especialistas en el área de la Geotecnia que han contribuido más con la problemática de los suelos colapsables a nivel mundial.

Knight (1956), a su vez, se dió a la tarea de realizar un análisis microscópico de secciones muy finas con la finalidad de estudiar la estructura de arenas colapsadas. Dicho procedimiento consistía en extraer una muestra de suelo no perturbado, la cual se procedió a dejar secar en un desecador con gel de sílice por varios días, se colocaba la muestra en un tubo de ensayo y se le agregaba una resina líquida mezclada, hasta cubrir el suelo, con el fin de causar la cementación líquida de la muestra.

Este ensayo fue realizado con la finalidad de demostrar que los suelos colapsables son producto de depósitos de arenas arrastradas por el viento, las cuales a su vez sufren degradaciones climáticas.

Esta teoría fue reforzada por distintos investigadores con el pasar de los años (Aitchinson en 1973, Peck, Hanson y Thorburn en 1983, Day en el 2000, entre otros), sin embargo, se demostró que los suelos colapsables también pueden ser de origen aluvial, y de formaciones de suelos residuales, como se mencionará más adelante durante el presente capítulo de este Trabajo Especial de Grado.

Das (1999), aporó una serie de criterios propuestos por diversos investigadores del área, los cuales la mayoría han sido consultados durante

la elaboración de este trabajo especial de grado, que permitirán identificar y evaluar algunos parámetros físicos de los suelos colapsables.

Dichos criterios se presentan a continuación en un orden cronológico, de manera de ir observando como ha sido la evolución de los mismos a través de los años:

- **Abeljev (1948):** Abeljev introdujo para la cuantificación numérica de la tendencia al colapso de un suelo, un concepto de colapso relativo, que se define de la siguiente manera:

$$i = \frac{\Delta e}{1 + e_i}$$

Donde: i = colapso relativo

Δe = reducción de la relación de vacíos debido al colapso, la cual se obtiene mediante el método del doble odómetro

e_i = relación de vacíos inmediatamente antes de inundar la muestra

Criterio: Si $i > 2\%$ el suelo tiende a colapso

- **Denisov (1951):** Coeficiente de hundimiento (K)

$$K = \frac{\text{Relación de vacíos en el límite líquido}}{\text{Relación de vacíos natural}}$$

Criterios:

a) $K = 0,5 - 0,75$	Muy colapsable
b) $K = 1$	Limoarcilloso no colapsable
c) $K = 1,5 - 2$	Suelos no colapsables

- Priklonski (1952):

$$K_p = \frac{\text{Contenido de agua natural} - \text{Límite plástico}}{\text{Índice de plasticidad}}$$

- Criterios:
- a) $K_p < 0$ Suelos muy colapsables
 - b) $K_p > 0,5$ Suelos no colapsables
 - c) $K_p > 1$ Suelos expansivos

- Feda (1964): $K_I = \frac{w_o - LP}{S_r \cdot IP}$

Donde, w_o = contenido de agua natural

S_r = Grado de saturación natural

LP = Límite plástico

IP = Índice de plasticidad

Para $S_r < 100 \%$, si $K_I > 0,85$ se trata de un suelo compresible

- Handy (1973): Loess de Iowa con contenido de arcilla ($< 0,002 \text{ mm}$):

- $< 16 \%$ Alta probabilidad de colapso
- 16 – 24 % Probabilidad de colapso
- 24 – 32 % Menos del 50 % de probabilidad de colapso
- $> 32 \%$ Usualmente seguro contra el colapso

Una vez conocidos estos criterios, a continuación se mencionarán algunos casos donde se han tratado los suelos colapsables, así como sus principales características, resaltando los casos donde los diversos investigadores consultados, sugirieron la utilización de los tratamientos que deben ser empleados para la disminución de riesgos bajo presencia de suelos colapsables, los cuales se mencionarán más adelante de una manera más concisa durante la elaboración del presente Trabajo de Grado.

Se comentarán seis (6) casos, los cuales servirán como antecedentes de la investigación. Los mismos se muestran a continuación:

Antecedente N° 1.- Primeramente se puede mencionar un estudio realizado en el año de 1990 en el Estado Bolívar, Venezuela, por los Ingenieros Juan Francisco Lupini (†) y José Amundaray, los cuales para la fecha, formaban parte del grupo de trabajo de una Compañía geotécnica de experticia.

Específicamente dicho trabajo consistió en el diseño de Fundaciones de tanques de almacenamiento del Proyecto SITOR de MENEVEN, S.A. en Ciudad Bolívar y Puerto Ordaz, (Ver Anexo A). Durante la ejecución de dicho trabajo, se encontraron suelos potencialmente colapsables; los mismos estaban constituidos por una sección aluvional homogénea, que consistían en arenas finas, muy limosas, ligeramente arcillosas, con finos de baja plasticidad, de densidad relativa muy suelta y color rojizo, esto debido a la presencia de óxidos de hierro.

Así mismo, el Ensayo de Penetración Estándar (SPT), arrojó un valor inferior a los 10 golpes/pie, típico para suelos colapsables, según estos autores.

Puede apreciarse a continuación en la siguiente figura (Figura 1), el comportamiento de la curva granulométrica del suelo predominante de la zona. Se observa que las partículas pasantes del tamiz 200, corroboran que el suelo de la zona estaba conformado por limos y arcillas en un porcentaje de 40 y 30% respectivamente.

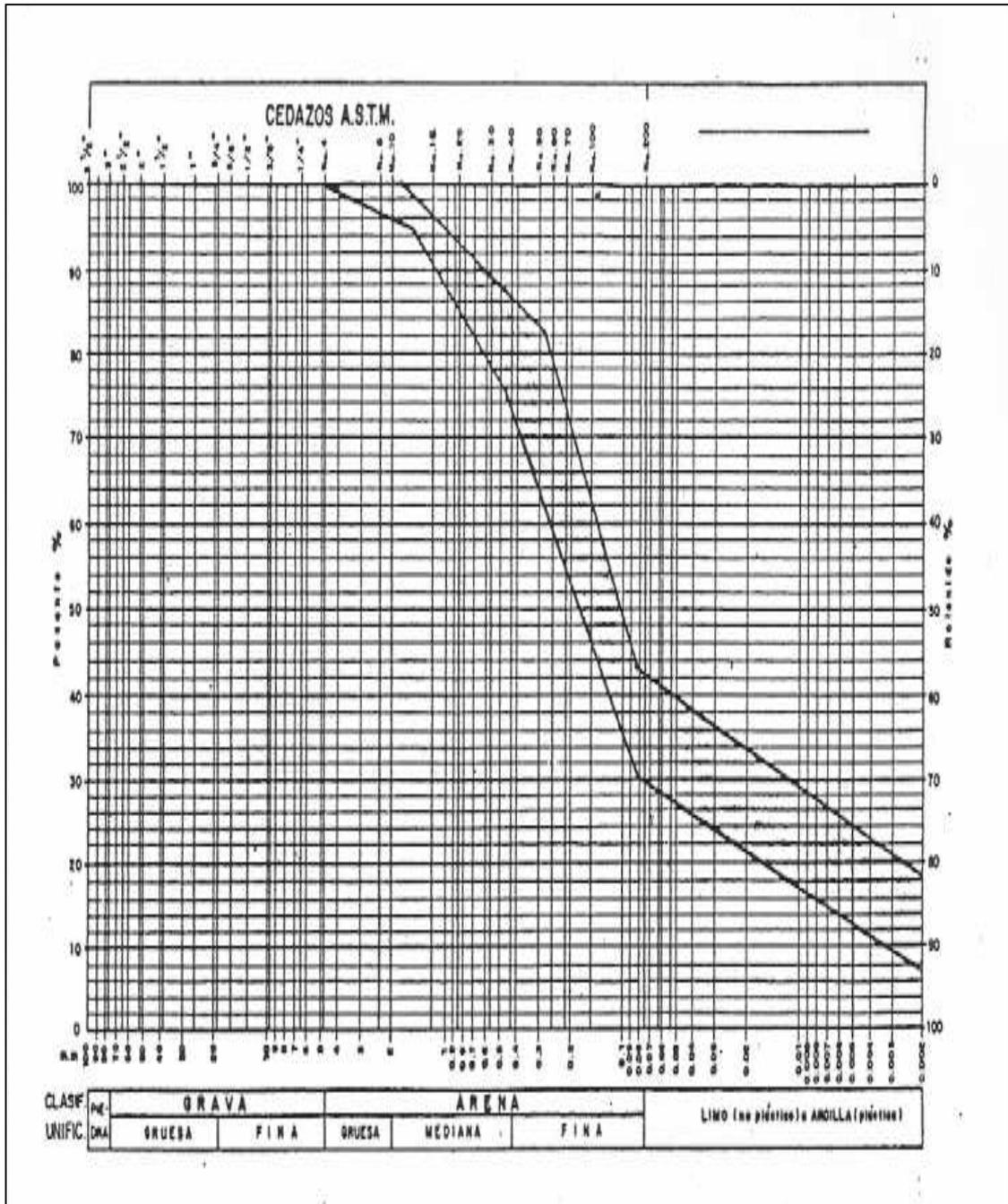


Figura 1. Curva granulometrica de suelos colapsables Proyecto Sisor Planta Ciudad Bolívar.
 Tomado de Lupini (†) y Amundaray, (1990)

Para la realización del trabajo anteriormente mencionado, Lupini (†) y Amundaray tomaron varias muestras imperturbadas a través de tubos de pared delgada (Shelby), a los cuales le realizaron ensayos de colapso, siendo medidos por la ecuación propuesta por Jennings y Knight (1975), la cual se expresa de la siguiente manera:

$$C_p = \frac{\Delta e_c}{(1 + e_o)}$$

Donde: C_p = Potencial de colapso

Δe_c = Disminución de relación de vacíos

e_o = Relación de vacíos in situ

Las muestras se dividieron en dos (2) partes, unas procedentes de Ciudad Bolívar y otras provenientes de Puerto Ordaz. Las provenientes de Ciudad Bolívar, obtuvieron valores de potencial de colapso entre 0.2 y 1.4, que según la tabla de Jennings y Knight (1975) mostrada a continuación, se evidencia que existe problemas moderados; y las muestras procedentes de Puerto Ordaz arrojaron valores de 3,3 a 7,7, es decir, suelos problemáticos.

Tabla 1. Valores indicativos del potencial de colapso

Tomado de Jennings y Knight, (1975)

Potencial de colapso C_p (%)	Severidad del problema
0 -1	No existe problema
1 – 5	Problema moderado
5 – 10	Problemático
10 – 20	Problema severo
> 20	Problema muy severo

Para la solución del problema de colapso, dichos ingenieros analizaron posibles alternativas de mejoramiento del subsuelo, entre las cuales se encontraron:

a.- Excavación y Recompactación: consiste en excavar y rellenar con el material extraído un espesor de 2 a 4 metros del material de fundación en cada tanque, debiendo alcanzar el 95% del valor máximo de la densidad seca obtenida mediante el ensayo proctor normal.

b.- Pilas de arena compactadas: este método consiste en hincar tubos de acero de punta cerrada, una vez hincados se remueve la punta y se rellena con arena, al mismo tiempo que se extrae el tubo.

c.- Precarga e Inundación: este método consiste en la precarga, mediante la utilización de terraplenes del suelo de fundación bajo toda el área del tanque, a la vez que se produce la inundación del subsuelo. Estos deben tener una altura tal, que transmitan las mismas presiones o presiones superiores a las que puedan transmitir los tanques al subsuelo.

De las alternativas mencionadas, los Ingenieros Lupini (†) y Amundaray recomendaron la primera, excavación y recompactación, por ser la más rápida y económica para los espesores a tratar. Además, a criterio de estos autores, este método es de los más recomendados cuando las profundidades de tratamiento necesario no son excesivas (entre 2 y 4 metros), como se observó en este caso.

Antecedente Nº2.- Otro caso es el del informe de Colapsabilidad de los suelos de Gurí elaborado por los Ingenieros Prusza, Liu, y Choudy, en 1977, quienes para la fecha formaban parte del grupo de trabajo de una Compañía generadora de electricidad venezolana. (Ver Anexo B)

En el Estado Bolívar, específicamente donde se encuentra la represa del Gurí, se encontraron suelos colapsables. Según el estudio de suelo realizado en la zona, dichos suelos eran de origen residual, los cuales presentaban un

color rojo claro a rojo oscuro en los primeros tres (3) metros (gneiss descompuesto).

El suelo encontrado en Gurí contiene arcilla, cuya cantidad disminuye con la profundidad desde un 38% cerca de la superficie, hasta un 14% a 18 metros de profundidad. Además la humedad y la densidad tienden a decrecer con la profundidad.

Los indicativos más importantes que confirmaban la presencia de suelos colapsables en la zona correspondían a los bajos grados de saturación (< 50%), la existencia de una estructura porosa (implica una alta relación de vacíos), siendo la principal causa del colapso, la disminución de la tensión capilar.

Antecedente Nº 3.- A continuación se mencionará otro caso, como lo es el de un Trabajo Especial de Grado asociado al fenómeno de colapso de los suelos de la Región Lacustrina al Sur-Oeste de Maracay, Estado Aragua, Venezuela, el cual fue realizado en 1987 por las Tesistas Livia Millán e Ivonne Martínez para optar al Título de Ingeniero Civil de la Universidad Central de Venezuela.

Específicamente estos suelos se encuentran en las Zona Norte, Sur y Centro de las Urbanizaciones La Punta y Mata Redonda, ubicados al Sur-Oeste de Maracay. (Ver Anexos C y D)

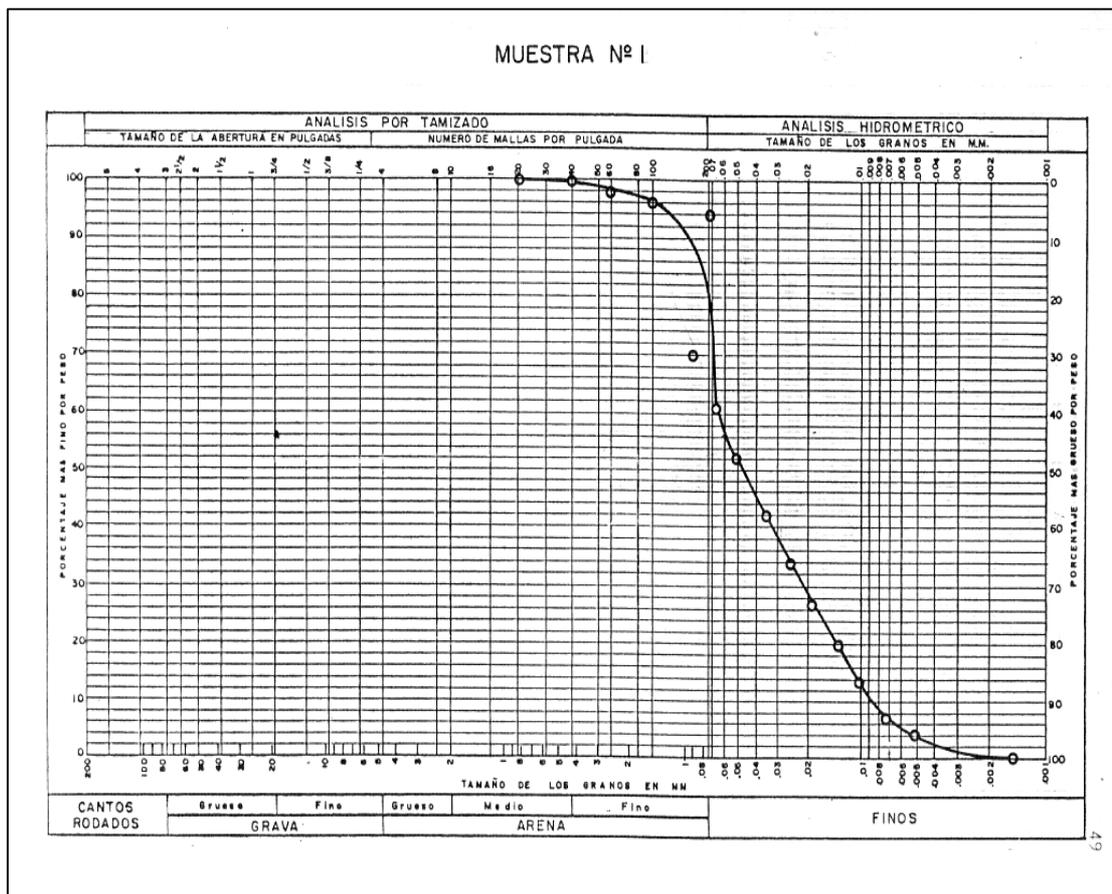
La zona en estudio está ubicada en la Cuenca del Lago de Valencia, al Norte de la Cordillera de la Costa y al Sur de la Serranía del Interior.

En dicha zona se encontraron materiales finos tales como limos y arenas finas hacia las zonas más alejadas de la desembocadura del Lago de Valencia.

Para el muestreo, las autoras realizaron varias calicatas con muestras imperturbadas y perturbadas. Dichas muestras fueron de dos (2) tipos:

- Muestras imperturbadas extraídas con tubos de pared delgada (Shelby)
- Muestras perturbadas.

Dichas muestras arrojaron como resultado, un predominio de limos orgánicos de alta compresibilidad (MH), según carta de plasticidad de casagrande. A continuación se muestra en la Figura 2, el análisis por tamizado, en el cual se podrá observar de que materiales estaba constituido dicho suelo.



Para la determinación del potencial de colapso, Martínez y Millán, utilizaron el criterio de Albejev (1948) y el de Jennings y Knight (explicado anteriormente como parte del desarrollo del Antecedente N° 1).

El criterio de Albejev de colapso se rige por un valor que se mencionará a continuación para este ensayo. El mismo se comparó con los valores de la tabla de Jennings y Knight (1975), mencionada también durante la reseña del Antecedente N°1 (Tabla N° 1).

La valoración numérica del criterio de Albejev es el siguiente, teniendo como criterio que si el valor de colapso relativo (i) > 2% el suelo tiende a colapso:

$$i = \frac{\Delta e}{(1 + e_i)}$$

Donde: i = colapso relativo

e_i = relación de vacíos inmediatamente antes de inundar

Δe = reducción de la relación de vacíos debido al colapso, la cual se obtuvo mediante el método del doble odómetro propuesto por Jennings y Knight (1975).

Para la realización del ensayo de doble odómetro, el mismo se realizó a muestras imperturbadas, utilizándose para la realización de la comparación entre los dos (2) métodos (Abeljev, y Jennings y Knight), las muestras números 1, 2 y 3.

Tabla 2. Comparación del colapso medido según Abeljev, y Jennings y Knight para una carga de inundación de 2,0 kg/cm².

Tomado de Martínez y Millán 1987

Muestra N°	% de Colapso		Diferencia Porcentual
	Abeljev	Jennings y Knight	
1	6,01	6,37	5,65
2	3,31	3,84	13,80
3	5,81	8,11	28,36

De acuerdo a los resultados arrojados por la tabla comparativa anterior, se observó que el colapso evaluado a través de los métodos de Abeljev, y de Jennings y Knight, presentaba una diferencia entre un 5 % y un 29 %, lo cual obedece a los distintos procedimientos empleados en ambos métodos. Según el criterio de Abeljev, las muestras estudiadas por Martínez y Millán, presentaron valores de $i > 2\%$, es decir, el suelo tiende a colapso. Igualmente las mismas muestras ensayadas según el criterio de Jennings y Knight, arrojaron que presentaban suelos problemáticos, es decir, entre 5 y 10%.

Como se menciona anteriormente, las muestras clasificaron como MH (Limos de alta plasticidad), salvo alguna que clasifiqué como ML (Limo de baja plasticidad), según análisis granulométrico y carta de plasticidad de Casagrande.

De la realización de este estudio, Martínez y Millán concluyeron lo siguiente:

- Existen suelos colapsables a lo largo de la zona estudiada, los cuales presentan un conjunto de propiedades comunes:

A.- Valores altos de relación de vacíos (aproximadamente 3 o más)

B.- Valores altos de Límite Líquido ($> 60\%$)

C.- Valores altos de Límite de contracción ($> 57\%$)

D.- Bajo peso unitario ($0,9 \text{ gr/cm}^3$)

E.- Bajo grado de saturación ($< 50\%$).

F.- No presentan Límite Plástico

- Observaron que el fenómeno de colapso creció a medida que se incrementaba el nivel de carga, era mayor la relación de vacíos inicial del suelo, y era menor el grado de saturación.

Finalmente se presentará una síntesis donde se especificaran los diversos resultados obtenidos por Martínez y Millán durante la aplicación de los ensayos antes mencionados en la zona de estudio, los cuales corroborarán la información suministrada previamente.

Tabla 3. Tabla representativa de valores de relación de vacíos, obtenidos según carga aplicada para cada ensayo

Tomado de Martínez y Millán, (1987).

Muestra Nº	Ensayo Nº	Condición o Carga	Valor de Rel. de vacíos
1	1	Sin sumergir	Entre 1,86 -1,98
	2	Inundada a 0,125 kg/cm ²	Entre 2,58 -3,12
	3	Inundada a 0,5 kg/cm ²	Entre 1,76 -2,42
2	1	Sin sumergir	Entre 0,78 -0,95
	2	Inundada a 0,5 kg/cm ²	Entre 0,95 -0,97
	3	Inundada a 2,0 kg/cm ²	Entre 1,0 -1,04
3	1	Sin sumergir	Entre 2,80 -3,54
	2	Inundada a 0,5 kg/cm ²	Entre 2,12 -3,98
	3	Inundada a 2,0 kg/cm ²	Entre 3,20 -3,46
4	1	Sin sumergir	Entre 3,32 -4,10
	2	Inundada a 0,5 kg/cm ²	Entre 3,22 -4,14
5	1	Inundada a 1,0 kg/cm ²	Entre 2,20 -2,44
6	1	Inundada a 1,0 kg/cm ²	Entre 1,02 -1,07
7	1	Inundada a 1,0 kg/cm ²	Entre 1,07 -1,11
8	1	Sin sumergir	Entre 2,59 -2,73
	2	Inundada a 0,5 kg/cm ²	Entre 1,77 -2,13
	3	Inundada a 2,0 kg/cm ²	Entre 1,89 -1,98
9	1	Sin sumergir	Entre 3,64 -5,01
	2	Inundada a 0,5 kg/cm ²	Entre 2,95 -4,45
	3	Inundada a 2,0 kg/cm ²	Entre 4,04 -4,28

Tabla 4. Propiedades Índices obtenidas de las diversas muestras de suelos de la región lacustrina de Maracay

Tomado de Martínez y Millán, (1987).

Muestra Nº	Peso Espec.	LL (%)	LP(%)	IP(%)	LC(%)	Clasif. S.C.U.
1	2,24	81,12	NP	NP	55,58	MH
2	2,56	57,80	35,68	22,12	34,38	MH
3	2,27	81,90	NP	NP	66,19	MH
4	2,25	64,91	NP	NP	57,96	MH
5	2,19	70,28	NP	NP	58,97	MH
6	2,65	51,00	28,48	22,52	25,30	MH – CH
7	2,66	35,55	NP	NP	24,43	ML
8	2,39	76,50	NP	NP	65,33	MH
9	2,26	92,40	NP	NP	68,20	MH

Tabla 5. Tabla representativa de los valores del índice de Colapso, obtenidos según ensayos de carga realizados a cada muestra estudiada Tomado de Martínez y Millán, 1987.

Muestra	Índice de Colapso (%)		
	1 kg/cm ²	2 kg/cm ²	4 kg/cm ²
1	0,90	10,61	20
3	3,19	6,37	6,53
4	4,21	7,74	9,03
8	2,17	3,84	6,39
9	4,17	8,11	9,53

Antecedente N° 4.- Se puede mencionar un Estudio geotécnico realizado en la Refinería de Jose (Ver Anexo E), ubicada en el Estado Anzoátegui por los Ingenieros José Amundaray y René Beltrán en el año 2004, el cual fue llevado a cabo como Trabajo Especial de Grado por el Ingeniero Silvio Carrillo en el año 2005 para optar al grado de Especialista en Ingeniería Geotécnica

Los diversos ensayos realizados a muestras de suelo de la zona por los Ingenieros Amundaray y Beltrán, arrojaron que los suelos colapsables encontrados en Jose eran de origen aluvional, formados por movimientos de

masas en forma de flujos, inducidos por las intensas precipitaciones típicas de la región.

La zona en estudio se encuentra ubicada en la Serranía del Interior Oriental de Venezuela que comienza en la Depresión de Unare al Este de Barcelona, la cual está cubierta por sedimentos depositados sobre las Formaciones Quebradón y Quiamare, la cual podrá observarse en la siguiente figura (Figura 3):



Figura 3. Extensión Geográfica de las Formaciones Quebradón y Quaimare.

Tomado de Carrillo, (2005).

Los depósitos de suelo colapsable encontrado en Jose por los Ingenieros Amundaray y Beltrán, eran de origen natural, sedimentario, del tipo aluvial.

Otra de las características que estos suelos presentaban, es que eran suelos de baja densidad y poseían una alta relación de vacíos (aproximadamente valores entre 2,5 y 4) parcialmente saturados, encontrándose en dicha zona, espesores de suelos colapsables de hasta seis (6) metros de profundidad.

Dentro de los ensayos realizados por Amundaray y Beltrán en este estudio geotécnico, se encuentra el ensayo de SPT, dando la resistencia a la penetración de estos ensayos, inferiores a 10 golpes/pie, ya que por lo general, estos son suelos muy blandos.

Como nota importante del estudio realizado por Amundaray y Beltrán, concluyeron que no debe utilizarse inyección de agua, ni tampoco tuberías de forro hincada, esto con la finalidad de evitar que el suelo a ser muestreado colapse previamente a la realización del ensayo SPT.

El efecto de colapso prematuro durante la realización del ensayo de SPT se observa en la siguiente figura (Figura 4). Esto debido a que se realizo el ensayo a muestras secas y muestras con inyección de agua.

Se observa claramente que las muestras secas arrojaron una resistencia al número de golpes, por lo general inferiores a 10 golpes/pie, corroborando el valor mencionado con la información dada durante el desarrollo del antecedente N° 1 para suelos colapsables. En las muestras realizadas con inyección de agua, las mismas aumentaban considerablemente ya que colapsaban antes de la realización de dicho ensayo. Se observa también que el número de golpes para ambas muestras aumentaba a medida que aumentaba la profundidad de la penetración.

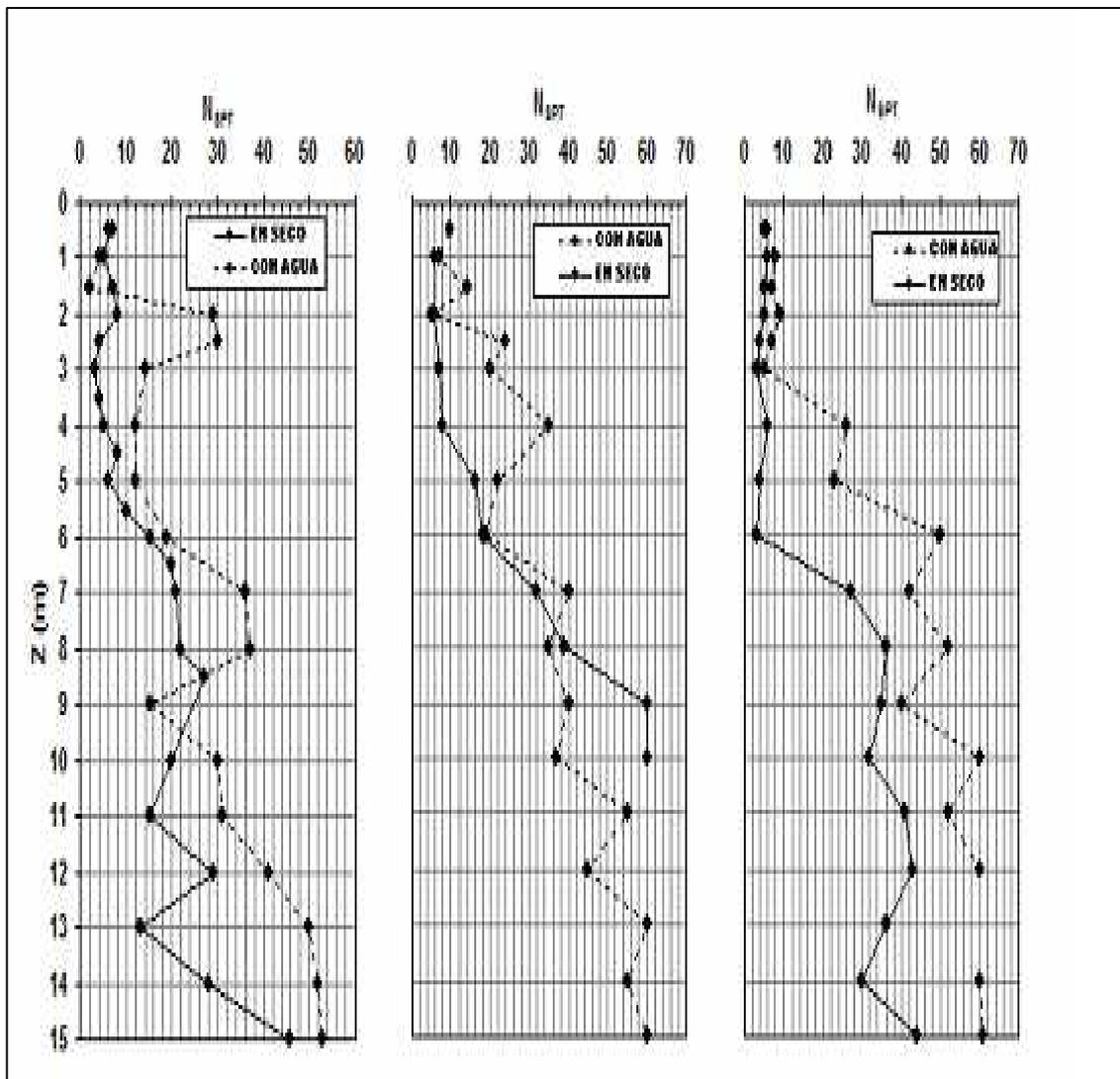


Figura 4. Comparación de valores de resistencia a la penetración del ensayo SPT realizado con muestras secas y con inyección de agua. Tomado de Amundaray y Beltrán, (2004).

En la siguiente figura (Figura 5), se presenta la tendencia de las curvas granulométricas obtenidas de las muestras que fueron utilizadas para realizar ensayos de colapso, que como bien puede observarse, la banda de granulometrías está bien definida. La misma, muestra los porcentajes de arena fina, limo, y arcilla. Los ensayos de clasificación son muy útiles para la

identificación de suelos colapsables, ya que por ser éstos muy homogéneos, pueden ser utilizados como guía de comparación cuando se sospeche de la presencia de suelos colapsables.

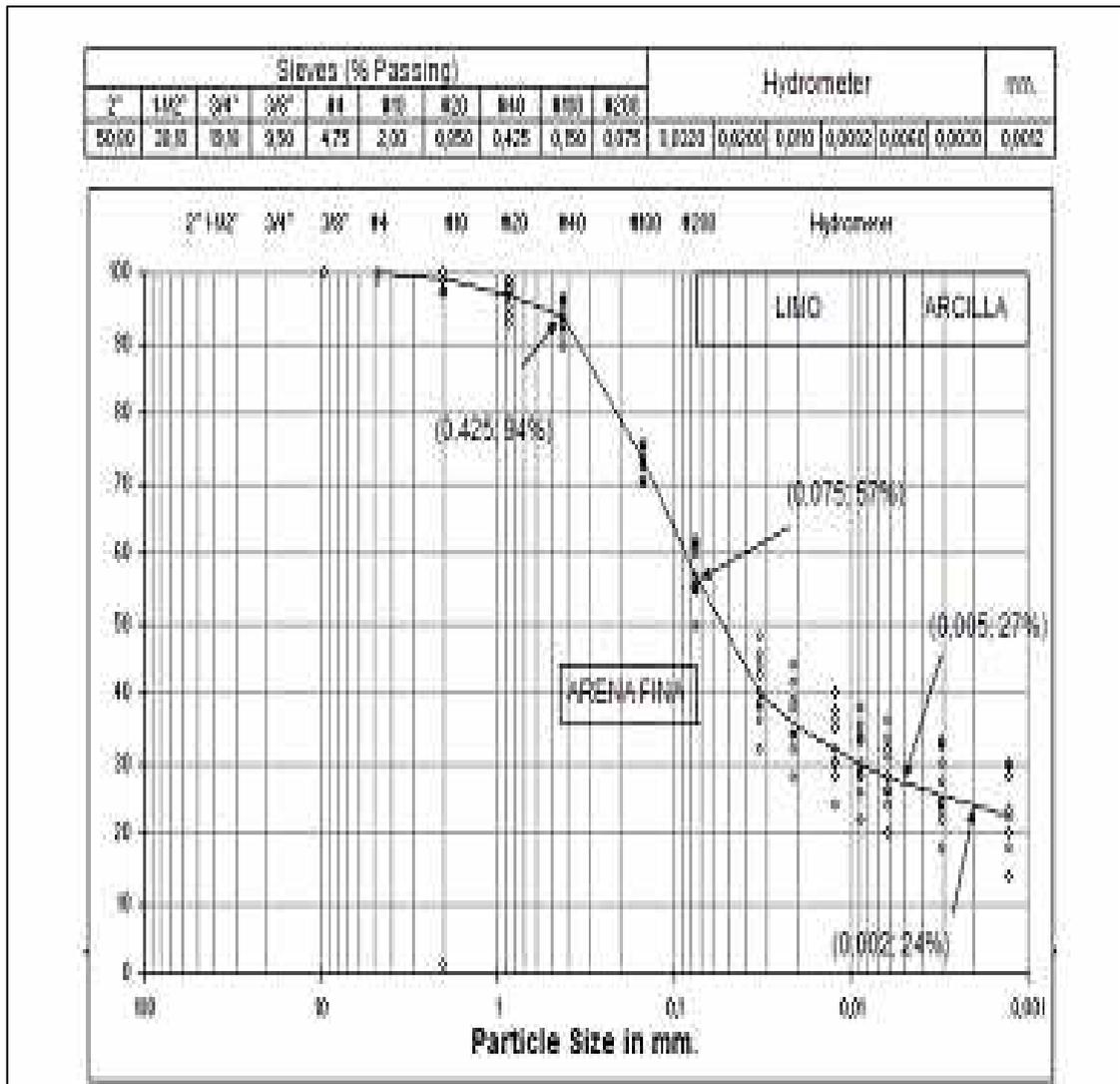


Figura 5: Curva granulométrica de tendencia promedio de suelos colapsables de Jose.
Tomado de Amundaray y Beltrán, (2004).

El “Método del Ensayo Estándar para la medición del Potencial de Colapso de los Suelos” fue el implementado por los Ingenieros Amundaray y Beltrán para determinar el potencial de colapso de los suelos de Jose, el cual esta contemplado en la Norma “A.S.T.M. D-5333” del año 1992 (reaprobado en el año 1996 y vigente actualmente). Este procedimiento es muy similar al de Jennings y Knight (1975), mencionado anteriormente y se expresa de la siguiente manera:

$$I_c = \frac{(\Delta h)}{(h_o)} * 100$$

Donde: Δh = descenso de altura de la muestra después de inundada, se expresa en milímetros (mm)

h_o = altura inicial de muestra (mm)

I_c = Índice de colapso

El potencial de colapso (I_c), es usado para la estimación de asentamientos que pudieran ocurrir en un estrato de suelo, en un sitio determinado, bajo una carga vertical específica.

De este ensayo aplicado a muestras imperturbadas, Amundaray y Beltrán obtuvieron valores de (I_c) entre 0 y 20 % , que según la tabla de Knight y Jennings (Tabla N° 1), presentan colapso moderado (2,1 - 6), colapso moderadamente severo (6,1 – 10) y colapso severo (> 10).

Amundaray y Beltrán pudieron concluir como parte de este estudio geotécnico que los resultados de pruebas de ensayo en sitio corroboran las magnitudes de colapso obtenidas en laboratorio y validan la aplicabilidad del ensayo de laboratorio para reproducir la ocurrencia del colapso en el sitio.

Antecedente Nº 5.- Se puede mencionar también el caso de la Construcción de una Central de una compañía telefónica venezolana, ubicada en Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela, Sector Los Olivos en el año de 1972, realizado por la Compañía Ingeniería de Suelos.S.A.

Durante la construcción de dicha Central, dicha compañía encargada del estudio de suelo en la zona, encontró arena fina a media, limosa, de baja plasticidad, de color marrón rojizo típico de la zona de Maracaibo. Se tomaron varias muestras a las cuales esta compañía le realizó diversos ensayos. Entre los ensayos realizados esta el “Ensayo de colapso bajo la carga media del cimiento” encontrando que la arena soporta cierta carga con asentamientos bajos, pero cuando se humedece, se comporta como un suelo colapsable y sufre un asentamiento apreciable.

Como parte del diseño estructural de dicha central, se puede mencionar que como las vigas de riostra son autoportantes, el descenso por humedecimiento superficial del suelo (tuberías, cloacas, entre otros), afectaría sólo a los pisos de Planta Baja, lo que podía evitarse usando una placa estructural, teniendo en cuenta que la Central es de dos (2) plantas.

Dada la alta permeabilidad de estos suelos, el riesgo de humedecimiento superficial siempre va a estar presente. Es por esta razón que la compañía para evitar esta posibilidad, empleo pilotes en lugar de fundaciones directas. Dadas las características del suelo y la ausencia de nivel freático, resulto muy fácil excavar pilotes con máquina rotativa hasta una profundidad suficiente, con el propósito de asegurar su soporte.

Las conclusiones presentadas por la compañía durante la realización de este estudio fueron las siguientes:

- Diseñar la Planta Baja como placa estructural con todas las cargas transmitidas a las fundaciones
- Fundar la estructura sobre pilotes excavados con máquina rotativa con las siguientes características:

a.- Longitud mínima de cada pilote fue de 10 metros contados desde la superficie, teniendo en cuenta que se encontraron espesores de suelos colapsables hasta de 10 metros de profundidad.

b.- Diseñar con cargas de trabajo de:

Tabla 6. Tabla representativa de valores de cargas aplicadas, según el diámetro del pilote a utilizar.

Tomado de Ingeniería de Suelos.S.A, (1972).

Diámetro del pilote (cm)	Carga de Trabajo aplicada (Ton)
45	50
65	100
80	150

Antecedente Nº 6.- Un caso histórico de estabilización de suelos colapsables, utilizando el método de compactación dinámica, fue el realizado por Lutenegger en el año de 1986. El reportó el uso de dicho método para estabilizar un grueso estrato de loess desmenuzable antes de la construcción de una cimentación, ubicado en Russe, (Bulgaria), el cual estaba compuesto por limos de baja plasticidad y arcillas limosas. Durante la exploración del terreno, el nivel freático no se encontró a una profundidad menor de 33 pies (10 metros), y el contenido de agua natural estaba por debajo del valor del límite plástico encontrado en la zona.

El procedimiento utilizado consistió en excavar la capa superior del material loesico de 5,6 pies (1,7 metros), utilizando un pizón de concreto de 15 toneladas como martillo, el cual se dejo caer de 7 a 12 veces a una distancia vertical de 8,2 pies (2,5 metros). Previamente se realizaron

mediciones de densidad seca; el incremento de la misma y de la resistencia a la penetración estándar, muestra que la compactación dinámica se usa con éxito para la estabilización de suelos colapsables.

2.2 SUELOS COLAPSABLES

2.2.1 Definición de Suelos Colapsables: muchas veces los ingenieros civiles y geotécnicos se encuentran en campo con suelos no saturados, los cuales al saturarse experimentan un gran cambio en su volumen, condición que hace que la estructura del suelo colapse. El tipo de suelo que presenta esta condición, se denomina suelo colapsable o también metaestable, ya que el suelo se encuentra en varios estados de equilibrio.

Si se quiere conocer el significado de suelos colapsables, se debe resaltar que la mayoría de los autores consultados comparten básicamente el mismo significado cuando se refieren a los suelos colapsables. A continuación se darán diversas definiciones de suelos colapsables según distintos autores:

- Según Uriel y Serrano (1974), *“los suelos colapsables son aquellos suelos, en que un aumento en el contenido de humedad, provoca una brusca disminución de volumen, sin la necesidad de un aumento en la presión aplicada”*. (P.332).

- Según Clemence y Finbarr (1981), *“los suelos colapsables también llamados metaestables, pueden ser definidos como cualquier suelo parcialmente saturado que experimenta un reacomodo drástico de sus partículas y una gran pérdida de volumen cuando se somete a humedecimiento, con o sin la aplicación de cargas externas”*. (P.309).

- Según Das (1999), *“los suelos colapsables son suelos no saturados que sufren un gran cambio de volumen al saturarse. Este cambio puede o no ser el resultado de la aplicación de carga adicional”*. (P.728).

- Según Day (2000), *“se define al suelo colapsable como aquel suelo que es susceptible a una gran y repentina reducción de volumen cuando se somete a humedecimiento”*. (P.9.15)

- Según Amundaray y Beltrán (2004), *“los suelos colapsables son suelos de baja densidad y alta relación de vacíos, parcialmente saturados, que presentan una ligera cementación y experimentan drásticas reducciones de volumen bajo la acción de saturación con agua, sin la necesidad de incremento de cargas externas”*. (P.2).

- Según Carrillo (2005), *“los suelos colapsables son suelos parcialmente saturados que presentan una estructura abierta compuesta por una fracción granular unida entre sí a través de materiales cementantes o conectores (sales, partículas de arcilla, carbonatos y silicatos), que forman una masa macroporosa de baja densidad y alta relación de vacíos”*. (P.3).

Se puede observar que existe una tendencia por parte de la mayoría de los autores consultados, en coincidir que el fenómeno del colapso se debe principalmente a la saturación del suelo, la cual conlleva a una brusca disminución de volumen de la estructura del suelo cuando el mismo es sometido a humedecimiento.

2.2.2 Estructura típica de los Suelos Colapsables: el término estructura está referido a la distribución y orientación del conjunto de las partículas sólidas del suelo.

Para Carrillo (2005), los suelos colapsables presentan una estructura hueca compuesta por una fracción granular unida entre sí a través de materiales cementantes (sales, partículas de arcilla, carbonatos y silicatos), que forman una masa macroporosa de baja densidad y alta relación de vacíos.

Según Ríos y Ospina (1984), por lo general estos suelos suelen ser de granos redondeados y su tamaño está en el orden de las micras (equivalente a la millonésima parte de un metro), tal es el caso de limos y arcillas, los cuales constituyen un alto porcentaje, aunque a veces se encuentran cantidades importantes de granos mayores correspondientes a gravas y arenas.

Barrera (2002), señala que la estructura interna que presentan los suelos es un aspecto de gran importancia en el comportamiento mecánico de estos. Por ejemplo, bajo las mismas condiciones de carga para un suelo con estructura abierta (macroporosa), se produce un colapso durante el humedecimiento del suelo.

Actualmente se considera la estructura interna del suelo de forma simplificada, teniendo en cuenta tres (3) tipos de elementos:

a.- Microestructura matricial con algunas partículas de arena: cuando las partículas elementales se distribuyen de forma homogénea, se considera una estructura de tipo matricial, con granos de arena rodeados de partículas arcillosas creando una matriz. En este arreglo existen poros intramatriciales.

b.- Microestructura de agregados de partículas elementales: a veces las partículas elementales están agrupadas como si fueran un grano de tamaño mayor y pueden estar o no en contacto con los granos de arena. En este caso se dice que hay una microestructura de agregados.

c.- Microestructura con matriz de arena y conectores de arcilla: es una estructura de granos de arena con conectores de arcilla entre los granos, o contactos directos sin partículas de arcilla.

Los suelos que tienen tendencia a colapsar, suelen presentar microestructura de agregados, o con conectores de arcilla.

Los suelos de estructura matricial cuando se mojan, se hinchan debido al aumento de volumen de las partículas de arcilla que constituyen la matriz. Del mismo modo, cuando se les somete a un aumento de succión reducen su volumen. Este último fenómeno no se produce en forma tan marcada en suelos con estructura de agregados, ya que al aumentar la succión, también se incrementa la resistencia de los contactos entre agregados, pero la estructura no retrae, y la variación de volumen global es pequeña.

A continuación se mostrará una figura (Figura 6), la cual establece los tres (3) tipos de microestructuras fundamentales que simplifican el conjunto de todas las estructuras posibles:

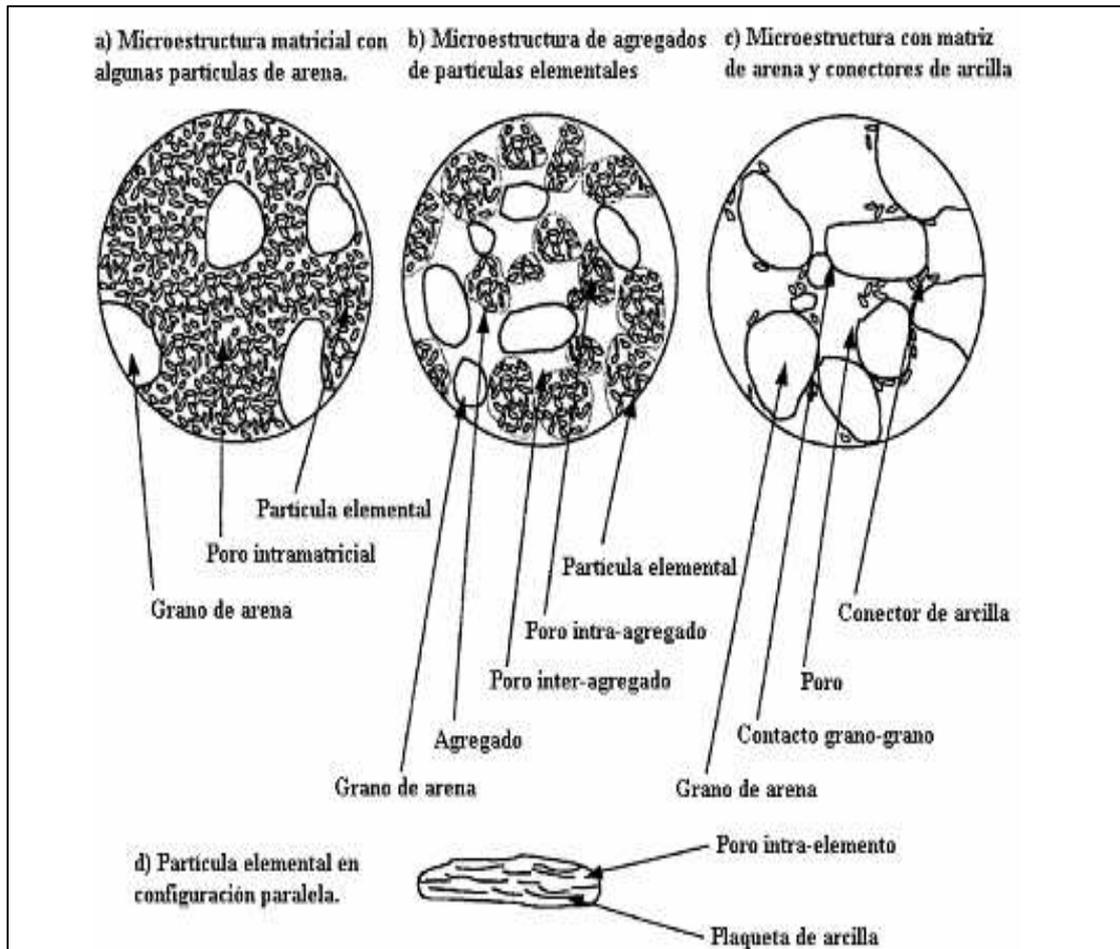


Figura 6: Estructura típica de los suelos colapsables.
Tomado de Barrera (2002)

2.2.3 Características Físicas de los Suelos Colapsables: las características de los suelos colapsables dependen de la estructura que pueden presentar. Reginatto (1971), menciona que algunas de las características físicas más relevantes que pueden destacarse de los suelos colapsables son las siguientes:

- Estructura macroporosa (muchas veces debido a la presencia de raíces vegetales o insectos), con relación de vacíos entre relativamente alto a muy alto (entre 2 y 5), es decir, gran volumen de espacios vacíos, donde las partículas menores se mantienen en equilibrio meta-estable por la presencia de un vínculo que es capaz de ofrecer al suelo una resistencia adicional temporal, proveniente de las tensiones capilares, fuerzas electromagnéticas de superficie y la presencia de sustancias cementantes, como óxido de hierro y carbonatos.
- Granulometría predominantemente fina y uniforme (predominan limos, arenas y arcillas), es decir, más del 50 % pasa el tamiz 200, siendo la cantidad de arcilla relativamente escasa, sin embargo posee una influencia importante en el comportamiento mecánico de la estructura intergranular.
- Estructura mal gradada, con partículas de mayor tamaño separadas por espacios abiertos y unidas entre sí por acumulaciones de material predominantemente arcilloso
- Bajo contenido de humedad, menor que el correspondiente a la saturación

Según Reginatto, el fenómeno del colapso puede presentarse en gran variedad de suelos (eólicos, depósitos aluviales, rellenos y formaciones de suelos residuales) y bajo ciertas condiciones tales como: Origen geológico, naturaleza de las partículas, factores climáticos, presencia de agentes químicos, tipo de agente cementante, entre otros.

¿Cómo se reconoce que un suelo ha sufrido colapso? Cuando este disminuye rápidamente su volumen. Sin embargo, dicho fenómeno también se puede producir cuando el suelo aumenta cualquiera de los siguientes factores: contenido de humedad, el cual provoca una brusca disminución de volumen sin la necesidad de un aumento en la presión aplicada, grado de saturación, tensión de corte, incremento de la presión de poros, la cual produce un gran cambio volumétrico lo que origina el agotamiento de la

resistencia al corte del suelo, o bien, al aplicársele una carga al suelo, el mismo se inunda o sufre un asentamiento repentino.

Además Reginatto agrega que el fenómeno de colapso tiene lugar en algunos suelos que, con bajo contenido de humedad (aproximadamente entre 2 y 10 %), estando cargados con presiones de cierta magnitud, al aumentar la humedad por encima de un cierto límite, en un breve tiempo sufren una brusca y marcada disminución de volumen.

Para Ríos y Ospina (1984), solo ciertos grupos de suelos son susceptibles al colapso. La presencia de este fenómeno se traduce a una pérdida brusca de volumen causada generalmente por la absorción de una gran cantidad de agua, así como, un desmoronamiento de su estructura interna y una rápida pérdida de su resistencia.

Para Jiménez Salas (1975), la magnitud del fenómeno es mayor a medida que el grado de saturación disminuye.

2.2.4 Causas que originan la aparición del fenómeno de colapso de un suelo: las causas que originan el colapso de un suelo son muy variadas, sin embargo la mayoría de los autores que han tratado sobre el tema (Jennings y Knight, Uriel y Serrano, Clemence y Finbarr, Day, Das, Amundaray y Beltrán, entre otros), coinciden en que el fenómeno se debe principalmente a la saturación del suelo.

Según Ferrero y Reginatto (1973), diversos criterios han sido establecidos para predecir que un suelo sea susceptible a colapso bajo saturación. La mayoría de esos criterios se basan más bien en relaciones simples entre diversos parámetros físicos de suelo, tales como relación de vacíos, contenido de humedad, grado de saturación, límites de Atterberg, densidad, entre otros.

Para Ríos y Ospina (1984), la influencia que tiene la estructura del suelo en la aparición del colapso no debe obviarse, a pesar de no ser una causa directa del fenómeno. Para que el colapso ocurra, el suelo debe tener una

estructura que tienda por ella misma a sufrir de colapso en función del tipo y cantidad de los materiales presentes, tamaño y forma de los granos, relación de vacíos, entre otros. A continuación se explicara cada uno de los parámetros mencionados anteriormente para poder comprender de una manera más detallada y concisa, las causas que origina el colapso de un suelo:

2.2.4.1 Relación de vacíos: según Ríos y Ospina (1984), de los distintos parámetros nombrados anteriormente, se tiene que la relación de vacíos es un factor que ayuda en la identificación de la estructura del suelo, aunque ésta debe ser confinada por otros valores debido a que suelos diferentes pueden tener igual relación de vacíos. La relación de vacíos puede definirse como la medida del volumen de los vacíos con respecto al volumen de las partículas sólidas, invariablemente expresado como un número.

La expresión utilizada para el cálculo de la relación de vacíos es la siguiente:

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Donde: e = Relación de vacíos

V_v = Volumen de vacíos

V_s = Volumen de sólidos

Peck, Hanson y Thorburn (1983), indican que estos términos utilizados en la medición de la relación de vacíos es importante, ya que nos indican si el suelo es poroso, o si por lo contrario el suelo está bien denso.

2.2.4.2 Contenido de humedad: según Carrilo (2005), el contenido de humedad y el grado de saturación inicial son variables cruciales en el comportamiento colapsable del suelo, por cuanto un suelo que tiene tendencia a colapsar, en general es estable mientras el grado de saturación es inferior a un valor crítico (Ver valores de la Tabla N° 7), a partir del cual el incremento del contenido de humedad puede debilitar suficientemente los enlaces existentes como para que se produzcan deslizamientos tangenciales en los contactos entre partículas.

2.2.4.3 Grado de saturación: como se pudo observar cuando se definió el significado de suelos colapsables según diversos autores consultados para la realización de este Trabajo Especial de Grado, tales como: Day, Uriel y Serrano, Das, Carrillo, entre otros, los cuales coincidieron que el fenómeno del colapso se debe principalmente a la saturación del suelo (alto nivel del grado de saturación que influye notablemente en el colapso de un suelo), la cual conlleva a una brusca disminución de volumen de la estructura del mismo cuando es sometido a humedecimiento.

Según López Corral (1978), la magnitud del fenómeno se hace mayor en la misma medida en que el grado de saturación del suelo se encuentre por debajo del 100 %. Se ha llegado a hablar de un valor crítico del grado de saturación para cada tipo de suelo, por debajo del cual el colapso puede ocurrir. Si el valor del grado de saturación supera ese valor crítico, el colapso ocurrirá solo si se somete al suelo a una carga adicional y a la vez se incrementa su contenido de humedad.

A continuación se mostrará una tabla la cual arroja algunos valores (en porcentaje) de grado de saturación crítico para distintos tipos de suelo:

Tabla 7. Valores críticos de grado de saturación para distintos tipos de suelo para que ocurra el colapso crítico.

Tomado de Dudley, (1970).

Tipo de suelo	Valor crítico de saturación (%)
Arena arcillosa	46-51
Arena limosa	61
Gravas finas	6-10
Arenas finas limosas	50-60
Limos arcillosos	90-95
Arenas	69

El valor del grado de saturación crítico, crece en forma inversa al tamaño de las partículas. Adicionalmente, Dudley (1970), indica que el máximo colapso ó colapso crítico, se consigue con valores del contenido de humedad entre 13 % y 39 % para los suelos colapsables.

2.2.4.4 Límites de Atterberg: los límites de Atteberg son en la actualidad una de las determinaciones que con más profusión se practican en los laboratorios de Mecánica de Suelos. Su utilidad deriva de que gracias a la experiencia acumulada en muchas determinaciones, es suficiente conocer sus valores para poderse dar una idea bastante clara del tipo de suelo y sus propiedades. Pertencen conjuntamente con el análisis granulométrico, al tipo de ensayos de identificación de suelos. Si el análisis granulométrico nos permite conocer la magnitud cuantitativa de la fracción fina, los límites de Atteberg nos indican su calidad, completando así el contenido del suelo. (Jiménez Salas, 1954).

2.2.4.5 Límite Líquido: el límite líquido se determina por medio de la Copa de Casagrande, y se define como el contenido de humedad con el cual se cierra una ranura de 12,7 mm mediante 25 golpes. Este valor es igual al contenido de humedad en el que el suelo cambia de estado líquido a estado plástico. (Carrillo, 2005).

Los materiales granulares poseen límites líquidos bajos o pueden no presentarlo. Los suelos de límite líquido elevado son siempre de grano fino y contienen muchos minerales absorbentes de agua, siendo estos suelos, no favorables para la construcción porque generalmente son muy compresibles. (Ugas, 1985)

Ríos y Ospina (1984), agregan que como criterio rápido de identificación de un suelo potencialmente colapsable se ha utilizado el valor del límite líquido; este debe usarse como índice para realizar estudios más profundos sobre el suelo. Se dice que si el suelo presenta una relación mayor que la que adquiere al llegar al límite líquido, cuando la masa de suelo absorba agua, su resistencia bajará considerablemente aún antes de llegar al 100 % de saturación y por lo tanto el suelo colapsará. Estos poseen valores de límite líquido e índice de plasticidad muy bajos ($LL < 45$ e $IP < 25$).

2.2.4.6 Límite plástico: Carrillo (2005), define el límite plástico como el mínimo contenido de humedad en el cual el suelo cambia de estado plástico a semi-sólido.

La plasticidad es una característica de los suelos cohesivos que les permite sufrir deformaciones considerables de corte sin romperse, sin presentar agrietamiento en su superficie y sin sufrir cambios de volumen apreciables, contrario a los suelos colapsables, los cuales se caracterizan por presentar una disminución brusca de volumen.

El límite plástico tiene importancia práctica, ya que la manipulación del suelo y la ejecución de obras de tierra son más fáciles en ese estado. (Ugas, 1985)

2.2.4.7 Límite de contracción: Carrillo (2005), define el límite de contracción como el contenido de humedad con el cual el suelo no sufre ningún cambio adicional de volumen con la pérdida de agua. En este contenido de humedad el suelo pasa de estado semi-sólido a sólido.

Mediante el procedimiento de Casagrande se obtuvo la siguiente ecuación para su estimación:

$$W_c = 46,5 \left(\frac{W_L + 43,5}{IP + 46,5} \right) - 43,5$$

Donde IP: es el índice de plasticidad, definido como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico

WL: es el límite líquido

Wc: es el límite de contracción.

En relación a los componentes de estos suelos, debe mencionarse la influencia que tiene la fracción arcillosa.

Varios autores toman como referencia de colapso, la actividad de la arcilla, que sería igual al Índice plástico entre el porcentaje de arcilla, la cual se verá expresada en la siguiente ecuación:

$$Ac = \frac{IP}{\%C}$$

Donde: IP: Índice de Plasticidad

%C: Porcentaje de Arcilla

Ac: Actividad de la arcilla

Para comprender mejor esta relación, se agregará la siguiente tabla, la cual expresa la actividad de la arcilla en suelos colapsables y sus respectivos valores para el Índice de Plasticidad y el Porcentaje de Arcilla:

Tabla 8. Tabla representativa de la actividad de la arcilla en suelos colapsables.

Tomado de Terzaghi y Peck, (1973).

Actividad de la arcilla en suelos Colapsables	Índice Plástico	% de Arcilla
BAJA	< 18	< 15
MEDIA	15 – 28	13 - 23
ALTA	25- 41	20 - 31
MUY BAJA	> 35	> 28

Los límites plástico y líquido dependen de la cantidad y tipo de arcilla respectivamente, mientras que el índice plástico generalmente es función de la cantidad de arcilla que hay en el suelo. En general puede decirse que la mayoría de los suelos que colapsan tienen un límite líquido por debajo de 45 y un índice de plasticidad inferior a 25. (Ríos y Ospina, 1984).

2.2.4.8 Densidad del suelo: de acuerdo a Ríos y Ospina (1984), con respecto a la densidad del suelo, se dice que ésta ayuda a precisar la relación de vacíos que el suelo presenta, aunque su valor debe considerarse como una información cualitativa y no decisiva como índice del posible colapso de un suelo.

De acuerdo a López Corral (1978), usualmente el valor de la densidad seca natural de los suelos colapsables está en el orden de 1,60 gr / cm³.

2.2.4.9 Ascenso del Nivel Freático: en un suelo granular grueso saturado que se encuentra por encima del nivel freático, se puede considerar que las presiones intersticiales son prácticamente nulas, por lo tanto, el colapso se debe al debilitamiento de la estructura producida por la acción del agua. (Jiménez Salas, 1954).

2.2.4.10 Tensión Capilar: para López Corral (1978), las fuerzas capilares forman una vinculación aparente entre las partículas de suelo. Se ha comprobado que la resistencia al esfuerzo cortante entre los granos de suelo se encuentra influenciada por la tensión capilar entre ellos. Su presencia produce compresión entre los granos del suelo.

Según Dudley (1970), en muchos casos, los limos y arenas finas ubicadas por encima del nivel freático poseen una cohesión aparente debida a la tensión capilar, cuya explicación es la siguiente:

En un suelo parcialmente saturado (suelos colapsables), la interfase agua-aire en los espacios entre las partículas de suelo, da lugar a que el agua esté sometida a tensión de tal forma que en la expresión del esfuerzo efectivo ($\sigma = \sigma_t - \mu$), la presión de poros (μ) se convierte en negativa y el esfuerzo efectivo (σ) se hace mayor que el esfuerzo total (σ_t) aplicado por la carga, lo cual incrementa la resistencia aparente del suelo. Sin embargo, la adición de agua reduce éste efecto y si el suelo es poroso se produce una disminución rápida de su volumen (colapso).

Como dato importante, Dudley (1970) menciona que el valor de la presión efectiva máxima en arenas finas está en el orden de 0,14 kg/cm² y para limos no saturados está entre 0,35 y 3,5 kg/cm².

2.2.5 Origen y tipos de Suelos Colapsables: Peck et al., (1983), mencionan que la mayoría de estos suelos son de origen eólico, es decir, arenas y/o limos depositados por el viento, tales como, loess, playas eólicas, dunas y depósitos de polvo volcánico, los cuales poseen altas relaciones de vacíos,

así como, pesos específicos bajos o poco cohesivos, siendo el viento, según Sowers (1972), un agente de transporte de partículas sumamente selectivo. El viento es capaz de levantar y transportar partículas más pequeñas que la arena fina, debido a que la erosión que el produce se limita mayormente a limos secos de regiones áridas ya que los suelos cohesivos o húmedos resisten esta erosión.

Si bien se acaba de mencionar que estos suelos por lo general son de origen eólico, Day (2000), menciona que la categoría de suelos colapsables incluye la posibilidad de colapso en suelos de orígenes distintos a estos, bien sea: depósitos aluviales, rellenos y formaciones de suelos residuales.



Figura 7: Meseta de suelo loesico ubicado en China
Tomado de Asociación Internacional de Fomento (n.d).



Figura 8: Suelos loesicos ubicados en Hungría

Tomado de <<http://es.wikipedia.org/wiki/Loess>> (n.d).

En las figuras anteriores (Fig. 7 y Fig. 8), se observan formaciones de suelos colapsables de origen eólico, específicamente formaciones de loess, ubicados en China y Hungría respectivamente, los cuales fueron transportados por la acción del viento a través del tiempo por miles de años lo que originó la formación de este tipo de suelo colapsable.

A continuación se mencionarán algunos tipos de suelos colapsables más comunes que pueden encontrarse de acuerdo a diversos autores consultados:

Según Jiménez Salas (1954), entre los suelos colapsables más comunes se encuentran:

- Arcillas o limos naturalmente cementados
- Arcillas o limos yesíferos
- Arenas inestables de baja densidad
- Loess y rocas de gran porosidad

Para Aitchinson (1973), los suelos colapsables son un caso particular de suelos estructuralmente inestables, siendo para el suelos colapsables los mencionados a continuación:

- Arenas transportadas por el viento de elevada relación de vacíos, no saturadas y ligeramente cementadas
- Arenas de relación de vacíos elevadas con enlaces cementables solubles al agua, las cuales pueden colapsar bajo lixiviación.
- Suelos arenosos no saturados con una alta relación de vacíos.
- Loess pobremente cementados no saturados, los cuales son propensos al colapso bajo aplicación de carga o inundación
- Agregados de arcilla del tamaño de limos depositados por el viento no saturados, que igual que el caso anterior, colapsan bajo aplicación de carga o inundación.

2.2.5.1 Origen geológico de los suelos colapsables: según Carrillo (2005), el fenómeno de colapso desde el punto de vista geológico ocurre típicamente en los siguientes tipos de suelos:

- Suelos depositados recientemente (Holoceno, hace menos de 10.000 años).
- Suelos depositados en ambientes áridos o semiáridos.
- Suelos cuyas partículas han sido transportadas por el viento (Loess).
- Suelos pertenecientes a abanicos aluviales y/o zonas de flujo de lodos.
- Suelos depositados durante inundaciones rápidas.
- Suelos Residuales producto del intemperismo de la roca madre.
- Rellenos con material volcado, hechos por el hombre.

Conocido su origen, los suelos colapsables pueden ser:

- Naturales: Sedimentarios: (aluviales o eólicos).
Residuales.
- Artificiales

La mayoría de los suelos sedimentarios se han depositado en ambientes acuosos, quedando inicialmente saturados y posteriormente desecados debido a los factores ambientales.

Respecto a los suelos residuales, son suelos originados por la intensa y profunda descomposición de la roca matriz, bajo condiciones climáticas y biológicas que prevalece en los trópicos.

Das (1999), indica que muchos suelos colapsables son suelos residuales producto del interperismo de las rocas madre. Según Das, la mayoría de los suelos que cubren la tierra están formados por el interperismo de diferentes rocas. Este proceso produce suelos con un gran rango de tamaños de partículas.

Existen dos (2) tipos generales de interperismo: mecánico y químico:

Mecánico: el interperismo mecánico es el proceso por el cual las rocas se fracturan en piezas de menor tamaño bajo la acción de fuerzas físicas, como las corrientes de agua de los ríos, el viento, las olas oceánicas, el hielo glacial, entre otros.

Químico: el interperismo químico es el proceso de descomposición química de la roca original. En el interperismo químico, el material original puede transformarse en otro totalmente.

2.2.6 Localización de Suelos Colapsables: para Ríos y Ospina (1984), estos suelos se encuentran esparcidos por casi todo el mundo donde las condiciones ambientales y topográficas le son favorables. Si bien ya se sabe que estos son de origen eólico, los cuales han podido permanecer en esta posición porque las condiciones topográficas se lo permiten, no se encontrarán suelos colapsables en altas montañas, en taludes escarpados, es decir, taludes de gran pendiente, o en el fondo de valles donde los ríos hayan removido el suelo. Por lo general, se encuentran zonas de suelos colapsables en topografías onduladas cerca de las cimas de las ondulaciones.

2.2.7 Clima: según Das (1999), los suelos colapsables se encuentran diseminados en todo el mundo, principalmente en regiones de clima árido y semi-árido donde las sequías son muy largas y existen condiciones de desecación, en zonas donde el agua freática esta a gran profundidad, y en zonas no áridas donde existen precipitaciones intensas.

A continuación Monje Villar (1981), suministra una tabla donde se muestran algunos países que presentan suelos colapsables, conjuntamente con el clima predominante en la zona y su respectivo tipo de suelo:

Tabla 9. Tabla representativa de países que presentan suelos colapsables, con su respectivo clima y el tipo de suelo.
Tomado de Monje Villar, (1981).

Localidad	Clima	Identificación del suelo
Brasil	Húmedo (Tropical)	Arena porosa, arcilla porosa
USA	Sub-húmedo, árido y semi-árido	Loess
Angola	Semi-árido (Tropical)	Arena con pocos finos
Rusia	Sub-húmedo, Semi-árido	Loess y suelos arenosos
Kenia	Húmedo (Tropical)	Arcillas
Suráfrica	Semi-árido, Sub-húmedo (Tropical)	Arcilloso-Arenoso
Israel	Semi-árido (Tropical)	Loess, Arena arcillosa
Australia	Semi-árido (Tropical)	Arcilla arenosa
España	Semi-árido	Arcilla
Argentina	Sub-húmedo	Arcillas con carbonato y Loess
Venezuela	Semi-árido (Tropical)	Arena fina a media y suelos residuales

2.2.8 Reconocimiento del problema de colapso en campo y en laboratorio: el Ingeniero Geotécnico debe estar en la capacidad de identificar la presencia de suelos colapsables durante la exploración de campo, que a su vez le permita realizar un buen muestreo de estos y poder luego determinar mediante pruebas de laboratorio la magnitud de colapso que puede ocurrir.

Según Lupini (†) y Amundaray (1990), los suelos colapsables son relativamente fáciles de reconocer en campo durante la ejecución de perforaciones exploratorias a través de calicatas, y mediante la ejecución del ensayo SPT, debido que estos suelos se caracterizan por tener una resistencia a este ensayo generalmente inferior a 10 golpes/pie. Sin embargo, es sumamente importante realizar los trabajos de perforación en seco, pues de lo contrario se estaría induciendo el colapso del suelo a ser muestreado, y se obtendrían valores de resistencia a la penetración alterados.

Durante la exploración de campo es muy importante tomar mediciones de las densidades en sitio para luego compararlas con las obtenidas en el laboratorio.

Holtz y Hilf (1961), propusieron el uso de la densidad seca en sitio y el límite líquido como criterio para predecir si un suelo es potencialmente colapsable o no. Su método está basado en la premisa de que, cuando un suelo tiene suficiente espacios vacíos como para albergar una humedad igual o mayor a su límite líquido bajo estado de saturación, existe una susceptibilidad al colapso del suelo si éste es humedecido en campo. Si los espacios vacíos son menores que lo necesario para albergar un contenido de agua igual al límite líquido en condición saturada, entonces el colapso no ocurrirá, a menos que el suelo sea sometido a un nivel de esfuerzos mayor.

Holtz y Hilf, prepararon un gráfico para la determinación rápida de la susceptibilidad al colapso de los suelos.

En esta figura (Figura 9) se representa la densidad seca medida en sitio ($\bar{\rho}_d$) en función del límite líquido (wl) del suelo. Para la realización de este gráfico se consideró un peso específico relativo (G_s) de 2,65; siendo este valor dependiente de la composición mineralógica de las partículas que constituyen el suelo.

Para cualquier suelo, si el peso específico cae por debajo de la línea límite (parte inferior de la curva), corresponde a suelos con probabilidad de colapso.

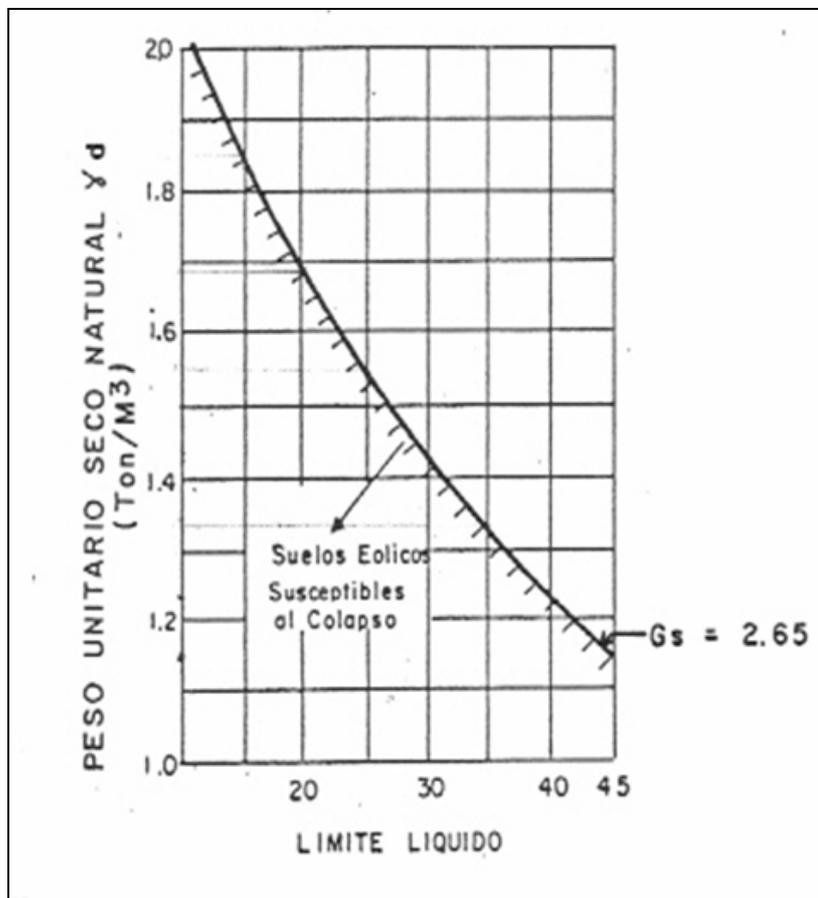


Figura 9. Suelos Eólicos susceptibles al Colapso.
Tomado de Holtz y Hilf, (1961).

2.2.8.1 Microscopio Electrónico de Barrido: Carrillo (2005), indica que mediante esta técnica de microscopía electrónica de barrido (M.E.B.) han sido tomadas micrografías de muestras de suelo con el uso de imágenes de electrones primarios. La técnica de electrones primarios permite definir mediante diferencia de contraste, las regiones o partículas que contienen elementos con número atómico diferente, donde las zonas más brillantes o claras corresponden a los compuestos más pesados (mayor número atómico) y las opacas a los livianos. El programa de ensayo a utilizar consiste en analizar las estructuras del suelo en su condición original y posterior a la ocurrencia del colapso.

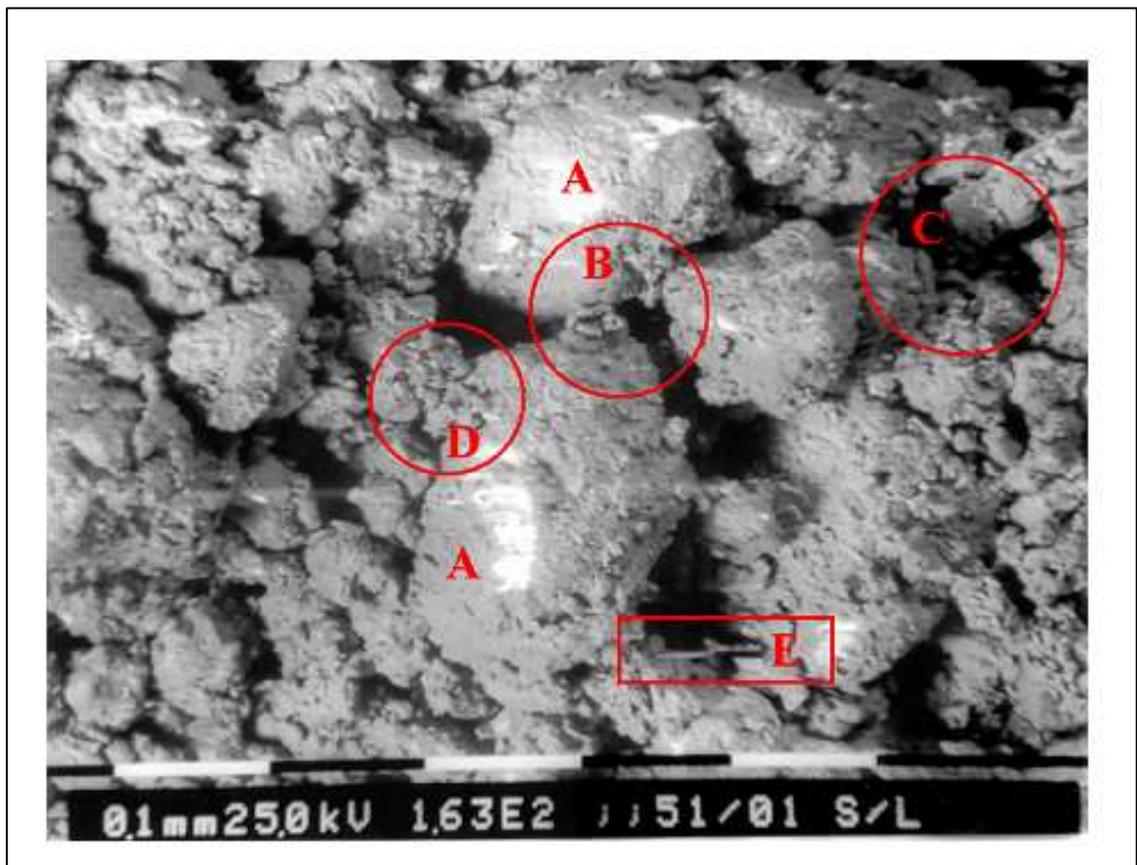


Figura 10. Micrografía de una muestra de suelo colapsable de Jose en condición natural.

Tomado de Amundaray y Beltrán, (2004).

Al observar la figura anterior, la cual fue tomada durante la realización de un Estudio Geotécnico realizado en Jose en el año 2005 por Silvio Carrillo (ver Antecedente N° 4), esta ha permitido detectar una microestructura de agregados, con distribuciones de poros bimodales. La figura se encuentra identificada con una serie de letras (de la A hasta la E), la cual nos permitirá una vez se haya descrito cada fenómeno, explicar y comentar cada uno de ellos.

La Figura 10, podemos subdividirla de la siguiente manera:

- “A” indica los granos de arena.
- “B” señala el detalle del enlace de granos de arena mediante puentes de agregados en un arreglo aplanado donde resaltan los poros inter-agregados.
- “C” (macroporos: entre granos de arena y agregados).
- “D” muestra un conjunto de agregados unidos entre sí, dejando ver poros inter-agregados del tipo microporo.
- “E” señala la presencia de una raicilla, que bien pudiera dar cuenta de una posible actividad micro-vegetal o ser un vestigio del arrastre del suelo en el proceso de conformación del estrato actual.

2.2.9 Ensayos para la identificación del colapso: existen diversos criterios para la identificación de suelos colapsables. Según López Corral (1978), existen fundamentalmente dos (2) ensayos de laboratorio para la identificación de suelos colapsables, siendo el más utilizado, el ensayo de consolidación, además del ensayo triaxial, aunque existen algunos ensayos de campo que no deben ser obviados para el estudio de los suelos colapsables, los cuales resultan más fáciles de aplicar.

2.2.9.1 Ensayo de Consolidación: según Martínez y Millán (1987), este es uno de los ensayos más apropiados para predecir el fenómeno de colapso y dar a conocer la magnitud de dicho fenómeno. Este consiste en ensayar una

muestra representativa e imperturbada con su humedad natural a un determinado nivel de carga. Para cada incremento de carga la muestra sufre una primera deformación conocida como deformación instantánea por compresión del aire y su disolución en el agua; luego, el agua de los poros es presionada y comienza un proceso de deformación por salida de agua, lo que se conoce como consolidación primaria. Después de algún tiempo, la sobrepresión estática del agua se disipa, cesa la salida del agua y el suelo alcanza un estado de equilibrio para esa carga

Ocurrida la consolidación primaria, el proceso de deformación continúa debido a fenómenos de química coloidal y de superficie. El asentamiento ocurrido durante este período de tiempo se denomina consolidación secundaria. El fenómeno se caracteriza por un marcado incremento de asentamiento al inundarse la muestra.

2.2.9.2 Ensayo Triaxial: el ensayo de compresión triaxial se realiza sobre muestras cilíndricas las cuales se someten a presiones laterales de un líquido, generalmente agua, del cual se protegen con una membrana impermeable.

Las pruebas triaxiales suministran las características de esfuerzo-deformación y resistencia de un suelo dado, para usarlos en el diseño de obras civiles de ingeniería. (Ugas, 1985).

Durante este ensayo se pueden medir los esfuerzos, las deformaciones, los cambios de volumen y la presión de poros. En la actualidad el ensayo triaxial es muy usado en la investigación de suelos colapsables.

De acuerdo a López Corral (1978), el uso de este ensayo ha ido cobrando importancia por el hecho de que pueden controlarse los esfuerzos aplicados a la muestra a ensayar.

2.2.9.3 Ensayos de campo: estos ensayos surgen como complemento de alguna información o resultado que no pudieron ser tomados en cuenta en el laboratorio. Dichos ensayos de campo deben realizarse sobre muestras imperturbadas. López Corral (1978) afirma que existen pruebas de campo muy sencillas, entre ellas tenemos:

- Se toma una muestra del tamaño de una mano procedente de una calicata; se rompe en dos (2) trozos y se corta cada uno hasta hacerlos iguales en volumen. Una muestra es mojada y moldeada en la mano hasta formar una pequeña pelota. Su volumen se compara con el trozo inalterado llevado también a forma de bola. Si es inferior se puede esperar un colapso.
- El ensayo de placa de carga que suele dar asientos mayores de los que realmente se producirán. Este se realiza cargando el suelo en forma escalonada hasta un determinado nivel, en el cual se inunda y se anota el asiento adicional que esto causa.

2.2.10 Ensayos de reconocimiento de suelo

2.2.10.1 Ensayo de Penetración Estándar (SPT): este ensayo es un método muy usado en las exploraciones de los suelos que permite determinar el espesor y estratificación de los materiales que se encuentran en el subsuelo, así como también permite conocer la resistencia a la penetración en función al número de golpes de los diferentes estratos que conforman el subsuelo a diversas profundidades.

Amundaray y Beltrán (2004), reportan que en suelos colapsables, los valores de resistencia a la penetración del ensayo SPT generalmente son inferiores a 10 golpes/pie, y advierten que la realización de dicho ensayo en sitios donde se sospeche la existencia de suelos colapsables, el mismo debe hacerse sin inyección de agua y sin hincado de tubería de forro. Con ello se evitaría que el suelo a ser muestreado colapse previo a la realización del ensayo SPT debido al humedecimiento por percolación del agua de

perforación, y que la estructura metaestable de la masa de suelo se densifique a causa de las vibraciones inducidas por el hincado del forro.

La figura 4 (Antecedente N° 4), muestra gráficos de perforación de sondeos real en sitio mediante avances tipo percusión en seco y percusión lavada, poniendo en evidencia el efecto de colapso prematuro del suelo en el avance con la utilización de agua, el cual se refleja generalmente en un incremento significativo y errático de la densidad del suelo, explicado por la estructura más compacta del suelo una vez ocurrido el colapso, pero que no es representativo de las propiedades geomecánicas in situ del suelo.

2.2.11 Ensayos de Colapso

2.2.11.1 Ensayo de colapso. Doble odómetro: Jennings y Knight (1975), desarrollaron el método del doble odómetro durante la investigación de suelos colapsables en Suráfrica con el propósito de predecir los asentamientos por colapso mediante la utilización de dos (2) pruebas llevadas a cabo sobre muestras idénticas: una al contenido de humedad natural, y otra completamente saturada.

Los resultados de las pruebas se grafican juntos, como se muestra en la Figura 11.

La distancia vertical entre las curvas representa la deformación potencial por hidrocólapsos, que es función del esfuerzo normal.

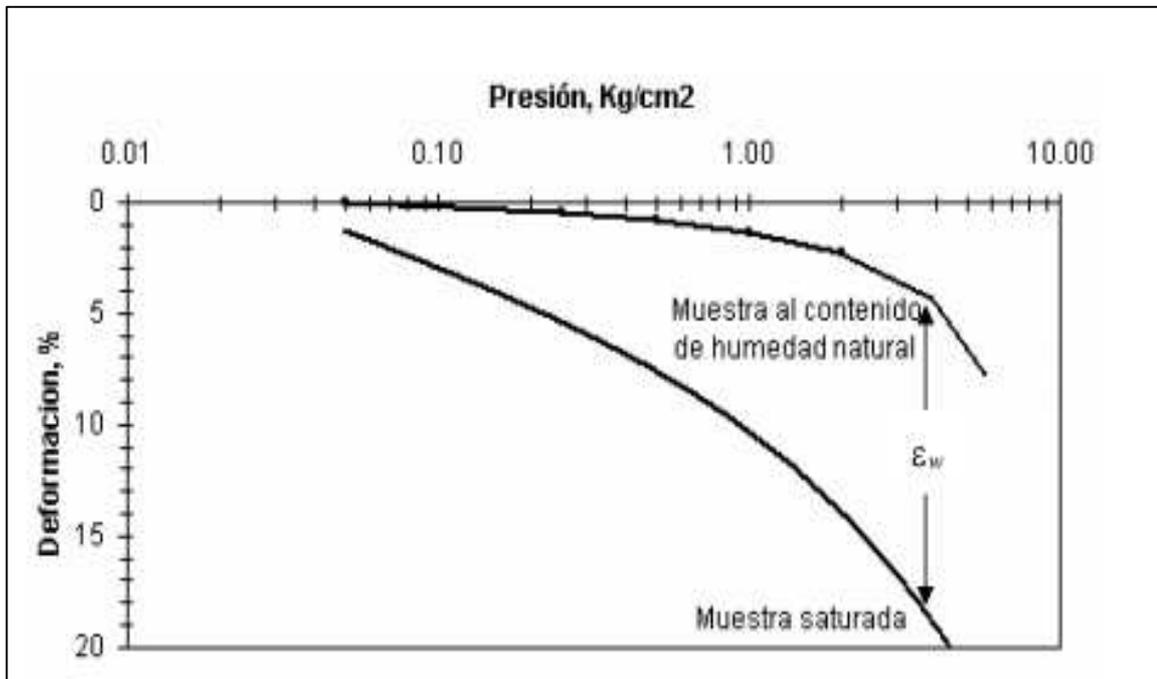


Figura 11. Resultado de una prueba de doble odómetro con muestra saturada y muestra parcialmente saturada.
Tomado de Carrillo, (2005).

2.2.11.2 Ensayo de colapso. Simple odómetro (Norma ASTM D-5333-96):

según Carrillo (2005), la prueba del simple odómetro es la más usada para evaluar el potencial de colapso. Este método requiere solo una muestra de suelo, y el procedimiento puede ser llevado a cabo entre 24 horas y 36 horas.

Este ensayo fue estandarizado bajo la designación “ASTM D-5333-96”, (el cual fue reprobado recientemente manteniéndose vigente en la actualidad) permitiendo determinar la magnitud del potencial de colapso (I_c) que puede ocurrir a un determinado esfuerzo vertical (axial), y el índice de colapso (I_e), que es el potencial de colapso determinado específicamente para un esfuerzo vertical de 200 KPa (2 Kg/cm²).

La Figura 12 muestra el resultado típico de un ensayo de simple odómetro. En dicha figura se puede observar la caída brusca de la curva al aumentar la carga (específicamente 2 kg/cm²) y al ser inundada.

Cuando se observan estos comportamientos bruscos en las gráficas de los suelos, se está en presencia de un suelo colapsable o potencialmente colapsable.

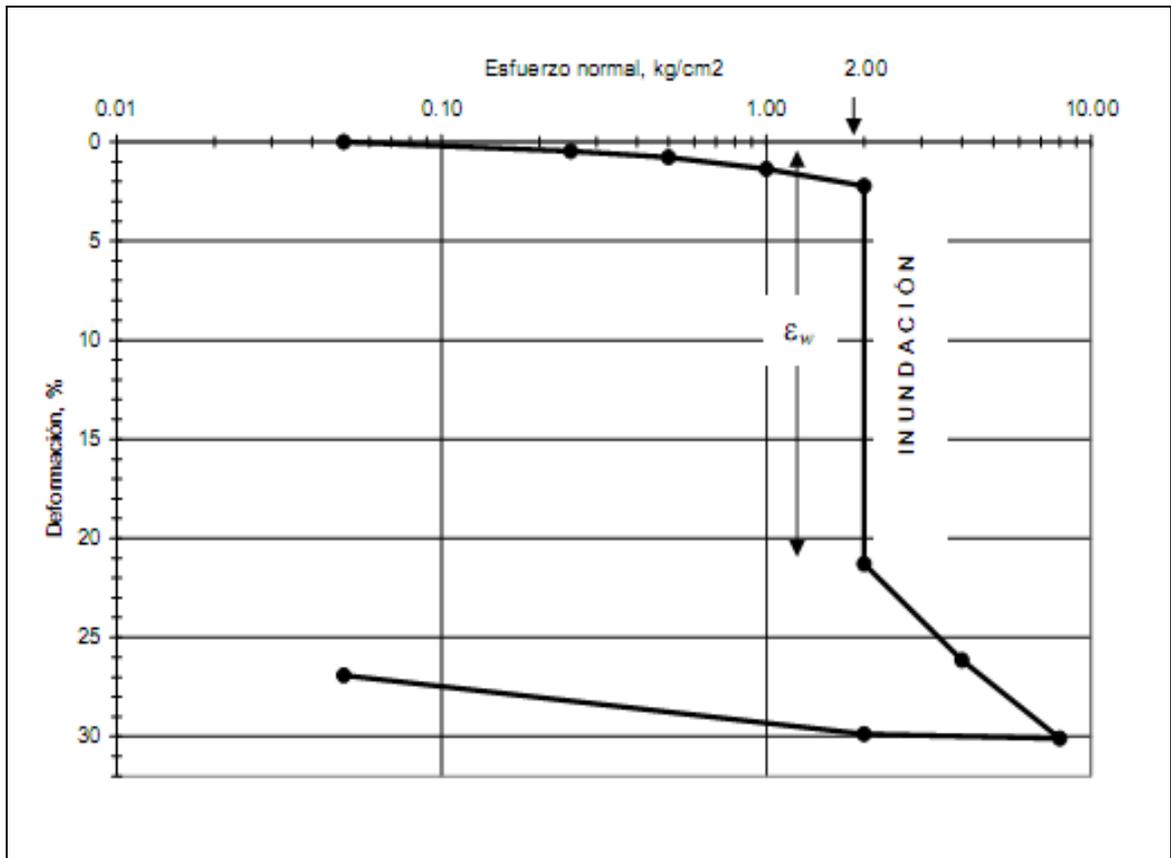


Figura 12. Resultado típico de una prueba de simple odómetro para determinar el índice de colapso.

Tomado de Carrillo, (2005).

2.2.12 Procedimiento para calcular el asentamiento debido al colapso:

existe un método para predecir los asentamientos por colapso para propósitos de diseño propuesto por Jennings y Knight (1975). Este método nos da no solo una determinación cualitativa de las posibilidades de colapso,

sino también información cuantitativa que permite hacer un estimado de la magnitud de los asentamientos por colapso.

A continuación Das (1999), explica el procedimiento de laboratorio para determinar el asentamiento de colapso de estructuras al saturarse el suelo propuesto por Jennings y Knight:

- 1.- Obtenga dos (2) muestras imperturbadas de suelo para probarlos en un aparato de pruebas de consolidación estándar (odómetro)
- 2.- Somete los dos (2) muestras a una presión de 0,15 lb/pulg² (1 kN/m²) durante 24 horas
- 3.- Después, sature una muestra inundándola. Mantenga la otra muestra con su contenido de agua natural
- 4.- Después de 24 horas de inundación, continúe con la prueba de consolidación en ambas muestras duplicando la carga hasta alcanzar el nivel de presión deseado.
- 5.- Trace las gráficas $e - \log(p)$ para ambas muestras
- 6.- Calcule la presión efectiva (p_o) in situ. Dibuje una línea vertical correspondiente a la presión (p_o)
- 7.- De la curva $e - \log(p)$ de la muestra empapada, determine la presión de preconsolidación, (p_c). Si $p_c/(p_o) = 0,8 - 1,5$, el suelo está normalmente consolidado; sin embargo si $p_c/(p_o) > 1,5$, está preconsolidado
- 8.- Determine e'_{o} , correspondiente a la p_o de la curva $e - \log(p)$ de la muestra empapada
- 9.- A través del punto (p_o, e'_{o}) dibuje una curva que sea similar a la curva $e - \log(p)$ obtenida de la muestra probada con contenido de agua natural
- 10.- Determine la presión incremental Δp , sobre el suelo causada por la construcción de la cimentación. Dibuje una línea vertical correspondiente a la presión $p_o + \Delta p$ en la curva $e - \log(p)$

11.- Ahora determine Δe_1 y Δe_2 . El asentamiento del suelo sin cambio en el contenido de agua natural es:

$$S_1 = \frac{\Delta e_1}{1 + e'_o} (H), \text{ donde } H \text{ es el espesor del suelo susceptible a colapsar}$$

Además, el asentamiento causado por el colapso de la estructura del suelo es: $S_2 = \frac{\Delta e_2}{1 + e_o'}$

En las siguientes figuras (Figura 13 y 14), se observarán dos (2) curvas correspondientes al cálculo del asentamiento por colapso. La primera de ellas (13), se presenta una muestra de suelo normalmente consolidado, y en la segunda figura (14), se presenta una muestra de suelo preconsolidado. Dichas curvas se realizaron siguiendo el procedimiento previamente mencionado.

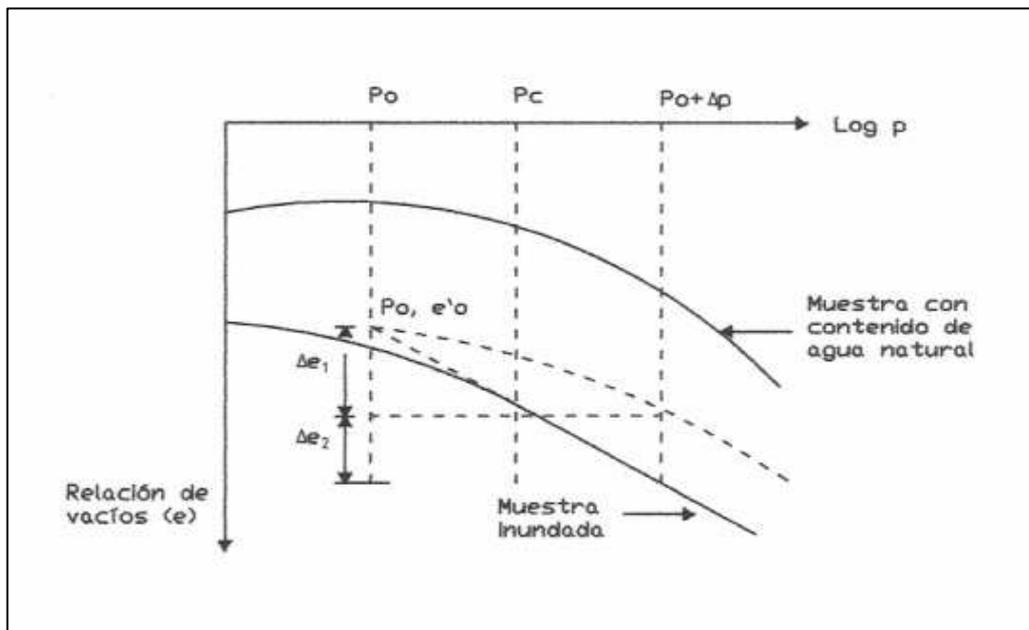


Figura 13. Cálculo del asentamiento con prueba de odómetro doble con muestra de suelo normalmente consolidado.

Tomado de Das, (1999).

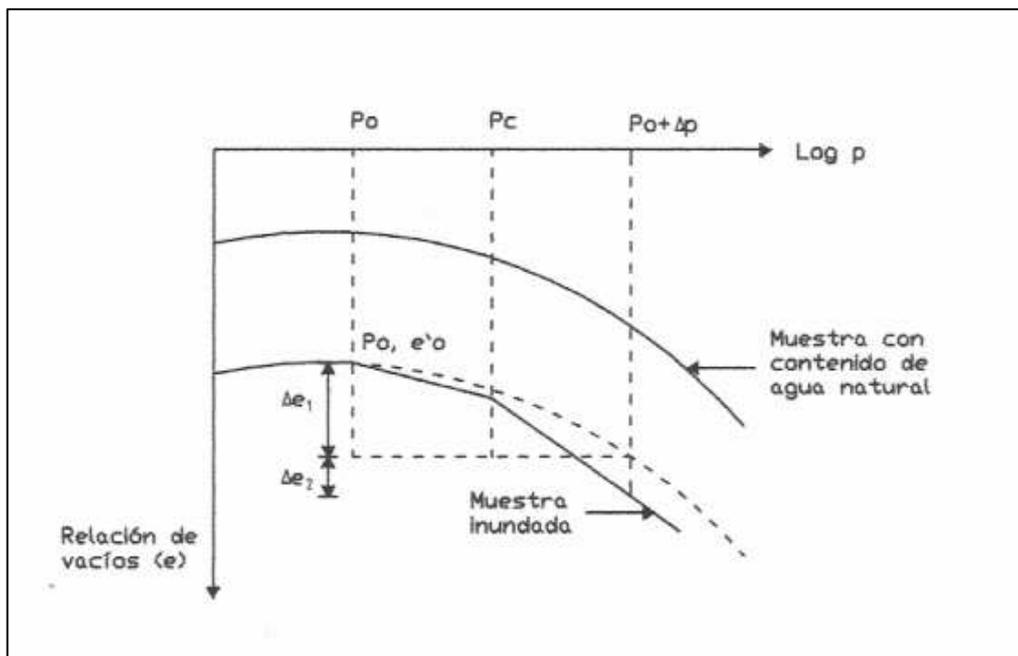


Figura 14. Cálculo del asentamiento con prueba de odómetro doble con muestra de suelo preconsolidado.
Tomado de Das, (1999).

2.3 CIMENTACIONES EN TERRENOS COLAPSABLES

Según Ríos y Ospina (1984), muchas de las actividades de los ingenieros se relacionan con la solución de problemas de cimentación en suelos difíciles, uno de estos suelos se da con mucha frecuencia en nuestro medio de trabajo: los suelos colapsables.

La causa principal de colapso es generalmente la presencia del agua, aunque otra de las circunstancias que deben ser concurrentes es la de una carga, en general mayor de la que previamente actuaba sobre el suelo. Este fenómeno se presenta casi exclusivamente en zonas áridas (zona donde prevalecen los suelos colapsables). Por lo general, su mayor incidencia es sobre las obras hidráulicas (desde hace mucho tiempo se conocía y recibía el

nombre de hidrocompactación), tales como diques, presas, embalses, entre otros.

Se sabe que los suelos colapsables pueden ser de formación eólica, aluvial, coluvial, residual, y por supuesto de rellenos efectuados por el hombre. Su identificación se hace esencialmente mediante el odómetro, aunque también existen otros criterios, tal es el caso de la densidad, aunque resulta difícil cuantificarlo por esta forma ya que como se menciono anteriormente, dicho valor debe considerarse como una información cualitativa y no decisiva como índice del posible colapso de un suelo.

Ríos y Ospina, mencionan que cuando se va a cimentar en este tipo de suelo, se debe tener en cuenta que son terrenos que presentan variaciones espontáneas de volumen, no dependientes directamente de las cargas aplicadas al mismo. Este caso afecta a áreas muy extensas dentro de las cuales constituyen cuantitativamente el principal problema de cimentación.

Los terrenos colapsables son muy variados, pero tienen como característica común una estructura floja pero cementada o rigidizada de alguna manera, de modo que se conserva hasta que por alguna circunstancia (generalmente inundaciones) el cemento se reblandece y la estructura colapsa.

Una característica esencial de los suelos colapsables es que poseen una densidad baja, lo que trae como consecuencia que cualquier suelo excavado y mal recompactado puede ser colapsable.

A continuación se mencionará el significado de pilotes, sus características de trabajo y el tipo de pilote adecuado que debe usarse en suelos colapsables:

2.3.1 Pilotes: según Tschebotariof (1967), *“se denomina pilote a un elemento constructivo estructural, utilizado para cimentaciones profundas de obras que permite trasladar las cargas hasta un estrato resistente del suelo, cuando este se encuentra a una profundidad tal que hace inviable, técnica o*

económicamente, una cimentación más convencional mediante zapatas o losas". (P.318).

Estos pueden clasificarse de diversas formas, bien sea según el tipo de material (acero, concreto, madera), según el tipo de transmisión de carga (punta y fricción) y según su ejecución (pilote vaciado en sitio, pilote prefabricado hincado y el pilote hincado vaciado en sitio, los cuales cada uno de ellos presentan características distintas para cada tipo de suelo).

Das (1999), indica que en muchos casos, los suelos colapsables están presentes en el sitio de una estructura propuesta y se extienden a gran profundidad por debajo de la superficie del terreno.

Se sabe también que los suelos constituidos por loess son de naturaleza colapsable. Cuando el contenido de agua de esos suelos aumenta, su estructura se rompe. Una disminución repentina de la relación de vacíos induce grandes asentamientos de las estructuras soportadas por cimentaciones superficiales (losas, zapatas, entre otros).

En tales casos, las cimentaciones con pilotes se usan con éxito si éstos se extienden hasta las capas de suelo estables más allá de la zona de cambio posible de contenido de agua.

Según Benarroch y Rossi (1972), para el caso de los suelos colapsables, el pilote más recomendado según sus características de trabajabilidad es el pilote hincado (prefabricado o vaciado), ya que estos representan una buena alternativa para la cimentación de estructuras en terrenos flojos y blandos (arenas y limos, predominantes en suelos colapsables), ya sea trabajando como pilotes flotantes, que transmiten la mayor parte de la carga por rozamiento a través del fuste, o como pilotes columna, que trabajan predominantemente por punta.

Este tipo de pilote tiene dentro de sus ventajas, que no existe la posibilidad de derrumbe, no influye en su ejecución el nivel freático, el cual por lo general en este tipo de suelo se encuentra a gran profundidad y finalmente, este tipo de pilote puede usarse en varias longitudes y formas,

teniendo en cuenta que el estrato colapsable puede encontrarse a gran profundidad.

Peck et al., (1983), indican que deben hincarse pilotes a través de suelo susceptible de colapso, para apoyarse en el material más resistente o no colapsable, o bien, usarse para compactar el suelo y reducir su compresibilidad.

2.3.2 Pilotes de compactación de arena: según Houston y Houston (1989), este método es muy laborioso para su uso, su procedimiento consiste en un mandril metálico hueco que se hinca e inyecta mortero por dentro del pilote, para luego una vez retirado el mandril, se siembran cabillas que no llegan sino hasta cierta profundidad, siendo estos pilotes por lo general, pilotes para soportar cargas.

Durante el retiro parcial del mandril, las puertas del fondo se abren. Se vierte arena desde la parte superior abierta del mandril y se compacta en etapas aplicando aire a presión conforme el mandril se retira. El diámetro usual del fuste es de 0,45 a 0,75 metros y se hincan a una separación aproximada de 1,5 y 3,0 metros entre centros.

Normalmente la disposición de las pilas en el área a mejorar tiene un patrón triangular y una separación de dos (2) y tres (3) metros. El potencial de colapso se reduce debido a la acción conjunta del suelo compactado en las adyacencias de los pilotes debido al desplazamiento durante el hincado de los mismos, y a las columnas de material granular compactado.

Es criterio del autor de este Trabajo Especial de Grado, que además de ser este un procedimiento laborioso, su eficiencia en compactación es discutible, además de representar un costo excesivo para su ejecución, por lo que su uso parece más apropiado como drenes de arena para acelerar la consolidación en sentido horizontal.

El retiro de la tubería o hinca de la misma no es fácil ni aplicable a cualquier terreno, ya que el retiro del mandril produce descompresión en el suelo.

2.4 MEJORAMIENTO DE SUELOS COLAPSABLES

Según Carrillo (2005), el objetivo principal de estas soluciones es eliminar o disminuir apreciablemente la susceptibilidad al colapso del suelo, bien disminuyendo la porosidad del suelo, o bien aumentando la resistencia estructural entre las partículas del suelo. Una de las formas de clasificar los métodos de mejoramiento o estabilización, ha sido precisamente ésta, o sea teniendo en cuenta la acción resultante sobre el suelo (Aitchison, 1973).

Sin embargo, para el desarrollo y explicación de los diferentes métodos se ha elegido la clasificación propuesta por Evstatiev(1988), que tiene en cuenta el medio usado para realizar la estabilización y el objeto de la misma, el cual propone la siguiente clasificación de los métodos de estabilización de suelos loésicos, la cual puede hacerse extensiva a suelos colapsables:

- a.-** Métodos de mejoramiento de las propiedades del suelo por compactación.
- b.-** Métodos de mejoramiento de las propiedades del suelo por modificación de su granulometría.
- c.-** Métodos de mejoramiento de las propiedades del suelo por la creación de nuevos contactos cohesivos.
- d.-** Métodos de mejoramiento por medio del reemplazo del suelo colapsable por suelo no colapsable.
- e.-** Métodos de mejoramiento que incorporan elementos resistentes a la tracción dentro del suelo.
- f.-** Geomembranas.
- g.-** Métodos de mejoramiento de las propiedades del suelo por drenaje.
- h.-** Corrección de taludes y terraplenes.

Adicionalmente a la lista de métodos de mejoramiento de suelos propuesta por Evstatiev (1988), se agregarán una serie de tratamientos

propuestas por Houston y Houston (1989), las cuales igualmente servirán para minimizar los daños o riesgos que puedan ocasionar los suelos colapsables. Dichos métodos se mostrarán a continuación:

2.4.1 Inyecciones de lechadas o de estabilizadores químicos: Bara (1977) indica que los suelos colapsables pueden ser estabilizados a través de estas técnicas, las cuales están destinadas a cementar la estructura del suelo para que no ocurra colapso si se produce un humedecimiento futuro. Claro está que algunos humedecimientos se producen cuando se inyecta el agente cementante, en este caso, silicato de sodio y Cloruro de Calcio, generalmente al 2% en peso, para estabilizar el suelo químicamente.

La medida en la cual está precarga es efectiva para reducir futuros asentamientos, depende del rigor de la humedad y el porcentaje del esfuerzo total debido a la sobrecarga.

2.4.2 Pre-humedecimiento: Bara (1977), indica que este método consiste simplemente en humedecer el suelo colapsable a través de una fuente de humedecimiento artificial para provocar colapsos controlados e intencionales en el suelo previo al inicio de la construcción. Es por esta razón que el asentamiento debido al colapso será pequeño o insignificante una vez construida la estructura. El agua puede ser introducida en o cerca de la superficie por medio de riego de agua en la superficie del terreno por medio de estanques, o la construcción de pozos (tipo calicata o perforación).

Si el suelo tiene una estratificación horizontal, como es el caso de la mayoría de los depósitos de suelo colapsable de origen aluvial, la inyección de agua puede fluir más rápidamente en sentido horizontal que en sentido vertical, por ello, se debe tener precaución en el uso de este método cuando existan estructuras en las adyacencias, apoyadas sobre suelos colapsables, ya que se podría inducir el colapso de las mismas por falla del soporte.

Es muy importante monitorear las operaciones de pre-humedecimiento mediante sondeos para confirmar que el agua penetra hasta la profundidad y extensión lateral requeridas. Este método puede ser combinado con sobrecargas temporales, lo cual incrementará el esfuerzo normal e intensificará el proceso de colapso, produciendo asentamientos mayores.

2.4.3 Compactación con vehículos o rodillos: Cintra y Nogueira (1986), mencionan que un suelo colapsable puede ser convertido perfectamente en una fundación de suelo aceptable por densificación.

Este proceso consiste en el simple pasado de rodillos vibratorios pesados, a lo largo de la superficie del terreno, preferiblemente previo a un humedecimiento del suelo. En la mayoría de los casos, cuando se trata de un depósito superficial de suelo colapsable con un espesor menor a tres (3) metros, se siguen las técnicas convencionales de movimiento de tierra para erradicar completamente el problema o minimizar los riesgos de asentamientos.

Estas técnicas consisten en la remoción total del suelo colapsable y su posterior recompactación en capas. Cuando el espesor colapsable es mayor a tres (3) mts se selecciona una profundidad a la cual se estima que se extienda el frente de humedecimiento, tomando en cuenta las características del material compactado. Dado que la compactación reduce la conductividad hidráulica del material mejorado, el suelo colapsable subyacente tendrá menos posibilidades de humedecerse a causa de infiltraciones.

Este proceso es aplicable en la construcción de rellenos artificiales como presas, terraplenes, caminos, entre otros, y en algunas ocasiones a terrenos naturales, como es el caso de las cimentaciones sobre arenas sueltas.

El objetivo básico de la compactación de un suelo es la obtención de un nuevo material (suelo compactado) que tenga un comportamiento adecuado para su aplicación específica, ya que este proceso genera en el suelo

deformaciones permanentes que modifican sus propiedades originales causando, entre otros, los siguientes efectos:

- Densificación del suelo (aumento de la densidad seca)
- Aumento de la resistencia mecánica
- Aumento de la rigidez
- Reducción de la permeabilidad
- Reducción de la erosionabilidad

2.4.4 Compactación Dinámica: Clemence y Finbarr (1981), indican que la compactación dinámica es una técnica inventada y desarrollada por Louis Menard que data del año de 1969, que tiene como finalidad el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo densificándolo e incrementando su capacidad portante. Dicha densificación se produce gracias a la creación de ondas de compresión y de corte de muy alta energía.

La densificación de los suelos se consigue mediante la ejecución de impactos llevados a cabo con pesos de 8 a 200 toneladas que se dejan caer por gravedad desde 15 a 40 metros.

Este procedimiento es llevado a cabo siguiendo un patrón de malla a lo largo de la superficie del terreno, y rellenando adecuadamente los cráteres producidos por la caída. La compactación dinámica puede ser muy efectiva si se combina con pre-humedecimiento del terreno.

2.4.5 Vibroflotación: Coduto (1994), la define como un método de mejoramiento de suelos granulares (arenas o gravas) con un contenido de finos (porción pasante del tamiz # 200) inferior a un 15 o 20 % que consiste en introducir en el suelo un equipo vibratorio con inyección de agua denominado vibroflot, que es de aproximadamente dos (2) metros de longitud, el cual induce un reacomodamiento de los granos del suelo aumentando su densidad, lo cual reduce el potencial de colapso.

Se tienen aberturas arriba y debajo de la unidad para proporcionar chorros de agua. Todo el proceso de compactación se divide en cuatro etapas:

- El chorro en el fondo del vibroflot se activa y el vibroflot es descendido hacia el terreno.
- El chorro de agua crea una condición movediza en el suelo que permite el hundimiento de la unidad vibratoria.
- Se vierte material granular en la parte superior del agujero. El agua del chorro inferior se transfiere al chorro superior de la unidad. Esta agua arrastra hacia abajo del agujero el material granular
- La unidad vibratoria es gradualmente levantada en tramos de aproximadamente 0,30 m y se mantiene vibrando cerca de 30 segundos en cada tramo, proceso que compacta el suelo.

2.4.6 Explosión profunda combinada con pre-humedecimiento: según Houston y Houston (1989), esta técnica incluye dos (2) variaciones en su aplicación. En la primera el suelo colapsable se humedece previamente (grado de saturación de 80 % o mayor) y luego se induce el colapso con las vibraciones de las detonaciones. En la segunda versión los explosivos son detonados mientras el suelo aún está seco, y los vacíos creados son rellenados primeramente con agua y luego con arena y grava.

2.4.7 Humedecimiento controlado: este método es similar al prehumedecimiento, ya que consiste igualmente en la inyección de agua al terreno a través de pozos o perforaciones, sin embargo éste difiere en que el humedecimiento es mucho más controlado y frecuentemente está concentrado en áreas específicas y generalmente es usado como medida preventiva para corregir asentamientos diferenciales que han ocurrido accidentalmente por resultado de un humedecimiento localizado. Usado cuidadosamente y con monitoreo, este método resulta económico y efectivo

para estabilizar suelos debajo de edificios existentes que ya han sufrido algún asentamiento por colapso (Coduto, 1994).

Puede hacerse humedecimiento controlado mediante la construcción de diques de baja altura (conocido como técnica de embalse), y se utiliza generalmente en sitios que no tienen capas impermeables. En pruebas de campo, se ha observado que aún después de la saturación y del colapso del suelo por embalse, algún asentamiento adicional del suelo llega a ocurrir después de la construcción de la cimentación. Un asentamiento adicional también es causado por una saturación incompleta del suelo durante la construcción (Das, 1999).

2.4.8 Precarga: según Stamatopoulos y Kotzias (1990). *“definen la precarga como una carga temporal aplicada en un sitio de construcción para mejorar los suelos bajo la superficie. La misma es llevada a cabo usualmente antes de la erección de la estructura, pero también puede llevarse a cabo cuando la obra está semiacabada o terminada”*. (P.16).

El precargado se ha utilizado con buenos resultados en virtualmente todo tipo de suelo natural o artificial (arenas sueltas y limos, arcillas limosas blandas, limos orgánicos o depósitos aluviales).

El método más usual para aplicar la precarga consiste en apilar el material de relleno; después de la precarga, el material se retira y en ocasiones se vuelve a utilizar en el mismo proyecto para otra precarga o para la construcción de terraplenes.

Otro método es aplicando el abatimiento del nivel freático. Esto se logra mediante pozos filtrantes, zanjas o bombeo al vacío en pozos relativamente profundos (aprox. 20 metros). A medida que el nivel freático baja, el suelo pierde su sustentación hidráulica y su peso unitario se incrementa en aprox. 10 kN/m³.

Cada metro de caída en el nivel de agua, produce aproximadamente la misma carga que medio metro de relleno. Este efecto a veces se incrementa

al combinar el método de abatir el nivel freático con el de amontonar el relleno. Con el abatimiento del nivel freático, se evita el peligro de una falla en la base; no obstante, se puede preferir apilar el material debido a que es menos costoso. Cuando el nivel freático es alto, se puede aplicar una carga que lo abata. Cuando el nivel freático es bajo, se puede aplicar una carga a algunos suelos mediante la acción opuesta, es decir, inundando la superficie.

Una acción adicional de la inundación es romper la débil adherencia existente en los suelos sueltos como el loess, como resultado la estructura del suelo se colapsa y tiene lugar la densificación. Sin embargo, el método más frecuente de precarga es el terraplén el cual se detallará a continuación:

- La duración de la precarga, desde el inicio de la colocación del terraplén hasta el final cuando se retira la carga, es de 3 a 8 meses en la mayoría de los casos. En los sitios donde la respuesta del terreno es bastante rápida, la duración se puede reducir de 4 a 6 semanas, donde uno de los factores determinantes es el tiempo requerido para obtener mediciones confiables de asentamiento.
- En la mayoría de los casos, la altura del montículo de precarga, construido de relleno de suelo, es de 3 a 8 metros por encima del nivel original, con valores mínimos y máximos probables de 1,5 metros a 18 metros respectivamente.
- Los asentamientos experimentados durante la precarga comúnmente son de 0,3 a 1 metro con valores extremos de 0,05 y 2 metros.

2.5 MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE DAÑOS Y RIESGOS EN SUELOS COLAPSABLES

Houston y Houston (1989), mencionan varias medidas disponibles para minimizar los riesgos y problemas cuando se va a construir con o sobre un suelo colapsable. Para ello nos apoyaremos en algunas de estas técnicas empleadas en el capítulo del marco teórico (antecedentes de la investigación). A continuación se describen algunas de estas técnicas:

2.5.1 Remoción del estrato de suelo colapsable: Holtz y Hilf (1961), indican que algunas veces el suelo colapsable puede ser simplemente excavado y removido, y la estructura puede ser soportada directamente sobre el material no colapsable expuesto.

Este método es el más atractivo a emplear cuando el estrato de suelo colapsable se extiende solo hasta una profundidad superficial de cuatro (4) metros aproximadamente.

2.5.2 Evitar o minimizar el humedecimiento: según Morrison (1969), por lo general, el colapso no ocurrirá mientras el suelo no se humedezca o se sature, es por esta razón que cuando se trabaja con suelos colapsables, deben tomarse medidas extras para minimizar la infiltración del agua en el terreno. Esto incluye el mantenimiento de superficies de drenaje, un buen direccionamiento de las descargas provenientes de los techos y de otras fuentes de agua fuera de las edificaciones, evitar el riego excesivo de las áreas verdes, entre otros. Esta medida debería estar acompañada de otra técnica de mitigación de daño para un mejor funcionamiento.

2.5.3 Transferencia de la carga a un suelo estable, por debajo del suelo colapsable: para Clemence y Finbarr (1981), si el estrato de suelo colapsable es superficial y tiene un espesor relativamente bajo, es decir, entre 1 y 4 metros, se hace factible empotrar las fundaciones superficiales tipo zapatas individuales a una profundidad de asiento tal que queden apoyadas sobre el estrato no colapsable subyacente.

Si el depósito tiene un espesor relativamente alto (> 4 metros), se pueden usar fundaciones profundas (pilotes) para el mismo propósito, caso en el cual se debe considerar la posibilidad de actuación de fricción negativa en la parte superior del elemento.

2.5.4 Diseño de estructuras capaces de tolerar asentamientos diferenciales: si los asentamientos potenciales inducidos por colapso no son de gran magnitud, se pueden diseñar fundaciones que toleren asentamientos diferenciales.

Si se toman suficientes medidas preventivas en campo para impedir que la humedad se incremente bajo las estructuras, es factible construir fundaciones corridas y losas de fundación sobre suelos potencialmente colapsables. Las fundaciones deben ser dimensionadas de manera que nunca se excedan los esfuerzos críticos en campo, lo cual se garantiza aplicando un factor de seguridad de aproximadamente 2,5 a 3, para calcular la presión admisible del suelo.

Las fundaciones corridas o continuas son más seguras que las aisladas sobre suelos colapsables, ya que minimizan efectivamente los asentamientos diferenciales.

Las fundaciones corridas, típicamente se unen mediante vigas de riostra y vigas longitudinales de carga. La siguiente figura (Figura 15), muestra un procedimiento típico para la construcción de cimentaciones continuas, mediante vigas de carga y zapatas.

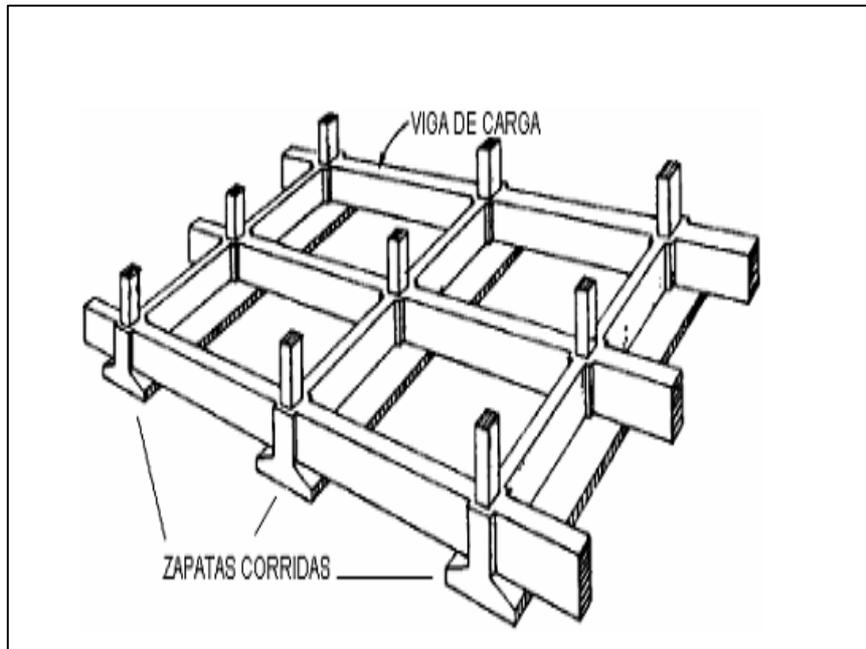


Figura 15. Fundaciones corridas con vigas de carga.
Tomado de Clemence y Finbarr, (1981).

Una vez mencionadas y explicadas las distintas técnicas de mitigación de daños con sus respectivas características, finalmente Kulhawy (1989), resumió cada técnica según el resultado buscado, o según el tratamiento que se le vaya a dar a dicho suelo, en la tabla mostrada a continuación (Tabla N° 10):

Tabla 10. Clasificación de las medidas de mitigación de acuerdo al resultado buscado.

Tomado de Kulhawy, (1989).

Resultado Buscado	Técnica a utilizar
Prevenir que ocurra el colapso	Remoción del estrato colapsable, minimizar el humedecimiento, transferencia de la carga a un suelo estable, estabilización química, compactación con rodillos, pilotes de compactación de arena, compactación dinámica, vibroflotación, explosión profunda
Causar el colapso antes de la construcción	Pre-humedecimiento, pilotes de compactación de arena, compactación dinámica, vibroflotación, explosión profunda
Prevenir la ocurrencia de asentamientos diferenciales, o proveer resistencia ante ellos	Evitar el humedecimiento
Remediar y minimizar futuros daños	Estabilización química, humedecimiento controlado

2.6 DEFINICIÓN DE TERMINOS BÁSICOS

Calicatas: son aberturas o excavaciones de profundidad pequeña a media que se le realiza a la superficie del terreno, con el propósito de tomar muestras y así poder realizar una inspección directa del suelo que se desea estudiar.

Gneiss: se denomina gneiss a una roca que se deriva del metamorfismo de grado alto. Este término se aplica a las rocas bandeadas con minerales granulares y alargados.

Holoceno: el holoceno es la última y actual época geológica del período cuaternario. Comprende los últimos 11.784 años desde el fin de la última glaciación. Es un período interglaciar en el que la temperatura se hizo más suave y la capa de hielo se derritió, lo que provocó un ascenso en el nivel del mar.

Lixiviar: tratar con el disolvente adecuado, una sustancia compleja a fin de obtener de ella su parte soluble.

Loess: material geológico sedimentario eólico, formado por depósitos de limo originado por la deposición de partículas muy finas transportadas por tormentas de polvo a lo largo de miles de años.

Odómetro: aparato que sirve para medir la compresión unidimensional de los suelos

Suelos aluviales: ocurren generalmente en planicies y deltas propensos a inundaciones y son frecuentemente de gran espesor. Son depositados en capas delgadas y varían de forma considerable.

Suelos Residuales: son suelos originados por la intensa y profunda descomposición de la roca matriz, bajo condiciones climáticas y biológicas que prevalecen en los trópicos.

Tubo de pared delgada (Tubo Shelby): son tubos hechos de acero, sin costura y se usan comúnmente para obtener suelos arcillosos inalterados. Los más comúnmente usados poseen diámetros exteriores de 50,8 mm (2 pulgadas) y 76,2 mm (3 pulgadas).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

El presente capítulo está referido a los aspectos metodológicos de la investigación, es decir, los procedimientos rigurosos a seguir mediante la aplicación de las técnicas u operaciones para la recolección de la información.

Es por esta razón que debe plantearse una estrategia metodológica para el abordaje de una investigación; supone adoptar una vía o camino a transitar para recolectar, analizar e interpretar las informaciones provenientes de los diferentes autores (sujetos de la investigación), documentos, supuestos teóricos, u otros, con el fin de dar respuestas a las interrogantes planteadas por el investigador. La aplicación de estos instrumentos de recolección de información condujo a la consecución de los objetivos establecidos.

3.1 DISEÑO, TIPO DE INVESTIGACIÓN Y FUENTES DOCUMENTALES

Según Arias (1999), la metodología del proyecto incluye el tipo o tipos de investigación, las técnicas y los procedimientos que serán utilizados para llevar a cabo la indagación. Es el “cómo” se realizará el estudio para responder al problema planteado.

En el presente Trabajo Especial de Grado, se utilizó una investigación de tipo documental.

Según Manual de la UPEL (2008), se entiende por Investigación Documental *“el estudio de problemas con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, con apoyo, principalmente, en trabajos previos, información y datos divulgados por medios impresos, audiovisuales o electrónicos”*. (P.20).

Además, la UPEL clasifica los tipos de Investigación Documental, según los objetivos del estudio propuesto y las disciplinas en las cuales se ubique la temática. Los trabajos de investigación pueden ser:

a.- Estudios de desarrollo teórico, en el cual se presentan nuevas teorías, conceptualizaciones o modelos interpretativos propios del autor.

b.- Estudios de educación comparada, en el cual se analizan diferencias y semejanzas sobre características o problemas de la educación en un contexto histórico, geográfico o sociocultural, fundamentado en información publicada.

c.- Estudios de investigación histórica, literaria, geográfica, matemática u otro que cumpla con las características mencionadas anteriormente

d.- Finalmente se encuentra la investigación Documental de tipo Revisión crítica del estado de conocimiento, siendo el que más se ajusto al modelo desarrollado en el presente Trabajo Especial de Grado.

En esta investigación se integra, se organiza y se evalúa la información teórica y empírica existente sobre un problema (los suelos colapsables), focalizando ya sea en el progreso de la investigación actual y posibles vías para su solución.

McKernan (2001), considera que esta técnica es una rica fuente de datos para el investigador, quien puede recurrir a diversos documentos como: textos, periódicos, actas de reuniones, artículos, revistas científicas, entre otros. El propósito del análisis de documentos es descubrir los hechos de la investigación a partir de fuentes primarias de datos.

3.2 ETAPAS PARA LA REALIZACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

La metodología empleada para la realización del presente Trabajo de Grado consistió en el cumplimiento de cinco (5) etapas fundamentales, las cuales, serán explicadas más detalladamente a continuación:

3.2.1 Recopilación de la información bibliográfica: esta fase de la investigación, se basó en dos (2) etapas fundamentales: selección e identificación del tipo de fuente a consultar para la elaboración de este Trabajo de Grado, y finalmente, definir criterios de selección para seleccionar esas fuentes.

Para seleccionar las fuentes que debieron ser consultadas para desarrollar esta investigación, se hizo énfasis en Tesis de Grado realizadas en la Universidad Central de Venezuela asociadas a la problemática de suelos colapsables, las cuales, fueron parte fundamental para la comprensión de la problemática existente relacionada a los suelos colapsables, además de permitir identificar cual era la línea de investigación que debía seguirse para cumplir los objetivos planteados en el presente Trabajo de Grado.

Igualmente, se examinaron trabajos de diversos autores especialistas de la materia, asociados a la problemática de suelos colapsables, textos especializados en Mecánica de suelos, a fin de profundizar y analizar los fundamentos teóricos acerca de las causas que originan el fenómeno de colapso de un suelo, diversas ponencias expuestas en varios congresos mundiales sobre Mecánica de suelos recopiladas en textos, específicamente asociadas a casos de suelos colapsables alrededor del mundo, generalmente escritas en los idiomas inglés y francés, lo cual implicó la debida traducción e interpretación de los escritos.

Finalmente, se consultaron bases de datos electrónicas asociadas al tema de suelos colapsables, aunque no se hizo mucho énfasis en la consulta de esta fuente de investigación.

3.2.2 Análisis exhaustivo de fundamentos teóricos relacionados al fenómeno de colapso: para la selección de las diversas fuentes consultadas para la elaboración del documento, las mismas fueron sometidas a un proceso de análisis, con la finalidad de plasmar en el trabajo final, las diversas reseñas, ponencias, o escritos, que a juicio del autor, representaron la mejor información para la elaboración del presente Trabajo de Grado.

Este proceso se basó fundamentalmente, en resaltar algunos antecedentes asociados al tema de suelos colapsables, donde se incluye la aparición del fenómeno de colapso, casos de suelos colapsables que ocurrieron en nuestro país, los cuales formaron parte fundamental del desarrollo del trabajo. Igualmente, gran parte de la información plasmada en el presente Trabajo de Grado, se basó en reseñas y ponencias de los principales investigadores en materia de suelos colapsables a nivel mundial.

Se debe resaltar igualmente, que la mayoría de estos escritos, ponencias, reseñas, entre otros, estaban escritas en los idiomas inglés y francés, lo cual implicó la debida traducción e interpretación de los mismos.

3.2.3 Análisis de los métodos de identificación para determinar el potencial de colapso del suelo: si bien se mencionaron una serie de parámetros físicos de identificación asociados a los suelos colapsables durante el desarrollo del marco teórico en un orden cronológico para observar cual había sido su evolución a través de los años (específicamente en el aparte relacionado a los Antecedentes de la Investigación), se mencionaron unos criterios de identificación para determinar el potencial de colapso, propuestos por investigadores especializados a la problemática de los suelos colapsables.

Existen dos (2) criterios fundamentales para determinar el potencial de colapso de un suelo, el propuesto por Abeljev en 1948 y otro propuesto por Jennings y Knight en 1975, resultando este último el más apropiado para determinar el potencial de colapso ya que este es muy similar al criterio que

se encuentra en la Norma ASTM D-5333-96, el cual se corresponde al ensayo de colapso (odómetro simple). Este criterio, permite cuantificar el valor del potencial de colapso, además de clasificar el grado de severidad del problema de colapso encontrado.

3.2.4 Análisis de métodos de mitigación de daños ocasionados por los suelos colapsables: a fin de determinar los diversos métodos de mitigación de daños ocasionados por los suelos colapsables, se recurrió al análisis exhaustivo de una variedad de artículos especializados en el área, a fin de presentar las posibles soluciones para enfrentar esta problemática.

Estos artículos hacían mención de las diversas técnicas de mejoramiento de suelo existentes, y como debían ser aplicadas para mitigar el daño producido por los suelos colapsables.

La aplicación de dichas técnicas, por lo general, están condicionadas a una serie de características fundamentales de los suelos colapsables, siendo el espesor del estrato, al igual que el costo de aplicación de dicha técnica, el factor preponderante para seleccionar cuál técnica funcionará mejor al aplicarla sobre suelos colapsables. Esto quiere decir, que cada técnica funciona mejor según la profundidad del estrato colapsable sobre el cual se vaya a trabajar, por ejemplo, según criterio del autor, si se trata de estratos poco profundos, la remoción y el pre-humedecimiento resultan ser las técnicas que mejor funcionan para este caso en específico, sin embargo, si se trata de estratos más profundos, se recomienda la implementación de pilotes.

3.2.5 Integración de resultados de la exploración documental y elaboración del documento final: esta es la etapa final del proceso de elaboración del documento final.

Una vez cumplidas las cuatro (4) etapas anteriores, en esta etapa, se tomó la decisión de cual será el contenido definitivo que llevará el documento final.

Para esto, nos apoyamos en el cumplimiento de los objetivos planteados durante la elaboración de este Trabajo de Grado.

En el documento se plasmó toda la información necesaria para cumplir con los objetivos planteados, además, se llevó una secuencia establecida por el orden en que se presentan cada uno de los objetivos específicos, los cuales tienen como propósito común, alcanzar la consecución del objetivo general de la presente investigación.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se procesaron los resultados obtenidos durante el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado, y se procedió con el análisis y descripción de los mismos, los cuales se reflejan en un análisis detallado que se mostrará a continuación.

Dicho análisis consistió en la realización de un estudio documental teórico, fundamentado en la revisión bibliográfica consultada para la elaboración del presente Trabajo de Grado, el cual proporciono la obtención del significado de suelos colapsables, sus principales características, los diversos métodos de identificación y las principales causas que originan la aparición del fenómeno de colapso.

Adicionalmente, se presentara una serie de ventajas y desventajas de cada método de mitigación de daños ocasionados por la presencia de suelos colapsables, las distintas limitaciones y su funcionamiento para cada tipo de estructura de ingeniería civil sobre la cual se vaya a trabajar, ya que los mismos varían según las características que se presenten.

4.1 SUELOS COLAPSABLES

Para obtener un significado técnicamente apropiado del concepto de suelos colapsables, se procedió a analizar una serie de definiciones dadas, según diversos autores consultados para realizar este Trabajo Especial de Grado.

Se consultaron seis (6) autores, observándose una tendencia por parte de los mismos en indicar que la principal causa del fenómeno de colapso se debe a la saturación del suelo.

Esta condición obedece a que los suelos colapsables, son suelos no saturados, los cuales experimentan una brusca disminución de volumen en su estructura, por lo general, cuando son sometidos a humedecimiento y a sollicitaciones.

Es por esta razón, que una vez observadas y analizadas las distintas características mencionadas, el autor podrá brindar una definición de suelos colapsables, ajustada a las distintas características mencionadas por los distintos autores citados anteriormente durante el desarrollo del marco teórico.

Recopilando toda la información dada por los diversos autores, el autor define suelo colapsable como aquel tipo de suelo no saturado o parcialmente saturado, que experimenta una brusca disminución de volumen en su estructura, bien sea por la aplicación de una carga adicional sobre el mismo, o simplemente cuando este es sometido a humedecimiento.

Coincidiendo con la mayoría de los autores consultados en esta Investigación, en indicar que la causa fundamental para que suceda el colapso de un suelo, es el aumento en el contenido de humedad del mismo.

Una vez que el autor ha llegado a definir el significado de suelos colapsables, se deben mencionar las distintas características propias de este tipo de suelo, las cuales permiten identificar de una manera más concisa, cuando se está en presencia de un suelo colapsable.

4.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS COLAPSABLES

Los suelos colapsables presentan una serie de características propias según su estructura granular, su comportamiento mecánico y según su resistencia , las cuales se mencionarán a continuación:

1.- Suelos de estructura macroporosa, presentan valores altos de relación de vacíos (aproximadamente 3 o más). Sin embargo en la práctica de la construcción, se han encontrado suelos colapsables que no poseen la

característica de la estructura macroporosa, no obstante, son propensos a un colapso considerable.

2.- Granulometría predominantemente fina, es decir más del 50%, es pasante del tamiz N° 200. Este material pasante del tamiz N° 200, actúa como agente cementante y los mantiene en una condición generalmente estable en estado no saturado.

3.- Estos suelos son generalmente de estructura mal gradada, esto debido a que les falta tamaños de partículas en su constitución.

4.- Pueden encontrarse en zonas áridas o semi-áridas (clima tropical), generalmente en zonas de sequías muy largas, lo que indica que por lo general el nivel freático se encuentra a gran profundidad.

5.- Los suelos colapsables no presentan suficiente capacidad portante, aunque aparentan una alta resistencia a las diversas actividades realizadas por el hombre, su estructura se destruye ante una combinación de carga y aumento del grado de saturación, presentando problemas de asentamientos considerables

4.3 CAUSAS QUE ORIGINAN EL COLAPSO DE UN SUELO

Las causas que pueden dar origen al fenómeno de colapso son de diversa índole, entre éstas se encuentran, la importancia que tiene cada una de los parámetros físicos de identificación de suelos para que ocurra el fenómeno de colapso (contenido de humedad, relación de vacíos, entre otros) sin embargo, el autor coincide con la mayoría de los autores consultados en indicar que el fenómeno de colapso se debe principalmente a la saturación del suelo y hará un especial énfasis en esta causa, sin dejar de mencionar algunas propiedades que considere de relevancia.

4.3.1 Aumento del grado de saturación: el aumento en el contenido de agua de un suelo hasta llevarlo a la saturación representa, como se menciona anteriormente, la causa principal del colapso del suelo, provocando un cambio en la estructura que este tenía en su estado natural.

Es conocido que el fenómeno de colapso del suelo no ocurre en condiciones naturales, es decir, cuando el suelo no se encuentra saturado, ya que el suelo cuando se encuentra en esta condición se considera potencialmente colapsable. Para que dicho fenómeno suceda, debe haber un incremento bien sea de su contenido de humedad o del grado de saturación, siendo el agua, el factor desencadenante del fenómeno de colapso de los suelos sometidos a estudio durante esta investigación.

Estos incrementos en el contenido de humedad y el grado de saturación pueden ser producto de alguna fuga que pueda producirse en una tubería (aducción o de aguas negras), infiltración de tuberías de drenaje, provenientes por lo general de las aguas de lluvia, de algún tanque de almacenamiento de agua potable, ascenso del nivel freático, entre otros.

Por lo general, un suelo que tiene tendencia a colapsar, es decir, aquel suelo que reúna las características mencionadas previamente durante este capítulo, se mantendrá estable mientras el grado de saturación sea inferior a un valor crítico (ver tabla 7), a partir del cual la llegada del agua debilita suficientemente los enlaces existentes entre sus partículas, siendo estos enlaces por lo general carbonatos, silicatos, sales, o alguna película de arcilla que sirve como agente cementante de las partículas de este tipo de suelo.

4.3.2 Rompimiento de los enlaces entre partículas de suelo: se sabe que los suelos colapsables están constituidos por partículas unidas entre sí por alguna clase material cementante, que como se menciona anteriormente pueden ser sales, partículas de arcilla, carbonatos y silicatos, por lo que la estabilidad y resistencia de este tipo de suelo es altamente dependiente de la resistencia de las uniones y contactos entre sus partículas.

Dicha cementación depende básicamente de la aparición o no del agua como agente desencadenante del fenómeno de colapso, ya que como se menciono anteriormente, este suelo se mantiene estable si su grado de saturación es inferior a un valor crítico, el cual variara dependiendo del componente que predomine en el.

La arcilla como puente de enlace entre las partículas de los suelos colapsables, definitivamente juega un papel muy importante dentro de la composición de los mismos, ya que cuando el suelo se satura, la adhesión de la arcilla pierde su resistencia produciéndose el colapso estructural.

4.3.3 Otras causas: básicamente, el colapso de un suelo se origina por las dos (2) causas discutidas anteriormente, apoyadas por la presencia de una estructura de suelo propensa al colapso.

Pocas veces el colapso del suelo se produce sólo por aumento de la carga exterior, ya que para que el fenómeno de colapso se manifieste, ese aumento debe ir casi siempre acompañado de un aumento del grado de saturación.

Existen casos de suelos en los que no se produce inundación, ni aumento de carga exterior, sino una disminución de la succión del suelo, causa que puede representar la aparición del fenómeno de colapso en algunos suelos.

4.4 MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN PARA DETERMINAR EL POTENCIAL DE COLAPSO

Durante el presente Trabajo Especial de Grado, varios fueron los enfoques propuestos para determinar e identificar el potencial de colapso, por lo tanto, el autor clasificó estos métodos en tres (3) grupos:

4.4.1 Métodos basados en parámetros físicos de suelos: durante el desarrollo del Marco Teórico, específicamente cuando se mencionaron los antecedentes asociados al presente Trabajo de Grado, se citaron una serie

de criterios propuestos por diversos investigadores consultados, los cuales permitieron identificar y evaluar algunos parámetros físicos de los suelos colapsables.

Entre ellos se citaron los criterios de Abeljev (1948), criterio que permite estimar el colapso relativo de un suelo de manera cuantitativa y el criterio de Jennings y Knight (1975), igualmente asociado a la estimación del potencial de colapso de un suelo de manera cuantitativa, siendo estos, a criterio del autor, los más acertados para determinar el potencial de colapso, destacando este último ya que es muy similar al contemplado en la Norma ASTM: D-5333-92 (reaprobado en 1996 y vigente hasta nuestros días).

El criterio de Jennings y Knight, permite obtener valores numéricos expresados en porcentaje, los cuales indican la magnitud del problema que puede causar el suelo colapsable sobre el que se vaya a trabajar. Dichos valores se ven reflejados en la Tabla N°1 correspondiente al marco teórico del presente Trabajo de Grado, específicamente en el aparte relacionado a los Antecedentes de la Investigación.

4.4.2 Ensayos para la Identificación del fenómeno de colapso: si bien es cierto que existen una serie de ensayos que permiten identificar el colapso de un suelo, tales como el ensayo de consolidación, siendo la mejor manera de emplearlo a través de un ensayo de colapso, el ensayo triaxial, y algunos ensayos de campo, los cuales se mencionan durante el desarrollo del marco teórico de este Trabajo de Grado, existe un ensayo de reconocimiento geotécnico de suelos (SPT), que tiene como uno de sus objetivos la obtención de muestras de suelo para su posterior identificación, el cual a criterio del autor, representa el ensayo más importante que sirve como indicador del comportamiento del suelo, además de determinar la capacidad portante del suelo.

En el caso particular de los suelos colapsables, dicho ensayo arroja valores de resistencia a la penetración, por lo general inferiores a 10

golpes/pie (lo que corrobora la poca resistencia de los suelos colapsables, ya que estos se destruyen fácilmente con una simple combinación de carga y saturación), siendo este un indicio significativo para reconocer que al suelo que se le está aplicando dicho ensayo, se trata de un suelo colapsable. Además, el mismo debe realizarse sin inyección de agua, ya que se evitaría que el suelo colapse previo a la realización del mismo.

4.4.3 Ensayos de colapso: los ensayos de colapso son realizados con un odómetro convencional, también conocido como consolidómetro, el cual mide la deformación de una muestra de suelo que ocurre bajo humedecimiento. Existen en general dos (2) tipos de procedimientos: ensayo de doble odómetro y ensayo de simple odómetro.

El ensayo de doble odómetro fue propuesto por Jennigs y Knight en 1975 después de la aparición del fenómeno de colapso en el continente africano, con la finalidad de predecir los asentamientos por colapso.

El ensayo de odómetro simple es el más usado para evaluar el potencial de colapso, siendo dicho ensayo estandarizado y vigente hasta nuestros días, bajo la designación ASTM D-5333-96.

Este último ensayo, es a criterio del autor el más indicado para determinar el potencial de colapso, ya que el mismo permite estimar los posibles asentamientos que pudieran producirse en un determinado estrato de suelo, bajo una carga vertical específica, siendo en este caso, una carga estándar de 200 Kpa (2 Kg/cm²)

4.5 TÉCNICAS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS PARA MITIGACIÓN DE DAÑOS OCASIONADOS POR LOS SUELOS COLAPSABLES

A continuación se realizará un análisis de las distintas técnicas de mejoramiento de suelos mencionadas durante el marco teórico, que a criterio del autor son las más apropiadas con sus respectivas ventajas y desventajas, así como, una serie de soluciones ingenieriles para cada una de las diversas

obras estructurales más importantes en el campo de la ingeniería civil en materia de suelos colapsables, y para cada una se sugerirá cual técnica es la más recomendable para obtener un comportamiento óptimo.

4.5.1 Remoción del estrato colapsable

Ventajas

- El estrato colapsable puede ser excavado y la estructura puede ser fundada directamente sobre el material no colapsable

Desventajas

- Se recomienda aplicarlo solo hasta una profundidad de 4 metros aproximadamente, ya que de lo contrario, esta técnica resultaría muy costosa

4.5.2 Pre-humedecimiento:

Ventaja

- El pre-humedecimiento es la medida de mitigación más usada ampliamente, ya que resulta ser una técnica efectiva a un costo competitivo. Dicha técnica resulta ser apropiada para estratos profundos de suelos colapsables

Desventajas

- Para que esta técnica resulte suficientemente efectiva, por lo general debe ser usada en combinación con otra medida, tal como, compactación y humedecimiento controlado

4.5.3 Compactación con peso apisonador o compactación dinámica:

Ventajas

- Esta técnica resulta sumamente efectiva para capas superficiales de alrededor de cinco (5) metros, además de ser un método de mejoramiento de suelos que permite fundar directamente sobre él

Desventajas

- Generalmente para que esta técnica funcione adecuadamente, debe ser combinada con pre-humedecimiento del terreno, además de ser efectiva solo para profundidades de hasta diez (10) metros

4.5.4 Compactación con vehículos o rodillos:

Ventajas

- Los suelos colapsables pueden ser convertidos en un excelente material de soporte con un potencial de colapso bajo al aplicárseles esta técnica, además de ser un método de mejoramiento de suelo que permite fundar directamente sobre el

Desventajas

- Esta técnica es efectiva para depósitos profundos de suelos colapsables, es decir, mayores de cinco (5) metros

4.5.5 Precarga

Ventajas

- Esta técnica brinda resultados satisfactorios en todo tipo de suelo (natural o artificial)

Desventajas

- A pesar de que la precarga es un método que puede ser aplicado a todo tipo de suelo, la duración para que se densifique el suelo, está entre tres (3) y ocho (8) meses, lo que sin lugar a dudas incrementaría de una manera muy notoria el costo de la obra civil que se vaya a construir.

4.5.6 Humedecimiento controlado:

Ventajas

- Este método resulta económico y efectivo para estabilizar suelos debajo de edificios existentes que ya han sufrido algún asentamiento por colapso

Desventajas

- La desventaja del humedecimiento controlado, es que este requiere bastante atención para el monitoreo de los asentamientos que minimicen el riesgo de accidentes

4.5.7 Evitar o minimizar el humedecimiento:

Ventajas

- Está técnica funciona adecuadamente en torres de transmisión eléctrica ya que por lo general hay pocas fuentes de humedecimiento cerca

Desventajas

- En el caso de fundaciones para edificaciones, esta medida debe estar acompañada de otra técnica (a juicio del autor sería el humedecimiento controlado) ya que en estos casos si existen fuentes de humedecimiento cerca

4.5.8 Pilotes:

Ventajas

- Representan una buena alternativa para la cimentación de estructuras en terrenos flojos y blandos, típicos en suelos colapsables

Desventajas

- No pueden fundarse directamente sobre el estrato colapsable, además, a juicio del autor, no deberían emplearse en estratos de suelos colapsables inferiores a cuatro (4) metros, además del alto costo a nivel económico que representa la puesta en marcha de esta técnica.

4.5.9 Soluciones Ingenieriles en Suelos Colapsables: una vez mencionadas las ventajas y desventajas de las técnicas de mitigación de daños más efectivas en suelos colapsables, se nombrarán algunas obras de infraestructura en materia de ingeniería civil, y para cada una se mencionará cual será la técnica más apropiada:

4.5.9.1 Edificios:

- Remoción del estrato de suelo colapsable y posterior colocación debidamente compactado, si la extensión de dicho estrato lo permite debido a la parte económica.
- Inundación de la zona con el objeto de producir el asentamiento del suelo saturado bajo su propio peso, de no ser esto suficiente, el procedimiento puede combinarse con la compactación mediante pilones de gran peso.

4.5.9.2 Presas:

- Si el espesor del suelo con problemas de colapso es pequeño (máximo 3 metros), se recomienda excavar y eliminar o restituir el suelo compactándolo.
- Si el espesor es tal que hace inviable económicamente el procedimiento anterior (> 3 metros), se procede a inundar la fundación del dique, con el objeto de colocar el suelo en condiciones más desfavorables antes del inicio de la obra.
- Evitar o minimizar el humedecimiento, disminuyendo las posibilidades de ingreso de agua al terreno a través de infiltración de cañerías, tuberías de aguas blancas, cloacas, entre otros.

4.5.9.3 Canales, Tuberías y obras afines

- El tratamiento aplicado es el de presaturación de las áreas afectadas mediante inundación. Además las obras de conexión (T, Y, Codos), deberán estar preparadas para adaptarse a asentamientos diferenciales mediante uniones flexibles o juntas adecuadas.

4.5.9.4 Puentes

- En el caso de tener puentes sobre canales con problemas de suelos colapsables, es de uso frecuente la fundación mediante pilotes y la presaturación del terreno.

Finalmente, las soluciones a los daños ocasionados por los suelos colapsables en estructuras fundadas sobre ellos, dependen de la magnitud e importancia del problema y pueden ser de dos (2) naturalezas:

a.- Tratamiento del suelo con el objeto de modificar su comportamiento ante cargas y/o inundaciones, la cual puede hacerse a través de:

- Eliminación del estrato de suelo colapsable
- Densificación del suelo a través de alguna técnica
- Inundación del suelo antes de comenzar la obra con el objeto de que éste colapse

b.- Reforzar las fundaciones, bien sea a través de inyecciones o pilotearla. En muchos casos por falta de espacios, se recomienda la utilización de micropilotes

CONCLUSIONES

A continuación se mencionarán las conclusiones de este Trabajo Especial de Grado, las cuales provienen de los resultados obtenidos en el capítulo anterior y de los distintos basamentos teóricos consultados para la elaboración del mismo. Dichas conclusiones se mencionarán a continuación:

1.- Los suelos colapsables pueden definirse como aquel tipo de suelo no saturado o parcialmente saturado, que experimenta una brusca disminución de volumen en su estructura (cambio en la estructura original), bien sea por la aplicación de una carga adicional sobre el mismo, cuando este es sometido a humedecimiento, o producto del debilitamiento del enlace entre sus partículas.

Dentro de las características fundamentales que presentan los suelos colapsables están las siguientes:

- Suelos de estructura macroporosa con altos valores de relación de vacíos, además de presentar una estructura mal gradada
- Predominan fracciones de limo y arcilla, está última en menor cantidad, aunque juega un papel muy importante en el comportamiento mecánico de la estructura intergranular
- Los suelos colapsables son de origen eólico, aluvial y residual, y por lo general pueden encontrarse en zonas áridas o semi-áridas
- El colapso no ocurre en suelos bajo el nivel freático, ya que es necesaria la condición de saturación parcial
- Sus partículas están unidas entre sí por agentes cementantes que pueden perder su efectividad o ser anulados, debido al aumento del contenido de humedad. Estos agentes cementantes son los que proporcionan los esfuerzos resistentes en los suelos colapsables

- Los suelos colapsables no presentan suficiente capacidad portante, aunque esta condición está íntimamente ligada a la presencia del agua como factor desencadenante del fenómeno del colapso

2.- Si bien se mencionaron anteriormente durante el desarrollo de este Trabajo de Investigación las diversas causas que originaban el colapso del suelo, a juicio del autor, son dos (2) las principales causas que originan el colapso del suelo, aumento en el grado de saturación y el rompimiento de los enlaces entre las partículas de suelo, las cuales se explicarán a continuación:

a.- Aumento en el grado de saturación: el aumento en el contenido de humedad en el suelo hasta llegar a saturarlo, representa la causa principal del colapso del suelo, donde el agua juega un papel fundamental para que ocurra el fenómeno de colapso, ya que sin la presencia de ella, es decir, si el suelo se encuentra en condición natural, este no colapsa, aunque debe tener ciertas características de modo tal que se tienda a la ocurrencia de dicho fenómeno (potencialmente colapsable).

Un suelo que tiene tendencia a colapsar, en general es estable mientras el grado de saturación es inferior a un valor crítico (ver tabla 7), a partir del cual la llegada del agua puede debilitar suficientemente los enlaces existentes para que se produzcan deslizamientos tangenciales en los contactos entre partículas.

Para concluir, el factor desencadenante del fenómeno de colapso, sin duda alguna es el humedecimiento de la masa de suelo, usualmente generado por agua proveniente de fuentes artificiales (fugas en tuberías, tanques de almacenamiento, piscinas, infiltraciones por irrigación (riego), y agua de lluvia), como resultado de cambios desfavorables en el drenaje superficial. De esta manera, el agua se infiltra a grandes profundidades y humedece suelos que en condiciones normales permanecerían secos.

b.- Rompimiento de los enlaces entre las partículas de suelo: se puede decir que la estabilidad y resistencia de los suelos colapsables es altamente dependiente de la resistencia de las uniones y contactos entre sus partículas (enlaces), en donde los esfuerzos entre sus partículas exceden la resistencia de los contactos produciendo un desmoronamiento o colapso de la masa de suelo.

Tanto el grado de saturación como el rompimiento de los enlaces entre las partículas de suelo, son factores que están íntimamente relacionados, ya que la cementación o la unión de las partículas dependen fundamentalmente de la aparición del agua como responsable del fenómeno de colapso, ya que el agente cementante, generalmente la arcilla, pierde su resistencia provocando un cambio en la estructura que este tenía en estado natural.

3.- La escogencia de un determinado método de mitigación dependerán de muchos factores, entre ellos, el espesor y la extensión del estrato colapsable, de que tan profundo podría extenderse el humedecimiento del suelo en caso de accidentes (fuga de tuberías, entre otros), la cercanía de edificaciones al lugar del tratamiento, la importancia de la estructura a construir, la disponibilidad de equipos y mano de obra calificada, y finalmente el costo relativo del mismo.

4.- A juicio del autor, las medidas de mitigación más efectivas en suelos colapsables son el pre-humedecimiento y la remoción del estrato colapsable, si el estrato colapsable no sobrepasa los 4 metros de profundidad. Sin embargo si se trata de estratos de mayor profundidad (mayores de 4 metros), se recomienda el uso de cimentaciones profundas (pilotes), siendo el tipo de pilote hincado prefabricado (metálico o de concreto), el más indicado de utilizar en este tipo de suelo, siempre y cuando pueda ejecutarse la hincada debido a limitaciones reflejadas de antemano en el número de golpes del ensayo SPT.

En caso de presentarse un suelo muy denso o muy duro, lo cual daría un número de golpes muy alto, se propone efectuar una pre-excavación antes de colocar el pilote.

RECOMENDACIONES

1.- La identificación y caracterización de los suelos colapsables, surge como una necesidad obligatoria para los diversos estudios de suelos requeridos para la realización de diversas obras civiles.

Para esto es necesario sensibilizar a los Ingenieros Geotécnicos sobre los riesgos potenciales que estos suelos representan, así como proporcionar herramientas prácticas para su reconocimiento, estudio y tratamiento.

2.- La identificación oportuna de los suelos colapsables durante la fase de exploración de campo es crucial para la adopción de medidas de mitigación durante la construcción, orientadas a evitar la falla de los sistemas de fundación, situación que compromete el comportamiento estructural de instalaciones y/o edificaciones y pone en riesgo la integridad de los trabajadores o habitantes de las mismas.

3.- Se recomienda que más de una medida de mitigación, o combinación de más de una, debe ser considerada para la realización de cada proyecto, ya que la aplicación de una sola técnica, no es suficiente para controlar el daño producido por la presencia de suelos colapsables

4.- Como Trabajo Especial de Pregrado, continuar con la investigación del tema de suelos colapsables de manera experimental con el objeto de clasificar las causas y mecanismos que producen el fenómeno del colapso

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- * Aitchinson, G. (1973). Structurally Unstable Soils. Proc of the 8^o International Conference on Soils and Mechanic Foundation Engineering. Moscú, URSS. Vol 3, pp. 161 – 190

- * Amundaray, J., y Beltrán, R. (2004). Los suelos colapsables de Jose, XIII Seminario Venezolano de Geotecnia, Caracas, Venezuela. pp 1-14.

- * Arevenca (n.d). Ubicación del proyecto TAP-ZAL. Recuperado en Julio 16, 2009 de URL: <http://www.arevenca.com.ve/ubicacion-proyecto/index.php>

- * Arias, F. (2006). El Proyecto de Investigación (Introducción a la Metodología Científica). Quinta edición. Caracas: Editorial Episteme.

- * A.S.T.M. (2000), Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils. Designation: D 5333-92 (Reapproved 1996).

- * Asociación Internacional de Fomento (n.d). Recuperado en Mayo 14, 2009 de URL:
<http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/BANCOMUNDIAL/QUIENESS OMOS/EXTIDASPANISH/0,,contentMDK:21264956~menuPK:3502454~pagePK:51236175~piPK:437394~theSitePK:1261939,00.html>

- * Baamonde, J. (2006). Geología Física. Facultad de Ciencias UCV

- * Bara, J. (1977). Collapsible soils. ASCE Annual Convention and Exposition, Philadelphia. pp 13.

- * Barrera, M. (2002). Estudio experimental del comportamiento hidromecánico de suelos colapsables. Tesis de doctorado no publicada, Universidad de Cataluña, España. Recuperado en Septiembre 2, 2009 de URL: <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt226.pdf>

- * Benarroch, R., y Rossi, I. (1972). Obras de pilotaje: Ensayos usuales para su buena ejecución. Venezuela: Primeras Jornadas Venezolanas sobre inspección de obras.

- * Carrillo, S. (2005). Identificación y Caracterización Geotécnica de los Suelos Colapsables de Jose, Estado Anzoátegui. Trabajo Especial de Grado. Universidad Simón Bolívar, Miranda, Venezuela. pp 3-88

- * Cintra, J., y Nogueira J. (1986). Shallow Foundations on Collapsible Soils. Proc 5th Int Cong Assoc Engineers Geological. Buenos Aires. pp 673-675.

- * Clemence, S., y Finbarr, A. (1981). Design considerations for collapsible soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers. Vol. 107, pp. 305-317.

- * Coduto, D. (1994), Foundation Design, Principles and Practices: Chapter 21. New Jersey: Editorial Prentice Hall

- * Das, B. (1999). Principios de Ingeniería de Cimentaciones. México: International Thomson Editores. Cuarta Edición. pp 728-738

- * Day, R. (2000). Geotechnical Engineer's Portable Handbook. USA: Editorial McGraw Hill. pp 9.15.

- * Denisov, N. (1951). The engineering properties of loess and loess loams. Gosstroizdat, Moscú.

- * Dudley, J. (1970). Review of collapsing soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE. pp. 925-947

- * Evstatiev, D. (1988). Loess Improvement Methods. Engineering Geology, N° 25, pp. 341 - 366

- * Feda, J. (1964). Colloidal activity, shrinking and swelling of some clays. Proceedings, Soil Mechanics Seminar. Illinois, pp.531-546.

* Ferrero, J., y Reginatto, A. (1973). Collapse potential of soils and soil-water chemistry. Proceedings of the eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow.

* Handy, R. (1973). Collapsible loess in Iowa. Proceedings, Soil science Society of America. Vol.37, pp.281-284.

* Holtz, W., y Hilf, J. (1961). Settlement of soil Foundations due to saturation, Proc 5 th International Conference. Paris, pp 673-679.

* Houston, S., y Houston, W (1989). Prediction of field collapse of soils due to wetting. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 1, Jan, pp. 40-58.

* Jennings, J. (1967). The theory and practice of construction on partly saturated soils as applied to South African conditions Engineering Effects of Moisture Changis in soils. Texas A & M Press.

* Jennings, J., y Knight, K. (1975). A guide construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure. Sixth Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering.

* Jiménez Salas, J. (1975). Geotecnia y Cimientos I. Segunda Edición. Madrid: Editorial Rueda.

* Knight, K. (1956). The Microscopic Study of the Structure of Collapsing Sands. Department of Engineering, University of the Witwatersrand, South Africa.

* Kulhawy, F. (1989). Foundation engineering: Current principles and practices". ASCE, Evanston, Illinois, June, pp. 161 – 175.

* López Corral, A. (1978). Fenómenos de colapso: Estudio. L.T.M.S. N° 127.

- * Lupini, J.F., y Amundaray, J. (1990). Investigación de suelos colapsables para fundaciones de tanques. XI Seminario Venezolano de Geotecnia

- * Lutenegger, A. (1986). Dynamic compaction in friable loess. Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers.

- * Mapa político del Estado Bolívar (n.d). Recuperado en Agosto 14, 2009 de URL: <http://www.a-venezuela.com/mapas/map/html/estados/bolivar.html>

- * Mckernan, J. (2001). Investigación-acción y currículo. Madrid: Morata

- * Millán, L., y Martínez, I. (1987). Estudio sobre el fenómeno de colapso de los suelos de la región Lacustrina al Suroeste de Maracay. Trabajo Especial de grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

- * Monje Villar, O. (1981). Solos Colapsireis: un problema para engenharia de solos tropicais. Simposio Brasileiro de solos tropicais en engenharia. Rio de Janeiro

- * Morrison, L. (1969). Procedures and problems of Highway Soils Engineering on Loessial terrain in Alaska. pp 33-38.

- * Peck, R., Hanson, W., y Thorburn, T. (1983). Ingeniería de Cimentaciones. México: Editorial Limusa.

- * Priklonski, V. (1952). Gruntovedenic-Vtoraya Chast. Gosgeolzdat, Moscú.

- * Prusza, Z., Liu, B., y Choudy, T. (1977). Colapsabilidad de los suelos de Guri. Informe preparado por EDELCA.

- * Reginatto, A. (1971) Collapsible soils. Prediction of susceptibility to collapse. Memorias del 4to Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Puerto Rico: American Society of Civil Engineers.

- * Ríos, J., y Ospina, C. (1984). Suelos Colapsables. Trabajo Especial de grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

- * Sobre Condiciones de Fundación para La Central Los Olivos en Maracaibo.(1972). Ingeniería de suelos.S.A.

- * Sowers, G. (1972) Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones. México: Editorial Limusa-Willey,S.A.

- * Stamatopoulus, A., y Kotzias, P. (1990). Mejoramiento de suelos por precarga. México: Editorial Limusa. pp 15-25.

- * Suelo loesico en Hungría (n.d). Recuperado en Junio 12, 2009, de URL: <http://es.wikipedia.org/wiki/Loess>

- * Tarbuck, E., y Lutgens, F. (2005). Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología Física. España: Editorial Prentice Hall.

- * Terzaghi, K., y Peck, R. (1973). Mecánica de suelos en la Ingeniería Práctica. Segunda Edición.

- * Tschebotariof, G. (1967). Mecánica del suelo: Cimientos y Estructuras de tierras. Madrid: Aguilar Ediciones. pp 318-324.

- * Uriel, S., y Serrano, A. (1974). Propiedades Geotécnicas de los Suelos Volcánicos Colapsibles de baja densidad en la cimentación de presas en las islas canarias. Boletín de información del laboratorio del transporte y mecánica de suelo. Madrid: CEDEX.

- * Ugas, C. (1985). Ensayos de Laboratorio de Mecánica de suelos. Tercera edición. Mimiografiado. Biblioteca del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

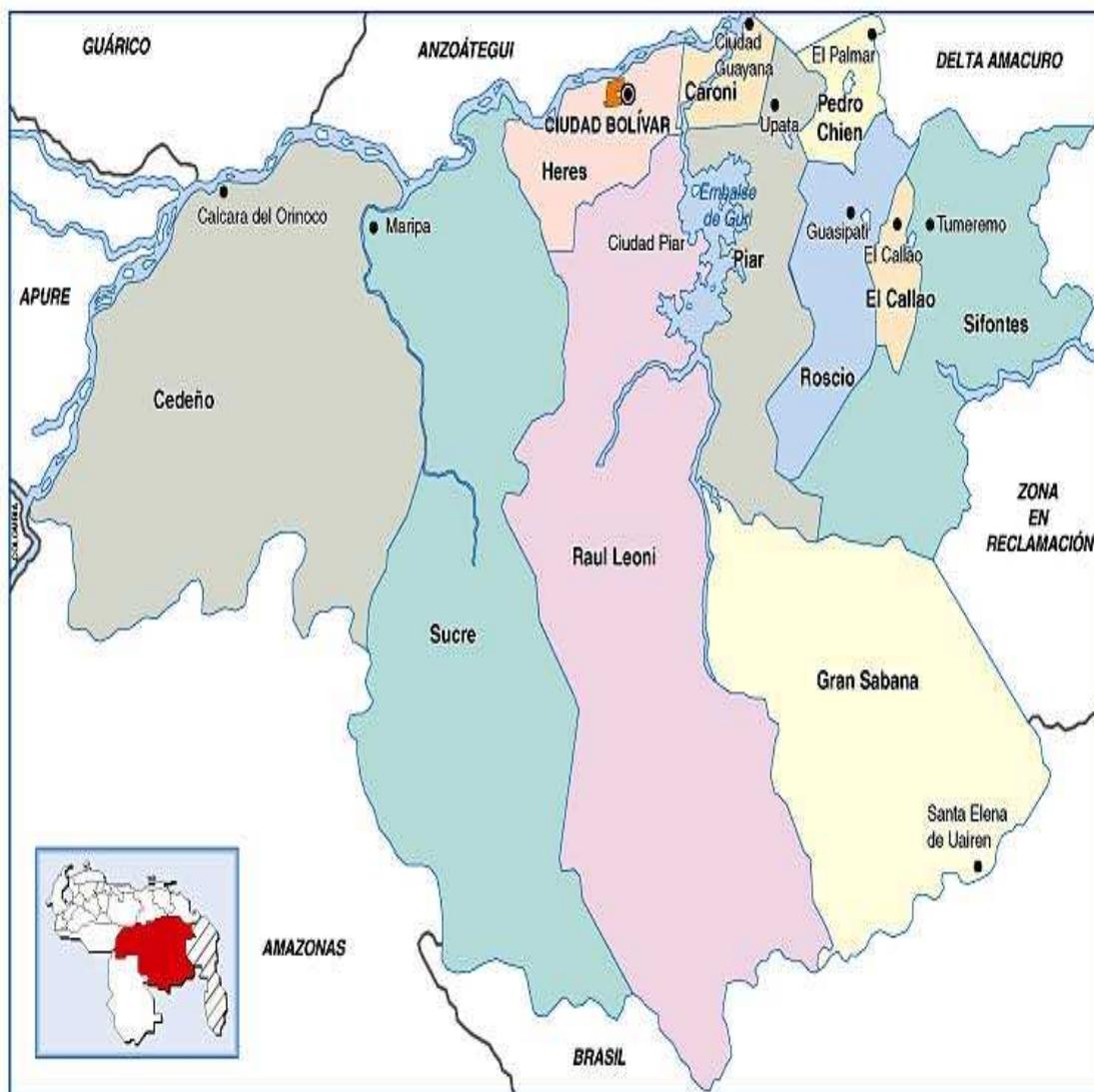
* Universidad Pedagógica Experimental Libertador. (2008). Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales. Cuarta edición. Caracas: Fondo Editorial de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador

* Venezuela tuya (n.d). Guri: Central Hidroeléctrica Simón Bolívar. Recuperado en Agosto 27, 2009 de
URL: <http://www.venezuelatuya.com/guayana/guri.htm>

ANEXOS

Anexo A: Mapa del Estado Bolívar, asociado a los antecedentes 1 y 2 de este Trabajo Especial de Grado. Tomado de:

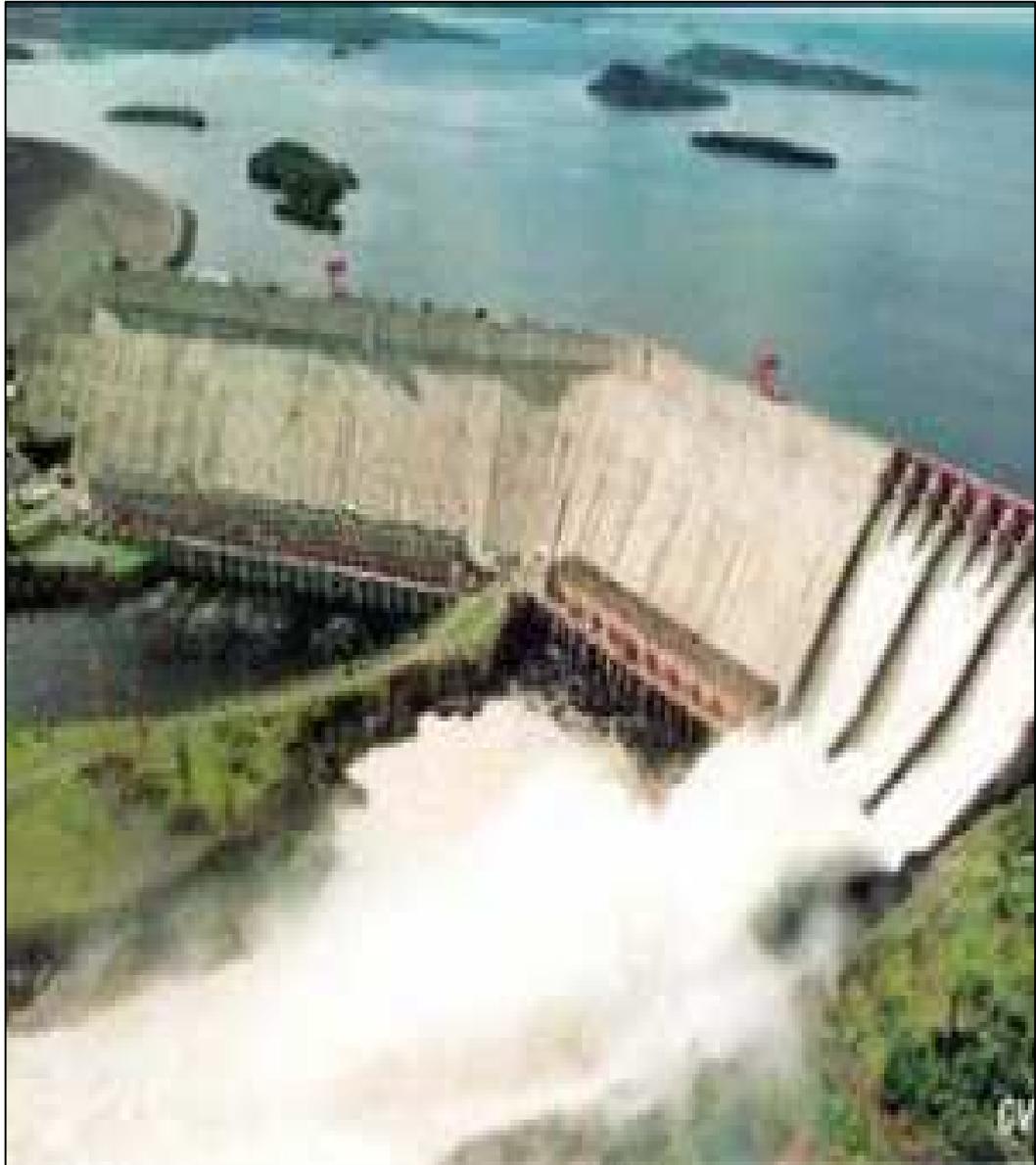
<http://www.a-venezuela.com/mapas/map/html/estados/bolivar.html>



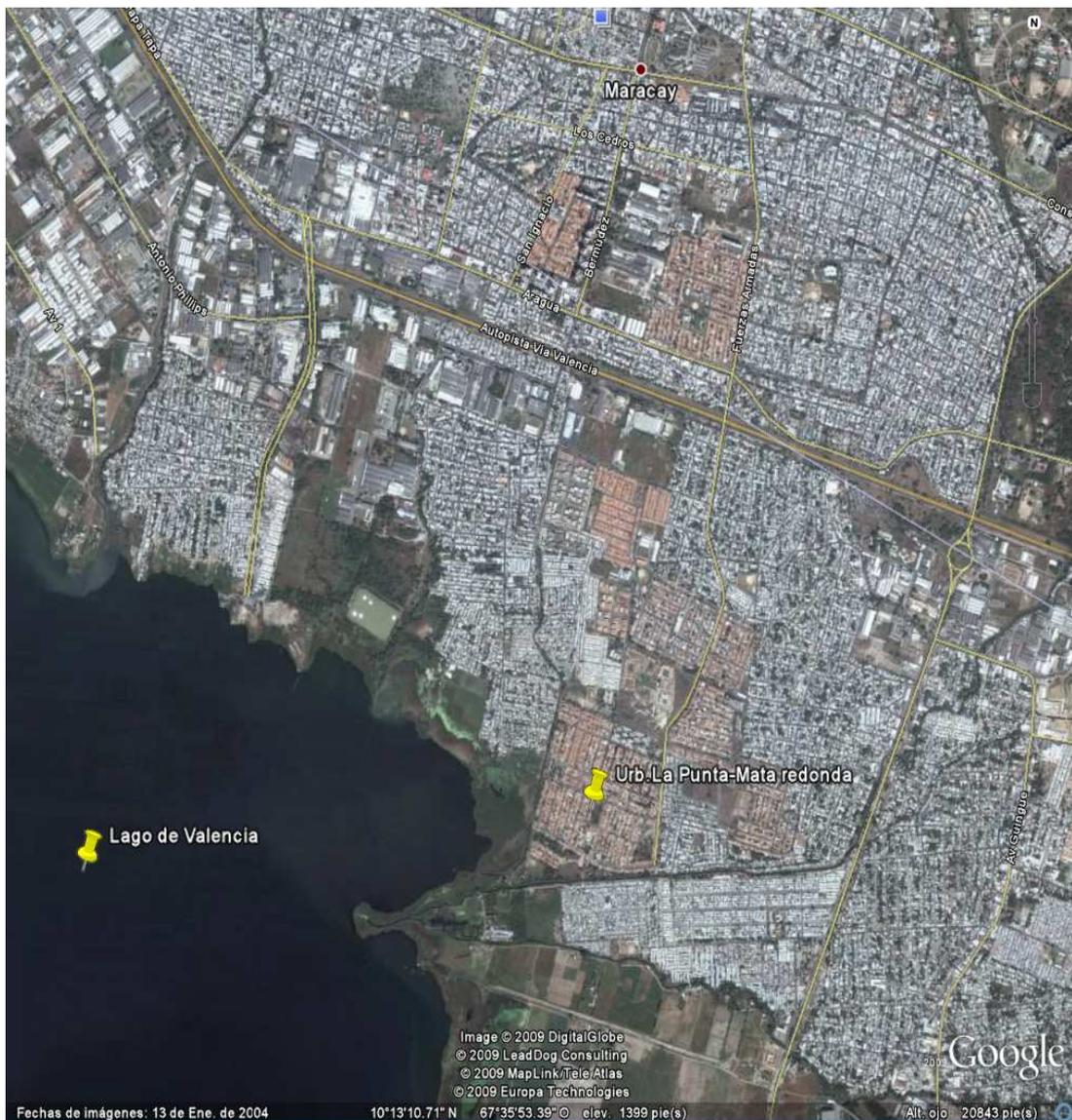
ESTADO BOLÍVAR

Anexo B: Vista de la Represa del Gurí, asociada al antecedente N° 2 de suelos colapsables encontrados en zonas aledañas a la represa

Tomado de: <http://www.venezuelatuya.com/guayana/guri.htm>



Anexo C: Ubicación de las Urbanizaciones La Punta y Mata Redonda (Estado Aragua). Tomado de: <http://earth.google.es/>



Anexo D: Ubicación Estado Aragua Venezuela, asociado al antecedente N° 3 de los suelos colapsables en la región lacustrina de Maracay.

Tomado de: <http://earth.google.es/>



Anexo E: Vista aérea del Complejo Criogénico Jose Antonio Anzoátegui, asociado al antecedente N° 4, de suelos colapsables encontrados en la Planta de Jose.

Tomado de: <http://www.arevenca.com.ve/ubicacion-proyecto/index.php>



Nombre de archivo: TEG_RAFAEL_VIELMA
Directorio: C:\Documents and Settings\Karina\Escritorio
Plantilla: C:\Documents and Settings\Karina\Datos de programa\Microsoft\Plantillas\Normal.dotm
Título: MARCO TEORICO
Asunto:
Autor: WinuE
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 25/09/2009 9:49:00
Cambio número: 58
Guardado el: 11/11/2009 19:01:00
Guardado por: Karina Paredes
Tiempo de edición: 1.148 minutos
Impreso el: 11/11/2009 19:22:00
Última impresión completa
Número de páginas: 126
Número de palabras: 25.123 (aprox.)
Número de caracteres: 138.177 (aprox.)