

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Influencia de la granulometría en la licuación de arenas

Trabajo Final de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

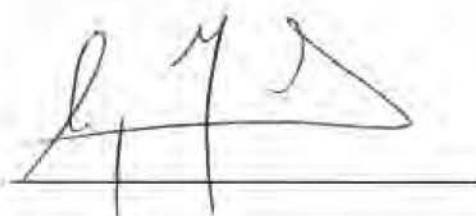
Janyz Mendoza Herrera

Director de Proyecto de Graduación:

Ing. Sergio Sáenz Aguilar, MSc.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

MIEMBROS DEL COMITÉ ASESOR



Ing. Sergio Sáenz Aguilar, MSc.

Director



Ing. Marco Valverde Mora, MSc.

Asesor



Ing. Oscar Valerio Salas

Asesor



Janyz Mendoza Herrera

Estudiante

DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL

2013, Marzo, 07

La suscrita, Janyz Mendoza Herrera, cédula 155813052423, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **A33216**, manifiesta que es autora del Proyecto Final de Graduación **Influencia de la granulometría en la licuación de arenas**, bajo la Dirección del **Ing. Sergio Sáenz Aguilar**, quién en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

AGRADECIMIENTOS

A Dios gracias, primero que todo, por darme salud y sabiduría para seguir adelante cada día, y poder terminar con éxito este proyecto de graduación.

A mi familia, por todo su apoyo incondicional, mamá, abuela y hermano, gracias por brindarme su calor familiar y su amor sincero, gracias por siempre estar conmigo en los momentos buenos y malos, los amo montones.

A mi director de tesis Ing. Sergio Sáenz Aguilar, primero que todo por haberme permitido desarrollar el tema propuesto, por guiarme en la investigación, y brindarme de sus grandes conocimientos en el área geotécnica, así como su ayuda cuando fue requerida, muchísimas gracias Don Sergio.

A mis asesores, Ing. Marco Valverde, e Ing. Oscar Valerio, por su asesoría en el presente proyecto, además de dedicarme parte de su valioso tiempo.

Agradezco la ayuda y amabilidad de los técnicos del Laboratorio de Geotecnia del LanammeUCR: Reyner Villagra, Manrique Vargas, Alfredo Marchena y Oscar Navarrete, y al jefe del Laboratorio el Ing. Oscar Valerio, gracias por brindarme su ayuda en los ensayos de laboratorio ejecutados, por guiarme en los procesos de ejecución, así como brindarme su calidez humana, muchas gracias.

Igualmente agradezco a todo el personal del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica LanammeUCR, por haberme permitido desarrollar gran parte de este proyecto en sus instalaciones, gracias a todos que directa o indirectamente colaboraron con mi persona.

A mi amigo y colega Aaron Silva, gracias por ayudarme en la realización de los ensayos a escala reducida, y gracias por brindarme su amistad y parte de su tiempo, gracias Silva.

DEDICATORIA

A mi querida mamá, por su paciencia y apoyo durante toda la carrera, que culmina con este trabajo de investigación, TQM.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 EL PROBLEMA ESPECÍFICO.....	2
1.2 IMPORTANCIA.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.4 ANTECEDENTES TEÓRICOS Y PRÁCTICOS DEL PROBLEMA.....	4
1.5 ALCANCE Y LIMITACIONES.....	6
1.5.1 <i>Alcances</i>	6
1.5.2 <i>Limitaciones</i>	6
1.6 METODOLOGÍA.....	7
2. EL FENÓMENO DE LICUACIÓN EN ARENAS.....	12
2.1 DEFINICIÓN DEL FENÓMENO DE LICUACIÓN.....	12
2.2 TIPOS DE INESTABILIDAD ESTRUCTURAL ORIGINADOS POR LA LICUACIÓN.....	13
2.2.1 <i>Desplazamiento o corrimiento lateral</i>	13
2.2.2 <i>Oscilación del terreno</i>	14
2.2.3 <i>Falla de flujo</i>	15
2.2.4 <i>Pérdida de la capacidad de soporte</i>	16
2.3 FACTORES QUE INCIDEN EN LA OCURRENCIA Y DESARROLLO DEL FENÓMENO DE LICUACIÓN.....	16
2.4 METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN SEGÚN EL C.C.C.R.....	18
2.4.1 <i>Métodos de grado 1</i>	18
2.4.2 <i>Métodos de grado 2</i>	20
2.4.3 <i>Métodos de grado 3</i>	21
3. INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA DE LOS SUELOS.....	27
3.1 GRANULOMETRÍA DE LOS SUELOS.....	27
3.1.1 <i>Definición e importancia del análisis granulométrico</i>	27
3.1.2 <i>Grupos de tamaños de partículas</i>	27
3.2 CURVA GRANULOMÉTRICA.....	29
3.3 APLICACIONES DE LAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS.....	33
3.3.1 <i>Tamaños específicos de partículas</i>	34

3.3.2	<i>Granulometría y clasificación de arenas y gravas.....</i>	<i>34</i>
3.4	APLICACIONES DEL ANÁLISIS DE GRANULOMETRÍA EN LA PRÁCTICA INGENIERIL.....	37
3.4.1	<i>Limitaciones del análisis de granulometría y clasificación.....</i>	<i>39</i>
3.5	INVESTIGACIONES Y METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE LICUACIÓN BASADAS EN ENSAYOS "IN SITU".....	39
3.6	INVESTIGACIONES Y METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE LICUACIÓN BASADAS EN ENSAYOS DE LABORATORIO.....	40
3.6.1	<i>Efecto de la gradación según investigaciones de Chang (1987) y Koester (1993). ..</i>	<i>44</i>
4.	ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA.....	52
4.1	DEFINICIÓN DE MODELOS DE ENSAYO A ESCALA REDUCIDA.....	52
4.2	MESAS VIBRATORIAS.....	52
4.2.1	<i>Reseña histórica y uso actual.....</i>	<i>53</i>
4.2.1	<i>Ventajas y limitaciones de las mesas vibratorias.....</i>	<i>58</i>
4.3	TIPOS DE CAJAS UTILIZADAS EN ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA.....	59
4.3.1	<i>Distorsión del campo de tensiones globales.....</i>	<i>59</i>
4.3.2	<i>Modificación del campo deformacional.....</i>	<i>59</i>
4.3.3	<i>Generación de ondas reflejadas en las paredes.....</i>	<i>60</i>
4.4	FACTORES DE ESCALA PARA INTERPRETACIÓN DE LOS ENSAYOS.....	60
5.	RESULTADOS DE ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA.....	64
5.1	DEFINICIÓN DE MODELO DE ENSAYO A ESCALA REDUCIDA.....	64
5.2	EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO EN LOS ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA.....	66
5.2.1	<i>Suelos ensayados.....</i>	<i>66</i>
5.2.2	<i>Resultados granulométricos.....</i>	<i>74</i>
5.2.3	<i>Equipo de vibración.....</i>	<i>78</i>
5.2.4	<i>Caja de ensayos.....</i>	<i>80</i>
5.2.5	<i>Sobrecarga.....</i>	<i>81</i>
5.3	FACTORES DE ESCALA.....	82
5.4	PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA.....	83
5.4.1	<i>Preparación de materiales.....</i>	<i>83</i>
5.4.2	<i>Guía de ejecución de ensayos a escala reducida en arenas.....</i>	<i>85</i>
5.5	RESULTADOS ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA.....	89
5.5.1	<i>Ensayo con arena de río al 100%.....</i>	<i>89</i>

5.5.2 Ensayo con arena de playa al 100%.....	92
5.5.3 Ensayo combinación 50% arena de río con 50% arena de playa.....	94
5.5.4 Ensayo combinación 30% arena de río con 70% arena de playa.....	96
5.5.5 Ensayo combinación 75% arena de río con 25% arena de playa.....	98
5.5.6 Ensayo combinación 15% arena de río con 85% arena de playa.....	101
6. EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA EN LA LICUACIÓN DE ARENAS.....	104
6.1 INTERPRETACIÓN DE LOS ENSAYOS DE LOS MODELOS A ESCALA REDUCIDA.....	104
6.2 ANÁLISIS DE LAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS DE LOS MODELOS.....	104
6.3 RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA.....	107
6.3.1 Modelos con granulometría bien gradada.....	107
6.3.2 Modelos con granulometría medianamente gradada.....	109
6.3.3 Modelos con granulometría mal gradada.....	110
6.4 INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LOS ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA.....	111
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	116
7.1 CONCLUSIONES.....	116
7.2 RECOMENDACIONES.....	117
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Metodología utilizada en el proyecto de investigación.....	8
Figura 2.1: Representación de los granos de suelo durante el fenómeno de licuación, las flechas naranjas indican el aumento de la presión de poro, y a su vez la flechas negras indican la reducción de la tensión efectiva.....	12
Figura 2.2: Ejemplo desplazamiento lateral de falla del terreno debido a la licuación.....	14
Figura 2.3: Ejemplo de la falla por oscilación del terreno debido a la licuación.....	15
Figura 2.4: Ejemplo de falla de flujo producida por licuación.....	15
Figura 2.5: Ejemplo falla por pérdida de la capacidad de soporte durante la licuación de un suelo.....	16
Figura 2.6: Distancia del epicentro hasta el sitio más lejano donde ocurrió licuación, R, para magnitudes de onda superficiales, Ms.....	19
Figura 2.7: Factor de reducción para estimar la variación del esfuerzo cíclico cortante con la profundidad.....	22
Figura 2.8: Relación entre la Razón de Esfuerzos Cíclico (CSR) que causa licuación y el valor $(N_1)_{60}$ para arenas limpias, $M=7,5$	23
Figura 2.9: Relación entre la Razón de Esfuerzo Cíclico (CSR) que causa licuación y el valor $(N_1)_{60}$ para arenas limosas, $M=7,5$	24
Figura 3.1: Intervalo de tamaños de partículas de acuerdo con algunos sistemas de clasificación de suelos.....	29
Figura 3.2: Representación esquemática del análisis granulométrico con tamices.....	30
Figura 3.3: Curva de distribución acumulada de tamaños de partículas de una arena.....	33
Figura 3.4: Ejemplo de curvas granulométricas para arenas y gravas.....	35
Figura 3.5: Ensamble de partículas idealizado de Fuller (representación bidimensional).....	36
Figura 3.6: Granulometría de algunos suelos que han sufrido licuación basados en investigaciones y metodologías de evaluación de susceptibilidad a la licuación.....	43
Figura 3.7: Variación del tamaño de grano con porcentaje de fino para suelos licuables en Japón.....	43
Figura 3.8: Gradación de suelos, probado por Lee y Fitton (1969).....	44
Figura 3.9: Gradación de arenas patrón utilizadas en investigación de Koester (1993).....	46
Figura 3.10: Curvas de resistencia triaxial cíclica para mezclas de arenas medias.....	48

Figura 3.11: Curvas de resistencia triaxial cíclica para mezclas de arenas finas y arenas bien graduadas.....	49
Figura 3.12: Razones de esfuerzos triaxiales cíclicos para causar licuación en 30 ciclos para las mezclas de arena finas.....	50
Figura 4.1: Diagrama de mesa vibratoria de Milne, (1890).....	54
Figura 4.2: Mesa vibratoria diseñada y usada por F.J. Rogers para estudio dinámicos de suelos.....	54
Figura 4.3: Mesa vibratoria con péndulo, propuesta por Jacobsen.....	55
Figura 4.4: (A) Maqueta a escala reducida de un edificio, (B) mesa vibratoria utilizada para estudiar el desempeño de edificios.....	56
Figura 4.5: Diseño de mesa vibratoria de la UC Berkeley.....	57
Figura 4.6: Mesa vibratoria "E-Defense" instalada en Japón, lista para ensayar una casa a gran escala.....	58
Figura 5.1: Diseño de modelo de ensayo, (A) vista isométrica, (B) vista superior, (C) vista en plana y (D) vista del interior.....	65
Figura 5.2: Arena de río de Guápiles (izquierda) y arena de playa Esterillos (derecha) utilizadas para los ensayos de escala reducida.....	67
Figura 5.3: Ejemplo de método gráfico de la araña.....	70
Figura 5.4: Cálculo de límites prácticos a partir de límites teóricos.....	71
Figura 5.5 Curvas granulométricas de arena de río y arena de playa.....	76
Figura 5.6: Curvas granulométricas de arenas de río y playa limpias y curvas obtenidas por sus correspondientes combinaciones.....	77
Figura 5.7: Curvas granulométricas a ser utilizadas en los ensayos a escala reducida.....	78
Figura 5.8: Equipo vibratorio del LanammeUCR.....	80
Figura 5.9: Bloques de cemento utilizado en ensayos a escala reducida (A) bloque utilizado en el primer nivel de pirámide, (B) bloque utilizado en segundo, tercer y cuarto nivel de pirámide.....	82
Figura 5.10: Arena colocada en bandeja y puesta al horno a 110°C.....	84
Figura 5.11: Balanza utilizada para calcular el peso de las muestras de arenas a ser combinadas.....	86
Figura 5.12: Mezcla de arena de playa (A) con arena de Río (B), para obtener una mezcla de proporción 50/50 (C).....	86

Figura 5.13: Depositación y saturación de material ensayado.....	87
Figura 5.14: Proceso para determinar el peso volumétrico de las muestras ensayadas a escala reducida.....	88
Figura 5.15: Colocación de bloques de cemento (simulación de sobrecarga).....	89
Figura 5.16: Resultado del modelo a escala con arena de río 100%. (A) Fachada norte, (B) fachada este, (C) fachada sur, (D) fachada oeste.....	90
Figura 5.17: Separación de bloques tras el paso de simulación de ondas sísmicas.....	92
Figura 5.18: Resultado del modelo a escala con arena de playa 100%. (A) Fachada norte, (B) fachada este, (C) fachada sur, (D) fachada oeste.....	93
Figura 5.19: Resultado del modelo a escala combinación 50/50. (A) Fachada norte, (B) fachada este, (C) fachada sur, (D) fachada oeste.....	95
Figura 5.20: Resultado del modelo a escala combinación 30/70. (A) Fachada norte, (B) fachada este, (C) fachada sur, (D) fachada oeste.....	97
Figura 5.21: Resultado del modelo a escala combinación 75/25. (A) Fachada norte, (B) fachada este, (C) fachada sur, (D) fachada oeste.....	99
Figura 5.22: Separación de bloques producto de la vibración. (A) Imagen ampliada de la separación entre bloques, (B) vista superior del modelo después del paso de ondas sísmicas	100
Figura 5.23: Resultado del modelo a escala combinación 15/85. (A) Fachada norte, (B) fachada este, (C) fachada sur, (D) fachada oeste.....	101
Figura 6.1: Comparación de curvas granulométricas de los modelos ensayados con los rangos establecidos por el C.C.C.R.....	105
Figura 6.2: Gráfico de la relación entre el coeficiente de uniformidad y el asentamiento máximo producido en los modelos a escala reducida.....	112
Figura 6.3: Gráfico de la relación entre módulo de finura y el asentamiento máximo producido en los modelos a escala reducida.....	112

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1: Criterios de Iwasaki para evaluar el potencial de licuación.....	20
Cuadro 2.2: Valor de N según el Código Chino.....	25
Cuadro 3.1: Intervalo de tamaños de partículas de acuerdo con algunos sistemas de clasificación de suelos.....	28
Cuadro 3.2: Conjunto completo de tamices estándar.....	31
Cuadro 3.3: Conjunto de tamices para obtener un espaciamiento uniforme de puntos.....	31
Cuadro 3.4: Coeficientes de uniformidad y curvatura para los suelos de la Figura 3.4.....	37
Cuadro 3.5: Gradación de arenas patrón.....	45
Cuadro 4.1: Factores de escala para ensayos a escala reducida en mesas vibratorias.....	61
Cuadro 5.1: Propiedades físicas de las arenas patrón ensayadas.....	67
Cuadro 5.2: Ejemplo de datos granulométricos utilizados para la realización del método de la araña.....	69
Cuadro 5.3: Corroboración de cumplimiento de porcentajes de límites prácticos.....	71
Cuadro 5.4: Ejemplo utilizado para realizar una combinación por el método de tanteos.....	72
Cuadro 5.5: Porcentajes a utilizar en las combinaciones de arenas de los ensayos a escala reducida.....	73
Cuadro 5.6: Resultados de ensayos de gravedad específica (ASTM D 854-10).....	74
Cuadro 5.7: Resultados de peso volumétrico.....	74
Cuadro 5.8: Resultados de análisis granulométrico de las arenas de río y playa en estado limpio.....	75
Cuadro 5.9: Resultados de análisis granulométrico para los diferentes porcentajes de combinaciones de arena de río y playa.....	76
Cuadro 5.10: Factores de escala a utilizar en los resultados de ensayos de los modelos a escala reducida.....	83
Cuadro 5.11: Cantidad de kilogramos para combinaciones de arena de río y playa.....	84
Cuadro 5.12: Resultados del ensayo a escala reducida con arena de río al 100%.....	91
Cuadro 5.13: Resultados del ensayo a escala reducida con arena de playa al 100%.....	94
Cuadro 5.14: Resultados del ensayo a escala reducida combinación 50/50.....	96
Cuadro 5.15: Resultados del ensayo a escala reducida combinación 30/70.....	98
Cuadro 5.16: Resultados del ensayo a escala reducida combinación 75/25.....	100
Cuadro 5.17: Resultados del ensayo a escala reducida combinación 15/85.....	102

Cuadro 6.1: Tamaños de partículas y caracterización de las curvas granulométricas.....	106
Cuadro 6.2: Resumen de resultados de los ensayos a escala reducida.....	108

Mendoza Herrera, Janyz

Influencia de la granulometría en la licuación de arenas

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José. C.R.:

J. Mendoza H., 2013

XIV, 123 h.: ils. col. – 31 refs.

RESUMEN

Se determinó la influencia de la granulometría en la licuación de arenas, mediante la realización de ensayos a escala reducida, variando gradaciones de arenas sueltas y saturadas.

Se investigaron metodologías que evalúan el potencial de licuación, además de la influencia granulométrica y del uso de ensayos a escala reducida en mesas vibratorias. Se utilizó arena de río de Guápiles y arena de playa Esterillos, las cuales fueron combinadas por peso, obteniendo cuatros combinaciones de arenas con distintas granulometrías. Se realizaron ensayos de granulometría, gravedad específica, y límites de Atterberg a las muestras seleccionadas. Se ejecutaron ensayos a escala reducida, utilizando una mesa vibratoria, la cual simulaba las ondas de un sismo. Tras la aplicación de vibración se observó si el modelo de ensayo sufrió licuación, para luego determinar cualitativamente el efecto granulométrico (mal, medianamente y bien gradado) sobre la licuación.

Cuatro de los seis ensayos a escala reducida, sufrieron licuación, el fenómeno se presentó en las arenas sueltas con mala gradación y las medianamente gradadas. Se comprobó que los finos (porcentaje pasando la malla N° 200) de las arenas en estudio, correspondían a finos no plásticos. Se concluyó que las arenas sueltas bien gradadas atenúan el fenómeno de licuación; mientras que las arenas sueltas, uniformes y finas son potencialmente licuables. Por otro lado las arenas sueltas medianamente gradadas, aminoraron el fenómeno de licuación, reduciendo los daños causados por dicho fenómeno, sin embargo también se consideran potencialmente licuables. Se concluyó que a mayor valor de C_u , menores son los asentamientos producidos por el fenómeno de licuación, y arenas con valores de C_u menores a seis son potencialmente licuables. J.M.H.

Palabras claves: GRANULOMETRÍA, ARENAS, LICUACIÓN, SISMOS, ESCALA REDUCIDA

Ing. Sergio Sáenz Aguilar, MSc.

Escuela de Ingeniería Civil

Capítulo 1: Introducción

1. INTRODUCCIÓN

1.1 El Problema específico

El fenómeno de licuación es un tema complejo que se presenta en la naturaleza bajo ciertas condiciones de los materiales saturados y en presencia de un sismo, de fundamental interés en ser evaluado en zonas que podrían ser susceptibles a este fenómeno, zonas con suelos en los cuales predominen los limos y las arenas con algunas características particulares. Este fenómeno que transforma algunos suelos originalmente sólidos en líquidos viscosos es mencionado en los libros de ingeniería sísmica y de ingeniería de fundaciones, pero es un tema que muchas veces se deja a un lado en la práctica de ingeniería civil. Como ingenieros civiles debemos tener el conocimiento de las ventajas y desventajas del suelo donde se cimentaran las obras civiles, para brindar seguridad a la estructura y a las personas que la habiten.

Para tratar de definir el riesgo de licuación se han desarrollado metodologías, basadas tanto en resultados de ensayos "in situ" como de laboratorio. Los métodos más utilizados que evalúan el potencial de licuación, correlacionan el comportamiento de los suelos observados en sismos anteriores, con las propiedades del terreno determinadas, mediante ensayos de campo. Dicha evaluación de susceptibilidad a la licuación, implica el uso de numerosas variables, dependientes del terreno y del sismo considerado; por lo cual resulta complicado establecer cuál es el método más apropiado (Henríquez, 2007).

Las investigaciones que se han llevado a cabo con respecto al fenómeno de licuación en Costa Rica son escasas, siendo éste un tema de investigación importante debido a la alta sismicidad del país, y de haberse presentado el fenómeno en zonas costeras de Costa Rica.

Dado que la granulometría es un factor influyente en el fenómeno de licuación, y que se ha demostrado que las arenas finas y uniformes están más propensas a este fenómeno, es significativo desarrollar y conocer más a fondo la variación granulométrica de diferentes tipos de arenas, y su relación con la aparición del fenómeno.

Debido a que las metodologías existentes se basan en un rango amplio en la influencia granulométrica, es importante conocer el efecto que se produce en una arena bien, medianamente o mal gradada sobre la susceptibilidad de un suelo a la licuación.

1.2 Importancia

Los casos históricos de licuación se comenzaron a notar a partir de los terremotos de Niigata (Japón), Valdivia (Chile) y Anchorage (Alaska) en 1964, y en nuestro país con el terremoto de Limón en 1991. En estos acontecimientos se perdieron vidas humanas, y se tuvieron pérdidas millonarias en infraestructura urbana. En el caso de Limón se observaron daños estructurales severos en varias edificaciones, la refinería de petróleo, muelles, puentes, entre otros.

Costa Rica es un país con altos niveles de amenaza sísmica y posee zonas cuya geología muestra depósitos de arenas saturadas susceptibles a la licuación, sobre las cuales es necesario desarrollar asentamientos humanos y estructuras industriales. Por lo tanto es importante realizar investigaciones que brinden información de los suelos arenosos, que como se mencionó anteriormente están más propensos a comportarse como líquidos viscosos debido a la pérdida de resistencia al corte durante un sismo. Además de pensar hacia el futuro cercano en fundaciones para estructuras o en diseños geotécnicos en sitios con tales características, debe realizarse un análisis racional y lo más detallado posible de la amenaza por licuación del suelo.

Al determinar la influencia granulométrica en la licuación y variando las curvas granulométricas de suelos arenosos, se establecerá una guía para tomar en cuenta la granulometría, y no restringirse al rango típico de curvas granulométricas que se pueden encontrar en los libros de ingeniería de cimentaciones.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar la influencia de la granulometría de arenas en el fenómeno de licuación, mediante la realización de ensayos a escala reducida.

1.3.2 Objetivos específicos

- Investigar las metodologías para la evaluación del potencial del fenómeno de licuación y la influencia de la granulometría en este fenómeno.
- Realizar una selección de diferentes arenas con variaciones en su granulometría.
- Realizar diferentes mezclas de arenas, a fin de satisfacer diferentes granulometrías.
- Realizar pruebas de granulometría, gravedad específica y peso volumétrico a las muestras de suelos seleccionadas y mezcladas.
- Indagar sobre el uso de modelos a escala reducida sobre mesas vibratorias.
- Realizar ensayos a escala reducida en mesa vibratoria, utilizando distintas muestras de suelos arenosos con variación de sus respectivas curvas granulométricas. Así se trabajará con curvas que clasifiquen como: bien, medianamente y mal gradadas.
- Analizar teóricamente la influencia de la granulometría en el fenómeno de licuación de arenas.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los resultados teóricos, para determinar el efecto de la granulometría en la licuación de arenas.

1.4 Antecedentes teóricos y prácticos del problema

En el siglo XX, se empezó a investigar más a fondo el fenómeno de licuación, desarrollando metodologías para el estudio sistemático del potencial de licuación. El estudio de este fenómeno ha partido básicamente de los acontecimientos en los cuales se ha presentado licuación de suelos debido a terremotos que han causado destrozos de la infraestructura de ciudades importantes a nivel mundial (Obando, 2009). Debido a estos eventos hoy en día se presta gran importancia a los estudios de los suelos que puedan ser susceptibles a la licuación.

El Código de Cimentaciones de Costa Rica (C.C.C.R), toma como referencia las metodologías Seed e Idriss (1975); Kuribayashi y Tatsuoka (1975); Ambraseys (1988) y Wakamatsu (1991), las cuales predicen el potencial de licuación. Así el C.C.C.R las explica según el nivel de detalle que se alcance, y las clasifica en Grado 1, 2 y 3.

En nuestro país se han desarrollado investigaciones sobre el fenómeno de licuación, las cuales están dirigidas principalmente a la zonificación del potencial de este fenómeno (Hernández, 2010). A partir de lo ocurrido en Limón en 1991, ingenieros geotecnistas nacionales se preocuparon por estudiar este fenómeno. Laporte, G. (1995), realizó una investigación de las metodologías analíticas y empíricas para la evaluación de licuación; Hafström, P. y Skogsberg, J. (1994), determinaron el factor de seguridad contra licuación con el método de Seed e Idriss, para diferentes sitios donde ocurrió licuación en el terremoto de Limón.

En la última década se realizaron en la Universidad de Costa Rica, trabajos finales de graduación orientados al tema de la licuación, en los cuales se realizaron mapas de zonificación de las regiones de la península de Nicoya, pacífica central y atlántica. Los autores de estos trabajos fueron Chacón, S. (2002), Hernández, E. (2002) y Araya, A. (2003), respectivamente.

Un precedente importante a este trabajo final de graduación, es la tesis de Hernández, I. (2010), que introduce el uso de ensayos a escala reducida, para determinar la influencia del porcentaje de finos en el fenómeno de licuación. Utiliza un concepto diferente a los trabajos

anteriormente realizados, debido a la utilización de una mesa vibratoria para la ejecución de ensayos a escala reducida.

La influencia granulométrica se ha investigado en temas ajenos de la ingeniería geotécnica, como por ejemplo la investigación realizada en el área de ingeniería de transportes sobre la influencia granulométrica, Azofeifa, C. (1979), quien determinó la influencia de la granulometría en la resistencia retenida de mezclas asfálticas. Sin embargo, la influencia de la granulometría en la licuación de los suelos no se había investigado todavía. Se han realizado estudios en los que se utilizaron diferentes gradaciones de arenas, realizando pruebas para observar la susceptibilidad de licuación ante la variante del contenido de finos y plasticidad (Hernández, 2010).

1.5 Alcances y limitaciones

1.5.1 Alcances

- El proyecto se basa en un análisis teórico-experimental de la influencia granulométrica en la licuación de arenas, para ello se ensayaron solamente arenas sueltas mal, medianamente y bien gradadas.
- Se utilizó solamente arena de "río" y arena de "playa" obtenidos de suelos de Costa Rica. Se realizan diferentes mezclas de las arenas recolectadas, para obtener los distintos efectos de gradación que se mencionaron anteriormente.
- Se realizaron solamente ensayos de granulometría, gravedad específica, peso volumétrico y ensayos a escala reducida a las arenas y mezclas seleccionadas. Los ensayos de granulometría vía hidrómetro no se ejecutaron, debido a que estos se utilizan para caracterizar el comportamiento de suelos finos (arcillas y limos).
- Solamente se realizaron ensayos de Límites de Atterberg, a las arenas de río y playa, no combinadas.

- La investigación pretende estimar solamente de manera cualitativa los daños que se produzcan por el fenómeno de licuación, considerando los daños como: graves o severos, considerables, leves o despreciables.
- La investigación propuesta se realiza únicamente simulando niveles superficiales de cimentación, debido a las características de la caja de ensayo utilizada.

1.5.2 Limitaciones

- La principal limitante que se presenta en el trabajo proviene de la utilización de la mesa vibratoria del LanammeUCR, en la cual se realizaron los ensayos a escala reducida. La vibración que se produce no representa exactamente los movimientos de un sismo real, debido a que el dispositivo que hace vibrar la mesa, emite solo una onda sinusoidal.
- La mesa vibratoria presenta restricciones respecto al peso que deba ser colocado, por lo cual limita la utilización de material a ser ensayado. Esto además implica una restricción en la construcción de los modelos a escala reducida, debido a que las dimensiones y peso de los materiales deben ser controlados.
- No se cuenta con equipo adecuado para medir aceleraciones, frecuencias, medidores de deformación y desplazamientos de la mesa vibratoria utilizada.
- No se cuenta con medidores de deformación adecuados para medir los asentamientos sufridos por la sobrecarga del modelo, debido a la licuación.

1.6 Metodología

La metodología seguida para la elaboración del proyecto propuesto se muestra en la Figura 1.1, y consta de las siguientes fases: fase teórica, fase experimental y fase de análisis.

Se detalla a continuación cada fase:

Fase teórica: En esta fase se realizó todo lo relacionado con la consulta bibliográfica, las respectivas investigaciones teóricas respecto al tema y al objetivo que se debe cumplir. Esto

es necesario para la realización de los capítulos 1, 2, 3 y 4 e inclusive el capítulo 5 del contenido del trabajo.

Durante la consulta bibliográfica se recopiló material de libros y tesis, disponible en la Biblioteca Luis Demetrio Tinoco de la Universidad de Costa Rica. Además de búsqueda de información por medio de internet.

Se investigaron los tres temas fundamentales que forman el contenido del proyecto en desarrollo. Se investigó además, sobre las metodologías para evaluar el potencial de licuación, que se clasifican según el nivel de detalle que se alcance, en grado 1, 2 y 3 (C.C.C.R, 2009).

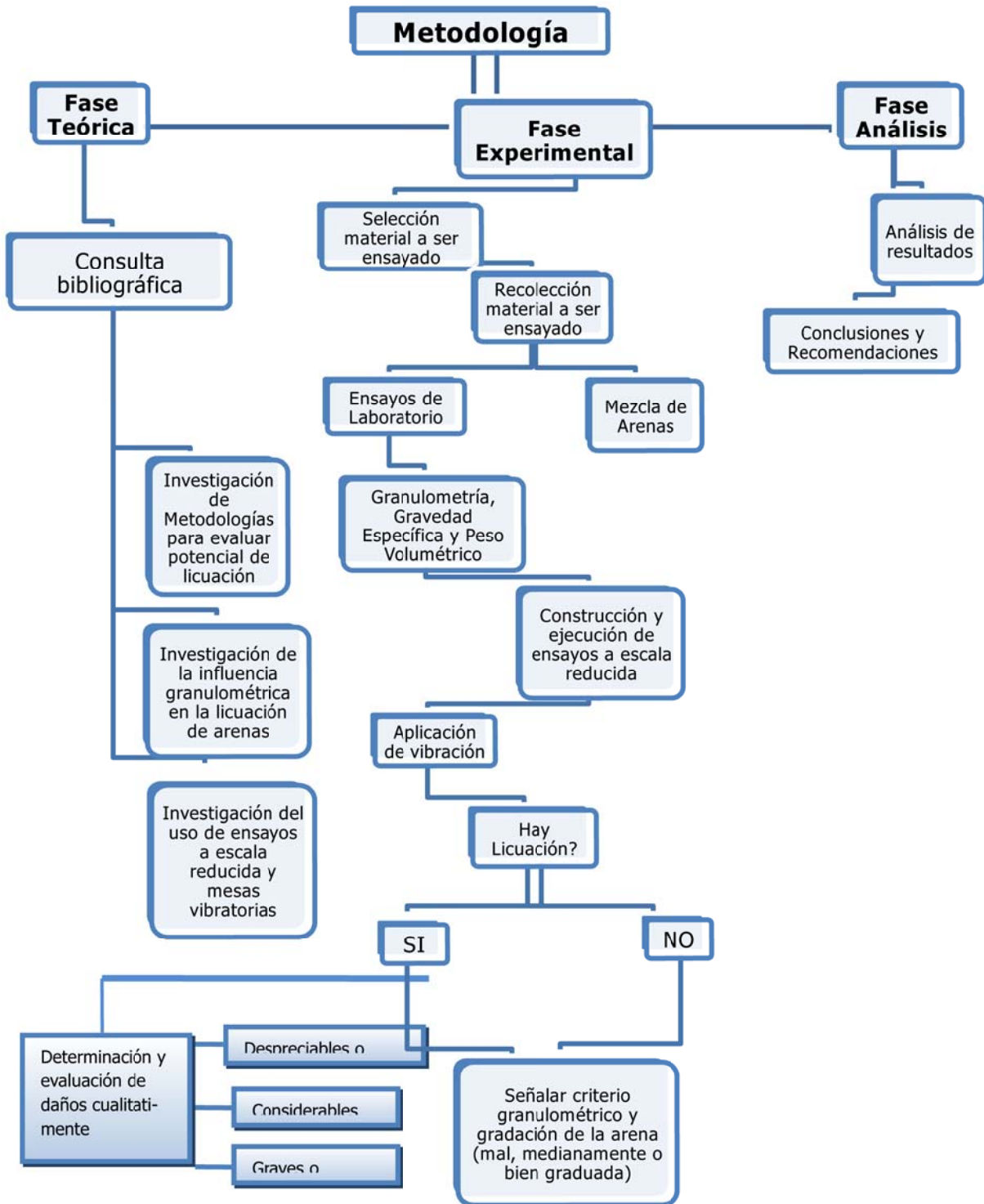


Figura 1.1: Metodología utilizada en el proyecto de investigación

Se investigó también la influencia granulométrica en la licuación de arenas, además de la aplicación del análisis de granulometría en otras prácticas de la ingeniería civil.

Otro tema indagado fue el uso de ensayos a escala reducida y mesas vibratorias. Se buscó información sobre las características de los ensayos a escala reducida, cómo se interpretan los resultados en dichos ensayos, que elementos se utilizan para llevarlos a cabo, y cuál es el procedimiento a seguir.

Fase experimental: La fase del desarrollo experimental del trabajo inició cuando se procedió a seleccionar los materiales a ser ensayados. Este paso se realizó con ayuda de los asesores y del director de tesis, además de consultar mapas de zonificación de suelos de Costa Rica. Una vez seleccionados los materiales, se procedió a la búsqueda y recolección de los materiales. La ubicación de los suelos a ser ensayados formó parte de la selección del material a utilizar.

Se utilizó arena de playa de Esterillos, Puntarenas, y arena de río de Guápiles, Limón. Para obtener diferentes variaciones de gradaciones, se mezclaron las arenas recolectadas en el laboratorio, mediante distintos porcentajes de arena de río y playa, para lograr notar la influencia de la granulometría en la licuación de arenas. Para ello se realizaron en primera instancia ensayos granulométricos a las arenas recolectadas.

Una vez que los materiales fueron seleccionados y mezclados, se procedió a realizar ensayos de laboratorio para caracterizar las arenas en estudio. Las pruebas realizadas fueron: análisis granulométrico, gravedad específica y peso volumétrico. Se construyeron las respectivas curvas granulométricas para verificar que se obtuvieran diferentes graduaciones, tanto de las arenas recolectadas como de las combinaciones realizadas. Se realizaron seis ensayos para cada una de las pruebas mencionadas anteriormente.

Una vez que los materiales estuvieron caracterizados, se procedió a la construcción y ejecución de los ensayos a escala reducida. Los elementos constituyentes del modelo a escala reducida fueron los siguientes:

- Arenas con diferentes granulometrías
- Equipo de vibración
- Caja para ensayos
- Sobrecarga en el terreno

El equipo de vibración utilizado en el proyecto, se encontró en las instalaciones del Laboratorio de materiales y modelos estructurales de la Universidad de Costa Rica,

LanammeUCR. El dispositivo de la mesa vibratoria genera una señal sinusoidal, y su vibrador trabajó a 3600 vibraciones por minuto; lo cual representó una frecuencia de 60 Hz, según datos de fábrica. La amplitud de vibración fue ampliada y reducida por medio de un reóstato.

La caja de ensayos utilizada en el modelo reducido, está conformada por láminas de hierro cortadas y torneadas, formando una caja rígida con de dimensiones 40cm x 40 cm x 35 cm. Para simular el efecto de una estructura en el terreno se construyó una pirámide conformada por bloques de cemento de 5 cm de lado.

Una vez listo los elementos que conformaban el modelo, se introdujo la vibración mediante la mesa vibratoria. Después se observó si ocurría el fenómeno de licuación para cada material ensayado con distintas gradaciones, seguidamente se realizó lecturas de asentamientos producidos en cada sector del modelo, y se determinó el efecto o nivel de daño generado por la licuación. Posteriormente se identificó si la granulometrías de la arena: mal, medianamente, o bien graduada, produjo o no licuación en los ensayos. Se utilizaron factores de escala reducida, para dar validez a los resultados.

Fase de análisis: Se analizaron y compararon los resultados obtenidos, respecto a sus características granulométricas, dentro de las que destacaron el coeficiente de uniformidad, módulo de finura, y diferentes tamaños de partículas respecto al porcentaje pasando, D_{50} , D_{10} , D_{30} y D_{60} .

Con el análisis y la comparación de resultados se proporcionan conclusiones y recomendaciones respecto a cómo influyó la granulometría de diferentes arenas en el fenómeno de licuación; esto mediante la utilización de los modelos a escala reducida para determinar dicho fenómeno.

Capítulo 2. El Fenómeno de Licuación en Arenas

2. EL FENÓMENO DE LICUACIÓN EN ARENAS

2.1 Definición del fenómeno de licuación

La licuación o licuefacción se produce cuando depósitos constituidos por materiales como arcillas saturadas muy sensibles, arenas secas sueltas y arenas saturadas (sobre todo las de baja compactación), son afectados por el paso de ondas sísmicas, produciendo una pérdida de la resistencia al corte; comportándose así como si fuera un líquido viscoso.

Durante el paso de las ondas sísmicas, que resultan ser una fuerza cíclica sin drenaje, las arenas sueltas afectadas por el movimiento disminuyen su volumen y se produce un aumento rápido en la presión de poro. Esto a su vez produce una disminución de la resistencia al corte, lo que da origen a una reducción de la tensión efectiva (ver Figura 2.1).

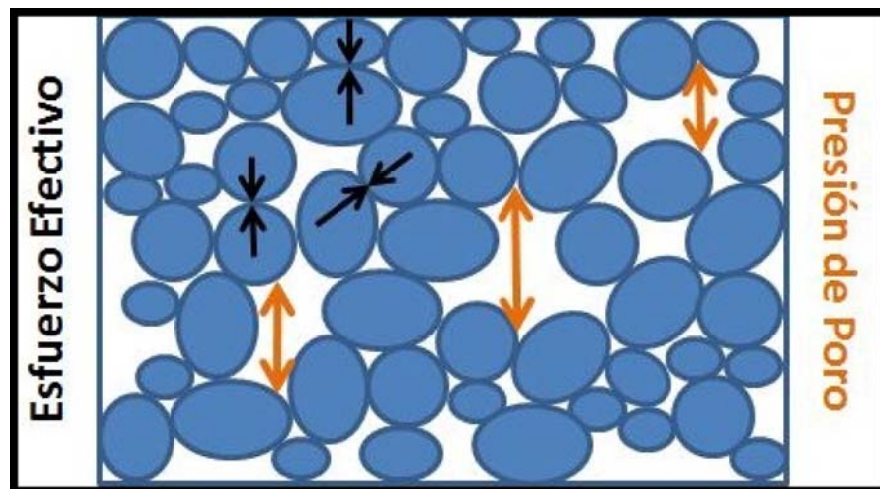


Figura 2.2: Representación de los granos de suelo durante el fenómeno de licuación, las flechas naranjas indican el aumento de la presión de poro, y a su vez las flechas negras indican la reducción de la tensión efectiva.

Fuente: http://geopetroleo.com/983912_Geopresiones.html, modificado por Mendoza, (2012)

Según Juárez (2009) los suelos susceptibles de licuarse presentan un conjunto de granos donde los contactos entre estos son relativamente escasos, lo que propicia a que se pierdan totalmente durante la presencia durante el flujo. Asimismo los suelos aptos a perder gran parte de su resistencia ante sollicitaciones dinámicas son las arenas finas y flojas, las arenas y limos mal gradados. El tamaño y uniformidad de los granos, y la baja velocidad de

sedimentación en aguas tranquilas (sin paso de ondas sísmicas), son elementos que constituyen estructuras muy sueltas (Juarez, 2009). Así también el nivel freático cerca de la superficie es una condición que favorece la presencia de licuefacción; además de un grado de compactación bajo, equivalente a valores N de SPT inferiores a 20 golpes (González, 2002).

El fenómeno de licuación afecta tanto a los suelos sedimentarios naturales como depósitos artificiales. La licuación está ligada a ciertos ambientes geológicos e hidrológicos. Los depósitos de sedimentos susceptibles a licuarse son aquellos materiales deltaicos con menos de 10.000 años, así como depósitos aluviales de ríos, llanuras de inundación, depósitos eólicos, y rellenos artificiales mal compactados (C.C.C.R, 2009).

2.2 Tipos de inestabilidad estructural originados por la licuación

La licuación en arenas genera problemas de inestabilidad en el suelo. Según el C.C.C.R (2009), estructuralmente se presentan cuatro ejemplos transcendentales de fallas de terrenos originadas por licuación y que incluyen ruptura: desplazamiento; la oscilación amplificada del terreno; la pérdida de la capacidad de soporte y el flujo, representan los tipos de fallas más comunes durante la licuefacción. Igualmente se pueden generar asentamientos del terreno y eyecciones de arena en la superficie.

A continuación se detallan estos cuatro tipos de fallas del terreno que son causadas por la licuación:

2.2.1 Desplazamiento o corrimiento lateral

Los desplazamientos laterales implican el deslizamiento de grandes bloques de suelo superficiales como consecuencia de la licuación de un estrato inferior. Cuando los sedimentos más profundos se licuan, los estratos superficiales del suelo se mueven lateralmente en bloques sólidos (ver Figura 2.2).

El movimiento se denomina "corrimiento lateral" porque ocurre en dirección perpendicular al límite de la zona afectada. En este tipo de fallas se producen rupturas del estrato no licuable, con grietas transversales a la dirección del movimiento, que separan el terreno en bloques y generan asentamientos diferenciales entre los sismos.

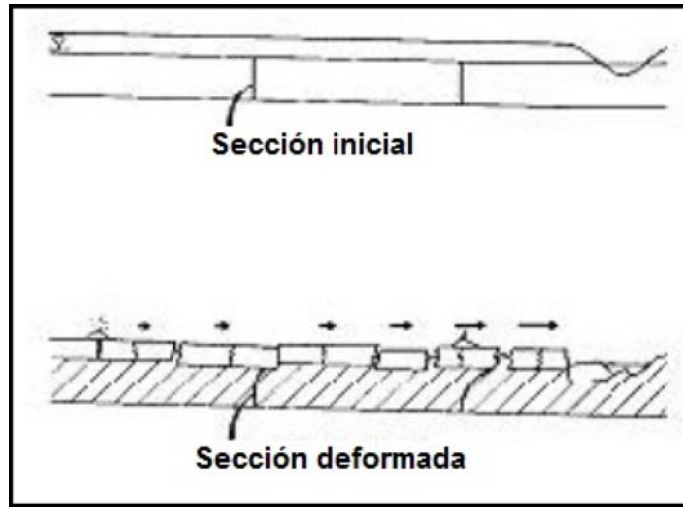


Figura 2.3: Ejemplo desplazamiento lateral de falla del terreno debido a la licuación.

Fuente: Código de Cimentaciones de Costa Rica, (2009)

El desplazamiento horizontal comúnmente se extiende por varios metros y el suelo se rompe internamente causando fisuras, escarpes y hundimiento de bloques. Este tipo de rupturas afecta en gran medida a las tuberías enterradas y las cimentaciones de construcciones en general.

2.2.2 Oscilación del terreno

Donde el terreno es plano o presenta una pendiente muy suave como para permitir el desplazamiento horizontal, la licuación de un estrato profundo puede desencajar los estratos de suelos superiores, lo cual genera que se presente una oscilación de los suelos superficiales en forma de ondas (ver Figura 2.3). Las oscilaciones están asociadas a la abertura y cierre de fisuras del terreno, y a la fractura de estructuras rígidas como pavimentos y tuberías.

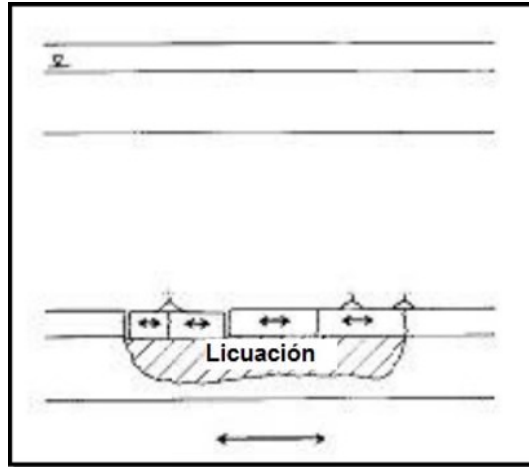


Figura 2.4: Ejemplo de la falla por oscilación del terreno debido a la licuación.

Fuente: Código de Cimentaciones de Costa Rica, (2009)

2.2.3 Falla de flujo

Estas son fallas asociadas a superficies inclinadas, como taludes con pendientes mayores de 3 grados. Los flujos se desarrollan principalmente en arenas finas o limos sueltos uniformes y saturados (ver Figura 2.4). Estas fallas comúnmente producen desplazamientos de decenas de metros, de grandes masas de suelo y en algunos casos, pueden viajar kilómetros abajo en terrenos con pendientes muy pronunciadas, y con velocidades considerables. Por este motivo se consideran las fallas de terreno más catastróficas causadas por el fenómeno de licuación. Los flujos pueden incluir suelos totalmente licuados o bloques de material intacto transportados sobre una capa de suelo licuado.

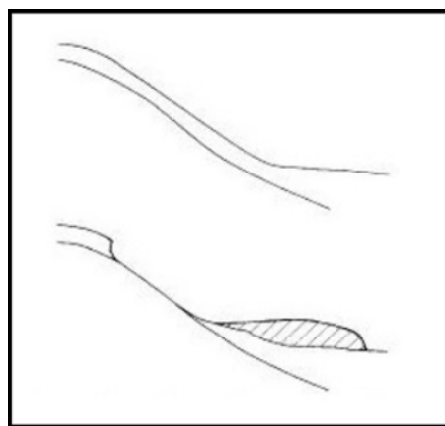


Figura 2.5: Ejemplo de falla de flujo producida por licuación.

Fuente: Código de Cimentaciones de Costa Rica, (2009)

2.2.4 Pérdida de la capacidad de soporte

Cuando el suelo que soporta un edificio u otra estructura pierde resistencia debido a la licuación, suelen producirse grandes deformaciones, lo que causa asentamientos o volcamiento de las estructuras. Las edificaciones altas pueden sufrir asentamientos que dependerán de la relación entre el peso de las estructuras y el empuje del suelo en estado líquido, según el principio de Arquímedes. Por otra parte las estructuras pesadas y esbeltas, con distribución no uniforme de la presión de cimentaciones, pueden sufrir volcamiento (ver Figura 2.5).

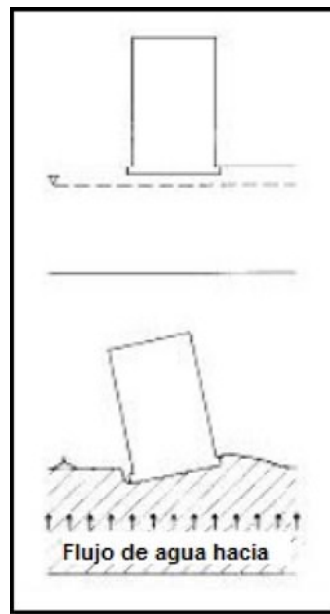


Figura 2.6: Ejemplo falla por pérdida de la capacidad de soporte durante la licuación de un suelo.

Fuente: Código de Cimentaciones de Costa Rica, (2009)

2.3 Factores que inciden en la ocurrencia y desarrollo del fenómeno de licuación

Existen factores importantes que están relacionados con los criterios para determinar la susceptibilidad de que un suelo se licue. Entre los principales factores que modifican y condicionan las características de licuación de suelos, el Código de cimentaciones de Costa Rica menciona los siguientes:

Características del sismo: la posibilidad de ocurrencia de licuación o susceptibilidad de un depósito de suelo depende de los esfuerzos cortantes inducidos por el sismo, los cuales son proporcionales a las aceleraciones. Para una misma magnitud sísmica, la susceptibilidad disminuye con la distancia epicentral y para una distancia epicentral fija, la susceptibilidad a la licuación aumenta con la magnitud, así como con el tiempo de duración de la fase más energética del movimiento (número de ciclos de carga).

Densidad o compacidad relativa: La susceptibilidad a la licuación es menor cuanto mayor sea la compacidad relativa.

Granulometría: Las arenas son más susceptibles a la licuación cuanto más finas y uniformes.

Estratigrafía del depósito: La posibilidad de ocurrencia de la licuación es mayor cuanto menos estratificado es el suelo.

Estructura interna del suelo: Cuanto más estable por su granulometría, compacidad y forma de granos, menor la susceptibilidad a la licuación.

Plasticidad: La susceptibilidad a la licuación es menor entre mayor sea el contenido de finos plásticos.

Permeabilidad: La susceptibilidad a la licuación de un depósito es menor cuanto mayor sea su permeabilidad.

Grado de saturación: La susceptibilidad a la licuación de un suelo granular aumenta con el grado de saturación.

Más específicamente González de Vallejo (2002), señala las propiedades que caracterizan a los suelos licuables:

- Grado de saturación del 100%.
- Diámetro medio D_{50} entre 0,05 y 1,0 mm.
- Coeficiente de uniformidad $C_u = D_{60}/D_{10} < 15$.

- Contenido de finos inferior al 10%.
- Bajo grado de compactación, es decir $N < 10$ para profundidades $< 10\text{m}$ y $N < 20$ para profundidades $> 10\text{ m}$.

2.4 Metodologías de análisis del potencial de licuación según el C.C.C.R

El Código de Cimentaciones de Costa Rica apunta que la evaluación del fenómeno de licuación depende de dos factores importantes: la naturaleza del sismo (intensidad y duración) y la susceptibilidad del material a la licuación. Seguidamente clasifica los distintos métodos existentes que evalúan el potencial de licuación, enumerándolos en 3 diferentes grados, adjuntando así los métodos según el nivel de detalle que se alcance en cada uno de ellos.

2.4.1 Métodos de grado 1

Las metodologías basadas en el estudio de las zonas donde ha ocurrido licuación de terremotos pasados, forman parte de la clasificación de grado 1, y se analizan en dos partes: 1) la valoración de la máxima extensión susceptible a licuación y 2) la estimación de la susceptibilidad a la licuación con base en el análisis de datos existentes.

2.4.1.1 Valoración de la máxima extensión susceptible a licuación

Criterio de Magnitud – Máxima distancia: Se presenta una relación entre la magnitud del sismo y la distancia desde el epicentro al sitio más lejano donde se presentó el fenómeno de licuación. Entre ellos se encuentran Kuribayashi y Tatsuoka (1975), Liu y Xie (1984), Ambraseys (1988) y Wakamatsu (1991). Aunque las relaciones no garantizan la ocurrencia a distancias mayores, son de gran ayuda para la estimación de escenarios regionales. En la Figura 2.6 se comparan estos criterios.

Criterio de Intensidad: Este criterio analiza las intensidades sísmicas en sitios donde ha ocurrido licuación. Los estudios de Kuribayashi y Tatsuoka (1975) y Wakamatsu (1991), mostraron que la licuación fue inducida en áreas formadas por sedimentos del Holoceno con intensidades mayores a VII en la escala Mercalli Modificada (M.M).

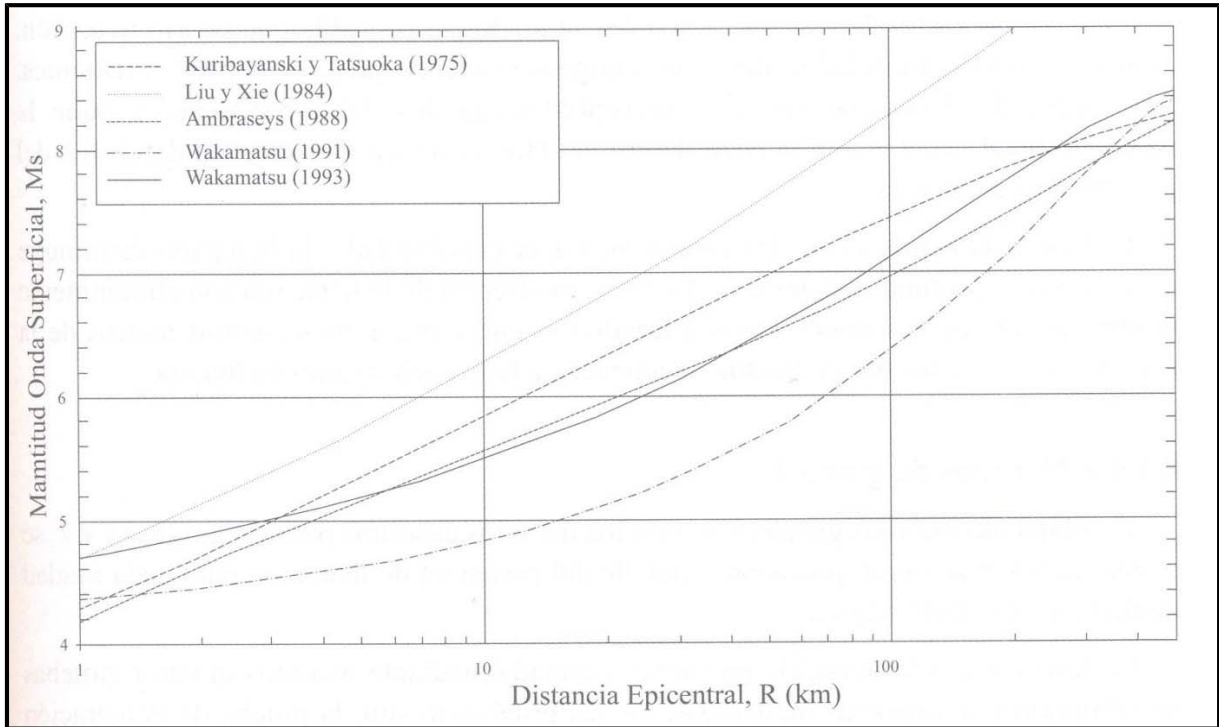


Figura 2.7: Distancia del epicentro hasta el sitio más lejano donde ocurrió licuación, R , para magnitudes de onda superficiales, M_s

Fuente: Código de Cimentaciones de Costa Rica, (2009)

2.4.1.2 Estimación de la susceptibilidad a la licuación basada en el análisis de datos existentes

Criterios geológicos y geomorfológicos: Localidades donde ha ocurrido licuación en el pasado se consideran como áreas potenciales, por lo que se puede crear una zonificación dibujando mapas que muestren donde se ha presentado el fenómeno de licuación. En particular, si se establece una correlación entre los sitios donde ha ocurrido licuación con criterios geológicos y geomorfológicos, se puede inferir áreas susceptibles a la licuación. Por ejemplo Iwasaki et al. (1982), analizando terremotos históricos de Japón, desarrolló el criterio listado en el Cuadro 2.1.

Índice de severidad de licuación (LSI, por sus siglas en inglés): Para cuantificar la severidad de los efectos de la licuación en depósitos del Holoceno tardío con baja pendiente, Youd y Perkins (1987), introdujeron el concepto de LSI, definido como el desplazamiento lateral

máximo del terreno (en milímetros) y dividido por 25. El método tiene por objetivo la confección de mapas de amenaza a partir de observaciones de campo de los efectos de sismos.

Cuadro 2.1: Criterios de Iwasaki para evaluar el potencial de licuación

Rango	Unidad Geomorfológica	Potencial de licuación
A	Depósitos recientes y antiguos de ríos, pantanos, tierras que han sido inundadas, tierras bajas entre dunas.	Probabilidad alta
B	Abanicos, llanuras de inundación, dunas de arena, playas y otras planicies.	Posibilidad de licuación
C	Terrazas, colinas, montañas.	Muy baja probabilidad

Fuente: Código de Cimentaciones de Costa Rica, (2009)

2.4.2 Métodos de grado 2

Las metodologías que clasifican dentro del rango de grado 2, son aquellas basadas en el estudio de las características geológicas y geomorfológicas de un sitio.

Los procesos geológicos que acomodan el suelo en distribuciones de tamaño uniforme y los depositan en estado suelto producen depósitos muy susceptibles a la licuación. Por ejemplo, en depósitos fluviales y coluviales saturados es probable que ocurra licuación. A su vez, la susceptibilidad de depósitos antiguos es menor que la de depósitos recientes. Los suelos del Holoceno son más susceptibles que los del pleistoceno, aunque la susceptibilidad decrece con la edad dentro del Holoceno. La licuación en depósitos del pre-pleistoceno es rara.

La licuación ocurre en suelos saturados. La susceptibilidad a la licuación disminuye al aumentar la profundidad del nivel freático; los efectos de la licuación son comúnmente observados en lugares donde el nivel freático se encuentra a unos cuantos metros de la superficie, y en sitios donde fluctúa, la amenaza a la licuación también fluctúa.

2.4.3 Métodos de grado 3

Los métodos de grado 3, están basados en la combinación de estudios geotécnicos utilizados en los métodos de grado 1 y 2, alcanzando una gran precisión y detalle del potencial de licuación del suelo.

La resistencia a la licuación puede ser estimada mediante métodos *in situ* o pruebas de laboratorio en muestras inalteradas. En Costa Rica, la prueba de Penetración Estándar (SPT) es la más utilizada.

Existen diferentes criterios y metodologías que utilizan la información obtenida en el ensayo de penetración estándar:

2.4.3.1 Procedimiento simplificado de Seed e Idriss

El método de Seed e Idriss, es de lo más utilizados en el mundo, para evaluar la susceptibilidad de licuación. Según este método, el suelo licuará si la razón de esfuerzo cíclico (CSR), producida por un sismo es mayor que la resistencia tangencial del suelo:

$$\frac{\tau_{av}}{\sigma'_0} = 0,65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_0}{\sigma'_0} r_d \quad (F.2.1)$$

En donde:

$a_{max} = \dot{u}$ Aceleración pico estimada

g = Aceleración de la gravedad

$\tau_{av} = \dot{u}$ Promedio del esfuerzo cortante cíclico (kPa)

$\sigma'_0, \sigma_0 = \dot{u}$ Esfuerzo efectivo y total a la profundidad considerada (kPa)

$r_d = \dot{u}$ Factor de reducción de esfuerzos, cuyo valor es 1 en la superficie y disminuye con la profundidad (ver Figura 2.7)

El segundo paso en el procedimiento de Seed e Idriss, requiere la determinación de la resistencia cíclica del depósito de suelo; este se estima a partir de correlaciones empíricas con el valor N_{SPT} .

$$(N_1)_{60} = C_n \frac{E R_m}{60} N_{SPT} \quad (F.2.2)$$

$$C_n = \sqrt{\frac{100}{\sigma'_0 [kPa]}} \quad (F.2.3)$$

En donde:

C_n = Coeficiente de corrección por presión

ER_m = Eficiencia de la energía del equipo de penetración

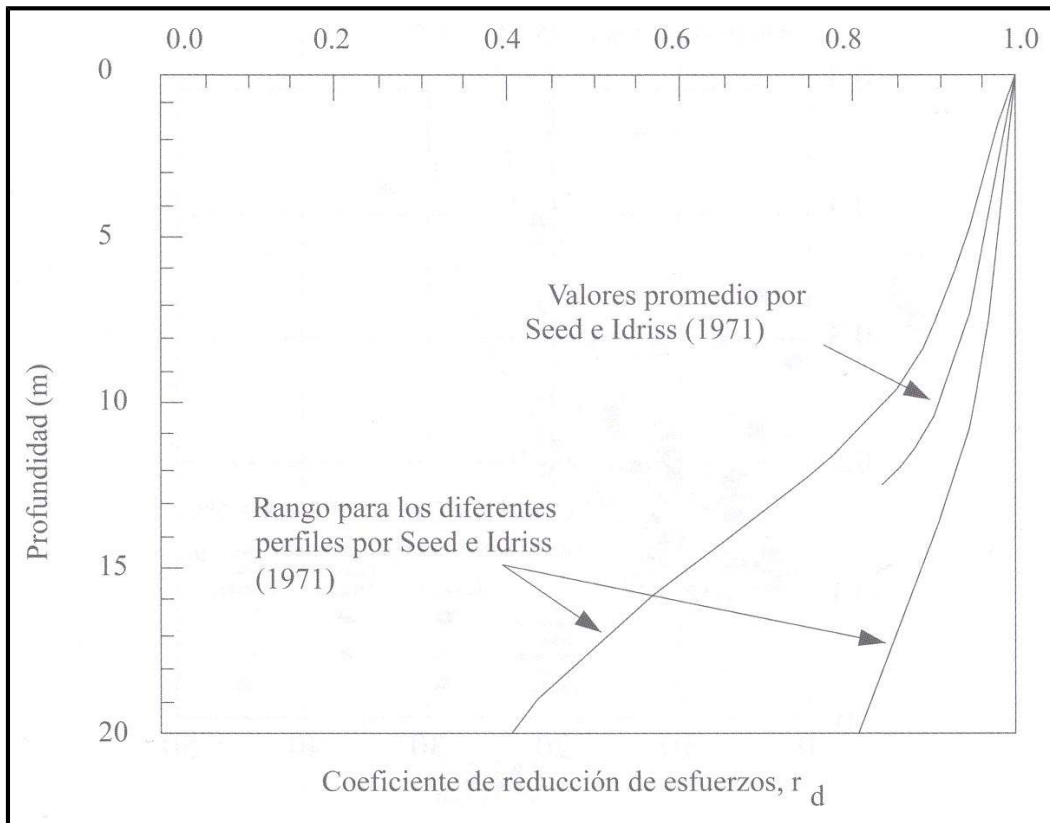


Figura 2.8: Factor de reducción para estimar la variación del esfuerzo cíclico cortante con la profundidad

Fuente: Código de Cimentaciones de Costa Rica, (2009)

Basado en $(N_1)_{60}$, la razón de esfuerzo cíclico que induciría licuación para un sismo de grado 7,5, $(\tau_{av}/\sigma'_0)_{1,M=7,5}$ está dada por varias relaciones mostradas en las Figuras 2,8 y 2,9.

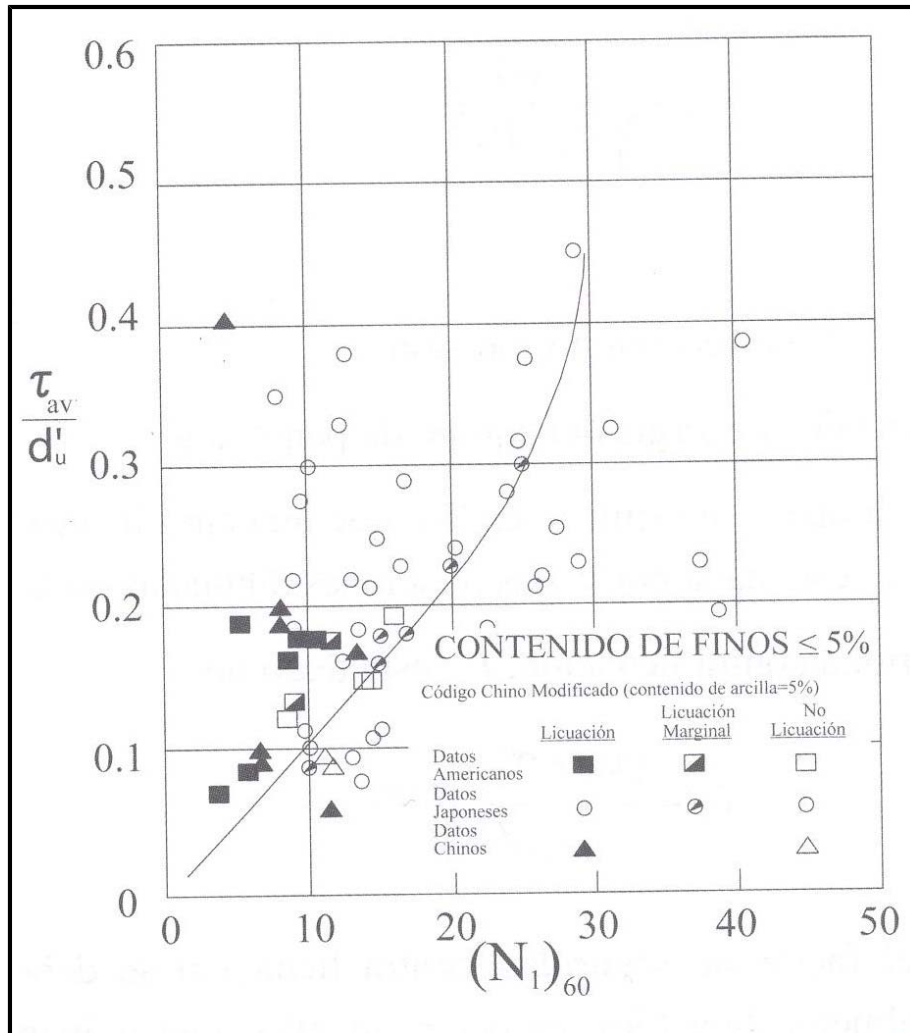


Figura 2.9: Relación entre la Razón de Esfuerzos Cíclico (CSR) que causa licuación y el valor $(N_1)_{60}$ para arenas limpias, $M=7,5$

Fuente: Código de Cimentaciones de Costa Rica, (2009)

El factor de seguridad contra licuación, F_L , esta dado por:

$$F_L = \frac{(\tau_{av}/\sigma'_0)_{1,M=M}}{(\tau_{av}/\sigma'_0)} \quad (F.2.4)$$

La evaluación del factor de seguridad contra licuación se debe realizar en todos los estratos potencialmente licuables, es decir, aquellos que reúnan las características descritas en apartados anteriores y debe ser entre 1 y 1,3 dependiendo de la importancia de la obra.

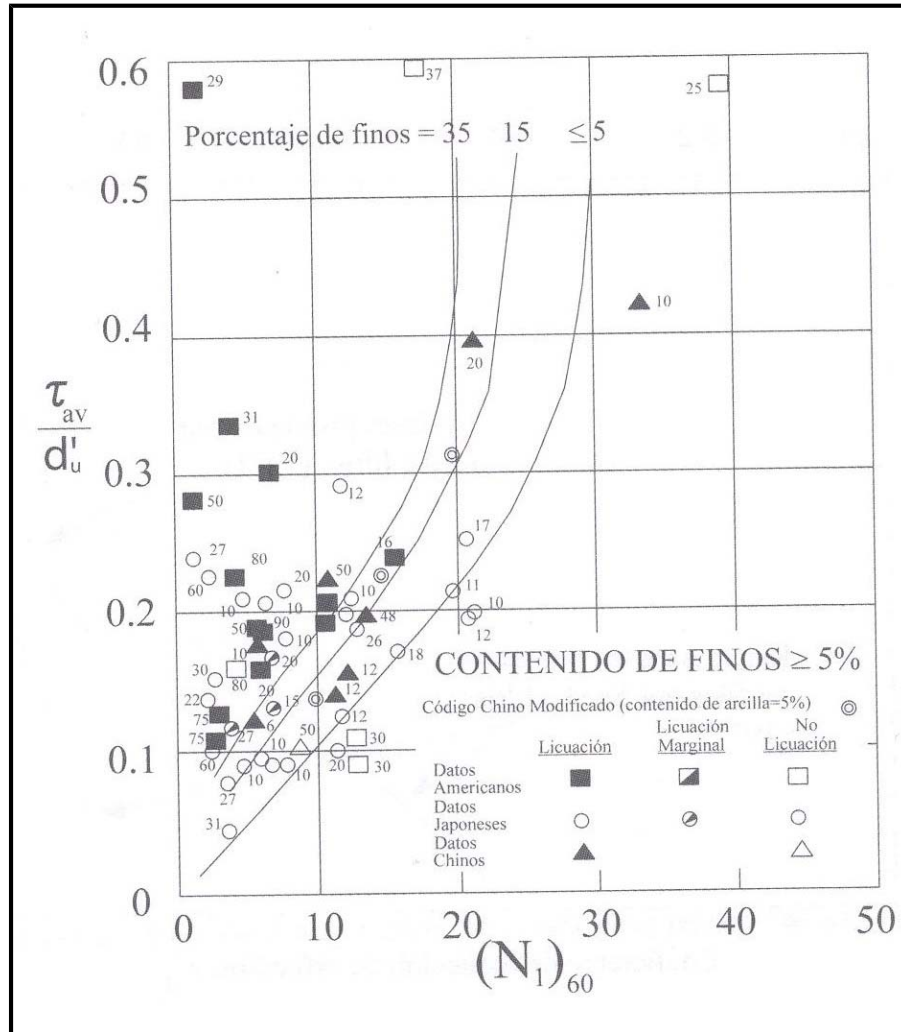


Figura 2.10: Relación entre la Razón de Esfuerzo Cíclico (CSR) que causa licuación y el valor $(N_1)_{60}$ para arenas limosas, $M=7,5$

Fuente: Código de Cimentaciones de Costa Rica, (2009)

2.4.3.2 Criterio Chino para evaluación de licuación

El criterio Chino, establece correlaciones de resistencia a la licuación y el valor N de la prueba de Penetración Estándar SPT, en términos de la resistencia a la penetración crítica, N_{crit} .

$$N_{crit} = \dot{N} \left[1 + 0,125(d_s - 3) - 0,05(d_w - 2) - 0,07 p_c \right] \quad (F.2.5)$$

En donde:

N_{crit} = Valor límite bajo el cual puede ocurrir licuación

d_s = Profundidad en metros de la capa de arena

d_w = Profundidad del nivel freático en metros

\dot{N} = Función de la intensidad del terremoto, como se muestra en el Cuadro 2.2

p_c = Porcentaje de arcillas, y representa la influencia del contenido de finos

Cuadro 2.2: Valor de \dot{N} según el Código Chino

Intensidad	\dot{N} (golpes/pie)	Aceleración pico (g = aceleración de gravedad)
VII	6	0,10 g
VIII	10	0,20 g
IX	16	0,40 g

Fuente: Código de Cimentaciones de Costa Rica, (2009)

Capítulo 3: Influencia de la Granulometría de los Suelos

3. INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA DE LOS SUELOS

3.1 Granulometría de los suelos.

La prueba de análisis granulométrico es fundamental a la hora de estudiar si un suelo es capaz de licuarse. En la actualidad existe evidencia que muestra que mezclas con granulometría uniforme son susceptibles al fenómeno de licuación. Respecto a los suelos con otras granulometrías (bien y medianamente gradadas), no han sido del todo investigadas, dando por un hecho que estas otras gradaciones mitigan la licuación. Por ello se debe determinar el comportamiento de las granulometrías de distintos estratos de arenas saturados, al ser sometidos a sollicitaciones dinámicas, y observar el comportamiento ante el fenómeno de licuación que pueda producirse por el efecto del paso de ondas sísmicas.

3.1.1 Definición e importancia del análisis granulométrico

Los suelos están compuestos por partículas de varias formas, tamaños y cantidades, que afectan el comportamiento mecánico del suelo, especialmente los de grano grueso. Por ello, para estudiar los suelos, se debe conocer tanto los tamaños de las partículas como la distribución de las mismas.

El análisis granulométrico divide las partículas de suelos en grupos de tamaños y determina sus proporciones relativas por peso. El análisis es realizado mediante un ensayo de laboratorio básico, y es necesario para identificar los suelos en los sistemas ingenieriles de clasificación.

3.1.2 Grupos de tamaños de partículas

Los sistemas de clasificación de suelos se basan en la división en diferentes categorías, con base en el tamaño de las partículas. El Cuadro 3.1 reúne los criterios usados por varios sistemas ingenieriles de clasificación de suelos, como la norma de la American Society for Testing Materials ASTM D422, utilizada en el presente proyecto de investigación. Además presenta la norma británica BS 1377, la norma AASHTO T 88 de la American Association of Highway Transportation Officials (AASHTO), el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el Massachusetts Institute of Technology (MIT). Estos criterios también son

mostrados en la Figura 3.1, aunque los valores específicos de tamaños de partícula difieren, casi todos los sistemas establecen una división principal en grupos, los cuales son las rocas, los cantos, los suelos y los coloides.

Cuadro 3.3: Intervalo de tamaños de partículas de acuerdo con algunos sistemas de clasificación de suelos

Grupo	Clase	Subclase	Tamaño superior (mm)				Tamaño inferior (mm)				
			AST M	AASHTO	SUCS	MIT/S B	AST M	AASHTO	SUCS	MIT/S B	
Roca			-	-	-	-	300	75,0	300	200	
Canto			300	NU	300	200	75,0	NU	75,0	60,0	
Suelo de grano grueso	Grava	Gruesa			75,0	60,0				19,0	20,0
		Media	75,0	75,0	UN	20,0	4,75	2,00	UN	6,00	
		Fina			19,0	6,00			4,75	2,00	
	Arena	Gruesa	4,75	2,00	4,75	2,00	2,00	0,425	2,00	0,60	
		Media	2,00	-	2,00	0,60	0,425	un	0,425	0,20	
		Fina	0,425	0,425	0,425	0,20	0,075	0,075	0,075	0,06	
Suelo de grano fino	Limo	Gruesa				0,06				0,02	
		Media	0,075	0,075		0,02	0,005	0,005		0,006	
		Fina			0,075	0,006			-	0,002	
	Arcilla	0,005	0,005		0,002	0,001	0,001		-		
Coloide			0,001	0,001	NU	NU	-	-	NU	NU	

Fuente: Vargas, (2010)

En general, las partículas que se denominan “suelos” tienen tamaños inferiores a 75 mm, aunque en la práctica los cantos, cuyos tamaños alcanzan los 300 mm también son incluidos dentro de los suelos. El grupo de los suelos se clasifica de acuerdo con el tamaño de las partículas en grano grueso y grano fino. Esos grupos se dividen luego en gravas y arenas clasificadas como granos gruesos, y limos y arcillas clasificados como grano fino con subdivisiones opcionales en grueso, medio y fino.

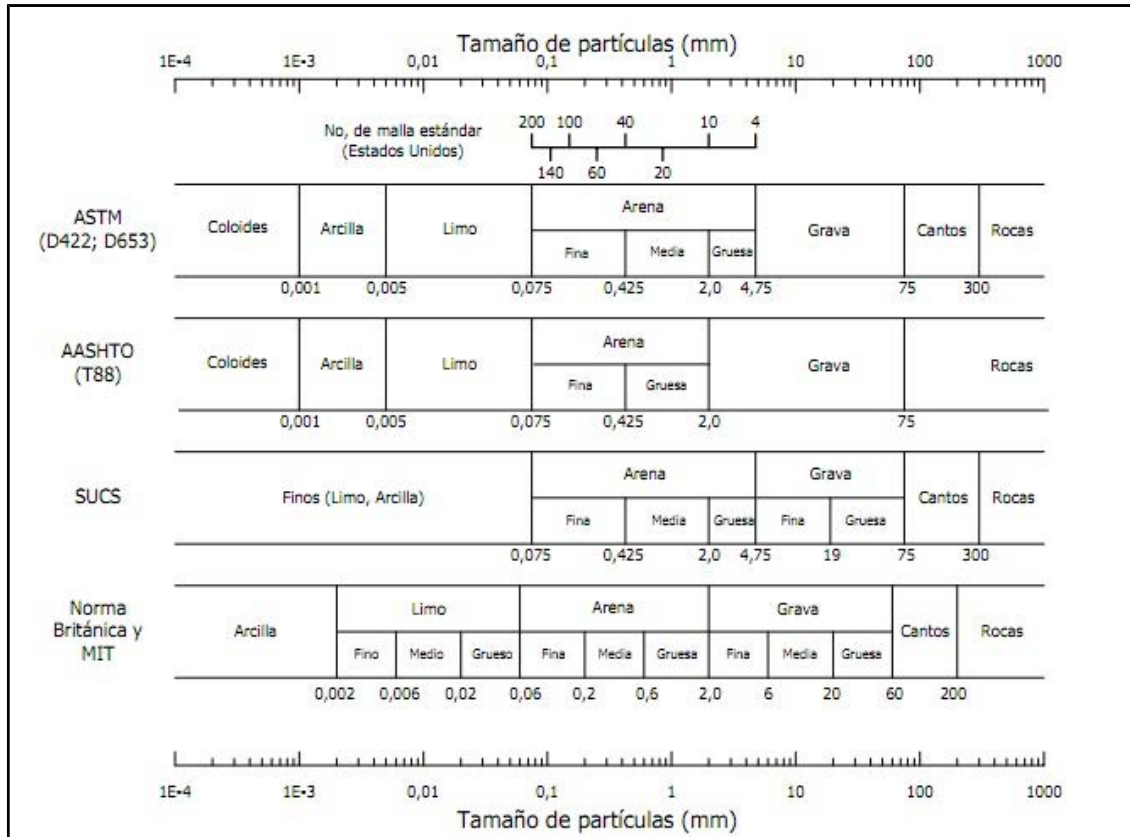


Figura 3.11: Intervalo de tamaños de partículas de acuerdo con algunos sistemas de clasificación de suelos

Fuente: Vargas, (2010)

3.2 Curva granulométrica

En la Figura 3.1 se definieron seis categorías de tamaños de partícula de acuerdo con varios sistemas de nomenclatura y clasificación de suelos: rocas, cantos, grava, arena, limo y arcilla. Sin embargo, los suelos naturales son generalmente una mezcla de partículas que no caen enteramente dentro de una sola de estas categorías y cubren dos o más intervalos. Sería demasiado tedioso tratar de contar la cantidad de partículas en cada categoría por ser esta muy amplia. Por lo tanto, la distribución de tamaños en las categorías definidas se hace mediante una distribución estadística acumulada.

La distribución de tamaños de partículas se obtiene mediante un proceso denominado análisis mecánico o ensayo de gradación. Los suelos de grano grueso se analizan con un

ensayo de separación en tamaños, en el cual una muestra de suelo seco se agita o se hace vibrar mecánicamente para que pase a través de una serie de tamices o mallas que tienen aperturas cada vez más pequeñas. Puesto que la masa o peso total de la muestra es conocido, el porcentaje retenido en cada tamiz y el que pasa a través del mismo se pueden determinar mediante la medición de las cantidades retenidas en cada tamiz. El procedimiento se muestra esquemáticamente en la Figura 3.2.

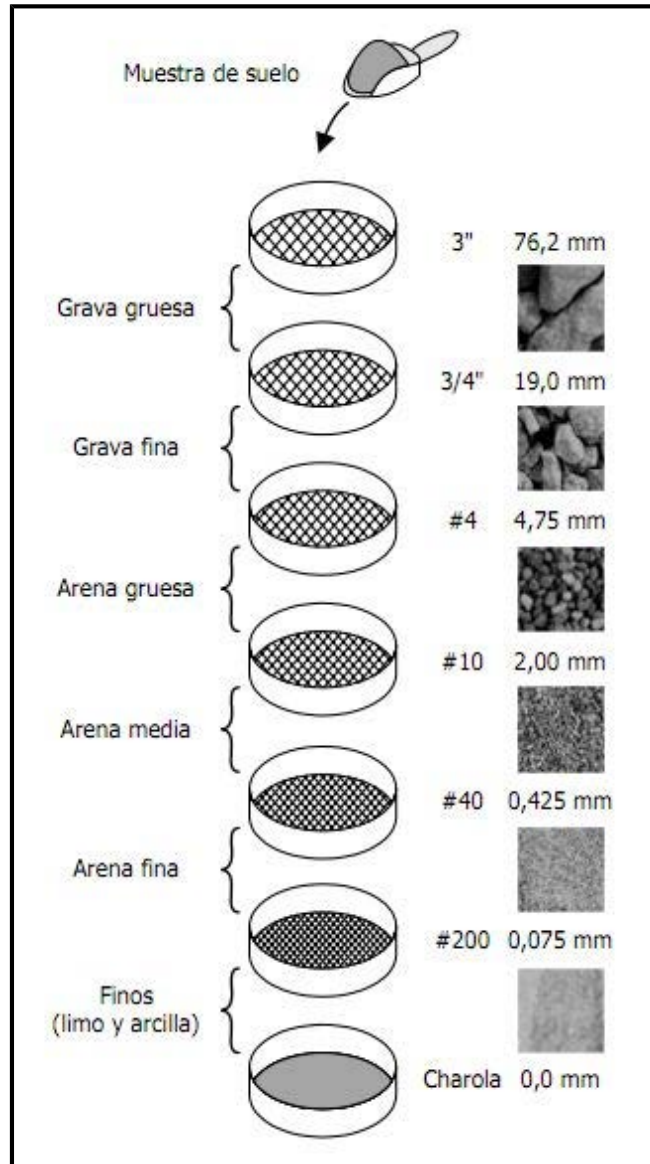


Figura 3.12: Representación esquemática del análisis granulométrico con tamices

Fuente: Vargas, (2010)

Los detalles de los procedimientos de ensayo están especificados en las normas ASTM C 136 y D 422 y AASHTO T 27 Y T88. Los tamaños de apertura de los tamices estándar en los Estados Unidos que se usan comúnmente para el análisis granulométrico se presentan en los Cuadros 3.2 y 3.3, respectivamente.

Cuadro 3.4: Conjunto completo de tamices estándar

Designación	Apertura (mm)
3"	76,2
2"	50,8
1 1/2"	38,1
1"	25,4
3/4"	19,0
3/8"	9,52
#4	4,75
#8	2,36
#10	2,00
#16	1,18
#20	0,85
#30	0,600
#40	0,425
#50	0,300
#60	0,250
#100	0,150
#140	0,106
#200	0,075

Cuadro 3.5: Conjunto de tamices para obtener un espaciamiento uniforme de puntos

Designación	Apertura (mm)
3"	76,2
1 1/2"	38,1
3/4"	19,0
3/8"	9,52
#4	4,75
#8	2,36
#16	1,18
#30	0,600
#50	0,300
#100	0,150
#200	0,075

El análisis mediante tamizado es impráctico para determinar la distribución de tamaños de partículas inferiores a 0,075 mm (Malla #200). Por esta razón, para el análisis de la distribución de partículas de suelos de grano fino (limos y arcillas) comúnmente se recurre a un ensayo de sedimentación en agua, proceso que no fue necesario realizar en el presente proyecto de investigación, debido a que se trabajó solo con suelos que clasifican como arenas; es decir con partículas mayores a 0,075 mm.

El porcentaje por peso (P) de partículas de la muestra que tienen tamaños inferiores a un valor D se grafica contra el tamaño D para obtener la curva granulométrica, la cual estadísticamente es un diagrama de frecuencia acumulada. El tamaño de partícula D se grafica en escala logarítmica debido a su amplio intervalo de valores posibles. El intervalo de tamaños de partícula posibles en los suelos es enorme y puede incluir desde bloques o cantos de varios centímetros de diámetro hasta materiales coloidales extremadamente finos.

Según la información del Cuadro 3.1 y la Figura 3.1, los tamaños de las partículas se extienden entre más de 200 mm y menos de 0,002 mm. La razón entre estos tamaños es de $10^5:1$ y el intervalo máximo posible en los suelos naturales es del orden de $10^8:1$. La curva une suavemente los valores del porcentaje correspondientes a cada apertura de tamiz o tamaño equivalente de partícula, según el ensayo. La Figura 3.3 muestra una curva granulométrica típica de una arena.

Existen otros tipos de gráficas que se utilizan en la práctica ingenieril. Por ejemplo, el eje horizontal (tamaño de partícula) puede tener una orientación opuesta, con los tamaños mayores en el extremo izquierdo. El eje vertical puede representar el porcentaje por peso de material más grueso, en lugar del porcentaje de material más fino.

Además de las curvas de distribución acumulada, hay otras representaciones gráficas para la granulometría de un material, tales como las distribuciones de frecuencia o histogramas. En este caso, se grafica el porcentaje por peso en un intervalo entre ciertos tamaños contra el logaritmo del tamaño de partícula. Este tipo de representación es más utilizado en la ingeniería química e industrial (polvos, granos, etc.). La curva granulométrica de distribución acumulada semilogarítmica continúa siendo la representación más usada en la ingeniería de suelos.

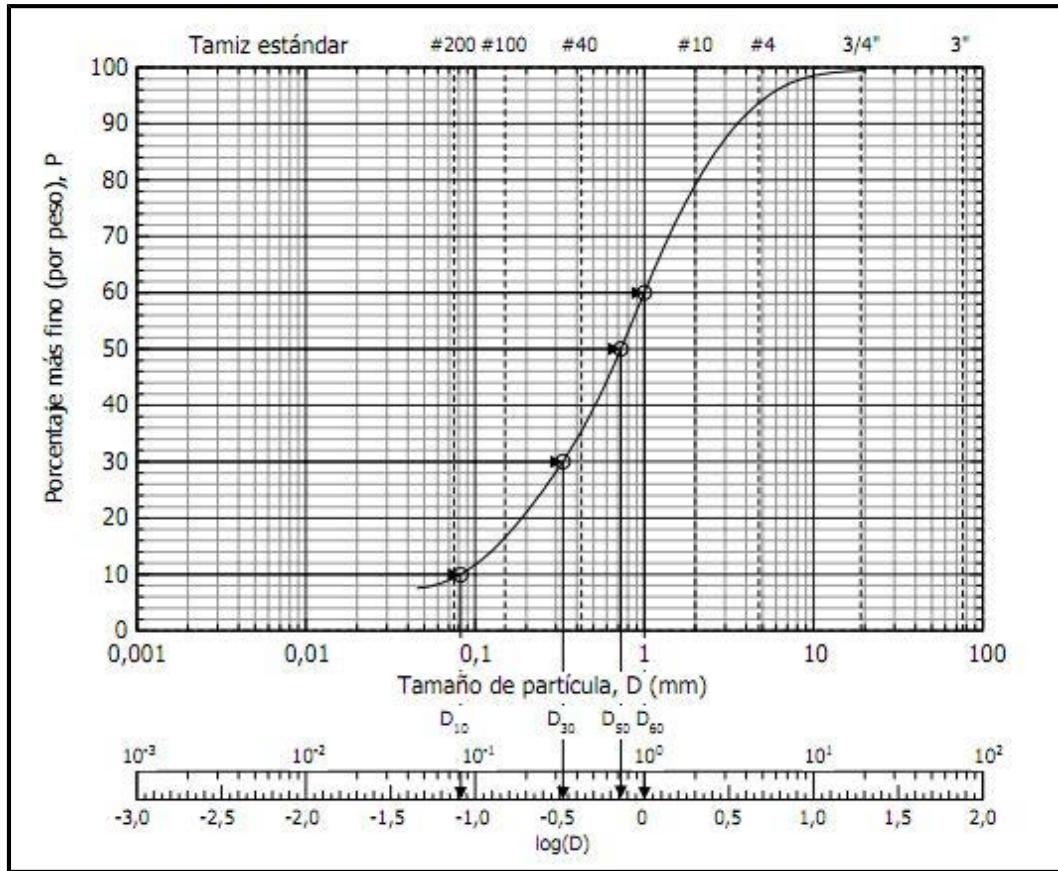


Figura 3.13: Curva de distribución acumulada de tamaños de partículas de una arena

Fuente: Vargas, (2010)

3.3 Aplicaciones de las curvas granulométricas

Las curvas granulométricas son un medio para clasificar los suelos y evaluar sus propiedades ingenieriles. La clasificación de suelos basada en granulometría se aplica principalmente a gravas y arenas. El uso de una gráfica estándar para representar los datos de tamaño de partículas permite a los ingenieros reconocer en forma instantánea las características de gradación de un suelo. La posición relativa de una curva sobre la gráfica (a la izquierda o la derecha) indica si el suelo es fino o grueso. La inclinación, horizontalidad y la forma general de la curva son indicativas de la distribución de tamaños de partículas.

A partir de la distribución de tamaños de partículas se pueden obtener los parámetros estadísticos usuales (valor promedio, desviación estándar, etc.) pero para los propósitos de la ingeniería civil es más útil conocer otros parámetros que se calculan de manera más sencilla.

3.3.1 Tamaños específicos de partículas

A partir de la curva granulométrica se determinan fácilmente los tamaños de partícula que corresponden con porcentajes específicos de interés, de manera que el valor D_p represente el tamaño de partícula correspondiente al porcentaje P.

- D_{50} , es el tamaño promedio, dado que el 50% del material está compuesto por partículas de tamaño inferior y, obviamente el otro 50% serán partículas de tamaño mayor que ese valor.
- D_{10} , es el tamaño correspondiente al 10% en la curva, es denominado tamaño efectivo de partícula. Este parámetro comúnmente es utilizado en el diseño de filtros.
- Otros tamaños de interés para el análisis de la granulometría son el D_{30} y el D_{60} .

3.3.2 Granulometría y clasificación de arenas y gravas

Las curvas granulométricas permiten clasificar las arenas y gravas en tres tipos principales: uniformes, bien gradadas y mal gradadas.

Suelos uniformes

Los suelos uniformes están compuestos por partículas que tienen aproximadamente el mismo tamaño, lo cual es típico de suelos transportados. El proceso de transporte segrega las partículas por tamaño y la depositación ocurre cuando la velocidad de la corriente no es capaz de arrastrarlas, por lo que los suelos resultantes tienen tamaños de partículas uniformes. La curva granulométrica de un suelo uniforme tiende a ser vertical, como lo muestra la curva A en la Figura 3.4, la cual representa una arena fina uniforme.

La uniformidad de un suelo se caracteriza mediante el *coeficiente de uniformidad* " C_u ":

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (\text{F.3.1})$$

en donde D_{10} es el tamaño de partícula que corresponde a un 10% por peso de material más fino y D_{60} es el tamaño de partícula que corresponde al 60% por peso de material más fino.

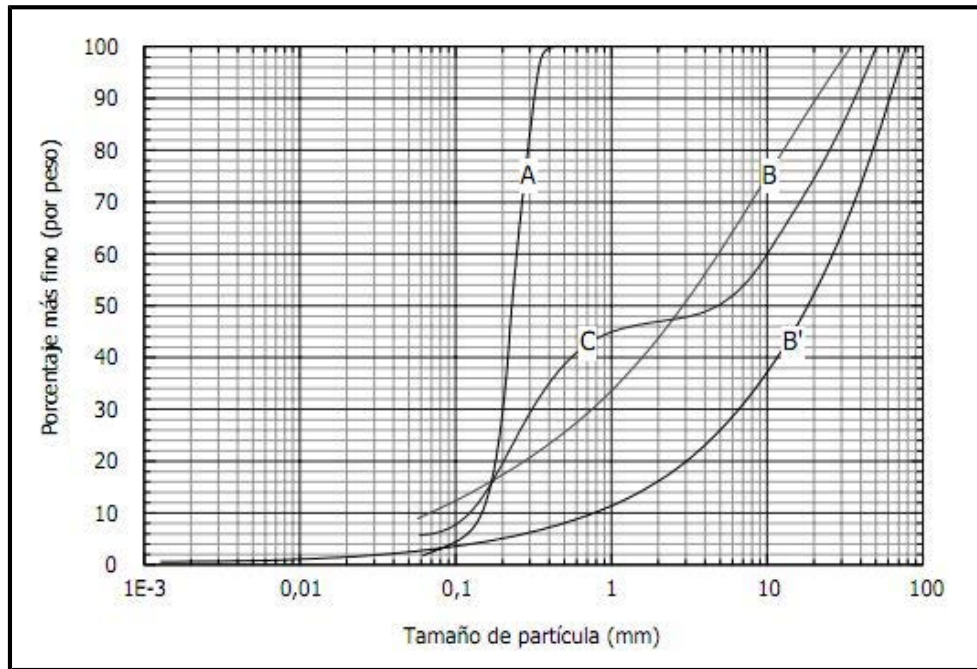


Figura 3.14: Ejemplo de curvas granulométricas para arenas y gravas

Fuente: Vargas, (2010)

D_{10} y D_{60} se obtienen mediante interpolación entre los puntos que representan los datos experimentales en la curva granulométrica. El valor de C_u es un indicador inverso de la pendiente promedio de la curva entre $P=10\%$ y $P=60\%$.

El valor más pequeño posible de C_u es la unidad ($D_{10} = D_{60}$), lo cual correspondería a un conjunto de partículas de igual tamaño (material uniforme). Un valor alto indica que el suelo no es uniforme dado que hay una mayor variedad de tamaños. Las arenas de playa usualmente son bastante uniformes y tienen valores de C_u entre 2 y 3.

Suelos bien gradados

Los suelos bien gradados tienen una distribución de tamaños de partícula amplia y pareja. La curva B de la Figura 3.4, muestra una mezcla de grava y arena, limosa y bien gradada. Una curva suave y cóncava hacia arriba es típica de un material bien gradado. La curva B' de la misma figura representa un material idealizado en el cual partículas esféricas de diferentes

tamaños se ensamblan en el acoplamiento más denso posible (gradación de Fuller), como se ilustra en la Figura 3.5.

En el arreglo de Fuller, los poros entre las partículas de tamaño D_{max} son rellenados, en un patrón regular, con partículas de tamaños cada vez más pequeños que ocupan los vacíos sin separar las partículas vecinas. La gradación de Fuller tiene la forma suave mostrada en la Figura 3.4 (curva B').

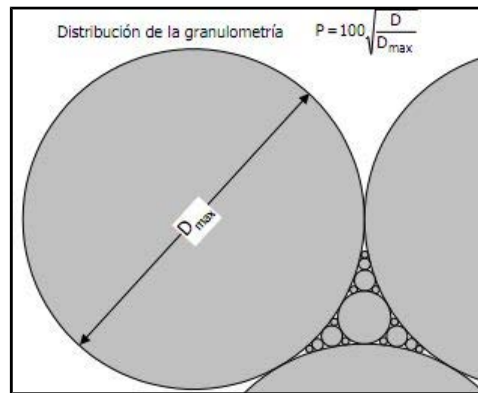


Figura 3.15: Ensamble de partículas idealizado de Fuller (representación bidimensional)

Fuente: Vargas, (2010)

Los valores del coeficiente de uniformidad de las curvas granulométricas mostradas en la Figura 3.4 se presentan en el Cuadro 3.4. Se puede observar que el coeficiente de uniformidad de los suelos B y C son altos, lo cual indica que no son uniformes, pero ese parámetro solo, no es suficiente para determinar si un suelo tiene una buena gradación. La curva C de la Figura 3,4 muestra un suelo que tiene muy pocas partículas con tamaños comprendidos entre 0,8 mm y 5 mm (aproximadamente un 8%), por lo que no está bien gradado. Por esa razón, para caracterizar adecuadamente la gradación de un suelo se debe evaluar la curvatura en la gráfica de granulometría.

El coeficiente de curvatura " C_c " se define como:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}} \quad (F.3.2)$$

En donde D_{30} es el tamaño de partícula que corresponde a un 30% de material más fino por peso (ver Figura 3.3). Por definición, se considera que un suelo es bien gradado cuando $1 < C_c < 3$ y $C_u > 4$ en el caso de las gravas y $C_u > 6$ en el caso de las arenas. Para la curva de la Figura 3.3, $D_{10}=0,082$ mm, $D_{30}=0,33$ mm, $D_{60}=1,0$ mm y $C_c=1,3$. Los valores de C_c para los suelos de la Figura 3.4 se presentan en el Cuadro 3.4.

Cuadro 3.6: Coeficientes de uniformidad y curvatura para los suelos de la Figura 3.4

Curva	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _c	Descripción
A	0,15	0,20	0,23	0,24	1,6	1,1	Arena fina uniforme
B	0,069	0,75	2,9	4,6	66,7	1,8	Grava y arena limosa bien gradada
B'	0,73	6,55	18,75	26,2	35,9	2,2	Gradación idealizada de Fuller
C	0,13	0,33	5,1	9,0	69,2	0,1	Grava y arena limosa con gradación fraccionada

Fuente: Vargas, (2010)

Los suelos arcillosos y limosos se clasifican con base en su comportamiento en presencia del agua, dado que la granulometría no tiene una influencia tan notable como en los suelos de grano grueso. Por tal razón el estudio de la influencia de la granulometría de las arenas en el fenómeno de licuación representa una investigación significativa de llevar a cabo.

3.4 Aplicaciones del análisis de granulometría en la práctica ingenieril

El análisis de granulometría de un suelo es útil en varias aplicaciones prácticas de la ingeniería geotécnica, que incluyen la selección de materiales para relleno (terraplenes) en la construcción de carreteras, agregados para la fabricación de concretos puzolánicos y asfálticos, drenajes, filtros e inyecciones de lechadas (mezclas fluidas de cemento y agregados finos), entre otras aplicaciones (Vargas, 2010). Se detallan a continuación la importancia de analizar la granulometría en distintas aplicaciones:

Selección de materiales de relleno: Los suelos que se usan para construir terraplenes y represas de tierra deben tener partículas de tamaños definidos dentro de límites específicos,

de acuerdo con las curvas granulométricas. Las diferentes zonas de una represa de tierra, por ejemplo, tienen diferentes características de gradación.

Selección de materiales como agregados: Las arenas y gravas que se usan como agregados en el concreto se dividen en varios tipos, de acuerdo con sus curvas granulométricas. El análisis de granulometría es el criterio principal para la selección de fuentes para explotación de estos agregados.

Materiales para sub-bases de carreteras: Cada capa de una sub-base para carretera o pista de aterrizaje debe cumplir con especificaciones de gradación particulares para que produzcan una cimentación mecánicamente estable (especificaciones de AASHTO).

Filtros y drenajes: La especificación de gradación para una capa de un filtro debe estar en cierta relación con la gradación del terreno circundante y de la siguiente capa. Esta especificación, condición o requisito para un filtrado adecuado, impide que las partículas de menor tamaño sean arrastradas por el flujo de agua subterránea y evita que se obstruyan los poros entre las partículas de mayor tamaño del filtro.

Drenaje de agua subterránea: La permeabilidad o capacidad de drenaje de un terreno depende en gran medida de la proporción de finos (partículas de limo y arcilla) presentes en el suelo. El tamaño de las partículas determina el tamaño de los poros y un suelo de grano fino tendrá un tamaño de vacíos mucho menor que uno de grano grueso, por lo que su permeabilidad será mucho menor. Además, los cuales llenan los vacíos entre las partículas de mayor tamaño, si están presentes.

Inyección de químicos y lechadas: Las inyecciones de químicos y lechadas tienen el propósito de llenar los poros en el suelo para disminuir su permeabilidad y mejorar sus propiedades mecánicas. El proceso de inyección más apropiado y la extensión que se puede alcanzar con la inyección, depende de las características de gradación del suelo.

Susceptibilidad de licuación: La licuación es un fenómeno de pérdida de resistencia y rigidez de suelos arenosos ante cargas sísmicas. La uniformidad de un suelo es uno de los factores que propician la licuación.

La presente investigación llevada a cabo se basa específicamente en lograr determinar cuan susceptible es un estrato de suelo arenoso, teniendo diferentes gradaciones de arenas, ante el paso de simulación de ondas sísmicas producidas por una mesa vibratoria. Como se menciona en el párrafo anterior se sabe que la uniformidad de un suelo hace que sea potencialmente licuable ante un sismo. Sin embargo, no se hacen referencias objetivas respecto al comportamiento de las arenas bien gradadas, e incluso arenas que se pueden considerar como medianamente graduadas.

3.4.1 Limitaciones del análisis de granulometría y clasificación

El análisis de granulometría es útil para clasificar los suelos, especialmente los suelos granulares. Con base en una curva granulométrica es posible decir si el suelo consiste predominantemente de grava, arena, limo y arcilla y hasta cierto punto se puede decir también cuál de estas partes será la que controle el comportamiento del suelo y sus propiedades ingenieriles.

El análisis de granulometría tiene más valor cuando se cuenta con información adicional, tal como el color y la forma de las partículas. Sin embargo, el comportamiento ingenieril de los suelos también depende de muchos otros factores, minerales, estructurales y de la historia geológica. El comportamiento de arcillas, especialmente, es controlado por otros factores, tales como su plasticidad, más que por su granulometría (Vargas, 2010). En el trabajo presente, el análisis granulométrico realizado no presenta limitaciones, debido a que se trabaja con arenas que contienen finos no plásticos.

3.5 Investigaciones y metodologías de análisis de licuación basadas en ensayos "in situ"

Para evaluar el potencial de licuación de un depósito de arena, se realiza frecuentemente pruebas "in situ"; así como ensayos de laboratorio. Con los resultados de las pruebas se obtienen parámetros requeridos para ser utilizados en modelos que se implementan en la evaluación del potencial de licuación.

Una de las metodologías más usada a nivel mundial y de las más importantes, es la propuesta por Seed & Idriss (1971), la cual ha sido revisada y actualizada, con el fin de

mejorar los criterios de respuesta al evaluar el fenómeno de licuación. Esta metodología está basada principalmente en observaciones empíricas y en datos obtenidos de laboratorio y en campo, como por ejemplo la prueba de penetración estándar (SPT).

La capacidad del suelo para resistir el esfuerzo ejercido por un terremoto, se determina en función de dos variables:

- La demanda sísmica de la capa de suelo, expresada en términos de la relación de tensiones cíclicas (CSR).
- La capacidad del suelo para resistir la licuación, expresada en términos de la relación de resistencia cíclica (CRR).

Existe un factor de seguridad frente a licuación que se define como el cociente de CRR/CSR. Por lo general la licuación podría presentarse si el factor de seguridad es menor a uno, por lo tanto a mayor factor de seguridad, mayor será la resistencia del suelo. Sin embargo si un suelo presenta un factor de seguridad ligeramente mayor a uno, podría licuarse; consecuentemente en la práctica se suele estimar un valor seguro del factor de seguridad mayor que 1,3. Además, según Kramer y Stewar (2004), este factor de seguridad no hace diferencia entre licuación de flujo y movilidad cíclica, ni brinda información sobre el comportamiento del suelo después de la licuefacción.

3.6 Investigaciones y metodologías de análisis de licuación basadas en ensayos de laboratorio

Numerosas investigaciones basadas en resultados de ensayos de laboratorio se han llevado a cabo para determinar las características de un suelo potencialmente licuable. Las pruebas de laboratorio en conjunto con los ensayos "*in situ*", brindan una respuesta más favorable sobre un estudio de evaluación de licuación.

Los ensayos de laboratorio que normalmente se realizan para evaluar las características de los suelos ante el fenómeno de licuación están dados por ensayos granulométricos, ensayos de columna resonante y ensayos triaxiales, que incluyen ensayos consolidados drenados y no drenados.

El efecto de la gradación que se obtiene a partir de los ensayos granulométricos, es factor importante en muchas de las metodologías que estudian el potencial de licuación. Se menciona a continuación los requerimientos de gradación o granulometría de los suelos según distintas investigaciones:

Métodos de Kishida (1969): La propuesta indica que la ocurrencia de licuación del suelo ante sismos de magnitud mayores a siete, se puede presentar en condiciones donde las características granulométricas satisfacen las siguientes relaciones:

$$\triangleright 2 \text{ mm} > D_{50} > 0,074 \text{ mm}$$

$$\triangleright C_u < 10$$

Métodos de Ohsaki (1970): Ohsaki estableció que los suelos con nivel freático cercano a la superficie pueden licuarse si:

$$\triangleright 0,2 \text{ mm} < D_{60} < 2 \text{ mm}$$

$$\triangleright D_{10} < 0,1 \text{ mm}$$

$$\triangleright C_u < 5$$

Investigación Seed & Idriss (1971): Seed & Idriss señalan que las arenas muy finas, con D_{50} aproximadamente igual a 0,08 mm, son más susceptibles a la licuación.

Investigación de Tokimatsu y Yoshimi (1981): Indican que el D_{50} tiene poco efecto sobre la resistencia a la licuación si:

$$\triangleright D_{50} > 0,25 \text{ mm}$$

Investigación de Chang (1982): Esta investigación reporta que la resistencia a la licuación cíclica de una arena limpia, se ve fuertemente afectada por el diámetro medio D_{50} y el coeficiente de uniformidad C_u , condicionando que:

$$\triangleright D_{50} < 0,23 \text{ mm}$$

Sin embargo, los efectos individuales de D_{50} y C_u no son significativos. Vaid (1991), examina el efecto del C_u , probando tres arenas limpias con idéntica mineralogía, D_{50} , asimismo las curvas de clasificación de estas tres arenas fueron lineales. Finalmente se encontró que la resistencia a la licuefacción cíclica de las arena limpias, aumenta con el coeficiente de uniformidad con una densidad relativamente baja, y disminuye con una densidad relativamente alta. Sin embargo, hay una escasez de datos de prueba sobre la influencia del C_u para distintas mezclas de arena.

Investigación de W.L. Finn: Basados en un nuevo código sísmico, propone que un suelo es licuable si:

- $D_{50} > 0,05$ mm y el suelo granular $> 40\%$

Investigación Garga y McKay (1984): Indagaron según pruebas triaxiales cíclicas isotrópicas y anisotrópicas consolidadas, que suelos con D_{50} entre 0,1 y 0,3 mm tienen la resistencia cíclica más baja.

Investigación Robertson y Campanella (1985): Investigaron que la resistencia a la licuación aumenta en medida que el D_{50} decrece, respecto a:

- $D_{50} > 0,25$ mm

Además indican que para causar licuación la relación cíclica de tensiones frente a la penetración de cono de punta es una función del tamaño de grano y por tanto las curvas deben estar separadas por:

- $D_{50} < 0,15$ mm y $D_{50} > 0,25$ mm

Investigación Shibata y Temparaksa (1988): Determina que si $q_{c,crit}$ es la penetración de punta crítica, separando entre licuable y no licuable, entonces para un determinado CSR:

- Para $D_{50} > 0,25$ mm, $q_{c,crit}$ no es función de D_{50}
- Para $D_{50} < 0,25$ mm, $q_{c,crit}$ es función de D_{50}

A como D_{50} disminuya, también disminuye el potencial de licuación.

Otras investigaciones han establecido límites en las curvas granulométricas, definiendo fronteras que separan los suelos licuables de los no licuables, ejemplos de ellas se muestran en las Figuras 3.6 y 3.7, respectivamente. En la Figura 3.6 se puede observar las envolventes de las curvas granulométricas de algunos suelos que se han licuado en sismos previos, y que han sido estudiados en base a las investigaciones mencionadas anteriormente, dentro de las que se destacan Kishida y Seed e Idriss.

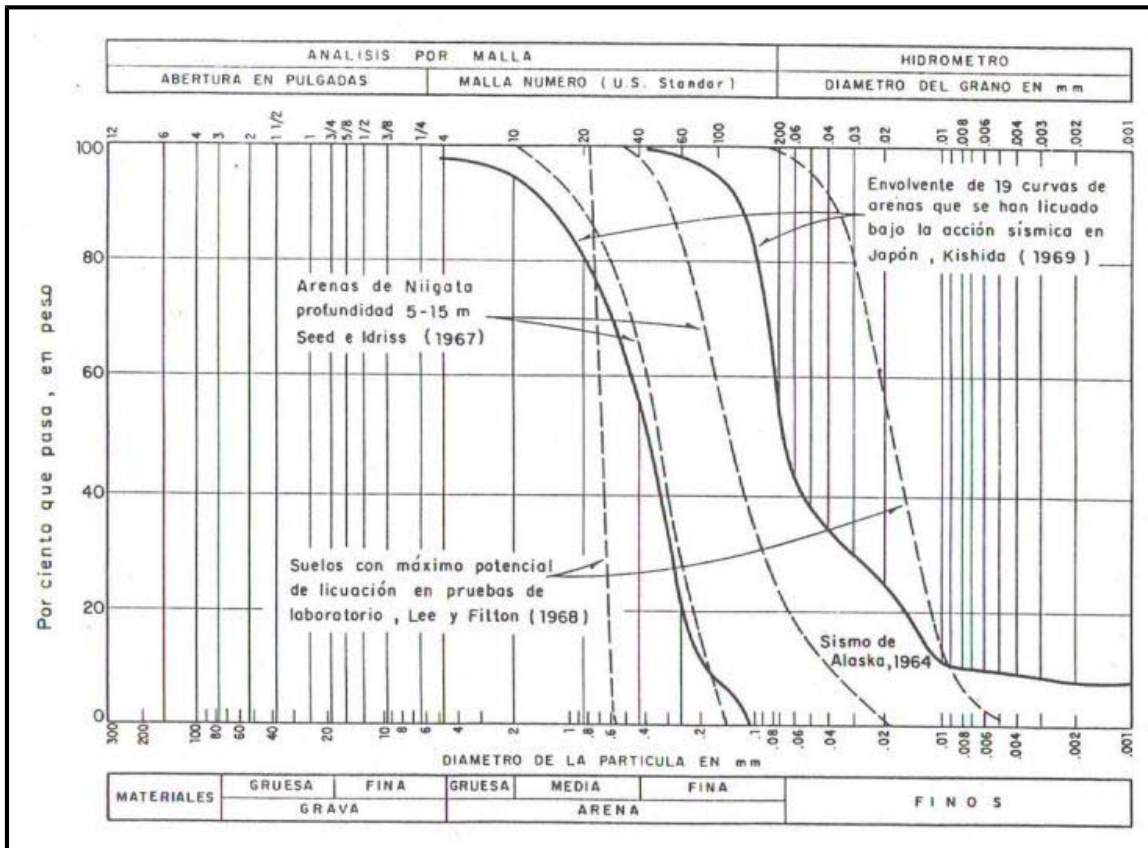


Figura 3.16: Granulometría de algunos suelos que han sufrido licuación basados en investigaciones y metodologías de evaluación de susceptibilidad a la licuación.

Fuente: Adaptado de Henríquez, (2007)

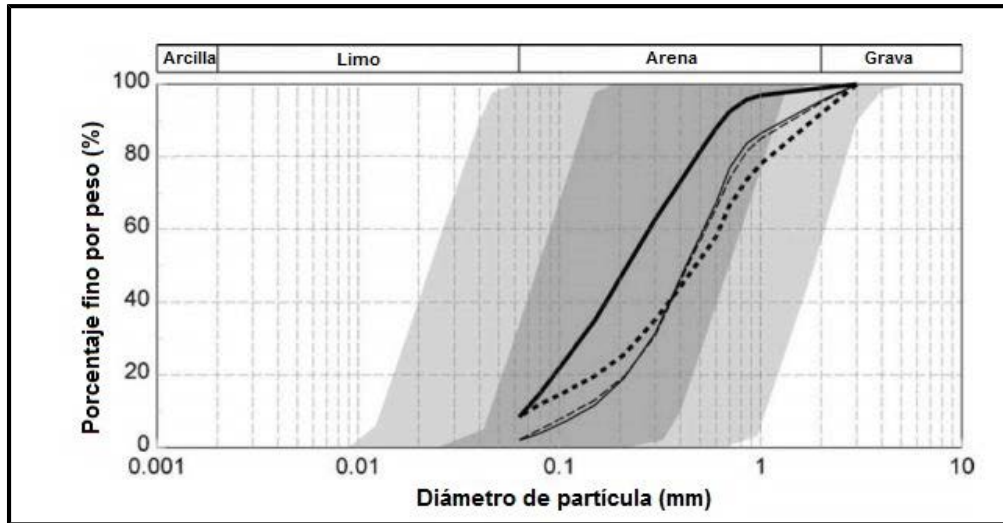


Figura 3.17: Variación del tamaño de grano con porcentaje de fino para suelos licuables en Japón.

Fuente: Adaptado de Obando, (2009)

3.6.1 Efecto de la gradación según investigaciones de Chang (1987) y Koester (1993)

Nien-Yiu Chang (1987), profesor de la Universidad de Colorado en Denver, realizó un reporte preliminar sobre el potencial de licuación de suelos de grano fino, en donde se indagaba el efecto de gradación de los suelos.

Según el reporte, se señala que en un estudio de susceptibilidad de licuefacción por parte de Lee y Fitton (1969) probaron arenas limpias uniformes, con tamaño de grano promedio que oscila de 0,1 a 13,4 mm y un coeficiente de uniformidad de alrededor de 1,5. También se ensayaron algunos suelos limosos. Las gradaciones de estos suelos se muestran en la Figura 3.8.

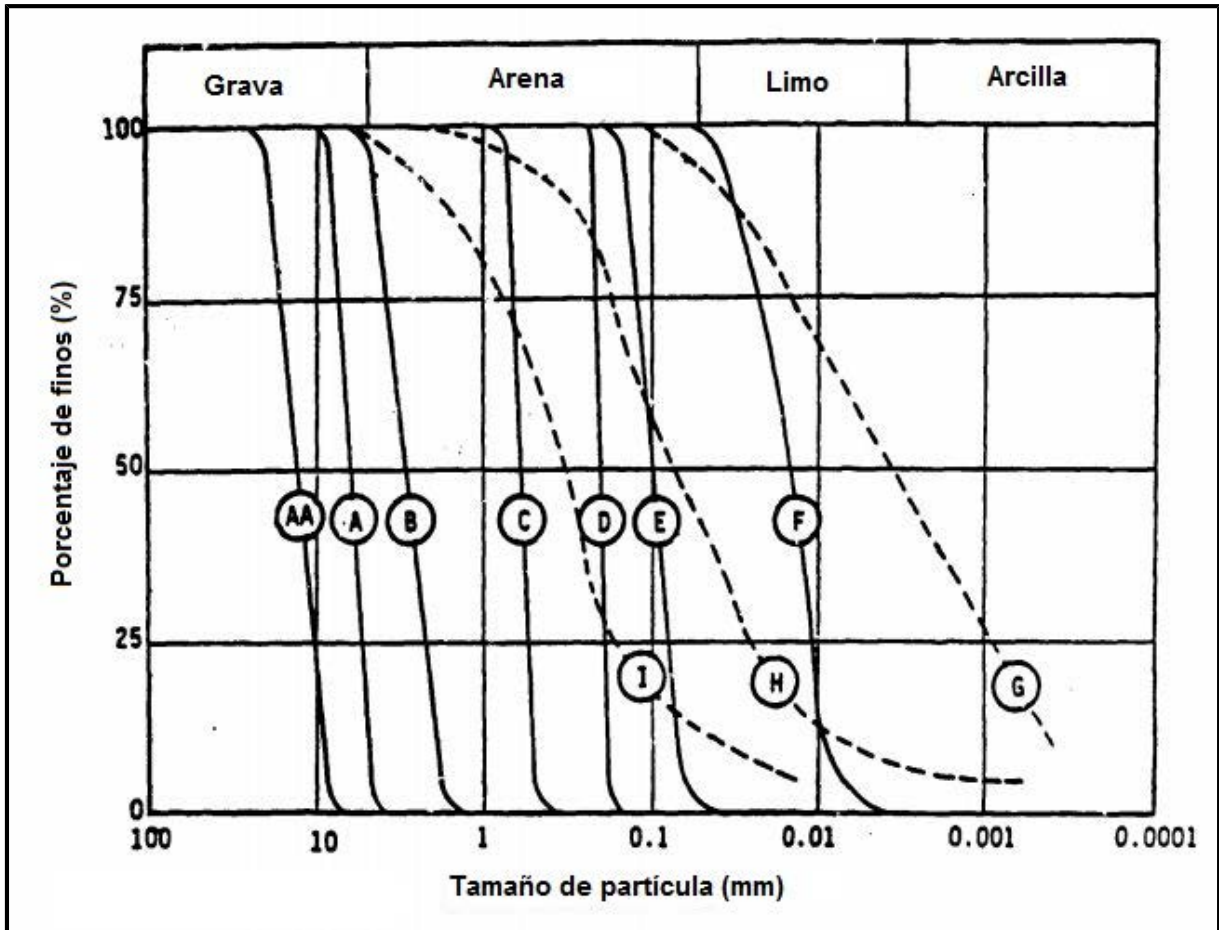


Figura 3.18: Gradación de suelos, probado por Lee y Fitton (1969)

Fuente: Adaptado de Chang, (1987)

El reporte indica que arenas uniformes y finas son más vulnerables a la licuación y que la resistencia dinámica aumenta a medida que aumenta el tamaño de grano promedio. Con respecto a los suelos limosos y arcillosos se encontró que poseen una mayor resistencia dinámica respecto a las arenas uniformes; sin embargo señala que los efectos de penetración de membrana que se presenta en los ensayos triaxiales no fueron valorados en el estudio.

Chang y Ko (1982) concluyen que el potencial de licuación de arenas limpias, se ve fuertemente afectado por sus características de gradación, y que el tamaño medio de grano impone un efecto mucho más fuerte que el coeficiente de uniformidad. La resistencia a la licuefacción disminuye al disminuir el tamaño de grano medio. Las arenas uniformes finas resultaron ser más vulnerables a la licuación. Suelos limpios, medianos y grueso están

sujetos a los efectos potencialmente serios de penetración de membrana y la resistencia a la licuación de estos suelos puede ser sobreestimada, si el efecto de penetración en la membrana no se contabiliza. Por lo tanto es extremadamente importante investigar el efecto de la penetración de la membrana en resistencia a la licuación de los suelos granulares.

Consecuentemente en los estudios elaborados por el profesor Chang, Joseph Koester (1993), se investigó el efecto del contenido y tipo de finos en el potencial de licuación de suelos de grano fino de baja a media plasticidad. La investigación tiene gran relevancia e importancia en la presente investigación, debido a que se utilizaron tres patrones de arenas en los experimentos realizados, de manera que se ensayaron distintas gradaciones: arena uniforme de grano fino (F), arena uniforme de grano medio (M), y arena bien graduada (W). La Figura 3.9 muestra la granulometría de los tres patrones de arenas mencionados. Además en el Cuadro 3.5 se presentan las gravedades específicas de las arenas y sus respectivos coeficientes de uniformidad obtenidos a partir de las curvas granulométricas, así como el tamaño medio de las partículas (D_{50}).

Cuadro 3.7: Gradación de arenas patrón

Arena patrón	G_s	Pasando Malla #8	Pasando Malla #20	Pasando Malla #40	Pasando Malla #60	Pasando Malla #100	C_u	D_{50} (mm)
F	2,65	N/A	N/A	100%	67%	42%	2,3	0,18
M	2,65	N/A	100%	38%	N/A	N/A	1,8	0,48
W	2,64	100%	75%	48%	32%	20%	5,7	0,45

Fuente: Adaptado de Koester, (1993)

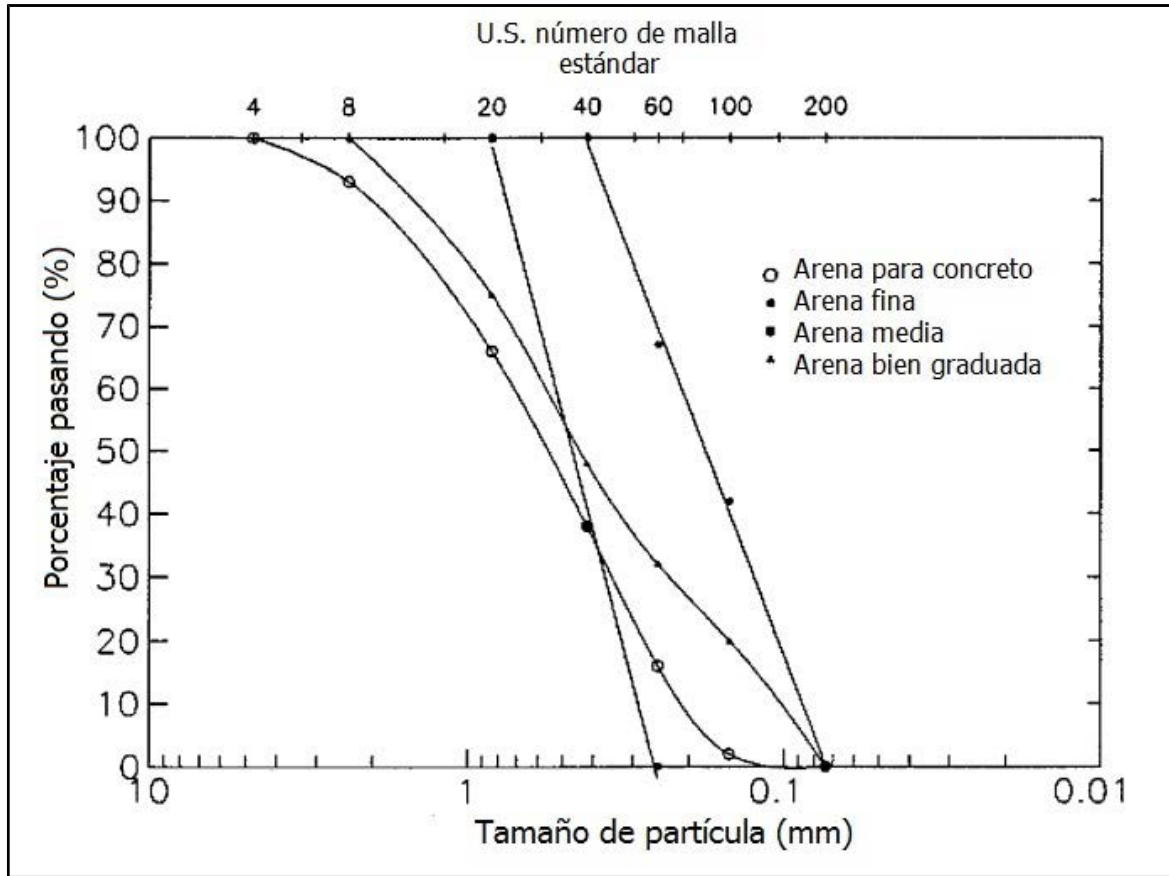


Figura 3.19: Gradación de arenas patrón utilizadas en investigación de Koester (1993)

Fuente: Adaptado de Koester, (1993)

La investigación se fundamentó en una serie de alrededor de 500 ensayos triaxiales cíclicos no drenados, realizados en una matriz de mezclas reconstituidas de arena, limo y arcilla plástica, para examinar la influencia de la resistencia de licuación y características de generación de presión de poro con distintas gradaciones y consistencia. Los resultados forman parte de un estudio realizado por el Departamento de Investigación y Desarrollo de Obras Civiles (CWRD, por sus siglas en inglés), conducido por la Estación Experimental de Ingeniería de Vías Fluviales del ejército de Estados Unidos (WES, por sus siglas en inglés), dicho estudio se llevó a cabo entre los años 1983 y 1992.

Un total de 129 mezclas fueron preparadas para generar una base de datos de los efectos del tipo y contenido de finos, sobre la resistencia triaxial cíclica. Las pruebas fueron conducidas

por el profesor N.Y. Chang y varios de sus estudiantes, así como personal del laboratorio de geotecnia de la Universidad de Colorado.

El estudio hizo hincapié en los efectos de la consistencia de los finos en la resistencia cíclica, no en la consistencia de la fracción de gradación entera pasando la malla #40, como especifica la norma ASTM D 4318 (ASTM 1991). El factor de gradación y consistencia fueron aislados, los propios finos, y particularmente los minerales constituyentes de arcilla, son la fuente de plasticidad del suelo. El control de las propiedades de consistencia o plasticidad, se logró fácilmente mediante la exclusión de la fracción más fina de arena pasando la malla #40 y retenida en la malla #200.

En el documento solo se presenta los efectos relativos sobre la resistencia triaxial cíclica sin drenaje del contenido de finos y las características de consistencia (como el índice de plasticidad) de la fracción fina. En la figura 3.10 se puede observar la generación de curvas de resistencia triaxial cíclica para muestras construidas de arena de grano medio, a la cual se le añadió finos con índice de plasticidad de 4. El esfuerzo efectivo de confinamiento en cada prueba mostrada en la Figura 3.10, fue de 15 psi (103,4 KPa). El material más fuerte representado, es la arena limpia de grano medio, la adición de hasta el 20% (en peso) de finos de baja plasticidad, demuestra que se reduce progresivamente la fuerza cíclica; la resistencia aumenta cuando se incrementa los finos después de ese valor.

La resistencia cíclica más baja encontrada, se presentó siempre en gradaciones que contienen limos o limos arcillosos finos. La figura 3.11 representa las curvas de resistencia cíclica, desarrolladas tanto para mezclas con arenas finas y arenas patrón bien graduadas, debido a los resultados similares se muestran en una sola figura. Con la adición de 5% de finos, se observó un aumento de la resistencia a la licuación (independientemente del índice de plasticidad), esto se notó a través de las matrices de análisis completos de arenas finas y bien graduada.

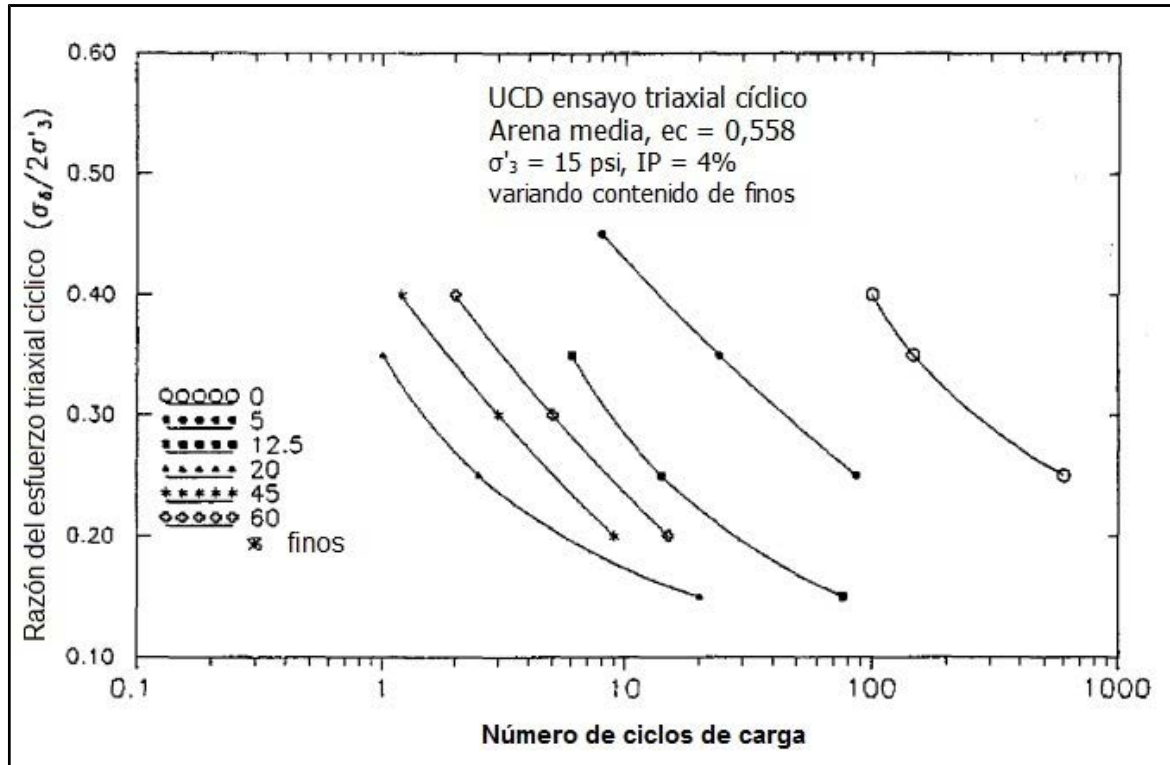


Figura 3.20: Curvas de resistencia triaxial cíclica para mezclas de arenas medias

Fuente: Adaptado de Koester, (1993)

El tamaño de grano medio, D_{50} , de la arena de grano medio es aproximadamente de 0,48 mm. Las arenas uniformemente graduadas de este tipo, pueden estar sujetas a la sobreestimación de un 35% de la resistencia triaxial cíclica, como para causar la licuación en 30 ciclos, como consecuencia del cumplimiento de membrana. El cumplimiento puede ser responsable de las notablemente altas resistencias cíclicas observadas en las muestras de arena limpia de grano medio. Conforme se añaden los finos para llenar los vacíos entre las partículas periféricas de arena gruesa, el potencial de penetración de la membrana y el cumplimiento consecuente en las pruebas sin drenaje se reduce. No se cree que el cumplimiento de la membrana pueda afectar la medición de la resistencia cíclica en especímenes de diámetro de 7,11 cm de diámetro de la mezclas de arena patrón de grano fino o bien graduada.

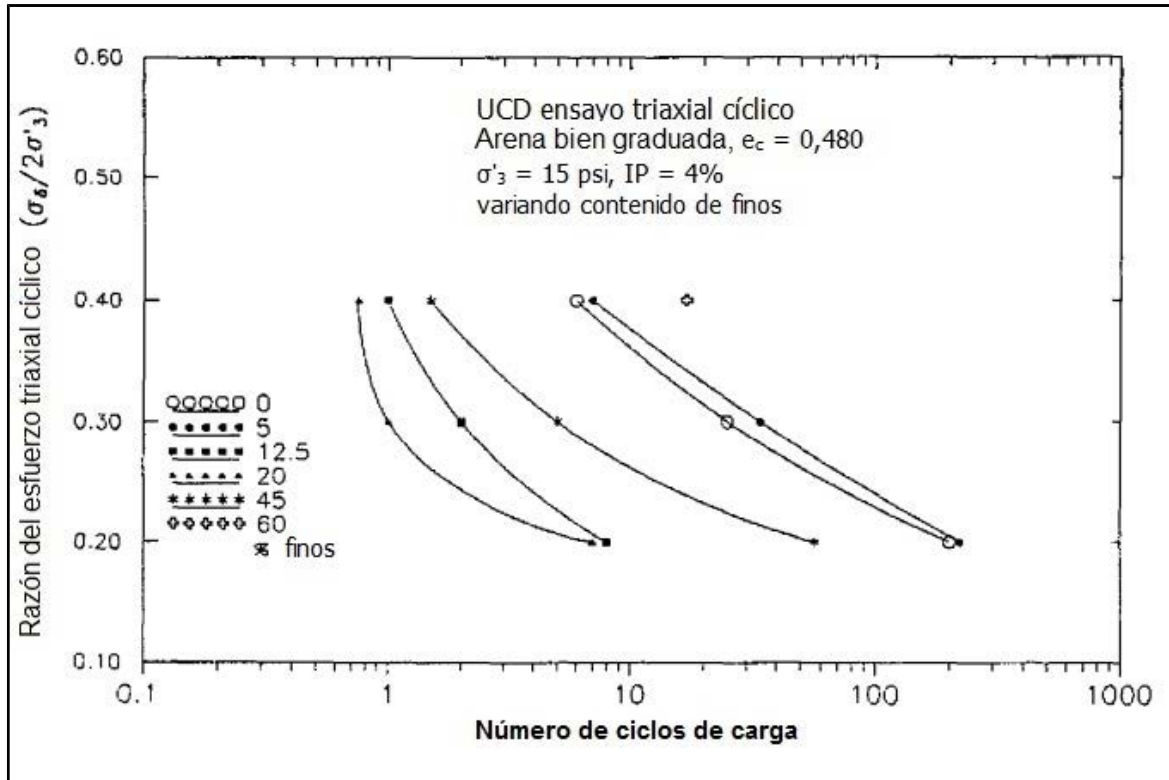


Figura 3.21: Curvas de resistencia triaxial cíclica para mezclas de arenas finas y arenas bien graduadas

Fuente: Adaptado de Koester, (1993)

La figura 3.12 representa los coeficientes de la resistencia triaxial cíclica, interpolados para causar licuación en 30 ciclos de carga en las mezclas de arena patrón fina (a base de arena patrón con $D_r=50\%$), con un contenido variable de finos, ensayados a 30 psi (206,8 KPa) de presión de consolidación eficaz. Cada curva individual representa los resultados de las pruebas sobre las muestras que contengan finos con un índice de plasticidad particular, como se muestran en las series contenidas en la Figura 3.12. Dependiendo del índice de plasticidad de los finos, la menor resistencia cíclica se asocia generalmente con la adición de 12,5% y 20% de finos.

Los contenidos más bajos de finos asociados con menor resistencia triaxial cíclica, fueron observados generalmente en especímenes bien graduados. Respecto al esfuerzo de consolidación, no se encontró que afectara la determinación de menor resistencia cíclica ligada en el estudio.

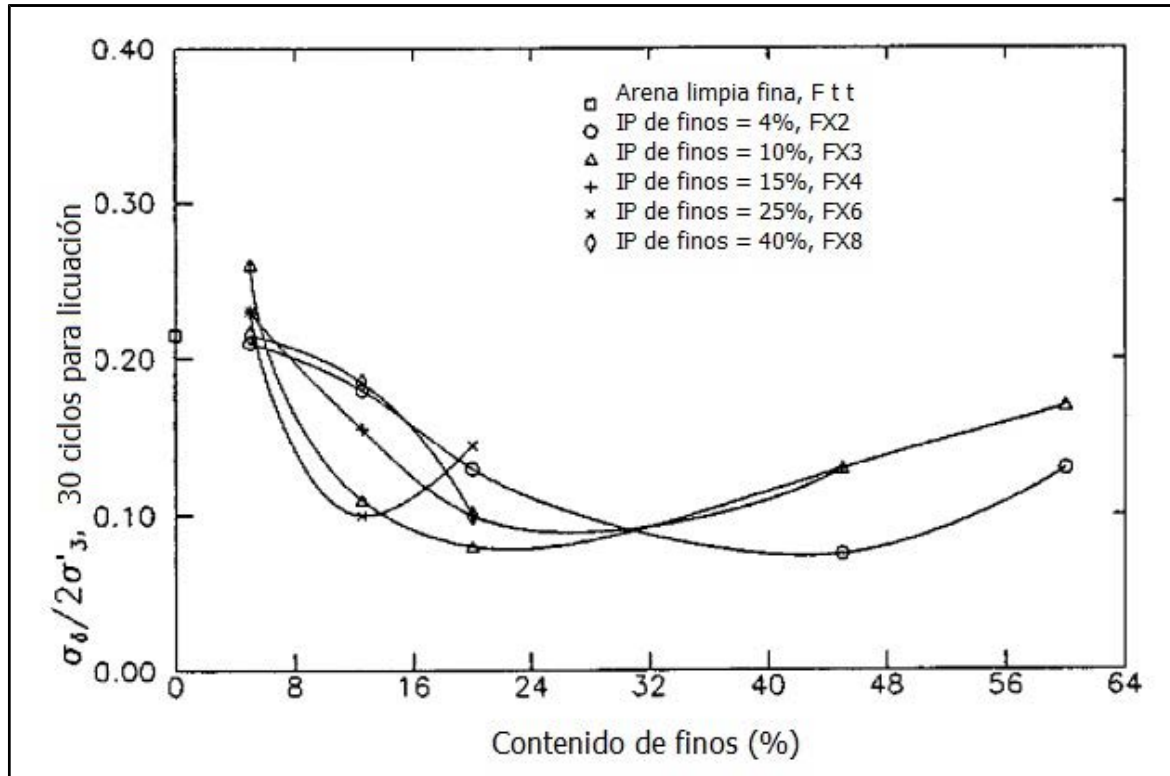


Figura 3.22: Razones de esfuerzos triaxiales cíclicos para causar licuación en 30 ciclos para las mezclas de arena finas

Fuente: Adaptado de Koester, (1993)

Finalmente la investigación de Koester, concluye que la presencia de finos de baja plasticidad no proporciona necesariamente una mayor resistencia a la licuación, y respecto al efecto de gradación de las arenas, concluye que la resistencia cíclica triaxial de especímenes bien graduado disminuyen a un valor de límite inferior, cuando se añaden finos de baja plasticidad hasta aproximadamente el 20%. La brecha de gradación de arenas sueltas que contienen hasta un 26% de limo, arcilla limosa, o limo arcilloso fino, pueden ser altamente susceptibles a la licuación.

Si bien la investigación incluye el efecto de gradación de distintas muestras de suelos, los resultados se basaron prácticamente en la relación del contenido de finos y su efecto sobre la resistencia a la licuación.

Capítulo 4: Ensayos a Escala Reducida

4. ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA

4.1 Definición de modelos de ensayo a escala reducida

Los modelos a escala reducida son utilizados en muchas de las ramas de la ingeniería, tales como la aeronáutica, la industria automotriz, ingeniería civil, etc. Con el análisis dimensional, base de los ensayos a escala, se busca obtener información sobre lo que ocurre en un determinado fenómeno real, reproducido a escala. Los resultados de la investigación son válidos siempre y cuando los números adimensionales que se toman como variables independientes para la experimentación, tengan el mismo valor tanto en el modelo a escala como en el modelo real.

El estudio de modelos a escala reducida, es destacable, ya que a través de simulaciones, es posible predecir la respuesta de los suelos y estructuras reales sometidas a eventuales acciones sísmicas. En relación a esta alternativa, se propone el estudio de modelos a escala reducida mediante el uso de mesas vibratorias.

Con el uso de mesas vibratorias se busca estudiar el comportamiento integral del suelo o del sistema suelo-estructura, cuando es sometido a una excitación dinámica. Al presentar los suelos características complejas, existe el problema de no escalar adecuadamente todas las propiedades que presenta. Ejemplo de esto es la presión de confinamiento dada por el propio peso del suelo, y que también depende de la profundidad del modelo, por lo tanto hace que los modelos a escala no sean capaces de reproducir exactamente el comportamiento real, con la excepción de que se aumente la densidad del material en estudio o que la aceleración de la gravedad se incremente de manera artificial.

Los ensayos a escala reducida realizados en la presente investigación, se basan en el modelo compuesto por una mesa vibratoria y una caja de ensayo, en el cual se monta la representación del sistema suelo-estructura. Se detalla a continuación las características de mesas vibratorias y cajas de ensayo utilizadas en el desarrollo de modelos a escala reducida.

4.2 Mesas vibratorias

Para simular el efecto de un sismo en una estructura, se cuenta con técnicas experimentales y complementarias, como el uso de mesas vibratorias. Una mesa vibratoria cuenta con una plataforma que imita un sismo o terremoto, produciendo vibraciones en uno, dos y hasta tres dimensiones.

Con el avance tecnológico, las mesas vibratorias han sido mejoradas en sus características de diseño y construcción, a tal punto que logran representar eventos sísmicos con gran exactitud, produciendo movimientos de hasta seis grados de libertad; es decir, cuentan con la capacidad de moverse hacia delante, atrás, arriba, abajo, izquierda y derecha, combinados con la rotación sobre tres ejes perpendiculares, el movimiento de todos los ejes, son independientes entre ellos.

4.2.1 Reseña histórica y uso actual

4.2.1.1 Primeras mesas vibratorias

El uso de máquinas o mesas vibratorias en las investigaciones de la ingeniería sísmica, empieza a finales del siglo XIX. La primera mesa vibratoria conocida, se construyó en Japón, y era impulsada por la fuerza de la mano, el modelo fue experimentado por el profesor Omori, de la Universidad de Tokio, quien colaboró con el profesor John Milne, para simular el comportamiento de los objetos en los terremotos reales, produciendo artificialmente la agitación de los modelos. En la Figura 4.1 se puede observar el prototipo de la máquina vibradora, el modelo conformado por un vagón sobre rieles, que producía un movimiento oscilatorio, a través de una rueda conectada por una manivela excéntrica.

Debido al terremoto de California de 1906, que causó destrucciones de estructuras y produjo la pérdida de miles de personas, F.J. Rogers, un profesor de física de la Universidad de Stanford, se interesó en los experimentos de vibración, para determinar la respuesta de los suelos ante las vibraciones de un terremoto.

Rogers comenzó una serie de pruebas simples, que consistían en volcar cubos de arena de diferentes grados de humedad contenidos en una caja de madera con dimensiones de 100 x 86 x 30 cm, sobre una mesa que se movía, utilizando una manivela excéntrica unida a un

motor eléctrico. En la Figura 4.2, se observa el diseño de Rogers, el cual producía un movimiento sinusoidal, con frecuencia entre 0,5 Hz y 4,6 Hz, y con un desplazamiento máximo horizontal de 10 cm.

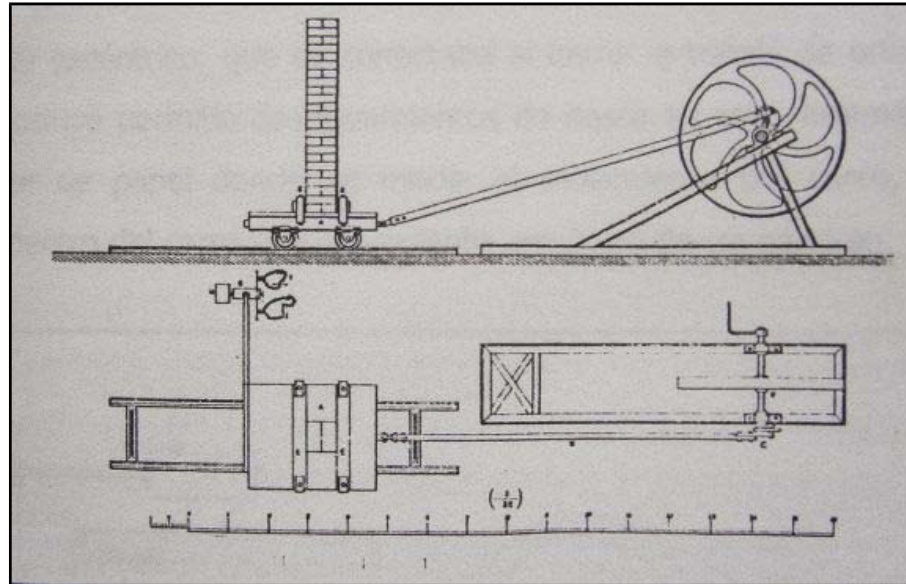


Figura 4.23: Diagrama de mesa vibratoria de Milne, (1890)

Fuente: Adaptado de Severn, (2010)

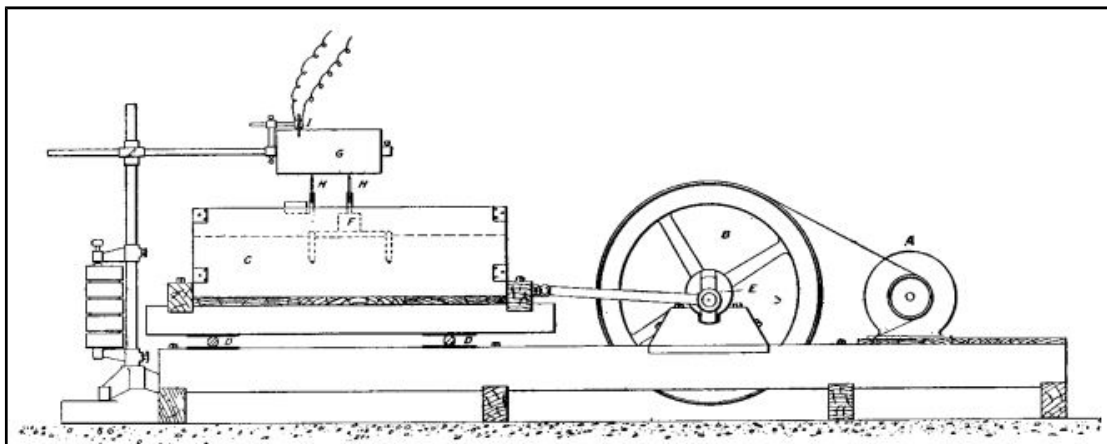


Figura 4.24: Mesa vibratoria diseñada y usada por F.J. Rogers para estudio dinámico de suelos

Fuente: Adaptado de Severn, (2010)

4.2.1.2 Primeros avances en mesas vibratorias

Después del terremoto de Santa Bárbara en 1925, se utilizó en experimentos de Caltech, una mesa vibratoria, igualmente en la Universidad de Stanford, la experimentación estuvo dirigida por el profesor de ingeniería mecánica Lydik Jacobsen, por sugerencia del profesor de geología Bailey Willis. Jacobsen construyó una máquina con una plataforma de acero, la mesa vibratoria producía dos movimientos accionados de dos maneras diferentes: el primer movimiento inducido por el impacto de un péndulo pesado, y el segundo era provocado por una rotación desequilibrada del volante accionado por un motor eléctrico (ver Figura 4.3).

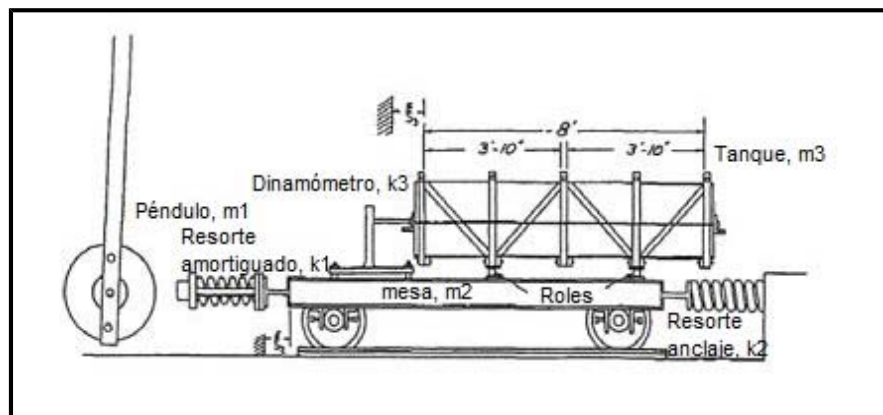


Figura 4.25: Mesa vibratoria con péndulo, propuesta por Jacobsen

Fuente: Adaptado de Severn, (2010)

En 1934 el profesor Jacobsen y su alumno, John Blume, desarrollaron un campo de instrumentos de fuerte sacudida de las estructuras, e investigaron el rendimiento de varios edificios. Conjuntamente crearon uno de los modelos de edificios multi-dimensionales más antiguos, y estudiaron su desempeño en una mesa vibratoria (ver Figura 4.4). Durante la década de 1940 se utilizó una mesa vibratoria para simular el impacto de terremotos en tierra, y a la vez estudiar el comportamiento mecánico de grandes muros de corte, estructuras de mampostería, marcos y otros elementos estructurales. Estos experimentos fueron de gran importancia para comprender la construcción de vibraciones y las implicaciones del rendimiento dinámico en el diseño estático.

En la década de 1950, en Italia se utilizaron péndulos, que se habían ampliado con dispositivos contra-rotativos de comunicación de entrada, brindando así un mejor control de

la frecuencia, también se utilizaron excitadores electrodinámicos. Y en Japón el movimiento fue inducido por la liberación de resortes comprimidos.

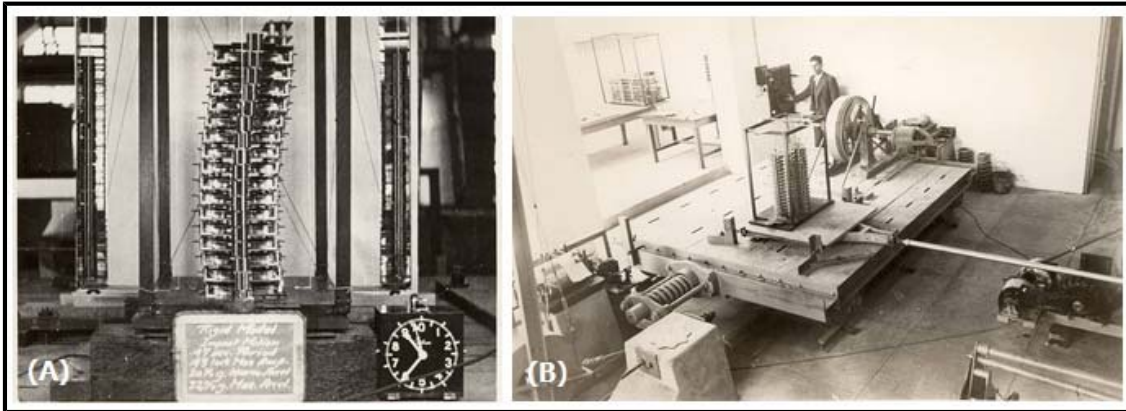


Figura 4.26: (A) Maqueta a escala reducida de un edificio, (B) mesa vibratoria utilizada para estudiar el desempeño de edificios

Fuente: The John A. Blume Earthquake Engineering Center, (2013)

4.2.1.3 Era contemporánea de las mesas vibratorias

Las mesas vibratorias se desarrollaron con gran éxito con la llegada de las computadoras, se tuvo el control de aparatos de accionamiento electrohidráulico, el procesamiento de los registros sísmicos reales y artificiales, y la adquisición de datos y análisis. La mesa vibratoria creada por el Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica de la Universidad de California, Berkeley, en 1972, representa una línea divisora entre la primera generación de simuladores y las máquinas modernas. La mesa fue conocida como “mesa vibratoria de mediana escala”, debido a que fue planeada a gran escala (30,5 x 30,5 m) pero nunca fue financiada, el planeamiento original estuvo a cargo de R.W. Stephen, J.G. Bouwkamp, R.W. Clough, y J. Penzien.

La mesa que logró construir el grupo de la UC Berkeley, tenía dimensiones de 6 x 6 m (ver Figura 4.5), también se contó con la colaboración del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT por sus siglas en inglés), quienes se encargaron de diseñar los inductores hidráulicos, los cuales podían controlar cinco de los seis grados de libertad disponibles.

Para el año de 1997, habían cinco mesas vibratorias de gran importancia en los Estados Unidos (UC Berkeley, SUNY Buffalo, University of Illinois a Urbana-Champaign, US Army Construction Engineering Research Lab, y UC San Diego), y otras 14 mesas en el resto del mundo, de las cuales 12 estaban en Japón.

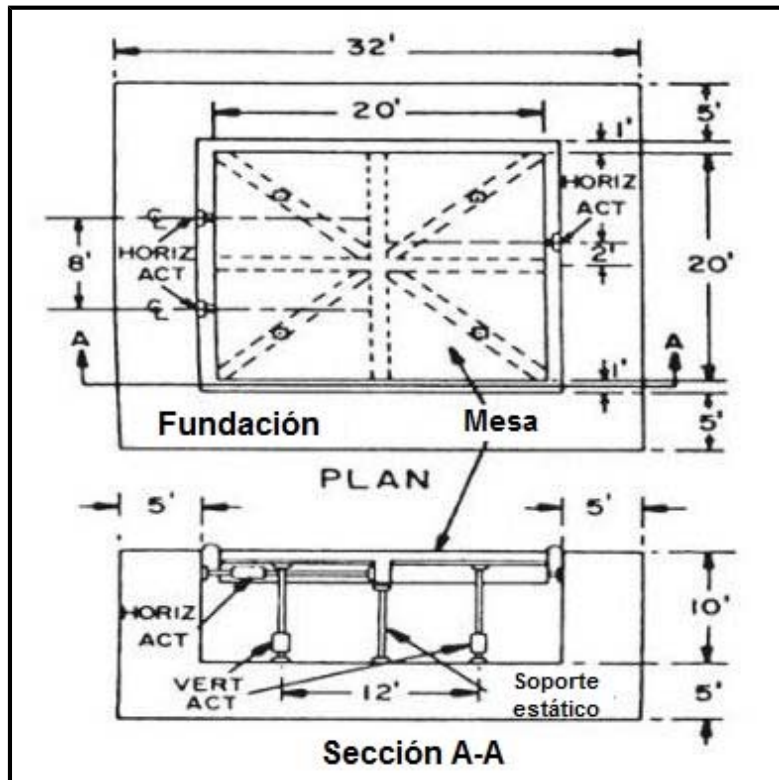


Figura 4.27: Diseño de mesa vibratoria de la UC Berkeley

Fuente: Adaptado de Severn, (2010)

En la actualidad existen mesas vibratorias de todos los tamaños, las cuales son utilizadas para distintos propósitos, pero no cabe duda que con el desarrollo de las mesas vibratorias en el campo de la ingeniería sísmica, se ha obtenido resultados experimentales de gran importancia, logrando representar movimientos sísmicos con gran veracidad, además de interpretar el comportamiento dinámico de los suelos.

La mesa vibratoria más grande del mundo, se encuentra instalada en la ciudad de Miki, Japón, y es conocida como E-Defense, contiene una plataforma de 15 x 20 metros, en la cual cabe un edificio de cinco pisos de altura, y es capaz de mover una estructura de 1200 toneladas, en la Figura 4.6 se puede observar el gran tamaño de la mesa vibratoria.



Figura 4.28: Mesa vibratoria "E-Defense" instalada en Japón, lista para ensayar una casa a gran escala.

Fuente: Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering, (2006)

4.2.1 Ventajas y limitaciones de las mesas vibratorias

La representación de distintos movimientos, que simulan eventos sísmicos, forma parte de las ventajas principales del uso de mesas vibratorias, ya que se pueden representar excitaciones de todo tipo: acelerograma natural o sintético, aceleración sinusoidal o aleatoria.

Asimismo los dispositivos pueden reproducir acelerogramas de alto nivel de aceleración que permiten determinar los límites y modos de falla de las estructuras ensayadas.

Con el uso de las mesas vibratorias existe la facilidad de instrumentar ampliamente los modelos de prueba, con el objetivo de obtener los parámetros mecánicos importantes para el diseño estructural.

Para poder representar movimientos sísmicos representativos, se necesita de costosos equipos que forman en conjunto el funcionamiento óptimo de las mesas vibratorias, consecuentemente se diseñan mesas vibratorias con sistemas hidráulicos de menor potencia, disminuyendo la veracidad de respuesta de los ensayos realizados.

También debido a los altos costos que demanda la construcción de mesas vibratorias de mayor potencia, existe la limitante de no poder realizar pruebas con estructuras a escala natural, debido a que se utilizaría potencia muy alta en los sistemas electro-hidráulicos muy alta, lo que significa una mayor inversión monetaria.

4.3 Tipos de cajas utilizadas en ensayos a escala reducida

Elemento fundamental en los ensayos a escala reducida, es el contenedor o caja, en el cual se deposita el material en estudio, y que conjuntamente con la mesa vibratoria forman el modelo a escala reducida.

Existen dos tipos de cajas, para la elaboración de ensayos a escala reducida, estas se clasifican en flexibles y rígidas y presentan características como distorsión del campo de tensiones globales, modificación del campo de deformación, y generación de ondas reflejadas en las paredes. Con base en estas características se pueden deducir restricciones y alcances dependiendo de si la caja a utilizar es flexible o rígida (Estaire, 2004).

4.3.1 Distorsión del campo de tensiones globales

En un terreno uniforme, afirmado sobre una base rocosa rígida, sometido a una excitación sísmica en dirección horizontal, además de la tensión geo-estática debida al peso propio, aparece una fuerza inercial proporcional al peso y tensiones tangenciales, tanto en el plano horizontal como vertical.

En un contenedor que tenga las paredes lisas, perpendiculares al movimiento, no se pueden generar las tensiones tangenciales en el plano vertical, por lo que se produce una distorsión del campo de tensiones globales en el interior del contenedor.

4.3.2 Modificación del campo deformacional

Un terreno uniforme, con superficie horizontal, apoyado sobre una base rocosa rígida, sometido a una excitación sísmica en dirección horizontal, presentará movimientos iguales en cualquier punto del terreno, situado a la misma profundidad.

En el caso del uso de cajas con paredes frontales fijas en los ensayos a escala reducida, surge una modificación del campo deformacional en las cercanías de las paredes, ya que

estas permanecen fijas durante la excitación sísmica. Sin embargo, si el contenedor o caja es relativamente largo, la deformación del suelo en el centro del modelo, reproduce adecuadamente la realidad, ya que la influencia del movimiento nulo de las paredes frontales es mucho menor.

4.3.3 Generación de ondas reflejadas en las paredes

La vibración real de un suelo en dirección horizontal, se debe principalmente a las ondas S propagadas verticalmente, sin embargo, en un contenedor de paredes rígidas la interacción entre las paredes y el suelo pueden causar compresiones y dilataciones laterales que generan ondas P. Además existe la limitante de que las paredes rígidas reflejen las ondas sísmicas, por lo que la vibración del suelo dentro del contenedor sea una combinación de ondas S y P.

Estaire (2004) señala que las paredes frontales y laterales deberían ser diferentes, de modo que las paredes frontales sean deformables, rugosas y absorbentes, para que al producirse el movimiento perpendicular a las paredes, el suelo acompañe el movimiento en su deformación cortante. La rugosidad permitiría el desarrollo de tensiones tangenciales verticales, y la producción de reflexión de ondas se vería limitada con la permeabilidad de las paredes. De forma contraria, las paredes laterales deberían ser completamente lisas, para que no se produjeran tensiones tangenciales que deformaran las condiciones bidimensionales.

4.4 Factores de escala para interpretación de los ensayos

Según Estaire (2004), para que los resultados a escala reducida tengan la validez necesaria, se debe cumplir con dos principios básicos:

- El comportamiento del material que constituye el terreno en el modelo, debe cumplir con los mismos regimientos que el correspondiente a la realidad (presión de confinamiento).
- Las leyes fundamentales de la mecánica deben satisfacerse tanto en el modelo como en la realidad. Estas leyes fundamentales en su forma más simple tienen las siguientes expresiones, para un suelo seco:

$$L^T \sigma + \rho g = \rho u'' \dots\dots\dots \text{ecuación de equilibrio} \quad (\text{F.4.1})$$

$$d\varepsilon = L \cdot du \dots\dots\dots \text{ecuación de la deformación} \quad (\text{F.4.2})$$

$$d\sigma = D \cdot d\varepsilon \dots \dots \dots \text{ecuación constitutiva del material} \quad (\text{F.4.3})$$

De las expresiones anteriores σ , ε y u son los vectores de tensión, deformación y desplazamiento, respectivamente, D es el módulo de deformación tangente, g la aceleración de la gravedad, ρ es la densidad, y L es un operador en derivadas parciales.

De las manipulaciones algebraicas de las ecuaciones básicas presentadas, indicadas en función de los factores de escala geométrico (λ), de densidad (λ_p) y de deformación (λ_ε), se obtienen los factores de escala mostrados en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.8: Factores de escala para ensayos a escala reducida en mesas vibratorias

Parámetro	Tipo I (Generales)	Tipo II ($\lambda_p = 1$)	Tipo III ($\lambda_p = 1 / \lambda_\varepsilon = \lambda^{0,5}$)
Longitud Densidad Tiempo	λ λ_p $(\lambda \lambda_\varepsilon)^{0,5}$	λ 1 $(\lambda \lambda_\varepsilon)^{0,5}$	λ 1 $0,75 \lambda$
Aceleración Velocidad Desplazamiento	1 $(\lambda \lambda_\varepsilon)^{0,5}$ $\lambda \lambda_\varepsilon$	1 $(\lambda \lambda_\varepsilon)^{0,5}$ $\lambda \lambda_\varepsilon$	1 $\lambda^{0,75}$ $\lambda^{1,5}$
Tensión Deformación Módulo de deformación	$\lambda \lambda_p$ λ_ε $\lambda \lambda_p / \lambda_\varepsilon$	λ λ_ε $\lambda \lambda_\varepsilon$	λ $0,5 \lambda$ $0,5 \lambda$

Fuente: Adaptado de Estaire, (2004)

Donde λ el factor de escala geométrico entre la realidad y el modelo, λ_ε el correspondiente a las deformaciones, el de los desplazamientos, λ_p el factor correspondiente a la densidad.

Algunos de esos factores de escala tienen un significado físico, por ejemplo, el desplazamiento es el producto de una deformación por una longitud, por lo que su factor de escala debe ser $\lambda \lambda_\varepsilon$.

Generalmente en los ensayos a escala reducida, se utiliza el mismo tipo de material existente en la realidad, por lo que el factor de escala de densidad (λ_p) es igual a la unidad. En estos casos, los restantes factores de escala se simplifican, tal como muestran en la columna denominada "Tipo II", del cuadro anterior.

Por otra parte, en los ensayos en los que se analizan problemas de interacción suelo-estructura, uno de los factores de escala más importante es el correspondiente a la deformación (λ_ϵ), que suele determinarse de forma rigurosa mediante la expresión de la fórmula F.4.4, en función de la velocidad de propagación de las ondas de corte en el modelo ($V_{s,m}$) y en la realidad ($V_{s,r}$).

$$\lambda_\epsilon = \lambda \left(\frac{V_{s,m}}{V_{s,r}} \right)^2 \quad (\text{F.4.4})$$

Sin embargo, si la velocidad de propagación de las ondas de corte no es conocida, generalmente se hace la hipótesis de que el módulo de corte elástico es proporcional a la raíz cuadrada de la presión de confinamiento, siempre que la densidad del terreno en el modelo y en la realidad sea la misma. Esta conjetura es equivalente a:

$$\lambda_\epsilon = \lambda^{0,5} \quad (\text{F.4.5})$$

De esta manera se obtienen los factores de escala de la columna designada como "Tipo III" del Cuadro 4.1. Este conjunto de factores de escala es el más utilizado en la práctica, ya que en los ensayos se suelen cumplir las dos condiciones anteriormente expuestas.

Para lograr entender los resultados obtenidos de los ensayos a escala reducida, es necesario utilizar estos factores de escala, para proporcionar un resultado a escala real, de manera que el proyecto en sí tenga validez e importancia.

Capítulo 5: Resultados de Ensayos a Escala Reducida

5. RESULTADOS DE ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA

5.1 Definición de modelo de ensayo a escala reducida

Los modelos a escala reducida proporcionan una metodología importante en el estudio de la susceptibilidad de un suelo a licuarse. Los ensayos experimentales en depósitos de suelos saturados en un determinado prototipo, no es posible llevar a cabo, debido al tamaño y dificultad de reproducir las condiciones reales que se presentan en el fenómeno de licuación. Por ello se realizan ensayos con modelos a escala reducida para simular el efecto tal y como se presentara en la realidad.

La selección del método a escala reducida es de vital importancia, debido a la información obtenida sobre lo que ocurre en el fenómeno a escala real. La semejanza física entre el fenómeno real y el ensayo, está prevista por los elementos constituyentes del modelo. Para lograr que el método sea efectivo, se buscan elementos que integren un ambiente susceptible a licuación, en el cual a su vez se logre la observación de los efectos o daños que se presenten a casusa de dicho fenómeno, así como la influencia de la granulometría de los suelos utilizados.

Los elementos determinados para el modelo a escala reducida en estudio son los siguientes:

- Arenas limpias con diferentes granulometrías
- Equipo de vibración
- Caja de ensayos
- Sobrecarga

Estos cuatro elementos unidos son los responsables de generar el modelo a escala reducida para evaluar la influencia de la granulometría en el fenómeno de licuación. Como se aprecia en la Figura 5.1 el modelo consiste de una caja metálica en la cual se deposita el material en estudio, simulando un depósito de suelo potencialmente licuable. Sobre el estrato de suelo en estado saturado se coloca una sobrecarga que ocupa un área de 400 cm². Dicha sobrecarga

simula una estructura colocada en un depósito de suelo susceptible a deformarse debido al paso de ondas sísmicas, ocurriendo así el fenómeno de licuación.

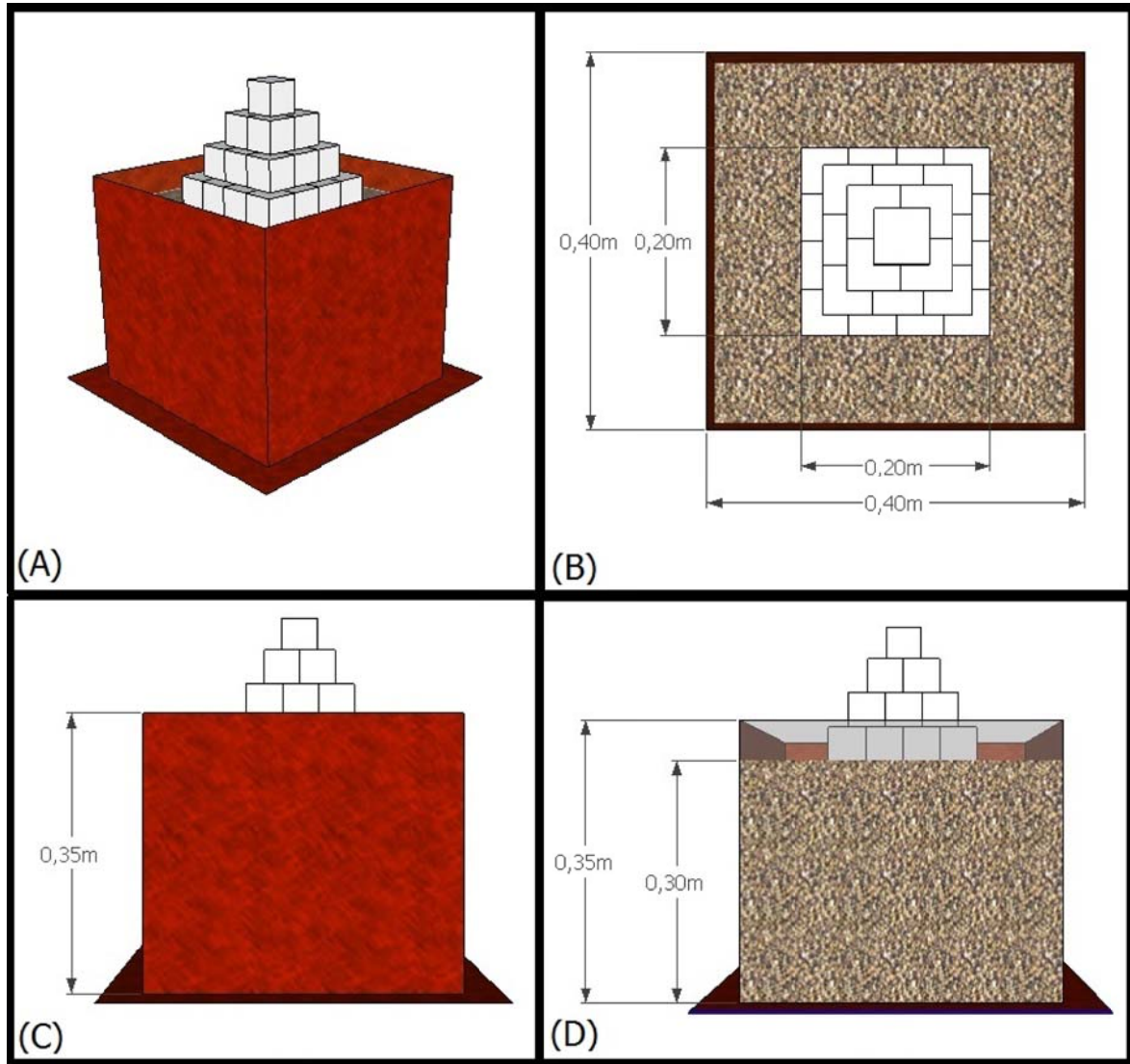


Figura 5.29: Diseño de modelo de ensayo, (A) vista isométrica, (B) vista superior, (C) vista en plana y (D) vista del interior

El equipo de vibración utilizado cuenta con un reóstato que amplía o disminuye la amplitud de onda vibratoria, y cuenta con valores de 0 a 10. Para los ensayos realizados el reóstato se aumentó de cero a ocho durante los primeros cinco segundos, manteniendo la vibración con un valor de ocho durante 15 segundos para todos los ensayos. Por lo tanto para cada ensayo

a escala reducida se simuló el efecto de un sismo durante 20 segundos, manteniendo la frecuencia y amplitud igual gracias al reóstato con el cual cuenta la mesa vibratoria.

La frecuencia de la mesa vibratoria no fue medida, debida a las limitantes del equipo, sin embargo se sabe que esta frecuencia fue la misma para todos los ensayos debido a la utilización del reóstato; así como la magnitud de la simulación de sismo que se logra recrear en modelo.

5.2 Equipo y material utilizado en los ensayos a escala reducida

El material y equipo es básico en la realización de los ensayos a escala reducida. Se deben tener en cuenta todos los elementos, y que estos se encuentren en perfecto estado, como es el caso de la mesa vibratoria; así también contar con la cantidad adecuada de material con la que se debe trabajar. A continuación se describe el equipo y material por ser utilizado en los ensayos a escala reducida.

5.2.1 Suelos ensayados

El suelo ensayado fundamentalmente está constituido por arenas sueltas, ya que el estudio era determinar la influencia de la granulometría en la licuación de arenas. Para lograr obtener diferentes granulometrías de arenas, se mezclaron dos arenas principales. Como primer espécimen se seleccionó arena de playa ya que generalmente su gradación es mala, y por otro lado se escogió arena de río, ya que su granulometría suele ser bien gradada. Teniendo los dos extremos de gradaciones se mezclaron en diferentes proporciones las arenas seleccionadas para obtener diferentes granulometrías, y así obtener gradaciones buenas, medias y malas.

La arena de playa utilizada es de la localidad de Esterillos y la arena de río proveniente de Guápiles (ver Figura 5.2), la proveniencia de estas arenas se dio por disponibilidad en el momento de la escogencia del modelo; así como las propiedades físicas presentadas por las muestras de suelos, en el Cuadro 5.1 se presentan las propiedades de las arenas de río y playa ensayadas, en dicho cuadro se puede observar los resultados de Límites de Atterberg,

los cuales concluyen que el porcentaje de finos pasando la malla N° 200 son no plásticos (NP).

Cuadro 5.9: Propiedades físicas de las arenas patrón ensayadas

Tipo de arena	$\gamma_{d\ min}$ (Kg/m ³)	LL	IP	% Pas. Malla N° 200	D ₅₀ (mm)	C _u	C _c	Clasificación
Arena de playa	1364	NP	NP	1,3	0,13	1,5	0,8	SP
Arena de río	1632	NP	NP	0,2	1,26	6,1	1	SW

La arena de playa de Esterillos fue recolectada por personal de la empresa de Ingeotec S.A, mientras la arena de río, es agregado de río que se utiliza para proyectos de graduación en el LanammeUCR. Como se mencionó anteriormente se tuvo que obtener diferentes variaciones de la granulometría. Para ello se mezclaron las arenas recolectadas en el laboratorio de geotecnia del LanammeUCR, para lograr notar el efecto de la influencia de la granulometría en la licuación de arenas.



Figura 5.30: Arena de río de Guápiles (izquierda) y arena de playa Esterillos (derecha) utilizadas para los ensayos de escala reducida

En primera instancia se realizaron ensayos granulométricos a las arenas de playa y río, respectivamente. Con los resultados de las granulometrías de cada una de las arenas, se procedió a mezclarlas en diferentes proporciones a fin de encontrar diferentes granulometrías. Para esto se utilizó el Método de tanteos y el Método gráfico para combinar agregados, denominado "Método de la araña", utilizado para combinar dos materiales con diferentes granulometrías, y lograr obtener una granulometría específica.

5.2.1.1 Combinación de agregados

Con el fin de mejorar la calidad, utilidad, gradación u otras deficiencias corregibles de un agregado y que este resulte aceptable, se pueden combinar agregados para lograr obtener los resultados deseados.

Determinar en qué proporción mezclar dos o más materiales representa un problema para lograr cumplir con los requisitos establecidos por las normas, o en este caso para cumplir con gradaciones diferentes.

Existen métodos conocidos para conseguir los resultados deseados de un material, en este proyecto se utilizó el método de tanteo, y el método gráfico conocido como "*método de la araña*", los cuales fueron utilizados para lograr obtener curvas granulométricas con distintas gradaciones, a continuación se explica cada método utilizado.

Método de la araña

Como elemento principal se debe contar con una gráfica, donde en la parte superior se coloca los porcentajes de diez en diez, partiendo de 100 a 0. Esta parte representa el material "B", que en este caso está representado por la arena de playa. En la parte inferior se ubican igualmente los porcentajes de diez en diez pero partiendo de 0 a 100, representando los porcentajes a utilizar del material "A", constituido por la arena de río. Por otra parte a la izquierda y derecha, se marcan los porcentajes pasando por cada tamiz.

Los datos utilizados para la realización del gráfico del "método de la araña", se muestran como ejemplo en el Cuadro 5.2, donde se adjuntan las granulometrías de los materiales "A" y "B" a ser combinados, así como los requisitos deseados. Estos requisitos se obtuvieron utilizando una hoja de cálculo en la cual se colocan los datos obtenidos de las granulometrías

bases de las arenas de río y playa con su respectiva curva granulométrica. Se insertó una columna extra, la cual se fue variando y actualizando los datos en el gráfico hasta obtener una curva granulométrica deseada.

Cuadro 5.10: Ejemplo de datos granulométricos utilizados para la realización del método de la araña

Tamiz	Abertura (mm)	Porcentaje Pasando (%)		
		Arena Río	Arena Playa	Especificación requerida
3/4 "	19,0	100,0	100	100
3/8 "	9,50	100,0	100	100
Nº 4	4,75	94,0	100	95-100
Nº 10	2,00	66,8	100	85-90
Nº 20	0,850	37,1	100	80-85
Nº 40	0,425	18,5	100	70-75
Nº 60	0,250	7,3	98,1	60-65
Nº 100	0,150	2,1	57,7	50-55
Nº 200	0,075	0,2	17,4	10-15
Charola		0,0	0,0	0-5

Una vez ubicados los datos del cuadro anterior en el gráfico, se procede a unir por una línea las marcas de porcentaje que pasa del agregado "A", a la izquierda del gráfico, con el porcentaje que pasa del agregado "B" a la derecha, para los tamices correspondientes. Seguidamente se marcan en los lados los rangos que delimita la norma, o los deseados por alcanzar para el porcentaje que pasa para cada tamiz, el menor valor corresponde al material "A", para cada marca se trazan líneas horizontales.

Seguidamente se traza la intersección de la línea con sus límites superior e inferior, del rango correspondiente al tamiz. Se repite esto para todos los tamices. La marca con el límite inferior más a la derecha y la marca con límite superior más a la izquierda, darán los valores para calcular las proporciones en porcentajes de cada agregado. Estas marcas se prolongan hasta la parte superior e inferior de la gráfica, obteniendo así dos valores para cada material. Estos valores representarán los límites teóricos, por lo tanto se aplica para cada porcentaje

un factor de seguridad de cinco por ciento a los límites teóricos. Se muestra en la Figura 5.3 el método gráfico de la araña.

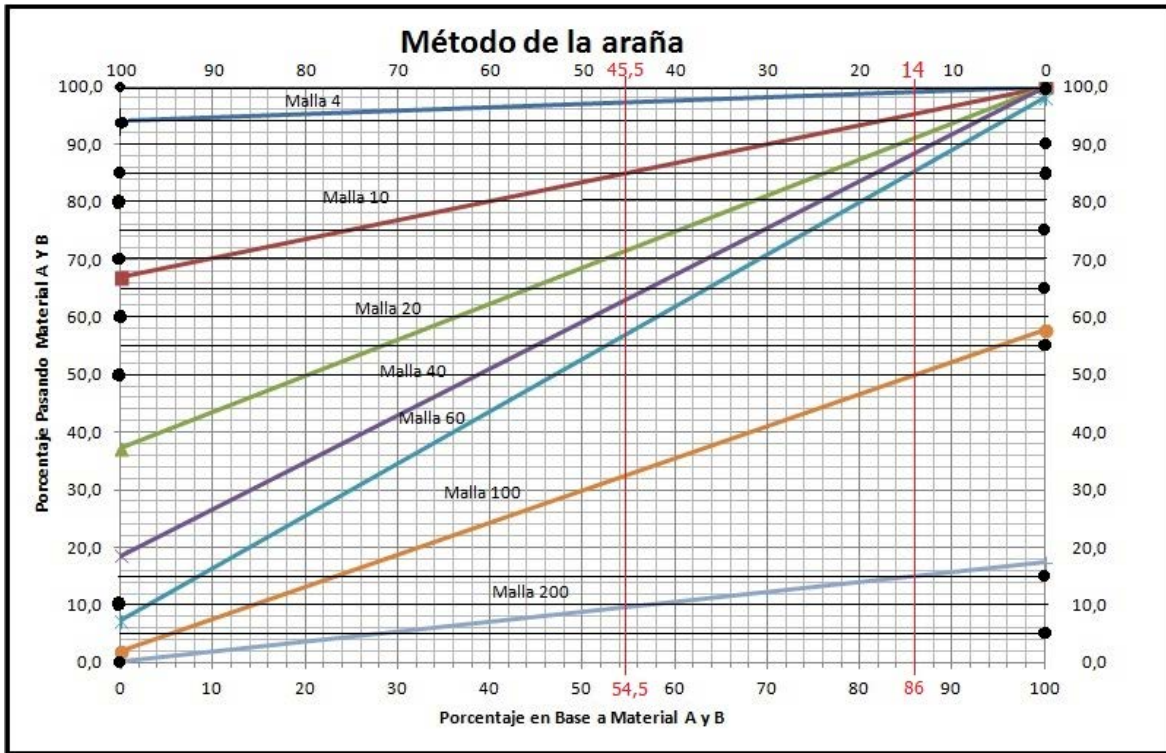


Figura 5.31: Ejemplo de método gráfico de la araña

Del gráfico anterior se observa que la línea vertical roja de la izquierda representa la especificación inferior, y la línea de la derecha representa la especificación superior. Los resultados de la parte inferior representa el porcentaje con base al material "A" o arena de río, y la parte superior indica el porcentaje de material "B" o arena de playa. De esta manera se tiene y se calcula los porcentajes de límites prácticos (ver Figura 5.4), donde a los valores correspondientes con la especificación inferior y referido por el material "A" se les resta el cinco por ciento, al igual que a la especificación superior referido por el material B; mientras que a la especificación superior referida por el materia "A" se le suma cinco por ciento, al igual que al valor de la especificación inferior referida por el material "B".

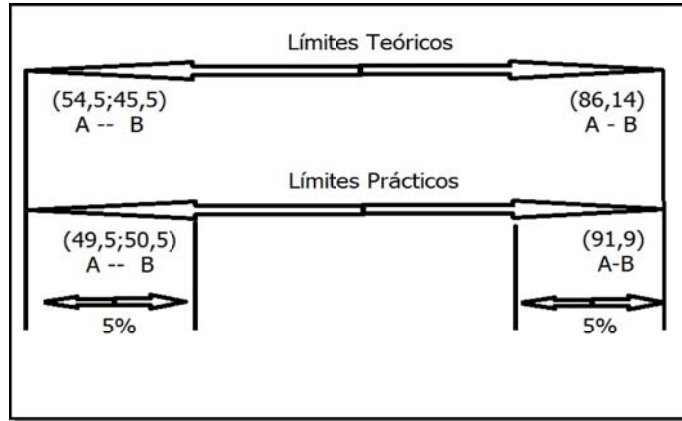


Figura 5.32: Cálculo de límites prácticos a partir de límites teóricos

Los resultados de los límites prácticos son más convenientes a usar, debido a que resultan menos ajustados. Así mismo se deben corroborar los dos extremos a fin de seleccionar los porcentajes que satisfagan el requisito deseado (ver Cuadro 5.3), para la combinación 49,5 y 50,5, se redondean los valores, por lo tanto las combinaciones a usar serían 50 y 50, 91 y 9.

Cuadro 5.11: Corroboración de cumplimiento de porcentajes de límites prácticos

Malla	% pasando materia "A"	% pasando material "B"	$0,50*A+0,5*B$	$0,91*A+0,09*B$	Especificación
3/4 "	100,0	100	100	100	100
3/8 "	100,0	100	100	100	100
Nº 4	94,0	100	97	94	95-100
Nº 10	66,8	100	83	70	80-100
Nº 20	37,1	100	69	43	60-80
Nº 40	18,5	100	59	26	55-60
Nº 60	7,3	98,1	53	15	30-55
Nº 100	2,1	57,7	30	7	10--30
Nº 200	0,2	17,4	9	2	0-10

Del cuadro anterior se obtiene que la combinación 50/50, es la indicada por usar, ya que cumple con las especificaciones deseadas, mientras que la combinación 91/9 por ciento no cumple con todas las especificaciones, se muestra en rojo los porcentajes que no están cumpliendo.

Por lo tanto, para el ejemplo mostrado, se utiliza una combinación de 50% de arena de río, y 50% de arena de playa, correspondiendo a la primera combinación utilizada para la

realización de los ensayos a escala reducida. La combinación obtenida se realiza por peso seco.

Método de tanteos

Este método se basa en predecir los resultados mediante prueba y error. En primera instancia se debe observar las granulometrías o curvas granulométricas a ser combinadas, y tomar la decisión de que porcentajes utilizar y ver si se satisfacen los requisitos para todos los tamices. A partir de este primer tanteo se varían las proporciones hasta cumplir con todos los tamices.

Se tiene como ejemplo el Cuadro 5.4, donde se observan dos diferentes granulometrías, en la arena de río se observa una granulometría bien gradada, mientras que la arena de playa presenta una mala gradación como es común. Se toma la decisión de utilizar una combinación 50-50%, y luego corroborar si la curva obtenida cumple con los requisitos buscados.

Cuadro 5.12: Ejemplo utilizado para realizar una combinación por el método de tanteos

Tamiz	Abertura (mm)	Porcentaje Pasando (%)		Mezcla 50-50	Requisito a cumplir
		Arena Río	Arena Playa		
3/4 "	19,0	100,0	100	$100*0,5+100*0,5=100$	100
3/8 "	9,50	100,0	100	$100*0,5+100*0,5=100$	100
Nº 4	4,75	94,0	100	$94*0,5+100*0,5=97$	95-100
Nº 10	2,00	66,8	100	$66,8*0,5+100*0,5=83,4$	80-100
Nº 20	0,850	37,1	100	$37,1*0,5+100*0,5=68,6$	60-80
Nº 40	0,425	18,5	100	$18,5*0,5+100*0,5=59,2$	55-60
Nº 60	0,250	7,3	98,1	$7,3*0,5+98,1*0,5=52,7$	30-55
Nº 100	0,150	2,1	57,7	$2,1*0,5+57,7*0,5=29,9$	10-30
Nº 200	0,075	0,2	17,4	$0,2*0,5+17,4*0,5=8,8$	0-10

Al realizar los cálculos, se determina que la combinación 50/50 cumple con éxito los requisitos de gradación establecidos, por lo tanto para la mezcla en el ejemplo la combinación correspondiente a ser utilizada es 50% arena de río con 50% arena de playa. Este ejercicio se utilizó independientemente del método de la araña, la clave es la observación de las granulometrías y decidir que combinación utilizar como primer caso.

De no satisfacer los requisitos, se varía el porcentaje, hasta cumplir con lo requerido, o en otro caso, pasar a utilizar el "método de la araña". En el Cuadro 5.5 se presentan las proporciones utilizadas, y su respectivo método aplicado para las combinaciones realizadas en los ensayos a escala reducida.

Cuadro 5.13: Porcentajes a utilizar en las combinaciones de arenas de los ensayos a escala reducida

Combinación	Porcentajes		Método aplicado para la combinación
	Porcentaje arena de río	Porcentaje arena de playa	
1	50%	50%	Método de tanteos
2	30%	70%	Método de la araña
3	75%	25%	Método de la araña
4	15%	85%	Método de la araña

5.2.1.2 Resultados de ensayos de gravedad específica y peso volumétrico

Una vez que los materiales fueron seleccionados y mezclados, se procedió a realizar ensayos de laboratorio para caracterizar las arenas en estudio. Las pruebas realizadas fueron:

- Análisis granulométrico (ASTM D 1140-00)
- Gravedad específica (ASTM D854-10)
- Peso volumétrico

En total se realizaron seis ensayos para cada tipo de prueba ejecutada a las arenas, se utilizaron las normas de American Society for Testing and Materials (ASTM) como guía para la realización de los ensayos señalados anteriormente.

La gravedad específica es la relación del peso de un volumen de un material, con el peso de igual volumen de otra sustancia usada como estándar, para sólidos y líquidos, el patrón a usar es el agua ($H_2O=1$). Se muestran en el Cuadro 5.6 los resultados de los ensayos de gravedad específica y peso volumétrico.

Cuadro 5.14: Resultados de ensayos de gravedad específica (ASTM D 854-10)

Descripción	Arenas limpias		Combinaciones			
	Arena Río	Arena Playa	Comb. 50/50	Comb. 30/70	Comb. 75/25	Comb. 15/85
Factor de Corrección K	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993
G _s =gravedad específica Suelo	2,74	2,80	2,77	2,79	2,77	2,79
G _{s(23°C)} =Corrección por humeada	2,73	2,79	2,77	2,79	2,77	2,78

El peso volumétrico de los agregados se calcula normalmente en condiciones secas cuando se sigue una norma al respecto. En este caso se calculó el peso volumétrico de las arenas utilizando un recipiente redondo con cortes rectos. Se calcula el volumen de dicho recipiente, el cual se llena con el material a ser ensayado en forma suelta, y luego se pesa la cápsula con el contenido de muestra de suelo seco, con los datos obtenidos se calcula el peso volumétrico o peso específico del material con la fórmula F.5.1. Los resultados de los pesos volumétricos de las muestras de ensayos a escala reducida se muestran en el Cuadro 5.7.

$$\gamma_d = \frac{\text{Peso Suelo Seco [g]}}{\text{Volumen [cm}^3\text{]}} * 1000 = [\text{Kg/m}^3] \quad (\text{F.5.1})$$

Cuadro 5.15: Resultados de peso volumétrico

Ensayo	Peso Cápsula + Peso Suelo (g)	Peso Cápsula+ Peso Suelo (g)	Peso Suelo Seco (g)	Volumen Cápsula (cm ³)	Peso Volumétrico (Kg/m ³)
Arena de Río	49,98	569,19	519,21	318,09	1632
Arena de Playa	50,37	484,27	433,90	318,09	1364
Combinación 50/50	49,98	583,29	533,31	318,09	1677
Combinación 30/70	50,50	514,55	464,05	318,09	1459
Combinación 75/25	49,98	588,45	538,47	318,09	1693
Combinación 15/85	50,50	516,89	466,39	318,09	1466

5.2.2 Resultados granulométricos

El análisis granulométrico se realizó tanto a las arenas de río y playa en estado limpio (poco a nada de finos), como en sus respectivas combinaciones. Estos resultados fueron

fundamentales para proceder con los ensayos a escala reducida, debido a que se debía satisfacer las distintas granulometrías puestas en como objetivo, y que el resultado de estas fuera aceptable con los métodos indicados para la combinación de arenas.

En primera instancia se realizó el análisis granulométrico a la arena de río y arena de playa, respectivamente, teniendo como resultado dos curvas granulométricas totalmente diferentes a partir de los datos del Cuadro 5.8.

Cuadro 5.16: Resultados de análisis granulométrico de las arenas de río y playa en estado limpio

Tamiz	Abertura (mm)	Porcentaje Pasando (%)	
		Arena Río	Arena Playa
3/4 "	19,0	100,0	100
3/8 "	9,50	100,0	100
Nº 4	4,75	94,0	100
Nº 10	2,00	66,8	100
Nº 20	0,850	37,1	100
Nº 40	0,425	18,5	100
Nº 60	0,250	7,3	98,1
Nº 100	0,150	2,1	57,7
Nº 140	0,106	-	16,1
Nº 200	0,075	0,2	1,3
Charola		0,0	0,0

En la Figura 5.5 observamos la buena gradación de la arena de río, mientras que la arena de playa tiene una curva recta, lo cual representa una mala gradación. Con el análisis granulométrico queda demostrada la buena selección de material a fin de llevar a cabo los ensayos a escala reducida. Con las distintas combinaciones de arena de río y playa, se obtienen curvas granulométricas diferentes comprendidas en los rangos de buena y mala gradación. En el Cuadro 5.9 se reflejan los resultados de los porcentajes pasando para las combinaciones indicadas en el Cuadro 5.5.

Análisis Granulométrico ASTM D 1140

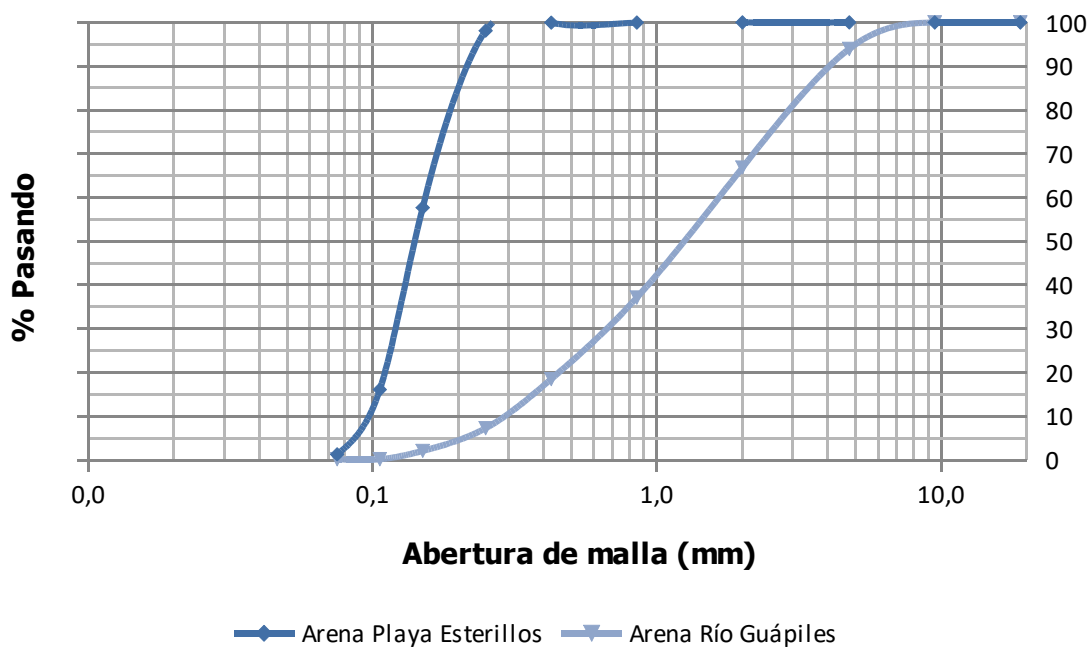


Figura 5.33 Curvas granulométricas de arena de río y arena de playa

Cuadro 5.17: Resultados de análisis granulométrico para los diferentes porcentajes de combinaciones de arena de río y playa

Tamiz	Abertura (mm)	% Pasando			
		Combinación	Combinación	Combinación	Combinación
3/4 "	19,0	100	100	100	100
3/8 "	9,50	100	100	100	100
Nº 4	4,75	96,3	95,7	91,6	96,5
Nº 10	2,00	81,1	79,5	63,3	90,6
Nº 20	0,850	66,9	71,8	44,7	87,1
Nº 40	0,425	58,4	70,3	32,8	85,6
Nº 60	0,250	52,1	68,3	27,2	82,9
Nº 100	0,150	26,5	37,2	14,2	43,9
Nº 140	0,106	7,5	9,3	4,0	10,8
Nº 200	0,075	0,8	0,6	0,4	0,6
Charola		0	0	0	0

Análisis Granulométrico ASTM D 1140

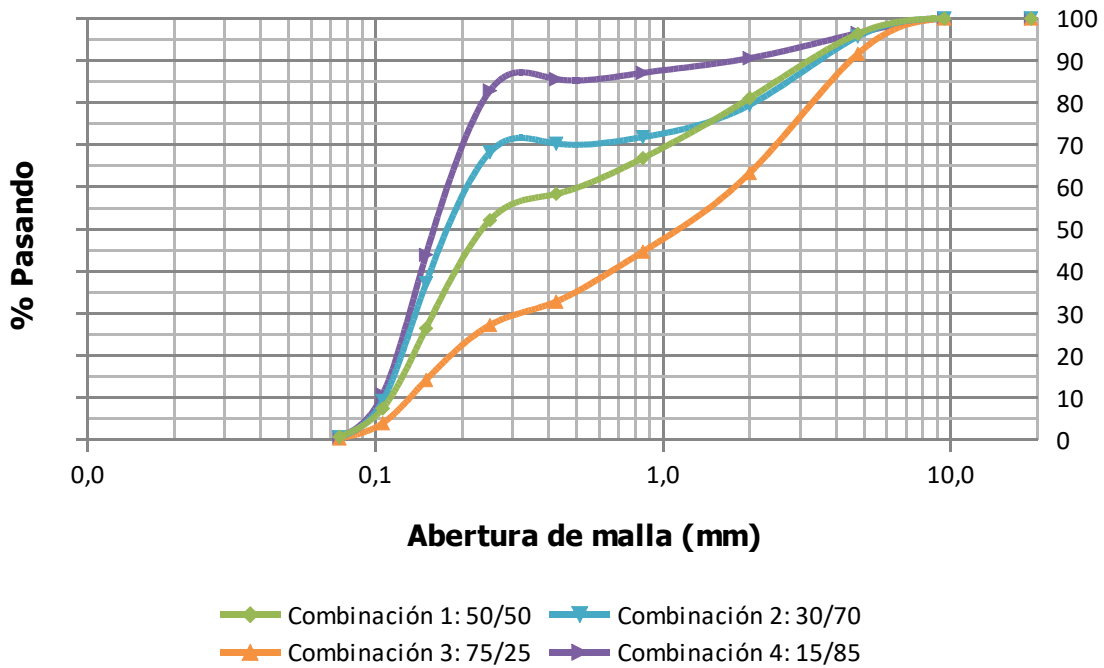


Figura 5.34: Curvas granulométricas de arenas de río y playa limpias y curvas obtenidas por sus correspondientes combinaciones

En la figura anterior observamos las cuatro curvas granulométricas diferentes, que varían entre una mala y buena gradación, contando también con gradaciones medias, al unir todas las respectivas curvas granulométricas a ser utilizadas en los ensayos a escala reducida (ver Figura 5.7). Se aprecia la variedad de gradaciones, con lo cual las combinaciones propuestas satisfacen los objetivos propuestos.

Análisis Granulométrico ASTM D 1140

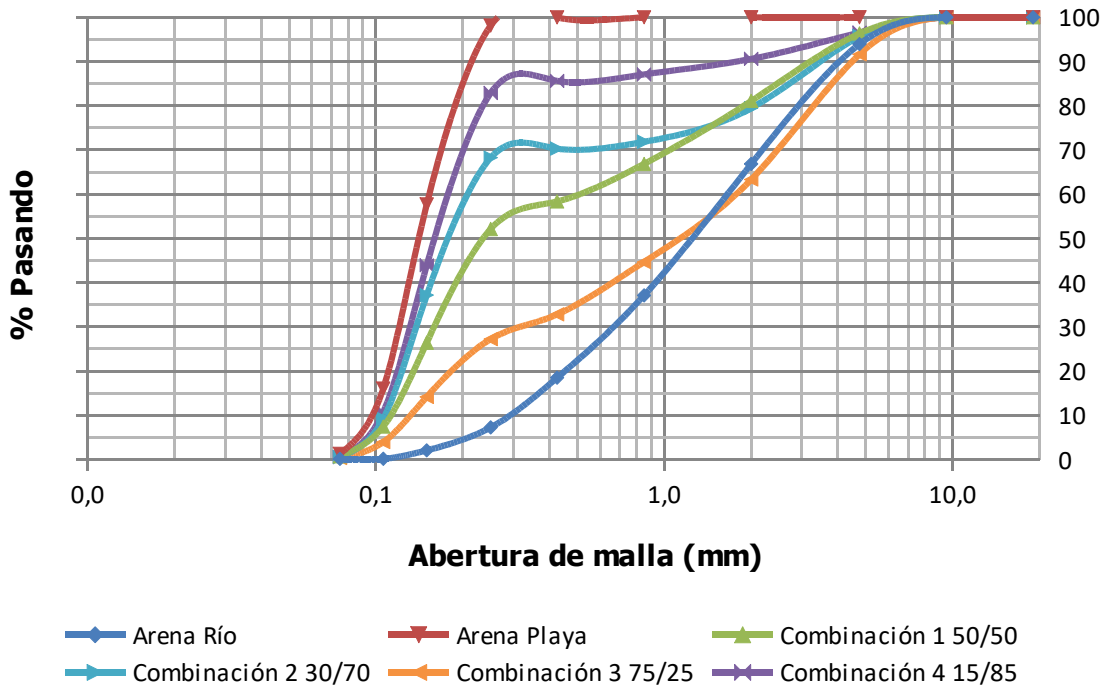


Figura 5.35: Curvas granulométricas a ser utilizadas en los ensayos a escala reducida

5.2.3 Equipo de vibración

Para lograr recrear los movimientos de un sismo, se cuenta con un equipo de vibración, el cual simula movimientos sísmicos en menor escala que la realidad, debido a la frecuencia que produce la mesa, pero que igualmente pueden causar el fenómeno de licuación. El dispositivo a utilizar es parte fundamental de los ensayos a escala reducida, por lo tanto debe revisarse que se encuentre en perfecto estado, y funcione de manera correcta.

El equipo de vibración está compuesto por una mesa vibratoria de impacto amortiguada con capacidad de carga de 136,1 Kg, generalmente este tipo de mesas se utiliza para vibrar los moldes de vigas, moldes de cilindro, productos de concreto y muestras de suelo. La potencia de vibración es regulada por medio de un resistor de resistencia variable denominado

reóstato en el circuito de control eléctrico, el cual se puede variar desde un valor mínimo de uno hasta un máximo de diez.

La mesa en sí está compuesta por tres partes forjadas de acero, la parte superior es la cubierta o plataforma de la mesa con dimensiones de 50,8 cm x 50,8cm, en este segmento se coloca el componente a ser vibrado. Debajo de la cubierta, se encuentra el marco que la sujeta mediante apoyos de caucho, y en su parte inferior contiene un moto-vibrador electromagnético. Este vibrador es una masa centrífuga excéntrica que gira y genera una fuerza de excitación, la cual hace que oscile la mesa y el molde que se encuentra sobre ella. El vibrador está adecuadamente unido a la plataforma mediante un electroimán y una parte superior que contiene y mueve las piezas.

El equipo está empotrado en una base de concreto rígido mediante apoyos, por lo tanto este empotramiento impide que la mesa propague ondas vibratorias hacia otros elementos, regulando así la energía de vibración exclusivamente hacia la mesa. La mesa está apoyada de tal modo que la superficie principal presenta un grado de libertad (eje X), por lo tanto su movimiento esta dado en un plano básicamente horizontal.

Respecto a la frecuencia que produce la mesa, varía según la regulación del reóstato. Datos de fábrica indican que la mesa vibra a 3600 vpm (vibraciones por minuto), realizando la conversión a unidades de hertz, la frecuencia producida es de 60 Hz (Humboldt, 2012). Asimismo la máxima amplitud que puede generar el desplazamiento horizontal que produce la mesa es de 1,6mm (Hernández, 2010), dicha amplitud está dada por un movimiento de onda de forma sinusoidal, que recrea las ondas sísmicas; aunque en la realidad las ondas sísmicas se propagan por todas direcciones partiendo desde el hipocentro. No todos los tipos de ondas son iguales, así para el efecto que produce el tipo de onda sinusoidal generada por la mesa funciona para lograr observar el fenómeno de licuación.

En la Figura 5.8 se muestra la mesa vibratoria utilizada para los ensayos a escala reducida y la cual se encuentra en las instalaciones del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). Está instalada en el área de almacenamientos de muestras en el sector norte del laboratorio.



Figura 5.36: Equipo vibratorio del LanammeUCR

Como se mencionó anteriormente el tipo de mesa utilizado en el proyecto, generalmente es utilizada para vibrar productos de concreto y muestras de suelo, ya que el vibrado es favorable para reducir el coeficiente de fricción del material, y dejar salir los espacios de aire atrapados de las muestras. Al realizar esto se aprecia a simple vista el fenómeno de licuación de modo anticipado, ya que los granos se compactan y reacomodan de manera artificial lo cual evita que se presente un cambio de volumen en caso de que ocurra un sismo. Además en el caso del concreto compactado en forma apropiada es más denso, resistente y durable.

5.2.4 Caja de ensayos

Para lograr mantener un estrato de suelo que pueda sufrir licuación, se cuenta con una caja metálica impermeable, que fue construida para la realización de los ensayos a escala reducida. La caja de ensayos fue construida por láminas de hierro de 2,38 mm de espesor, cortadas de forma rectangular y torneadas de forma recta. En la figura 5.1, se muestran las dimensiones de la caja utilizada para los ensayos a escala reducida. Contiene un fondo que sobresale 5 cm a cada lado, lo cual permite que sea sujeta mediante prensas en caso de movimientos extremos que pueden desplazar la mesa de manera considerable. Las paredes

de la caja suministran el confinamiento adecuado al estrato de suelo ya que son totalmente rígidas, por lo cual no se presentan deformaciones.

El peso de la caja vacía es de 14,9 kg, este peso fue considerado en su diseño para que junto con la muestra de suelo en estado saturado y la sobrecarga de los ensayos a escala reducida no sobrepasara la máxima capacidad de carga de 136,1 Kg que soporta la mesa vibratoria.

La muestra de suelo saturada contenida en la caja, ocupa un volumen aproximado de 0,048 m³, comparado con la realidad la recreación de una masa de suelo que pueda sufrir licuación queda muy restringida. Además de la capacidad de volumen y área, se tiene también el esfuerzo cortante actuante; éste es tomado por el molde de la caja, imponiendo condiciones de frontera que no incorporan apropiadamente las situaciones reales *in situ*.

5.2.5 Sobrecarga

La sobrecarga del modelo a escala reducida, está representada por una pirámide hecha a base de bloques de cemento de 5 cm de lado. Esta sobrecarga recrea una estructura colocada sobre un suelo que pueda sufrir licuación. Lo anterior permite la observación de asentamientos, deformaciones y deterioros ocurridos, y consecuentemente se determina de manera cualitativa el nivel de daños producto de la licuación inducida.

La base tiene un área de 0,04 m² colocada en el centro del modelo, conformada así por 16 bloques de cemento, utilizando en total 30 bloques distribuidos en cuatro pisos, llegando hasta una altura de 20 cm. Se utilizaron dos tipos de bloques de cemento (ver Figura 5.9), debido a la disponibilidad en el laboratorio, para la base (primer piso) se utilizaron 16 bloques con un peso aproximado de 275 g cada uno, mientras que para el resto de los pisos se utilizaron 14 bloques con un peso de 240 g cada uno. En total se utilizaron 30 bloques que transmitían un peso aproximado de 7760 g.

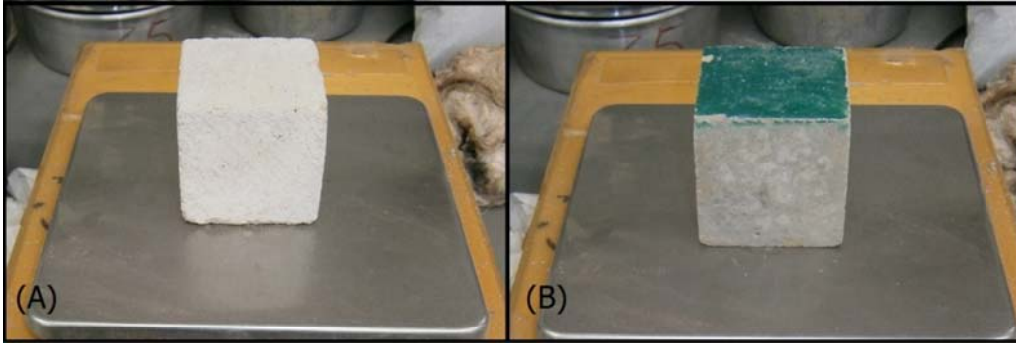


Figura 5.37: Bloques de cemento utilizado en ensayos a escala reducida (A) bloque utilizado en el primer nivel de pirámide, (B) bloque utilizado en segundo, tercer y cuarto nivel de pirámide

5.3 Factores de Escala

La determinación del factor de escala a utilizar es de suma importancia, ya que permite trasladar los resultados de escala reducida obtenidos a escala real. De esta manera se puede identificar los efectos a escala real, y describir los daños producidos por el fenómeno de licuación.

En el capítulo cuatro, específicamente en la sección 4.4, se explicó la obtención e interpretación de los factores de escala utilizados para el presente proyecto. Es así que los parámetros importantes a tener en cuenta en la lectura de los resultados a escala reducida utilizando una mesa vibratoria son: longitud, densidad y tiempo. Se utilizan los factores que se encuentran en la columna tres del Cuadro 4.1. En dicho cuadro se observa que la densidad tiene un valor de uno, debido a que los materiales utilizados se consideran con un valor de densidad igual a la realidad.

Los factores utilizados son fáciles de calcular y aplicar para la longitud que está caracterizada por el factor geométrico. Este es el componente a ser aplicado en los resultados luego de vibrar el modelo a escala reducida. En términos de escala geométrica el modelo utilizado está dado por un factor de escala 1:10. Así para el estrato de suelo contenido en el modelo representa en la realidad un estrato de suelo potencialmente licuable con un espesor de 3 m. Además el valor de la presión de la sobrecarga convertido a la realidad es aproximadamente $1,9 \text{ t/m}^2$, que simula una estructura o edificación de 2 niveles. Por último el valor que representa el tiempo de sismo simulado por la mesa vibratoria es aproximadamente de 112

segundos. Se muestran en el Cuadro 5.10 los factores de escala mencionados anteriormente que son aplicados en los resultados de ensayos de escala reducida. Destacar que las condiciones de borde podrían tener efecto sobre el cálculo de los factores, sin embargo, no se profundiza respecto a este tema, por ser el presente trabajo de índole cualitativo.

Cuadro 5.18: Factores de escala a utilizar en los resultados de ensayos de los modelos a escala reducida

Factores de escala		
Factor geométrico	λ	10
Factor de tiempo	$\lambda^{0,75}$	5,62
Factor de carga	λ	10

5.4 Procedimiento de ensayos a escala reducida

La forma de realizar el procedimiento es parte fundamental para que se lleve una correcta ejecución de los ensayos, y así obtener resultados válidos que logren determinar los objetivos propuestos.

Las normas de ensayo y procedimientos son de uso frecuente en los laboratorios. En el caso de la ingeniería de suelos, las normas que rigen son las ASTM. Para ensayos a escala reducida no existe una norma que describa de manera establecida, los requisitos de procedimientos de ensayos, ya que los procedimientos dependen del modelo seleccionado; ajustándose a las necesidades del seleccionador del modelo y su respectivo uso.

5.4.1 Preparación de materiales

Una vez que la selección de material y modelo de ensayo han sido elegidos, se preparan los materiales a ser ocupados, de tal manera que a la hora de ejecutar un ensayo no haya faltante de muestras de arenas y el equipo funcione perfectamente. Con las arenas seleccionadas se realiza combinaciones que reflejen diferentes granulometrías. Puesto que el material a ser utilizado debe estar completamente seco, éste deberá colocarse en bandejas grandes para colocarlas al horno a 110°C durante 24 horas (ver Figura 5.10).



Figura 5.38: Arena colocada en bandeja y puesta al horno a 110°C

Teniendo en cuenta la cantidad de números de ensayos por realizar, se contabiliza si la muestra de material se encuentra en cantidades suficiente, o por el contrario, si se necesita más, se deberán tomar las precauciones del caso. La arena de río y playa utilizada en los ensayos uno y dos respectivamente, se reutilizan, debido a que no son mezcladas.

Para las combinaciones de arenas, se toman en cuenta las proporciones por peso seco en base a 100 Kg, debido a que el modelo final (caja, arena, sobrecarga) llega a pesar entre 100 Kg y 115 Kg. Tomando en cuenta que el peso de la caja es 14,9 Kg, el peso base de 100 Kg resulta ser más exacto para calcular las combinaciones por peso, así para una combinación de 30/70 se mezclan 30 Kg de arena de río con 70 kg de arena de playa. En el Cuadro 5.11 se muestran las combinaciones por kilogramos.

Cuadro 5.19: Cantidad de kilogramos para combinaciones de arena de río y playa

Combinación	Combinación de arenas	
	Peso seco arena de río (Kg)	Peso seco arena de playa (Kg)
50/50	50	50
30/70	30	70
75/25	75	25
15/85	15	85

Con respecto al equipo, se debe revisar la impermeabilidad de la caja, para ello se inspecciona que no tenga agujeros o abolladuras. Se debe contabilizar los bloques utilizados como sobrecarga, preferiblemente tener más de 30, por el hecho que algún bloque se quiebre o se encuentre en mal estado. La mesa vibratoria debe ser probada variando la intensidad de 1 hasta su máximo de 10, y verificar que funciona perfectamente.

Por otro lado se necesita una balanza adecuada para soportar más de 136 Kg. También se necesita equipo menor como balanza pequeña, cubetas, cucharas pulperas de distintos tamaños, manguera, palas, bandejas, palo de madera, cápsula con bordes rectos, guantes, regla, y cronómetro.

5.4.2 Guía de ejecución de ensayos a escala reducida en arenas

Las pautas a llevar a cabo para la realización de los ensayos a escala reducida son sencillas, sin embargo se debe ser cuidadoso a la hora de desarrollarlos. Para cada ensayo realizado es necesaria la utilización de una balanza adecuada en la que se pueda pesar el modelo antes de ser ejecutado, y verificar que se cumple con un peso que no sobrepase el valor máximo que soporta la mesa vibratoria. Este procedimiento debe realizarse con cuidado de no vibrar el modelo, para ello se debe contar con el personal adecuado que colaboren con el traslado del modelo a la balanza y consecuentemente a la mesa vibratoria. Se describe a continuación los pasos a realizar para la ejecución de cada ensayo a escala reducida:

1. Para la realización de los ensayos en los cuales se necesita combinar arena de río y arena de playa, se deberá pesar las cantidades de arenas según las proporciones del ensayo a ser ejecutado en base a 100 Kg, para esto se utilizan cubetas, para pesar y separar el material por ser mezclado (ver Figura 5.11).
2. Mezclar las arenas dosificadas en una bandeja grande, asegurándose de unir lo más perfectamente posible los materiales mezclados hasta notar uniformidad en toda la muestra de suelo. Esto se logra con la ayuda de un elemento que disperse el material como por ejemplo un palo de escoba o un cono de tránsito (ver Figura 5.12).



Figura 5.39: Balanza utilizada para calcular el peso de las muestras de arenas a ser combinadas.



Figura 5.40: Mezcla de arena de playa (A) con arena de Río (B), para obtener una mezcla de proporción 50/50 (C)

3. Seguidamente se coloca la caja de ensayo en una base firme, colocando una manguera que llegue hasta el fondo para poder saturar el material, comenzar a llenar hasta la tercera parte de la altura de la caja, depositando el material lo más sueltamente posible.
4. Proceder a abrir el grifo por el cual la manguera está conectada, el flujo de agua deberá salir de poco a poco, por lo tanto antes de llenar la caja probar el caudal con el cual sale el agua de la manguera. Si el caudal es muy vigoroso crea un hueco en el centro del material depositado, lo cual representa inconsistencia en el estrato a ser ensayado. Llenar el tercio de muestra hasta que se haya saturado toda la muestra de suelo.
5. Continuar llenando la caja de ensayo con las arenas hasta el segundo tercio, y volver a pasar agua a través de la manguera, y saturar el material.



Figura 5.41: Deposición y saturación del material ensayado

6. Al llegar al último tercio se procede a calcular el peso volumétrico del material depositado, para ello se coloca sobre la arena suelta y seca una cápsula con bordes rectos con su volumen previamente calculado al igual que su peso. Se continúa llenando la caja, hasta cubrir la cápsula (ver Figura 5.14), con una regla enrasar el material, de manera tal que el mismo quede perfectamente moldeado en la cápsula. Proceder a pesar la cápsula con el material dentro. Realizar los cálculos para determinar el peso volumétrico (γ_d) del suelo depositado en la caja de ensayo. Antes de continuar llenando la caja, eliminar cuidadosamente el exceso de suelo seco que queda debido al enrasado de la cápsula, proceder a llenar la caja hasta la altura final de 30 cm y saturar hasta que el nivel freático quede aproximadamente de medio a un centímetro por encima del material.



Figura 5.42: Proceso para determinar el peso volumétrico de las muestras ensayadas a escala reducida.

7. Retirar la manguera con mucho cuidado de no provocar diferencias en el estrato por vibrar.
8. Proceder a pesar el modelo de ensayo cuidadosamente de no pre-vibrar el material, verificar que se cumple con un peso máximo que pueda ser soportado por la mesa vibratoria.
9. Seguidamente trasladar la caja y situar el modelo sobre la mesa vibratoria, colocar la sobrecarga en el centro de la superficie cuidando de no ejercer presión sobre la masa de suelo saturada, acomodar 16 bloques de cemento como base, en el segundo nivel colocar nueve bloques, en el tercero nivel colocar cuatro bloques y por último un solo bloque en la cúspide (ver Figura 5.15).
10. Encender el reóstato de la mesa vibratoria, y llevar la frecuencia de uno hasta el máximo deseado, mantenerla durante un período de tiempo determinado, para el caso del modelo utilizado mantener la frecuencia por un tiempo de 20 segundos, este mismo período y frecuencia se utiliza para todos los modelos ensayados.

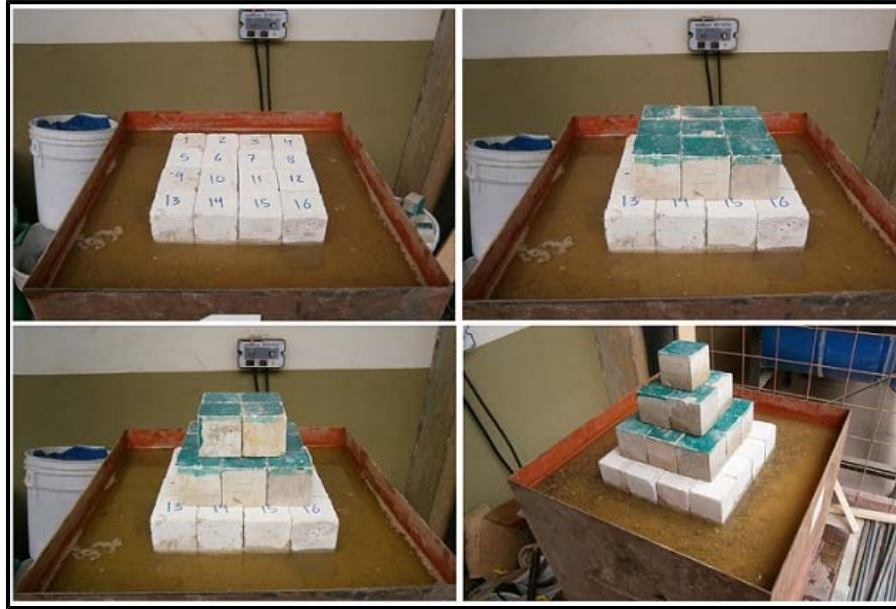


Figura 5.43: Colocación de bloques de cemento (simulación de sobrecarga)

11. Al cumplir los 20 segundos, apagar el reóstato, y proceder a realizar lecturas de asentamientos importantes de todos los lados del modelo, observar si ocurre desplome de la simulación de sobrecarga debido al fenómeno de licuación, así mismo describir si los daños producidos son de carácter severo, considerable o despreciable.

5.5 Resultados ensayos a escala reducida

5.5.1 Ensayo con arena de río al 100%

El término 100%, se refiere al agregado sin modificaciones de sus propiedades, se encuentra tal y como fue extraído del río o playa, en nuestro caso lo identificamos como 100% arena de río o 100% arena de playa, cuando estos no han sido mezclados entre sí.

Como primer ensayo, se ejecutó el modelo con 100% arena de río proveniente de Guápiles, una arena con granulometría bien gradada como se aprecia en la Figura 5.5. Los resultados del modelo a escala reducida al ser sometido a la vibración, fueron los esperados, si tomamos en cuenta las características del suelo, debido a la variedad de granos que conforman el estrato de suelo de arena de río.

Se aprecia en la Figura 5.16, el resultado final de la vibración ejecutada al modelo con arena de río, se observa cierta resistencia de la arena de río al fenómeno de licuación, sin embargo

se evalúa un asentamiento máximo final de 6 cm (aplicando factores de escala), este asentamiento se produjo durante los primeros segundos del paso de ondas sísmicas, una vez asentada la estructura se mantuvo así durante el resto del período de vibración.

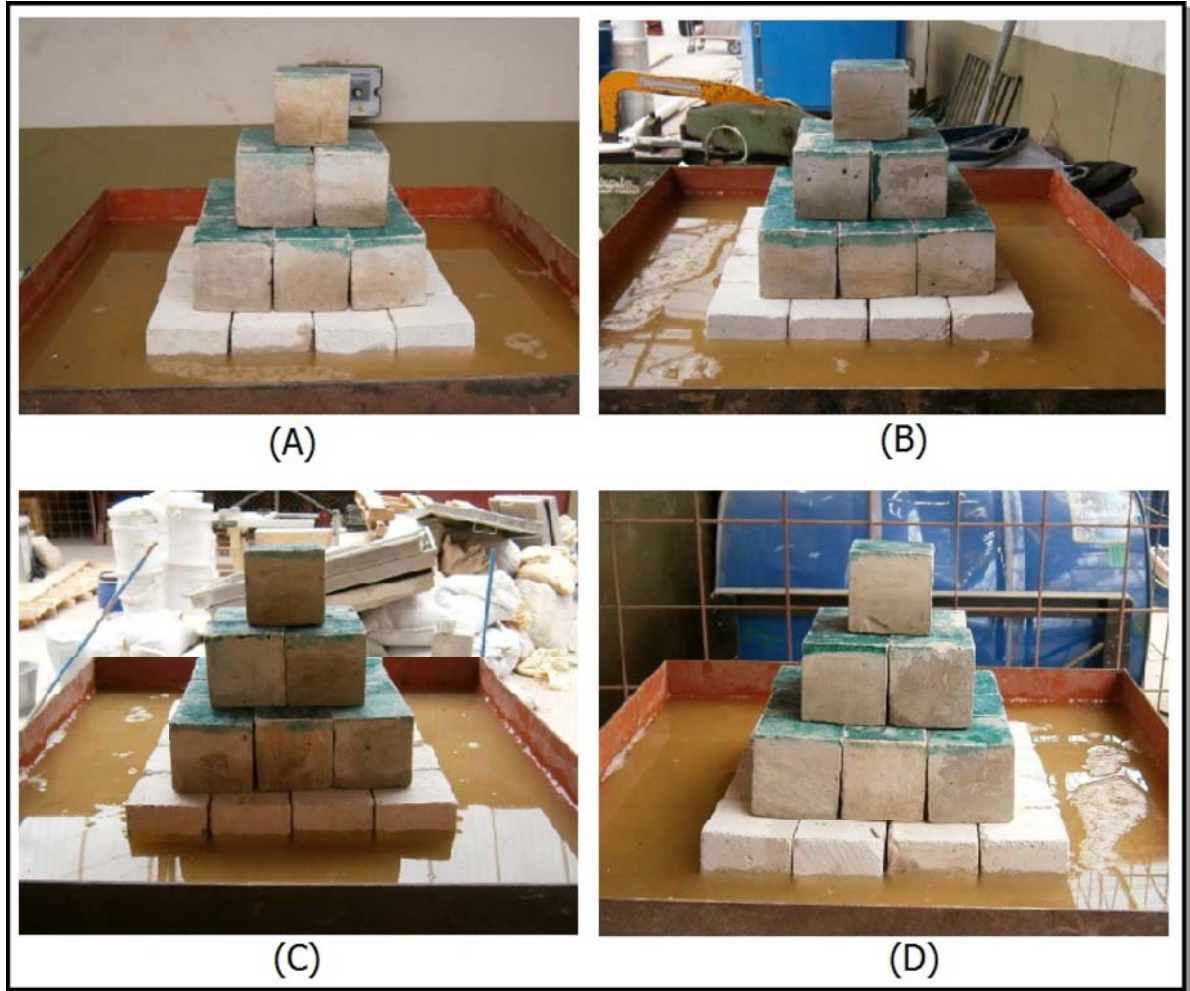


Figura 5.44: Resultado del modelo a escala con arena de río 100%. (A) Fachada norte, (B) fachada este, (C) fachada sur, (D) fachada oeste

Si bien se nota medio piso hundido, esto no se debe en sí al fenómeno de licuación, sino más bien a la altura inicial del nivel freático, ya que antes de proceder con la vibración éste se encontraba a 0,5 cm por encima del nivel de suelo del modelo reducido. Al producir el paso de ondas sísmicas la presión de poro aumenta y el agua confinada en la caja busca salida hacia la superficie, lo que hace que los granos se reorganicen y sufran asentamiento; así mismo el nivel freático sube. Sin embargo la estructura o arreglo de los granos de arena de

río, así como su forma, atenúan de cierta forma en que se presente el fenómeno de licuación en su modo clásico. En este caso el estrato de arena sigue comportándose como un estrato sólido y no como un líquido viscoso, propio del fenómeno de licuación.

Además de observar que no hubo licuación de forma en la cual el suelo se comportara como líquido viscoso y la sobrecarga colapsase, se dio como resultado del paso de ondas sísmicas un asentamiento máximo importante. Se percibió que la simulación de sobrecarga conformada por bloques de cemento, sufrió pequeñas separaciones entre algunos de los bloques que forman la pirámide que simula una estructura en el terreno, debido a que los bloques no están pegados entre sí. El efecto del sismo y la resistencia de la arena de río al fenómeno de licuación, causan que la sobrecarga se mueva junto con el estrato de suelo, separando así los bloques que conforman los niveles de la estructura. Estas observaciones presentarían daños sísmicos no estructurales significativos en una edificación real. En el Cuadro 5.12 se resumen los resultados de este modelo.

Cuadro 5.20: Resultados del ensayo a escala reducida con arena de río al 100%

Parámetro	Resultados
Tiempo de vibración	20 s
Sobrecarga en el modelo	0,19 t/m ²
Criterio de gradación de la arena	Bien gradada
Asentamiento máximo observado en el modelo	0,6 cm
Presencia de licuación	No
Determinación de daños	Leves
*Evaluación de daños	Daños no estructurales

*La evaluación de daños es a criterio del autor, según lo observado en el modelo.

En la Figura 5.17 se puede apreciar la separación de los bloques, además de una leve concavidad de la sobrecarga, es de suponer que el centro del estrato de suelo es más sensible a la licuación debido al peso y forma de la estructura, por lo tanto sufre un asentamiento mayor en el centro.

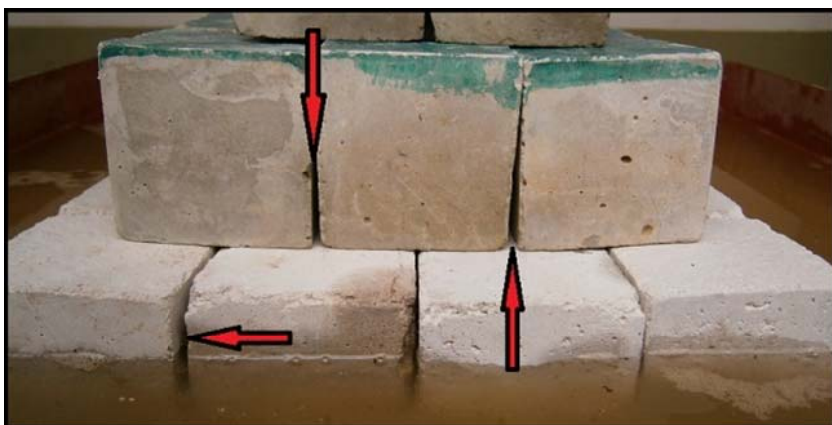


Figura 5.45: Separación de bloques tras el paso de simulación de ondas sísmicas

5.5.2 Ensayo con arena de playa al 100%

Al igual que la explicación del término 100% dado para la arena de río, se aplica con la arena de playa. Así para el segundo ensayo a escala reducida se utilizó arena de playa de Esterillos en estado seco y suelto que luego fue saturado. Una arena con granulometría clásica de las arenas de playa, arenas finas y uniformes con una curva granulométrica con mala gradación (ver Figura 5.5).

Los resultados del modelo se aprecian en la figura 5.18, dicho resultados son los esperados al tener una estructura cimentada sobre un estrato de suelo de arena de playa, el cual es un suelo fino y flojo.

El paso de las ondas sísmicas por el modelo con arena de playa, produjo el fenómeno de licuación, como era de esperar con el tipo de arena utilizado. A partir del paso mayor de ondas por el modelo, la estructura empezó a asentarse porque el estrato de suelo que se comporta como un líquido viscoso, propio del fenómeno de licuación. Además se observó la presencia de burbujas, debido al aumento excesivo de la presión de poro y el confinamiento que proporciona la caja del modelo, ya que el agua contenida debe buscar una salida próxima y el choque con las paredes impermeables de la caja producen burbujas durante la simulación del sismo. Así mismo se aprecia una súbita elevación de nivel freático.

El asentamiento máximo final de la estructura fue de aproximadamente 68 cm (aplicando factores de escala), quedando hundidos 2 pisos de la estructura, en la Figura 5.18 (A). Se nota que la simulación de sobrecarga se voltea en sentido este, siendo este sector el que presenta mayor asentamiento. Evaluando el modelo, es de apreciar que una estructura real tendría daños graves ante el fenómeno de licuación, produciendo así la pérdida de la cimentación de la estructura e incluso de su nivel superior. Esto no permitiría que la edificación sea habilitada, incluso podría llegar a colapsar por completo. En el Cuadro 5.13 se resumen los resultados de este modelo.

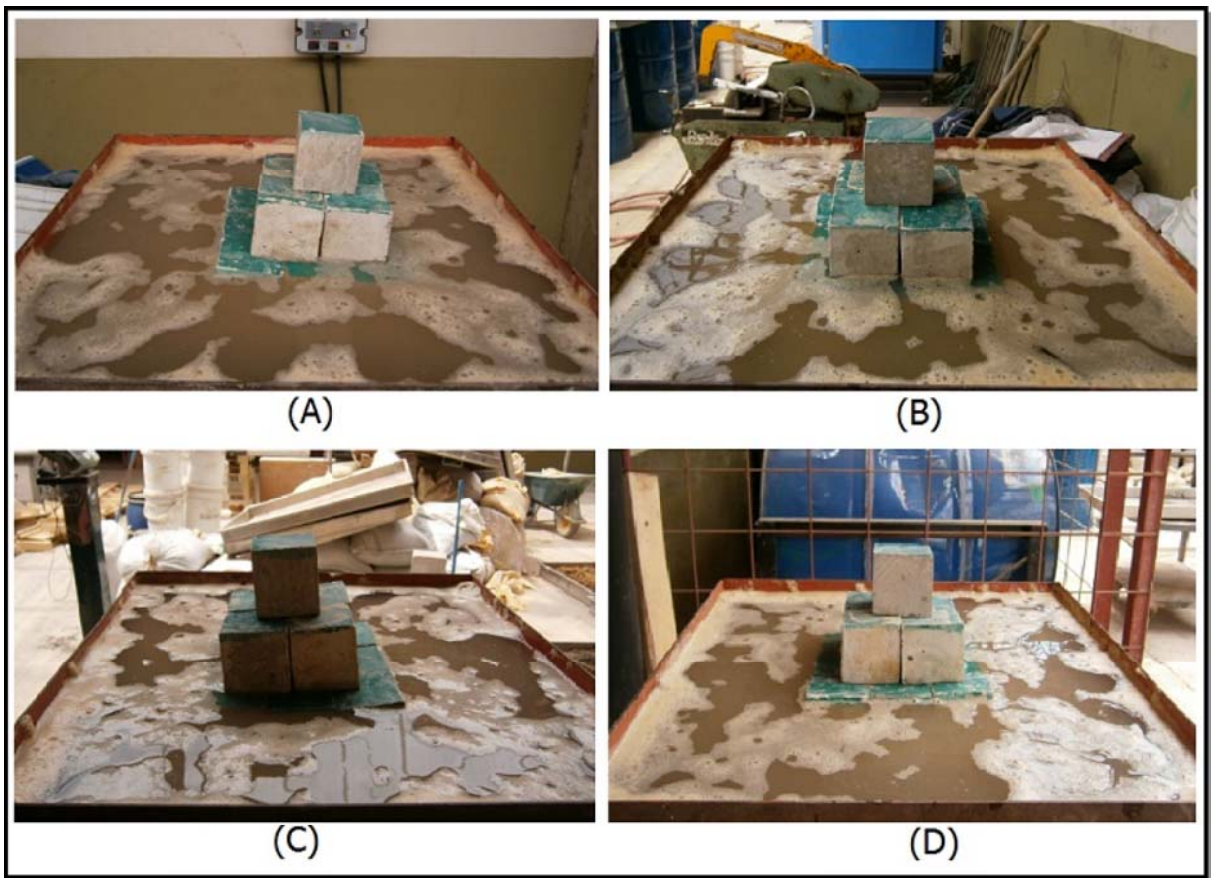


Figura 5.46: Resultado del modelo a escala con arena de playa 100%. (A) Fachada norte, (B) fachada este, (C) fachada sur, (D) fachada oeste

Cuadro 5.21: Resultados del ensayo a escala reducida con arena de playa al 100%

Parámetro	Resultados
Tiempo de vibración	20 s
Sobrecarga en el modelo	0,19 t/m ²
Criterio de gradación de la arena	Mal gradada
Asentamiento máximo observado en el modelo	6,8 cm
Presencia de licuación	Si
Determinación de daños	Graves, colapso estructural
*Evaluación de daños	Incapacidad de la estructura a seguir cumpliendo con la función para la que fue diseñada, alta probabilidad de pérdidas humanas

*La evaluación de daños es a criterio del autor, según lo observado en el modelo.

5.5.3 Ensayo combinación 50% arena de río con 50% arena de playa

Una vez realizado los ensayos a las arenas de río y playa en estado 100%, es decir sin sufrir modificaciones, se procede con los ensayos utilizando combinaciones de arenas, combinaciones que fueron obtenidas utilizando métodos propuestos en el punto 5.2.1.1. Es así que la ejecución para este ensayo a escala reducida se utiliza la combinación número uno de arenas, la cual consta de 50% arena de río de Guápiles, y 50% arena de playa de Esterillos, porcentajes calculados en estado de peso seco.

Los resultados obtenidos de este ensayo son interesantes, debido a la gradación del estrato de suelo, que proporciona una curva granulométrica medianamente gradada, como se aprecia en la Figura 5.7. Esto significa un término medio entre el ensayo número uno y dos. La Figura 5.19 muestra los resultados finales luego del proceso de vibración al modelo.

Durante la ejecución del ensayo se observó la pérdida de resistencia del suelo, debido al fenómeno de licuación producto de la simulación de un sismo. Además el estrato de suelo pasó de comportarse de un estrato sólido, a un líquido sumamente viscoso, el cual produjo

un asentamiento máximo de 40 cm (aplicando factores de escala); durante la simulación del sismo, el modelo se inclinó levemente hacia el sector norte, como se nota en la Figura 5.19 (B) y (D), apreciando el hundimiento de un piso de la sobrecarga. Estos resultados se evalúan como severos, si los reflejamos en una estructura real, ya que los asentamientos en la cimentación pueden impedir el funcionamiento apropiado de una edificación.

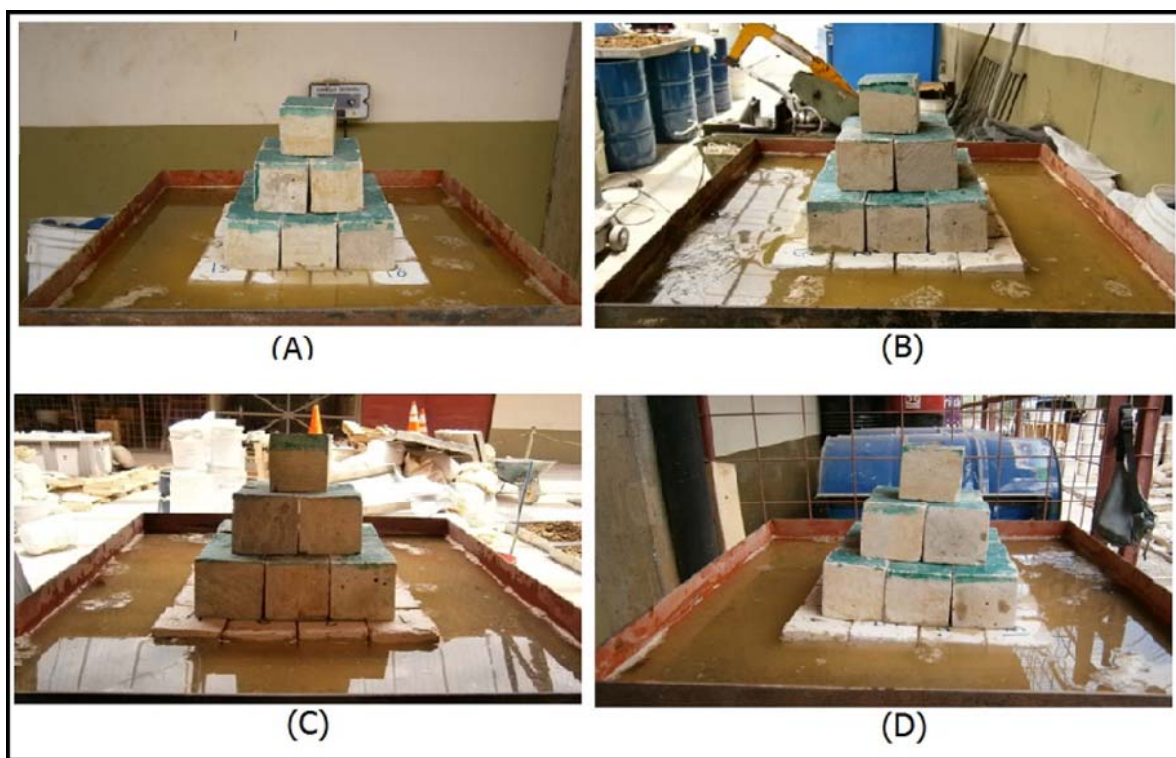


Figura 5.47: Resultado del modelo a escala combinación 50/50. (A) Fachada norte, (B) fachada este, (C) fachada sur, (D) fachada oeste

Respecto a la combinación de arena de río con la arena de playa, se destaca la mejoría del estrato de suelo, en comparación con el estrato de arena de playa 100%, como es de esperarse, debido a las diferencias granulométricas que se presentan al combinar granos de distintos tamaños al suelo uniforme de la arena de playa. Sin embargo, siendo una curva medianamente gradada, no mitiga el efecto de licuación respecto a una granulometría bien gradada que aminora el fenómeno de licuación. En el Cuadro 5.14 se resumen los resultados de este modelo.

Cuadro 5.22: Resultados del ensayo a escala reducida combinación 50/50

Parámetro	Resultados
Tiempo de vibración	20 s
Sobrecarga en el modelo	0,19 t/m ²
Criterio de gradación de la arena	Medianamente gradada
Asentamiento máximo observado en el modelo	4,0 cm
Presencia de licuación	Si
Determinación de daños	Severos
*Evaluación de daños	Daños severos en cimentaciones y elementos no estructurales

*La evaluación de daños es a criterio del autor, según lo observado en el modelo.

5.5.4 Ensayo combinación 30% arena de río con 70% arena de playa

Este ensayo es resultado de la combinación número dos propuesta según el "método de la araña" el cual se explica en el punto 5.2.1.1, para el modelo se utilizó 30% arena de río de Guápiles y 70% arena de playa de Esterillos, obteniendo un estrato básicamente fino, debido a la utilización de mayor porcentaje de arena de playa.

El fenómeno de licuación se hace presente para el modelo ensayado, produciéndose el fenómeno de manera notable, es decir el comportamiento del suelo como un líquido viscoso, el cual pierde resistencia, de manera que la estructura se hunde en este caso uniformemente sin llegar a colapsar. Cabe señalar que de continuar con la vibración por unos segundos más la sobrecarga probablemente colapsaría.

La curva granulométrica del modelo se observa en la Figura 5.7, y se podría describir entre medianamente gradada a mal gradada, ya que se observa en su parte superior una pequeña variación de sus granos, pero en su parte inferior es muy uniforme, típico de las arenas de playa. Esta curva es muy similar al modelo 50/50, la diferencia destaca en el porcentaje pasando por las mallas, el cual es mucho mayor a partir del tamiz N°20 en el modelo de

combinación 30/70, lo que hace que la curva suba respecto a la del modelo de combinación 50/50, y tendiendo más a la forma de una curva mal gradada.

Al poseer mayor variedad de los granos que conforman la muestra de la combinación 50% arena de río y 50% arena de playa, mitiga de mejor manera la licuación en comparación con la combinación 30/70, la cual contiene granos más uniformes debido a que presenta mayor cantidad de arena de playa.

En la Figura 5.20 se aprecian los asentamientos finales producto de la licuación en el modelo de ensayo, siendo el asentamiento máximo de 45 cm (aplicando factores de escala). La simulación de sobrecarga se inclinó ligeramente hacia el sector norte como se observa en la Figura 5.20 (B). En lecturas de pisos hundidos, se puede notar la inmersión de un piso total de la sobrecarga que simula una edificación. En la realidad, un asentamiento de este tipo se cataloga como grave, incluso puede causar el desplome de la edificación.

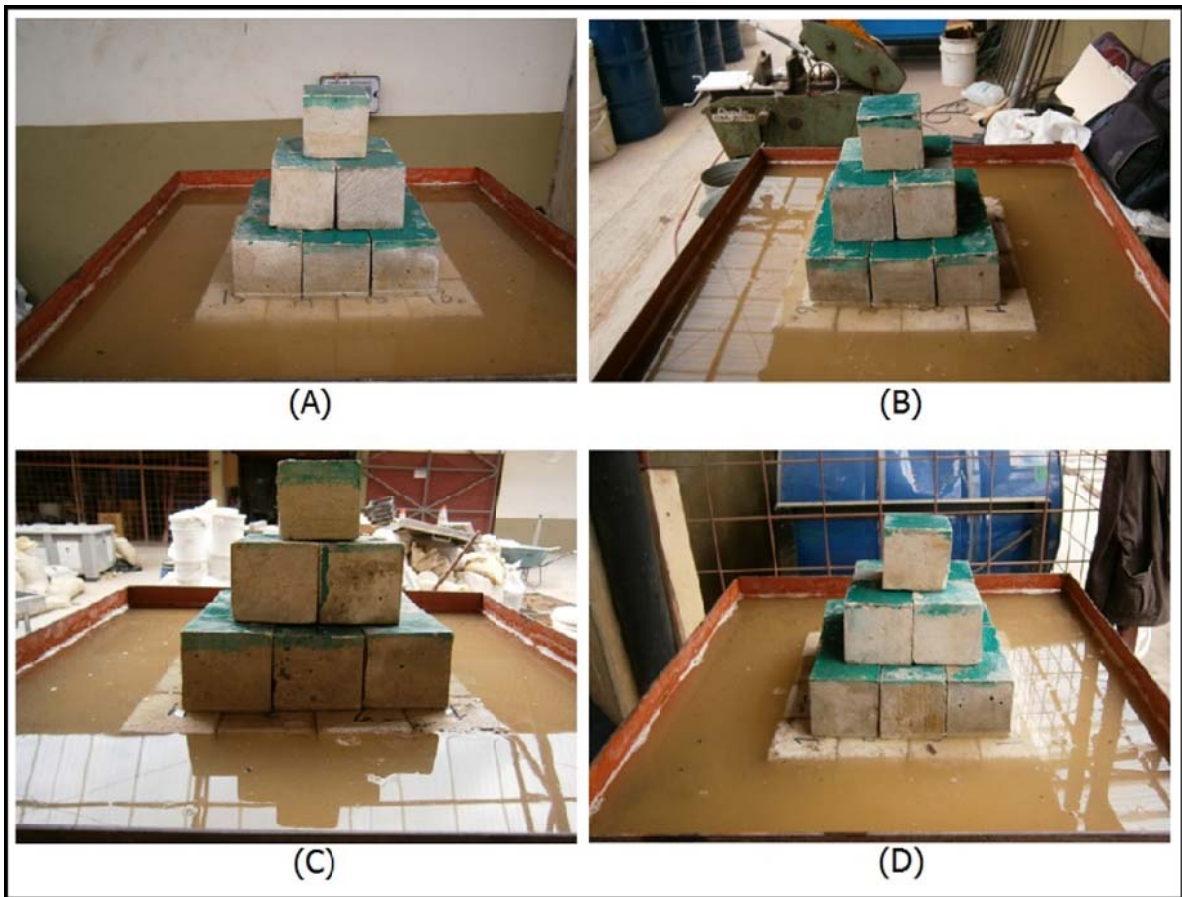


Figura 5.48: Resultado del modelo a escala combinación 30/70. (A) Fachada norte, (B) fachada este, (C) fachada sur, (D) fachada oeste

Al igual que los ensayos anteriores se presentó la pérdida de resistencia al corte debido a la sollicitación dinámica a la que fue expuesto el estrato de suelo, consecuentemente hubo aumento de la presión de poro por lo que el agua contenida en el suelo tendió a subir, notándose claramente la ocurrencia de licuación. En el Cuadro 5.15 se resumen los resultados de este modelo.

Cuadro 5.23: Resultados del ensayo a escala reducida combinación 30/70

Parámetro	Resultados
Tiempo de vibración	20 s
Sobrecarga en el modelo	0,19 t/m ²
Criterio de gradación de la arena	Medianamente gradada
Asentamiento máximo observado en el modelo	4,5 cm
Presencia de licuación	Si
Determinación de daños	Graves
*Evaluación de daños	Colapso de la cimentación, daños graves en elementos no estructurales

*La evaluación de daños es a criterio del autor, según lo observado en el modelo.

5.5.5 Ensayo combinación 75% arena de río con 25% arena de playa

Para la tercera combinación que representa el ensayo número cinco, se utilizó 75% arena de río, y 25% arena de playa, provenientes de las mismas localidades que se utilizaron en los ensayos anteriores. En este caso la curva granulométrica tiende a ser bien gradada como se observa en la Figura 5.7, teniendo una similitud con la curva granulométrica de la arena de río 100%, con la observación de un porcentaje pasando mayor de granos finos por los tamices, con respecto a la curva granulométrica de la arena de río 100%.

Los resultados del modelo tras la excitación dinámica producida por la mesa vibratoria se muestran en la Figura 5.21, durante el transcurso del movimiento no se observó el fenómeno de licuación para la mezcla ensayada. El estrato de suelo saturado mitigó el efecto de licuarse, con lo cual la resistencia al corte se mantuvo en todo momento, sin embargo por efecto de la vibración se presentó un reacomodo de los granos de arena, con lo cual la presión de poro aumentó significativamente el nivel freático, que subió aproximadamente 25 cm (aplicando factores de escala). Además se notó la presencia de burbujas con la salida súbita del agua debido al aumento de las presiones intersticiales.

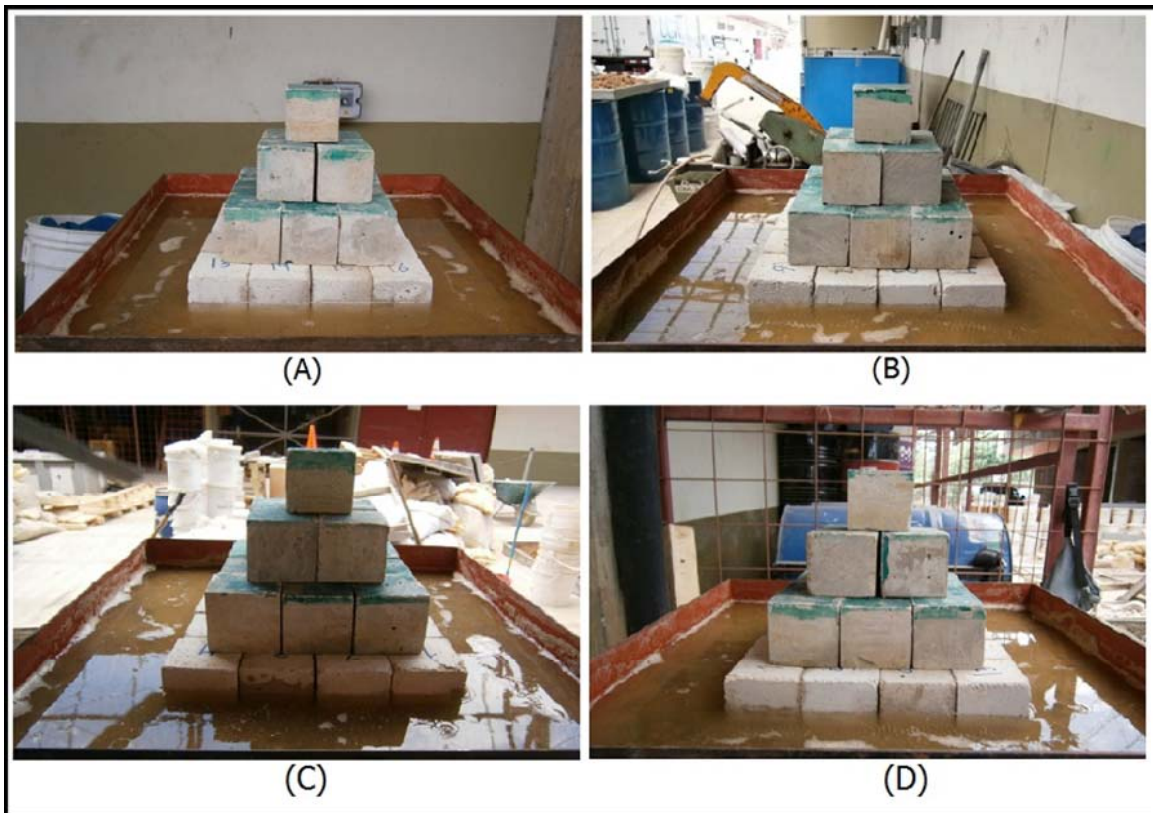


Figura 5.49: Resultado del modelo a escala combinación 75/25. (A) Fachada norte, (B) fachada este, (C) fachada sur, (D) fachada oeste

El asentamiento máximo presentado es de 3 cm (aplicando factores de escala), lo cual se podría describirse como un daño muy leve en una cimentación. Si bien no se observó el fenómeno de licuación, se aprecia una leve inclinación de la estructura en dirección este, pero esto se debe en sí a un comportamiento propio del estrato de suelo en el modelo.

Cabe señalar la presencia de separaciones notables entre los bloques que conforman el conjunto de la simulación de sobrecarga, como se aprecia en la Figura 5.22 (A), llegando a una separación máxima de 3 mm entre bloques. Esto representaría daños no estructurales en una edificación por efecto del sismo. Igualmente esto sucedió en el ensayo con arena de río 100%, y como se explicó anteriormente estas separaciones se presentaron debido a que los bloques no están pegados entre sí, y por efecto de la excitación dinámica así como la resistencia a la licuación, la estructura superior tiende a moverse (ver Figura 5.22 (B)), causando que los bloques se separen. En el Cuadro 5.16 se resumen los resultados de este modelo.

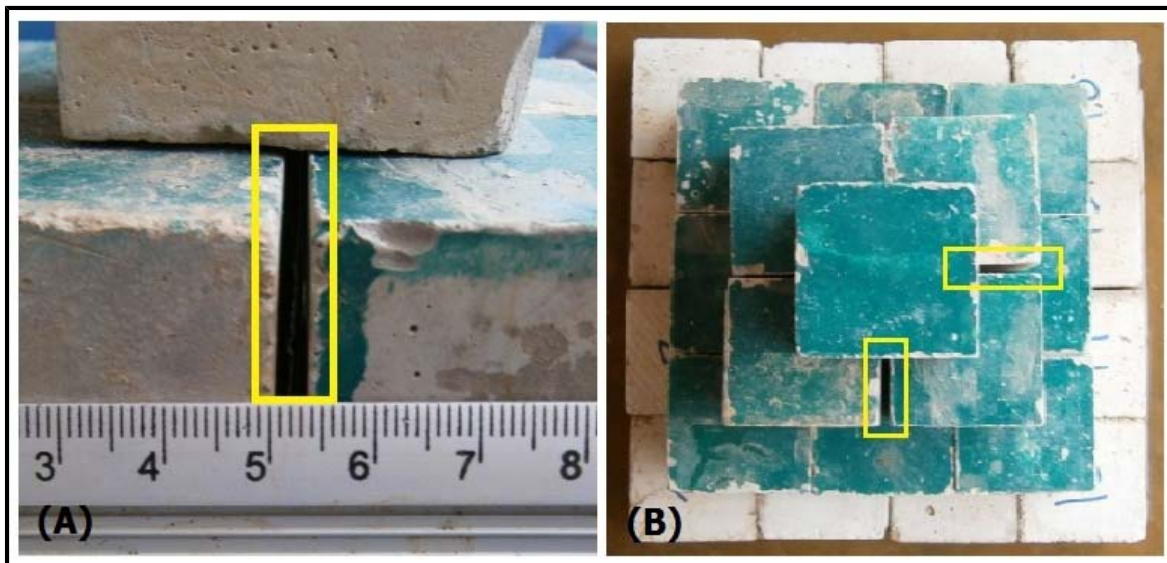


Figura 5.50: Separación de bloques producto de la vibración. (A) Imagen ampliada de la separación entre bloques, (B) vista superior del modelo después del paso de ondas sísmicas

Cuadro 5.24: Resultados del ensayo a escala reducida combinación 75/25

Parámetro	Resultados
Tiempo de vibración	20 s
Sobrecarga en el modelo	0,19 t/m ²
Criterio de gradación de la arena	Bien gradada

Asentamiento máximo observado en el modelo	0,3 cm
Presencia de licuación	No
Determinación de daños	Leves
*Evaluación de daños	Daños no estructurales

*La evaluación de daños es a criterio del autor, según lo observado en el modelo.

5.5.6 Ensayo combinación 15% arena de río con 85% arena de playa

El último modelo de ensayo fue elaborado con una combinación de 15% arena de río y 85% arena de playa, como resultado de esta combinación se presenta una mezcla básicamente de arena fina y uniforme, los resultados se muestran en la Figura 5.23.

La granulometría del estrato de suelo ensayado fue condicional para que se diera lugar al fenómeno de licuación tal y como se observa en la figura anterior, produciendo un asentamiento máximo de 48 cm (aplicando factores de escala). Además del hundimiento de un nivel completo de la sobrecarga, se aprecia una inclinación relativamente leve de la estructura en dirección sur (ver Figura 5.23 (C)).

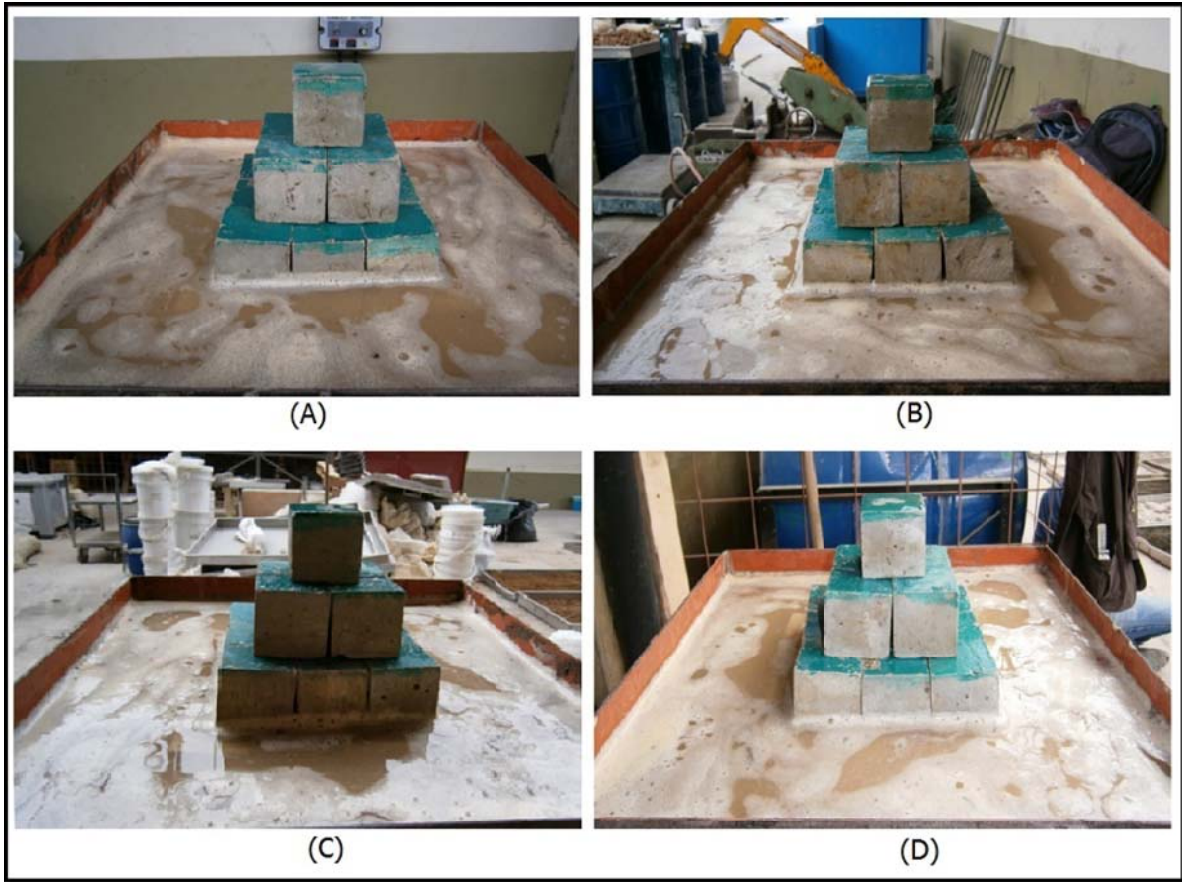


Figura 5.51: Resultado del modelo a escala combinación 15/85. (A) Fachada norte, (B) fachada este, (C) fachada sur, (D) fachada oeste

En sí la sobrecarga actuó en conjunto, asentándose uniformemente y despacio en el estrato de suelo potencialmente licuable. La simulación del sismo desató la elevación de la presión de poro, notándose la salida de agua y elevando el nivel freático en menor intensidad si lo comparamos con el modelo de arena de playa 100%.

La curva granulométrica de la mezcla se encuentra entre las curvas de los modelos de arena de playa 100% y la combinación 30/70, con lo cual se refleja en los resultados de las lecturas de los asentamientos, que igualmente se ve disminuido al agregar arena de río a la arena de playa, mejorando la graduación de la granulometría de arena de playa sola, pero no en sí la mitigación del fenómeno de licuación. Los daños causados en este ensayo son graves si los apreciáramos en una cimentación real, produciendo deterioros notables en una edificación que podría llegar a colapsar producto del paso de un sismo o terremoto. En el Cuadro 5.17 se resumen los resultados de este modelo.

Cuadro 5.25: Resultados del ensayo a escala reducida combinación 15/85

Parámetro	Resultados
Tiempo de vibración	20 s
Sobrecarga en el modelo	0,19 t/m ²
Criterio de gradación de la arena	Mal gradada
Asentamiento máximo observado en el modelo	4,8 cm
Presencia de licuación	Si
Determinación de daños	Graves
*Evaluación de daños	Colapso de la cimentación, daños graves en elementos no estructurales

*La evaluación de daños es a criterio del autor, según lo observado en el modelo.

Capítulo 6: Efecto de la Granulometría en la Licuación de Arenas

6. EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA EN LA LICUACIÓN DE ARENAS

6.1 Interpretación de los ensayos de los modelos a escala reducida

En este capítulo se resumen los resultados obtenidos experimentalmente tanto de los ensayos de laboratorio como de los ensayos a escala reducida. Se realiza una interpretación primordialmente cualitativa para los ensayos a escala, refiriéndonos a la respuesta de los modelos ante las sollicitaciones dinámicas causadas por la mesa vibratoria.

La interpretación de los resultados de los ensayos a escala reducida se realiza en relación a las gradaciones de las curvas granulométricas de cada modelo a diferencia del capítulo anterior en el cual se presentaron los resultados según la ejecución de cada modelo. Por lo tanto se analizan partiendo de la curva considerada como mejor gradada, pasando por las curvas medianamente gradadas, hasta llegar al modelo con mala gradación granulométrica.

6.2 Análisis de las curvas granulométricas de los modelos.

La granulometría de los suelos es de gran importancia, ya que por medio de la aplicación de curvas granulométricas se puede clasificar los suelos y evaluar propiedades ingenieriles.

Es conocido que el análisis de granulometría es útil en la determinación de la susceptibilidad de licuación. El Código de Cimentaciones de Costa Rica presenta rangos granulométricos con posibilidad de licuación para suelos mal gradados. Además indica que las arenas cuanto más finas y uniformes son más susceptibles a la licuación. En la Figura 6.1 se observan las curvas granulométricas de las arenas ensayadas en el presente proyecto. Al compararlas con los rangos propuestos por el C.C.C.R se puede apreciar que las arenas ensayadas caen dentro del rango muy fácilmente licuable; sin embargo, las distintas gradaciones de las arenas, implican diferentes comportamientos ante el fenómeno de licuación, como se explica más adelante.

En la Figura 6.1 se presentan las tres gradaciones en estudio identificadas con colores representativos. Se parte de la curva inferior que representa la granulometría de la arena

de río 100% identificada de color verde, hasta llegar a la curva superior que está constituida por la granulometría de la arena de playa 100% mostrada en la Figura 6.1 con color rojo; mientras que en el centro se encuentran las curvas de los modelos con estratos de suelos combinados.

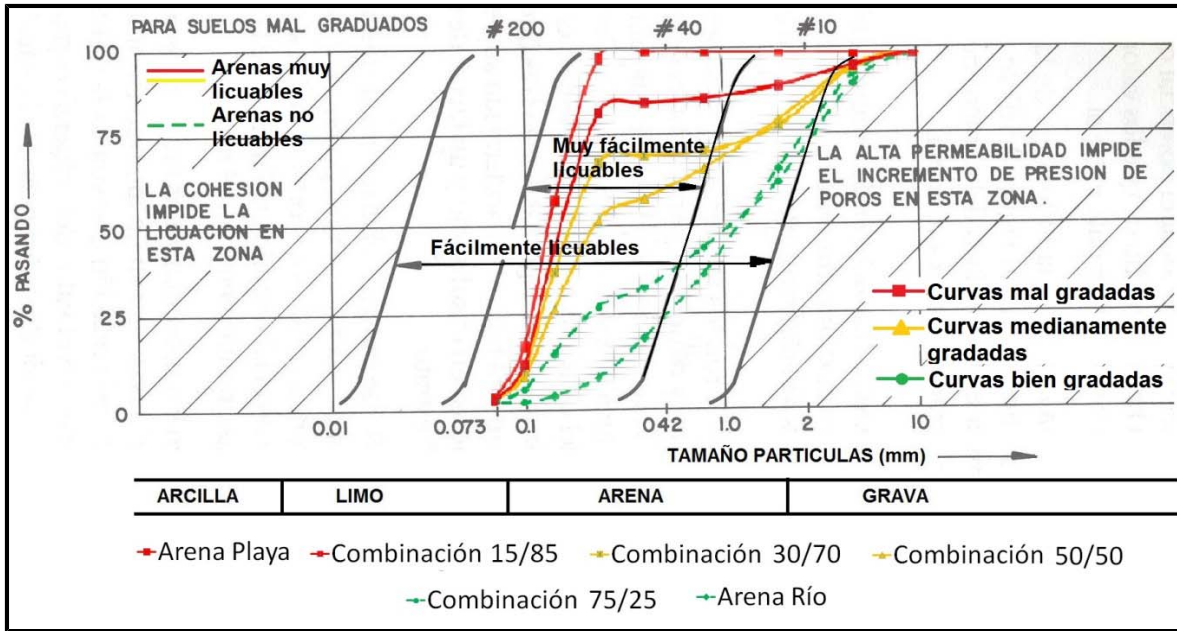


Figura 6.52: Comparación de curvas granulométricas de los modelos ensayados con los rangos establecidos por el C.C.C.R

Fuente: Código de Cimentaciones de Costa Rica, modificado por Mendoza, (2013)

A partir de las curvas granulométricas se determinaron los tamaños de partícula que corresponden con porcentajes específicos, esto permite clasificar las arenas de una mejor manera en uniformes, bien gradadas y mal gradadas, agregando también el concepto de medianamente gradada. Para ello se calculan los valores de D_p que representan los valores del tamaño de partículas correspondientes al porcentaje P , por ejemplo el D_{50} es el tamaño promedio dado que el 50% del material está compuesto por partículas de tamaño inferior, y notoriamente el otro 50% está compuesto por las partículas de tamaño mayor que ese valor.

En la Cuadro 6.1 se presentan los datos de los tamaños de partículas respecto a los porcentajes de 50,10,60 y 30, además se anotan los valores de los coeficientes de

uniformidad " C_u " y curvatura " C_c ", respectivamente, con dichos valores se determinó si el estrato de suelo arenoso tiene buena gradación. Estos resultados se utilizan para corroborar las gradaciones mencionadas anteriormente para las curvas mostradas en la Figura 6.1, donde las curvas trazadas a la derecha representan curvas bien gradadas, y las curvas más a la izquierda son más uniformes y consecuentemente mal gradadas. Sin embargo según el coeficiente de uniformidad de la combinación 75/25, se considera con una mejor gradación en comparación con la arena de río 100%, debido a su alto valor de C_u . Esto se debe a que al agregar una cantidad leve de finos, la conformación de granos pasa a tener una mayor variedad de tamaños, mientras que la arena de río, si bien cuenta con una buena gradación, el porcentaje de variación de tamaños es menor que la mezcla de arena 75/25.

Cuadro 6.26: Tamaños de partículas y caracterización de las curvas granulométricas

Conformación estrato de suelo	D ₅₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	C _u	C _c	Módulo de finura	Consideración de la gradación de la curva granulométrica
Arena de río 100%	1,26	0,27	1,66	0,66	6,1	1,0	4,74	Bien graduada
Aren de río 75%, arena de playa 25%	1.12	0,126	1,78	0,32	14,1	0,5	5,22	Bien graduada
Arena de río 50%, arena de playa 50%	0,23	0,110	0,50	0,16	4,5	0,5	4,11	Medianamente graduada
Arena de río 30%, arena de playa 70%	0,18	0,102	0,21	0,13	2,1	0,8	3,67	Medianamente graduada
Arena de río 15%, arena de playa 85%	0,16	0,101	0,17	0,12	1,7	0,8	3,02	Arena fina uniforme (mal graduada)
Arena de playa 100%	0,13	0,097	0,15	0,11	1,5	0,8	2,27	Arena fina uniforme (mal graduada)

Con respecto a las otras cuatro curvas, los datos de clasificación de gradaciones demuestra que la arena de playa 100% está conformada por arena fina uniforme, al igual

que la mezcla de arenas 15/85, con valores de " C_u " cercanos a uno, lo cual correspondería a un conjunto de partículas de igual tamaño (material uniforme).

6.3 Resumen de resultados de los ensayos a escala reducida

Se ejecutaron seis ensayos en total, correspondiendo cada modelo con unas de las curvas granulométricas mostradas en la Figura 6.1. En cada ensayo se observaba el comportamiento del estrato de suelo arenoso ante la sollicitación dinámica producida por una mesa vibratoria. Una vez transcurrido el tiempo de simulación de un sismo, se midieron los asentamientos producidos, así mismo se hacía la observación de si se producía el fenómeno de licuación. En el Cuadro 6.2 se muestra el resumen de los resultados de los asentamientos ocasionados para cada ensayo, además se evalúan los daños según el asentamiento máximo causado.

Se analizaron los resultados de los modelos a escala reducida en base a las gradaciones de las curvas granulométricas.

6.3.1 Modelos con granulometría bien gradada

Los modelos calificados con granulometría bien gradada fueron: modelo con arena de río 100%, y modelo combinación de arenas 75/25, curvas de color verde en la Figura 6.1.

Los resultados de los ensayos ejecutados a los modelos con buena gradación de granos de arena fueron los esperados, debido a que ninguno sufrió licuación. Esto era de esperarse, ya que la variedad de tamaños de sus granos, así como su arreglo, mitigaron el fenómeno de licuación. Destacar que la carga de sismo se mantuvo constante en todos los ensayos, así como la densidad suelta de las arenas.

Cuadro 6.27: Resumen de resultados de los ensayos a escala reducida

Clasificación Nº de ensayo según Figura 6.1	Modelo de Ensayo conformado por	Asentamiento máximo observado en el modelo (cm)	Presencia de licuación	Determinación de daños	Evaluación de daños
1	<i>Arena de río 100%</i>	0,6	No	Leves	Daños no estructurales
2	<i>Arena de río 75%, arena de playa 25%</i>	0,3	No	Despreciables	Daños no estructurales
3	<i>Arena de río 50%, arena de playa 50%</i>	4	Si	severos	Daños severos en cimentaciones y elementos no estructurales
4	<i>Arena de río 30%, arena de playa 70%</i>	4,5	Si	Graves	Colapso de la cimentación, daños graves a elementos no estructurales
5	<i>Arena de río 15%, arena de playa 85%</i>	4,8	Si	Graves	Colapso de la cimentación, daños graves a elementos no estructurales
6	<i>Arena de playa 100%</i>	6,8	Si	Graves, colapso estructural	Alta probabilidad de pérdidas humanas

*La evaluación de daños es a criterio del autor, según lo observado en el modelo.

Sin embargo la excitación dinámica y el alto grado de saturación a la que fueron expuestos los modelos, produjo una reorganización de los granos que conforman el estrato de suelo ensayado, ocurriendo así pequeños asentamientos. Asimismo a causa del aumento de la presión de poro, el nivel freático tiende a subir, pero el arreglo de los granos atenúa la licuación manteniendo su capacidad soportante.

Se destaca que el modelo con mezcla de 75% de arena de río con 25% arena de playa, fue más resistente que el modelo conformado por arena de río 100%, esto se aprecia con los asentamientos máximos correspondientes a 3 cm y 6 cm (aplicando factores de escala). Esto concuerda con los coeficientes de uniformidad indicados anteriormente, donde se determinó que la curva de la combinación 75/25 presenta una mayor variedad de tamaños de granos de arenas. Por lo tanto esta mayor variedad proporcionó menor asentamiento de la simulación de sobrecarga.

La resistencia del estrato de suelo a la licuación, provocó que la simulación de la sobrecarga conformada por bloques de cemento, sufriera separaciones entre los bloques, estas separaciones se presentaron en los dos estratos bien gradados, esto básicamente debido a la sollicitación dinámica que fue ejercida en los modelos.

6.3.2 Modelos con granulometría medianamente gradada

Los modelos calificados con granulometría medianamente gradada fueron: modelo combinación de arenas 50/50, y modelo combinación de arenas 30/70, curvas de color amarillo en la Figura 6.1.

El fenómeno de licuación se presentó al producir vibración a los modelos mencionados, de manera muy similar, la pérdida de capacidad soportante y el aumento de la presión de poro causaron que la simulación de sobrecarga se asentara sobre un estrato de suelo que asimilaba un líquido viscoso.

Se destaca la presencia de burbujas y salpicamiento vigoroso de agua, producido en las paredes de la caja durante el ensayo al modelo 50/50. Los asentamientos producidos son afines conforme al contenido de granos finos, así el modelo de combinación 30/70 tuvo un asentamiento máximo de 5 cm mayor (aplicando factores de escala) al modelo 50/50, con lo

cual se aprecia que un estrato de arena con más finos sufre licuación de manera que produce mayores daños en una estructura.

En comparación con las arenas bien gradadas se nota la presencia de licuación en las arenas medianamente gradadas, afectando así la sobrecarga y asentándola 40 cm (aplicando factores de escala) más producto de la licuación.

Además se señala que el tamaño efectivo de las partículas para los dos modelos medianamente gradados son similares como se pueden verificar en el Cuadro 6.1, con lo cual se puede notar del mismo modo en que los modelos se comportaron tras el paso de ondas sísmicas.

6.3.3 Modelos con granulometría mal gradada

El último grupo analizado presenta granulometría mal gradada y está conformado por los modelos: combinación de arenas 15/85, y el modelo de arena de playa 100%, curvas de color rojo en la Figura 6.1.

Los resultados obtenidos fueron los esperados, se produjo el fenómeno de licuación en su forma clásica, desarrollándose elevadas presiones intersticiales de forma rápida, lo que dio lugar a una pérdida de resistencia al corte y a la rotura del suelo, que pasó a comportarse como un líquido viscoso. Todo esto provocó que los niveles base de la sobrecarga se hundieran completamente.

El asentamiento máximo de 68 cm (aplicando factores de escala) producido por el estrato de arena de playa 100% representa el asentamiento máximo de todos los modelos ensayados, produciendo así los daños más graves en una estructura real. El modelo 15/85 produjo un asentamiento de 48 cm (aplicando factores de escala). Por ello se notó un margen de diferencia entre los asentamientos de 20 cm (aplicando factores de escala).

El modelo de combinación 15/85 se comportó de manera similar a los ensayos con curvas granulométricas medianamente gradadas. Como se puede observar en el Cuadro 6.2 los asentamientos máximos para cada modelo, donde se aprecia que los asentamientos de las combinaciones 50/50, 30/70 y 15/85 rondan entre los 40 y 50 cm, con lo que se puede

inducir que al agregar 15% de agregado más grueso a un estrato de arena de playa, aminora los daños producidos por el fenómeno de licuación.

Se destaca también los valores de los tamaños de partículas que corresponden a un 30% por peso de material más fino " D_{30} " de las combinaciones mencionadas, los cuales son similares entre ellos, rondando valores de 0,12 y 0,16 mm, en comparación con los " D_{30} " de los demás modelos que se apartan de este rango (ver Cuadro 6.1).

6.4 Influencia de la granulometría en los ensayos a escala reducida

Si bien ya se ha comprobado que una granulometría bien gradada mitiga el fenómeno de licuación, se presenta en la Figura 6.2 un gráfico que relaciona el coeficiente de uniformidad " C_u " respecto a los asentamientos máximos resultados de los ensayos a escala reducida. En el gráfico se puede observar que conforme mayor sea el coeficiente de uniformidad, menores serán los asentamientos producidos por el fenómeno de licuación, lo cual es esperable, ya que se mejora la gradación conforme se tiene un mayor valor de " C_u ". En este caso el " C_u " representa la granulometría de los modelos, es decir valores de " C_u " mayores a seis corresponden a granulometrías bien gradadas, y valores menores de " C_u " alrededor de 1 y 3 representan usualmente granulometrías mal gradadas. Aunque claro está que también depende del coeficiente de curvatura " C_c " y el módulo de finura $M.F$ para identificar de manera más correcta la gradación de un suelo.

También se logró notar el efecto del módulo de finura respecto a los asentamientos producidos en los ensayos. En la Figura 6.3 se aprecia dicha relación, en donde se observa que a mayor valor del módulo de finura, menor es el asentamiento máximo producido por la vibración al modelo y consecuentemente la presencia de licuación. Se observa una tendencia casi lineal entre el $M.F$ y el asentamiento producido. Respecto a los valores de " C_c " y su relación con los asentamientos, no tienen mayor importancia debido a que los valores de " C_c " de los modelos son muy similares (ver Cuadro 6.1), por lo tanto no se logra apreciar una tendencia específica de dicha relación.

Relación del coeficiente de uniformidad C_u en relación al asentamiento máximo observado en cada modelo a escala

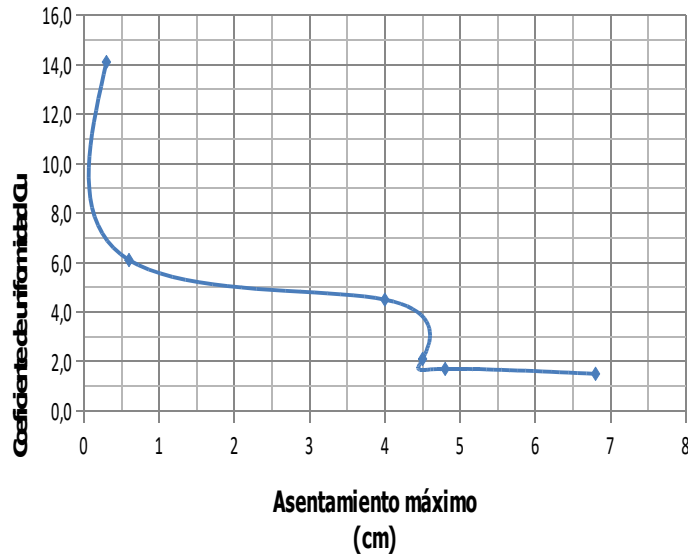


Figura 6.53: Gráfico de la relación entre el coeficiente de uniformidad y el asentamiento máximo producido en los modelos a escala reducida

Relación del módulo de finura con el asentamiento máximo observado

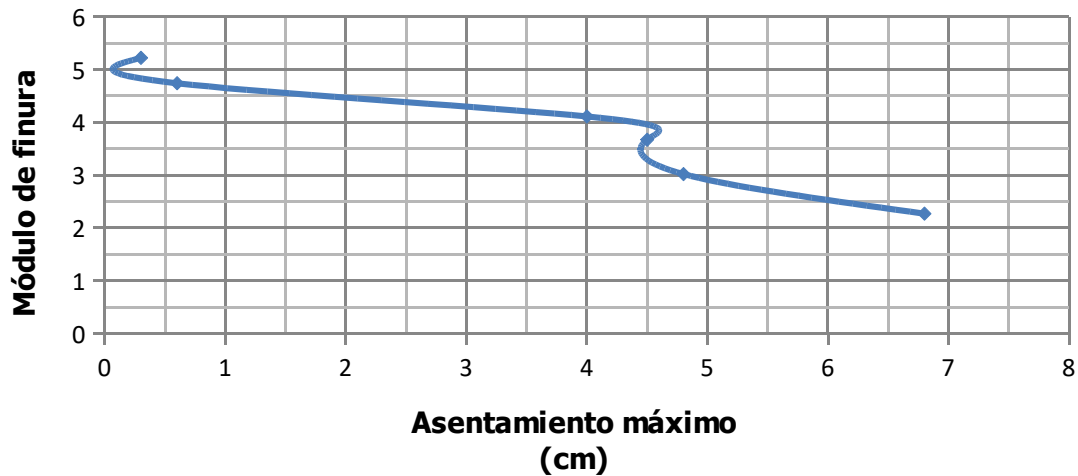


Figura 6.54: Gráfico de la relación entre módulo de finura y el asentamiento máximo producido en los modelos a escala reducida

En resumen, de la totalidad de resultados obtenidos se observa la tendencia de que conforme las arenas son más uniformes y finas, serán más susceptibles al fenómeno de licuación tal y como lo indican las teorías de licuación. Esto quedó demostrado en los ensayos a escala reducida.

Si bien las derivaciones obtenidas de los ensayos a escala reducida resultaron satisfactorias, en sentido que, las granulometrías demostraron su influencia en la licuación de arenas dependiendo de sus gradaciones, se debe tener en claro que existen factores externos que afectan los resultados de ensayos a escala reducida. Investigaciones de ensayos a escala reducida utilizando mesas vibratorias han demostrado que los siguientes factores pueden afectar los resultados obtenidos:

- Frecuencia y duración de la vibración
- Tamaño y geometría del contenedor o caja de ensayo
- Características de deformación del contenedor
- Método de colocación en el contenedor de la muestra estudiada
- Drenaje
- Aparatos de medición de deformaciones utilizados en los ensayos
- Presión de confinamiento

Se debe señalar que los factores utilizados en los ensayos ejecutados en el proyecto investigado se mantuvieron constantes, así factores mencionados anteriormente como, la frecuencia y duración de la vibración, el tamaño y características de la caja de ensayo, fueron utilizados de la misma manera para todos los ensayos. Sin embargo, como se mencionó anteriormente estos factores pueden generar variaciones en los resultados ya sea notándose en la propia ejecución del ensayo, o indirectamente en los resultados totales.

El estudio de las distintas gradaciones de arenas, llevado a cabo en el presente proyecto de investigación, comprueban que las arenas mal graduadas y saturadas son potencialmente licuables, y conforme su variedad de tamaños aumenta, es decir su granulometría es mejor

graduada, mejora la forma de actuar de un estrato arenoso ante un sismo o terremoto, atenuando a que se produzca el fenómeno de licuación.

Cabe destacar que solo se estudiaron granulometrías que se clasifican como arenas, tal y como se observan en la Figura 6.1. La única variante de las arena fue el tamaño de las partículas. Como puntos extremos la forma de actuar de las arenas de río y playa, respectivamente, fueron mitigantes y favorables respecto al fenómeno de licuación. La arena de río al poseer una granulometría bien gradada logró atenuar el efecto de licuación, aun en condiciones con grado de saturación del 100%; mientras la arena de playa, actuó en forma contraria, permitiendo la licuación del suelo de manera fácilmente notable, produciendo el colapso de la sobrecarga.

Si bien se ensayaron distintas combinaciones de arena de río con arena de playa, esto se hizo básicamente para lograr obtener el efecto de diferentes granulometrías. Por lo tanto la investigación se basa en notar los resultados de las distintas gradaciones de un depósito de arena, ante una excitación dinámica, y no el de determinar el porcentaje correcto de una combinación de arena de río con arena de playa que mitigue la licuación de arenas. Los resultados en sí, demuestran y brindan un mejor conocimiento de las distintas gradaciones de curvas granulométricas de arenas, ya que la teoría solo cuenta con un rango de curvas granulométricas susceptibles a la licuación de arenas mal gradadas; es decir con granos uniformes y finos (ver Figura 6.1). Así la presente investigación propone un rango más limitado a tomar en cuenta en el estudio de susceptibilidad de las arenas a sufrir licuación.

Como se mencionó anteriormente el objetivo no era encontrar una combinación que mitigue el fenómeno de licuación, pero queda demostrado que si se desea mejorar un estrato de arena mal gradada como es el caso de las arenas de playa, se puede tomar en cuenta que, al ser combinadas con arena de río, aminora la licuación; pero igualmente se sigue generando el fenómeno, tomando en cuenta que la curva granulométrica mejora al agregar granos de distintos tamaños.

Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones extraídas de este proyecto de investigación, y las recomendaciones con respecto a la aplicación de los resultados obtenidos, se resumen a continuación:

7.1 Conclusiones

- ✓ Se realizaron ensayos a escala reducida en mesa vibratoria, utilizando distintas gradaciones de arenas sueltas y saturadas, logrando apreciar el fenómeno de licuación en cuatro de los seis ensayos ejecutados; el fenómeno se presentó en las arenas sueltas con mala gradación y las medianamente gradadas.
- ✓ Se logró obtener diferentes granulometrías de arenas. Mediante la combinación de una arena de río y una arena de playa, se obtuvieron 4 combinaciones con variaciones de gradación. Con la realización de ensayos de análisis granulométricos, se determinaron en total seis diferentes curvas granulométricas, que se clasificaron como: mal gradadas, medianamente gradadas y bien gradadas.
- ✓ Se comprobó la influencia de la granulometría en la licuación de arenas mediante ensayos a escala reducida, logrando demostrar que las arenas sueltas bien gradadas atenúan el fenómeno de licuación; mientras que las arenas sueltas, uniformes y finas son potencialmente licuables. Por otro lado las arenas sueltas medianamente gradadas, aminoran el efecto de licuación, reduciendo los daños causados por dicho fenómeno, sin embargo también se consideran potencialmente licuables.
- ✓ Se logró observar la importancia que tienen las características de una curva granulométrica, como son el coeficiente de uniformidad C_u y el coeficiente de curvatura C_c , en el fenómeno de la licuación. Con los resultados de los ensayos a escala reducida se determinó que a mayor valor del C_u , menores son los asentamientos producidos por el fenómeno de licuación. Por otra parte arenas con valores de C_u menores a seis son potencialmente licuables.
- ✓ Se determinó que a mayor valor del módulo de finura obtenido de los ensayos granulométricos, mayor es la resistencia de las arenas a la licuación.

- ✓ Los finos (porcentaje pasando la malla N° 200) de las arenas en estudio, correspondían a finos no plásticos, por lo que los mismos finos no afectaron sobre los resultados de licuación en los modelos de ensayos a escala reducida.
- ✓ Se concluye que las arenas sueltas cuanto más finas y uniformes, serán más susceptibles al fenómeno de licuación, y que arenas con mejor estructura o arreglo de sus granos, resisten de mejor manera la licuación; tal y como lo indican las teorías que evalúan dicho fenómeno.
- ✓ A nivel de investigaciones existentes se verificó que el estudio del efecto de gradación en la licuación de arenas, ha sido parte de investigaciones llevadas a cabo para determinar la influencia del contenido de finos en la resistencia de suelos arenosos; sobre todo con relación a resultados de pruebas de resistencia cíclica triaxial. Estos resultados se basan mayoritariamente en la relación del contenido de finos, más que en lograr observar la influencia granulométrica sobre la resistencia a la licuación.
- ✓ La falta de equipo adecuado para medir aceleraciones, frecuencias, deformaciones y desplazamientos, limitan los resultados de esta investigación. Por tal motivo los resultados obtenidos en los modelos son de índole cualitativos.

7.2 Recomendaciones

- ✓ Si bien los resultados obtenidos durante la investigación fueron satisfactorios, se recomienda introducir nuevos elementos, que pueden sustentar y dar mayor validez a los resultados de ensayos a escala reducida. De esta manera se recomienda, la utilización de medidores de frecuencias y de mediciones de deformaciones en los ensayos a escala reducida. Además sería útil la instalación de un sistema de adquisición de datos que permita obtener respuestas de los modelos respecto al efecto dinámico.
- ✓ Se recomienda seguir el proceso de ejecución de ensayos a escala reducida, de tal manera que se estudien otros parámetros y características importantes de los suelos potencialmente licuables. Así por ejemplo se pueden ejecutar ensayos a escala

reducida variando la compacidad relativa, utilizando los mismos tipos de arenas y combinaciones ensayadas en el presente trabajo.

- ✓ Se recomienda el uso de mesas vibratorias de mayor tamaño, para que la construcción de modelos a escala no presenten restricciones de peso, y se pueda analizar de mejor manera el comportamiento de los suelos en estudio.
- ✓ Sería importante realizar pruebas *in situ* a las muestras ejecutadas en ensayos a escala reducida, como por ejemplo la prueba SPT, y realizar una comparación de la susceptibilidad a la licuación, con las metodologías propuestas por el Código de Cimentaciones de Costa Rica.
- ✓ Se recomienda realizar ensayos triaxiales cíclicos no drenados, a las arenas y combinaciones ensayadas. Además, examinar la influencia de la resistencia de licuación y características de generación de presión de poro de las distintas gradaciones; y realizar una comparación con los resultados de los ensayos a escala reducida.

Referencias Bibliográficas

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Araya, A. (2003). Zonificación de la Amenaza de Licuación de la Región Atlántica. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
2. Asociación Costarricense Geotecnia. (1994). *Código de Cimentaciones de Costa Rica* (1^{ra} edición, 3^{ra} reimpresión). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
3. Asociación Costarricense Geotecnia. (2009). *Código de Cimentaciones de Costa Rica* (2^{da} edición). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
4. Azofeifa, J. (1979). Influencia de la granulometría en la resistencia retenida de mezclas asfálticas. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
5. Chacón, S. (2002). Zonificación del potencial de licuación de suelos para la zona de la península de Nicoya y alrededores. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
6. Chang, N.Y., & ko, H.Y. (1982). Dynamic properties of clays under general three-dimensional stresses [Versión electrónica]. *Final Report to the National Science Foundation under Grant No. PRF 79-00718*.
7. Chang, N.Y. (1987). Liquefaction susceptibility of fine-grained soils preliminary study report [Versión electrónica]. *Department of Civil and Urban Engineering University of Colorado at Denver*, 4, 9-18.
8. Chavarría, A. (2002). Construcción y Calibración de una Mesa de Movimiento Unidireccional para Realizar Ensayos con Modelos Didácticos a Escala Reducida. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

9. Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering (2006). Earthquake Engineering. Extraído el 12 de noviembre de 2012 de http://www.curee.org/projects/ce-museums/SF_exhibit/downloads/CUREE-exhibit_booklet.pdf
10. Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering (1997). Historic Developments in the Evolution of Earthquake Engineering [Versión electrónica]. Adapted from the 1998 CUREE Calendar, 2.
11. Das, B. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: Thomsom Learning.
12. Estaire, J. (2004). Comportamiento de cimentaciones superficiales sobre suelos granulares sometidas a solicitaciones dinámicas [Versión electrónica]. Proyecto de graduación para optar por el grado de Doctor de Filosofía en Ingeniería Civil, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
13. García, J. (2007). Análisis comparativo del fenómeno de licuación en arenas, aplicación a Tumaco (Colombia) [Versión electrónica]. Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
14. Garevski, M. & Ansal, A. (2010). *Earthquake Engineering in Europe*. Londres: Springer.
15. Geopetrolío.com (2012). *Geopresiones*. Extraído el 23 de octubre, 2011, http://geopetroleo.com/983912_Geopresiones.html
16. González, L.I. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
17. Henríquez, C. (2007). Mejora de terrenos potencialmente licuables con inyecciones de compactación [Versión electrónica]. Proyecto de graduación para optar por el grado de Doctor de Filosofía en Ingeniería Civil, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
18. Hernández, E. (2002). Zonificación del potencial de licuación de suelos para la zona del Pacífico Central, entre los ríos Tárcoles y Parrita. Proyecto de graduación para optar por el

- grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
19. Hernández, I. (2010). Influencia del porcentaje de finos en el fenómeno de licuación de arenas. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
 20. Humboldt, (2012). *Catálogo digital Humboldt*. Extraído el 28 de noviembre de 2012, de <http://humboltdemexico.com/datos/webs/humcat-esp/69.pdf>
 21. Juarez, E. & Rodríguez, R. (2009). *Mecánica de suelos II , Volumen 2; Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos* (2^{da} edición). México: Limusa.
 22. Koester, J.P. (1993). *Effects of fines type and content on liquefaction potential of low to medium plasticity fine grained soils*. U.S. Central United States Earthquake Consortium (CUSEC), 67-75. Extraído el 14 de diciembre, 2012, de <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/eng/doc6586/doc6586-contenido.pdf>
 23. Laporte, G. (1995). Licuación de Suelos y Desplazamientos Horizontal del Terreno, Inducidos por Sismo: Análisis y Evaluación para Costa Rica. Proyecto de graduación para optar por el grado de Maestría en Ciencias, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
 24. Obando, T. (2009). Estado actual del conocimiento del proceso cíclico de licuefacción en suelos sujetos a solicitaciones sísmicas, ejemplo de casos. Tesis Doctoral. Editorial Universidad Internacional de Andalucía UNIA, Huelva, España.
 25. Pérez, E. (2005). Evaluación del potencial de licuación de suelos arenosos en la ciudad de Cartago. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
 26. Santibáñez, D. (2006). Determinación del potencial de licuefacción de suelos no cohesivos saturados bajo cargas sísmicas usando el ensayo de penetración estándar. Tesis para optar al título de Ingeniero Constructor, Escuela de Ingeniería en Construcción, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

27. Severn, R.T. (2010). The development of shaking tables – a historical note [Versión electrónica]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 195-213.
28. The John A. Blume Earthquake Engineering Center (2013). The History of the Blume Center, extraído el 7 de enero, 2013, de <https://blume.stanford.edu/about/history-blume-center>
29. Ulate, D. (2010). Criterios simplificados para evaluación de vulnerabilidad a licuación de terraplenes de carreteras en zonas aluviales. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
30. Vargas, W. (2010). *Análisis granulométrico*. Apuntes de clase Mecánica de Suelos II. Universidad de Costa Rica.
31. Villalobos, D. (2009). Elaboración de una herramienta computacional para la evaluación del potencial de licuación de suelos. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.