

32



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**LA CENTRIFUGA COMO HERRAMIENTA PARA  
SOLUCIONAR PROBLEMAS DE INGENIERÍA  
CIVIL EN MÉXICO**

29/5/38

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**I N G E N I E R O C I V I L**  
P R E S E N T A .  
**MIGUEL AMADO CERVANTES MACEDA**



**DIRECTOR DE TESIS: DR. VICTOR M. TABOADA URTUZUASTEGUI**

**MEXICO, D. F., CIUDAD UNIVERSITARIA,**

**2001**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/128/00

Señor  
**MIGUEL AMADO CERVANTES MACEDA**  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **DR VICTOR M. TABOADA URTUZUASTEGUI**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

**"LA CENTRIFUGA COMO HERRAMIENTA PARA SOLUCIONAR PROBLEMAS DE INGENIERIA CIVIL EN MEXICO"**

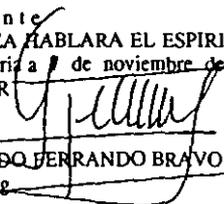
**INTRODUCCION**

- I. ANTECEDENTES SOBRE LA CENTRIFUGA**
- II. PRINCIPIOS DEL MODELADO EN LA CENTRIFUGA**
- III. APLICACIONES EN LOS DIFERENTES CAMPOS DE LA INGENIERIA CIVIL**
- IV. IMPORTANCIA Y CONVENIENCIA DE CONTAR CON UNA CENTRIFUGA EN MEXICO**
- V. CONCLUSIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**  
Cd. Universitaria a 7 de noviembre de 2000.  
EL DIRECTOR

  
**M. C. GERARDO FERRANDO BRAVO**  
GER/GMP/mstg

A MIS PADRES, ILSE Y HUMBERTO, POR TODO

A MI HERMANO, POR LOS CONSEJOS

A TODOS LOS CON LOS QUE HE COMPARTIDO  
MOMENTOS TRASCENDENTALES DE MI VIDA

UN AGRADECIMIENTO ESPECIAL A VÍCTOR  
TABOADA POR SU ASESORÍA Y APOYO

# **La centrífuga como herramienta para solucionar problemas de Ingeniería Civil en México.**

## **Objetivos**

---

- ▶ Presentar la Centrífuga desde su aparición, así como el desarrollo del modelado con esta herramienta en beneficio de los diferentes campos de la Ingeniería Civil.
- ▶ Mostrar ejemplos de las múltiples aplicaciones y resultados obtenidos con la ayuda de una centrífuga.
- ▶ Difundir el uso de la centrífuga como una importante herramienta para el campo de la Ingeniería Civil en México.

# Índice

---

Agradecimientos	i
Objetivos	ii

---

## INTRODUCCIÓN 1

### **CAPÍTULO 1** ANTECEDENTES SOBRE LA CENTRÍFUGA. 3

1.1. Reseña histórica.	3
1.2. Utilidad de contar con una centrífuga.	6
1.3. Funcionamiento de una centrífuga.	7
1.4. Tipos de centrífuga y sus características.	8
1.4.1. Centrífuga de Tambor.	8
1.4.2. Centrífuga de brazo balanceado.	9
1.4.3. Características principales de una centrífuga de brazo balanceado.	10
1.4.4. Capacidad de una centrífuga.	11
1.4.5. Sitio de instalación de una centrífuga.	12
1.5. Centrífugas existentes en el mundo.	13

### **CAPÍTULO 2** PRINCIPIOS DEL MODELADO EN LA CENTRÍFUGA. 15

2.1. El modelado en una centrífuga.	15
2.2. Teoría.	16
2.2.1. Incremento en la aceleración.	16
2.2.2. Relaciones de escala.	18
2.2.3. Similitud de esfuerzos.	19
2.3. El modelado y sus efectos de escala.	22
2.3.1. Aceleración rotacional y campo de esfuerzos.	22
2.3.2. Efecto del tamaño de la partícula.	23

2.3.3. Utilización de un fluido viscoso para saturación del modelo.	24
2.3.4. Ejemplo de escalado.	30

## **CAPÍTULO 3**      **APLICACIONES EN LOS DIFERENTES CAMPOS DE LA INGENIERÍA CIVIL.**      **33**

<b>3.1. Desarrollo de contenedores de modelos, equipos simuladores de sismos e instrumentación utilizada.</b>	<b>33</b>
3.1.1. Contenedores y cajas laminares.	33
3.1.1.1. Contenedores de paredes rígidas.	33
3.1.1.2. Cajas laminares.	35
3.1.2. Generadores de sismos.	35
3.1.3. Preparación de los modelos.	38
3.1.4. Instrumentación.	39
<b>3.2. Aplicaciones en Geotecnia.</b>	<b>42</b>
3.2.1. Consideraciones al realizar un modelo para Geotecnia.	44
3.2.2. Realización de pruebas a la muestra de suelo previo al ensaye.	44
3.2.3. Estudios en Ingeniería Sísmica y Dinámica de Suelos.	45
<b>3.3. Aplicaciones en Hidráulica.</b>	<b>46</b>
<b>3.4. Aplicaciones en Ingeniería ambiental.</b>	<b>48</b>
<b>3.5. Aplicaciones en Ingeniería Estructural.</b>	<b>51</b>
3.5.1. Aplicaciones de la centrífuga en estudios de interacción suelo-estructura.	51
<b>3.6. Aplicaciones en Construcción.</b>	<b>53</b>
<b>3.7. Ejemplo de un modelado en centrífuga realizado en el Instituto Politécnico de Rensselaer en colaboración con el Instituto de Ingeniería de la UNAM.</b>	<b>55</b>
3.7.1. Caso estudiado.	56
3.7.2. Características del equipo empleado.	58
3.7.2.1. Características del generador de sismos.	58
3.7.3. Programa de prueba.	59
3.7.4. Preparación de la muestra y del modelo.	61
3.7.5. Ensaye del modelo y adquisición de datos.	63
3.7.6. Modelo No 1 ensayado a 60g y 60u.	64
3.7.6.1. Descripción general del modelo	64
3.7.6.2. Localización de los instrumentos en el ensaye de Niigata a 60g.	65

3.7.7.	Excitación registrada en la base del modelo.	66
3.7.8.	Aceleraciones registradas.	66
3.7.8.1.	Aceleraciones registradas en el talud.	66
3.7.8.2.	Aceleraciones registradas en campo libre.	67
3.7.9.	Registro de excesos de presiones de poro.	68
3.7.9.1.	Excesos de presiones de poro registrados en el talud.	68
3.7.9.2.	Exceso de presiones de poro registrados en campo libre.	69
3.7.9.3.	Isócronas en campo libre.	70
3.7.10.	Asentamientos registrados.	71
3.7.11.	Desplazamientos laterales permanentes registrados.	72
3.7.12.	Realización de una segunda prueba.	74

**CAPITULO 4**    **IMPORTANCIA Y CONVENIENCIA DE CONTAR CON UNA CENTRÍFUGA EN MÉXICO.**    **76**

4.1.	Ventajas y limitaciones.	76
4.2.	Una herramienta para el desarrollo de la Ingeniería Civil en México.	79

**CAPITULO 5**    **CONCLUSIONES**    **83**

	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>85</b>
--	---------------------	-----------

---

## INTRODUCCIÓN.

La Ingeniería ha requerido siempre, como la mayoría de las actividades que realizan los humanos, la ayuda de herramientas para poder facilitar el trabajo y desempeñarse correctamente, éstas se emplean tanto en la parte teórica como durante todo el desarrollo de un proyecto, desde el principio hasta su conclusión. En Ingeniería Civil se emplean una gran variedad de instrumentos para distintos fines, según las aplicaciones y las funciones para las cuales se utilizaran. La modelación es una herramienta para comprender problemas complejos en ingeniería, sirve para estudiar algunos de los fenómenos que se presentan en la realidad.

Las centrifugas desde su aparición han sido utilizadas en diversos campos de la investigación y en el desarrollo de procesos industriales, algunas de ellas son empleadas para sedimentar muestras o para separar sólidos de líquidos como es el caso del uso que se les da en la Química.

La centrifuga estudiada, tiene una plataforma sobre la que se colocan los modelos; gracias a la fuerza centrífuga obtenida al girar, se alcanza en el modelo un campo gravitacional mayor al existente en la tierra, obteniendo así condiciones similares a las existentes en la realidad; con base en ciertos cuidados y criterios permite estudiar de manera confiable los fenómenos que ocurren en la realidad.

En el campo de la geotecnia, se construyen modelos para simular el comportamiento de un suelo, al usar una centrifuga, se obtiene el mismo nivel de esfuerzos a la profundidad equivalente que la existente en el prototipo, una condición básica de similitud. Los dos principios básicos del modelado en una centrifuga son: el incremento del peso propio de una muestra debida al incremento de la aceleración que es proporcional a la reducción entre la escala del modelo y la del prototipo, y por otro parte la reducción en el tiempo para las pruebas en el modelo al reducir la escala.

La centrifuga de brazo que es la herramienta sobre la cual se hablará, es un equipo que ha ido aumentando en cuanto a su uso, aplicaciones, y desarrollo en el mundo.

En la actualidad existe más de un centenar de estos equipos distribuidos en el mundo, desgraciadamente en México aun no se cuenta con ninguno, uno de los objetivos será el de difundir y presentar el uso y aplicaciones con un equipo como éste y las ventajas que ofrecería el contar con una centrifuga de acuerdo a las necesidades de nuestro país.

---

El modelado se aplica a diferentes campos de la Ingeniería Civil, en ramas especializadas de la investigación, así como para aplicaciones directas al diseño y propuestas de alternativa de solución a problemas específicos.

El modelado en centrífuga es escasamente conocido en México, comenzando por el hecho de que no existe un equipo de estas características, también por que se cree que se aplica únicamente en investigación de sólo algunos fenómenos, siendo que ofrece una importante cantidad de aplicaciones en diversos campos, cada vez se desarrollan nuevos equipos de mayor potencia y técnicas de modelado especializadas.

Se presentaran los antecedentes sobre el modelado en centrífuga, partiendo desde las primeras ideas, los diferentes tipos de equipos y sus características, y sobre la importancia que este tipo de herramientas tienen en el mundo.

Se describira el proceso de modelado, al lograr un campo artificial de aceleración en el modelo por medio de la fuerza centrífuga permitiendo de esta manera satisfacer condiciones de similitud necesarias.

Algunas de las principales aplicaciones relacionadas con la Ingeniería Civil, serán expuestas, principalmente se verá el caso de la Geotecnia en donde se han logrado los desarrollos más considerables, las técnicas de modelado, la construcción de los modelos, la instrumentación de los mismos, y la forma en que se simulan las condiciones estáticas y dinámicas según sean los requerimientos.

Finalmente, se hará un balance de las ventajas y limitaciones de este equipo, así como los beneficios que aportaría el poseer un equipo con estas características en México.

**CAPITULO 1****ANTECEDENTES SOBRE LA CENTRÍFUGA.****1.1. Reseña Histórica.**

En 1869 Edouard Phillips, ingeniero en Minas, maestro de l'École Centrale y de la École Polytechnique, en Francia, presentó una publicación en la Academia de Ciencias de Paris titulada: "*De l'équilibre des solides élastiques semblables*" en la cual él reconocía las limitaciones de la teoría elástica contemporánea para el análisis de estructuras complejas. En sus trabajos se enfrentó con problemas analíticos excesivamente difíciles de resolver, por lo que reconoció la necesidad de construir modelos, para probarlos y ensayarlos en una centrífuga con el fin dar una solución.

Partiendo de las ecuaciones diferenciales de equilibrio de los sólidos elásticos estableció las relaciones de similitud que deberían ser satisfechas para que tanto el modelo a escala reducida, como el prototipo presentaran el mismo comportamiento. Phillips sugirió utilizar la fuerza centrífuga para obtener la similitud entre un modelo y un prototipo para el caso de problemas en los cuales se implicara la fuerza de gravedad como un factor esencial. Dio someramente algunos principios generales para la concepción de una centrífuga y propuso aplicarlos para estudiar la viabilidad de construir puentes de grandes dimensiones, su campo inicial de aplicación eran problemas relacionados con ingeniería de puentes, ya que los ingenieros ingleses se encontraban trabajando en cada vez mayores e intrépidas construcciones. Phillips reconoció la importancia de las fuerzas debidas al peso propio en un número considerable de situaciones por lo que desarrolló apropiadamente relaciones de escala con las que propuso la centrífuga, con el fin de obtener la similitud de esfuerzos entre modelos y prototipos cuando se trabaja con el mismo material.

En 1931 Philip Bucky de la Universidad de Columbia, Estados Unidos, realizó un experimento, en el cual sometió un modelo de las estructuras del techo de una mina de roca a un incremento de aceleraciones hasta lograr su falla. Esta actividad tuvo un impacto limitado y no le siguió un verdadero desarrollo de nuevos métodos experimentales.

En la misma época (1932), comenzaron a llevarse a cabo experimentos en Moscú por Pokrovskii, en el laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Hidrogeología y de Hidráulica de la antigua República Soviética. Pokrovskii se dedicó en primer lugar al

estudio de la estabilidad de estructuras de tierra, los resultados que obtuvo con sus modelos reducidos se aplicaron en proyectos de cortinas, diques y terraplenes. Pokrovskii junto con Fiodorov, ambos científicos rusos, hicieron propuestas para el modelado geotécnico en una centrífuga, con lo cual publicaron un artículo en la Primera Conferencia Internacional sobre Mecánica de Suelos, en 1936. En los años comprendidos entre 1940 y 1950, la investigación con el uso de una centrífuga continuó posiblemente con fines militares en la antigua Unión Soviética.

Entre 1930 y 1960 se comenzaron a instalar, una veintena de centrífugas, especializadas para estudios principalmente geotécnicos en diferentes centros de investigación repartidos en el mundo. Japón y diversas naciones de Europa del este se sumaron al interés por las pruebas en centrífuga. Se llegó a tener una comunidad mundial de investigadores que trabajaban con esta herramienta y a contar con múltiples facilidades en todo el mundo, se vio un rápido desarrollo del Estado del Arte en este campo. El final de los años 60 puede ser considerado como un periodo muy importante para el modelado en centrífuga. En los años setenta comienza la manufactura e instalación de centrífugas de mayor tamaño y capacidad, así como la realización de mejoras y nuevas aplicaciones al campo del modelado en centrífuga.

Diferentes aspectos caracterizaron los años ochenta y marcaron una nueva etapa en el desarrollo de estudios en centrífugas. Gracias a la existencia de una mayor tecnología y beneficiados por los avances en electrónica e informática, se construyeron equipos más sofisticados en cuanto a sus características y mayor capacidad, lo cual permitió la utilización en múltiples campos de la Ingeniería y sobre todo de la investigación. Se comenzaron a instalar equipos de este tipo en todo el mundo con fines comerciales e industriales y no sólo en centros de investigación y universidades. En los años ochenta hubo un desarrollo importante en los modelos que simulaban sismos. Se crearon organismos y comités con el fin de darle una mayor difusión al uso, aplicaciones y aportaciones del trabajo realizado con una centrífuga.

Por primera vez a partir de 1936 aparecieron publicaciones relacionadas con trabajos en centrífuga, provenientes de Inglaterra, Japón y la Unión Soviética.

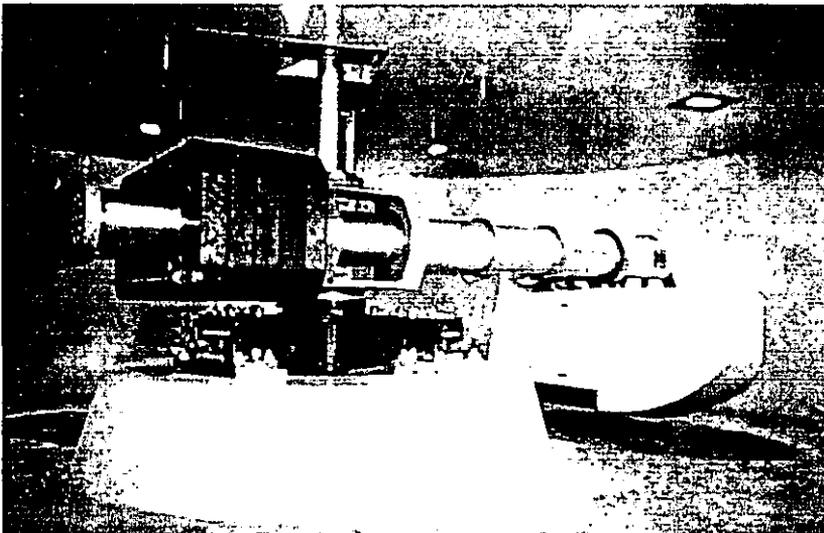
En 1969, la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones (ISSMFE, por sus siglas en inglés) tuvo su séptima conferencia en México,

En las siguientes conferencias dirigidas por la ISSMFE, como la realizada en Moscú en 1973, se apreció la existencia de un mayor número de publicaciones relacionadas

con la centrífuga y la diversidad de los campos en los que se aplica. Se observó un importante avance en el conocimiento sobre técnicas de modelado en centrífuga, así como de nuevos o más modernos instrumentos para los modelos.

El avance en el campo de la informática con equipos de computo más poderosos logró enormes beneficios en todos los equipos tanto de la centrífuga, como de todos los equipos que la acompañan.

En 1981 el presidente de la ISSMFE dio un paso muy positivo al organizar un comité técnico internacional para promover la actividad en este campo. Este comité funcionó bajo el auspicio de la Sociedad Geotécnica Británica para el periodo comprendido hasta 1985 para después ser manejado por Francia hasta 1989 y estados Unidos hasta 1994. Debido al gran número de aportaciones y publicaciones que se hacen con esta herramienta, se realiza un congreso sobre la Centrífuga cada determinado número de años, los últimos y más importantes congresos referentes al modelado en centrífuga han tenido lugar en: Francia (1988), Estados Unidos (1991), Singapur (1994) y Japón (1998), y el próximo congreso tendrá lugar en Canadá, en el año 2002. Actualmente existen mas de un centenar de centrífugas (Figura 1.1), de diferentes tamaños y características, instaladas en todo el mundo, siendo Japón el país con el mayor número, los Estados Unidos en segundo lugar; y en América Latina, únicamente Brasil cuenta con una herramienta de este tipo.



*Figura 1.1- Centrífuga de Brazo.*

## 1.2. Utilidad de contar con una centrífuga.

En situaciones en las que los efectos de la gravedad son importantes, un modelo a escala no representará correctamente el comportamiento de la realidad, por lo que llevar el modelo a un incremento en el campo de fuerza artificial hará que se presente en éste un nivel de esfuerzo similar al existente en la realidad. En los diferentes campos de la Ingeniería Civil, como el de la Geotecnia, los efectos de la gravedad son significativos y sumamente importantes de considerar en un suelo determinado, esto debido al esfuerzo causado por el peso propio de los materiales del suelo presentes, los cuales son la carga dominante que genera las fuerzas confinantes y son fundamentales para el comportamiento de dicho suelo.

El principio básico detrás del modelado con una centrífuga es el de crear un campo de esfuerzos en el modelo que simula las condiciones del prototipo, esto con el fin de permitir hacer observaciones difícilmente o imposibles de realizar en la realidad.

Diversas filosofías han sido seguidas por los investigadores que trabajan con estos equipos respecto a la forma de trabajar con una centrífuga. El Estado del Arte actual en este ramo indica que la centrífuga se ha establecido firmemente como una forma viable de llevar a cabo modelado a pequeña escala, de diversos tipos de eventos, suelos y estructuras. De igual manera, se han desarrollado métodos de trabajo y de investigación muy precisos sobre el trabajo con eventos estáticos. Para el caso de situaciones de tipo dinámico se han dado múltiples avances en este campo, siendo de los principales aspectos que se desarrollan en la actualidad, un ejemplo de esto son los modelos montados en plataformas capaces de simular sismos.

La centrífuga es una herramienta que permite de manera conveniente proporcionar un campo de aceleración alto, el cual proporciona a un modelo la condición de gravedad necesaria para tener similitud de esfuerzos entre el modelo y el prototipo.

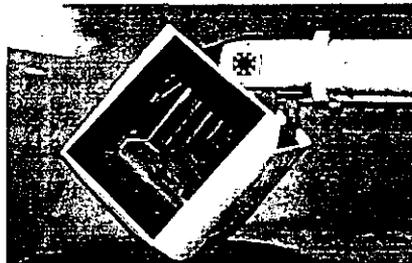
La aceleración centrífuga se usa para simular la gravedad y permite la correspondencia de los campos de esfuerzo entre el modelo a pequeña escala y el prototipo, permitiendo un modelado suficientemente preciso de los fenómenos que ocurren en la realidad. Este modelado permite mejorar el entendimiento de problemas así como también, la calibración y verificación de modelos teóricos y numéricos que son poco entendidos. El uso del modelado en centrífuga en los países en los que se encuentran instaladas tiene un impacto considerable en la práctica de la ingeniería y las ciencias físicas.

Jean-François Corté, Corté (1988), del Laboratorio Central de Puentes y Caminos, en Bouguenais Francia, editor de las memorias de la conferencia internacional sobre modelado en centrífuga geotécnica, Centrifuge 88, realizada en abril de ese año, en el prefacio sintetizó el rápido desarrollo del modelado en centrífuga de la siguiente manera:

*"La idea de realizar experimentos en modelos a escala con la centrífuga, fue presentada por primera vez en 1869 por E. Phillips, en Francia, en la 'Académie des Sciences' (Phillips 1869). Usando las ecuaciones diferenciales de equilibrio para sólidos elásticos, él encontró la relación de similitud que tenía que ser satisfecha por el prototipo y el modelo a escala para que se obtuviera el mismo comportamiento. Cuando la gravedad es un factor mayor en el equilibrio de los sólidos, Phillips sugirió el uso de las fuerzas de inercia y muy particularmente la fuerza centrífuga para obtener esta similitud. Él dio algunos principios generales para el diseño de centrífugas. Phillips propuso en conclusión aplicar estas ideas en el estudio de puentes de acero muy largos, como el que fue planeado para cruzar el canal de la mancha."*

### 1.3. Funcionamiento de una centrífuga.

El brazo de una centrífuga (Figuras 1.2 y 1.3) gira sobre un eje vertical, en el cual están contenidos el motor y mecanismos que permiten la rotación, el brazo gira a muy alta velocidad y con ello se produce una fuerza de inercia llamada fuerza centrífuga, la cual ejerce una aceleración que depende tanto del radio del brazo de la centrífuga con respecto al eje, como de la velocidad angular a la cual se encuentra sometido dicho brazo.



**Figura 1.2- Canasta de una Centrífuga de Brazo.**

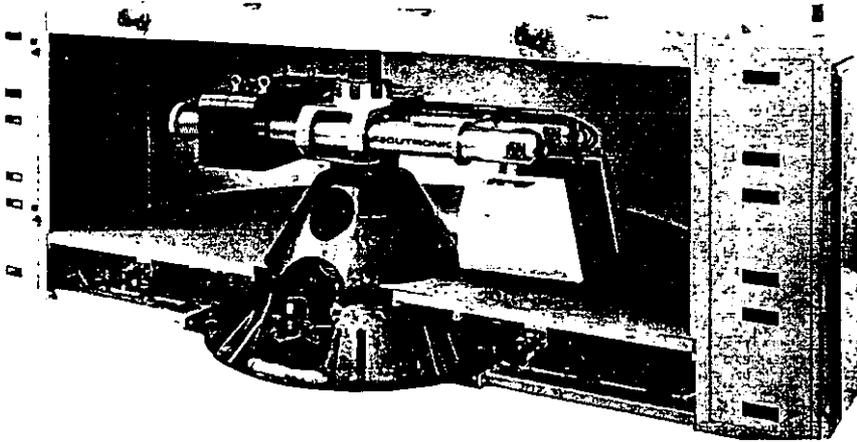


Figura 1.3- Centrífuga dentro de cuarto aerodinámico.

La aceleración centrífuga esta dada por:

$$a = r \omega^2 \quad (1.1)$$

En donde:

$r$ , radio del brazo de la centrífuga.

$\omega$ , velocidad angular de la centrífuga.

Para el caso del modelo; la aceleración que sufre es equivalente a aumentar la aceleración gravitacional el número de veces que fue reducida la escala entre el modelo y el prototipo:

$$a = Ng \quad (1.2)$$

En donde:

$N$ , relación de escala entre el modelo y el prototipo.

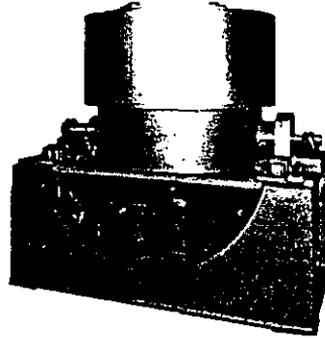
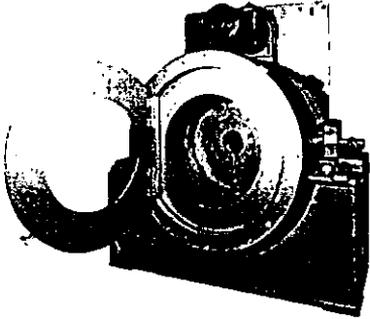
$g$ , aceleración gravitacional

## 1.4. Tipos de centrífuga y sus características.

### 1.4.1. Centrífuga de Tambor.

Existen dos tipos de centrífugas empleadas en el campo de la Ingeniería Civil. La primera de ellas es conocida como la centrífuga de tambor (Figuras 1.4 y 1.5) la cual

está compuesta básicamente por un tambor rotatorio, el cual opera similarmente a una secadora de ropa, solo que a mucho mayor velocidad y nivel de fuerzas  $g$ .



*Figura 1.4- Centrifuga de Tambor. Figura 1.5- Centrifuga de Tambor en posición de funcionamiento.*

Este tipo de centrifuga no ofrece muchas ventajas para el uso de modelos muy complejos, esto debido a las dimensiones de la misma, ya que es pequeña y no facilita la introducción de modelos grandes. Aunque esto no le resta importancia ya que se han hecho múltiples investigaciones con ella obteniéndose importantes resultados.

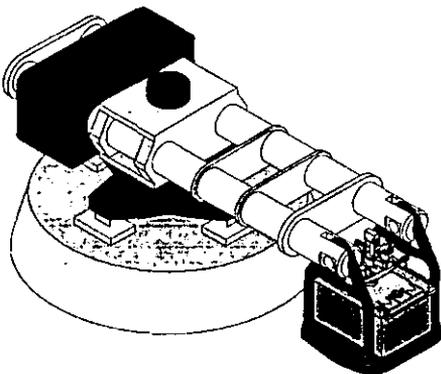
#### **1.4.2. Centrifuga de brazo balanceado.**

La centrifuga de brazo balanceado (Figura 1.6) o simplemente centrifuga de brazo, es la más empleada, ya que ofrece flexibilidad en cuanto a su operación, es decir, permite un mayor número de aplicaciones con diferentes tipos, tamaños y características de modelos; siendo altamente conveniente de utilizar para experimentos largos y complejos.

Los elementos básicos de una centrifuga de brazo son los siguientes: un brazo que gira sobre un eje vertical, una plataforma o "canasta" en el extremo del brazo en la cual se coloca el modelo, un contrapeso para equilibrar el peso de la plataforma con el modelo, conexiones basadas en juntas rotatorias para el paso de diversos fluidos y para la transmisión de diferentes tipos de señales eléctricas. Todo ello controlado desde un centro de mando donde se encuentran los controles de la centrifuga.

La "canasta" o plataforma de la centrifuga tiene un ángulo de rotación de  $90^\circ$

perpendicularmente al brazo, posición de descanso a  $0^\circ$  y posición de vuelo a  $90^\circ$ . Durante la realización de una prueba, los eventos en el interior del modelo son monitoreados remotamente, se cuenta con sensores y cámaras que están instalados dentro y fuera del modelo. Los modelos son construidos por separado, con el fin de poder mantener en operación el equipo y poder realizar distintos experimentos mientras son preparados otros modelos.



**Figura 1.6- Centrífuga del LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes Francia), radio del brazo: 5m,**

La plataforma permite tener movimientos laterales en el modelo, esto es posible gracias a un simulador de sismos sobre el cual se coloca el modelo, que es un mecanismo electro-hidráulico que permite obtener un evento de tipo dinámico durante el vuelo de la centrífuga.

#### **1.4.3. Características principales de una centrífuga de brazo balanceado.**

Las centrífugas de brazo están generalmente formadas por los siguientes elementos (Figura 1.7): 1) una plataforma; 2) un motor o varios motores para hacer girar el brazo; 3) un contrapeso para nivelar el brazo automáticamente; 4) juntas rotatorias hidráulicas para el suministro de líquidos necesarios durante la prueba; 5) anillos deslizantes eléctricos los cuales son para señales analógicas, energía eléctrica y señales de video; 6) Modelo.

El radio de la centrífuga corresponde a la distancia entre la base de la plataforma conteniendo el modelo y el eje de la centrífuga.

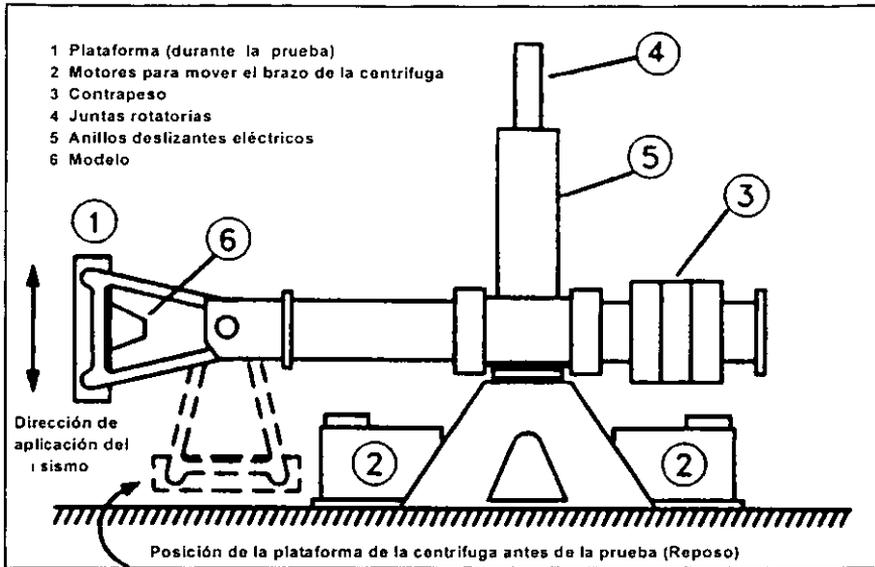


Figura 1.7- Partes de una centrífuga, en este caso la instalada en el Instituto Politécnico de Rensselaer, en Troy, Estados Unidos.

#### 1.4.4. Capacidad de una centrífuga.

La capacidad de una centrífuga se expresa en **g-ton**, que es el producto de la carga en la plataforma (en toneladas), multiplicada por el número **N** de fuerzas **g** obtenidas con la centrífuga. La capacidad está limitada por la carga máxima que soporta la centrífuga y por el número máximo de fuerzas **g** que permite obtener la centrífuga.

Si por ejemplo se tuviera una centrífuga con capacidad máxima de **100g-ton**, con capacidad de soportar modelos de hasta una tonelada y que permitiera una aceleración angular de **200g**; se tendrían los dos casos siguientes:

Caso 1. La máxima aceleración estaría limitada a **100g**, al tener:

$1 \text{ ton} \times 100 \text{ g} = 100 \text{ g-ton}$ , que es la capacidad máxima permisible.

Caso 2. En el caso de trabajar con una aceleración máxima de **200g**, se deberá tomar una carga máxima de **0.5 ton** ya que:  $0.5 \text{ ton} \times 200 \text{ g} = 100 \text{ g-ton}$ .

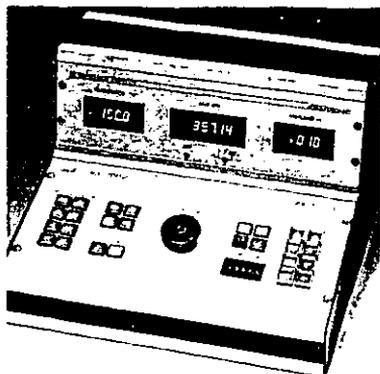
Por lo general, los experimentos se conducen por debajo de los límites de las capacidades máximas de operación de la centrifuga.

Se cuenta en la actualidad con diferentes tipos de centrifuga repartidas en todo el mundo, que van desde bajas capacidades, hasta algunos modelos construidos recientemente los cuales cuentan con capacidades de más de 1000 g-ton.

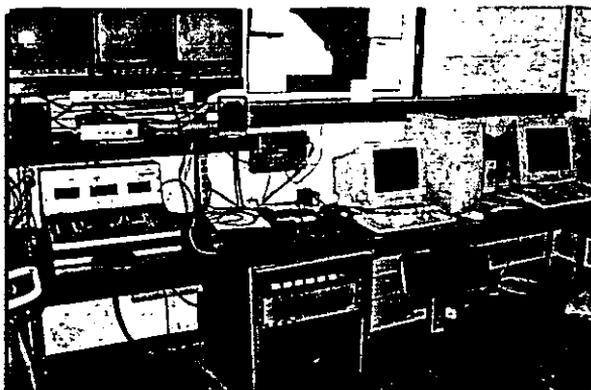
#### **1.4.5. Sitio de instalación de una centrifuga.**

En la mayoría de los casos las centrifugas son instaladas en niveles subterráneos, en una cámara o cuarto especialmente construido de concreto reforzado. Generalmente la cámara está localizada cerca de otros laboratorios en los cuales se fabrican y preparan los modelos que serán cargados en la centrifuga. El muro de forma circular que rodea la centrifuga tiene que ser de un espesor importante y de gran resistencia a impactos. Alrededor de las paredes de concreto al interior del cuarto en donde se encuentra el equipo, se añade una capa o recubrimiento de algún material como poliestireno, el cual tiene una gran capacidad de absorción de energía en caso de un impacto, así como de brindar una protección térmica y acústica. Todo ello se hace con el fin de proteger las instalaciones y al personal que labora con este equipo, para prevenir accidentes, ya que la centrifuga al girar a tan alta velocidad, portando grandes y pesados modelos podría llegar a ser altamente peligrosa en caso de una separación o desprendimiento de alguna parte o pieza del equipo. La cimentación sobre la cual está colocada la centrifuga debe de tener un diseño capaz de resistir los enormes esfuerzos que genera la centrifuga al girar. De igual manera las puertas del cuarto son reforzadas extensamente.

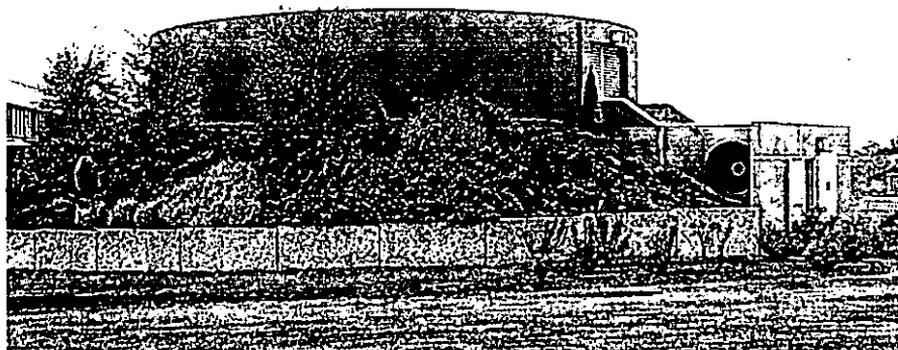
Se debe de contar con un cuarto de control, anexo en donde se estará monitoreando y verificando el correcto funcionamiento de la centrifuga, así como recabando toda la información y los datos que se van obteniendo a lo largo del vuelo y todo lo que sucede dentro del modelo. En este tipo de cuartos se cuenta con equipos avanzados de computo, monitores y sistemas de vídeo para registrar todos los detalles (Figuras 1.8, 1.9 y 1.10).



**Figura 1.8- Controles básicos de una centrífuga.**



**Figura 1.9- Cuarto de control de la centrífuga instalada en el Instituto Politécnico de Rensselaer, en Troy, Estados Unidos.**



**Figura 1.10- Edificio en el cual se encuentra instalada la centrífuga del LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes, Francia)**

## 1.5. Centrífugas existentes en el mundo.

Actualmente hay más de un centenar de centrífugas instaladas (Tabla 1.1), de los dos tipos, en todo el mundo. Se encuentran principalmente funcionando en los países desarrollados, los cuales cuentan además con los mejores equipos de este tipo, ya sea en referencia al número de equipos, la capacidad, el tamaño y el desarrollo tecnológico de los mismos.

Tabla 1.1- Centrífugas instaladas en el mundo hasta 1998.

PAÍS	NUMERO DE EQUIPOS INSTALADOS	PAÍS	NUMERO DE EQUIPOS INSTALADOS
AUSTRIA	1	COREA	1
BRASIL	1	HOLANDA	2
CANADÁ	4	CHINA	11
DINAMARCA	1	PORTUGAL	1
FRANCIA	2	RUSIA	12
ALEMANIA	2	SINGAPUR	1
INDIA	1	TAIWÁN	1
ISRAEL	2	REINO UNIDO	6
ITALIA	1	E.U.	20
JAPON	37		

Japón es el país que posee el mayor número de centrífugas en todo el mundo contando con 37 equipos tanto de brazo como de tambor. La primera centrífuga geotécnica que se instaló en Japón fue en Mikasa en 1965, durante los veinte años siguientes no hubo un verdadero interés en la centrífuga, sin embargo en la mitad de los años ochenta, varios sectores entre universidades, centros de investigaciones y compañías privadas, comenzaron a construir y trabajar con centrífugas. Una de los puntos más destacados en este país es que la mayoría de los equipos pertenecen a compañías privadas.

Estados Unidos se posiciona en segundo lugar en cuanto número de equipos, los cuales están instalados en universidades y centros de investigación incluyendo los de la armada. Los Estados Unidos poseen los equipos de mayor capacidad con equipos que superan las 1000 g-ton.

En América Latina, Brasil es el único país que dispone de una centrífuga.

**CAPÍTULO 2****PRINCIPIOS DEL MODELADO EN LA CENTRÍFUGA.****2.1. El modelado en una centrifuga.**

La centrifuga ha sido empleada por científicos e ingenieros desde comienzos del siglo XX. Entre las aplicaciones más comunes de la centrifuga están la filtración y la separación de elementos, como lo pueden ser sólidos de líquidos en una mezcla.

El modelado en centrifuga es empleado para la modelación de eventos que se presentan en los diferentes campos de la Ingeniería Civil.

El desarrollo del modelado en la centrifuga en ingeniería ha tenido lugar y ha evolucionado a lo largo del siglo XX, contando con aplicaciones en un cada vez mayor número de actividades, las técnicas y los modelos se han mejorado, todo ello hasta lograr hacer del modelado un método confiable y viable para resolver problemas. El modelado en centrifuga ha tenido un desarrollo mayor en el área geotécnica, pero cada vez más se ha ido incorporando a otros campos como: la hidráulica, las estructuras, la ingeniería ambiental, entre otras más.

Las dificultades matemáticas que se presentan en algunos fenómenos hacen que un problema no pueda ser formulado debido a su complejidad, por lo que el modelado físico debe ser considerado como una alternativa para obtener una solución a dichos problemas. Un ejemplo podría ser el de un sistema tridimensional de materiales con comportamiento no lineal, con condiciones de frontera complejas de determinar, y que además el fenómeno fuera dependiente del tiempo.

El estado de esfuerzos en un modelo a pequeña escala, bajo cargas debidas a su peso propio, será muy diferente al existente en un prototipo a escala completa. Si los materiales del modelo tienen un comportamiento dependiente de los esfuerzos y muestran respuesta a la variación en el tiempo, la existencia de diferencias cualitativas y cuantitativas se deben esperar entre un modelo y su correspondiente en la realidad. Por lo que de esta manera, se debe buscar la forma de tener una situación en la que las condiciones sean similares. Una manera de resolver esto es someter el modelo a pequeña escala a un campo gravitatorio artificial, en el cual la aceleración se incrementará o llevará, hasta un punto en el cual los esfuerzos causados por el peso propio en el modelo sean los mismos al correspondiente nivel de esfuerzos existentes en el prototipo, y que el fenómeno de la

dependencia con el tiempo sea controlado. Con esto muchos de los problemas y limitaciones asociadas con las pruebas en el modelo a pequeña escala son eliminados, la similitud existirá entre el modelo y el prototipo en términos de la geometría, propiedades del material, esfuerzos aplicados y tiempo.

## 2.2. Teoría

### 2.2.1. Incremento en la aceleración.

El principio de ensayos geotécnicos en una centrífuga es el de mantener los esfuerzos en el modelo con el mismo valor en puntos homólogos en el prototipo. Para hacer esto se requiere, en general, usar el mismo suelo con la misma densidad de masa en el modelo como en el prototipo. Con una aceleración centrífuga de  $Ng$ , donde  $N$  es el factor de escala seleccionado y  $g$  es la aceleración de la gravedad, esto significa que el peso unitario del suelo en la centrífuga es  $N$  veces el peso unitario a  $1g$ . Por consiguiente, en un modelo con dimensiones lineales de  $1/N$  de aquellas en el prototipo, y con la misma geometría, los esfuerzos generados en la prueba de centrífuga serán los mismos a aquellos en la situación de escala completa (prototipo). En adición a esto, para el modelado dinámico, ambas, la frecuencia y la aceleración, necesitan ser incrementadas  $N$  veces.

Arulanandan et al., (1988) mencionaron que para el mismo suelo usado en el prototipo y en un modelo el cual es  $N$  veces más pequeño, los esfuerzos serán idénticos en el modelo y en el prototipo si la gravedad es incrementada  $N$  veces. Ellos sugirieron la siguiente derivación de las relaciones de escala para justificar esto:

Para tomar en cuenta la dependencia de las propiedades de los materiales al estado de esfuerzos, éstos deben ser similares en el modelo y en el prototipo.

Por lo cual, la condición de esfuerzos idénticos es impuesta sobre el modelo

$$\frac{\sigma_{\text{modelo}}}{\sigma_{\text{prototipo}}} = \sigma^* = 1 \quad (2.1)$$

(el asterisco sobre la cantidad indica el factor de escala para esa cantidad)

Como los esfuerzos tienen unidades de fuerza/área, el factor de escala de longitud y fuerza deben de satisfacer la ecuación

$$\sigma^* = \frac{F^*}{(l^*)^2} = 1 \quad (2.2)$$

El factor de escala de longitud esta definido como

$$l^* = \frac{l_{\text{modelo}}}{l_{\text{prototipo}}} = \frac{1}{N} \quad (2.3)$$

de las ecuaciones (2.2) y (2.3) se obtiene que:

$$F^* = (l^*)^2 = N^{-2} \quad (2.4)$$

Como el modelo y el prototipo están compuestos de materiales idénticos, el factor de escala para densidad es:

$$\rho^* = 1 \quad (2.5)$$

El factor de escala de masa es calculado como

$$\rho^* = \frac{m^*}{(l^*)^3} \quad (2.6)$$

Despejando  $m^*$  de la ecuación (2.6) e introduciendo las ecuaciones (2.3) y (2.5)

$$m^* = (l^*)^3 (1) = N^{-3} \quad (2.7)$$

y el factor de escala para gravedad sigue la ley de Newton para un cuerpo en reposo en un campo gravitacional

$$F^* = m^* g^* \quad (2.8)$$

o

$$g^* = \frac{F^*}{m^*} = \frac{N^{-2}}{N^{-3}} = N \quad (2.9)$$

Por lo cual, si se usan materiales idénticos en el modelo y en el prototipo, y las dimensiones de longitud son reducidas  $N$  veces, la gravedad debe de incrementarse  $N$  veces para preservar esfuerzos idénticos en el modelo y prototipo. Por tanto, la fuerte dependencia de las propiedades del suelo en los esfuerzos es tomada en cuenta en los modelos de centrífuga.

### 2.2.2. Relaciones de escala.

Al trabajar con un modelo se presentan diferentes relaciones que están en función de la escala que se haya elegido para el experimento. Cuando se está usando un modelo a escala reducida para estudiar el comportamiento de un prototipo, se debe de mantener la similitud entre ambos, por lo que se requiere el establecimiento de los factores correctos de escala. El análisis dimensional se construye con los parámetros más relevantes que caracterizan al prototipo. La selección de los parámetros principales requiere de experiencia, de un buen conocimiento de los aspectos físicos del problema y de una evidencia experimental.

La similitud entre un modelo y un prototipo en una centrífuga existe en términos de la geometría, propiedades del material, esfuerzos aplicados, y el tiempo.

En la Tabla 2.1 se muestran las principales relaciones de escala utilizadas para el modelado en centrífuga.

Un conjunto completo de relaciones de escala gobernando diferentes problemas geotécnicos pueden ser desarrollados por medio de análisis dimensional, o si la física del problema es completamente conocida, analizando las ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento. Por otro lado, el método de ecuaciones diferenciales está restringido en su propia generalidad, ya que las ecuaciones diferenciales que gobiernan muchos fenómenos son desconocidas. Por tanto, el método de ecuaciones diferenciales debe ser generalmente evitado, debido a que uno de los propósitos fundamentales del modelado en la centrífuga es el de vencer las limitaciones debido a aquellas suposiciones sobre-simplificadas en las cuales muchas de las teorías en geotecnia están basadas. Por otro lado, la clave para la correcta aplicación del análisis dimensional es el de seleccionar las cantidades físicas que tienen una influencia primaria sobre el problema. Sin embargo, esto no es siempre una tarea fácil, requiere un alto grado de intuición.

Una lista de relaciones de escala pertinentes a modelado en la centrífuga es proporcionado en la Tabla 2.1 (Whitman y Arulanandan, 1985). Si un modelo es

construido usando los mismos materiales encontrados en el prototipo, entonces estas relaciones pueden ser usadas para interpretar las mediciones del modelo como representativas de las cantidades en el prototipo.

**Tabla 2.1. Relaciones de escala (Whitman y Arulanandan, 1985)**

<b>Cantidad</b>	<b>Escala del prototipo</b>	<b>Modelo en la centrifuga a N veces g, respecto a la escala prototipo.</b>
<b>Dimensión linear</b>	1	1/N
<b>Esfuerzo (Fuerza/Area)</b>	1	1
<b>Deformación</b> (desplazamiento/longitud)	1	1
<b>Densidad</b>	1	1
<b>Masa</b>	1	1/N <sup>3</sup>
<b>Fuerza</b>	1	1/N <sup>2</sup>
<b>Desplazamiento</b>	1	1/N
<b>Velocidad (Distancia/Tiempo)</b>	1	1
<b>Aceleración (Distancia/Tiempo<sup>2</sup>)</b>	1	N
<b>Tiempo:</b>		
en problemas dinámicos	1	1/N
en casos de difusión	1	1/N <sup>2</sup>
<b>Frecuencia en problemas dinámicos</b>	1	N

(N es el factor de escala entre el modelo y prototipo)

### 2.2.3. Similitud de esfuerzos.

A continuación se presenta una manera alterna de analizar la necesidad de aumentar la aceleración gravitacional con la misma relación de escala entre el modelo y el prototipo. El principio básico de la modelación con una centrifuga consiste en que los correspondientes esfuerzos para el modelo respecto a los del prototipo sean iguales, esto se logra aumentando el peso propio de los materiales del modelo gracias a un campo artificial de aceleración.

Cuando se está empleando un modelo a pequeña escala para estudiar algún fenómeno, la similitud de los parámetros físicos debe ser mantenida respecto al prototipo, y se requieren establecer los correctos factores y leyes de escala.

En las figuras 2.1, 2.2 y 2.3 se muestran las distribuciones de esfuerzos de tres contenedores de suelo a diferentes escalas y condiciones de gravedad.

Los esfuerzos verticales son representados por  $\sigma_v$ ,  $\rho$  es la densidad del suelo,  $g$  es la aceleración gravitacional,  $H$  es la profundidad,  $N$  es la relación de escala entre el modelo y el prototipo, el subíndice  $p$  es empleado para el prototipo y el subíndice  $m$  para el modelo.

En la Figura 2.1 se tiene el prototipo a escala real sometido a una aceleración de  $1g$ , los esfuerzos en el prototipo a la profundidad  $H$ , son de la siguiente manera:  $(\sigma_v)_p = \rho g H$ . Por lo tanto, los esfuerzos varían desde cero en la superficie hasta  $\rho g H$ .

La Figura 2.2 muestra el modelo hecho a la escala  $1/N$  sometido  $1g$ , respecto al prototipo de la figura 2.1. Los esfuerzos en este modelo se distribuyen como (comparados con las dimensiones del prototipo):  $(\sigma_v)_m = \rho g (H/N)$ , por lo que los esfuerzos se encuentran reducidos  $N$  veces, respecto a los calculados en el prototipo.

La Figura 2.3 presenta un modelo construido a  $1/N$  en este caso sujeto a una aceleración  $N$  veces la aceleración gravitacional, generado con la ayuda de la fuerza centrífuga. Con ello se aprecia que los esfuerzos entre el modelo y el prototipo son idénticos en puntos similares y si además se utiliza el mismo material en el modelo que el del prototipo, el comportamiento esfuerzo-deformación será el mismo en ambos.

Para la verificación del correcto funcionamiento del modelado, se pueden utilizar diferentes modelos a diferentes escalas de un mismo evento, y ensayarlos a los correspondientes niveles de aceleración de tal manera que correspondan al mismo prototipo, luego se extrapolan los resultados a la escala del prototipo y se comparan. Si se obtiene la misma respuesta y los resultados son consistentes para cada uno de los modelos a diferentes escalas, entonces el fenómeno físico fue correctamente modelado. A este procedimiento se le conoce como el **modelado de modelos**.

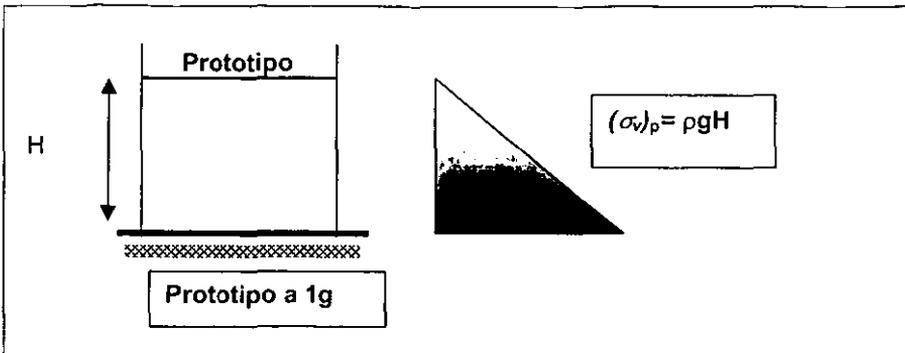


Figura 2.1- Distribución de Esfuerzos en el prototipo.

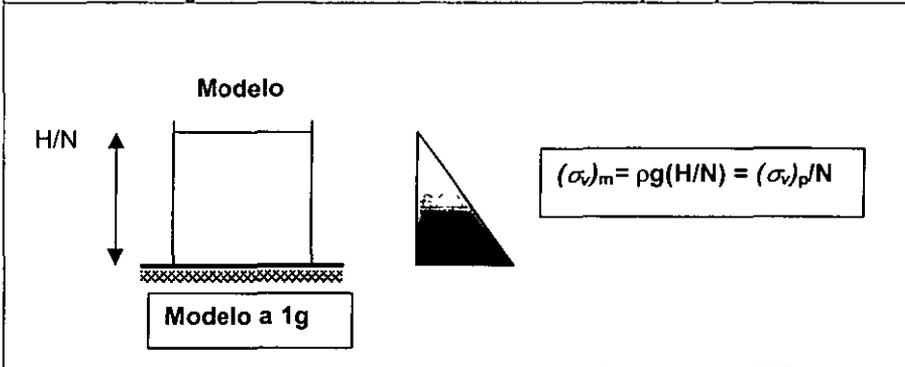


Figura 2.2 - Distribución de Esfuerzos, Modelo  $N$  veces más pequeño que el prototipo, sometido a 1g.

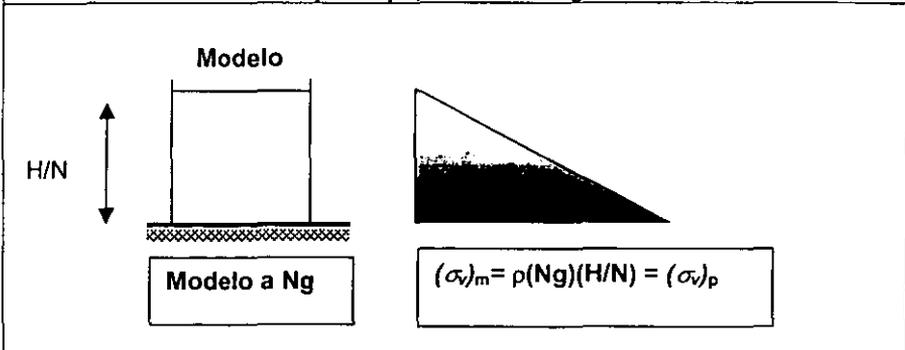


Figura 2.3 - Distribución de Esfuerzos, modelo  $N$  veces más pequeño que el prototipo sometido a un campo artificial aumentando la aceleración gravitacional  $N$  veces ( $Ng$ ).

### 2.3. El modelado y sus efectos de escala.

En el caso de estudios que implican modelado físico es difícil lograr una replica exacta de todos los detalles y fenómenos que ocurren en el prototipo, por lo que se tienen que realizar algunas aproximaciones. Es importante reconocer que los modelos no son perfectos, se deben reconocer y evaluar algunas limitaciones conocidas como efectos de escala. La completa realización de la similitud es generalmente imposible excepto al trabajar con una relación de escala  $N=1$ .

Cuando los problemas en Ingeniería se vuelven más complejos, aumenta la dificultad de satisfacer la similitud debido al gran número de cantidades dimensionales que están involucradas en la descripción del problema. Una manera de conocer la influencia de estos efectos de escala es realizar el modelado de modelos comentado en el inciso anterior.

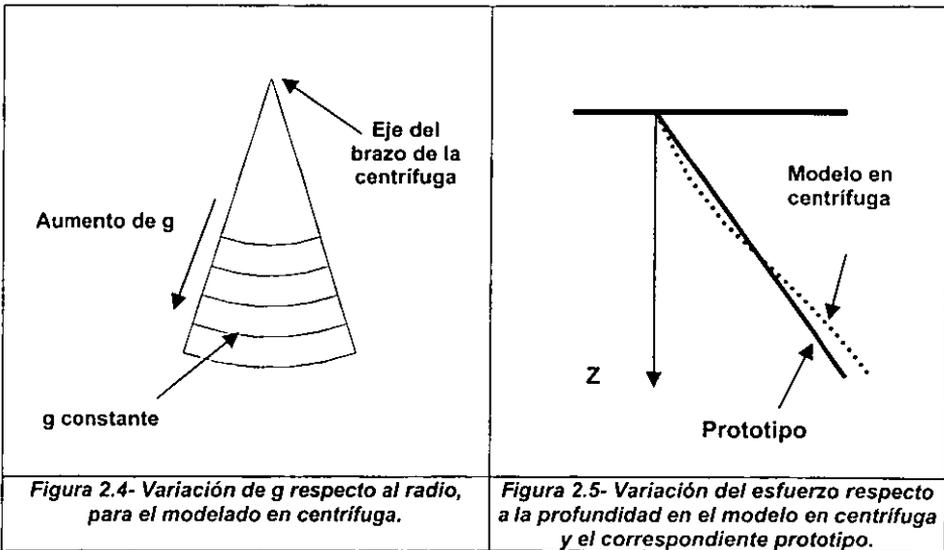
#### 2.3.1. Aceleración rotacional y campo de esfuerzos.

Uno de los problemas existentes es que la longitud de arco entre dos planos radiales aumenta con el incremento en el radio, como se muestra en la Figura 2.4, esto tiene como resultado la expansión lateral del suelo cuando se trabaja con un modelo en una centrífuga. Para conservar la deformación lateral en cero, las longitudes de arco deberían mantenerse constantes, por lo que se deben evaluar dichas expansiones laterales. Es preferible localizar los eventos más importantes en la región central del modelo en donde el error de este tipo es más pequeño.

La gravedad de la tierra es prácticamente uniforme para las profundidades de los suelos con los que se trabaja en ingeniería civil. Pero en el caso de la centrífuga existe una variación en la aceleración que se obtiene en el modelo. Esto es debido a que la aceleración en la centrífuga está dada por la relación  $\omega r^2$  (en donde  $\omega$  es la velocidad angular rotacional de la centrífuga,  $r$  es radio desde el eje central de la centrífuga hasta cualquier elemento en el modelo). Esta variación es inevitable y es una de las principales dificultades en el modelado en centrífuga. De esta manera, para reducir el efecto de la variación en la aceleración, algunas consideraciones deben ser tomadas para determinar el radio efectivo,  $R_e$  el cual es, el radio usado para calcular  $\omega$  y de esta manera obtener la aceleración deseada.

Schofield (1988) y Taylor (1995) recomiendan que el radio efectivo,  $R_e$ , debe ser medido desde el eje central de la centrífuga hasta un tercio de la profundidad del modelo. Este método minimiza los errores de los esfuerzos entre el modelo y el prototipo, los cuales son, en muchos casos, considerablemente pequeños. La variación de esfuerzos verticales en el modelo es no lineal, por tanto esto es diferente al prototipo, como se muestra en la figura 2.5. Para hacer un error menor al 3% en el perfil de esfuerzos, la relación entre la profundidad del modelo y el radio efectivo,  $H_{\text{modelo}}/R_e$  debe ser menor a 0.2.

Cuando se tienen centrífugas con brazos pequeños, en las cuales se presenta una variación de la aceleración en el sentido lateral, se coloca una cuña curva en la base del modelo, que tiene la misma curvatura de arco que genera el radio desde eje de la centrífuga hasta la base del modelo, a partir de ésta, las siguientes capas de material continuarán teniendo la misma curvatura, eliminando así los efectos de la variación de la aceleración.



### 2.3.2. Efecto del tamaño de la partícula.

Una de los principales cuestionamientos que se hacen respecto al uso de una centrífuga es el de como justificar el modelado en centrífuga cuando las partículas de suelo no son reducidas de tamaño con el factor de escala  $N$ . Pensando de esta manera una arena fina usada en un modelo a una escala 1:100 representaría una grava y de la misma manera

una arcilla podría creerse que se debe usar en el caso de una arena fina. Esto es erróneo ya que una arcilla tiene características esfuerzo-deformación totalmente diferentes de las que tiene una arena. Por lo que se recomienda el uso de los mismos materiales. Aunque algunos autores como Tasuoka et al. (1991) consideran la necesidad de aplicar una relación de escala a la partícula empleada en el modelo para ciertos experimentos. En la propagación de la ruptura por cortante, estudiada por Scarpelli y Wood (1982), esta se ve afectada por el tamaño de las partículas, un suelo dado puede ser menos vulnerable al ablandamiento post-pico en las bandas de ruptura en un modelo pequeño con desplazamientos reducidos.

Ovesen (1979, 1985) investigó el comportamiento de las cimentaciones circulares en arena llevando experimentos de modelado de modelos, concluyó que la relación entre el diámetro de una cimentación circular y el diámetro del grano arena debe ser menor de 15. Es necesario considerar la posibilidad de reducir el tamaño de las partículas conforme al factor de escala entre el modelo y el prototipo.

#### 2.4.3. Utilización de un fluido viscoso para saturación del modelo.

En el estudio de problemas en la centrífuga los cuales envuelven el movimiento relativo de partículas y fluido, tales como en licuación, las relaciones de escala para el tiempo poseen un problema, de acuerdo al conocimiento actual, la disipación de la presión de poro ocurre  $N$  veces más rápida que el proceso dinámico. En muchos problemas dinámicos esto no es crítico, ya que condiciones no drenadas prevalecen en el modelo y prototipo (Whitman y Arulanandan, 1985). Sin embargo, esto presenta una dificultad con algunos suelos si la presión de poro es simultáneamente generada dinámicamente y disipada por difusión (Tan y Scott, 1985).

Una forma de estudiar este problema puede establecerse considerando la definición del factor de tiempo adimensional  $T$  para la consolidación (Whitman et al., 1982), el cual nos representa el grado de consolidación.

$$T = \frac{C_v t}{H^2} \quad (2.10)$$

Donde:

$C_v$                       coeficiente de consolidación

t	tiempo
H	longitud de drenaje
T	factor de tiempo adimensional

Para escalas dinámicas,  $t_p = t_m N$ , y  $H_p = H_m N$ , donde los subíndices p y m denotan prototipo y modelo, respectivamente. Si T es el mismo a instantes comparables de tiempo, entonces:

$$\frac{C_{vm} t_m}{H_m^2} = \frac{C_{vp} (t_m N)}{(H_m N)^2} \quad (2.11)$$

$$C_{vm} = \frac{C_{vp}}{N} \quad (2.12)$$

Por lo tanto el coeficiente de consolidación en el modelo  $C_{vm}$  debe ser  $C_{vp}/N$ .

La consolidación se relaciona con la disipación del exceso de presión de poro y es un evento de difusión. Utilizando un análisis dimensional,

Esto es  $C_v$  debe ser reducido en el modelo. Ahora :

$$C_v = \frac{k}{\gamma_f m_v} \quad (2.13)$$

Donde:

k	permeabilidad
$\gamma_f$	peso unitario del fluido de presión de poro a gravedad normal
$m_v$	coeficiente de variación volumétrica (compresibilidad del esqueleto mineral)
$C_v$	coeficiente de consolidación.

Si el comportamiento esfuerzo-deformación es el mismo en el modelo y prototipo, entonces  $m_v$  no debe cambiar. Por lo tanto, es necesario cambiar  $k/\gamma_f$ . Existen dos rutas que son comúnmente adoptadas para obtener un tiempo de escala único para el proceso dinámico y la disipación de presión de poro: ya sea incrementando la viscosidad del fluido en los poros, o reduciendo el tamaño de las partículas del suelo para reducir su permeabilidad (Steedman y Ledbetter, 1994).

Para incrementar la viscosidad del fluido entre los poros por N se utiliza un aceite de silicón o una mezcla de glicerina y agua, actualmente existen otros sustitutos para el fluido como el Metolose. Si se utilizan diferentes fluidos en el modelo y en el prototipo, entonces la diferencia en densidades debe tomarse en cuenta. Aunque un incremento en viscosidad de cincuenta o ochenta veces la del agua puede sonar un poco alta, en la práctica, este fluido aparece más como agua que como aceite. Los modelos son generalmente construidos en seco y saturados con el fluido entre los poros bajo vacío. Pueden encontrarse dificultades si el modelo contiene regiones o capas impermeables, o una mezcla de arena y arcilla, y puede ser necesario saturar en etapas para evitar que el aire se quede atrapado. Las arcillas, ya sean de muestras provenientes de bloques o arcillas naturalmente recompactadas o remoldeadas pueden ser prácticamente saturadas solo con agua.

Otra forma de verlo es la siguiente, la permeabilidad se define como la capacidad de un suelo para permitir que la atraviese el agua y recibe el nombre de coeficiente de permeabilidad, se define como la velocidad de flujo producida por un gradiente hidráulico unitario.,

$$k = \frac{\rho_f g K}{\eta_f} = \frac{g K}{\nu_f} \quad (2.14)$$

k	coeficiente de permeabilidad
$\rho_f$	densidad del fluido
g	aceleración gravitacional
K	permeabilidad intrínseca del suelo, depende de la forma, el tamaño y el acomodo de los granos del suelo.
$\nu_f = \frac{\eta_f}{\rho_f}$	viscosidad cinemática del fluido, $\eta_f$ es la viscosidad dinámica del fluido.

Al modelar en centrífuga se tiene que la permeabilidad aumenta de la siguiente manera:

$$k_m = \frac{(Ng)K}{\nu} \quad (2.15)$$

mientras que en el prototipo

$$k_p = \frac{gK}{v} \quad (2.16)$$

Por lo tanto a N veces la aceleración de la gravedad se tiene:

$$K_m = Nk_p \quad (2.17)$$

Por lo que si se emplea el mismo fluido de poro en el modelo y en el prototipo entonces  $k_m = Nk_p$ . La manera de corregir esto es cambiando la viscosidad del fluido, es decir, aumentando N veces la viscosidad

$$k_m = \frac{(Ng)K}{(Nv_f)} = \frac{gK}{v_f} = k_p \quad (2.18)$$

De esta manera en se obtiene  $K_p = K_m$ , la misma permeabilidad en el modelo y el prototipo.

La segunda alternativa, es reducir el tamaño de los granos, ello es recomendable solo en casos en los cuales por dificultades en la saturación se requiere usar agua como fluido entre los poros. Los modelos saturados con agua son generalmente más sencillos y rápidos de construir y manejar. Para muchas arenas finas la permeabilidad puede ser considerada como una función del cuadrado del  $D_{10}$ , el diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 10% del suelo en peso de un análisis de granulometría.

La ecuación de Hazen (1892) permite determinar la permeabilidad:

$$k = C(D_{10})^2 \quad (2.19)$$

K	Permeabilidad, varía desde 1000 m/s en el caso de gravas de grano muy grueso, hasta un valor despreciable en el caso de las arcillas.
C	Constante que representa el coeficiente de uniformidad $D_{60}/D_{10}$ , Hazen recomendaba un valor de 100.
$D_{10}$	Tamaño correspondiente al 10% de la curva granulométrica.

(Los subíndices p y m, indican modelo y prototipo respectivamente).

En el caso del prototipo:

$$k_p = C(D_{10})_p^2 \quad (2.20)$$

para el modelo:

$$k_m = C(D_{10})_m^2 \quad (2.21)$$

Al incrementar la aceleración N veces por medio de una centrifuga y utilizando agua como fluido de saturación, la permeabilidad en el modelo es la existente en el prototipo por el factor de escala N de la manera siguiente:

$$k_m = k_p N \quad (2.22)$$

Sustituyendo las ecs. 2.15 y 2.16 en la ec. 2.17 obtenemos,

$$NC(D_{10})_p^2 = C(D_{10})_m^2 \quad (2.23)$$

Eliminando términos y despejando  $(D_{10})_p$ , se tiene que

$$(D_{10})_p^2 = \frac{(D_{10})_m^2}{N} \quad (2.24)$$

Por lo que modelado a un aceleración  $Ng$  se obtiene lo siguiente:

$$(D_{10})_p = \frac{(D_{10})_m}{\sqrt{N}} \quad (2.25)$$

Por lo que esto nos indica que en el modelo el tamaño de la partícula es como si se incrementa  $\sqrt{N}$  veces, la manera de resolver esto es reduciendo el tamaño de la partícula del prototipo  $\sqrt{N}$  en el modelo, es decir  $(D_{10})_p = \frac{(D_{10})_m}{\sqrt{N}}$ , esto sería la forma de obtener la similitud con el tamaño de la partícula.

Para reducir la permeabilidad  $N$  veces se requiere reducir el tamaño de las partículas por  $(N)^{0.5}$ , que en muchos casos es posible, particularmente a aceleraciones centrífugas bajas. Sin embargo, es importante reconocer que el alterar el tamaño de las partículas puede alterar las propiedades mecánicas del suelo. De esta manera la reducción del tamaño de la partícula no es atractiva para la modelación.

La alternativa de sustituir el fluido, por uno de mayor viscosidad es la empleada más frecuentemente por los investigadores. Sin embargo, la presencia de un sustituto de fluido viscoso a veces afecta el comportamiento constitutivo del suelo y por consiguiente, sus efectos deben ser completamente evaluados.

Se debe de recalcar que los conflictos en el escalado del tiempo no son un problema serio cuando los modelos de arcilla saturada o arena seca son sujetos a una excitación sísmica en una centrífuga, el problema se torna serio solo en casos en los que una significativa cantidad de exceso de disipación de presión de poro ocurre durante el momento de la aplicación de la excitación en la base del modelo, tal como en modelos de arena saturados con agua.

Las leyes de escala usadas para interpretar los resultados del modelo en términos del comportamiento del prototipo seguido no pueden ser verificadas con resultados reales del prototipo. El monitoreo de prototipos es siempre costoso y no siempre posible. Por lo cual, el concepto de modelado de modelos se ha desarrollado como una alternativa para

verificar los modelos en la centrifuga. En lugar de comparar los resultados con un prototipo real, uno puede realizar una serie de modelos del mismo prototipo a diferentes aceleraciones centrifugas, y comparar los resultados de las diferentes pruebas escalados a unidades de prototipo.

El sustituto ideal del fluido de poro debe tratar de satisfacer los criterios siguientes:

1. El comportamiento constitutivo global (tal como el comportamiento de esfuerzo-deformación, la generación de presión de poro, y la resistencia al cortante en general) de suelos inalterados. La interacción del suelo-fluido debe ser de la misma manera preservada. Algunos de los requerimientos necesarios son los siguientes:
  - El sustituto del fluido viscoso debe de tener una densidad muy cercana a la del agua, la cual es normalmente el fluido viscoso existente en el prototipo. Si este requerimiento es satisfecho la presión de poro hidrostática en el prototipo y los esfuerzos efectivos serán reproducidos en el modelo. De igual manera, el escalado de la inercia y de las fuerzas de filtración serán correctos.
  - Para modelar correctamente la capilaridad, el fluido sustituto debe tener la misma tensión superficial que el agua.
  - El fluido es, igual que el agua, un fluido Newtoniano. La viscosidad dinámica  $\eta$  de un fluido es la relación entre el esfuerzo cortante y la proporción de la deformación al cortante. Esta proporción es constante para el agua a todos los niveles de esfuerzo cortante. Debe ser constante en el caso del fluido de sustitución para que se lleve a cabo la interacción suelo fluido de manera inalterada.
  - El fluido debe tener la misma compresibilidad que el agua para que la interacción del suelo y el esqueleto del fluido sea preservada durante la carga y la descarga.
  - El fluido debe de estar químicamente polarizado para permitir su uso no sólo con arenas sino que también con limos y arcillas.
2. La presencia de un fluido viscoso diferente no debe alterar las características de humedad del suelo.

3. Se debe de disponer del fluido viscoso en un gran rango de viscosidades. Típicamente, un rango de viscosidades entre 15 y 100 veces la del agua serían de gran utilidad en experimentos en centrífuga.
4. Si el proceso de saturación con el fluido sustituto no es tan rápido como el del agua, por lo menos no debe de ser excesivo en cuanto a duración.
5. El fluido debe ser sencillo de obtener y fabricar, y las características deben de ser consistentes y similares entre lotes.
6. Las propiedades del fluido viscoso sustituto no deben cambiar con el tiempo de preparación del experimento, ni durante la realización de la prueba.
7. Idealmente, el fluido no debe de ser tóxico y debe de ser soluble al agua, para asegurar su manejo seguro, facilidad de limpieza y disposición segura. Entre los fluidos viscosos sustitutos se encuentra el aceite de silicón y mezclas de glicerina y agua, este tipo de sustitutos tiene la limitación de que sólo se puede alcanzar como máximo 60 veces la viscosidad del agua. En la actualidad, se utiliza un polvo llamado comercialmente "Metolose", el cual se mezcla con agua a determinada temperatura y tiene la ventaja que puede llegarse hasta viscosidades mucho mayores que con los fluidos sustitutos tradicionales (120 veces la viscosidad del agua). Además, es un producto duradero y estable, es completamente biodegradable y no tóxico.

#### 2.3.4. Ejemplo de escalado.

Se requiere modelar una capa de arcilla sobre una capa de arena, donde los estratos tienen un espesor de 25 metros cada uno. Se decidió preparar un modelo con una profundidad de 0.8m, el cual está conformado por ambas materiales por estratos de 0.4m para cada material.

a) Se requiere encontrar el factor de escala entre el modelo y el prototipo ( $N$ ), el cual corresponde al número de veces que será aumentado el campo gravitacional.

b) Si el radio de la centrífuga desde el eje de la centrífuga hasta la plataforma es de 6 metros, encontrar el número de revoluciones por minuto ( $RPM$ ) necesarias al trabajar con el factor de escala del inciso a) y así obtener las fuerzas  $g$  requeridas.

c) Cuando la centrifuga esta girando con las revoluciones encontradas en el inciso anterior, verificar que se tenga el factor de escala correcto de arcilla y la de arena.

**Solución:**

a) El factor de escala  $N$  entre modelo y prototipo se obtiene como:

$$N = \frac{H_{\text{prototipo}}}{H_{\text{modelo}}} = \frac{25\text{m} + 25\text{m}}{0.4\text{m} + 0.4\text{m}} = 62.5$$

b) El número de revoluciones requeridas en la centrifuga es:

La aceleración centrífuga está dada por:  $a = \omega^2 r$

donde:       $a$       aceleración centrífuga  
                $\omega$       aceleración angular  
                $r$       radio

En la centrifuga esta aceleración es equivalente a aumentar  $N$  la aceleración  $g$  de la gravedad,  $a = Ng$

Por lo tanto,

$$N = \frac{a}{g} = \frac{\omega^2 r}{g} \quad \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{Ng}{r}}$$

$$RPM = \frac{60\omega}{2\pi} \quad \Rightarrow RPM = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{Ng}{r}}$$

$g$ : aceleración de la gravedad,  $g=9.81 \text{ m/s}^2$

$$RPM = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{N \times 9.81}{r}} = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{62.5 \times 9.81}{6 - 0.4}} = 99.92$$

c) Ahora revisamos el factor de escala en los dos estratos. Despejando  $N$  de la ecuación anterior se tiene que:

$$N = \left( \frac{2\pi \times RPM}{60} \right)^2 \frac{r}{g} = \left( \frac{2\pi \times 99.9}{60} \right)^2 \frac{r}{9.81}$$

Con la que obtenemos los factores de escala de los dos estratos.

Radio a la mitad del estrato de arcilla:

$$r_{\text{mitad estrato de arcilla}} = 6.0\text{m} - (0.4/2)\text{m} = 5.8\text{ m}$$

El factor de escala para el estrato de arcilla reemplazando en la ecuación obtenida es:

$$N_{\text{mitad estrato de arcilla}} = 64.7$$

Radio a la mitad del estrato de arena:

$$r_{\text{mitad estrato de arena}} = 6.0\text{m} - (0.4 - 0.4/2)\text{m} = 5.4\text{ m}$$

El factor de escala para el estrato de arena reemplazando en la ecuación obtenida es:

$$N_{\text{mitad estrato de arena}} = 60.2$$

Se puede apreciar lo comentado en el punto 2.3.1, respecto a la variación de los niveles de aceleración,  $N_g$ , que varían con relación al radio. Para un modelo de este tamaño esto se considera despreciable, y se cumple con la relación propuesta por Scholfield y Taylor, entre la profundidad del modelo ( $H_{\text{modelo}}$ ) y el radio efectivo ( $Re$ ), la cual debe ser menor a 0.2.

$$\frac{H_{\text{modelo}}}{Re} = \frac{0.8}{6 + \frac{0.8}{3}} = 0.128 < 0.2$$

**CAPÍTULO 3****APLICACIONES EN LOS DIFERENTES CAMPOS DE LA INGENIERÍA CIVIL.****3.1. Desarrollo de contenedores modelos, equipos simuladores de sismos e Instrumentación utilizada.**

Para la realización de una prueba en una centrífuga se requiere contar con contenedores para los modelos, de varios tipos de instrumentos según las mediciones que se deseen obtener, y según el tipo de prueba que se vaya a realizar se necesita o no de un generador de sismos, todos ellos existen de diferentes tipos y características.

**3.1.1. Contenedores y cajas laminares.**

Desde que se comenzó a trabajar con modelos ensayados en una centrífuga se tuvo la necesidad de contar con contenedores en los cuales se construiría y ensayaría el modelo, estos deben de cumplir ciertas especificaciones según el tipo de prueba a realizar. En el caso de las centrífugas de brazo balanceado, el modelo es siempre realizado en un contenedor o en una caja laminar.

**3.1.1.1. Contenedores de paredes rígidas.**

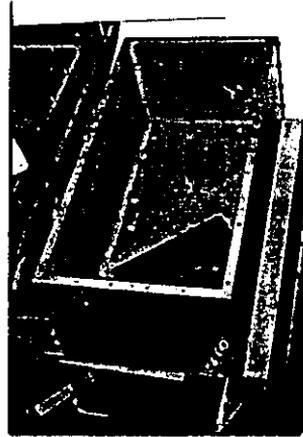
Este tipo de contenedores se emplean tanto para eventos dinámicos, como estáticos. Las cajas (Figuras 3.1, 3.2, 3.3) de este tipo tienen las siguientes características: son rectangulares, con paredes gruesas de aluminio, en algunos casos tienen micas con un espesor de algunos centímetros en alguna de sus caras, para permitir analizar y observar los efectos después de haber llevado a cabo un ensaye en la centrífuga (Figura 3.1). Algunas de las aplicaciones más comunes para este tipo de contenedores incluyen el modelado de: presas, taludes, cimentaciones profundas y superficiales, dispersiones de contaminantes, flujo de agua en el subsuelo y cimentaciones. Actualmente existe una gran variedad de contenedores, clasificados principalmente por su diseño, dimensiones y según el uso que se le vaya a dar.

En modelos para eventos estáticos, se requiere una frontera unidimensional de las condiciones de consolidación usando muros verticales sin fricción y de alta rigidez lateral para prevenir desplazamientos significativos.

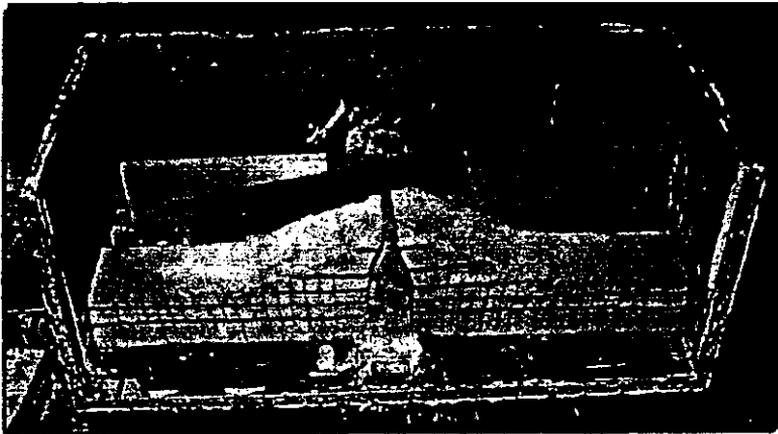
Para modelos de eventos dinámicos, como puede ser la simulación de sismos, las condiciones de frontera son más complejas por lo que se han diseñado contenedores especializados según las necesidades.



**Figura 3.1- Contenedor de paredes rígidas con una ventana lateral que permite observar lo ocurrido al interior del modelo antes, durante y después del ensaye.**



**Figura 3.2- Contenedor pequeño de paredes rígidas.**

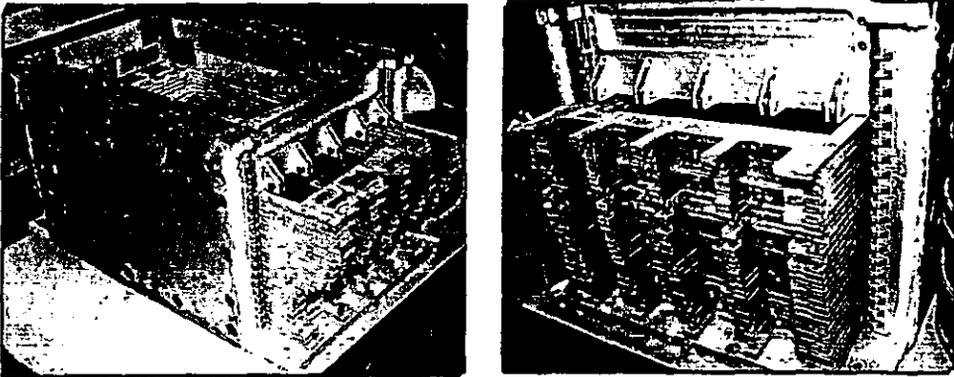


**Figura 3.3- Contenedor de paredes rígidas en el cual fue ensayado un modelo de una presa, el corazón impermeable a sido extraído.**

### 3.1.1.2. Caja laminar para modelar eventos dinámicos.

Para el caso de eventos dinámicos se llevan a cabo experimentos en cajas laminares que permiten movimientos laterales. Dichas cajas laminares están formadas por anillos rectangulares (figuras 3.4 y 3.5), el espesor de cada anillo así como el número de los mismos dependen del diseño, uso y tamaño que se le dará al contenedor.

Los anillos están separados por un sistema de rodamiento formado por pequeños cilindros de acero inoxidable, esto para permitir a los anillos deslizantes tener un desplazamiento con la mayor libertad posible en el sentido longitudinal de la caja, en la dirección de la excitación. Existen ecuaciones y coeficientes obtenidas tras importantes investigaciones que corrigen los errores y alteraciones al comportamiento en un experimento que pueden ser causados por los anillos deslizantes y la fricción existente en este caso.

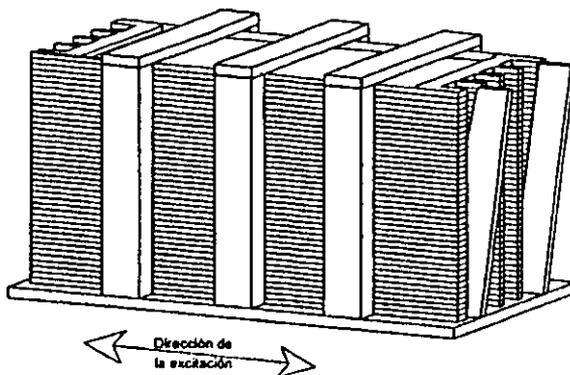


*Figura 3.4- Caja laminar de anillos deslizantes, utilizada en el Instituto Politécnico de Rensselaer (RPI), en Estados Unidos.*

### 3.1.2. Generadores de sismos.

Para generar una excitación como un sismo y aplicarla al modelo montado en una centrífuga se utilizan equipos especiales que permiten desarrollar las fuerzas y las aceleraciones necesarias para simular las existentes ante la presencia de un sismo, a estos equipos se les llama "shakers" en inglés, y en español son conocidos como

generadores de sismos (figuras 3.6 y 3.7). Estos generadores son montados sobre la plataforma de la centrífuga para así proveer el movimiento necesario al modelo, la agitación es aplicada perpendicularmente al plano de rotación de la centrífuga.



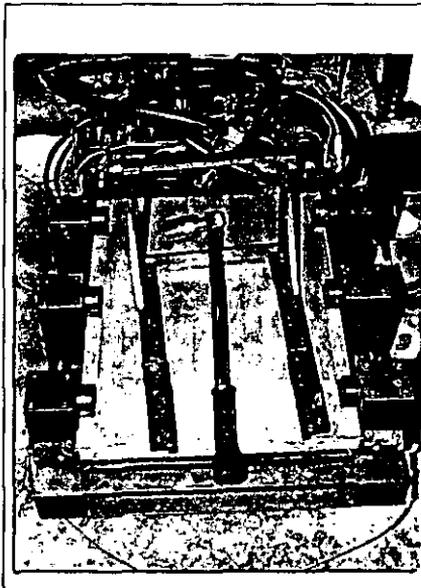
**Figura 3.5- Vista esquemática de la caja laminar de RPI (Van Laak et al. 1994)**

Para casos de cargas dinámicas el tiempo se escala con  $N$  para pasar del modelo al prototipo. Como la frecuencia es la inversa del tiempo ( $frecuencia = 1/Tiempo$ ), la frecuencia de una carga cíclica en el modelo debe ser  $N$  veces más larga que en el prototipo. Una manera para explicar esto es considerando un prototipo de 100 m sometido a una onda sinusoidal. La velocidad de la onda es 1.0 m/s y el periodo de la onda es de 1.0 segundo. En el prototipo, la onda tardaría 100 segundos para viajar completamente a través de la estructura, y habría 100 periodos de la onda contenidos en el prototipo. Si la misma onda fuese aplicada a un modelo de 1.0 metro, el tiempo que tardaría en recorrer el modelo sería de 1.0 segundo, y solo contendría un periodo de la onda. Por lo que no existiría similitud relativa a la frecuencia de una carga cíclica. Sin embargo si la frecuencia en el modelo se incrementara 100 veces en el modelo de 1.0 metro, se tendría entonces que en 1.0 segundo habría 100 periodos de la onda en el modelo, que es lo que se tenía en el prototipo, y la similitud en este caso quedaría resuelta.

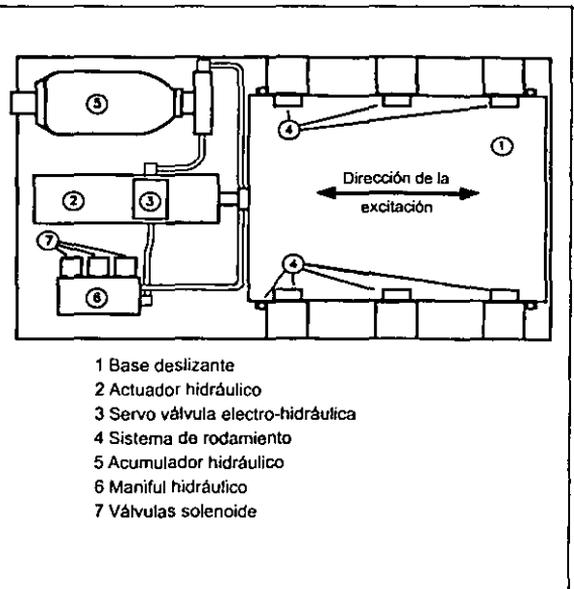
El generador de sismos tiene que trabajar bajo aceleraciones, fuerzas y frecuencias todas ellas de gran magnitud. Las frecuencias en las que debe funcionar el modelo son muy altas ya que los factores de escala para eventos dinámicos se comportan de esta manera. La frecuencia dominante en un sismo típico en campo varía entre 0.2 Hz y 5 Hz, en caso de tener una aceleración centrífuga de 100g, se requiere que el generador sea capaz de generar movimientos controlables a frecuencias en el rango de 20 a 500 Hz.

El segundo requerimiento es la fuerza necesaria para aplicar el sismo. Por ejemplo, al trabajar con una relación de escala  $N=100$  entre modelo y prototipo, existiendo una aceleración máxima en el prototipo de  $0.4g$ , en el modelo se requiere aplicar una aceleración de  $40g$ , es decir de  $400 \text{ m/s}^2$ . Si la masa que se va a excitar es de  $500 \text{ kg}$ , entonces la fuerza requerida para generar una excitación en la base del modelo es de  $500 \times 400 = 200 \text{ kN}$  (20 Toneladas). Sin embargo, la amplitud del movimiento requerido para alcanzar esta aceleración a  $100 \text{ Hz}$ , asumiendo una onda sinusoidal, es solo  $400 / (2\pi 100)^2 = 0.001 \text{ m}$  ( $=1 \text{ mm}$ ).

Lo anterior nos muestra que si un modelo fue construido a la escala  $N=100$ , la frecuencia de entrada para dar el movimiento al modelo, debe de ser 100 veces la frecuencia a la cual fue sometido el prototipo, la duración del movimiento sísmico es 100 veces más corto y la aceleración es 100 veces mayor.



**Figura 3.6- Generador de sismos del Instituto Politécnico de Rensselaer, el cual se montará sobre la plataforma de la centrifuga.**



**Figura 3.7- Vista en planta de un generador de sismos, en este caso el que se emplea en RPI (Van Laak et al., 1994)**

Aunque la duración de la excitación va a ser corta (típicamente algunos milisegundos), el actuador debe ser capaz de proporcionar la energía de flujo pico casi instantáneamente y, aunque no tan crítico, detener el movimiento al final del evento. A pesar de estos

problemas tan desafiantes, se han elaborado diferentes sistemas para generar excitaciones durante los ensayos en centrífuga.

Han sido desarrollados diversos sistemas de movimiento sísmico entre los que se incluyen: mecánicos simples con resortes, a base de pequeñas explosiones, piezoeléctricos, electromagnéticos, sistemas mecánicos y servo-hidráulicos.

En general los sistemas piezoeléctricos y electromagnéticos ofrecen un muy buen comportamiento para producir variaciones de alta frecuencia para desplazamiento, pero no en baja frecuencia.

Los actuadores mecánicos tienen la ventaja de ofrecer un relativo bajo costo en su fabricación y mantenimiento, siendo fáciles de controlar y capaces de generar una vibración sinusoidal en un corto rango de frecuencias, la cual es su limitante máxima.

La ventaja primaria del sistema simulador de sismos electro-hidráulico es su versatilidad para ofrecer rangos muy extensos en la banda de frecuencias. Es empleado para proveer el movimiento en la base del modelo, éste es aplicado perpendicularmente al plano de rotación de la centrífuga. El simulador de sismos utiliza actuadores hidráulicos lineales para hacer vibrar el contenedor con el modelo y así obtener los movimientos necesarios.

### 3.1.3. Preparación del modelo.

Cuando se modela en centrífuga se requiere tener un modelo que cumpla con el mayor número de características que lo hagan similar al prototipo, por lo que se deben cuidar todo tipo de detalles. Una de las partes más importantes para obtener resultados confiables al realizar una prueba en centrífuga es la preparación del modelo, comenzando desde el momento de seleccionar la escala, el tipo de prueba (estática o dinámica), el contenedor, la correcta colocación de los transductores en el modelo, el cuidado de mantener las proporciones en el modelo (pendientes, ángulos, formas), la colocación correcta de los materiales (tipo de suelo, tipo de fluido), hasta la construcción final del modelo la cual es generalmente el momento más largo y complejo. En la mayoría de los casos el construir el modelo toma periodos prolongados de tiempo, aunque después de la prueba el recopilar, capturar e interpretar la información y concluir sobre los resultados, toma también periodos más largos.

El factor más importante en el modelado geotécnico en el caso de un suelo es el perfil de los esfuerzos efectivos. La historia, el estado actual y la trayectoria seguida por los esfuerzos efectivos durante la prueba dictarán el comportamiento del modelo. El

modelado en centrífuga puede ser realizado con muestras inalteradas de suelos, si las condiciones de esfuerzo en la muestra son representativas de las del prototipo.

#### 3.1.4. Instrumentación.

En años recientes, se han podido aplicar a la investigación en centrífuga instrumentos de medición cada vez más pequeños y precisos, gracias al desarrollo de la tecnología.

El comportamiento del modelo probado en centrífuga puede ser monitoreado por una gran variedad de instrumentos y nueva instrumentación esta siendo desarrollada la cual puede ser aplicada al modelado en centrífuga. Particularmente se comienzan a implementar al modelado en centrífuga instrumentos como lo son el monitoreo remoto y el uso de fibras ópticas para la transmisión de la información.

La instrumentación empleada más comúnmente para llevar a cabo las mediciones al interior de un modelo durante una prueba en centrífuga, consiste en el uso de transductores; éstos son dispositivos que transforman la energía de entrada en energía de otro tipo a la salida, originalmente se les conocía como transductores a los dispositivos que convierten un estímulo mecánico en energía eléctrica de salida, pero en la actualidad se les da un significado más amplio ya que detectan diversos tipos de estímulos de tipo físico tales como vibración, calor, esfuerzo, presión, aceleración, entre otros.

Los transductores en contacto con el modelo deben ser pequeños y suficientemente reforzados para resistir no sólo el incremento en su peso propio, sino también deben soportar el manejo durante la preparación del modelo y al ser desmontados.

Normalmente los transductores deben ser capaces de suministrar información continua durante todo el ensaye, aunque para el caso de los transductores de presión de poro, las deformaciones antes y después del ensaye no son necesarias. Para el monitoreo constante, los transductores deben tener una adecuada respuesta al aumento en magnitud de la frecuencia respecto de los que se emplearían en el prototipo.

Las dimensiones de los transductores deben ser de un máximo de 10 mm, aunque de preferencia de menor tamaño. En el caso del estudio de los suelos, éstos son enterrados y pueden actuar como anclajes, por lo que se debe tener cuidado de no convertirlos en refuerzos para el propio suelo o causantes de alteraciones en el comportamiento. Los transductores enterrados deben soportar los altos niveles de presión dentro de la masa de suelo y las altas presiones del agua, para estudio en medios saturados (Figura 3.8).

Se utilizan transductores para medir los esfuerzos totales y de esta manera definir completamente el estado de esfuerzos en las fronteras o dentro del modelo.

Los desplazamientos pueden ser medidos con potenciómetros o transformadores diferenciales linealmente variables conocidos como LVDT (linear variable differential transducer), los cuales existen con diferentes características (Figura 3.9).

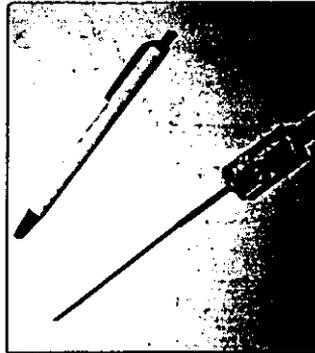
La temperatura dentro del modelo puede ser registrada por medio de termómetros especiales o con termómetros digitales.

Algunos tipos de instrumentos dependen del experimento y necesitan ser diseñados según sea el caso de la prueba que se desea efectuar.

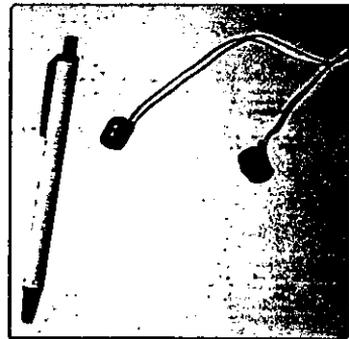
Para medir deformaciones se emplean "strain gauges", que son medidores de deformación, otra manera de conocer deformaciones y movimientos dentro de un modelo es marcando puntos importantes y al término de la prueba medir cual fue su desplazamiento. Para el estudio de suelos saturados esto se hace enterrando espaguetis previamente marcados los cuales al estar húmedos son flexibles y podrán deformarse libremente siguiendo el comportamiento del suelo en su rededor.



**Figura 3.8-**  
**Transductor de**  
**presión de poro**



**Figura 3.9- Transductor**  
**de desplazamiento,**  
**(LVDT- linear variable**  
**differential transducer)**



**Figura 3.10- Acelerómetros**  
**piezoeléctricos.**

Los transductores de presión de poro (Figura 3.8) capturan la fluctuación de la presión con alta precisión, son empleados para medir distribuciones en la presión de poro en un modelo de suelo y para observar el proceso de consolidación durante el ensaye. En el caso de estudios de licuación, estos transductores son esenciales para localizar la porción

licuada y su magnitud. Los transductores de presión de poro cuentan con un elemento poroso para aislar la presión del fluido de las partículas de suelo y de esta manera lograr las mediciones.

Los acelerómetros (figura 3.10) se dividen en tres categorías: tipo "strain gauge", semiconductor y piezoeléctrico. Los acelerómetros miniatura "strain gauge" son menos sensibles a la aceleración mientras que los de tipo piezoeléctrico son altamente sensibles. Con respecto a la medición de desplazamientos existen los LVDT de contacto (figura 3.11) y los de no contacto, de tipo láser (figura 3.12). Los primeros tienen la desventaja de necesitar un cuidado especial, ya que el peso propio de la varilla y el círculo que entra en contacto con el suelo no debe ejercer demasiada presión como para causar un asentamiento debido a la presencia del propio equipo. Los sensores de desplazamiento de no-contacto tipo láser evitan este problema, pero tienen la desventaja de que si el punto que el rayo láser está registrando sale del curso de captura, se obtienen lecturas completamente erróneas, se recomienda usarlos cuando los desplazamientos laterales son considerablemente pequeños.

La instrumentación disponible en la actualidad incluye no solamente transductores, sino también técnicas visuales como la fotografía digital y el video, empleadas para observar la respuesta del modelo durante toda la prueba o en momentos específicos.

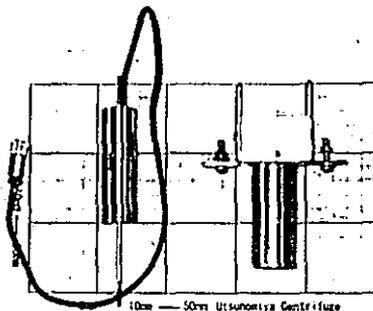


Figura 3.11- LVDT- de contacto

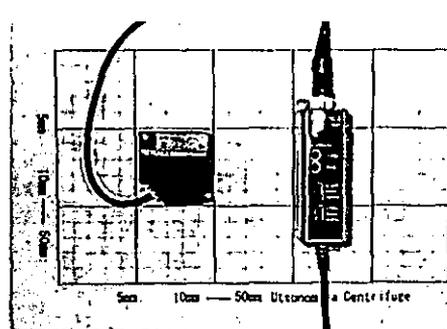


Figura 3.12- LVDT- láser

## 3.2 Aplicaciones en Geotecnia.

El desarrollo del modelado en centrífuga en Geotecnia, es sin lugar a duda la rama de la Ingeniería Civil para la cual se han aportado el mayor número de investigaciones y aplicaciones al respecto.

En la actualidad el modelado en centrífuga se encuentra en una fase de desarrollo muy avanzado, se realizan importantes investigaciones en un gran número de países y se modelan diversos eventos que se presentan en el campo de la Ingeniería Geotécnica, aportando nuevos conocimientos y técnicas.

El aspecto más importante al trabajar con un modelo de un suelo en Geotecnia es el perfil de los esfuerzos efectivos. La historia de los esfuerzos efectivos, el estado actual y la trayectoria de los mismos seguida durante la prueba, determinará el comportamiento del modelo.

Los ensayos de los modelos pueden ser ejecutados en muestras de suelos inalterados si las condiciones de los esfuerzos efectivos en el modelo son representativas de las del prototipo.

El control del flujo de agua en suelos saturados es importante para mantener el drenaje correcto y las condiciones de esfuerzo efectivo. El agua es el fluido más comúnmente empleado, aunque dependiendo de la prueba se utilizan otro tipo de fluidos con mayor viscosidad, esto se vio en el capítulo sobre modelado.

Un problema que se presenta es que al saturar un modelo, al fluir el agua u otro fluido empleado se presenta erosión, esto debido a la fuerte aceleración presente en este tipo de experimentos. Una de las soluciones es mantener todo el suelo sumergido o llenar paulatinamente el modelo a lo largo de la prueba de una manera en la que se reduzca al máximo la erosión dentro del modelo colocando una esponja sobre la que será vaciado el fluido, un error en el llenado y saturación de un modelo puede causar un colapso y de esta manera perder todo el trabajo que implicó la construcción del mismo.

Las aplicaciones en centrífuga en el caso de la Geotecnia están divididas en cinco áreas principales, éstas son: Mecánica de Suelos y de Rocas, Movimientos, Ingeniería Sísmica, Dinámica de Suelos y Pavimentos.

El comportamiento de los materiales de la tierra es complejo y altamente no lineal lo que hace difícil de predecir con seguridad la respuesta de una estructura de un sistema suelo-estructura. El modelado físico es un acercamiento para resolver problemas de alta complejidad en ingeniería. El modelado en centrífuga de materiales terrestres y de

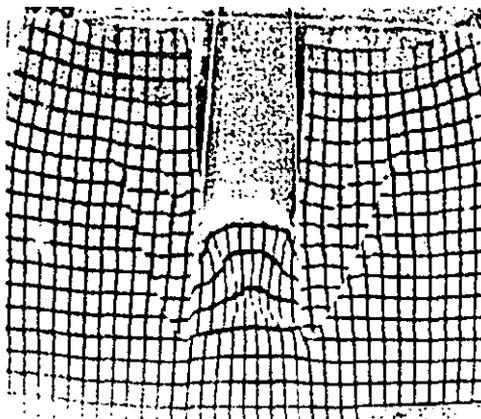
problemas complejos que los involucran produce el equivalente comportamiento de esfuerzos y deformaciones necesarios.

Diversos problemas en mecánica de suelos y de rocas han sido modelados con una centrífuga obteniendo diversos grados de éxito, éste se determina por el grado de similitud obtenido entre el modelo y el prototipo. Debe aclararse que un grado perfecto de similitud es imposible excepto a la escala  $N=1$ . Con el cuidado suficiente al momento de diseñar un modelo y el manejo correcto de las relaciones de escala, el modelado en centrífuga permite abordar problemas de Ingeniería que son imposibles de tratar con otro tipo de herramientas.

Estas son algunas de las principales aplicaciones hechas en Ingeniería Geotécnica con el uso de esta herramienta:

Rehabilitación de taludes, diseño y estabilidad de taludes, diseño de cimentaciones, aspectos geotécnicos de problemas sobre interacción suelo-estructura, capacidad de carga de un suelo, mecanismos de falla (Figura 3.13), diseño y desempeño de pilas y pilotes, estabilidad de muros de retención, investigaciones sobre la erosión, consolidación del suelo, disipación de la presión de poro y drenaje en suelos, y filtración en estructuras de suelos.

Las aplicaciones en mecánica de rocas incluyen problemas de investigación sobre: minería (estabilidad de estructuras en minas, diseño de pilas) y rehabilitación de las mismas, fallas en estructuras de roca, estabilidad de taludes, derrumbes, flujo del agua en un medio rocoso, túneles, anclajes y comportamiento de suelos rocosos (resistencia, deformación).



*Figura 3.13- Mecanismos de falla en tablaestacas.*

### 3.2.1. Consideraciones al realizar un modelo para Geotecnia.

En las últimas dos décadas, se cuenta a nivel mundial con un gran número de medios y recursos sobre modelado en centrífuga, y se han conducido un gran número de experimentos relacionados con Ingeniería Geotécnica. En universidades en las que se cuenta con equipos de este tipo, el uso de esta herramienta no solo se emplea con fines de investigación, sino también para la solución de problemas en la práctica profesional y para fines didácticos. El modelado en centrífuga es ahora un medio común para hacer investigación, para estudiar problemas nuevos y complejos. Los resultados del ensaye de un modelo dependen significativamente de los procedimientos referentes a la preparación y construcción del modelo.

Para conducir modelos funcionales en centrífuga, en general se toman en consideración los siguientes puntos para el caso de muestras de suelo:

- La relación de vacíos y la densidad, los cuales son parámetros primarios que controlan la deformación y las características de rigidez de un suelo. Por consiguiente las fluctuaciones de la relación de vacíos y de la densidad relativa deben ser suficientemente pequeñas en el modelo con respecto al prototipo.
- La fricción en el interior de los muros del modelo que contienen al suelo, debe ser lo suficientemente pequeña para prevenir cualquier influencia sobre la prueba. Se deben considerar las discrepancias de la distribución de esfuerzos ideales y reales respecto a la profundidad al interior del modelo.
- Tratar de usar un contenedor lo más grande posible. La influencia de la fricción de un muro se vuelve relativamente pequeña entre más grande es el contenedor.
- En arenas saturadas, se debe de mantener un alto grado de saturación para evitar efectos de capilaridad entre las partículas que pudieran producir cohesión aparente.
- Son preferibles métodos sencillos, simples y repetibles.
- Se deben anotar todos los métodos y pasos empleados para la preparación de la muestra.

### 3.2.2. Realización de pruebas a la muestra de suelo previo al ensaye.

Entre las pruebas que se requieren hacer a una muestra de arena antes de probarla en la centrífuga están las siguientes: verificación de la correcta selección del tamaño de la

partícula o grano, densidad, grado de saturación, pruebas de consolidación. Se requiere conocer información sobre las propiedades físicas y mecánicas del suelo empleado.

La preparación de muestras de arcilla es un proceso que requiere de grandes periodos de tiempo, no sólo para la consolidación en el laboratorio, sino también para su preparación dentro del modelo. Además en la realización de muestras en términos de la relación de vacíos y otras propiedades es difícil de lograr.

La pruebas de penetración de cono son llevadas a cabo en modelos probados en centrífuga para determinar los perfiles de los suelos y para verificar su homogeneidad. La prueba consiste en empujar un penetrómetro en el suelo del modelo. La penetración se lleva a cabo midiendo la resistencia a la penetración en el cono y si posible, incluyendo mediciones continuas de la presión de poro alrededor de la punta del cono. La prueba de penetración de cono en miniatura en una centrífuga tiene dos diferencias respecto a la prueba en campo, las cuales pueden tener una influencia en la resistencia a la penetración, estas son: el diámetro del cono es relativamente pequeño en comparación al de la partícula, y la existencia de fronteras artificiales impuestas por el contenedor de suelo.

En la prueba de penetración de cono, los penetrómetros tienen en la punta una celda para medir la presión en la misma. Dependiendo del tipo de prueba, éstos se emplean para medir la presión de poro. Existe una gran variedad de penetrómetros disponibles según las necesidades y la prueba por hacerse.

Las pruebas de capacidad de carga son llevadas a cabo bajo diferentes condiciones geométricas y de carga.

### **3.2.3. Estudios en Ingeniería Sísmica y Dinámica de suelos.**

La capacidad de resistir los efectos de un sismo es especialmente importante para muchas estructuras tales como presas, terraplenes, taludes, puentes, conductos, viviendas, por citar algunos.

Los efectos de la actividad sísmica en tales estructuras pueden ser evaluados considerando la respuesta sísmica de los suelos de cimentación y las interacciones con las estructuras (incluyendo estructuras de tierra) y la cimentación. Para la solución sobre la interacción suelo-estructura, las propiedades y los movimientos deben ser conocidos, ya que es necesario realizar un método analítico y un modelo físico.

La dinámica de suelos, la interacción suelo-estructura y la ingeniería sísmica han sido ampliamente estudiadas desde hace algunos años. La licuación en suelos durante un sismo comenzó a estudiarse a partir de 1964 con el sismo de Niigata, en Japón; éste causó fallas en las cimentaciones y desplazamientos laterales debido a la licuación que se presentó. Como resultado de estas investigaciones, diversos procedimientos y modelos, algunos simples y otros sofisticados, se han desarrollado para predecir la licuación y sus efectos, así como las respuestas sísmicas de los suelos. No obstante, la eficiencia para evaluar la respuesta sísmica y la interacción en el suelo es limitada debido a la falta de conocimientos sobre los movimientos sísmicos en el suelo, el comportamiento dinámico, y las limitaciones de los métodos de análisis dinámico. Faltan verificaciones definitivas y comprobaciones sobre la efectividad de las técnicas empleadas en la actualidad. La validación completa sobre los métodos empleados no ha sido posible debido a la falta de un extenso conjunto de datos e información sobre un sitio que ha sufrido licuación. En la actualidad existe incertidumbre respecto al fenómeno de licuación y los métodos analíticos que se emplean para modelarlos. En vez de esperar a que un sismo se presente para obtener datos de campo, la alternativa es conducir pruebas en centrífuga de suelos y estructuras de suelo con propiedades conocidas, medir con precisión la respuesta y con ello verificar, modificar y calibrar las herramientas analíticas utilizadas actualmente. Este tipo de pruebas complementan, propician y aportan nuevas ideas, conocimientos y técnicas.

En la sección 3.7 se presentará un ejemplo de lo que fue llevar un modelo en la centrífuga referente al caso de licuación en Niigata, Japón.

### **3.3. Aplicaciones en Ingeniería Hidráulica.**

Los modelos físicos son ampliamente empleados en el ramo de la investigación en hidráulica, se realizan modelos de canales, cortinas, estaciones de bombeo, presas de almacenamiento. Cuando son diseñados efectivamente y operan de acuerdo a criterios de similitud, estos modelos ofrecen información cualitativa y cuantitativa del prototipo.

Estos modelos se han enfocado a la determinación de parámetros tales como la velocidad, algunos coeficientes, pérdidas de energía y perfiles de la superficie del agua. Los modelos tratan de cumplir satisfactoriamente con los fines para los cuales fueron pensados y son conducidos en condiciones de gravedad normal.

El empleo de modelos en centrífuga ofrece al ingeniero hidráulico la posibilidad de obtener una mejor similitud entre el modelo y el prototipo. La centrífuga puede ayudar a mejorar el modelado de algunos de los proyectos mencionados anteriormente o puede ser empleada para conducir modelos que anteriormente no eran posibles de realizar.

Una de las más grandes razones por la cual la centrífuga no ha sido muy empleada en ingeniería hidráulica, es el que los estudios de este tipo enfrentan problemas con su forma, tamaño y relación de escala, como puede ser el caso de ríos, estuarios, lagos.

Existen áreas en Ingeniería Hidráulica que pueden ser favorecidas por el uso de un aumento en el campo gravitatorio, éstas son algunas: erosión superficial y protección contra ella, hidráulica del subsuelo e interacciones fluido-estructura.

Para el caso de la erosión superficial, se necesita hacer investigación respecto a las partículas y los fluidos necesarios para poder modelar con la centrífuga. La erosión de materiales cohesivos y granulares, es una área en la cual la centrífuga podría ofrecer una similitud que no podría ser obtenida de otra manera.

El agua que existe en el subsuelo es una de las mayores fuentes de este líquido para los humanos. La información requerida sobre la contaminación y como proteger de ella los acuíferos pueden obtenerse utilizando modelos numéricos; pero al utilizar una centrífuga de considerable tamaño esta ayudaría a redefinir o validar modelos numéricos del flujo de agua en el subsuelo.

Un modelado en centrífuga con una escala adecuada, respecto a los modelos que trabajan a 1g, tendría la ventaja de ofrecer una correcta información respecto al comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales empleados.

Aunque existen requerimientos primarios para conducir experimentos en una centrífuga tales como simular todas las condiciones existentes en un prototipo, esto no es siempre factible ya que dependería en gran medida del radio del brazo de la centrífuga, así como el de tener plataformas suficientemente grandes.

Un problema que se ha visto al trabajar con modelos de gran tamaño, es que se requiere trabajar a bajas aceleraciones en la centrífuga y esto trae algunos problemas, ya que se tiene la atracción gravitacional actuando normalmente al plano de rotación de la centrífuga.

### 3.4. Aplicaciones en Ingeniería Ambiental.

Otra de las aplicaciones más importantes en la centrifuga es la validación y la investigación acerca de problemas relacionados con la contaminación del subsuelo y las áreas que estudian el almacenamiento de residuos tóxicos y peligrosos. Con la centrifuga se pueden estudiar problemas relacionados al subsuelo y su contaminación, tanto en suelos saturados como no saturados. Los estudios pueden hacerse sobre problemas de migración y factores de influencia de contaminantes, pozos de agua, sistemas de recarga, factores geológicos tales como los diversos tipos de estratigrafía que tienen efecto sobre el flujo de agua subterráneo y la migración de contaminantes de la superficie del suelo hacia el subsuelo. El tiempo de disipación en una centrifuga es el producto del tiempo de duración de la prueba por el cuadrado de la relación de escala entre modelo y prototipo.

La migración de un contaminante en un suelo que tardara 27 años, puede ser simulada en un experimento en centrifuga que dura menos de un día a 100g ( $t_{\text{disipación}} = 100^2 \times 1 \text{ día} = 10000 \text{ días} \approx 27 \text{ años}$ ).

Con una centrifuga se obtienen los datos y la información faltante respecto al comportamiento y los efectos que no pueden ser obtenidos en campo, ni con ensayos convencionales, que se emplean para validar modelos numéricos de flujo de agua en el subsuelo.

Estos son algunos problemas específicos sobre la difusión de contaminantes mayormente realizados en centrifuga, el control de rellenos sanitarios, el manejo fugas de tanques de almacenamiento subterráneos, el manejo de residuos peligrosos y la remediación de problemas de contaminación de aguas subterráneas.

Para el caso de Hidráulica del subsuelo los estudios en prototipos requieren un gran número de años para obtener resultados, pero en cambio para el caso del modelado en centrifuga éstos se pueden tener en cuestión de días o semanas. El modelado provee información valiosa sobre el flujo de agua en el suelo, la propagación y el movimiento de los contaminantes. Los estudios en este tipo de modelos pueden ofrecer soluciones y estrategias convenientes para resolver problemas vinculados con el manejo de contaminantes en el subsuelo.

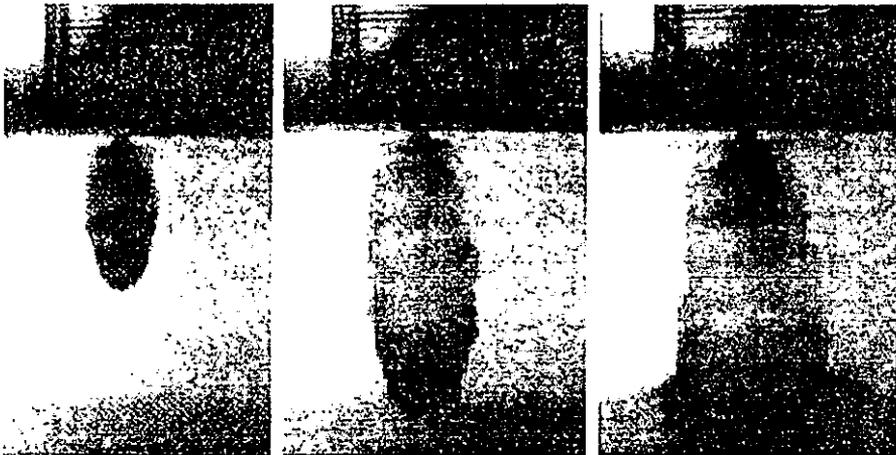
La predicción del flujo de contaminantes en el subsuelo se hace en ocasiones utilizando técnicas de modelado teóricas. En el modelado teórico, el proceso que está siendo examinado es manejado con la ayuda de un número importante de ecuaciones, que son resueltas utilizando métodos analíticos y numéricos, en la mayoría de los casos de gran

complejidad. En años recientes, se ha visto que existe la necesidad de trabajar con métodos de observación física de los mecanismos de transporte en el subsuelo, tales observaciones son requeridas para validar los modelos matemáticos y para ayudar al desarrollo y mejoramiento de las técnicas conocidas en la actualidad.

Diversos problemas ambientales conciernen el transporte de flujo de masa, de energía y de contaminantes, a través de un medio poroso.

En la figura 3.14, se muestran las etapas de propagación de un contaminante a través de un material granular dentro de la centrifuga, hasta llegar al contacto con un manto acuífero. Esto se observa en la figura 3.14 de la extrema derecha, donde la mancha negra toma una forma de campana al tocar el manto acuífero.

Cabe mencionar, que este experimento se realizó a una escala entre el modelo y la realidad de 1 a 150, es decir  $N=150$ . La gran ventaja de la centrifuga es que el fenómeno de flujo de contaminantes presentado en la figura anterior se desarrolló durante un periodo de dos horas en la centrifuga. Utilizando los factores de escala de tiempos de difusión estas dos horas en centrifuga correspondieron a estudiar el fenómeno en la realidad por un periodo de 5.2 años ( $2 \text{ horas} \times 150^2 = 45\,000 \text{ horas} \approx 5 \text{ años}$ ). Esta es una de las grandes ventajas de la centrifuga que permite observar fenómenos en tiempos muy cortos que corresponden en la realidad a varios años.



**Figura 3.14- Flujo de contaminantes en materiales granulares durante un ensaye en la centrifuga.**

A través de diversas investigaciones se ha visto que para las relaciones de escala en el caso del transporte o difusión, los eventos ocurren  $N^2$  veces más rápido en un modelo en centrífuga a escala reducida que en el prototipo a escala real. Los cambios en las presiones, la temperatura y las concentraciones serán idénticos a puntos homólogos entre el modelo y el prototipo. Muchas de las leyes han sido demostradas por Arulanandan et al.(1988), Savvidou (1988).

El modelado en centrífuga en el caso de eventos que involucran problemas de tipo ambiental presenta dos ventajas considerables, ésta técnica provee un modo de acelerar el proceso de transporte en un suelo, de esta manera permite observar fenómenos que ocurren en largos periodos en el prototipo en tiempos muy cortos en el modelo; la otra ventaja más importante es que se simulan todos los efectos debidos al peso propio de los materiales.

El peso propio envuelve algunos problemas para modelar el transporte de contaminantes en el subsuelo, dado que el movimiento de contaminantes líquidos en el subsuelo es dependiente de las propiedades del suelo tales como permeabilidad y la porosidad; las propiedades materiales de muchos de los suelos compresibles son una función tanto de los niveles de esfuerzo como de la historia de esfuerzos en el suelo, de este modo al lograr esfuerzos idénticos en puntos homólogos entre el modelo y el prototipo, es posible obtener una distribución real de las propiedades del material en todo el modelo. Los problemas ambientales frecuentemente involucran flujo en algún grado, en sistemas de agua subterránea lejos, cerca o debajo de una fuente, en donde las zonas de capilaridad aumentan y los gradientes de potencial total son gobernados.

De esta manera existen diversas condiciones bajo las cuales el modelado físico correcto del transporte en el subsuelo no se alcanzará hasta que el peso propio está totalmente considerado para las técnicas de modelado.

En algunos casos, los efectos de escala introducidos por fallas en la modelación de algunos procesos, como la dispersión de un contaminante, son probablemente menores. Bajo estas circunstancias, las observaciones hechas con miras al modelo en centrífuga pueden ser consideradas representativas del comportamiento del prototipo. El modelado en una centrífuga genera información valiosa bajo condiciones de laboratorio controladas y reproducibles.

La instrumentación que se emplea para este tipo de problemas se hace principalmente con instrumentos capaces, de medir la presión de un fluido, la temperatura de un suelo y la concentración de un contaminante durante el vuelo de la centrífuga, ésta se hace

principalmente con transductores de presión de poro, termocoples y sondas de resistividad.

### 3.5. Aplicaciones en Ingeniería Estructural.

Existe un gran número de eventos que son independientes de los efectos de la gravedad, por ejemplo el viento y el deterioro de los materiales con el tiempo. En contraparte, existe un sinfín de aspectos que son dependientes de la fuerza de gravedad, que al usar modelos en los cuales no se escalen las fuerzas de gravedad, es posible que tengan resultados cuestionables y en algunos casos totalmente erróneos. Para estudiar los efectos de una detonación nuclear en la tierra o contra cualquier otro tipo de estructura, los modelos pueden ser requeridos ya que las pruebas a escala real inconvenientes. En otros casos, las pruebas en modelos pueden ser más económicas y podrían permitir una mucho mayor variación de los parámetros que gobiernan el resultado, pero se debe contar también con resultados obtenidos en pruebas a escala real para poder comparar y verificar si realmente se está teniendo el comportamiento existente en la realidad.

La facultad de una centrífuga para modelar fuerzas de gravedad ofrece un medio para vencer los problemas anteriormente mencionados y conlleva dos de las ventajas de trabajar con una centrífuga que son, poder tener resultados y datos que difícilmente serían alcanzables por la dificultad de hacer una prueba a escala real y resultados efectivos a partir de modelos con una buena relación costo-beneficio.

En el caso de estructuras rígidas de concreto, es muy complicado el modelar fallas estructurales en modelos convencionales a pequeña escala, debido a la imposibilidad de escalar la influencia de cargas muertas en la estructura. Esto se vuelve una limitación crítica en investigación sobre daños en estructuras de gran tamaño (tales como puentes de concreto) y en túneles. Con una centrífuga es posible modelar acertadamente la falla estructural.

#### 3.5.1. Aplicaciones de la centrífuga en estudios de interacción suelo-estructura.

Una de las razones más importantes del uso del modelado en centrífuga es la validación de modelos numéricos. Con el desarrollo de cada vez mayores y poderosos sistemas de cómputo, se requieren conocer parámetros que algunas veces no se pueden determinar en campo, el modelado en centrífuga satisface esta necesidad.

En problemas de interacción suelo-estructura, el interés de más de una disciplina debe ser satisfecho. Los ingenieros geotecnistas están interesados en los esfuerzos y desplazamientos en los suelos, mientras que los ingenieros estructuristas se interesan primeramente en esfuerzos cortantes, momentos, y desplazamientos de una estructura. En algunas ocasiones estos diferentes intereses pueden no ser totalmente satisfechos al modelar un problema. Por consiguiente, la primera meta de la investigación debe ser cuidadosamente analizada. El uso del modelado en una centrífuga para un problema de interacción suelo-estructura, requerirá un considerable cuidado para los modelos experimentales y los numéricos.

Los problemas de interacción suelo-estructura han sido largamente estudiados por el interés que representan en Ingeniería. La respuesta no lineal de un suelo y el comportamiento de una estructura es de gran complejidad y hace que el análisis sea igualmente difícil. Un método analítico se selecciona cuando se aproxima a la realidad pero cuando también permite la obtención de una solución. Estos procesos analíticos deben ser comprobados respecto a las observaciones en campo. Esta verificación es algunas veces compleja o imposible de obtener debido a la falta de instrumentación, mediciones de la respuesta en el prototipo, a la dificultad y al alto costo que implicaría realizar pruebas a escala real. El modelado en centrífuga provee medios para verificar procesos analíticos y numéricos en el caso de la interacción suelo-estructura.

La interacción suelo estructura incluye la investigación sobre pilas de cimentaciones, muros de retención, cimentaciones profundas, estructuras enteradas y presas, entre otras.

En el caso de las estructuras de retención funcionando con gravedad, estas estructuras trabajan con su peso propio para poder resistir las fuerzas ejercidas por el suelo que retienen. Cuando se usan métodos convencionales para analizar muros de retención trabajando a gravedad en terrenos granulares y roca, el resultado indica que los muros pueden ser inestables a pesar de haber tenido un comportamiento satisfactorio por muchos años. Los resultados obtenidos indican que algunos métodos convencionales pueden ser erróneos para los muros. Se han emprendido esfuerzos para estudiar el comportamiento fundamental de estructuras de retención trabajando a gravedad usando las mejores técnicas de análisis disponibles, comparando los resultados con análisis convencionales como medio para determinar por que el empleo de un análisis convencional puede ser excesivamente conservador. Para completar los estudios de

análisis, una serie de estudios en modelos son conducidos para verificar los resultados de los estudios analizados. El análisis indica que la altura de un muro tiene un efecto significativo sobre el comportamiento de una estructura, sin embargo, los estudios en modelos no permiten cuantificar este efecto. Debería ser posible el definir este efecto sobre la altura de un muro utilizando una serie de modelos en centrífuga que en los que se variara la aceleración con el fin de simular diferentes alturas de un muro.

Las estructuras sostenidas por pilas introducidas en capas de suelos blandos y sometidas a cargas laterales deben ser estables contra el deslizamiento. Para evaluar la estabilidad contra deslizamiento de este tipo de estructuras, la contribución de las pilas a la resistencia al deslizamiento debe ser determinada. Los aspectos clave para la evaluación de la resistencia de una pila son modelar correctamente la interacción entre las pilas y el suelo. La interacción no-lineal para las cargas laterales y verticales en cada pila deben ser consideradas al modelar el problema. Aun cuando una estructura soportada por una pila es estable, los movimientos en los estratos débiles en la cimentación necesitan ser tomados en cuenta para el diseño. Se llevan a cabo estudios para identificar los modos potenciales de falla y los mecanismos asociados, así como diversas técnicas analíticas son desarrolladas en la actualidad para evaluar los modos de falla. Debido a la compleja naturaleza del problema, un número considerable de suposiciones y aproximaciones deben hacerse para la evaluación de los casos estudiados, por consiguiente, es posible realizar comparaciones cualitativas entre el comportamiento en campo y los métodos analíticos. Las centrífugas pueden ser empleadas para corroborar los modos potenciales de falla y para verificar los modelos analíticos.

En algunos casos se toman en consideración criterios muy conservadores que hacen que los costos de algunas estructuras sean muy elevados, todo ello debido a la falta de un estudio para actualizar dichos criterios, la centrífuga es una importante alternativa y ayuda para hacer las modificaciones y actualizaciones que se requieran en este campo.

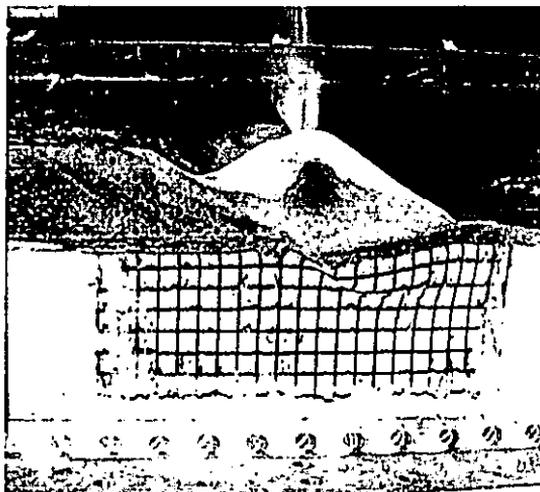
### **3.6. Aplicaciones en la Construcción.**

Las investigaciones realizadas en centrífuga pueden tener aplicaciones directas como en el siguiente caso, de un problema real que se modeló y ensayo en una centrífuga, se logró obtener una solución para el problema. En las siguientes figuras (3.15 y 3.16) se muestra la falla que se presentó en una autopista en Alemania debido a un problema

constructivo cuando se optó por ampliarla con dos carriles más. En el momento del procedimiento constructivo, al querer formar el terraplén adicional empezaron a generarse grietas longitudinales en el tramo existente, como se muestra en la Figura 3.15. Debido a la complejidad del análisis de la generación de dichas grietas se procedió a simular en la centrífuga el proceso constructivo que se estaba realizando en campo. Esto implicó construir el terraplén adyacente durante el vuelo en la centrífuga (Figura 3.16). Los resultados indicaron que el procedimiento constructivo estaba creando en efecto una falla cercana al talud por capacidad de carga. En este caso la centrífuga sirvió para modificar el proceso constructivo y evitar la aparición de las grietas longitudinales. Por lo que con la ayuda de la modelación en una centrífuga se resolvió dicho problema.



*Figura 3.15- Agrietamiento en una carretera.*



*Figura 3.16 – Simulación del procedimiento constructivo y vista de la falla por capacidad de carga.*

### 3.7 Ejemplo de un modelado en centrífuga realizado en el Instituto Politécnico de Rensselaer en colaboración con el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

La siguiente investigación fue desarrollada por parte del Ingeniero Gabriel Martínez Ramírez durante una estancia de seis meses que realizó en el Instituto Politécnico de Rensselaer, formando parte de una investigación conjunta entre dicho centro y el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Se modeló el caso historia del sismo de Niigata, Japón en 1964 donde hubo un gran número de pérdidas humanas y materiales debido a desplazamientos laterales ocasionados por el fenómeno de licuación.

El objetivo de llevar a cabo este modelado es el de entender mejor los fenómenos que tienen lugar y obtener datos que no se pudieron obtener durante el sismo y con éstos calibrar métodos numéricos y computacionales.

Los desplazamientos laterales de taludes en zonas donde el suelo se encuentra totalmente saturado es una de las fallas más costosas inducidas por licuación.

Este tipo de fallas puede destruir edificios, terraplenes, puentes, estructuras enterradas en el suelo y estructuras portuarias.

Entre los sismos más recientes e importantes, en los que hubo desplazamientos laterales, se encuentran: los de San Fernando 1971 y Loma Prieta en 1989, en California; Nihonkai-Chubu en 1983, en Japón; Filipinas 1990; Costa Rica 1991; Kobe 1995, en Japón; y Manzanillo, México, en 1995.

Los desplazamientos laterales se desarrollan típicamente en depósitos de arenas sueltas y otros materiales granulares, donde el nivel freático se encuentra próximo a la superficie.

En los últimos 20 años se han logrado importantes avances en la comprensión de los factores principales que controlan la ocurrencia de licuación y desplazamientos laterales, derivado de lo anterior existe una urgente necesidad de continuar con estos esfuerzos orientados a mejorar los procedimientos de evaluación basados en un mejor entendimiento de los mecanismos de desplazamientos laterales con la finalidad de: a) reducir la incertidumbre en la predicción de los desplazamientos laterales, b) obtener una evaluación más precisa de la variación espacial en el fenómeno ya mencionado y c) evaluar la efectividad de los métodos de mejoramiento de suelos para disminuir los desplazamientos laterales.

Para los fines mencionados la centrífuga es una herramienta muy valiosa para la modelación de estos fenómenos.

### 3.7.1 Caso estudiado.

Se estudiaron los desplazamientos laterales y la licuación causados por el sismo del 16 de junio de 1964, en Niigata, cerca del Río Shinano, entre el puente Showa y el Puente Yachiyo, en Japón (figura 3.17).

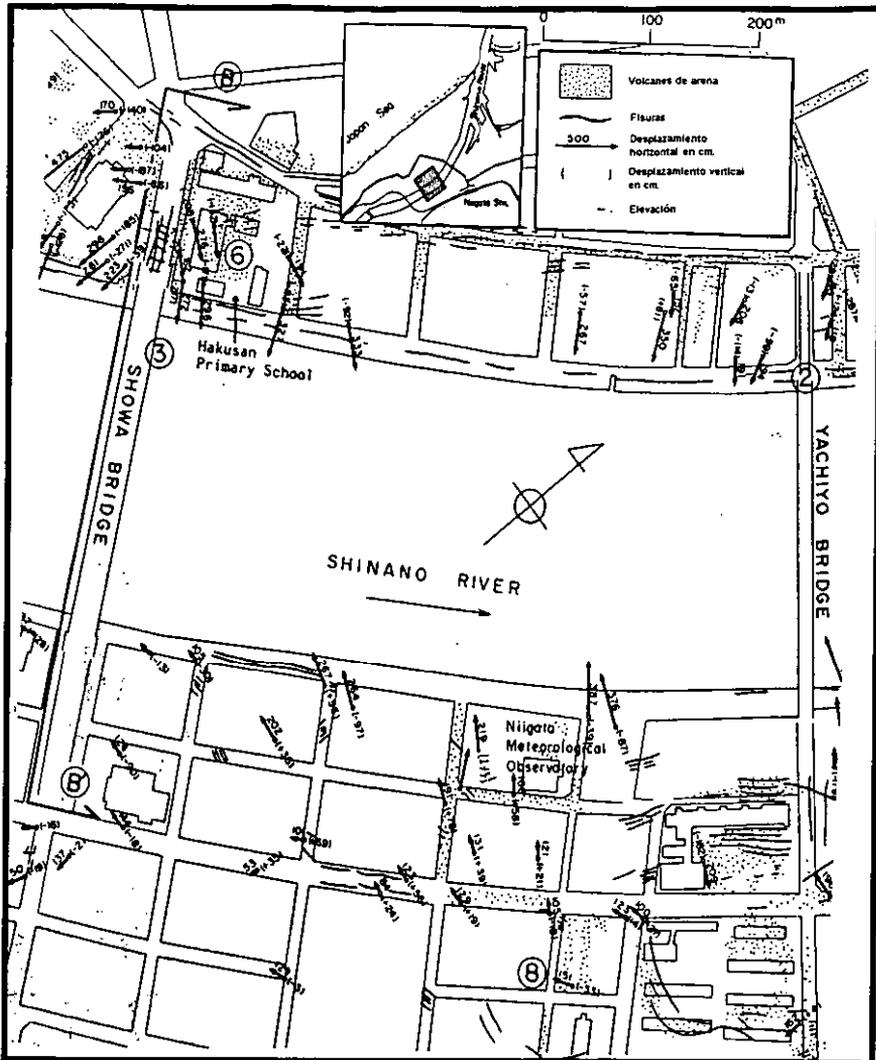
Este evento tuvo importantes repercusiones causando grandes daños a la ciudad de Niigata y sus alrededores. Un considerable número de edificios, puentes, muelles, líneas de abastecimiento de agua, electricidad, gas y de comunicación sufrieron severos daños.

Esto llevo a estudiar el fenómeno de licuación en arenas sueltas saturadas así como los daños causados al ocurrir: 1) asentamientos, 2) desplome de estructuras por reducción de capacidad de carga y 3) inclinación o colapso de estructuras de retención debido al incremento de la presión lateral y reducción del esfuerzo cortante en el suelo.

El sismo tuvo una magnitud de 7.5 en la escala de Richter y su epicentro se localizó en las coordenadas 38°21'N, 139°11'E, su foco a 40 kilómetros de profundidad, cerca de las costas de la Isla de Awa, ubicada a 50 km de la ciudad de Niigata.

De acuerdo con las mediciones de la Agencia de Meteorológica Japonesa, la mayor intensidad registrada fue de V, equivalente a VII u VIII en la escala de Mercalli Modificada (MMI). Generalmente, la aceleración máxima en la superficie se estimó entre 0.08 y 0.25g y se podría pensar que esta excitación no era lo suficientemente fuerte como para ocasionar los daños causados.

Los datos de la excitación del sismo fueron registrados en dos lugares de la ciudad de Niigata. El primero, obtenido en el sótano y techo de un edificio en Kawagishisho, el cual se encuentra muy cercano al río Shinano, de este lugar se obtuvo la siguiente información: durante la primera parte del registro (cerca de 7 segundos) la excitación con un periodo predominante de 0.1 segundos ocurrió con una amplitud de 0.5 g. Durante la segunda parte (7 a 11 segundos) la aceleración máxima alcanzada fue de 0.159g en el sótano y 0.184g en el techo y el periodo predominante se incrementó drásticamente a 0.8 segundos.



**Figura 3.17- Localización de la zona de estudio y las mediciones de campo de los desplazamientos laterales permanentes (Hamada 1992).**

Después de la segunda parte siguieron varias más, con un largo periodo de algunos segundos. Una de las razones probables para este drástico cambio en el periodo predominante en la excitación del sismo pudo haber sido el efecto de licuación.

La otra estación de registro se encontraba ubicada en el observatorio meteorológico de Niigata. Desgraciadamente los registros de desplazamiento en la dirección horizontal quedaron fuera de escala, por lo que no se pudo tener ningún registro en esta dirección. En lo que respecta a los datos registrados en la dirección vertical, la excitación principal continuó por más de 2 minutos.

En lo que concierne a los desplazamientos permanentes, fue posible su medición gracias a fotografías aéreas, se tomaron unas antes del sismo y otras posteriores al mismo, tomando puntos estratégicos se pudo determinar la magnitud de los desplazamientos, todo esto se complementó con las mediciones de campo existentes para lograr mayor veracidad.

### 3.7.2 Características del equipo empleado.

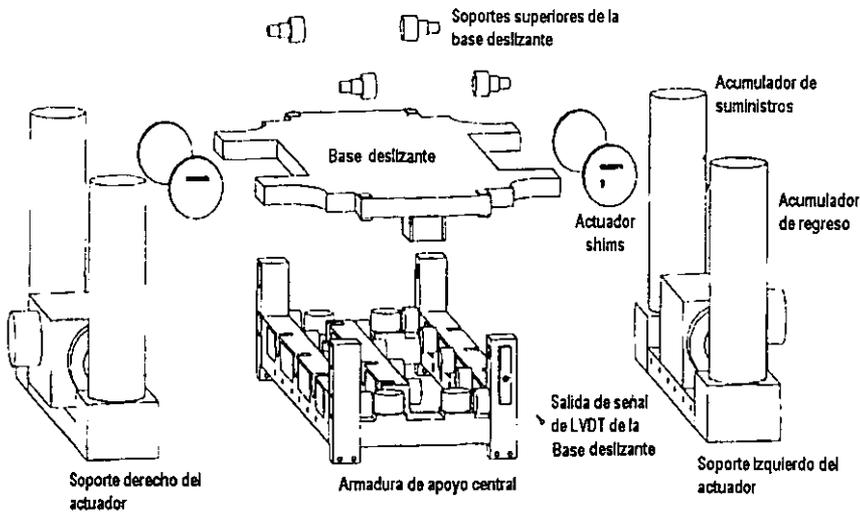
La centrífuga empleada fue la del Instituto Politécnico de Rensselaer, la cual es una centrífuga manufacturada en Francia por Acutronic, el modelo es 665-1, de 100 g-ton y de tres metros de radio. El espacio máximo disponible en la plataforma para colocar muestras es de 1.0 m de profundidad, 0.8 m de ancho y una altura de 1.2 m.

La centrífuga está equipada con 64 anillos deslizantes, de los cuales 50 son para señales análogas, 12 como fuente de poder y 2 para señales de video. Se cuenta también con una junta rotatoria hidráulica que contiene un total de 6 pasajes, dos de los cuales pueden resistir presiones hasta de 210 kg/cm<sup>2</sup>.

#### 3.7.2.1 Características del generador de sismos.

El generador de sismos (Figura 3.18) o simulador empleado de sismos tiene las características siguientes:

Capacidad de carga útil	400 kg
Dimensiones	90x70x50cm
Desplazamiento	12 mm
Velocidad pico	750 mm/seg
Aceleración pico a su máxima capacidad	30 g
Fuerza máxima del actuador	20 Ton
Frecuencia de operación	0-400 Hz
Rango de operación	Mayor a 100 g



**Figura 3.18- Simulador de sismos grande utilizado en la centrifuga de RPI.**

### 3.7.3 Programa de prueba.

El experimento consistía en evaluar el modelo de un talud homogéneo correspondiente al sitio anteriormente mencionado, y en las condiciones en las que sucedió el sismo de Niigata en 1964.

**Tabla 3.1- Características de los ensayos realizados.**

No. de ensaye	Nivel de gravedad	Aceleración máxima de la excitación	Viscosidad del fluido con respecto al agua	Angulo del Talud	Densidad Relativa de la Arena
Ensaye 1	60 g	0.2 g	60 $\nu$ (60 veces la viscosidad del agua)	33.69°	40%
Ensaye 2	120 g	0.17 g	120 $\nu$ (120 veces la viscosidad del agua)	33.69°	40 %

Se realizaron dos pruebas (Tabla 3.1) a distintas aceleraciones y viscosidades de fluido, con la finalidad de verificar que el fenómeno haya sido modelado correctamente, lo cual se conoce como modelado de modelos. El cual consiste en que un prototipo sea modelado a dos diferentes escalas y a sus correspondientes aceleraciones, si los

resultados al ser extrapolados a unidades del prototipo son consistentes, entonces se puede decir que el fenómeno fue modelado correctamente.

Se empleó un contenedor de paredes rígidas, con las siguientes dimensiones 87.5 cm de largo, 37 cm de ancho y 35.8 cm de altura. Se utilizó para los experimentos, arena fina de Nevada No. 120, ésta arena (Tabla 3.2) está compuesta predominantemente por partículas de cuarzo con pequeñas cantidades de feldespato, la forma de los granos varía de redondeada a sub-redondeada.

**Tabla 3.2- Características de la arena fina de Nevada**

Densidad específica	2.68
Peso volumétrico seco máximo	17.33 kN/m <sup>3</sup>
Relación de vacíos mínima	.516
Peso volumétrico seco mínimo	13.87 kN/m <sup>3</sup>
Relación de vacíos máxima	.894
D <sub>50</sub>	.15mm
Permeabilidad	0.0021 cm/seg

La instrumentación empleada (Tabla 3.3) consistió en instalar transductores de presión de poro (PPT), acelerómetros y transductores de desplazamiento (LVDT), con las siguientes especificaciones.

**Tabla 3.3- Especificaciones de los transductores.**

Transductores	Dimensiones	Masa (gramos)	Modelo
Acelerómetro	7x12	2.8	PCB 303*03
Transductores de presión de poro	6x12	2.5	Druck PDCR81
LVDT			
Diámetro	1.8	2.2	Schaevitz
extensión (Base de plástico)	35(diámetro) x 1(ancho)	2.2	MHR250

Las excitaciones en la base aplicadas en los modelos fueron 0.17 y 0.2 g debido a que las aceleraciones registradas en el prototipo oscilaban entre esos valores.

### 3.7.4 Preparación de la muestra y del modelo.

Los pasos que se siguieron para la construcción del modelo fueron los siguientes:

1. Se prepara la caja rígida donde se va a construir el modelo, se sella en todas sus juntas con silicón y se verifica que no se filtre el agua por las mismas.
2. Se coloca una membrana de látex en la paredes de la caja, para evitar la fricción del suelo con las mismas durante la prueba.
3. Se procede a pintar fuertemente una cantidad suficiente de área con pintura en aerosol.
4. Se consigue una caja de espaguetti y se procede a marcarlo de manera con un plumón permanente a cada centímetro.
5. Se calibran todos los LVDT con un voltímetro, para obtener su rango y factor de calibración.
6. Se verifica el funcionamiento correcto de los transductores de presión de poro.
7. Se verifica el funcionamiento correcto de los canales transmisores que se van a utilizar en la centrífuga.
8. Se procede a cubrir los acelerómetros piezoeléctricos miniatura con cera para evitar la entrada de agua a los mismos y que tengan un correcto desempeño.
9. Se pesa todo el material que va a ser colocado en la caja, esto por dos razones, la primera se debe a que se requiere un control, de la densidad relativa, en nuestro caso es de 40 % y la segunda es que se debe conocer el peso total del modelo para balancear la centrífuga.
10. Una vez que se pesó el material, se procede a su colocación dentro de la caja, lo cual se realiza por el método de pluviación en seco con un esparcidor en forma de "V", con una hilera de orificios de 2 mm de diámetro y una separación de 5 mm aproximadamente y un ancho total igual al de la caja utilizada. La pluviación consiste en esparcir a lo largo de toda la caja, moviendo hacia adelante y hacia atrás en repetidas ocasiones el esparcidor a una altura de aproximadamente 2 cm tratando de mantenerla constante para que se consiga una densidad relativa de un 40% aproximadamente.

11. A determinado espesor de la capa, el cual se mide con toda precisión y dependiendo de la escala del modelo se coloca la arena de color con un espesor de 2 mm, aproximadamente.
12. Durante la pluviación se procede a determinar la ubicación exacta de los instrumentos y su colocación.
13. Se repiten los últimos tres pasos hasta cumplir con la escala del modelo requerido.
14. Una vez que se llegó a las dimensiones requeridas, se procede a la inserción de espaguetis en el modelo de manera vertical y con la ayuda de tubos diminutos para facilitar la penetración en el suelo. El espagueti aunado a los estratos de arena de color forman un buen indicador de las deformaciones tanto vertical como horizontal.
15. Terminada la instalación de los espaguetis, el paso siguiente es el de colocar el modelo en la centrífuga con la ayuda de un montacargas, esto se debe de hacer con el mayor cuidado para evitar la alteración del modelo.
16. Una vez montado el modelo en la centrífuga, se procede a sujetarlo a la base de la plataforma del generador de sismos.
17. Se coloca una tapa de acrílico transparente sellada con un empaque, con grasa y atornillada a la caja para someter el modelo a un proceso de desairado, el cual consiste en colocar unas válvulas en las esquinas de la tapa y éstas a su vez se conectan a un compresor el cual actúa como aspiradora a una presión de 95 KPa, este proceso dura aproximadamente una hora, para extraer todo el aire que se encuentra en los vacíos en el suelo.
18. En estos modelos para su saturación se utilizó un fluido viscoso, el cual es una mezcla de agua con un polvo el cual se llama Metolose, fabricado por la compañía química Shin-Etsu (Shin-Etsu Chemical, 1997). Esta solución de Metolose al 2% en agua fue hecha para alcanzar una viscosidad de 60 veces la del agua (60 centi-stokes de viscosidad cinemática) requerida para el primer modelo; y 2.5% de polvo con respecto al peso del agua para una viscosidad de 120 veces la del agua (120 centi-stokes de viscosidad cinemática) requerida para el segundo modelo. Como referencia la viscosidad del agua a 20 grados centígrados es 1 centi-stoke. El propósito de utilizar el fluido viscoso se debe a que los modelos se ensayaron a 60g y 120g, a esa aceleración la permeabilidad del material aumenta proporcionalmente a la aceleración, por lo que utilizando un fluido con mucho mayor viscosidad: la simulación de la permeabilidad es lo más cercana a la existente en el prototipo.

Por ejemplo: Si se utilizara agua en un ensaye a 60g para modelar la licuación de un prototipo de arena completamente saturada, considerando una permeabilidad  $K$  de  $0.0021 \times 60 = 0.126$  cm/seg, la cual corresponde a una arena gruesa en el campo en lugar de una arena fina como se utilizó en el modelo (Tan y Scott, 1985).

Otra duda que puede surgir es, si el fluido viscoso (Metolose) afecta las propiedades mecánicas del suelo a ensayar. Resultados de laboratorio y pruebas en centrifuga han mostrado que las propiedades de la arena de nevada no se alteran cuando se utiliza Metolose (Dewoolkar et al., 1999; Stewart et al., 1998). Además, la densidad del fluido viscoso es  $1.01$  g/cm<sup>3</sup>, que es esencialmente idéntica a la del agua, por lo cual no es necesaria ninguna corrección.

19. Una vez que terminó el proceso de desairado, se procede a saturar el modelo lentamente hasta un nivel de aproximadamente 2 cm por encima del suelo, la saturación con el fluido viscoso tomó un tiempo aproximado de 24 horas.
20. Cuando se ha terminado el proceso de saturación se retira la tapa y se coloca un marco sujetado a la superficie de la caja donde se montaron los LVDT para verificar las deformaciones verticales.
21. Una vez bien sujeto el marco, se hacen las conexiones de todos los instrumentos en el canal destinado para cada uno y se sujetan los cables a las partes rígidas de la centrifuga con bandas fijadoras de plástico resistente, esto con la finalidad de que no se tenga ningún elemento suelto y pueda causar un accidente.
22. Se procede a conectar las mangueras hidráulicas que suministran aceite al simulador de sismos.
23. De acuerdo con el peso del modelo se mueve el contrapeso y se balancea el brazo de la centrifuga.
24. Una vez que se encuentra todo perfectamente instalado, se procede a verificar que todos los instrumentos tengan una señal adecuada en el sistema de adquisición de datos.

### 3.7.5 Ensaye del modelo y adquisición de datos.

A continuación se muestra de manera detallada como se ensayó el modelo y su sistema de adquisición de datos.

Una vez que se ha verificado el funcionamiento de todos los instrumentos, se procede a poner en funcionamiento la centrifuga, si el balance es correcto se sigue con la prueba y

si no es así, se le colocan unos bloques para balancear la máquina. Ya que ésta se encuentra correctamente balanceada se somete el modelo al campo gravitacional requerido para el ensaye en particular. La centrifuga cuenta con dos cámaras de video para monitoreo, una montada en el brazo, para ver de cerca el comportamiento del modelo y otra exterior para ver girar la centrifuga.

Para llegar a la aceleración final, ésta se va incrementando lentamente para no provocar alteraciones en el modelo, una vez alcanzada la aceleración requerida y consolidado el modelo, se envía por medio de la computadora una señal la cual provoca que el simulador de sismos aplique la excitación requerida en la base del mismo, cuando se aplica la excitación, los instrumentos transmiten los registros a otra computadora, la frecuencia de adquisición de datos es de 3000 puntos por segundo por canal, esto se mantiene por un periodo aproximado de 10 veces la duración de la excitación, hasta que las mediciones de presión de poro y los asentamientos se hayan estabilizado.

Cuando se termina la prueba se verifica que todos los registros se encuentren dentro del rango de medición de los instrumentos, si todos los registros son correctos se procede a escalarlos y a convertir las señales eléctricas en unidades de medición, utilizando los factores de calibración anteriormente obtenidos.

Ya que se tienen las mediciones, se procede a graficar los resultados para observar como se comportó el modelo durante la prueba, se analizan los resultados y se llega a las conclusiones.

### **3.7.6 Modelo No 1 ensayado a 60g y 60v.**

#### **3.7.6.1 Descripción general del modelo**

Este modelo simula un talud de arena de 33 grados de inclinación, con una altura superior de 10 metros en su extremo izquierdo y 5 metros en el extremo derecho. El modelo fue construido con arena fina de Nevada No. 120 y colocada a una densidad relativa de 40% con el proceso mencionado en el inciso anterior. La instrumentación de este modelo consta de acelerómetros (AH), medidores de presión de poro (PPT) y medidores de desplazamiento (LVDT) (Figura 3.19). Además se colocaron espaguetis y arena de color como indicadores de las deformaciones permanentes tanto horizontal como vertical.

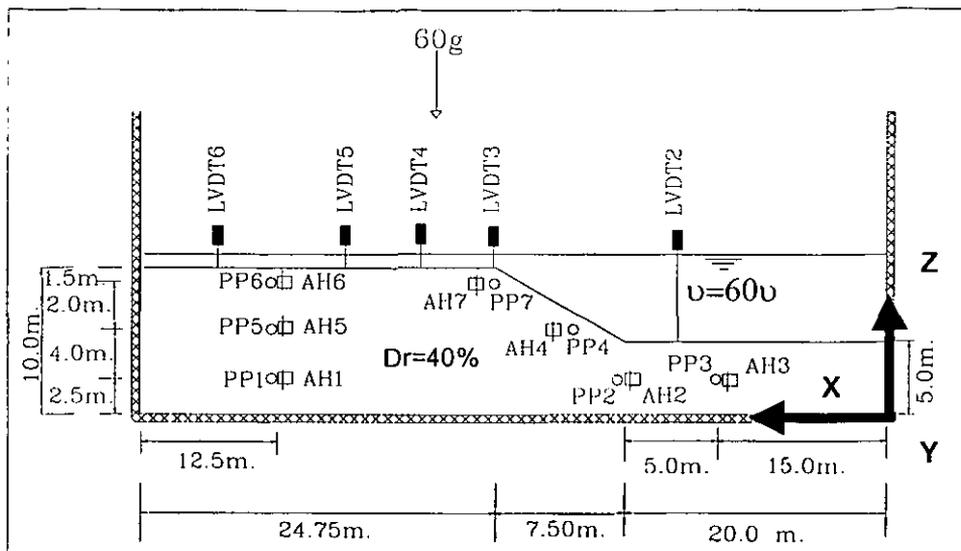


Figura 3.19- Modelo No. 1 ensayado a 60g

3.7.6.2. Localización de los instrumentos en el ensayo de Niigata a 60g.

La colocación correcta de los instrumentos es una de las partes fundamentales del ensayo, de ello la correcta adquisición de datos obtenidos por medio de los transductores y su correlación con las coordenadas del prototipo, para la interpretación de resultados.

En la tabla 3.4 se muestra la ubicación de los instrumentos, referenciadas en los ejes X, Y, Z de la figura 3.19 ; utilizando unidades del prototipo.

Tabla 3.4- Localización de los instrumentos en el ensayo de Niigata a 60g (Unidades de prototipo)

Transductor	Instrumento	Coordenadas (m)		
		X	Y	Z
Acelerómetro	AH1	39.75	11.82	2.5
	AH2	20	11.82	2.5
	AH3	15	11.82	2.5
	AH4	22.75	11.82	6.5
	AH5	39.75	11.82	6.5
	AH6	39.75	11.82	8.5
	AH7	27.5	11.82	8.5

**Tabla 3.4- (Continuación) Localización de los instrumentos en el ensaye de Niigata a 60g (Unidades de prototipo).**

	ID	X	Y	Z
LVDT	LVDT2	17	11.82	5
	LVDT3	30.4	11.82	10
	LVDT4	32.4	11.82	10
	LVDT5	35.4	11.82	10
	LVDT6	41.4	11.82	10
Transductor de presión de poro	PP1	39.75	7.89	2.5
	PP2	20	7.89	2.5
	PP3	15	7.89	2.5
	PP4	22.75	7.89	6.5
	PP5	39.75	7.89	6.5
	PP6	39.75	7.89	8.5
	PP7	27.5	7.89	8.5

### 3.7.7 Excitación registrada en la base del modelo.

En la prueba realizada a 60 g, se aplicó una excitación en la base de 0.2 g, con 20 ciclos de 1 Hz de frecuencia. El valor de aceleración máxima fue de 0.26 y la aceleración promedio 0.1g como se muestra en la tabla 3.5.

**Tabla 3.5- Características de la excitación**

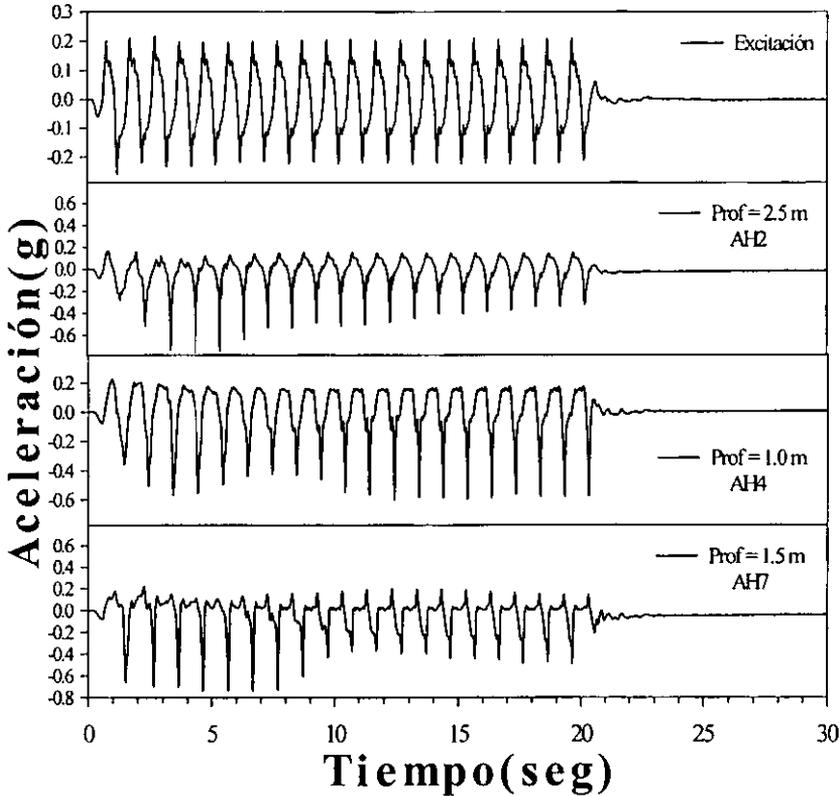
Ensaye 1	60g
Aceleración máxima	0.26g
Aceleración promedio	0.1g
Frecuencia	1 Hz.
No. de ciclos	20

### 3.7.8 Aceleraciones registradas.

#### 3.7.8.1 Aceleraciones registradas en el talud.

En la prueba realizada a 60g y saturada con un fluido viscoso de 60 veces la viscosidad del agua (60 $\nu$ ), la señal de aceleración de salida consistió en 20 ciclos de 0.2g y una frecuencia de 1 Hz. Los instrumentos AH2, AH4 y AH7 localizados en el talud y sus

alrededores (Figura 3.20), registraron una reducción en la amplitud de las aceleraciones positivas en los primeros 2 segundos, después de la reducción se muestran largos picos en la dirección negativa del talud.



**Figura 3.20- Registro de aceleraciones en el talud prueba a 60g.**

### 3.7.8.2 Aceleraciones registradas en campo libre.

En el caso de los instrumentos localizados en el campo libre AH1, AH5 y AH6 (Figura. 3.21) se registró una reducción en las aceleraciones después de los 2 segundos, pero en este caso la amplitud de la señal fue mucho menor que en la zona del talud, y no se

presentan los largos picos después de 7 segundos, como se observa en los registros de los acelerómetros localizados en el talud.

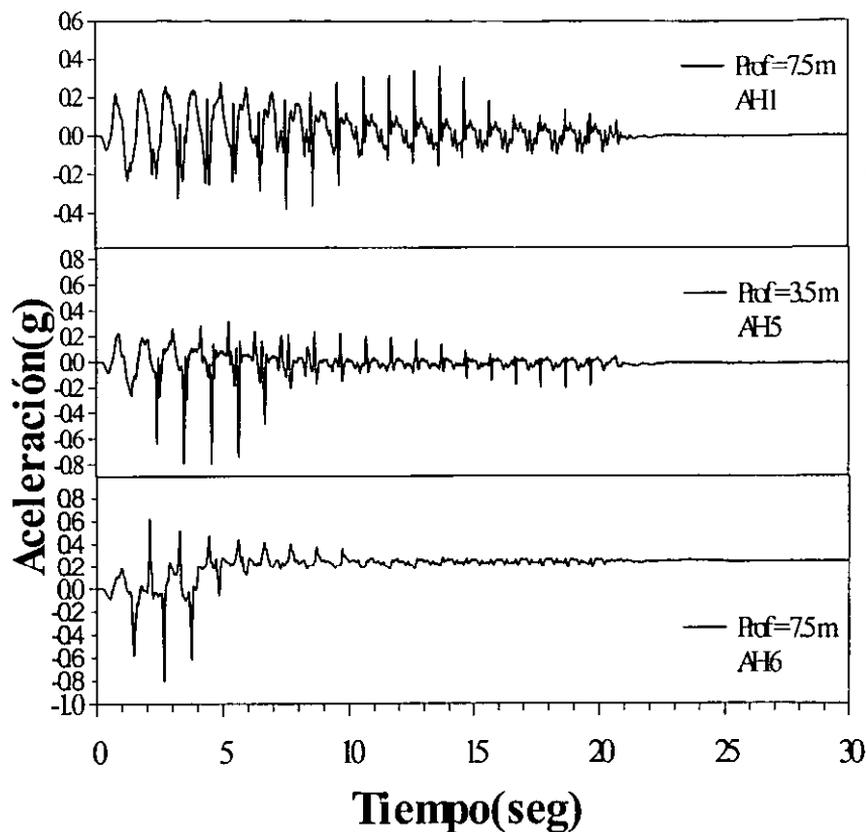


Figura 3.21- Aceleraciones registradas en el campo libre en la prueba a 60g

### 3.7.9 Registro de excesos de presiones de poro.

#### 3.7.9.1 Excesos de presiones de poro registrados en el talud.

En el ensaye a 60g, los transductores de presión de poro (PPT) localizados en el talud PP2, PP3, PP4 y PP7 (Figura 3.22) muestran que la licuación ocurrió después de los 2 segundos, debido a que en este tiempo las historias de exceso de presión de poro

alcanzaron la línea  $r_u = u/\sigma'_v = 1.0$ , lo cual significa que se igualan las presiones de poro y los esfuerzos efectivos y la resistencia al esfuerzo cortante tiende a ser nula, produciendo el fenómeno de licuación. En esta zona se presentó reducción en el exceso de presión de poro después de que ocurrió el fenómeno de licuación.

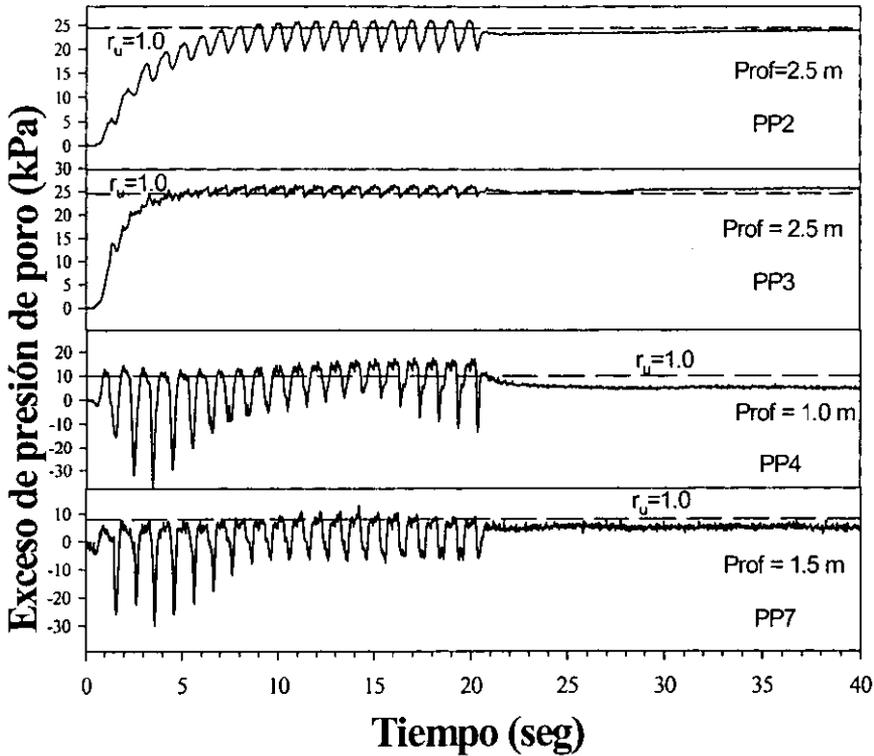


Fig. 3.22 Registro de exceso de presión de poro en el talud ensaye a 60g

### 3.7.9.2 Exceso de presiones de poro registrados en campo libre.

En el caso de los instrumentos localizados en el campo libre PP1, PP5 y PP6 (Figura 3.23) muestran que la licuación ocurrió unos segundos después que en la zona cercana al talud, pero en este caso no se observó una variación importante en el exceso de presión de poro después de que ocurrió la licuación.

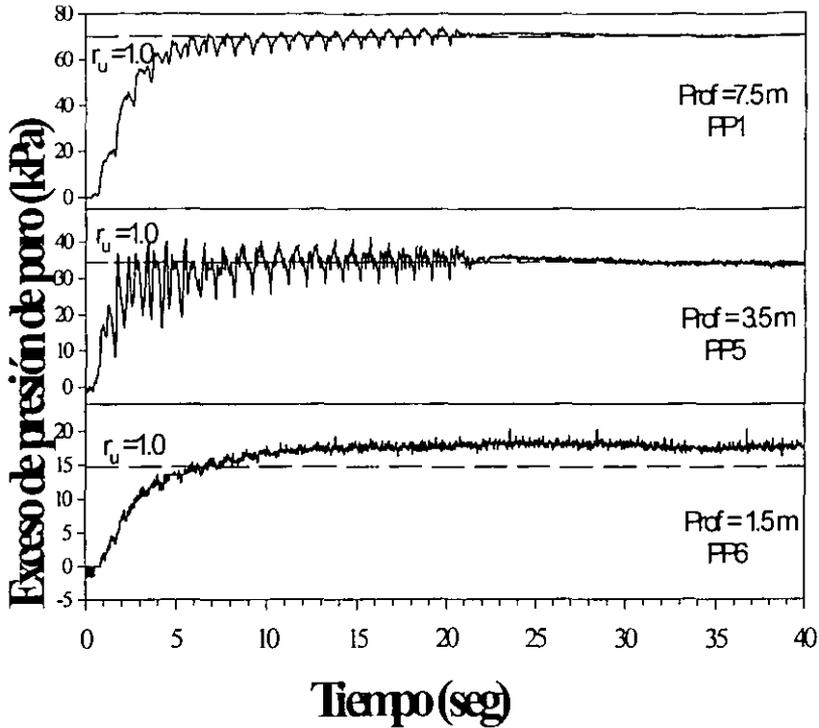


Figura 3.23- Registro del exceso de presión de poro en campo libre ensaye a 60g.

### 3.7.9.3 Isócronas en campo libre.

En la figura 3.24 se presenta la información piezométrica en Isócronas de exceso de presión de poro durante la excitación. La línea punteada en esta gráfica corresponde a los esfuerzos verticales iniciales ( $\sigma'_v$ ) con lo cual se indica los alcances de la licuación inicial. En la figura 3.24 se observa que la licuación inicial penetró a una profundidad mayor a 7.5 m (unidades de prototipo), que era donde se encontraba localizado el instrumento (PP1).

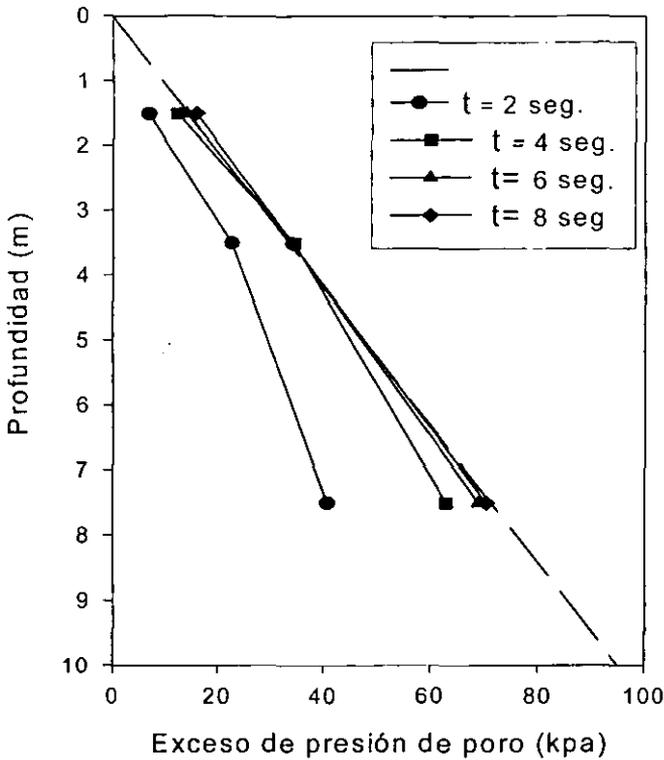


Fig. 3.24 Isócronas de exceso de presión de poro en campo libre.

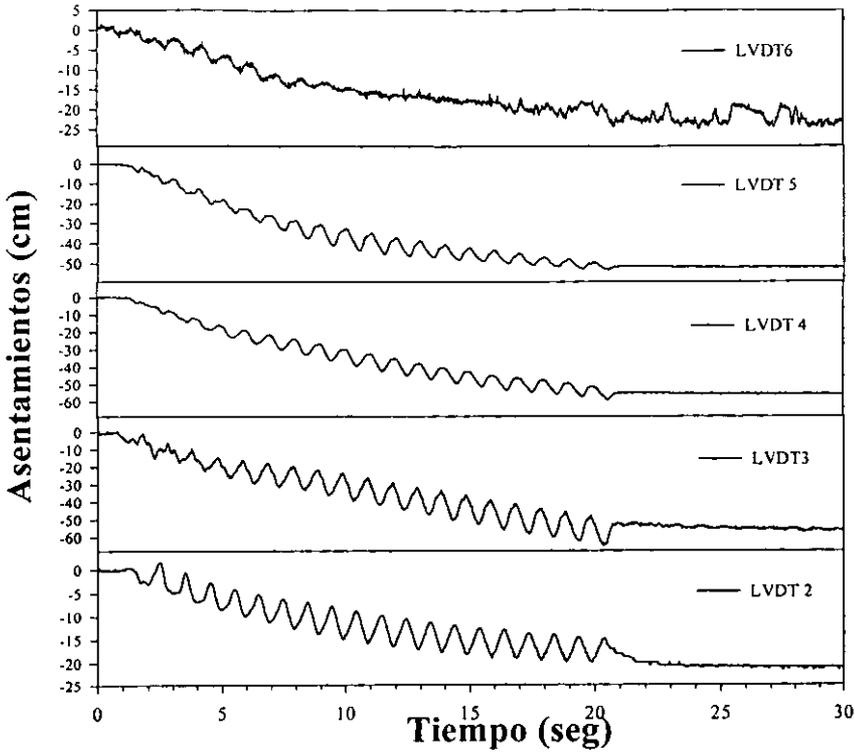
**3.7.10 Asentamientos registrados.**

Los asentamientos en la superficie del suelo fueron medidos utilizando transductores de desplazamiento (LVDT).

En el primer ensaye a 60g, los asentamientos superficiales registrados en unidades de prototipo por los LVDT estuvieron en el rango de 25 a 65 cm.

Los asentamientos máximos se localizaron en la cresta del talud donde se encontraban localizados el LVDT3 y LVDT4 (Figura 3.25).

Es necesario observar en la figura 3.25 que los asentamientos fueron incrementándose a medida que se acercaban al talud.



**Fig. 3.25- Asentamientos en la superficie en el ensaye a 60g.**

### 3.7.11 Desplazamientos laterales permanentes registrados.

Los desplazamientos laterales permanentes fueron registrados tomando la lectura de la posición inicial y final de las marcas del espagueti, esto se llevó a cabo calcando las marcas en un acetato, para después capturar las lecturas y obtener la magnitud de los vectores de desplazamiento.

La máxima deformación obtenida con los espaguetis fue localizada en el talud y fue mayor a los 1.9 m en unidades de prototipo en el ensaye a 60g (Figura 3.26).

En la Figura 3.27 se muestra la fotografía de los espaguetis deformados indicando la magnitud de los desplazamientos laterales.

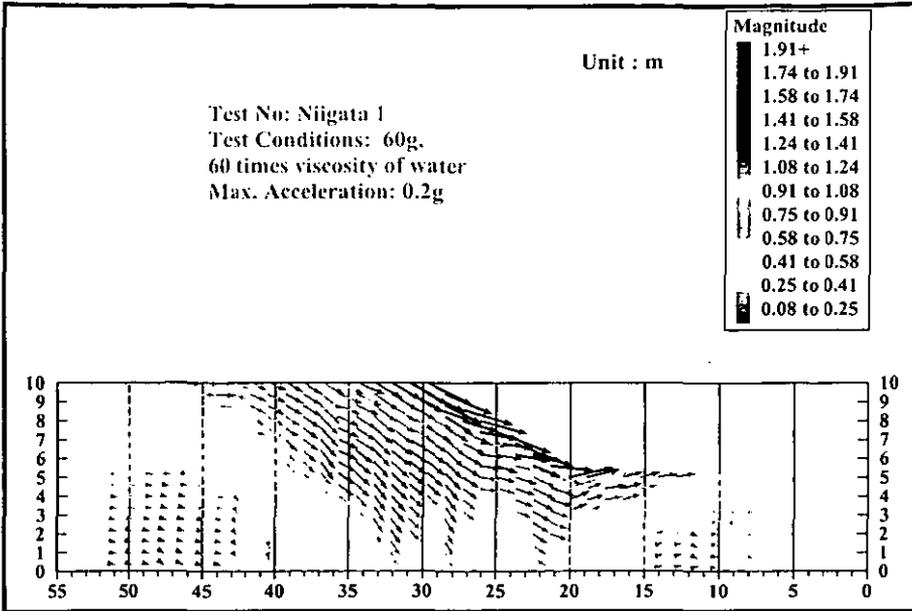


Figura 3.26- Vectores de desplazamiento en el ensaye a 60g.

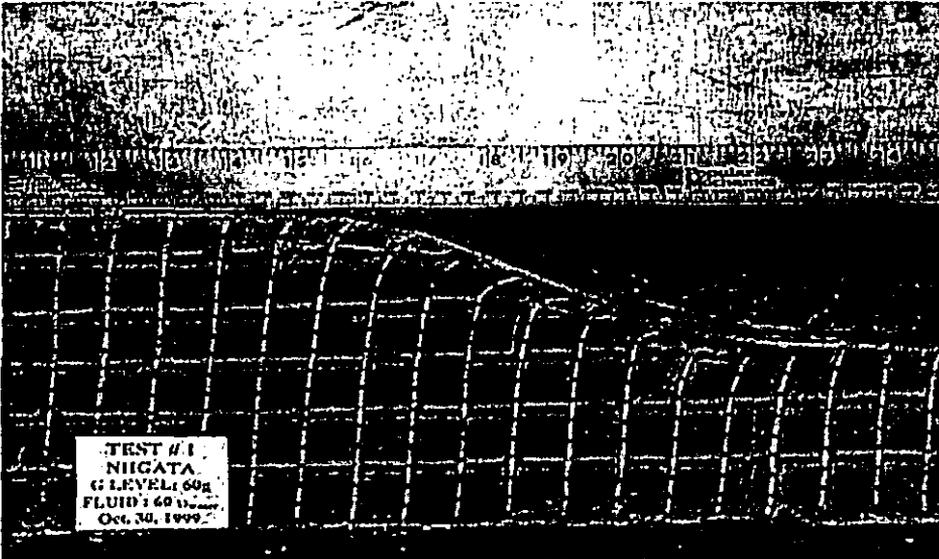


Figura 3.27- Espagueti deformado en el ensaye a 60g.

### 3.7.12 Realización de una segunda prueba.

Se realizó un segunda prueba con otro modelo (Modelo No. 2) ensayado: a 120 g y 120  $\nu$ . Se hicieron comparaciones entre los resultados obtenidos con los dos modelos a sus correspondientes aceleraciones, con la finalidad de ver si existía una concordancia razonable; es necesario mencionar que los modelos son prácticamente iguales, ensayados a distintas aceleraciones y con distintas viscosidades del fluido de saturación. Para cumplir con los factores de escala, la única diferencia es que la distancia de colocación de los instrumentos en campo libre con respecto al talud, es mucho mayor en el segundo modelo, esto se hizo con la finalidad de observar el comportamiento del suelo a medida que se aleja del talud.

El objetivo de ensayar el modelo No. 2 es el realizar el modelado de modelos, en este caso se ensayaron dos modelos basados en el mismo prototipo, pero en diferentes campos gravitacionales, por lo tanto diferentes relaciones de escala, todo ello con la finalidad de asegurar que los resultados sean congruentes al extrapolar a unidades del prototipo.

Este modelo fue ensayado a 120g, y el fluido viscoso utilizado fue de 120 veces la viscosidad del agua (120 $\nu$ ), la aceleración de excitación consistió en una onda sinusoidal con frecuencia de 1HZ y 20 ciclos de amplitud 0.17g.

**Tabla 3.6- Comparación de la excitación en la base de los 2 modelos.**

Ensayo 1	60g	Ensayo 2	120g
Aceleración máxima	0.26g	Aceleración máxima	0.19g
Aceleración promedio	0.1g	Aceleración promedio	0.08g
Frecuencia	1 Hz	Frecuencia	1 Hz
N <sub>o</sub> de ciclos	20	N <sub>o</sub> de ciclos	20
Viscosidad del fluido	60 veces la del agua	Viscosidad del fluido	120 veces la del agua

En la tabla anterior (Tabla 3.6) se observa que en el modelo ensayado a 60g, registra mayores aceleraciones en la base que el modelo ensayado a 120g; se observa también que la frecuencia y el número de ciclos son los mismos en ambos modelos.

Se obtuvieron resultados consistentes, tanto para la comparación hecha con el modelado de modelos, así como con resultados que se habían obtenido con otras investigaciones, como es el caso de los desplazamientos laterales medidos en campo por el Profesor Hamada en su reporte de 1992; en los ensayos de centrifuga los desplazamientos laterales permanentes oscilaron entre 2 y 3.5 m, mientras que en las mediciones reales hechas a partir de fotografías aéreas varían de 1 a 3.8 m en la zona en estudio.

En la parte del talud, donde los esfuerzos cortantes estáticos son distintos a cero, no se presentó reducción en las aceleraciones, en vez de ello se registraron grandes picos negativos en los acelerogramas, principalmente en la dirección hacia arriba del talud. En esta misma zona, a grandes deformaciones del orden del 1 a 2%, el esqueleto del suelo trata de dilatarse e induce una instantánea reducción en la presión de poro, así como su correspondiente incremento en esfuerzos efectivos y resistencia al esfuerzo cortante del suelo.

Las capas horizontales del modelo (campo libre) y el talud en arena suelta se comportan diferente. En las primeras, la propagación del frente de licuación aparece a través de las correspondientes aceleraciones horizontales, en donde las magnitudes mínimas son obtenidas cuando  $r_u$  se aproxima a 1.0, es decir, cuando los esfuerzos efectivos son casi nulos. Después de que el material está licuado, su resistencia disminuye considerablemente, por lo cual no puede tomar aceleraciones provenientes de la base y se aísla de la misma.

El frente de licuación se propagó de la superficie hacia abajo.

El modelado en centrifuga puede ayudar a clarificar mecanismos de licuación en el campo, incluyendo información sobre la respuesta dinámica, el fenómeno de consolidación y técnicas de mejoramiento del comportamiento del suelo ante sismos. Puede utilizarse también para cuantificar la influencia de factores importantes, tales como el desarrollo de procedimientos de evaluación en ingeniería y calibración de técnicas analíticas. El uso combinado de centrifuga, mesa vibradora y casos historia puede ampliar el panorama de conocimiento de licuación y desplazamientos laterales en arenas limpias provocados por sismos.

**CAPÍTULO 4****IMPORTANCIA Y CONVENIENCIA DE CONTAR CON UNA CENTRÍFUGA EN MÉXICO.****4.1. Ventajas y limitaciones.**

Estas son las ventajas de mayor consideración al emplear un centrífuga:

1. En una centrífuga se trabaja con un modelo construido geoméricamente similar a un prototipo y al ser ensayado se satisfacen algunas de las condiciones de similitud más relevantes para el problema, sobre todo de aquellos aspectos relacionados con la gravedad. Es la única manera con la que se utilizan modelos en pequeña escala en los cuales los esfuerzos debidos al peso propio son de la misma magnitud que los existentes en el prototipo y con ello se obtiene resultados comparables a los presentes en la escala real. En el caso específico de problemas en Geotecnia, si se usa el mismo suelo y los esfuerzos son iguales en ambos en puntos homólogos, entonces el comportamiento esfuerzo-deformación del modelo será el mismo que en el prototipo.
2. La centrífuga es una herramienta que permite de manera conveniente, proporcionar un campo alto de aceleraciones.
3. Se facilita el estudio experimental de ciertos fenómenos usando la centrífuga, partiendo del hecho de que la preparación de un modelo a pequeña escala es relativamente sencilla comparada con lo que implicaría realizar una prueba a escala real, y es más sencillo que realizar modelos matemáticos de ciertos fenómenos de gran complejidad.
4. La centrífuga permite la verificación de relaciones de escala y de resultados entre el modelo y el prototipo, la manera de hacerlo es trabajando con varios modelos a diferentes escalas y probándolos en los niveles de aceleración correspondientes a su escala, con la técnica conocida como el *modelado de modelos*.

5. Los experimentos en centrifuga se llevan a cabo para examinar la validez de modelos numéricos y pueden ser también empleados para la calibración de los mismos. Los resultados obtenidos a partir de un experimento modelado en una centrifuga pueden ser aceptados partiendo del hecho de que si el experimento fue preparado y desarrollado correctamente, sabiendo que un número de condiciones tales como las de frontera, de los materiales y niveles de esfuerzo, son satisfechas en el modelo y habiendo verificando con la técnica de modelado de modelos.
6. Gracias al modelado en centrifuga se ha podido constatar y verificar el comportamiento de algunas estructuras en ciertas condiciones que pueden llevarla a la falla. Como es el caso de taludes en los que se aprecian claramente los mecanismos de falla alcanzados.
7. Al ensayar modelos en una centrifuga se puede estudiar el comportamiento de las estructuras ante cierto tipo de condiciones que no se han presentado pero que podrían presentarse, como en el caso de una avenida extraordinaria en una presa de materiales graduados.
8. Con la ayuda del modelado en centrifuga se han adquirido nuevos conocimientos tanto de problemas presentes, como de aquellos que podrían tener lugar y que por su complejidad son difíciles de entender y analizar con los métodos existentes.
9. Gracias a esta técnica se pueden lograr aplicaciones directas a problemas reales que se presentan en Ingeniería.
10. Es la única manera realista de modelar fenómenos de gran escala, tales como efectos de una explosión nuclear.
11. Se puede aplicar a múltiples campos de investigación y para uso comercial.
12. Posee una gran versatilidad para estudiar diferentes suelos y sistemas suelo-estructura.
13. Es altamente útil para la evaluación de alternativas de diseño y técnicas de

mejoramiento, así como para la cuantificación de factores importantes.

14. La centrifuga es ideal para clarificar e identificar mecanismos de deformación y falla, que dan pie a la verificación de estas hipótesis consideradas en el análisis o la aportación de evidencias experimentales útiles para el desarrollo de nuevas teorías basadas en los mecanismos observados a grandes deformaciones.
15. Es ideal para estudiar el transporte de contaminantes en el subsuelo, ya que el tiempo de dispersión de un contaminante se ve aumentado  $N^2$  veces más rápido que el tiempo en la realidad. Un experimento que permite estudiar la dispersión de un contaminante en centrifuga que dure dos días nos proporciona información de un evento que se realizaría en 500 años.
16. El costo-beneficio de un experimento es conveniente respecto de otros métodos, como sería el trabajar directamente con prototipos a escala real.

A continuación se presentan algunas de las limitaciones más considerables:

1. Los niveles de aceleración varían con relación al radio de rotación, entre el eje de rotación y las diferentes profundidades en el modelo, en contraste a la constante gravitacional del campo de fuerza en la superficie terrestre ( $g$ ), por lo que se debe de tomar en cuenta esto para modelos de dimensiones considerables.
2. El efecto de Coriolis puede tener influencia si algunos movimientos ocurren dentro del modelo durante la prueba.
3. El periodo de inicio, entre el momento en el cual comienza a girar el brazo de la centrifuga hasta que es alcanzada la velocidad final de vuelo, no tiene una contraparte en ningún momento en el prototipo.
4. La aceleración tangencial puede ser significativa si las velocidades son cambiadas muy drásticamente en la centrifuga.

5. La similitud en cuanto al tamaño del grano es difícil de obtener cuando se concluye que ésta es necesaria.
6. Existe el riesgo de dañar a personas, objetos o inmuebles, durante la operación de una centrifuga de grandes dimensiones, esto debido a las enormes fuerzas que se desarrollan.
7. El costo de una centrifuga es elevado, así como su mantenimiento.
8. La centrifuga como la mayoría de las herramientas debe ser usada adecuadamente. Para su aplicación exitosa se debe entender y manejar correctamente según sus principios, ventajas y limitaciones.

#### 4.2. Una herramienta para el desarrollo de la Ingeniería Civil en México.

México con su extensión territorial de casi 2 millones de kilómetros cuadrados, con todo tipo de variedades de suelos, se ubica en una de las zonas del planeta con el mayor movimiento de las placas tectónicas, este último se presenta bajo la forma de una gran actividad sísmica y volcánica en la región. Situado sobre la placa Norteamericana que interactúa con la Placa de Cocos, la del Pacífico y la del Caribe, éstas han dado lugar a lo que ahora es el relieve y la orografía del país. La centrifuga como se ha visto, ofrece considerables ventajas en el campo de la Ingeniería Civil en la mayor parte de las áreas que la componen, con especial implicación en problemas referentes al estudio de los suelos, tanto en situaciones de cargas estáticas y dinámicas presentes al momento de un sismo. En México se han hecho pocas aplicaciones haciendo uso del modelado en centrifuga. En la actualidad, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se están llevando a cabo estudios y análisis de ensayos en centrifuga realizados sobre el sismo de Manzanillo que tuvo lugar el 9 de octubre de 1995, se estudian desplazamientos laterales debidos a licuación de arena, dichos ensayos fueron realizados en la centrifuga del Instituto Politécnico de Rensselaer, en Troy, Estados Unidos. Se han realizado también estudios de modelado en centrifuga por Ingenieros Mexicanos, como el mencionado en el capítulo anterior sobre un sismo que tuvo lugar en Niigata, Japón en 1964, el cual forma parte de un magno proyecto en el cual se pretenden modelar diversos casos historia mundiales en

donde se haya producido licuación, de esta manera se podrá tener un mejor entendimiento y aportar nuevos conocimientos sobre este fenómeno.

El modelado en centrífuga es una área en pleno y constante crecimiento, como se ha ido percibiendo en las últimas décadas. En nuestro país el contar con un equipo de estas características ofrecería un número considerable de beneficios, ya que se podrían estudiar una gran cantidad de problemas presentes en la actualidad con los suelos, sismos, contaminación de mantos acuíferos, en los que no se ha podido llegar a una solución, esto debido a la complejidad que implica el simular estos problemas.

Las centrífugas fueron diseñadas con la finalidad de simular las fuerzas gravitacionales en un modelo y de esta manera lograr los esfuerzos debidos al peso propio que crean los fenómenos de fractura o falla y de flujo.

La alternativa del modelado numérico en algunos casos requiere de un conocimiento detallado de las características del material y en otros casos simular el comportamiento de esfuerzo-deformación es complejo y difícil de caracterizar. El modelado numérico es extremadamente conveniente en cuanto a costo-beneficio, sobre todo con la utilización de computadoras, pero debemos recordar que el tiempo y los recursos económicos que se tienen que invertir para la obtención de datos para tales modelos son también parte del costo del mismo.

Se ha visto que existen más de un centenar de centrífugas y de equipos cada vez más sofisticados y poderosos trabajando en el mundo, estudiando diferentes problemas presentes en Ingeniería Civil, tanto en investigación como en consultoría para aplicaciones directas de campo. Existen fabricantes tanto de pequeñas, como de medianas y grandes centrífugas.

Las aplicaciones directas en las que se podrían construir modelos, con el fin de prevenir futuras fallas y corregir errores en obras que ya están construidas, son una parte importante de considerar para contar con un equipo de estas características en México.

Los efectos de un sismo como el que tuvo lugar en septiembre de 1985 y sus consecuencias sobre importantes estructuras de la Ciudad de México, pueden ser modelados en centrífuga, así como ensayos de las arcillas, el comportamiento de las cimentaciones, de pilotes y de pilas, se podrían proponer mejoras o descubrir situaciones

de riesgo que llegaran a presentarse en ciertas estructuras, como falla por efectos de hundimiento y asentamientos.

Antes de construir grandes obras, como presas, carreteras, cimentaciones o importantes edificaciones, se podrían modelar a pequeña escala y ensayarlos en una centrifuga y de esta manera evitar problemas que podrían llegar a presentarse, los cuales se hubieran omitido o no desconocieran. En México, esto podría aplicarse a un gran número de problemas existentes, como es el caso de autopistas y carreteras en las que se presentan fallas en taludes, con esto se podrían ofrecer distintas alternativas de solución.

En México han ocurrido fallas por licuación en litorales y zonas costeras afectando importantes áreas de desarrollo urbano, económico e industrial, desafortunadamente sólo se han estudiado con detalle algunas de ellas. Existen casos documentados como lo son los efectos de los terremotos de 1959 en Jaltipan y Coatzacoalcos, en Chiapa de Corzo en 1975, en Lázaro Cárdenas en 1976, en el Valle de Mexicali en 1980, nuevamente en Lázaro Cárdenas en 1985, en varios poblados de Colima y Jalisco en 1995 y Tlaxcala en 1999. La licuación ocurre únicamente en suelos granulares saturados principalmente en arenas. El fenómeno de licuación se puede volver a presentar en lugares en los que ya se ha registrado anteriormente, así como en zonas con alto potencial de licuación y causar grandes daños, por lo que se deben de tener presentes estos lugares y estudiarlos detalladamente; hacerlo con la ayuda de modelos en centrifuga se aportarían grandes beneficios para dar solución, a las técnicas de mejoramiento, aportando nuevos conocimientos sobre problemas existentes o susceptibles de ocurrir.

Con la ayuda de una herramienta de este tipo se puede simular el comportamiento de las cimentaciones, en México y más precisamente en la ciudad capital se han tenido problemas con las cimentaciones de importantes edificios principalmente del centro de la ciudad (como la catedral de la ciudad de México) la cimentación de dichos edificios podría ser modelada y así corregir los problemas que enfrentan de hundimiento diferencial y todo lo que esto conlleva.

La mayor parte de las presas en México tienen años de haber sido construidas, algunas han presentado fallas de diversa magnitud, dichas presas también podrían ayudarse de

está técnica para conocer su comportamiento ante ciertas situaciones así como corregir o evitar que tengan riesgos de falla.

El modelado en centrifuga se puede utilizar en investigación y aportar nuevos conocimientos, pero también se puede emplear para estudiar problemas que estén enfrentando nuevos proyectos, como podrían ser los estudios requeridos para la construcción del nuevo aeropuerto para la Ciudad de México. También en el caso de re-acondicionamiento de obras existentes ofrece igualmente importantes beneficios y criterios de diseño.

Una gran cantidad de países en el mundo no cuenta con una centrifuga de este tipo, México es uno de ellos. Al contar con un equipo de estas características se podrían conducir estudios en conjunto con centros de investigación de otros países, especialmente con los latinoamericanos en donde sólo Brasil cuenta una centrifuga de poca capacidad y tamaño.

Actualmente en el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), se está trabajando en la reevaluación de la estabilidad de plataformas marinas ante el oleaje. Este problema ya ha sido modelado en centrifuga en otros países, ya que el oleaje puede simularse en una centrifuga. Por lo anterior, en la industria petrolera Mexicana existe un campo considerable de trabajo y de estudio a partir de esta herramienta.

**CAPÍTULO 5****CONCLUSIONES.**

El modelado en centrífuga ha demostrado ser una técnica altamente efectiva para trabajar con modelos y reproducir correctamente los estados de esfuerzos que se encuentran en la realidad, los datos pueden ser obtenidos rápidamente y de manera económica con variables cuidadosamente controladas. Los resultados pueden ser usados para determinar mecanismos de falla, verificar observaciones de campo y calibrar modelos numéricos, permitiendo de esta manera analizar, cuantificar y resolver problemas que son complejos o imposibles de alcanzar por otros métodos.

Se deben tener cuidados especiales con los materiales empleados, la instrumentación, la construcción de los modelos, además de tener un control de las condiciones más relevantes que pudieran afectar el comportamiento del modelo y afectar los resultados. Si se modela correctamente, los resultados obtenidos con la centrífuga serán altamente confiables.

La centrífuga es una herramienta muy importante para la investigación en el campo de la Geotecnia, así como de otras áreas de la Ingeniería Civil, ofrece un gran potencial para la experimentación de fenómenos complejos.

El modelado en centrífuga es una herramienta más de apoyo para el desarrollo de nuevas investigaciones que permite la resolución a problemas existentes, así como una técnica que trabaja en conjunto con el modelado analítico y computacional proporcionando resultados confiables que permiten llegar a conclusiones válidas.

Esta herramienta ha demostrado ser altamente efectiva en investigación y en aplicaciones directas de campo, pero también puede ser de gran utilidad como herramienta educacional para alumnos de Geotecnia, ya que muchos fenómenos presentes en la realidad pueden ser apreciados en modelos a pequeña escala, como lo son: los mecanismos de deformación y falla, así como la verificación de teorías de consolidación y verificación de métodos numéricos entre otros.

Ha demostrado ser una herramienta con la cual se pueden obtener resultados

comparables con los obtenidos en la realidad, además de tener la posibilidad al realizar el modelado de modelos, de verificarla por medio del mismo modelado, lo que le ha valido ganarse la posición en la que se encuentra como un instrumento indispensable para la investigación en Ingeniería. En la actualidad es una herramienta que se utiliza cada vez en un mayor número de aplicaciones y día a día se desarrollan nuevos instrumentos para ser utilizados con la centrífuga, por lo que los campos que abarcan los estudios y experimentos en centrífuga son cada vez más variados. No debe olvidarse que la centrífuga es una herramienta, pero como en el caso de todas éstas, se debe usar adecuadamente.

El modelado en centrífuga, de problemas de Ingeniería, ofrece solucionar problemas en tiempos relativamente cortos a un razonable costo-beneficio, puesto que hacer pruebas a escala real tiene un costo muy elevado y en algunos casos no es posible.

México es un país en el cual se cuenta con importantes desarrollos, conocimientos e investigación en Ingeniería Civil, los que en su mayoría son de gran calidad. Existen importantes centros de investigación en los cuales la planta de investigadores está al nivel de las existentes en los centros más importantes del mundo, importantes empresas han nacido en el país y éstas exportan sus técnicas y realizan proyectos en el extranjero. El campo de la Geotecnia en México tiene un importante reconocimiento en el ámbito mundial, sin embargo respecto al modelado en centrífuga no existen trabajos desarrollados con la ayuda de esta herramienta. El contar con una centrífuga ofrece a nuestro país la posibilidad de lograr innovadores, nuevos e importantes avances e investigaciones en áreas difíciles de estudiar por su complejidad, es una alternativa tanto de investigación propia como de colaboración con otros países para centros de investigación, empresas publicas y privadas que requieran de estudios realizados con estos equipos.

Los problemas que se pueden estudiar con la centrífuga son muy variados: desde problemas de deformaciones, asentamientos, estabilidad de taludes, estructuras de retención, cortinas de presas de tierra y enrocamiento, cimentaciones, túneles, flujo de agua, sismos, transporte de contaminantes, efectos de una explosión, problemas causados por el oleaje en plataformas marinas y puertos, así como una gran cantidad de aplicaciones más.

## BIBLIOGRAFÍA.

- Arulanandan, K. Yogachandran, C., Muraleetharan, K.K., Kutter, B.L. y Chang, C.S., (1988). "Seismically Induce Flow Slide on Centrifuge". *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 12, December, 1442-1449.
- Bielza A., (1999). "Manual de técnicas de mejoramiento del terreno". U.D. proyectos, Madrid 1999, pp 50-51.
- Bucky, P.B. (1931). "Use of modelas for the study of mining problems. Am. Inst. Min. Met. Eng, Tech. Pub. 425,pp 28.
- Cheney, J. A. y Fragaszy, R. J., (1984). "The centrifuge as a research tool". *American Society for Testing and Materials*, pp 182-187.
- Cheney, J. A., Fragaszy, R. J., y Schofield, A. N., (1984). "Drum Centrifuge for Geotechnical Research". *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 7, No. 4, Dec., pp 188-194.
- Corté, J. F. (1988). "Preface to Centrifuge 88". *Proceedings of the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modeling*, Corté, J. F. (ed.), Balkema A.A.
- Collins, B., Znidarcic, D., y Goddery, T., (1997). "A new instructional Geotechnical Centrifuge". *Geotechnical News*, September 1997, pp 32-35.
- Craig, W.H., (1998). "On the uses of centrifuge". *Centrifuge 88, Proceedings of the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling*, Balkema A.A., Rotterdam, pp 1-6.
- Craig W.H., (1995). "Geotechnical centrifuges: past, present and future". *Geotechnical Centrifuge Technology*, Edited by R.N. Taylor, Blackie Academic & Professional, pp.1-18.
- Craig, W. H., (1989). "Edouard Phillips and the Idea of Centrifugal Modeling". *Géotechnique*, Vol. 39, pp. 697-700.
- Croce, P., Pane, V., Znidarcic, D., Ko, H.-Y., Olsen, H. W., y Schiffman, R. L. (1984). "Evaluation of Consolidation Theories by Centrifuge Modeling". *Proc. of the symposium on Application of Centrifuge Modelling to Geotechnical Design*. Craig, W. H. (ed.), Manchester, 16-18 April, Balkema, Rotterdam, pp. 380-401.
- Dewoolkar, M. M., Ko, H.-Y., Stadler, A. T., y Astoneh, S. M. F., (1999). "A Substitute Pore Fluid for Seismic Centrifuge Modeling". *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 22, No. 3, September, pp 196-210.
- Dobry, R. y Liu, L., (1992). "Centrifuge modelling of soil liquefaction". *Post Conference Proceedings, Tenth World Conference on Earthquake Engineering*. Madrid, España, pp 6801-6809.
- Elgamal, A.-W., Dobry, R., Van Laak, P., y Nicolas-Font, J., (1991). "Design, Construction and Operation of a 100 g-ton Centrifuge at RPI". *Centrifuge 91*, Balkema A.A., pp 27-34.

---

Garnier, J. y Cottineau, L.M., (1988). "La centrifugeuse du LCPC: Moyens de préparation des modèles et instrumentation". Centrifuge 88, Corté, J.F. Balkema, Rotterdam, pp 83-92.

Hushmand, B., Scott, R. F., y Crouse, C. B., (1988). "Centrifuge liquefaction studies in a laminar box". Géotechnique 38(2), pp 253-262.

Jia P.-Z, Wang W.-H., y Ru L.-A., (1988). "The survey of conceptual design for a 450 g-t Geotechnical centrifuge". Centrifuge 88, Proceedings of the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling, Balkema A. A., Rotterdam, pp. 17-28

Katagiri, M., (1988). "Okamura, Cone penetration test". Centrifuge 98, Proceedings of the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling, Balkema A. A., Rotterdam, pp 1059-1065.

Kimura, T., (1998). "Development of geotechnical centrifuge in Japan". Centrifuge 98, Proceedings of the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling, Balkema A.A., Rotterdam, pp 945-954.

Ko, H.Y., (1988). "Summary of the state-of-the-art in centrifuge model testing". In Centrifuges in Soil Mechanics (eds Craig, W.H., James, R.G. y Schofield, A.N.), Balkema, Rotterdam, pp. 11-18.

Kutter, B. L., (1995). "Recent advances in centrifuge modeling of seismic shaking". Proceedings of the Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, S. Prakash (ed.), St. Louis, MO, April 2-7, 1995, Vol. II, pp 927-941.

Ledbetter, R. H., (1991). "Large centrifuge: a critical Army capability for the future". Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Miscellaneous paper GL-91-12, pp 1-100.

Ovesen, N.K., (1979). "The scaling relationship". Panel Discussion. Proc. 7<sup>th</sup> Euro. Conf. Soil Mech. Found. Eng, Brighton, No. 4, pp 319-323.

Phillips, E., (1869). "De l'équilibre des solides élastiques semblables." C.R. Acad. Sciences, Paris, 68, pp 75-79.

Phillips, R., (1995). "Centrifuges in modelling: practical considerations". Geotechnical Centrifuge Technology (ed Taylor, R.N.), Blackie Academic and Professional, Glasgow, pp. 34-60.

Pokrovsky, G. I. y Federov, I. S., (1936). "Studies of Soil Pressures and Soil Deformations by Means of a Centrifuge". Proc. of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp 70-70.

Randolph, M.F., Jeweel, R.J., Stone K., y Brown, T.A., (1991). "Department of civil Environmental Engineering". Centrifuge 91, 1991 Balkema Rotterdam.

- Savidou, C. (1988). "Centrifuge Modelling of heat transfer in soil". Centrifuge 98, Proceedings of the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling, Balkema A.A., Rotterdam, pp 583-591.
- Schofield A. N, (1988). "Geotechnical centrifuge development can correct soil mechanics errors". Centrifuge 98, Vol. II, September 1998. pp 92.
- Scott, R.F., (1988). "Physical and numerical models". Centrifuge in soil mechanics, Craig, James & Schofield (ed.), Balkema, pp 103-115.
- Siddiquee, M.S.A., Tanaka, T. and Tatsuoka, F., (1992). "A numerical simulation of bearing capacity of footing on sand". Proc. of 27th. Annual Meet. JSSMFE, Vol. 2, pp 1413-1416.
- Steedman, R. S. and Ledbetter, R. H. (1994). Centrifuge Modelling of Earthquake Problems. Proc. of the International Workshop on Remedial treatment of Liquefiable Soils, Tsukuba Science City, Japan, July 4-6. Task committee on Soil Behavior and Stability During Earthquake U.S.-Japan. Panel on Wind and Seismic Effect, U.S.-Japan Cooperative Program in Natural Resources.
- Taboada V.M., (1996). "Modelado en centrífuga de problemas geotécnicos durante sismos: teoría equipo utilizado y herramientas de interpretación". XVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Morelia 96, Michoacán , Vol. 1, pp 429-435.
- Takemura, J., (1998). "General". Centrifuge 98, Proceedings of the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling, Balkema A.A., Rotterdam, pp 1045-1046
- Takemura, J., (1998). "Methods for preparation of clays samples". Centrifuge 98, Proceedings of the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling, Balkema A.A., Rotterdam, pp 1057-1058.
- Tan, T. S. y Scott, R. F. (1985). Centrifuge Scaling Considerations for Fluid-Particle Systems. Géotechnique, Vol. 35, No. 4, pp. 461-470.
- Tatsuoka, F., Okahara, M., Tanaka, T. Tani, K., Morimoto, T. y Siddiquee, M.S.A., (1991). "Progressive failure and particle size effect in bearing capacity of a footing in sand. ASCE Geotechnical Engineering Congress 1991, Vol. II (Geotechnical Special Publication 27), pp. 788-802.
- Taylor, R.N. (1995). "Centrifuges in modelling: principles and scale effects". Geotechnical Centrifuge Technology (Ed. Taylor, R.N.), Blackie Academic and Professional, Glasgow, pp 19-33.
- Ueno K., (1998). "Methods for preparation of samples". Centrifuge 98, Proceedings of the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling, Balkema A.A., Rotterdam, pp 1047-1055
- Van Laak, P. A., Elgamal, A.-W., y Dobry, R., (1994). "Design and Performance of an Electrohydraulic Shaker for the RPI Centrifuge". Centrifuge 94, Proceedings of the

---

International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling, Balkema A.A., Rotterdam, pp 139-144.

Whitman, R. V., Lambe, P. C., and Akiyama, J. (1982). Consolidation During Dynamic Tests on a Centrifuge. ASCE, Physical Modeling of Soil Dynamics problems, Session No. 67, ASCE National Convention, Las Vegas, Nevada, April 26-30.

Whitman, R. V., y Arulanandan, K., (1985). Centrifuge Model Testing with Dynamic and Cyclic Loads. Proc. Advances in the Art of Testing Soil Under Cyclic Conditions, Khosla, editor, ASCE National Convention, Detroit, Michigan, October, pp 255-285.

Zimmie, T. F., (1995). "Geo-environmental research using centrifuges", Control technology, Gulf Publishing Co., Vol. 9, Chapter 10, pp 335-366.

#### **World wide Web:**

##### **Información:**

<http://geotech.cv.titech.ac.jp/~cen-98/>

<http://www.engr.mun.ca/~ccore/cgs/tc2/cusers.htm>

<http://www.c-core.ca/icpmg/>

<http://geotech.cv.titech.ac.jp/~cen-98/Library/MAIN.HTM>

##### **Fabricantes:**

<http://www.actidyn.fr/>

<http://www.g-max.co.uk/>

##### **Centros de Investigación:**

<http://cgm.engr.ucdavis.edu/>

<http://www.dundee.ac.uk/civileng/research/geotech/centrifuge/manual/manual.html>

<http://www.rpi.edu/~dobryr/centrifuge/>

<http://www-civ.eng.cam.ac.uk/geotech/facilities/scchome.html>