

01149
22



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA**

**MODELADO EN CENTRIFUGA DE CRATERES PRODUCTO DE
EXPLOSIONES SOBRE LA CORONA DE TERRAPLENES**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA
(G E O T E C N I C A)**

P R E S E N T A

SALVADOR PEÑA HARO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. VICTOR M. TABOADA URTUZUASTEGUI



MEXICO, D.F.

2003

6



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.

Dedicatoria

En virtud de la empresa que culmina, con estas breves pero sinceras palabras, deseo dedicar esta obra y todo el trabajo que ésta conllevó, a mi esposa de quien siempre he recibido apoyo y cariño, a Sabina, a mis queridísimos padres y excelente hermana.

Autor: Salvador Peña Hare

Fecha: 17/nov/05

Lugar: Salvador Peña Hare

Agradecimientos

Muchas personas e instituciones colaboraron de alguna forma con el desarrollo de mis estudios de posgrado, el cual culminan con este trabajo, por lo que deseo expresarles mi más profundo agradecimiento con los siguientes párrafos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a sus profesores, por mi formación profesional, y muy en especial al Dr. Víctor M. Taboada Urtuzuástegui, por su apoyo e interés en el desarrollo de esta tesis y en mi estancia de investigación en el extranjero.

A la Dirección General de Estudios de Posgrado, por haberme otorgado ayuda económica para mi estancia de investigación en el extranjero.

Al Rensselaer Polytechnic Institute, por abrirme sus puertas y por todas las facilidades prestadas. Al Dr. Thomas Zimmie, quien hizo posible mi estancia y me aceptó en su proyecto de investigación, así como al Dr. Tarek Abdoun, por la ayuda prestada durante el desarrollo de los experimentos y manejo de la centrífuga.

A la familia Kasson, por toda la ayuda brindada y por haber hecho la estancia lo más placentera posible.

A mis sinodales, por el tiempo invertido en la revisión de esta tesis y por sus observaciones

A mi esposa, por su apoyo y ayuda en las traducciones.

Finalmente, y no por eso menos importante, a mis familiares y amigos

Resumen

En el presente trabajo se modelaron en centrífuga cráteres producto de detonaciones sobre la cresta de terraplenes. El nivel de aceleración fue de 80 veces la gravedad terrestre, con lo cual fue posible simular explosiones en el prototipo de hasta 1327 kg de TNT.

Se modeló un terraplén típico homogéneo de tierra el cual tenía un ancho de cresta de 3.7 m, taludes de 2.5:1 y una altura de 5.5 m, lo cual resulta en una base de 31.4 m. Los explosivos fueron detonados en la superficie de la corona.

Esta investigación fue dividida en tres series. La primera consistió en hacer detonaciones sobre una superficie plana de arena seca de Nevada con el objetivo de estudiar la influencia de la posición de la carga en la forma de cráter. Se encontró que la carga parcialmente enterrada creó el cráter más grande, mientras que la carga colocada horizontal sobre la superficie produce el cráter más pequeño.

En la segunda serie se llevaron a cabo detonaciones en una mezcla de arena de Nevada 85% con Kaolín 15% y con un contenido de humedad del 7%, el material fue compactado y se fabricó una superficie plana. Se encontró que los cráteres formados en esta mezcla de suelo fueron menores que los obtenidos en la arena seca. También se estudió la influencia de colocar dos cargas juntas en la forma del cráter, resultando que este arreglo creaba cráteres más grandes.

En la tercera y última serie de pruebas se realizaron detonaciones sobre la corona de terraplenes hechos del mismo tipo de suelo que en la segunda serie. Se analizaron las dimensiones aparentes de los cráteres; la profundidad, radio, volumen y fueron graficados contra la masa escalada de explosivos en una equivalencia de TNT.

Para poder evaluar el daño producido al terraplén, se reportaron las dimensiones de la abertura creada en los taludes. La profundidad máxima de la abertura fue de 0.56 m con una carga explosiva de 1 326 kg, al comparar este resultado con el bordo libre recomendado

de 0.9 m se puede concluir que aparentemente el agua no fluirá a través del terraplén pero los taludes pudieron haberse dañado de tal manera que no puedan soportar la presión del agua, lo anterior no pudo ser estudiado, ya que los terraplenes se modelaron sin agua en el embalse lo cual representa la situación menos crítica. También se obtuvieron las dimensiones del cráter, y la profundidad máxima para la misma carga fue de 1.76 m en el centro de la cresta.

Tabla de Contenido

Resumen	7
Introducción	13
Planteamiento del problema, visión y objetivos	15
1. Antecedentes	17
1.1 Principios de la centrifuga	17
1.1.1 Leyes se escala	19
1.1.2 Errores	21
1.2 Cráteres	28
1.3 Contribuciones de la centrifuga a la tecnología del cráter	33
2. Equipo e instalaciones de la centrifuga del Rensselaer Polytechnic Institute (RPI)	41
2.1 Centrifuga geotécnica del RPI	41
2.2 Contenedor	44
2.3 Medición del cráter	44
2.4 Detonadores	46
2.4 Colocación de los detonadores	48
2.5 Procedimiento de prueba	49
3. Modelado de explosiones sobre una superficie de arena plana	53
3.1 Descripción del modelo	53
3.2 Resultados	55
3.3 Análisis	58
4. Modelado de explosiones sobre una superficie plana de arena y arcilla	63
4.1 Prueba de permeabilidad	63
4.2 Prueba Proctor	64
4.3 Pruebas UU	65
4.4 Descripción del modelo	67
4.5 Resultados	69
5. Modelado de explosiones sobre la cresta de terraplenes	79
5.1 Descripción del modelo	80
5.2 Resultados	83
5.3 Análisis	87
6. Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro	95
Apéndice A	99
Apéndice B	103
Apéndice C	109
Apéndice D	115
Bibliografía	121

Introducción

Los terraplenes son usados para varios propósitos tales como irrigación, control de inundaciones, almacenamiento, recreación, usos domésticos y municipales, etc. Estas estructuras son fundamentales en todos los países, incluyendo México que tiene miles de ellos en su territorio y su integridad es una cuestión de suma importancia. El control de acceso a estos terraplenes es nulo y muchas veces son usados como una manera de recreación, así es que la entrada es relativamente fácil.

Hay muy poco conocimiento sobre el tamaño que tendría un cráter si se produjera una explosión en la superficie de la corona. Así que no hay apoyo para el control que se necesitaría en este tipo de estructuras.

En investigación se han desarrollado las técnicas de modelado para proveer un mejor entendimiento del comportamiento del prototipo. El método ideal es el de realizar pruebas a escala natural, pero esto no es posible en muchas ocasiones ya que no resulta económico, seguro y las condiciones de frontera no se pueden controlar haciendo el modelado muy atractivo. Pero modelos a 1g, generalmente, no son aplicables al diseño en geotecnia por lo que las propiedades de los suelos dependen de los esfuerzos gravitacionales inducidos por la masa dentro de los materiales. Para poder asegurar que las relaciones esfuerzo-deformación a puntos correspondientes en el modelo y en el prototipo son los mismos, se debe ensayar el modelo a una gravedad mayor que la del prototipo, en una proporción inversa a la escala lineal del modelo (Taboada, 1995)

En este trabajo se estudió las dimensiones que tendría un cráter si una carga explosiva fuera colocada en la superficie de un terraplén homogéneo de tierra con el embalse vacío, lo cual representa la situación menos crítica. Dicho fenómeno fue estudiado en una centrifuga geotécnica. La centrifuga es una herramienta poderosa para el estudio del proceso de formación de cráteres, por ejemplo si el mismo suelo y explosivos son usados en un modelo N veces más pequeño que el prototipo y éste modelo se pusiera bajo una aceleración N veces mayor que la gravedad de la tierra, la carga explosiva y la energía serían escalados

por un factor de N^3 , lo que significa que si usamos 2.5 gramos de explosivo, como en este estudio, y los detonamos a 80g's producirían un cráter que correspondería a 1.3 toneladas de TNT en un experimento de campo. Además la centrífuga nos da la ventaja de poder controlar las condiciones del experimento.

Planteamiento del problema, visión y objetivos.

Aquí se presenta un primer acercamiento al estudio de la geometría de cráteres producidos en la corona de terraplenes con una geometría definida, por medio de explosivos. El objetivo principal fue el de determinar la forma que tendría un cráter producido en un terraplén de tierra homogéneo por una carga explosiva colocada en la cima de la cresta, cuando este terraplén se encuentra sin agua.

Este trabajo fue dividido en tres series de pruebas, la primera consistió en detonaciones sobre una superficie plana de arena de Nevada seca, en la segunda serie se utilizó un suelo hecho de una mezcla de 85% de arena de Nevada y 15% de kaolín con un contenido de agua de 7.5% y compactado, y la última de las series consistió en detonaciones sobre la corona de terraplenes hechos con el mismo suelo que se usó en la serie anterior.

Objetivos

Para la primera serie de pruebas los objetivos fueron:

- Estudiar la influencia de la posición de la carga en la forma del cráter
- Ser usados como pruebas de calibración, para revisar que todos los sistemas (detonadores, profilómetro, etc.) trabajaran adecuadamente y los resultados fueran congruentes.

Para la segunda serie:

- Determinar la forma del cráter hecho en suelo compacto formado de una mezcla de arcilla y arena con diferentes cargas explosivas, que va a ser utilizado en la construcción de los modelos de terraplén.
- La influencia de poner dos cargas juntas en lugar de una.

Y para la tercera serie:

- Determinar la forma del cráter producido en un terraplén homogéneo con una geometría típica construido de arena y arcilla.

1. Antecedentes

1.1 Principios de la centrífuga

En general, el comportamiento del suelo es extremadamente dependiente de los esfuerzos, por lo tanto modelos a 1 g no son buenos, ya que no reproducen los esfuerzos que se presentan en el prototipo; mientras que en una centrífuga los esfuerzos en el modelo pueden hacerse iguales que en el prototipo, haciendo el modelado en centrífuga muy práctico.

El principio básico de la centrífuga es el de mantener los esfuerzos en el modelo semejantes a los del prototipo. Para lograr lo anterior, el suelo del modelo se coloca en un recipiente el cual se instala al final del brazo de la centrífuga y luego se le aplica una aceleración centrífuga de tal manera que el modelo se somete a un campo inercial de fuerzas que simulan un campo gravitacional varias veces al de la tierra.

Para explicar más a detalle el principio de la centrífuga, la figura 1.1 nos muestra tres contenedores que están llenos de suelo, el de arriba es el prototipo a escala real, el de en medio es un modelo N veces más pequeño, y el último es el mismo modelo pero sujeto a una aceleración N veces mayor que la gravedad de la tierra, creada por la centrífuga. Los esfuerzos en el prototipo varían desde cero en la cima hasta ρgH a una profundidad H , donde ρ es la densidad del suelo, H es la profundidad del suelo y g es la fuerza de la gravedad. Los esfuerzos en el modelo a 1g varían desde cero en la cima hasta $1/N$ de los del prototipo en la parte inferior del suelo, así que este modelo no tiene los mismos esfuerzos que los del prototipo, por lo tanto el esfuerzo, la compresibilidad, dureza, asentamientos y cualquier otra cantidad dependiente del esfuerzo no podrán ser modelados correctamente.

Ahora si sometemos al modelo a una aceleración de N veces la de la gravedad terrestre en la centrífuga, el suelo retenido en el contenedor del modelo está libre de esfuerzos en la parte superior del suelo y la magnitud del esfuerzo incrementa con la profundidad a una razón relacionada con la densidad del suelo y la fuerza del campo de aceleración, por lo tanto el esfuerzo es cero en la parte superior e igual a ρgH en el fondo, al igual que en el

prototipo. Si se usa el mismo suelo del prototipo en el modelo, la deformación correspondiente serán iguales (Zimmie, 1995).

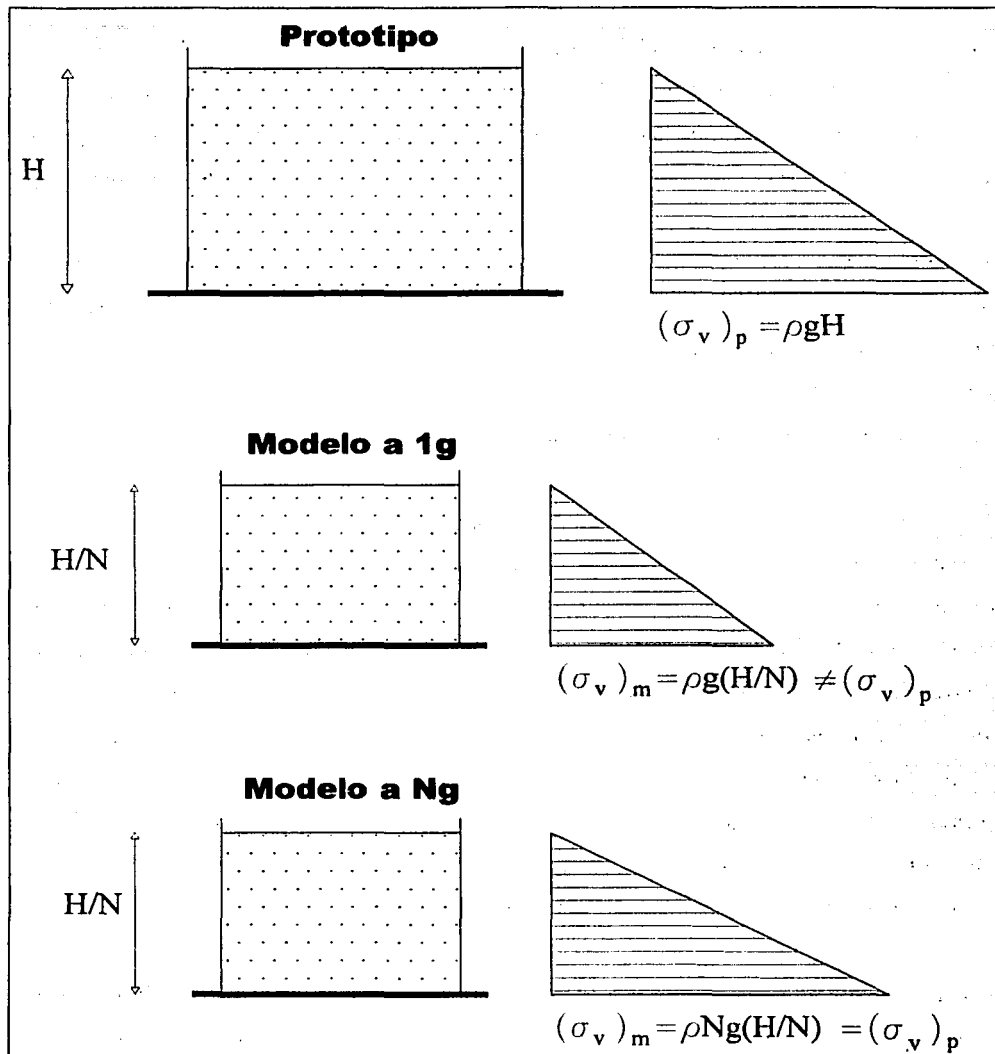


Figura 1.1 Modelo de escala

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.1.1 Leyes de escala

Como se mencionó anteriormente, el principio básico es el de mantener los esfuerzos en el modelo con el mismo valor que en puntos homólogos en el prototipo, considerando esto (Taboada, 1995):

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

El asterisco en la cantidad indica el factor de escala para esa cantidad.

El esfuerzo tiene unidades de fuerza / área, el factor de escala para la longitud y la fuerza tiene que satisfacer la siguiente ecuación:

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

Por lo tanto:

$$F^* = 1(l^*)^2 \quad (2.3)$$

El factor de escala para la longitud está definido como:

$$l^* = \frac{l_{\text{modelo}}}{l_{\text{prototipo}}} = \frac{1}{N} \quad (2.4)$$

Por lo tanto el factor de escala para el volumen es:

$$v^* = \frac{1}{N^3} \quad (2.5)$$

De las ecuaciones (2.3) y (2.4):

$$F^* = (l^*)^2 = \frac{1}{N^2} \quad (2.6)$$

Ya que el modelo y el prototipo están compuestos del mismo material, el factor de escala para la densidad es:

$$\rho^* = 1 \quad (2.7)$$

El factor de escala para la masa se calcula usando la siguiente formula:

$$\rho^* = \frac{m^*}{(l^*)^3} \quad (2.8)$$

Por consiguiente:

$$m^* = (l^*)^3 = \frac{1}{N^3} \quad (2.9)$$

Y el factor de escala para la gravedad proviene de la ley de movimiento de Newton para un cuerpo en reposo en un campo gravitacional:

$$F^* = m^* g^* \quad (2.10)$$

Así que:

$$g^* = \frac{F^*}{m^*} = \frac{N^{-2}}{N^{-3}} = N \quad (2.11)$$

Por lo tanto, si se usan materiales idénticos en el modelo y en el prototipo, y la longitud de las dimensiones son reducidas N veces, la gravedad deberá incrementarse N veces para poder preservar los esfuerzos idénticos en el modelo como los del prototipo. Como se puede observar en la centrifuga se toma en cuenta la gran dependencia de las propiedades del suelo con respecto a los esfuerzos. En la tabla 1.1 se muestra una relación completa de escalas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Cuando se usa el mismo suelo y la misma fuente explosiva, un experimento a pequeña escala puede reproducir correctamente un evento N veces mayor en cada dimensión lineal, si el experimento a pequeña escala es conducido a N veces la gravedad. Esto implica que la masa simulada del detonador y la energía es N^3 veces más grande que la carga usada en el experimento en la centrífuga. Consecuentemente 50 gramos de explosivos químicos detonados a 600 g produce un cráter que correspondería una prueba de campo de 11 kilotones de TNT (Schmidt, 1988).

Tabla 1.1 Relaciones de escala

Parámetro	Modelo
Longitud	N^1
Velocidad	N
Masa	N^3
Densidad	1
Fuerza	N^2
Esfuerzo	1
Deformación	1
Frecuencia	N
Tiempo (dinámico)	N^{-1}
Tiempo (flujo)	N^{-2}
Tiempo (difusión)	N^{-2}
Tiempo (creep)	1

* N es la aceleración de la centrífuga en g 's

1.1.2 Errores

Por definición un modelo no representa todas las características de un prototipo, sin embargo, si se tiene cuidado en la construcción del modelo, la información producida durante su ensaye contribuirá al conocimiento del comportamiento del prototipo. Estudios realizados en modelos pueden proveer indicaciones de lo "más probable" y a contribuir a determinar el escenario "menos aceptable" bajo diferentes condiciones.

La centrífuga no es la excepción, y hay algunos errores que se deben de tomar en cuenta en la interpretación de los resultados. Dichos errores son discutidos a continuación:

Errores por el tamaño de la partícula

En el modelado en centrífuga es necesario construir modelos a cierta escala. En algunos modelos el tamaño de la partícula no es escalada por un factor de N. En algunas circunstancias los efectos debidos al tamaño de la partícula pueden ser importantes y se debe realizar una investigación que evalúe la importancia de este factor en el problema que se está estudiando.

En algunos casos no se hace ningún intento de escalar el tamaño de las partículas ya que al hacer esto, se puede llegar a tener partículas del tamaño de arcillas cambiando totalmente sus propiedades. El problema al no usar el tamaño de la partícula escalado es que las dimensiones lineales de los granos de arena se escalan a un material mayor en el prototipo. Mientras que la distorsión del tamaño de la partícula no afecte a otras áreas del modelo como el número de puntos de contacto con la estructura o el instrumento, la distorsión del modelo es considerado de segunda importancia. La consideración primaria es que el comportamiento del suelo en el modelo sea similar al del como en el prototipo (Brownell, 1992).

Variación en aceleración

En ingeniería civil, la gravedad de la tierra se considera uniforme para el rango práctico de las profundidades del suelo. Cuando se usa una centrífuga para generar una aceleración de campo alta como es requerido para este modelado físico, una pequeña variación de aceleración a través del modelo estará presente. Esto se debe a que la aceleración inercial del campo es dado por $\omega^2 r$ donde ω es la velocidad rotacional angular de la centrífuga y r es el radio a cualquier elemento en el modelo. Este problema resulta ser menor si se tiene cuidado al seleccionar el radio en el cual el factor de escala gravitacional N se determina (Taylor, 1995).

Las distribuciones verticales del esfuerzo en el modelo y las correspondientes al prototipo son comparadas en la figura 1.2, donde son graficadas contra la profundidad. En el prototipo, el esfuerzo vertical a profundidad $h_p = Nh_m$ está dado por;

$$\sigma_{vp} = \rho g h_p = \rho g N h_m \quad (2.12)$$

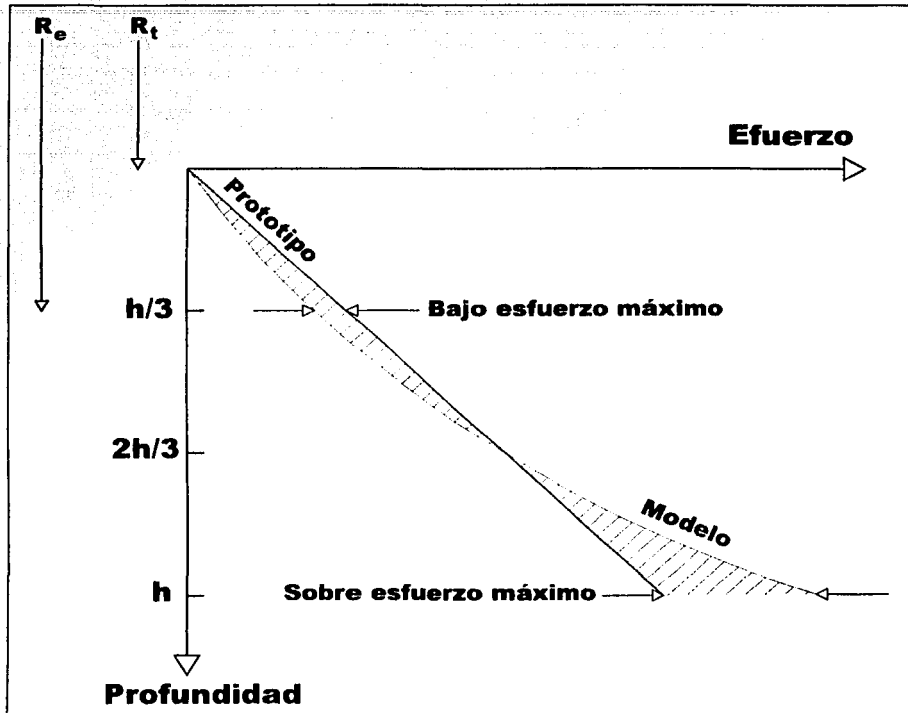


Figura 1.2 Comparación de la variación del esfuerzo con respecto a la profundidad en el modelo y su correspondiente prototipo.

El factor de escala N necesita ser calculado a un radio de centrifuga efectivo para el modelo R_e tal que:

$$Ng = \omega^2 R_e \quad (2.13)$$

Si el radio a h_e en la cima del modelo es R_i , entonces el esfuerzo vertical a la profundidad z en el modelo puede ser determinado como sigue:

$$\sigma_{vm} = \int_0^z \rho \omega^2 (R_i + z) dz = \rho \omega^2 z \left(R_i + \frac{z}{2} \right) \quad (2.14)$$

Si el esfuerzo vertical es idéntico en el modelo y en el prototipo a la profundidad $z=h$, entonces, de las ecuaciones (2.12), (2.13), y (2.14) se puede demostrar que:

$$R_e = R_i + 0.5h_i \quad (2.15)$$

Una regla conveniente para minimizar errores en la distribución de esfuerzos puede ser derivada si se considera las magnitudes relativas del sobre y bajo esfuerzo. La relación r_u , del máximo bajo esfuerzo, el cual ocurre a la profundidad $0.5h_i$, del modelo, a la profundidad del esfuerzo del prototipo esta dada por:

$$r_u = \frac{0.5h_i \rho g N - 0.5h_i \rho \omega^2 \left(R_i + \frac{0.5h_i}{2} \right)}{0.5h_i \rho g N}$$

Cuando se combinan las ecuaciones (2.13) y (2.15), se pueden reducir a esto:

$$r_u = \frac{h_i}{4R_e}$$

De manera similar la relación, r_o , del máximo sobre esfuerzo, la cual ocurre en la base del modelo, h_m , a la del esfuerzo del prototipo a esa profundidad, se puede demostrar como:

$$r_0 = \frac{h_m - h_i}{2R_e}$$

Si se combinan las dos relaciones r_u y r_0 nos da:

$$h_i = \frac{2}{3}h_m$$

y así:

$$r_u = r_0 = \frac{h_m}{6R_e}$$

También, usando la ecuación (2.15):

$$R_e = R_t + \frac{h_m}{3}$$

Usando esta regla, hay una correspondencia exacta en esfuerzos entre el modelo y el prototipo a dos terceras partes de la profundidad del modelo y el radio efectivo de la centrífuga debería medirse del eje central a una tercera parte de la profundidad del modelo. Para la mayoría de las centrífugas geotécnicas, h_m/R_e es menos de 0.2 y por eso el máximo error en el perfil de esfuerzos es pequeño, generalmente un 3% menor que los esfuerzos en el prototipo (Taylor, 1995).

Coriolis

Otro problema causado por generar el campo de aceleración mediante una rotación es la aceleración de Coriolis que es generada cuando el modelo se mueve en el plano de rotación. Las partículas del modelo que son expulsadas de la centrífuga durante el vuelo, viajan con una velocidad horizontal constante en línea recta en la dirección con la cual se pusieron en

movimiento (anulando la resistencia de aire) hasta que pegan otra vez contra la centrífuga o la pared de la cámara de la centrífuga.

A continuación se determinarán los rangos de la velocidad del modelo dentro de los cuales los efectos del Coriolis se pueden considerar nulos. La aceleración de Coriolis a_c está relacionada con la velocidad angular de la centrífuga, ω , y con la velocidad, v , de una masa dentro del modelo de la siguiente manera (Taylor, 1995):

$$a_c = 2\omega v$$

La aceleración inercial, a , del modelo es:

$$a = \omega^2 R_c = \omega V$$

donde V es la velocidad del modelo durante el vuelo. Generalmente se asume que los efectos de Coriolis serán nulos si la relación a_c/a es menor del 10% lo cual implica que $v < 0.005V$. Esto nos ofrece un límite superior de v para eventos relativamente lentos (Taylor, 1995).

Por otro lado, para un suelo expulsado a alta velocidad durante la simulación de una explosión se puede tomar en cuenta que el radio de curvatura, r_c , del camino seguido por una masa en movimiento del modelo no debería ser menor que el radio efectivo de la centrífuga. Así es que la aceleración de Coriolis puede ser escrita de la siguiente manera:

$$a_c = 2\omega v = \frac{v^2}{r_c}$$

entonces:

$$r_c = \frac{v}{2\omega}$$

Ya que $V = \omega R_e$, entonces $r_c > R_e$, $v > 2c$. Por consiguiente, se concluye que el rango de velocidades en un modelo que no dará pie a efectos significantes de Coriolis es:

$$0.005 > v > 2V$$

Efectos de frontera

El espécimen tiene que ser colocado dentro de un contenedor, si tal contenedor no es lo suficientemente grande se pueden presentar problemas relacionados con efectos de fronteras. No obstante, los efectos de frontera usualmente han demostrado ser despreciables en comparación al evento medido, si se utiliza un contenedor de tamaño adecuado.

Aceleración gravitacional de la tierra

Otro error puede ser inducido por la misma fuerza gravitacional de la tierra. La aceleración del espécimen es el resultado de la aceleración centrípeta y gravitacional terrestre, así es que la gravedad de la tierra no puede ser pasado por alto a niveles bajos de aceleración.

La centrífuga es una herramienta poderosa para modelar fenómenos dominados por la gravedad de la tierra, sin embargo tiene algunos errores que pueden ser minimizados siguiendo algunas reglas. Una de ellas es que el contenedor tiene que ser lo suficientemente grande para reducir los efectos de frontera. El tamaño de la partícula debe ser suficientemente pequeña para poder mantener suficientes puntos de contacto pero no tan pequeña como para alterar las propiedades del suelo. El tamaño del modelo debe estar limitado a alguna fracción del largo del rotor del brazo, y las pruebas deben ejecutarse a velocidades lo suficientemente altas para que la aceleración gravitacional sólo sea un pequeño porcentaje del resultado.

Aunque un modelo no puede ser una replica exacta del prototipo, esto sigue siendo un evento físico único. En términos del prototipo el ingeniero puede ver al modelo como “el

sitio de al lado” donde las condiciones son muy similares, si no idénticas a las del prototipo (Phillips, 1995).

1.2 Cráteres

La centrifuga también puede ser usada para estudiar el fenómeno de formación de cráteres, con la gran ventaja de que la energía se escala a N^3 . Esto surge por analogía de la relación de escala para la masa, que también es N^3 . Esto nos brinda una gran oportunidad para estudiar los efectos de una gran explosión sin las consecuencias medioambientales ni las dificultades que se experimentan en el campo: un gramo de explosivos a 100g's se generará un cráter idéntico a uno hecho por uno de 1 tonelada de explosivos en el campo, pero en miniatura. Esta relación nos da las bases para todas las modelaciones no nucleares o eventos nucleares simulados (Steedman y Zeng, 1995).

Dimensiones del cráter

La figura 1.3 nos muestra un perfil de la mitad de un cráter típico y los parámetros usados para describirlo. El material que es expulsado del cráter por la explosión y puesto en la superficie del suelo que rodea al cráter es llamado *material expulsado*. El *material que regresa* se refiere al material que vuelve a caer dentro del cráter. Las letras a y t indican las dimensiones del cráter aparente y cráter verdadero, respectivamente. El *cráter aparente* es el cráter visible y el *cráter verdadero* es el cráter que se formó antes de que cayera el *material de regreso*. Se le denomina *labio* a la porción de suelo levantado que rodea inmediatamente al cráter aparente (Ferrero, 1998).

El material aplastado y fracturado que no son sometidos a desplazamiento significativo o desarreglos se encuentran en la *zona de ruptura*. La *zona plástica* define a la región en la cual una deformación permanente ha ocurrido sin que haya aplastamientos o fracturas. Dentro de la zona plástica hay una frontera delgada donde se asume que algo de material no fue dañado. La *zona elástica* contiene al material que no sufrió ninguna deformación permanente.

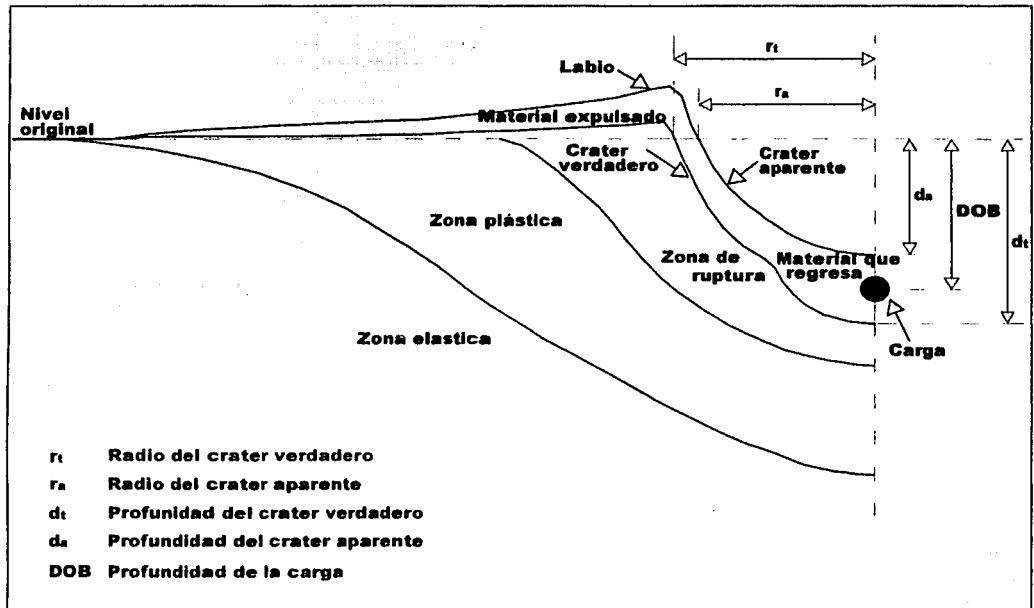


Figura 1.3 Dimensiones del cráter

Particularmente para este trabajo se definió otra terminología, la cual se refiere a las dimensiones del cráter producido en un terraplén. En la figura 1.4 se presenta un cráter hecho en un terraplén, el diámetro del cráter para este caso es el largo máximo del cráter medido en la cresta, la profundidad del cráter es la profundidad máxima medida de la cresta a lo más profundo del cráter. También se definió como el ancho de la brecha (figuras 1.5 y 1.6) al largo del cráter medido en la orilla del talud y la profundidad de la brecha es la distancia entre la cresta del terraplén y el punto más profundo donde el cráter es interceptado por el talud.

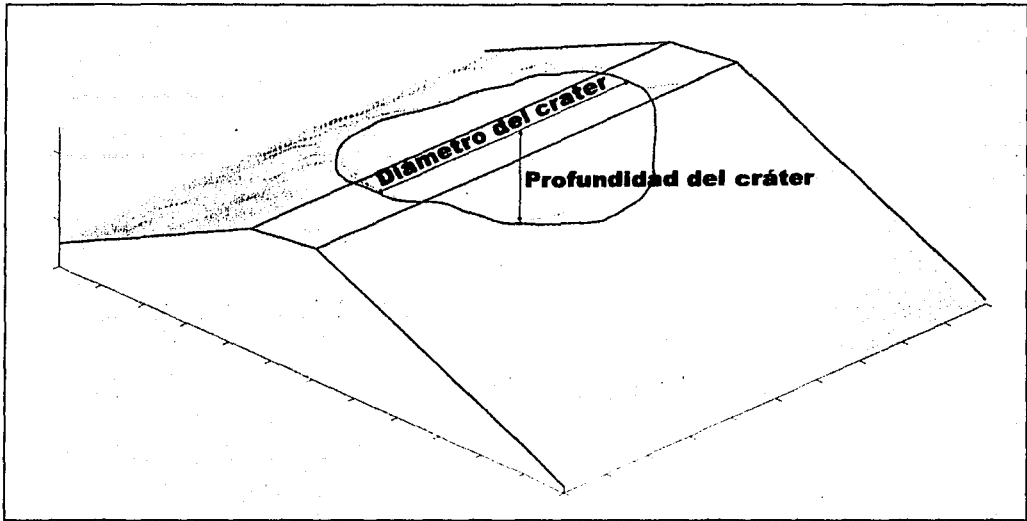


Figura 1.4 Dimensiones del cráter

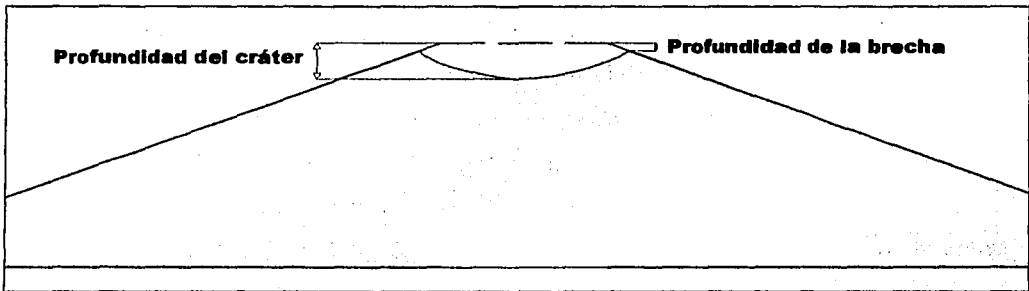


Figura 1.5 Vista lateral del cráter

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

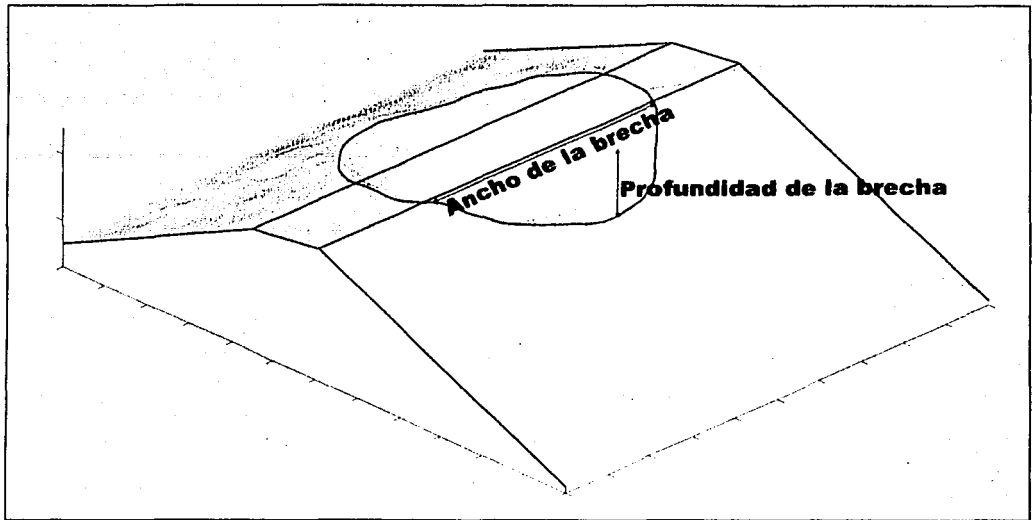


Figura 1.6 Dimensiones de la brecha

Terminología de cráteres

Las dimensiones de los cráteres en una centrífuga pueden describirse como medidos, escalados o normalizados. Las dimensiones escaladas del cráter son las medidas del modelo multiplicadas por N , donde N es un múltiplo de la aceleración gravitacional de la tierra. Por lo tanto las dimensiones escaladas son las dimensiones del cráter del prototipo (Brownell, 1992).

Para modelar cráteres, las dimensiones son divididas entre W^n para eliminar la dependencia a la energía explosiva. La *carga explosiva* (W) es comúnmente usada para representar la energía explosiva porque para un explosivo químico dado, la carga es proporcional a la energía explosiva. Con todas las demás variables constantes, el exponente de la carga explosiva, n , es referido como el exponente. Cuando el exponente es desconocido, un valor de $1/3$ ha sido una buena aproximación para las dimensiones del radio y profundidad. El procedimiento de dividir entre W^n es denominado normalización. Las dimensiones de un cráter normalizado son en realidad dimensiones escaladas que son divididas entre la raíz cúbica del carga explosiva.

La *profundidad de la carga* (DOB) es la distancia de la elevación del suelo original al centro de gravedad del explosivo (Ferrero, 1998). El DOB afecta significativamente el tamaño del cráter. Un DOB positivo se refiere a una carga enterrada y un DOB negativo se refiere a un estallido en el aire. La *altura de la detonación* (HOB) también es usada para denotar la distancia de un estallido en el aire hasta la superficie del suelo.

Mecanismos de formación de cráteres

Si se realiza una detonación cerca de la superficie del suelo se creará un cráter, el tamaño y la forma de dicho cráter es controlado por la energía de la explosión, las propiedades del suelo, DOB y la gravedad. Si todas las demás variables se mantienen constantes, se puede decir que entre mayor sea la energía liberada, mayor será el cráter. Opuestamente, entre mayor sea la resistencia al esfuerzo cortante, más pequeño será el cráter (Brownell, 1992).

La fracción de energía liberada que impacta al medio es función del DOB. Inicialmente mientras que el DOB incrementa, el cráter se hace más grande ya que se aplica más energía al medio. Más allá de cierto DOB, el impacto de energía liberada en la superficie disminuye y consecuentemente el tamaño del cráter decrece. El DOB óptimo para lograr el máximo volumen, o radio, o profundidad del cráter no es necesariamente el mismo.

La gravedad es un factor significativo para la formación de un cráter. Primero la energía explosiva tiene que exceder la fuerza gravitacional para excavar el suelo. Segundo, la gravedad controla la distribución del material que regresa. Y tercero, la gravedad controla las propiedades del material.

Hay tres mecanismos para la producción de cráteres no nucleares. En orden cronológico estos mecanismos son la formación de un frente de choque, aceleración del gas explosivo y la gravedad. El frente de choque es el cambio de presión creado por la detonación. La onda de choque impacta primero al suelo y ocasiona aplastamiento, compactación, facturación y deformación plástica del suelo que esta alrededor de la cavidad del estallido.

1.3 Contribuciones de la centrifuga a la tecnología del cráter

La primera idea de una centrifuga la tuvo en 1869 Edouard Phillips en Francia, sus ideas no fueron llevadas a cabo, pero él notó la importancia del peso del cuerpo en diferentes situaciones, él también desarrolló relaciones en las cuales reconocía la necesidad de una centrifuga. El primero que llevó a cabo el modelado en centrifuga fue Philip Bucky en 1931, aunque el desarrollo geotécnico importante en el modelado en centrifuga fue en 1932 por Davidenkov y Pokrovskii de la antigua Unión Soviética (Craig, 1995). Y no fue sino hasta los años sesentas cuando la centrifuga empezó a ser utilizada en Inglaterra y hasta los setentas cuando investigadores de los EE.UU. la usaron como una alternativa a las problemáticas y costosas pruebas de campo.

La centrifuga ha sido ampliamente usada en los últimos 60 años, principalmente en Europa, Inglaterra, y la Unión Soviética. La idea de usar la centrifuga para estudiar el fenómeno de formación de cráteres fue sugerida en el libro de Sedov (1959) y más recientemente por Chabai (1965). Pokrosky y Fyodorov (1968) usaron la centrifuga para estudiar los efectos de explosivos enterrados en suelo y piedra.

El proceso de formación de cráteres es un mecanismo complicado; a lo largo de los años se han explorado diferentes técnicas analíticas y experimentales. Se ha comprobado que es difícil predecir el tamaño de los cráteres que resultan de explosiones mediante ecuaciones debido a la ausencia de teorías adecuadas, pero también a la falta de datos experimentales congruentes.

Intentos para extrapolar la información de un cráter pequeño creado con explosiones pequeñas a esos esperados con más cantidad de energía ha sido complicado por la inserción de eficiencias desconocidas que relacionan explosivos grandes a pequeños y una falta de comprensión de la participación de otras influencias en el tamaño del cráter (Chabai, 1965; Nordyke, 1961; Vortman, 1968 y Westine, 1970).

Las primeras investigaciones realizadas para predecir el tamaño del cráter se basaban en información de campo, la finalidad era la de derivar una relación entre el radio y la profundidad del cráter aparente con la energía explosiva usada para crear dicho cráter.

En un medio dado, con un solo tipo de explosivo, el patrón del efecto de incrementar el tamaño de la carga (w) ha sido examinado por varios autores (Chabai, 1965; Rooke, 1965 y Dillon, 1972), ellos encontraron que las dimensiones del cráter están determinadas por:

$$r, p = kw^n$$

Donde r y p son el radio y la profundidad respectivamente, k es una constante y n es un exponente que varía entre 0.25 y 0.40

Estas relaciones son referidas como leyes de escala y se les da el nombre del exponente. Por ejemplo, la regla de escala de la raíz cúbica describe una condición donde las dimensiones lineales del cráter en el modelo se escalan a las del prototipo a la raíz cúbica de la energía de la explosión, esto es: $r, p \propto w^{1/3}$. Con esta ley de escala el volumen del cráter es proporcional a la energía de la explosión dado que el volumen es proporcional al cubo de las dimensiones lineales (Brownell, 1992). Diversos autores han encontrado que el exponente para el volumen varía entre 0.75 y 1.

Como se mencionó, el exponente varía entre 0.25 y 0.4 para el radio y la profundidad lo cual genera diferentes leyes de escala. En los años cincuentas generalmente se aceptaba, que las dimensiones de un cráter, que eran el resultado de un explosivo enterrado, resultaran proporcionales o fueran escaladas por la raíz cúbica del peso del explosivo. Explosivos con diferentes energías enterrados a la misma profundidad normalizada (la profundidad dividida por la raíz cúbica del peso del explosivo) producen las mismas dimensiones del cráter escalado (dimensiones lineales divididas por la raíz cúbica del peso del explosivo). En 1959 Chabai hizo un análisis de regresión sobre la información obtenida de cráteres producidos en aluvi3n en el desierto de Nevada, demostrando que las dimensiones lineales de los cráteres son casi proporcionales con la potencia $3/10$ de la

energía. A medida que más información sobre cráteres fue adquirida, la regla de escalar a la raíz cúbica no fue estrictamente válida si un gran rango de energía explosiva era usada; la raíz cuarta parecía dar una mejor descripción que la regla de la potencia 3/10 de la energía, para explosiones mayor a 20 toneladas de TNT, pero Chabai declaró que la evidencia que favorecía la raíz cuarta no era definitiva (Chabai, 1959).

Dillon (1972) realizó un análisis de regresión usando información ya existente de cráteres, utilizó 10 eventos nucleares entre 308,000 y 91,000,000 kg de equivalencia de TNT y 200 explosiones que variaron entre 0.45 y 454,000 kg de TNT obteniendo un exponente de 5/16.

Como se ve diferentes autores generaron diferentes leyes de escala las cuales parecen ser válidas para ciertas condiciones del suelo y de la masa del explosivo.

El tamaño del cráter también depende de la profundidad a la que se encuentre el explosivo. El máximo crater aparente de produce cuando $1 < \lambda < 1.5$, donde λ es la profundidad

normalizada:
$$\lambda = \frac{DOB}{w^{1/3}}$$

Piekutowsky (1974) trabajó en los Estados Unidos estudiando la relación entre las propiedades físicas y el comportamiento dinámico de la formación de cráteres y las dimensiones finales de un cráter; su metodología y resultados constituyen una base sólida de comparación para futuros estudios.

Schmidt y Holsapple son los que han hecho la mayor contribución al entendimiento del fenómeno de formación de cráteres con modelado en centrífuga en la literatura occidental. En 1976 trabajaron en un programa se estableció para estudiar la factibilidad de conducir experimentos con explosivos en una centrífuga para el estudio de la formación de cráteres.

Para estudiar la formación de cráteres, Schmidt y Holsapple trabajaron con arena de Ottawa seca en un rango de aceleraciones de entre 300 y 470 g, usaron explosivos Pentaerythritol

tetranitrate (PENT) y PbN_6 (lead azide) los cuales fueron colocados a profundidades someras y registraron las dimensiones del cráter (volumen, radio, y profundidad). Schmidt y Holsapple (1978) desarrollaron un grupo de números adimensionales a partir de un análisis termomecánico y realizaron una serie de pruebas para verificar la similitud de dichas relaciones. También estudiaron el efecto del tamaño de las partículas y las reglas para escalar el cráter aparente

Las variables seleccionadas para sus análisis fueron, V el volumen aparente del cráter, Q calor de las detonaciones por unidad de masa, δ densidad inicial del explosivo, ρ densidad inicial del suelo, Y parámetro de fuerza del material, a la carga explosiva del radio esférica, d la profundidad del enterramiento y g la gravedad.

Schmidt y Holsapple (1978, 1980) concluyeron que grandes explosiones realizadas a $1g$ pueden ser simuladas con precisión por cargas pequeñas a una gravedad elevada, y para las cargas parcialmente enterradas el efecto de incrementar la aceleración gravitacional en una carga determinada es lo mismo que aumentar la carga en una aceleración gravitacional fija. Se demostró que la relación funcional obtenida al variar la gravedad con un tamaño de carga explosiva fija es idéntica a la obtenida variando la carga y manteniendo constante la gravedad. Además realizaron varias detonaciones para demostrar la validez de la técnica de modelado de modelos. También variaron el tamaño del grano en la arena por un factor de cuatro y no se encontró ningún efecto significativo en el tamaño o la forma del cráter.

El tamaño del cráter estimado se redujo debido a la identificación del tamaño de la transición de la fuerza-gravedad, arriba del cual la eficiencia del cráter decrece con el tamaño (Schmidt, 1988). Esta tendencia no había sido observada en la información de campo existente ya que era demasiado escasa y los experimentos fueron hechos en un medio heterogéneo que oscurecía este patrón. La centrífuga geotécnica es una técnica experimental valiosa para investigar la formación de cráteres con explosivos.

Schmidt y Holsapple demostraron que si se mantiene fijo el tipo de suelo, la regla de escala de la raíz cuarta es imposible mientras que la regla de la raíz cúbica es la que aplica.

Habiendo establecido la eficiencia de la centrífuga para satisfacer los requerimientos de similitud para modelar grandes eventos de cráteres, llevaron a cabo experimentos para investigar el papel que juegan las propiedades del suelo. Schmidt y Holsapple (1979) demostraron que los materiales que tienen cohesión, aparente o real no presentan las mismas dimensiones que los producidos en arena seca. Observaron que a valores bajos de gravedad, la cohesión domina el proceso de formación de cráteres, el volumen del cráter es proporcional a la carga y la ley de la raíz cúbica es aplicable. Cuando la fuerza centrífuga se aumenta, la fuerza del suelo debida a la resistencia del esfuerzo cortante domina el proceso de formación de cráteres.

Holsapple et al. (1978) explicó las diferencias en el volumen de cráteres en arcilla y en arena como sigue, la arena tiene una resistencia al esfuerzo cortante relativamente alta, por lo tanto la fuerza se incrementa con la presión confinante. Mientras la aceleración centrífuga aumenta, la fuerza de la arena crece porque la presión confinante se incrementa. A corto plazo bajo condiciones no drenadas, se asume que la arcilla no tiene resistencia al esfuerzo cortante, pero una cohesión relativamente alta. Sin embargo, la cohesión no es afectada por la aceleración gravitacional, por lo que la fuerza de la arcilla permanece constante. Por ende, Holsapple et al. (1978) concluyó que a niveles de aceleración g altos, una carga explosiva produciría un cráter más grande en la arcilla que en la arena

Schmidt y Holsapple (1978) declararon que la información del radio y la profundidad del cráter aparente no necesariamente encajaban en el modelo de la resistencia del material propuesto para el volumen del cráter. No obstante, el radio podía encajar en el modelo hasta cierto punto ya que el volumen es proporcional a la profundidad del cráter multiplicado por el radio al cuadrado.

Schmidt y Holsapple (1978) también llevaron a cabo pruebas para estudiar los efectos del tamaño del grano. Ejecutaron dos pruebas a 360 g con 4 gramos de PETN y otros dos a 451 g 's. Usaron arena de Ottawa Flinshot ($D_{50}= 0.43\text{mm}$) y arena de Ottawa Banding ($D_{50}= 0.14\text{mm}$), y concluyeron que no había influencia por el tamaño del grano para aceleraciones

altas. Mencionaron que Piekutowsky utilizó las mismas dos arenas a 1g con 1.7 gramos de plomo azide y obtuvo cráteres 55% mayores en volumen usando la arena Flinshot que con la arena Banding. Schmidt y Holsapple sugieren que para aceleraciones altas las diferencias en las fuerzas del material son insignificantes.

Serrano (1987) estudió la aplicabilidad de las pruebas, a altas aceleraciones, de Schmidt y Holsapple en un rango entre 1 y 100g. Encontró que no había ningún efecto de escala asociado con dicho rango de aceleraciones y una buena reproducibilidad de los experimentos.

Ferrero (1988) continuó con el trabajo de Serrano y estudió los efectos del tamaño del grano, las condiciones de frontera, la importancia del peso unitario de la arena y la influencia de la posición de las cargas. Concluyó que bajo las condiciones en las cuales el estudio fue realizado no se presentó ningún efecto de escala detectable. Observó un incremento en el tamaño del cráter del 32% al aumentar el tamaño del grano de $D_{50}=0.16$ mm hasta $D_{50}= 1.15$ mm, pero no hubo un mayor incremento para $D_{50}= 3.5$ mm. Un decremento en el peso unitario del 8% resultó en un incremento de 72% en el volumen del cráter. Un incremento en el volumen del cráter del 53% se presentó cuando las cargas se cambiaron de posición, de totalmente enterradas con un $DOB= 1$ a parcialmente enterradas y un decremento de un 47% para las cargas que estaban tangentes a la superficie ($HOB= 1$).

También estudió la influencia del espesor de la cama de arena, por lo cual varió dicha profundidad, pero no encontró ningún efecto claro de que esto influyera en el volumen del cráter. Encontró que las dimensiones del labio son fuertemente afectadas por la distancia entre las paredes del contenedor del modelo.

Además probó diferentes tipos de materiales para las paredes y no encontró ninguna influencia en la forma del cráter. Otra prueba fue conducida con las paredes aisladas y tampoco se observó ninguna influencia sobre el cráter. La conclusión fue que aparentemente no hay evidencia de haber un efecto de frontera para aceleraciones superiores a 50 g's.

Adicionalmente, realizó detonaciones a 1g en tres cajas de diferentes áreas. El radio del cráter permaneció casi constante, la profundidad del cráter se incrementó un 35% cuando el área de la superficie del suelo cambiaba de 1742 cm² a 6207cm², y el volumen del cráter se incrementó en un 10%.

Holsapple encontró que las dimensiones del cráter están influenciadas por el tipo de suelo y la saturación de éste. Suelos con contenidos de humedad altos resultaban en cráteres más esféricos, mientras que los contenidos de humedad bajos se asociaban con cráteres de formas más planas. También encontró que las dimensiones de los cráteres se escalaban diferente para suelos cohesivos húmedos, que para suelos secos sin cohesión.

Brownell (1992) y Brownell et al. (1994) estudiaron los efectos de la humedad en las dimensiones del cráter. Encontraron que la cohesión aparente, resultado de las fuerzas capilares, controlaba la formación del cráter a cualquier nivel g, para pruebas hechas con arena húmeda. La relación de aspecto (radio / profundidad) se mantuvo constante para valores de saturación mayores al 20%. Se obtuvieron valores más altos de la relación de aspecto para cráteres en arena seca que con arena húmeda. Mientras que el nivel de la aceleración centrífuga se incrementa, la cohesión aparente se convierten en un porcentaje más pequeño de la resistencia al esfuerzo cortante total y por lo tanto puede ocurrir un derrumbe en las paredes internas del cráter, lo que contribuye a una relación de aspecto mayor.

Finalmente, concluyó que se producían cráteres más grandes en especímenes preparados con densidades relativas más bajas. Las dimensiones aparentes del radio, profundidad, y volumen se incrementaron en un 20%, 100% y 150% respectivamente entre 0% y 20% del contenido de humedad. Entre 20% y 70% de contenido de humedad, no se observó ningún cambio en las dimensiones aparentes del cráter.

En la tabla 1.2 se presenta un resumen de las contribuciones más importantes de la centrífuga al conocimiento sobre el proceso de formación de cráteres. Los primeros

experimentos en la centrifuga abordaron cuestiones sobre la validez de esta técnica, la cual ha sido comprobada; después, varios experimentos de cráteres en diferentes condiciones fueron realizados, pero no se encontró ningún estudio sobre explosiones realizadas en suelos con diferentes geometrías, solamente sobre superficies planas. En el presente trabajo este aspecto es el que se aborda.

Tabla No. 1.2 Resumen de las contribuciones más importantes de la centrifuga

Autor	Contribución
Schmidt y Holsapple (1978)	<ul style="list-style-type: none"> • Demostraron la aplicabilidad de la centrifuga, hicieron pruebas entre 300 y 470 g's. • Concluyeron que grandes explosiones realizadas a 1g pueden ser simuladas con precisión por cargas pequeñas a gravedad elevada. • Identificaron las diferencias en los cráteres hechos en suelos cohesivos y friccionantes. • Derivaron números adimensionales • No encontraron ninguna influencia del tamaño del grano para aceleraciones altas. • Demostraron la aplicabilidad de la regla de la raíz cúbica.
Serrano (1987)	<ul style="list-style-type: none"> • Estudió la aplicabilidad de la centrifuga para aceleraciones entre 1 y 100g, no encontró ningún efecto de escala.
Ferrero (1988)	<ul style="list-style-type: none"> • Observó un incremento del cráter al aumentar el tamaño de grano • Determinó que si el peso unitario del suelo disminuye, el volumen del cráter incrementa. • También se presenta un incremento en el volumen del cráter cuando las cargas se entierran. • No encontró ninguna influencia de la profundidad de la cama de arena en la forma del cráter. • No encontró ningún efecto de escala detectable
Brownell (1994)	<ul style="list-style-type: none"> • Encontró que el volumen, profundidad y radio aparentes incrementan cuando la saturación de compactación aumenta entre 0 y 20% pero entre 20 y 70% no se observó ningún cambio.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2. Equipo e instalaciones de la centrífuga del Rensselaer Polytechnic Institute (RPI)

La experimentación con modelos es una actividad multidisciplinaria, que generalmente involucra diferentes áreas de la ingeniería como mecánica, hidráulica, electrónica, control, entre otras, así como a la geotécnica, y estas actividades limitan los objetivos de las pruebas. El modelado en centrífuga está restringido por condiciones mundanas tales como recursos, capacidad de carga y comunicación con el ambiente remoto de la centrífuga (Phillips, 1995); por lo tanto el arte de la modelación en centrífuga es el de minimizar los efectos de esas limitantes, maximizando la calidad de la información geotécnica obtenida.

2.1 Centrífuga geotécnica del RPI

Hay diferentes tipos de centrífugas las cuales son usadas por ejemplo, en procesamientos de materiales, aeronáutica y simulación de movimiento. La centrífuga geotécnica se caracteriza por su naturaleza robusta, gran capacidad de carga y operación a baja velocidad. Las centrífugas geotécnicas pueden ser subdivididas en dos clases (Phillips, 1995):

- Centrífugas de brazo
- Centrífugas de tambor

La centrífuga del RPI es del primer tipo. Las centrífugas de brazo tradicionalmente rotan en un plano horizontal. El campo de aceleración que actúa en el modelo es el resultado de la aceleración de campo de la centrífuga y el campo gravitacional de la tierra. El comportamiento del modelo dependerá de la orientación del modelo en la plataforma de la centrífuga y del resultado del campo de aceleración. Las centrífugas de brazo pueden ser subdivididas en tres tipos de plataforma:

- Fija
- Restringida
- Balanceante

La centrífuga del RPI tiene una plataforma balanceante; en este tipo de plataformas la superficie siempre es normal a la aceleración resultante.

El modelo de la centrífuga del RPI es el 665-1 manufacturado por Acutronic de Francia. Esta máquina está compuesta, a grandes rasgos, por (Elgamal et al., 1991): plataforma balanceante, contrapeso, motores, juntas rotatorias, anillos deslizantes eléctricos, sistema de manejo, cuarto aerodinámico, y un sistema de balanceo durante el vuelo (figura 2.1). La centrífuga también tiene un sistema de medida de desequilibrio, este sistema apaga la centrífuga automáticamente si un desequilibrio excesivo es detectado.

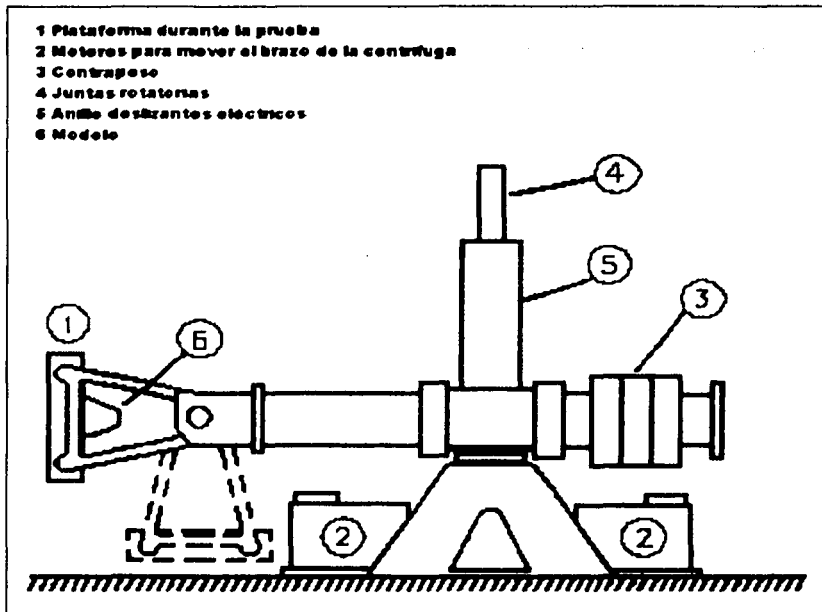


Figura 2.1 Centrífuga del RPI

Hay tres atributos que caracterizan el desempeño de una centrífuga, las cuales se describen a continuación:

1. El radio de la centrífuga. Hay dos radios que generalmente son de interés: i) el radio nominal, que es la distancia entre el centro de la carga y el eje de la centrífuga. La capacidad de carga utilizable y la aceleración son definidos a este radio. Para el modelo de centrífuga 665-1 este radio es de 2.7 m. ii) el radio de la plataforma, que

es la distancia entre la plataforma de la canasta balanceadora y el eje de la centrífuga, para el modelo 665-1 esa distancia es de 3.0 m.

2. Dimensiones utilizables para la carga. El espacio disponible para la carga en el 665-1 es de una profundidad de 1 m., el ancho es de 0.8 m, y la altura máxima es de 1.2 m.
3. Envoltorio de desempeño. La envoltorio de desempeño en la centrífuga indica los niveles permitidos de aceleración como una función de la carga asumiendo que el centro de la masa de la carga está localizado en el radio nominal. Esta envoltorio define la capacidad del aparato e indica el rango de operación normal, fuera de este rango la seguridad de la máquina estaría en juego. La figura 2.2 nos demuestra la envoltorio de desempeño de la centrífuga 665-1 con sus tres fronteras: i) limitación de aceleración causado por la máxima velocidad de rotación del motor, ii) limitación del peso de la carga efectivo causado por las capacidades de balanceo del contrapeso, y iii) limitación mecánica causado por esfuerzos estructurales.

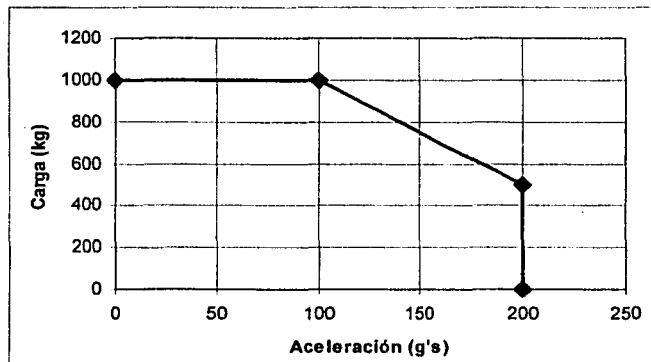


Figura 2.2 Mapa de operación de la centrífuga, al radio nominal

La centrífuga está equipada con 64 anillos deslizantes, 50 de ellos son para señales analógicas, 12 para la energía y 2 son para señales de video.

La capacidad de la centrífuga está expresada en g-ton, que es el producto del peso de la carga en toneladas multiplicado por el nivel de aceleración en gravedades. La capacidad

máxima de la centrifuga del RPI es de 100 g-ton, mientras que las limitaciones de operación son una capacidad de carga máxima de una tonelada y una aceleración máxima de 200g. Por ejemplo, si una carga de una tonelada es utilizada entonces la máxima aceleración es 100g o si una carga de 0.5 toneladas es usada, entonces la aceleración máxima es de 200g.

2.2 Contenedor

Todas las pruebas fueron realizadas en una caja de aluminio rectangular con unas paredes rígidas de 1.95 cm de grueso. Las dimensiones interiores eran de 87.5 x 39.4 cm con una altura de 35.8 cm (figura 2.3).

2.3 Medición del cráter

Se construyó un dispositivo denominado profilómetro para medir el perfil del cráter (figura 2.3) como los que Serrano (1987) y Ferrero (1988) utilizaron. Consiste en una viga de aluminio con orificios perforados con un centímetro de separación entre ellos, donde se colocan varillas de aluminio de 3 mm de diámetro. Se colocó una escala detrás de las varillas para poder tomar mediciones. El profilómetro se instaló en la parte superior de la caja, y para realizar las mediciones las varillas se bajaban hasta que tocaran el suelo, y se tomaba la medición con la escala.

Ferrero (1998) reportó algunos problemas ya que las varillas se hundían en la arena, hecho que también se presentó en este estudio. Para solucionar este problema se colocó una tira de papel delgado entre las varillas y la superficie del suelo, con esto no se observó ninguna penetración de las varillas en el suelo. En la figura 2.4 se enseña una fotografía del profilómetro con la tira de papel.

Para poder obtener el perfil del cráter, la superficie del suelo se debe conocer antes y después de las pruebas. Antes de la prueba el nivel de la superficie original se calculó con la información del espesor del suelo, profundidad de la caja y las dimensiones del profilómetro, esto podía hacerse ya que la superficie del suelo era uniforme. Después de la

prueba, dependiendo del tamaño del cráter, de 12 a 23 puntos fueron registrados en 12 a 23 diferentes posiciones de la viga, dando un total de 144 puntos como mínimo y un máximo de 529 puntos por cráter. Con estos puntos se interpoló una cuadrícula a partir de la cual se obtuvieron los contornos a partir de los cuales se calculó el diámetro, el volumen y la profundidad del cráter en diferentes direcciones.

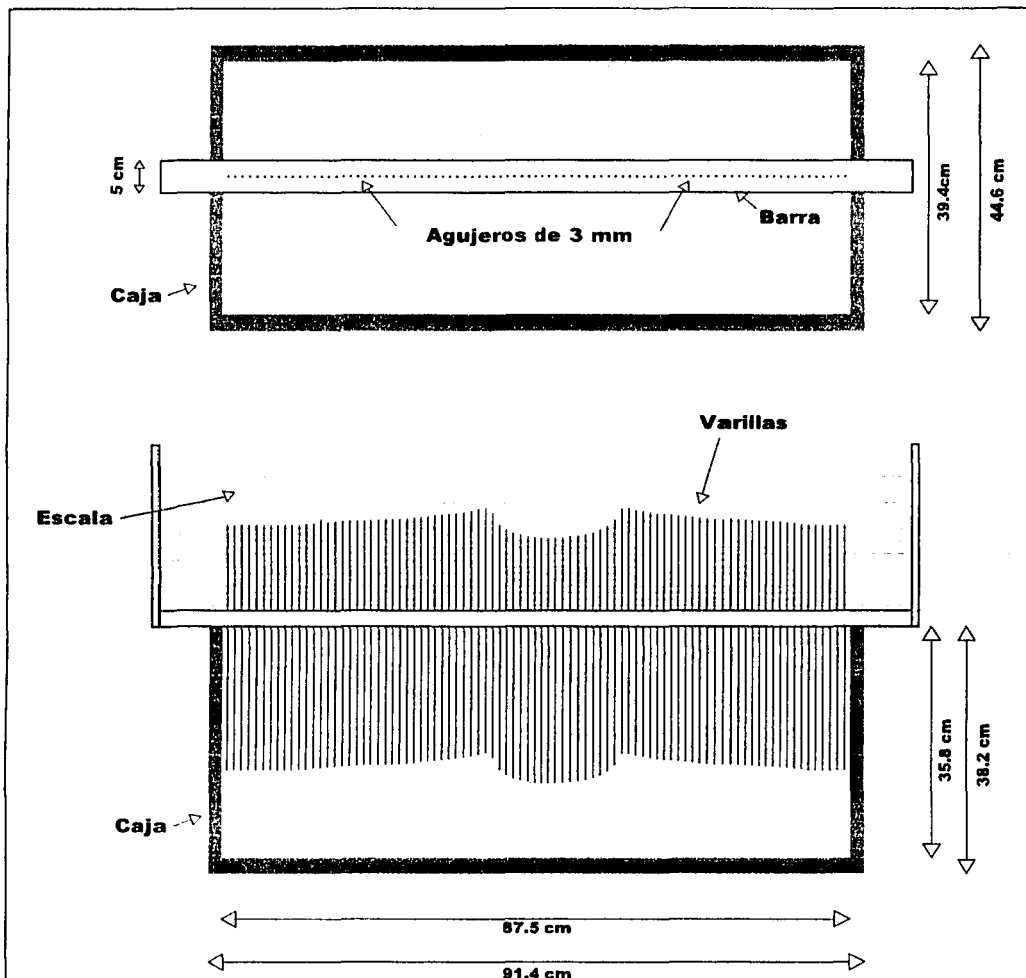


Figura 2.3 Vistas en planta y lateral del profilómetro

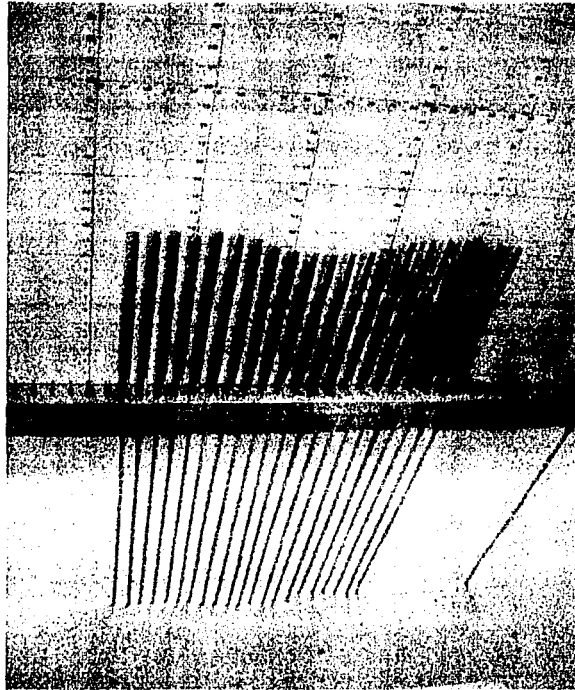


Figura 2.4 Profilómetro

2.4 Detonadores

Los explosivos utilizados en este estudio fueron los detonadores EBW por sus siglas en inglés (Exploding Bridge Wires) RP-80, RP-810, y RP-830 fabricados por Reynolds Industries Systems.

En los EBW se aplica rápidamente una gran cantidad de energía puente de alambre; ya que el alambre tiene sección transversal muy pequeña, la corriente calienta al alambre, el cual pasa por las fases de derretido, hervido y vaporización casi instantáneamente. Para que el EBW funcione, esta energía debe ser aplicada tan rápidamente que el cambio de la fase del material del alambre sea restringido debido a la inercia. Cuando se sobrepasa esta inercia, la vaporización del alambre ocurre como una explosión dando lugar a una energía termal y una onda de choque. La onda de choque puede ser utilizada para iniciar el explosivo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

secundario. En los EBW se utilizan explosivos secundarios los cuales requieren de aproximadamente 200 kilowatts y 200 amperes para funcionar (Reynolds Industries). Se seleccionaron estos detonadores ya que son muy seguros debido a que no explotan con calor o chispa.

En la figura 2.5 se muestra un detonador RP-80, está compuesto por un explosivo iniciador, en este caso 80 gramos de PETN y un explosivo de salida de 123 mg de RDX.

En la tabla 2.1 se muestran las dimensiones y las cantidades de explosivo para los diferentes detonadores usados en este estudio, así como su equivalencia en TNT. El equivalente de TNT fue obtenido al multiplicar la masa del PETN por un factor de 1.39 y la masa del RDX por 1.149, después estos dos resultados se sumaron. La equivalencia de TNT se utiliza para poder comparar cráteres hechos con diferentes explosivos.

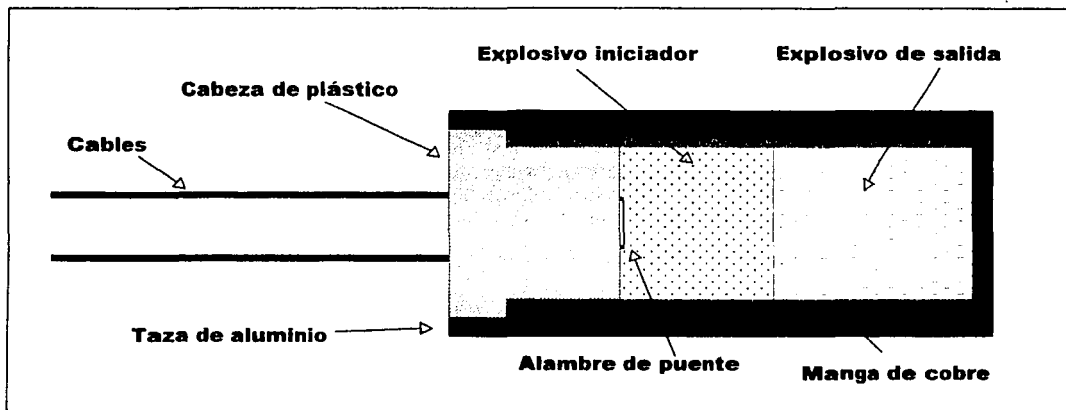


Figura 2.5 Detonador

Tabla 2.1 Características de los detonadores usados

EBW	Dimensiones		Explosivo iniciador PETN mg	Explosivo de salida RDX mg	Equivalencia En TNT mg
	Longitud (cm)	Diámetro (cm)			
RP-80	2.09	0.75	80	123	252.5
RP-810	2.54	0.75	80	450	628.3
RP-830	3.96	0.71	80	1031	1295.8

El sistema de detonación consistía en una unidad de control y un módulo de detonación (figura 2.6). La señal se genera en la unidad de control, la cual tiene una salida de 40 voltios, los cuales llegan al módulo de detonación, y los amplifica hasta 3000 voltios los cuales van directamente a los detonadores.

Para que la señal de la unidad de control se genere es necesario tener conectada la llave de seguridad a la unidad de control y accionar dos botones simultáneamente, lo que hace bastante seguro a este sistema.

La unidad de control se colocó en el cuarto de control y los 40 voltios se pasaron a través de los anillos deslizantes al centro de la centrífuga, donde se localizaba el módulo de detonación. Un cable coaxial de alto voltaje fue conectado del módulo de detonación a los detonadores que se encontraban en el modelo dentro de la canasta de la centrífuga.

2.4 Colocación de los detonadores

Los detonadores se colocaron en los modelos justo antes de que se empezara la prueba, se fijaron usando una barra longitudinal a la caja, la cual estaba fija a esta. Se colocaron dos tronillos de 35 cm de largo a través de la barra, normales al modelo, y al final de éstos se pusieron los detonadores. Los tornillos se bajaban hasta que el detonador tocara la superficie del suelo y se fijaban ahí con la ayuda de tuercas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Además se colocaron dos barras transversales a la caja por debajo de la primera barra, para evitar que la barra principal que sostenía a los detonadores se flexionara durante el vuelo de la centrífuga (figura 2.7)

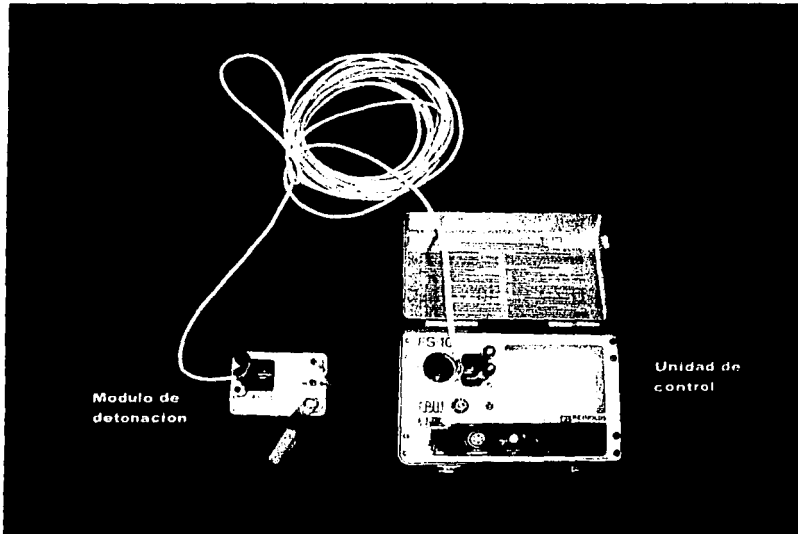


Figura 2.6 Sistema de detonación

2.5 Procedimiento de prueba

Para todas las pruebas se siguió la misma secuencia, la única diferencia fue en la construcción del modelo porque cada serie de pruebas fue preparada de diferente manera.

La secuencia de pruebas se resume de la siguiente manera:

- El modelo fue construido como se describe en las secciones 3.1, 4.4, y 5.1, dependiendo del tipo de prueba a realizar.
- La batería de la unidad de control y el circuito de detonación era revisado.
- El modelo se colocó en el brazo de la centrífuga, y si era necesario, se ajustaba el balance de la centrífuga.

- Las cargas eran conectadas, posicionadas y fijadas siguiendo el procedimiento explicado en la sección 2.4
- La puerta de la centrifuga era cerrada después de haber revisado el sistema y de no haber encontrado ninguna pieza suelta.
- La bomba hidráulica era activada, la televisión y el micrófono se prendían.
- La velocidad de rotación de la centrifuga era gradualmente incrementada hasta llegar a las revoluciones por minuto deseadas.
- Se detonaban las cargas al nivel de aceleración deseada.
- La centrifuga era desacelerada, se apagaban todos los sistemas eran apagados y la puerta de la centrifuga se abría.
- Se tomaban las fotos.
- Se sacaba la caja del brazo de la centrifuga. En el primer experimento se tomaron dos perfiles del cráter, uno con la caja dentro del brazo de la centrifuga y el otro después de que la caja fue removida y colocada cuidadosamente afuera de la centrifuga para evitar algún cambio en la forma del cráter, por lo que se decidió sacar la caja antes de medir el cráter.
- El perfil del cráter fue tomado como se explica en la sección 2.3.
- Se obtuvieron muestras de suelo de la segunda y tercera serie de pruebas para obtener el contenido de agua, se tomaron cuatro ejemplares de suelo a diferentes profundidades y posiciones.
- Se vaciaba y limpiaba la caja.
- Se procesaba la información.

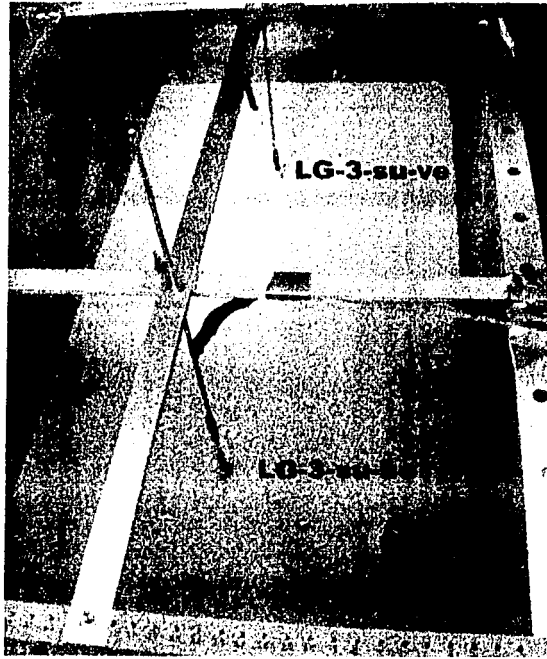


Figura 2.7 Colocación de las cargas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN.

1911

3. Modelado de explosiones sobre una superficie de arena plana

La primera serie de pruebas consistió en detonaciones sobre una superficie plana de arena seca, los objetivos de esta serie eran observar la influencia de la posición de la carga en la forma del cráter y comparar los resultados con los obtenidos por otros investigadores. Se utilizaron diferentes posiciones de las carga desde parcialmente enterradas hasta detonaciones superficiales, en posiciones verticales y horizontales. El nivel de aceleración se fijó en 50g's, como también el tipo de detonador. Se usó un detonador RP-80, el cual tiene una masa en equivalencia de TNT de 252.2 mg en unidades del modelo. En la tabla 3.1 se presenta el programa de pruebas.

También en esta serie de pruebas se incluyó una que fue hecha a la aceleración de la gravedad para ver como funcionaban el profilómetro y el sistema de detonación; este resultado muestra una buena concordancia con los que fueron hechos a 50g's como se muestra en la tabla 3.1. Se colocaron dos cargas en cada caja, los cráteres LG-2-bu-ve y LG-2-su-ve estaban en la misma caja como también los cráteres LG-3-su-ho y LG-3-su-ve. El cráter LG-2-su-ve y LG-3-su-ve fueron hechos bajo las mismas condiciones ya que estaban en la misma posición, con el mismo nivel de aceleración y con la misma masa, esto con la intención de estudiar la reproducibilidad.

Tabla 3.1 Programa de pruebas de la primer serie de pruebas

Número de prueba	Aceleración g	Tipo de suelo	EBW	Carga (mg)	Profundidad de la Carga	Posición	Densidad del suelo (KN/m ³)
LG-1-su-ho	1	Arena	RP-80	252.5	Superficie	Horizontal	15.598
LG-2-bu-ve	50	Arena	RP-80	252.5	Mitad enterrada	Vertical	15.676
LG-2-su-ve	50	Arena	RP-80	252.5	Superficie	Vertical	15.676
LG-3-su-ho	50	Arena	RP-80	252.5	Superficie	Horizontal	15.559
LG-3-su-ve	50	Arena	RP-80	252.5	Superficie	Vertical	15.559

3.1 Descripción del modelo

El modelo consistió en una cama de arena de 7 cm de espesor, la cual fue pluvada dentro del contenedor. Con la pluvación la densidad de las muestras puede ser controlada por

medio de la energía impartida a las partículas de arena: muestras densas son creadas cuando se vierte la arena lentamente desde cierta altura mientras que las muestras sueltas son creadas cuando la arena se deja caer rápidamente dentro del contenedor (Phillips, 1995).

La cama de arena fue preparada vertiendo la arena en el contenedor desde una altura constante de 4 cm usando un embudo diseñado en el RPI. Este embudo tiene una sección transversal triangular y aproximadamente 30 cm de largo, al final del embudo tiene varios hoyos. El embudo se movía a una velocidad constante para poder obtener una densidad relativa del 55% aproximadamente. Una vez colocado el material, la superficie fue nivelada con un nivelador.

Se construyó un nivelador para crear una superficie plana paralela a la parte superior del contenedor. La parte de arriba estaba hecha de madera y se encontraba conectada con dos tornillos a la parte de abajo la cual era de aluminio (figura 2.5). Los tornillos daban la posibilidad de cambiar el espesor de la cama de arena.

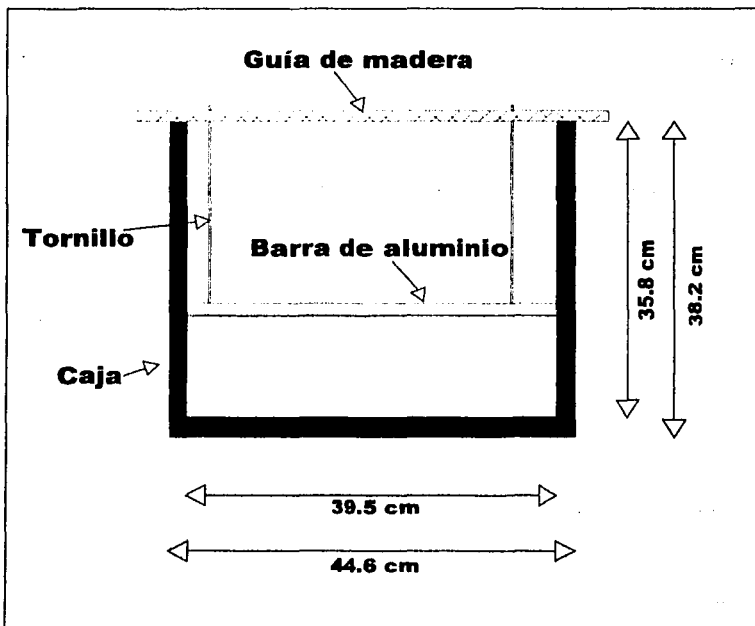


Figura 2.5 Nivelador

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para esta serie de pruebas se utilizó arena de Nevada No. 90, y fue colocada dentro del contenedor con el método de pluviación con la cual se obtuvo una densidad promedio de 15.618 KN/m^3 , con un mínimo de 15.559 KN/m^3 y un máximo de 15.676 KN/m^3 , ver tabla 3.1.

Una vez que la arena estaba lista, la caja se colocaba en el brazo de la centrifuga y las cargas eran puestas como se describe en la sección 2.4.

3.2 Resultados

Después de que la centrifuga era detenida, se media el perfil del cráter. Para estos experimentos se tomaron 216 puntos de cada cráter con excepción de la prueba realizada a 1g, para este cráter sólo se tomaron 32 puntos en una misma línea por lo que el volumen para este cráter no se pudo calcular. En la figura 3.1 se muestran dos cráteres justo después de parar la centrifuga y los resultados se presentan en la tabla 3.2.

Los resultados se compararon con los obtenidos por Schmidt y Holsapple (1978), Serrano (1987) y Ferrero (1988). Schmidt y Holsapple usaron cargas esféricas de plomo azide y PETN, los explosivos fueron colocados a una profundidad igual a la mitad del volumen de la carga. Sus experimentos los realizaron en arena seca de Ottawa con una densidad promedio de 17.452 KN/m^3 siendo el máximo 17.678 KN/m^3 y el mínimo de 16.353 KN/m^3 . Los niveles de aceleración variaron de 10g's a 463g's y la carga de 0.49 gr. a 4.08 gr. Schmidt y Holsapple (1978) encontraron que su información concordaba con las pruebas hechas a 1g por Piekutowsky.

Serrano (1987) realizó 42 pruebas en arena de Ottawa seca con un peso unitario de 16.716 KN/m^3 , cargas de un gramo de PETN colocadas a una DOB de cero. El autor escogió 33 pruebas para hacer su análisis, las mismas que son presentadas en las siguientes gráficas.

Del trabajo de Ferrero, se seleccionaron 31 pruebas hacer la comparación ya que estas 31 pruebas fueron hechas bajo las mismas condiciones, en arena seca de Ottawa, con un

espesor de la cama de arena 25.4 cm, un peso unitario de 16.961 KN/m³ y con cargas cilíndricas parcialmente enterradas.

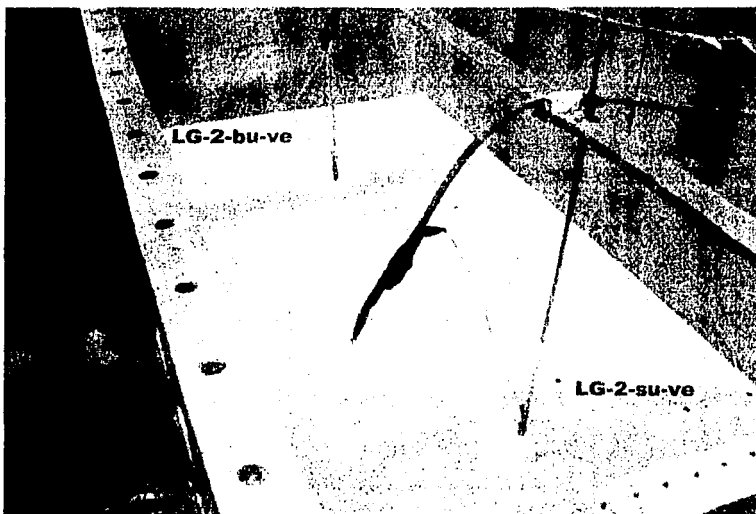


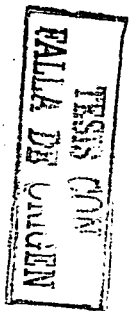
Figura 3.1 Cráteres LG-2-bu-ve y LG-2-su-ve

El volumen fue obtenido con la cuadrícula que se interpoló a partir de los puntos recabados con el perfilómetro, como se mencionó anteriormente. En la figura 3.2 se muestra una imagen en tercera dimensión del cráter LG-2-su-ve. Esta figura se obtuvo de la cuadrícula interpolada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 3.2 Resultados de explosiones sobre una superficie plana de arena

Número de Prueba	Aceleración g	Tipo de Suelo	Densidad del suelo (KN/m ³)	Contenido de agua (%)	EBW	Profundidad de la carga	Posición	Unidades del modelo					Unidades escaladas			
								Carga TNT eqv (mg)	Volumen (cm ³)	Radio (cm)	Profundidad (cm)	Relación de aspecto r/d	Carga TNT eqv (kg)	Volumen (m ³)	Radio (m)	Profundidad (m)
LG-1-su-ho	1	Arena	15.598	0.0	RP-80	Superficie	horizontal	252.5		6.67	1.70	3.92	0.000253		0.067	0.017
LG-2-bu-ve	50	Arena	15.676	0.0	RP-80	Mitad enterrada	vertical	252.5	28.36	4.79	1.30	3.68	31.566	3.545	2.390	0.549
LG-2-su-ve	50	Arena	15.676	0.0	RP-80	Superficie	vertical	252.5	25.45	4.42	1.09	4.05	31.566	3.181	2.208	0.545
LG-3-su-ho	50	Arena	15.559	0.0	RP-80	Superficie	horizontal	252.5	21.01	4.16	0.82	5.07	31.566	2.626	2.080	0.410
LG-3-su-ve	50	arena	15.559	0.0	RP-80	Superficie	vertical	252.5	22.31	4.38	1.05	4.17	31.566	2.789	2.188	0.525



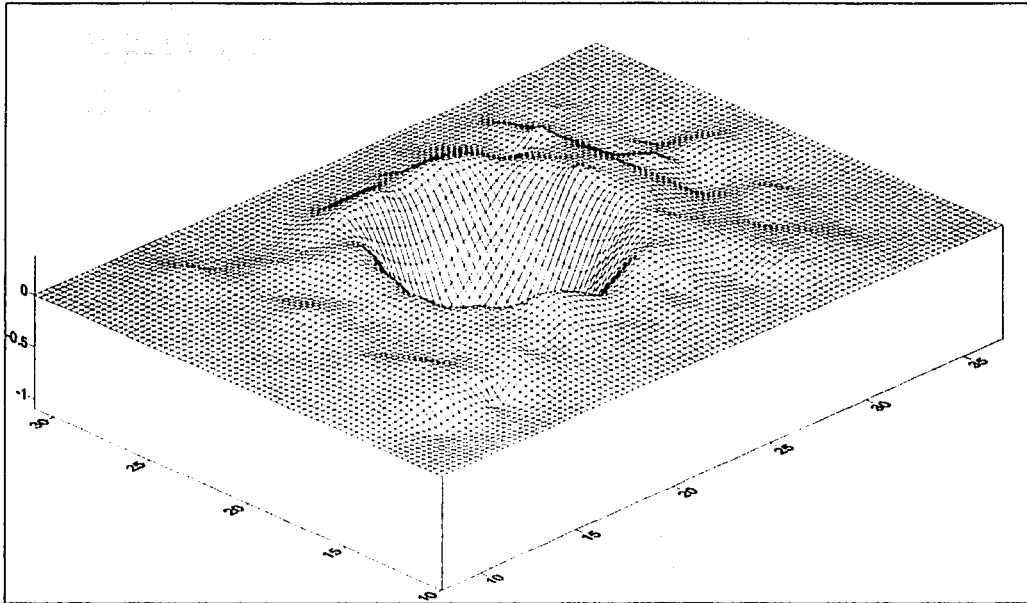


Figura 3.2 Perfil de cráter para la prueba LG-2-su-ve (unidades en cm)

3.3 Análisis

Las figuras 3.3 a 3.5 nos presentan el radio, profundidad y volumen aparentes escalados, los cuales están graficados contra la carga escalada equivalente en TNT. En estas gráficas los resultados están divididos según la posición de la carga de la siguiente manera: su-ho significa que la carga se colocó al nivel de la superficie en una posición horizontal, bu-ve que la carga estaba parcialmente enterrada y vertical, y finalmente su-ve eran las que estaban en la superficie pero verticalmente, esto es, una punta de la carga estaba tocando el suelo y la otra no.

En estas gráficas se incluyeron las líneas de tendencia para los resultados de Schmidt y Holsapple (1978), Serrano (1987) y Ferrero (1988). Las gráficas se encuentran en una escala logarítmica y la línea de tendencia sigue una función potencial.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Se puede observar que los resultados concuerdan con los obtenidos por los otros investigadores; los resultados están entre la línea de tendencia para los resultados de Schmidt y Holsapple y la obtenida por Serrano. El presente trabajo difiere de los otros ya que fue hecho con una arena diferente, densidad diferente, y con diferentes posiciones en la carga; todos estos factores contribuyen a la forma del cráter.

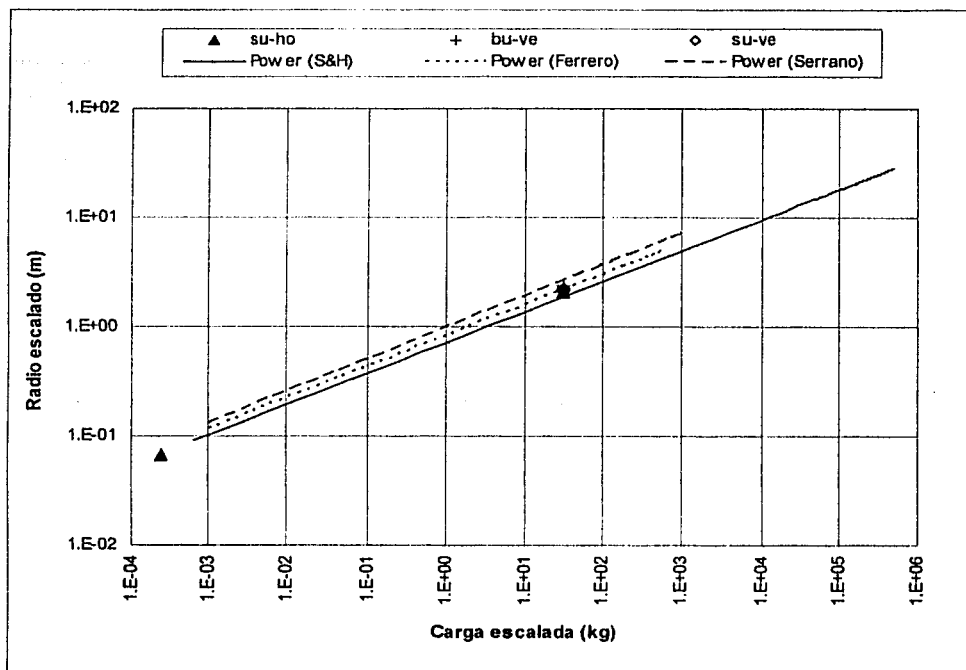


Figura 3.3 Radio escalado vs. carga escalada (equivalente a TNT)

TEMA
FALLA DE ORIGEN

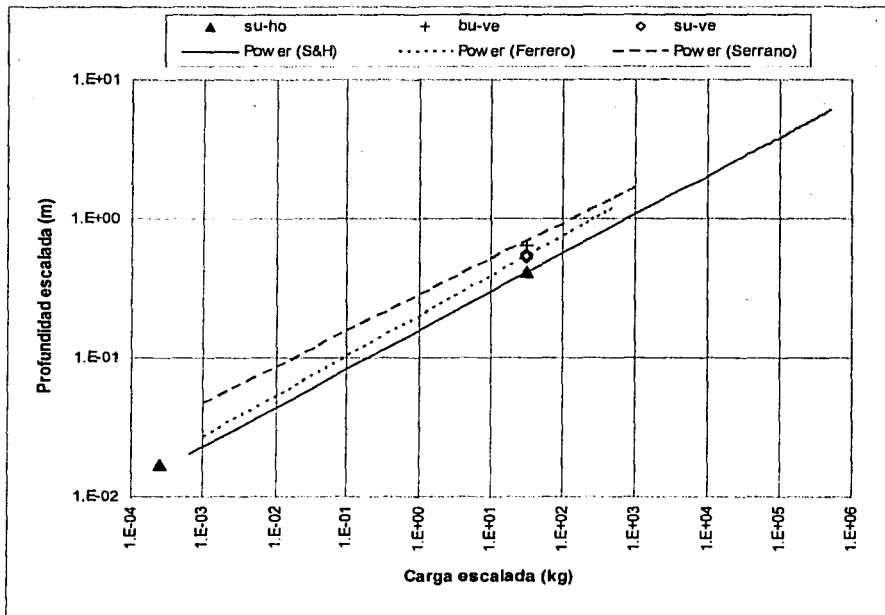


Figura 3.4 Profundidad escalada vs. carga escalada (equivalente a TNT)

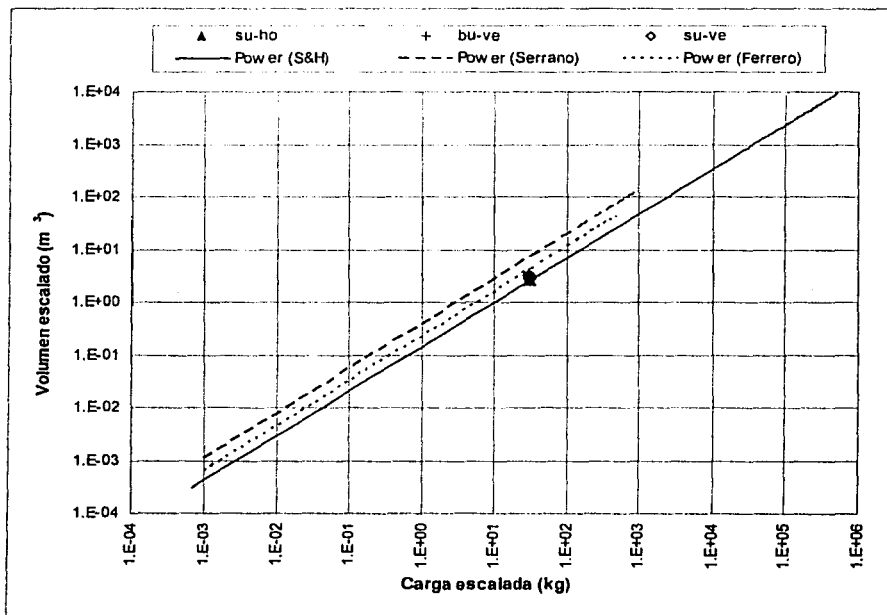


Figura 3.5 Volumen escalado vs. carga escalada (equivalente a TNT)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En las figuras 3.3 y 3.4 se graficó la prueba hecha a 1g, la cual se encuentra separada de las otras, ya que la carga escalda resultó muy pequeña, pero aun así podemos ver la buena relación con la tendencia. El radio del cráter y su profundidad (no escalada) es mayor que el de las otras pruebas, ya que mientras la aceleración de la centrifuga incrementa, la presión confinante también lo hace aumentado la resistencia de la arena, lo cual nos da por resultado cráteres más grandes a niveles de aceleración más pequeños.

Al comparar el cráter LG-2-su-ve contra el cráter LG-3-su-ve, que fueron hechos bajo las mismas condiciones, podemos ver que el radio del cráter LG-3-su-ve es 1.6% menor que el LG-2-su-ve y la profundidad es 3.7% menor, mientras que el volumen es 12.3% menor. Las diferencias que son mínimas, se consideraron que se encuentran dentro del rango de las variaciones experimentales aceptables.

La posición de la carga tiene una gran influencia en la forma del cráter, especialmente en la profundidad de éste. El cráter más profundo se produjo con la carga que estaba parcialmente enterrada en una posición vertical seguida por la que estaba vertical en la superficie del modelo y después le sigue la que estaba en la superficie en una posición horizontal, como se esperaba. El radio del cráter tuvo un comportamiento similar, teniendo una diferencia menor entre las diferentes posiciones de las cargas, el volumen también presentó el mismo comportamiento.

Ferrero encontró que el volumen del cráter decrecía en un 47% cuando la posición de la carga cambiaba de estar totalmente enterrada en posición vertical a estar horizontal tangente a la superficie (HOB=1). De las pruebas LG-2-bu-ve (parcialmente enterrada) a la LG-3-su-ho (tangente a la superficie) se registró un cambio del 26% en el volumen.

Se puede ver en la tabla 3.3 que la mayor relación de aspecto (radio / profundidad) se presentó con la carga que fue colocada en la superficie y horizontal, lo que quiere decir que esa posición produjo el cráter más plano.

Al momento de realizar las mediciones se observó que dentro del cráter quedaban residuos de los explosivos, lo que influenciaba las mediciones del cráter especialmente a la profundidad. En algunas ocasiones, el cráter se deformó debido a que algunas partes del detonador cayeron adentro del cráter o en los labios.

Tabla 3.3 Relación de aspecto

Número de prueba	Aceleración g	Densidad del suelo (KN/m ³)	Carga TNT eqv (mg)	Radio (cm)	Profundidad (cm)	Relación de aspecto r/d
LG-2-bu-ve	50	15.676	252.53	4.78	1.30	3.68
LG-2-su-ve	50	15.676	252.53	4.42	1.09	4.05
LG-3-su-ho	50	15.559	252.53	4.16	0.82	5.07
LG-3-su-ve	50	15.559	252.53	4.38	1.05	4.17

En la figura 3.6 se presenta las líneas del contorno para el cráter LG-2-bu-ve. Los contornos de los demás cráteres se presentan en el apéndice A.

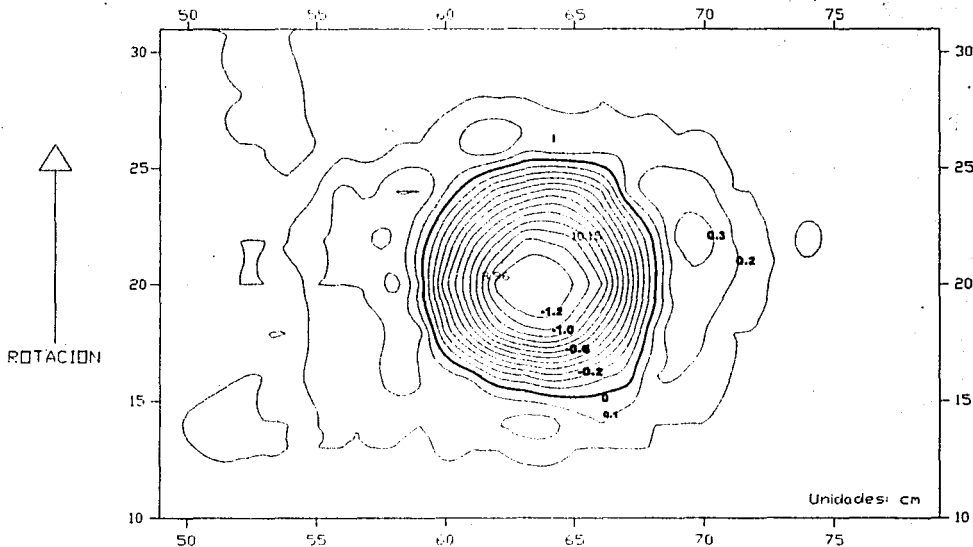


Figura 3.6 Perfil del cráter para la prueba LG-2-bu-ve

TECNOLOGIA
FALLA DE CANGEN

4. Modelado de explosiones sobre una superficie plana de arena y arcilla.

Como siguiente paso en este estudio, se realizaron siete pruebas en un suelo hecho de una mezcla de arcilla con arena. Este material es el mismo que se utilizó en la tercera serie, en los terraplenes, por lo que tuvo que cumplir con ciertas características principalmente, permeabilidad y cohesión. Por ende, se decidió hacer una mezcla de arena con arcilla, pero para saber la relación que estos dos materiales tenían que guardar se tuvieron que realizar pruebas de permeabilidad.

Se buscaba una permeabilidad de 10^{-5} cm/s, esta permeabilidad se escogió ya que se consideró apropiada para el terraplén de tierra homogéneo que se utilizará en la siguiente serie de pruebas.

Para poder obtener esa permeabilidad, la arena de Nevada se mezcló con kaolín. Se realizaron dos pruebas de permeabilidad con diferente relación entre los materiales para seleccionar la relación más apropiada entre la arcilla y la arena.

Una vez que la mezcla de arcilla y arena que se va a usar fue seleccionada, se realizó una prueba proctor con el objeto de determinar la compactación máxima que podía ser obtenida así como también el contenido de humedad óptimo. También se llevó a cabo una prueba triaxial con el suelo compactado con el óptimo contenido de humedad para obtener la resistencia del suelo, para ese propósito se realizó una prueba no consolidada no drenada (UU).

4.1 Prueba de permeabilidad

La permeabilidad fue medida en un permeámetro de pared flexible. Se hicieron dos pruebas, la primera tenía una mezcla de 10% arcilla y 90% arena y la segunda tenía un 15% de arcilla y un 85% de arena.

La permeabilidad fue calculada usando la siguiente fórmula:

$$K = \frac{Q}{\frac{\Delta H}{\Delta L} A}$$

Se utilizó una contrapresión de 275.8 KPa y una presión confinante de 310.3 KPa. En el proceso de saturación la presión confinante y contrapresión fueron aumentadas en incrementos de 34.5 KPa, y sólo se hacían hasta que el suelo dejaba de absorber el agua. Una vez que la presión confinante alcanzó un valor de 310.3 KPa se aplicó una carga de presión de 2396.5 KPa para realizar la prueba de permeabilidad.

La permeabilidad obtenida para la mezcla de 10% kaolín y 90% arena de Nevada fue de 4.75×10^{-5} cm/seg y para 15% de kaolín y 85% de arena de Nevada la permeabilidad fue de 9.21×10^{-5} cm/seg. Con base en estos resultados se escogió la relación de 15% arcilla y 85 % arena para construir los modelos.

4.2 Prueba Proctor

Después de que se decidió la mezcla de arena-arcilla a usarse, se hizo una prueba proctor para saber el contenido de agua óptimo y el peso volumétrico seco máximo. Se realizó una prueba de compactación proctor estándar, empleando en un cilindro de acero con un diámetro de 10.2 cm, una altura de 11.7 cm y una extensión de 5 cm de altura; se utilizó un martillo de 2.5 Kg con el que se aplicó 25 golpes por capa; se hicieron 3 capas. El pistón era dejado caer desde una altura de 30.5 cm. Con estas características se aplicó una energía de 6 Kg cm/cm³.

Se obtuvieron cinco puntos de la curva de compactación con diferentes contenidos de agua, en cada subsiguiente prueba se le iba agregando agua. Los resultados se muestran en la figura 4.1, donde podemos ver que el contenido óptimo de agua es de 7.5%, con este contenido de agua se logró un peso unitario seco de 18.511 KN/m³.

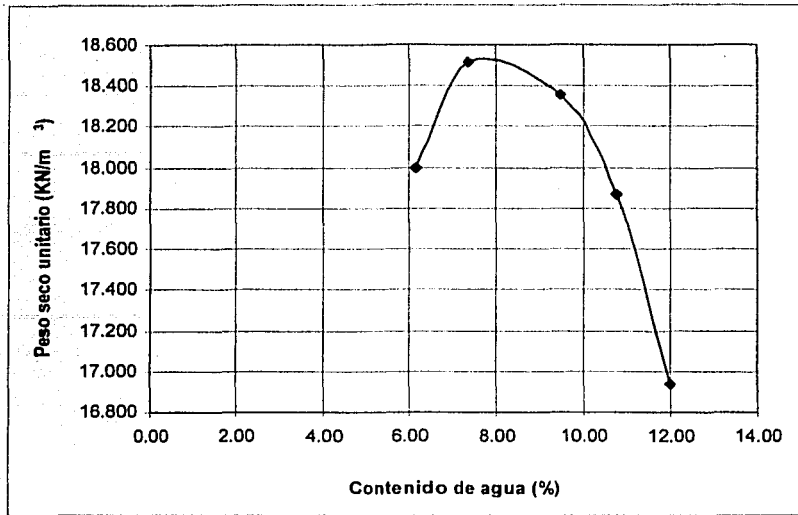


Figura 4.1 Prueba proctor estándar de compactación

4.3 Pruebas UU

Uno de los parámetros que influyen en la forma del cráter es la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, por lo cual se realizó un prueba triaxial UU para obtener la resistencia al esfuerzo cortante no drenada del suelo. Para esta prueba la arena y la arcilla se mezclaron en seco, después se le agregó 8% de agua y es volvió a mezclar hasta que el suelo se encontraba totalmente homogéneo. Después el suelo es colocó dentro de un cilindro el cual tenía una membrana de látex en su interior, el suelo es puso en capas y se compactó dentro del cilindro, una vez compactado se colocó dentro de la cámara triaxial y para proceder con la prueba.

La prueba UU se realizó a un velocidad de deformación constante de 1% / min. El esfuerzo principal menor fue de 0.14 kg/cm² y el esfuerzo desviador fue de 5.75 kg/cm², obteniéndose una resistencia al esfuerzo cortante no drenado de 2.81 kg/cm².

Cabe mencionar que la resistencia a la compresión varía según la velocidad de la carga, Casagrande y Wilson (1951) realizaron una investigación sobre el efecto de la velocidad de carga en la resistencia de arcillas de la zona del canal de Panamá.

En la tabla 4.2 se muestra una gráfica del tiempo a la falla contra la relación de resistencia, la cual es el cociente de la resistencia a la compresión obtenida con una velocidad de carga diferente y la obtenida con una velocidad de carga normal. En dicha gráfica se muestran dos líneas las cuales delimitan el rango de variación. Encontraron que la resistencia aumenta al doble con un tiempo a la falla de aproximadamente 0.0002 segundos, y por el contrario esta relación disminuye hasta valores de 0.3 con un tiempo a la falla de aproximadamente 70,000 minutos (48 días).

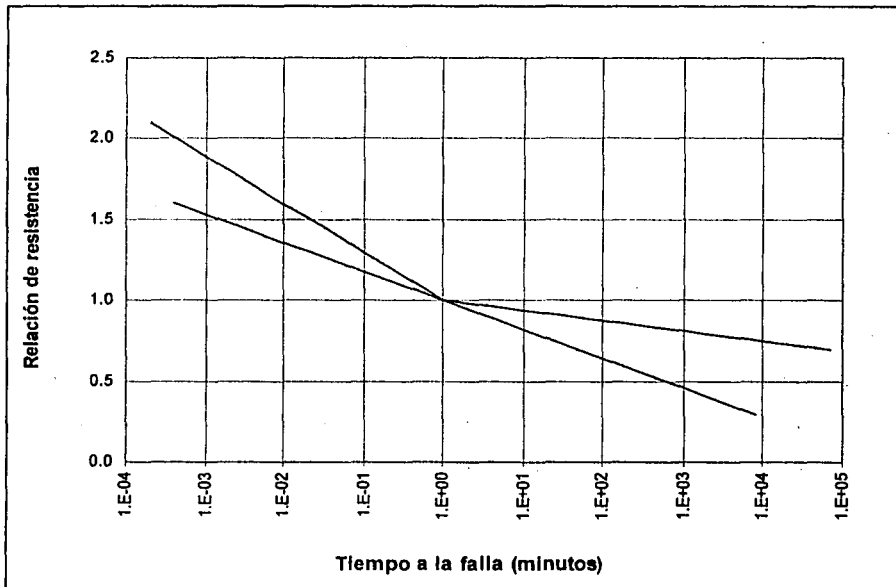


Tabla 4.2 Efecto de la velocidad de carga en la resistencia a la compresión

Estos resultados tienen importantes implicaciones en la resistencia al esfuerzo cortante obtenida en este trabajo, ya que el valor que resultó de la prueba triaxial puede variar

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

significativamente a la que en realidad se tendría bajo las condiciones a las que están sujetas las pruebas en este estudio.

En este mismo artículo menciona que dos suelos compactados en laboratorio y uno no alterado que no se encontraba totalmente saturado, tendía a volverse más fuerte y rígido bajo cargas sostenidas, aún cuando el contenido de agua se mantuvo constante; esto es, cuando eran cargados muy lentamente, fallaban bajo esfuerzos considerablemente mayores que lo que indicaban las pruebas normales de laboratorio. Esto tiene influencia en las presas de tierra ya que la mayoría de los suelos compactados de las presas incrementan su resistencia con el tiempo, aun sin consolidación adicional.

Por otro lado Santoyo (1969) llevó a cabo una investigación sobre los cambios en la resistencia al corte en las arcillas del lago de Texcoco con el uso de explosivos. En dichos experimentos se detonaron explosivos colocados dentro de 16 perforaciones de 25 cm de diámetro y 15 metros de profundidad separadas 10 metros entre ellas. Dentro de las perforaciones se colocaron 25 kg de una dinamita gelatinosa de alta densidad (toval). Se hicieron 3 sondeos antes de la prueba, en dos de ellos se empleó la veleta y en el otro se rescató una muestra inalterada. Después de la explosión se hicieron tres pruebas de veleta cercanas a las primeras. En los sondeos con veleta se midió la resistencia a cada metro hasta los 20 metros. Concluyó que la disminución de la resistencia al corte provocada por explosivos es importante sólo en puntos muy próximos a donde fueron colocados los explosivos, sin notarse ninguna diferencia en puntos mas alejados a ellos.

4.4 Descripción del modelo

El modelo fue similar al usado en la primera serie de pruebas, consistió en una superficie plana de 7cm de grueso, la diferencia fue que se cambió el tipo de suelo. El suelo se preparó mezclando la arena y la arcilla con el agua dentro de una mezcladora. Primero la arena y la arcilla fueron pesadas y colocadas dentro del mezclador. Una vez que se midió el agua que se le iba a agregar al suelo se le fue poniendo paulatinamente con un rociador

mientras la arena y arcilla daban vueltas dentro de la mezcladora, ocasionalmente se detenía la mezcladora para deshacer los grumos de material.

Una vez que la mezcla quedó lista, el suelo se colocó por capas dentro del contenedor y cada capa fue compactada hasta que se alcanzó una altura de 7 cm. La altura era revisada con el mismo nivelador utilizado en la serie de pruebas anteriores, mismo que se utilizó para emparejar la superficie una vez que se alcanzó la altura deseada. No fue posible obtener la misma precisión que con el modelo de arena, ya que como el suelo era compactado, al mover el nivelador a través del suelo este se llevaba pedazos más grandes de suelo en vez de granos de arena como en las pruebas anteriores. Se estimó que se obtuvo una precisión de +/- 1 mm.

A pesar del cuidado tomado en compactar el suelo, se obtuvieron diferentes densidades en cada experimento. La mínima fue de 18.247 KN/m^3 y la máxima de 19.816 KN/m^3 dando un promedio de 19.577 KN/m^3 (tabla 4.1).

En esta serie de pruebas la posición de la carga fue constante, solamente se varió la masa de la carga. Las posiciones de las cargas fueron horizontal y superficial. La carga fue puesta en la posición deseada usando el mismo método que en las series anteriores. En la tabla 4.1 se muestra el programa de pruebas.

Se realizaron ocho cráteres colocando dos cargas en la misma caja, pero uno de ellos se desechó. Se utilizaron tres detonadores diferentes y en algunos experimentos se colocaron dos detonadores juntos para ver la diferencia en la forma del cráter contra una carga sola. Se compararon los resultados obtenidos con dos RP-810 y un RP-830, los cuales tienen casi la misma masa explosiva. Finalmente, para obtener cráteres más grandes, dos RP-830 fueron colocados juntos.

Se incrementó el nivel de la aceleración a $80g$'s, ya que esta aceleración fue requerida para poder escalar los terraplenes, esto será explicado con más detalle en la siguiente sección.

Tabla 4.1 Programa de la segunda serie de pruebas

Número de prueba	Aceleración g	Tipo de suelo	EBW	Carga TNT eqv (mg)	Profundidad De la carga	Posición	Densidad del suelo (KN/m ³)	Contenido de agua (%)
LG-4a	80	Arena-arcilla	RP-80	252.5	Superficial	Horizontal	19.326	7.0
LG-4b	80	Arena-arcilla	RP-810	628.3	Superficial	Horizontal	19.326	7.0
LG-5b	80	Arena-arcilla	RP-830	1295.8	Superficial	Horizontal	19.816	6.9
LG-6a	80	Arena-arcilla	2 RP-810	1256.5	Superficial	Horizontal	18.247	7.0
LG-6b	80	Arena-arcilla	2 RP-830	2591.6	Superficial	Horizontal	18.247	7.0
LG-7a	80	Arena-arcilla	2 RP-810	1256.5	Superficial	Horizontal	19.718	7.1
LG-7b	80	Arena-arcilla	RP-810	628.3	Superficial	Horizontal	19.718	7.1

4.5 Resultados

En estos experimentos se midió la profundidad del cráter en 144 puntos para los cráteres hechos con el detonador RP-80 y en 483 puntos para la carga mayor, siguiendo el mismo procedimiento discutido en el capítulo 2. Los contornos del cráter para la prueba LG-6a se muestran en la figura 4.2 y en la figura 4.3 se presenta una fotografía del mismo cráter. Este cráter fue hecho con dos detonadores RP-810 (equivalente a 1 256 mg de TNT). Como se puede observar en la fotografía, la superficie de los cráteres no está tan lisa como los realizados en arena seca, hay grandes pedazos de material los cuales salieron expulsados durante la explosión, la forma del cráter no es tan regular como en las pruebas realizadas previamente. Todos los demás cráteres se pueden ver en el apéndice B. En la tabla 4.2 se muestran los resultados de los experimentos.

Justo después de que se midió el perfil del cráter, se tomaron cuatro muestras para obtener el contenido del agua. Las muestras fueron tomadas de dos lugares diferentes de la caja, uno de la superficie y el otro de la parte inferior de la caja.

Debido a la aceleración centrípeta provocada por la centrifuga durante la prueba, se registró una desaturación del espécimen. Se observó que la parte inferior del modelo tenía un 20% más de contenido de agua que la parte superior.

La máxima profundidad se obtuvo con dos detonadores RP-830 que fueron colocados juntos, y la cual proporcionó una carga escalada de 1 326.9 kg de TNT. Eso produjo un cráter con un radio escalado de 3.8 metros y una profundidad escalada de 1.4 metros.

Tabla 4.2 Resultados de explosiones en una mezcla de arena y arcilla

Número de prueba	Densidad del suelo (KN/m ³)	Contenido De agua (%)	EBW	Carga (mg)	Volumen (cm ³)	Radio (cm)	Profundidad (cm)	Relación de aspecto r/d	Carga escalada TNT eqv (kg)	Volumen Escalado (m ³)	Radio escalado (m)	Profundidad escalada (m)
LG-4a	19.326	7.0	RP-80	252.53	3.63	2.52	0.72	3.50	129.29	1.92	2.02	0.58
LG-4b	19.326	7.0	RP-810	628.25	6.13	2.91	0.97	3.06	321.66	3.14	2.37	0.78
LG-5b	19.816	6.9	RP-830	1295.82	8.17	3.48	0.96	3.63	663.46	4.18	2.78	0.77
LG-6a	18.247	7.0	2RP-810	1256.50	15.63	4.25	1.12	3.79	643.33	8.00	3.40	0.90
LG-6b	18.247	7.0	2RP-830	2591.64	41.66	4.79	1.79	2.67	1326.92	21.33	3.83	1.43
LG-7a	19.718	7.1	2RP-810	1256.50	24.06	4.09	1.30	3.15	643.33	12.32	3.27	1.04
LG-7b	19.718	7.1	RP-810	628.25	11.64	3.22	1.00	3.22	321.66	5.96	2.57	0.80

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

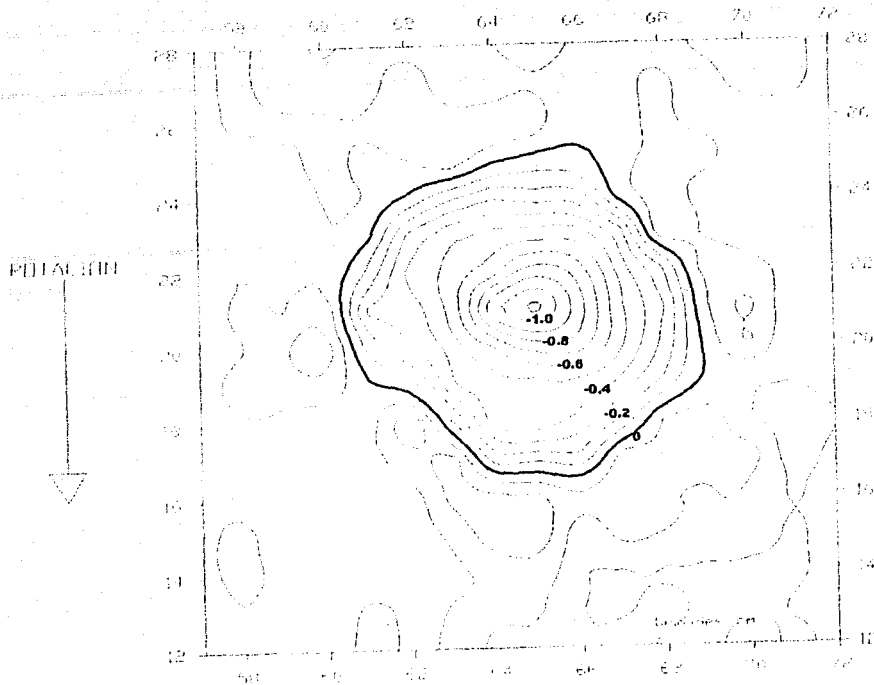


Figura 4.2 Cráter LG-6a



Figura 4.3 Cráter LG-6a

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.6 Análisis

En las figuras 4.4 a 4.6 se muestran graficados el radio, la profundidad, y el volumen escalados aparentes contra la carga escalada en TNT equivalente. En estas graficas la tendencia de Schmidt y Holsapple (1978) se muestra como referencia.

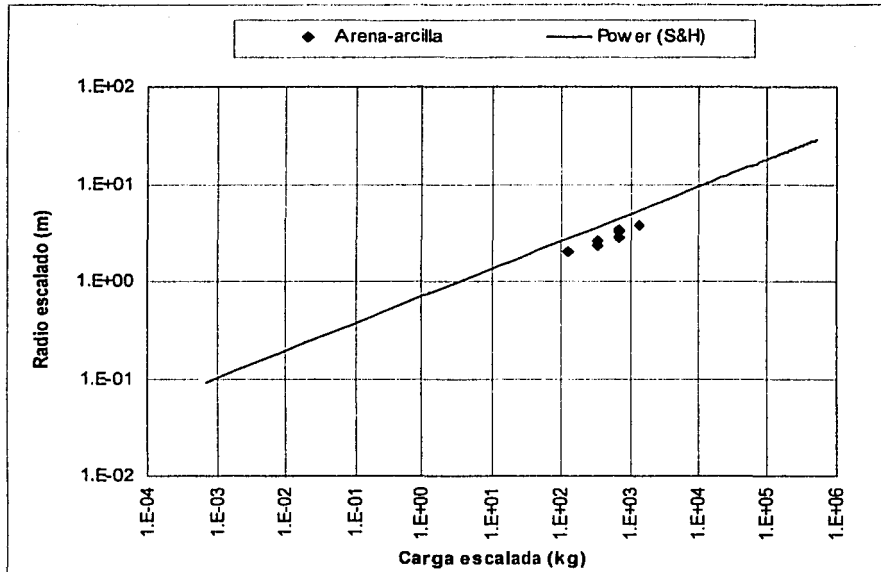


Figura 4.4 Radio escalado vs. la carga escalada (equivalente a TNT)

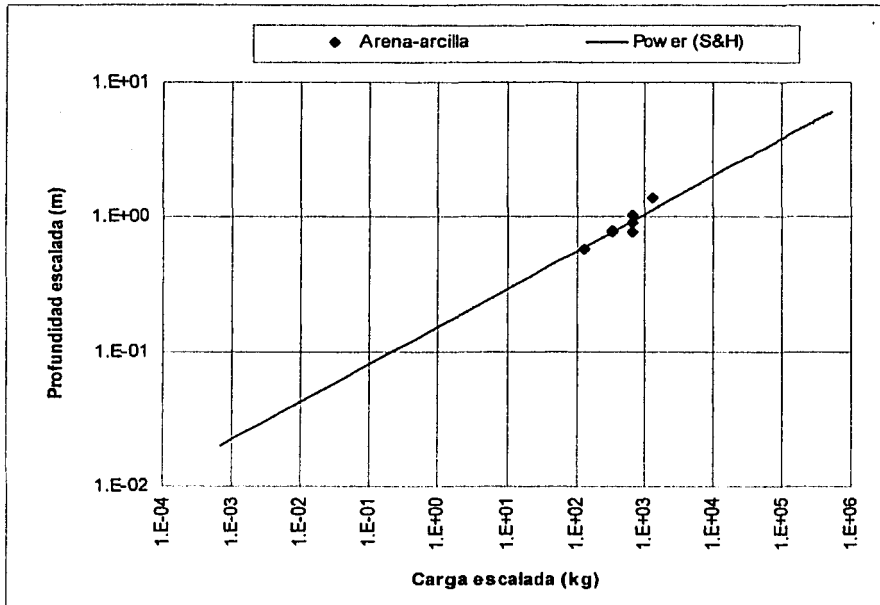


Figura 4.5 Profundidad escalada vs. la masa escalada (equivalente a TNT)

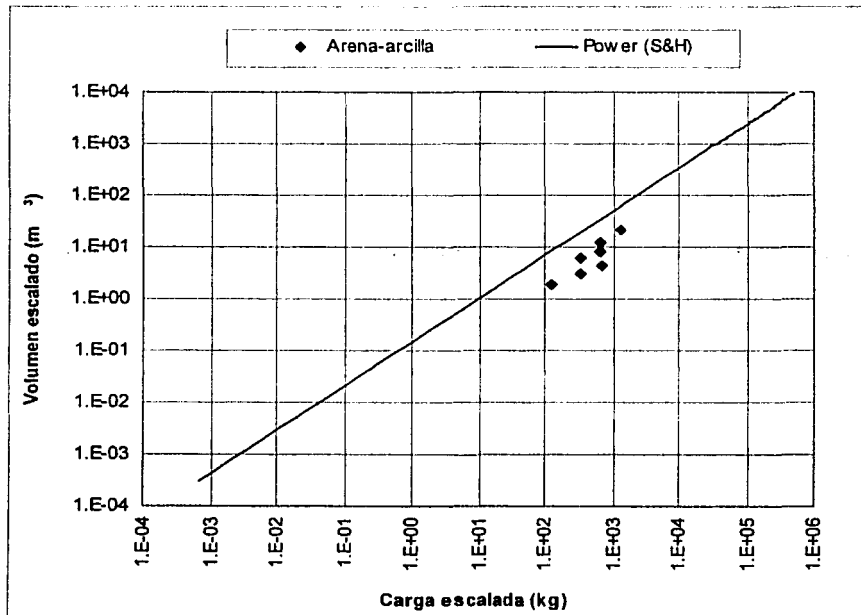


Figura 4.6 Volumen escalado vs. la masa escalada (equivalente a TNT)

Las líneas de tendencia dibujadas con la información en una escala logarítmica tienen la forma $Y \propto W^n$ donde n es el exponente n, W es la masa explosiva y Y son las dimensiones escaladas aparentes del cráter (volumen, radio, y profundidad).

En la tabla 4.3 se reportan los exponentes obtenidos en este estudio así como los correspondientes de los estudios realizados por Schmidt y Holsapple (1978), Serrano (1987) y Brownell (1992). Los exponentes de este estudio son similares a los exponentes de los otros estudios. Los exponentes son 0.984, 0.277 y 0.338 para el volumen, radio, y profundidad respectivamente.

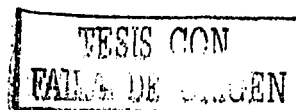
Los especímenes probados en el presente estudio se encontraban compactados a una densidad seca promedio de 17.943 KN/m^3 , la cual es mayor al de los otros investigadores.

Los coeficientes de correlación (valores R^2) derivados de un análisis de regresión usando el método de mínimos cuadrados fueron 0.75, 0.89, y 0.81 para el volumen, radio y profundidad, respectivamente.

Tabla 4.3 Exponentes

	Tipo de suelo	Densidad seca (KN/m^3)	Volumen	Radio	Profundidad
Estudio actual	Kaolin 15%- arena de Nevada 85%	17.943	0.964	0.276	0.335
Schmidt y Holsapple	Aluvión	15.421	0.974	0.316	0.326
Schmidt y Holsapple	Arena de Ottawa	17.648	0.842	0.280	0.279
Serrano	Arena Ottawa	16.716	0.850	0.288	0.257
Brownell	Arena de Tyndall (seca)	14.931	0.831	0.297	0.279
Brownell	Arena de Tyndall (húmeda)	14.931	0.914	0.308	0.297

De acuerdo con estudios teóricos previos, la profundidad y el radio deben de tener el mismo exponente, esto no fue observado en este trabajo. Pero los exponentes obtenidos caen entre los valores predichos por la teoría, esto es, el volumen varía entre 0.75 y 1.0, el radio y la profundidad están entre 0.25 y 0.33. Los exponentes están influenciados por el hecho de



que los valores experimentales estaban dentro de rango muy pequeño de cargas explosivas, así que una diferencia mínima en los valores experimentales podría significar un gran cambio en los exponentes.

En las figuras 4.4 a 4.6 se observa algo de dispersión en los resultados, debida a la diferencia en la densidad del suelo y el método de compactación. También hay algunas diferencias entre los experimentos realizados con la misma carga esto se puede deber a la manera en la que el modelo fue preparado. El suelo fue compactado aplicando varias capas las cuales no siempre eran iguales, también se le pegó con el mismo peso pero la energía de compactación no fue controlada, así que se considera que el suelo no estaba totalmente homogéneo.

Otro factor que tuvo influencia en la forma del cráter, aparte de las diferencias en la densidad del suelo, fue el contenido de agua, aunque se consideró que este factor no fue tan significativo, ya que la variación no fue mucha. Brownell (1992) encontró que las dimensiones aparentes escaladas del volumen, radio y profundidad del cráter se incrementaban en un 150%, 20% y 100% respectivamente para grados de saturación entre 0% y 20%. El contenido de agua promedio en este estudio fue de 7%; en este rango el perfil del cráter es sensible a este parámetro.

Los cráteres LG-6a y LG-7a fueron hechos bajo las mismas circunstancias, ambos tuvieron el mismo detonador con 1256.5 mg equivalente a TNT. Los cráteres LG-4b y LG-7b también fueron hechos bajo las mismas circunstancias. Entre ellos se encontró una diferencia promedio del 70% para el volumen, 8% para el radio y 9% para la profundidad. Las diferencias para la profundidad y el radio son muy pequeñas, pero no es así para el volumen la cual es mayor, esto se pudo deber al modo en que se construyó el modelo.

Es claro por la información de las dimensiones de cráteres hechos en campo a escala real que aun para sitios idénticos, con los mismos explosivos y por los mismos investigadores, hay una tremenda variación en los resultados y es muy probable que esto se deba a errores

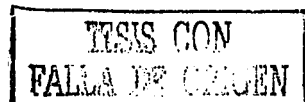
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

experimentales. La ventaja de hacer modelos y probarlos es que uno puede hacer más experimentos con un mejor control, pero aun así la dispersión sigue presente.

Ahora si comparamos los cráteres LG-6a y LG-7a que usaron dos detonadores con una carga 1256.5 mg contra el cráter LG-5b que se hizo con un solo detonador de 1295.8 mg, podemos observar que los cráteres hechos con dos detonadores son más grandes, dando un incremento del 26% para la profundidad, 20% para el radio y un 193% para el volumen. Si comparamos estas diferencias con los datos obtenidos para cráteres hechos bajo las mismas condiciones se puede concluir que dos detonadores con la misma carga que uno solo, producen cráteres más grandes.

Para analizar la forma de los cráteres se graficó la carga contra la relación de aspecto definida como el radio aparente entre la profundidad aparente, en la figura 4.7 se presenta dicha gráfica. La forma del cráter está afectada por la estabilidad de las pendientes del cráter, ya que un derrumbe puede ocurrir afectando la relación de aspecto. La estabilidad de la pendiente y el derrumbe son funciones de la profundidad, la cohesión y el ángulo de fricción interna del cráter.

En la figura 4.7 se puede ver que la relación de aspecto no cambia con respecto a la carga. Sólo el experimento, LG-6b cae debajo de la tendencia general; si este punto no se considera, la tendencia es casi horizontal a pesar de la dispersión. Brownell (1994) también observó que la carga no afecta a la relación de aspecto.



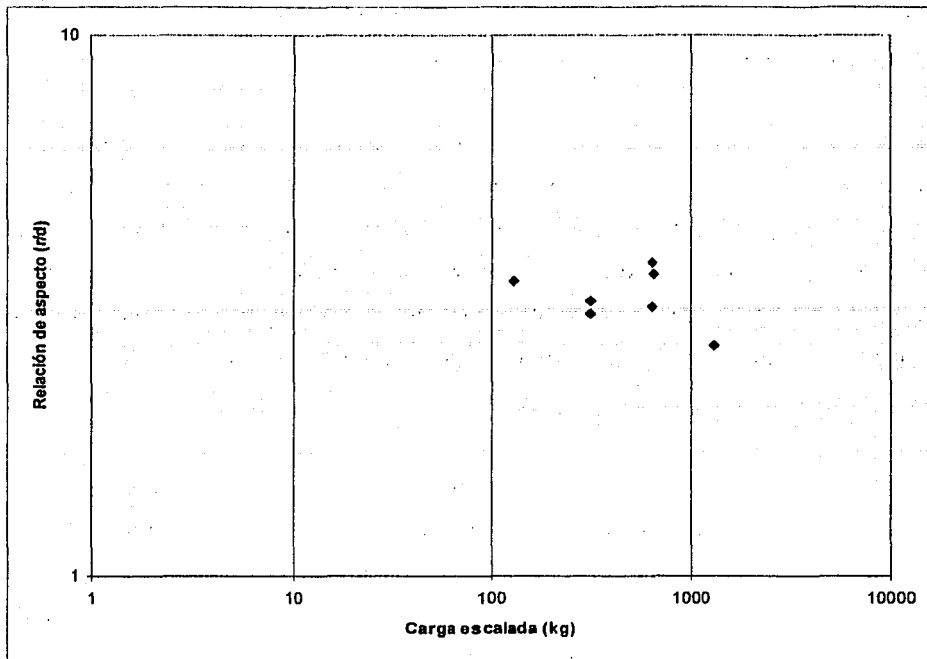


Figura 4.7 Relación de aspecto vs carga escalada (equivalente en TNT)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5 Modelado de explosiones sobre la cresta de terraplenes

La siguiente serie de pruebas fueron hechas sobre un modelo de terraplén. El terraplén que fue modelado tenía las dimensiones que se muestran en la figura 5.1. Para estos experimentos se escogió un terraplén de tierra homogéneo el cual tenía 3.7 m en la cresta, las pendientes eran de 2.5:1, una altura de 5.5 m lo cual da una base total de 31.4 m. Ya que los cráteres son hechos en la parte superior del terraplén, este modelo podría simular un terraplén más alto. El modelo del terraplén se encontraba seco, esto es, sin agua en el embalse.

Las dimensiones fueron seleccionadas de acuerdo con la configuración de un terraplén típico, al tamaño del contenedor del modelo y la aceleración que se utilizó en las pruebas (80 g's).

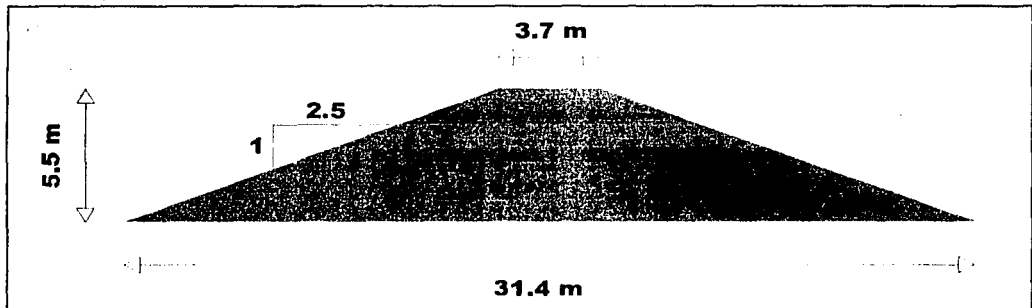


Figura 5.1 Prototipo del terraplén

Los terraplenes de tierra son los más comunes, principalmente porque su construcción involucra el uso de materiales en su estado natural requiriendo un procesado mínimo. La desventaja principal de un terraplén de tierra es que puede ser muy fácilmente dañado o incluso destruido bajo la acción erosiva del agua, si ésta llegara a fluir por encima del terraplén. También esta estructura está sujeta a serios daños por las madrigueras de animales o si éstos llegan a escarbar.

Como fue mencionado antes, la presa puede ser destruida si el agua fluye por encima. Para que el agua fluya por encima del terraplén el cráter tiene que ser más profundo que el bordo libre.

El bordo libre es la distancia vertical entre la cresta del terraplén y el nivel de aguas máximo en el embalse. El bordo libre máximo está definido como la diferencia en elevación entre la cresta de la presa y el nivel mínimo del agua en el embalse. El bordo libre mínimo requerido es dado para prevenir el desbordamiento del agua por la acción del oleaje el cual puede coincidir con el nivel máximo de diseño. El bordo libre requerido varía de 0.9 m a 2.1 m de acuerdo con la velocidad del viento y la longitud del embalse (Diseño de Presas Pequeñas).

5.1 Descripción del modelo

El modelo consistió en un terraplén construido con el mismo suelo usado en la última serie de pruebas (85% de arena de Nevada y 15% de kaolín) con una permeabilidad de 9.21×10^{-5} cm/seg y un promedio de densidad de 15.775 KN/m^3 . Se escogió este suelo por su permeabilidad similar a la de un terraplén homogéneo.

En la figura 5.2 se puede ver el modelo del terraplén, las dimensiones finales a 80g's fueron de 4.6 cm en la cresta, 6.8 cm de altura y 39.2 cm en la base. El terraplén fue colocado paralelo al lado largo de la caja por lo que fue posible hacer dos detonaciones en el mismo terraplén.

El modelo fue construido usando el molde que se ve en la figura 5.3, el cual estaba construido de madera. El suelo se colocó dentro del molde y después se puso una tapa de madera encima del molde fijada con tornillos al resto del molde. Una vez que la tapa se encontraba en su lugar el molde se volteaba y ponía dentro de la caja, después se le quitaban los tornillos y el molde era removido quedando el terraplén en su posición, en este momento la tapa quedaba como la base del terraplén.

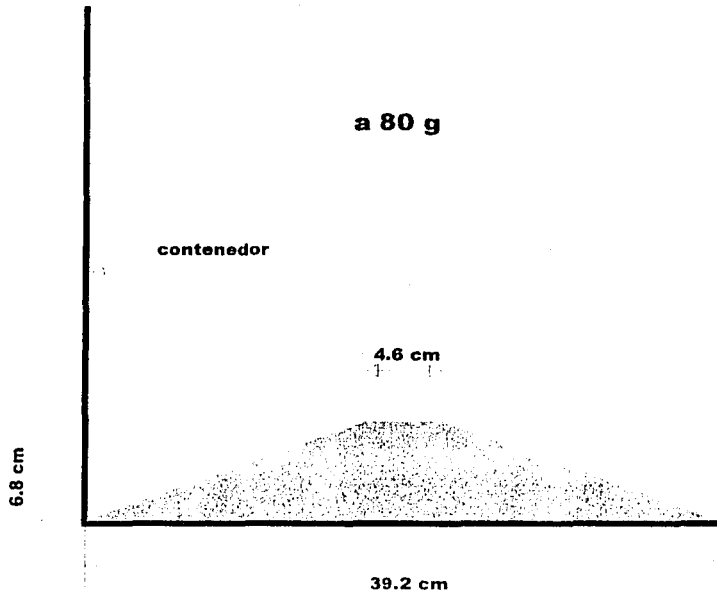


Figura 5.2 Modelo del terraplén

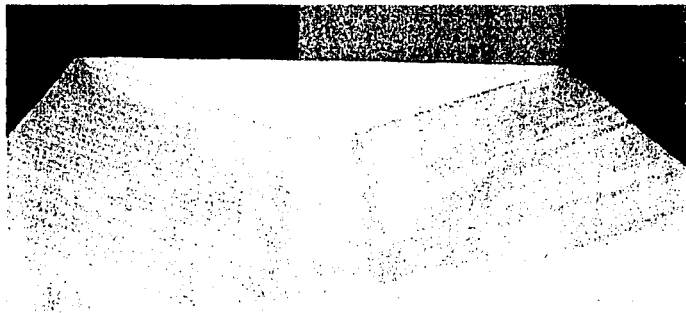


Figura 5.3 Molde del terraplén

El suelo fue preparado siguiendo los mismos pasos que en la segunda serie de pruebas, esto es; colocándolo en capas y compactándolo usando el mismo peso que en la serie anterior.

Los detonadores se pusieron usando la misma técnica que en los otros experimentos, la configuración final se muestra en la figura 5.4.

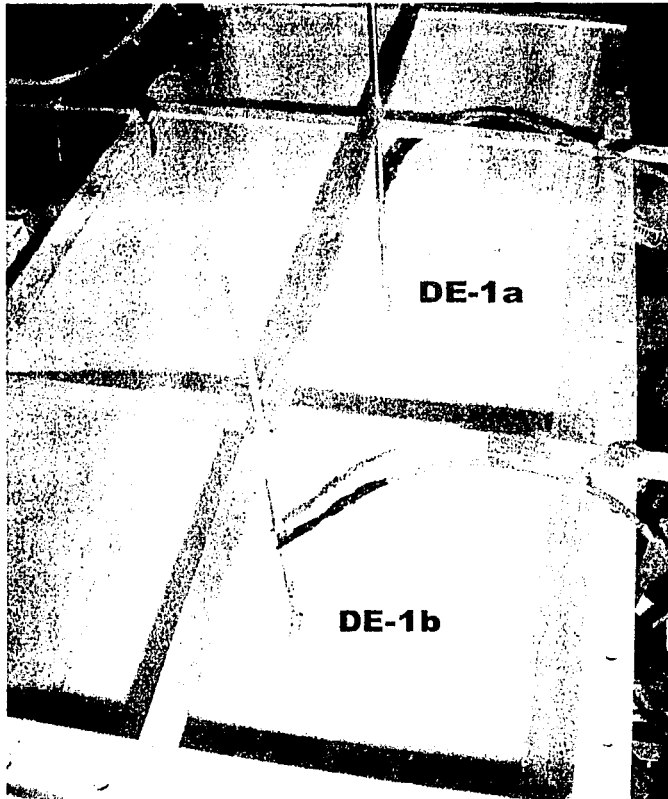


Figura 5.4 Configuración final

Se hicieron ocho pruebas (ver tabla 5.1), de las cuales el experimento DE-4a se desechó. Se utilizó la misma combinación de cargas que en las pruebas anteriores, con el objeto de comparar las los cráteres hechos en una superficie plana y en el terraplén, así que en esta serie de pruebas la carga estaba horizontal y en la superficie del suelo, y la pruebas se

hicieron a 80g's. En la tabla 5.1 se puede notar que los experimentos DE-3b y DE-4b son iguales, esto se hizo para revisar la reproducibilidad del modelo, al igual que en la serie anterior.

Tabal 5.1 Programa de pruebas

Número de prueba	Aceleración (g)	Tipo de Suelo	EBW	Carga TNT eqv (mg)	Densidad del suelo (KN/m ³)	Contenido de agua (%)
DE-1a	80	Arena-arcilla	RP-80	252.5	16.383	8.7
DE-1b	80	Arena-arcilla	RP-810	628.3	16.383	8.7
DE-2a	80	Arena-arcilla	RP-830	1295.8	15.794	8.7
DE-2b	80	Arena-arcilla	RP-810	628.3	15.794	8.7
DE-3a	80	Arena-arcilla	2 RP-830	2591.6	15.892	7.5
DE-3b	80	Arena-arcilla	2 RP-810	1256.5	15.892	7.5
DE-4b	80	Arena-arcilla	2 RP-810	1256.5	15.009	8.2

5.2 Resultados

Una vez detenida la centrifuga y puesto el contenedor fuera de ella, se tomaban las medidas del cráter usando el profilómetro. En la figura 5.5 se muestran los cráteres DE-3a y DE-3b, para el cráter DE-3a se utilizaron dos detonadores RP-830 y para el cráter DE-3b dos detonadores RP-810. Estas cargas crearon los cráteres más grandes. En la figura 5.6 se muestran los contornos del cráter DE-5a. Todos los contornos de los cráteres se presentan en el apéndice C.

Los contornos de los cráteres para esta serie de pruebas difieren de las otras pruebas donde el nivel del suelo original fue determinado y representado por el nivel 0. Para estos experimentos no hay un nivel 0, los contornos son presentados como fueron medidos por el profilómetro, así que en general, el nivel 10.2 corresponde al nivel original de la cresta. Los valores del nivel de la cresta varían entre 10.3 y 10.1. La diferencia es mínima y se debió a que la base de madera no estaba asentada uniformemente sobre el contenedor ni en la misma posición en los diferentes experimentos. También durante las pruebas, pudo haber sufrido algún reacomodo.

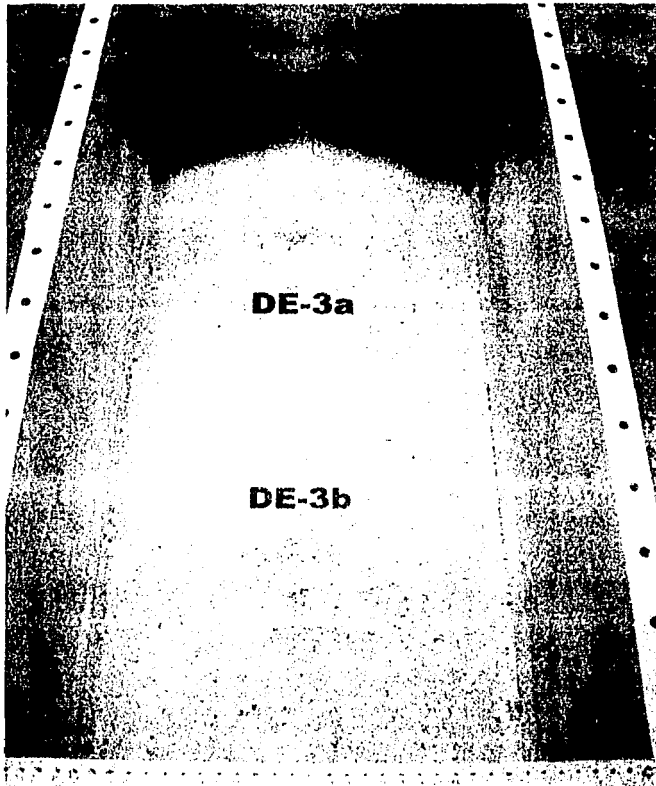


Figura 5.5 Cráteres DE-3a y DE-3b

Los resultados se muestran en las tablas 5.2 y 5.3. En la primera tabla el término radio largo se refiere al radio medido paralelo a la dirección larga de la carga. El radio en la dirección corta no se presenta porque el radio del cráter era más grande que el ancho de la cresta así que no fue posible determinarlo. La profundidad es la máxima profundidad del cráter. También en estas tablas se presentan la densidad del suelo y el contenido de agua.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

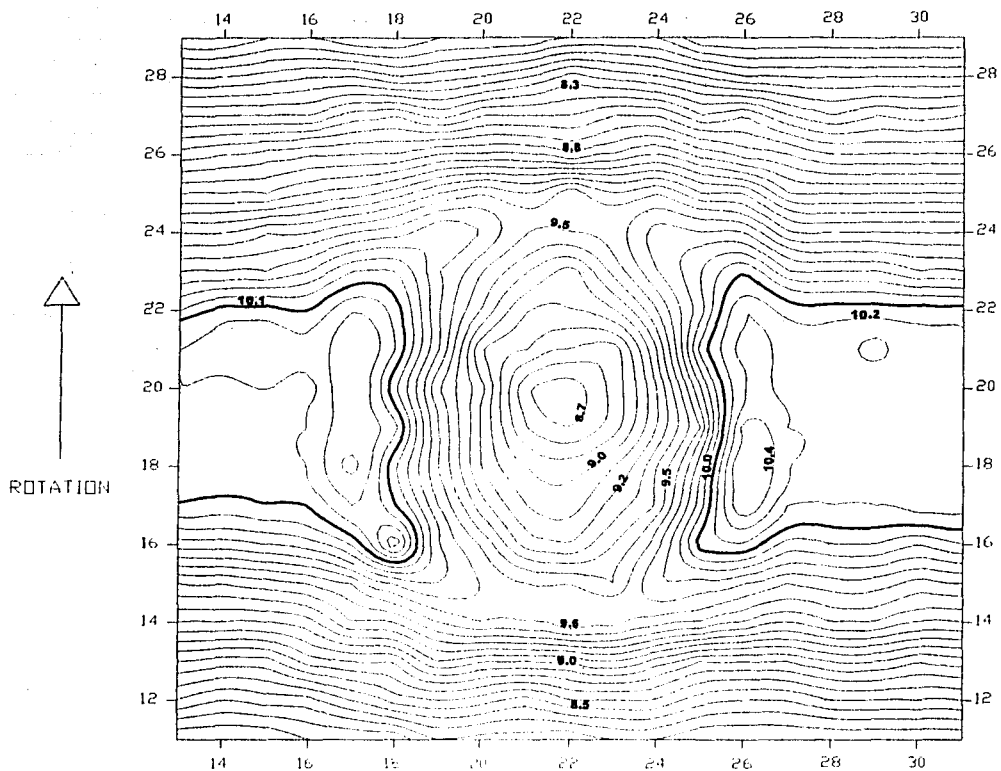


Figura 5.6 Cráter DE-2a

En la tabla 5.3 se presentan las medidas de las brechas creadas en los taludes del terraplén, ya que se consideró que este parámetro podía determinar el daño producido al terraplén porque si la profundidad de esta abertura es mayor que de la del bordo libre, el agua podría fluir sobre el terraplén erosionándolo.

Tabla 5.2 Dimensiones del cráter

Número de prueba	Aceleración g	Tipo de suelo	Densidad del suelo (KN/m ³)	Contenido de agua (%)	EBW	Carga TNT eqv (mg)	Profundidad de la carga	Posición	Radio largo (cm)	Profundidad (cm)	Carga escalada TNT eqv (kg)	Radio escalado (m)	Profundidad escalada (m)
DE-1a	80	Arena-arcilla	16.383	8.7	RP-80	252.5	Superficial	Horizontal	2.39	0.65	129.29	1.91	0.52
DE-1b	80	Arena-arcilla	16.383	8.7	RP-810	628.3	Superficial	Horizontal	2.95	1.00	321.66	2.36	0.80
DE-2a	80	Arena-arcilla	15.794	8.7	RP-830	1295.8	Superficial	Horizontal	3.83	1.40	663.46	3.06	1.12
DE-2b	80	Arena-arcilla	15.794	8.7	RP-810	628.3	Superficial	Horizontal	2.94	0.90	321.66	2.35	0.72
DE-3a	80	Arena-arcilla	15.892	7.5	2RP-830	2591.6	Superficial	Horizontal	4.72	2.20	1326.92	3.78	1.76
DE-3b	80	Arena-arcilla	15.892	7.5	2RP-810	1256.5	Superficial	Horizontal	4.08	1.60	643.33	3.26	1.28
DE-4b	80	Arena-arcilla	15.009	8.2	2RP-810	1256.5	Superficial	Horizontal	4.08	1.80	643.33	3.26	1.44

Tabla 5.3 Dimensiones de la abertura lateral

Número de prueba	Aceleración g	Carga TNT eqv (mg)	Prof. sup (cm)	Prof. inf (cm)	Ancho sup (cm)	Ancho inf (cm)	Prof. promedio (cm)	Ancho promedio (cm)	Prof. sup. escalada (m)	Prof. inf. escalada (m)	Ancho sup. escalado (m)	Ancho inf. escalado (m)	Prof. prom. escalada (m)	Ancho prom. escalado (m)
DE-1a	80	252.5	0.03	0.15	0.63	2.53	0.09	1.58	0.02	0.12	0.50	2.02	0.07	1.26
DE-1b	80	628.3	0.40	0.20	5.22	3.37	0.30	4.30	0.32	0.16	4.18	2.70	0.24	3.44
DE-2a	80	1295.8	0.50	0.40	7.38	6.44	0.45	6.91	0.40	0.32	5.90	5.15	0.36	5.53
DE-2b	80	628.3	0.10	0.30	3.36	4.85	0.20	4.11	0.08	0.24	2.69	3.88	0.16	3.28
DE-3a	80	2591.6	1.10	0.30	10.15	7.85	0.70	9.00	0.88	0.24	8.12	6.28	0.56	7.20
DE-3b	80	1256.5	0.60	0.40	8.25	6.76	0.50	7.51	0.48	0.32	6.60	5.41	0.40	6.00
DE-4b	80	1256.5	0.70	0.40	8.29	6.29	0.55	7.29	0.56	0.32	6.63	5.03	0.44	5.83

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La profundidad sup es la profundidad de la brecha en el talud que está localizada en la parte superior; el ancho sup es el ancho de la brecha medida en la orilla de la cresta del talud superior. La profundidad y el ancho inf son las medidas de la brecha del talud inferior.

En la figura 5.7 se aprecia el cráter DE-3a visto de lado, aquí podemos ver la profundidad y el ancho de la abertura en el talud. El mismo cráter en tercera dimensión se muestra en la figura 5.8, el resto de las figuras en tercera dimensión se encuentran en el apéndice D.

Al igual que en la serie anterior, se tomaron cuatro muestras de suelo para obtener el contenido de agua justo después de haber medido el cráter. Al igual que en la serie anterior se observó la desaturación de la parte superior del modelo.

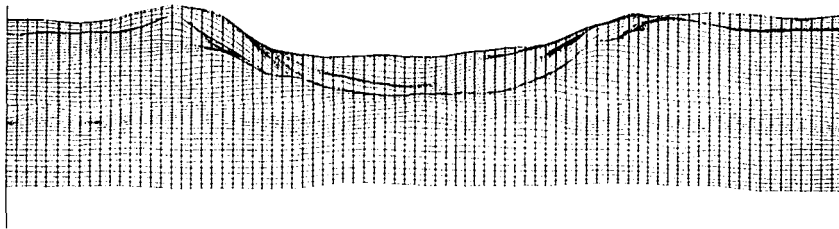


Figura 5.7 cráter DE-3a

5.3 Análisis

Como se puede ver en los contornos de los cráteres (apéndice C), la forma del cráter no es circular sino oval. El diámetro en la dirección longitudinal del terraplén es más corto que en el plano transversal, esto se debe a que en la dirección longitudinal la presión confinante es mayor que en la sección transversal donde se encuentran los taludes. El diámetro en la dirección transversal del terraplén no pudo ser medido ya era mayor que la cresta, por lo tanto el volumen tampoco se calculó.

En la figura 5.9 el radio medido en la dirección longitudinal se encuentra graficado contra la carga escalada en equivalente a TNT. En esta figura está graficada la tendencia de Schmidt y Holsapple para la arena de Ottawa para referencia.

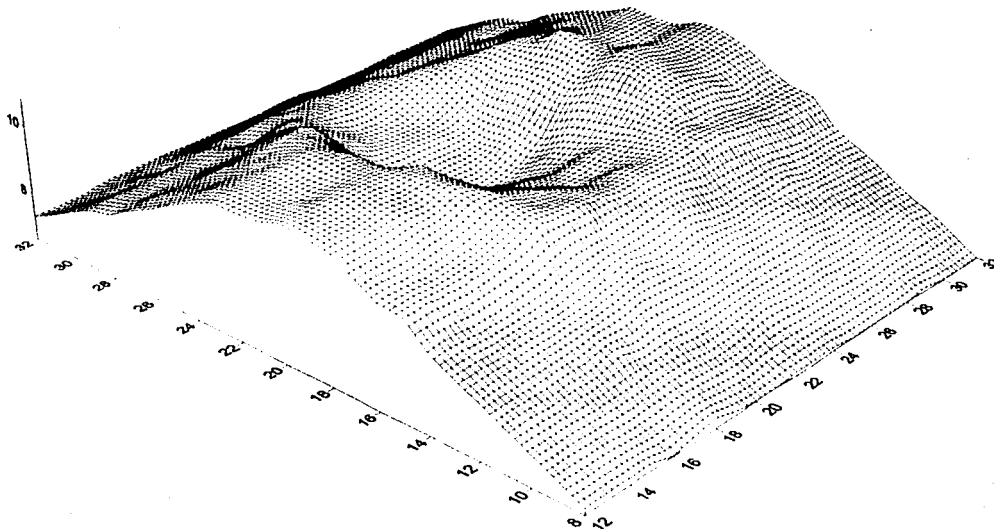


Figura 5.8 cráter DE-3a

La línea de tendencia para el radio aparente del cráter dibujado en una escala logarítmica también tiene la forma $Y \propto W^n$ donde el exponente n en este caso es de 0.318 con un valor R^2 de 0.96. Este resultado es un poco mayor que el que se obtuvo para los cráteres hechos sobre una superficie plana, donde el exponente fue de 0.276. Aunque el exponente fue mayor que el obtenido para una superficie plana aun concuerda con los expuestos en la tabla 4.3.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

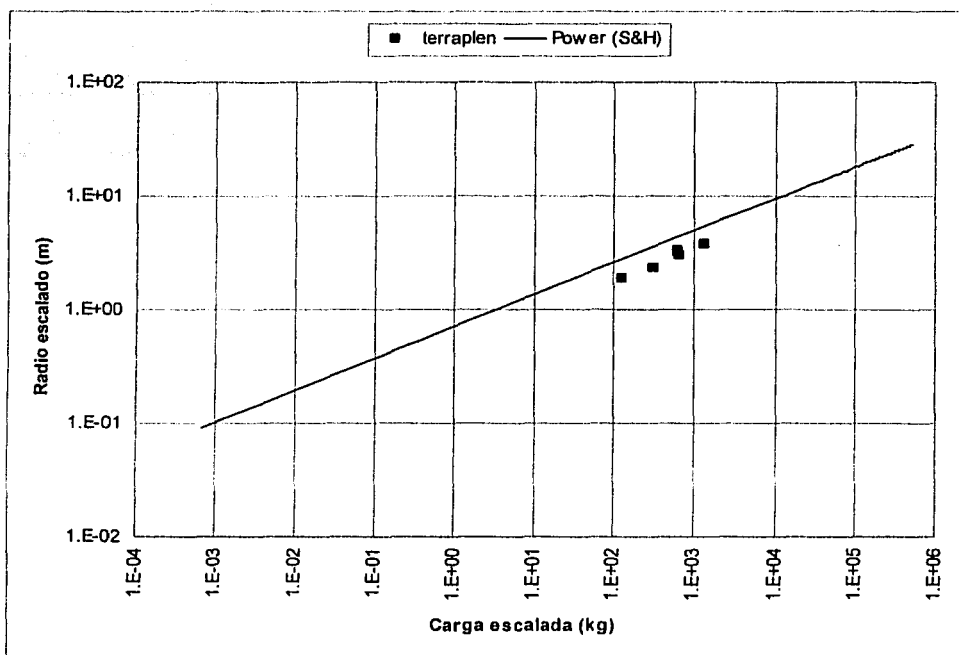


Figura 5.9 Radio escalado del cráter vs la carga escalada

En la figura 5.10 se muestra el radio obtenido en la dirección longitudinal del terraplén y el radio que se obtuvo en la serie anterior para una superficie plana contra la carga, en esta figura se puede observar que los valores son casi iguales. La diferencia del radio fue en promedio de 13%, y de acuerdo con el dispersión presentada en la información podemos considerar que son casi iguales.

Una gráfica de la profundidad escalada contra la carga de masa escalada con equivalencia en TNT se presenta en la figura 5.11. En esta grafica hay tres series diferentes, la primera es la línea de tendencia de los resultados de Schmidt y Holsapple (1978) para la arena de Ottawa, la segunda es la profundidad máxima del cráter y la tercera es la profundidad máxima de la brecha en el talud. Hubo dos resultados para la profundidad de la brecha en el talud, ya que hay dos taludes, en esta gráfica sólo se presenta la máxima.

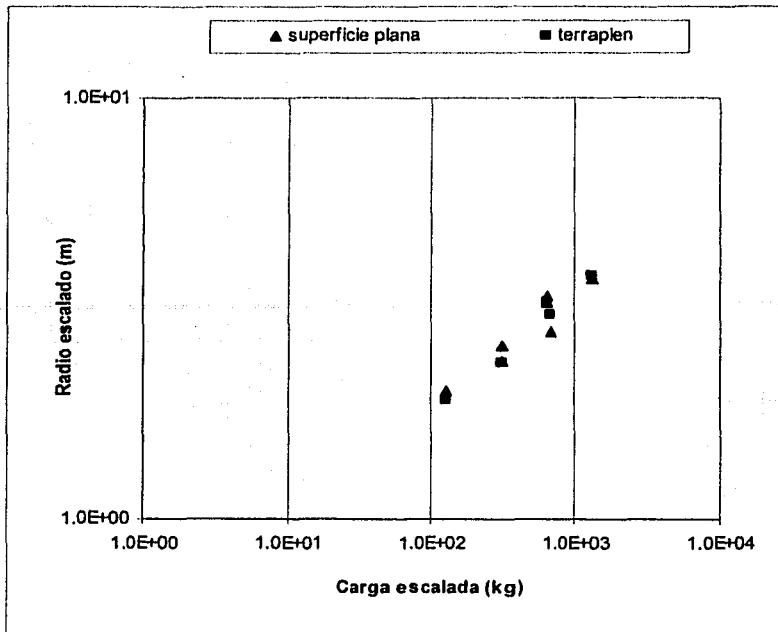


Figura 5.10 Radio escalado vs carga escalada

La profundidad de la brecha en el talud del cráter más pequeño, DE-1a, cae muy por debajo en la gráfica, esto se debe a que la carga era la más pequeña y apenas abrió un brecha en un lado del terraplén y era poco profunda en ese lugar. La profundidad en el centro del cráter es mayor que la profundidad en la abertura en el talud, pero esta diferencia se hace más corta mientras que la carga se incrementa, esto se debe a que el área de mayor profundidad se vuelve mayor a medida que la carga se incrementa, tendiendo a ser la misma en el centro del cráter que en la brecha del talud.

El exponente para la profundidad fue de 0.559 con un valor de R^2 de 0.94, el cual es mucho mayor que el reportado para la superficie plana que fue de 0.335 (ver tabla 4.3).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

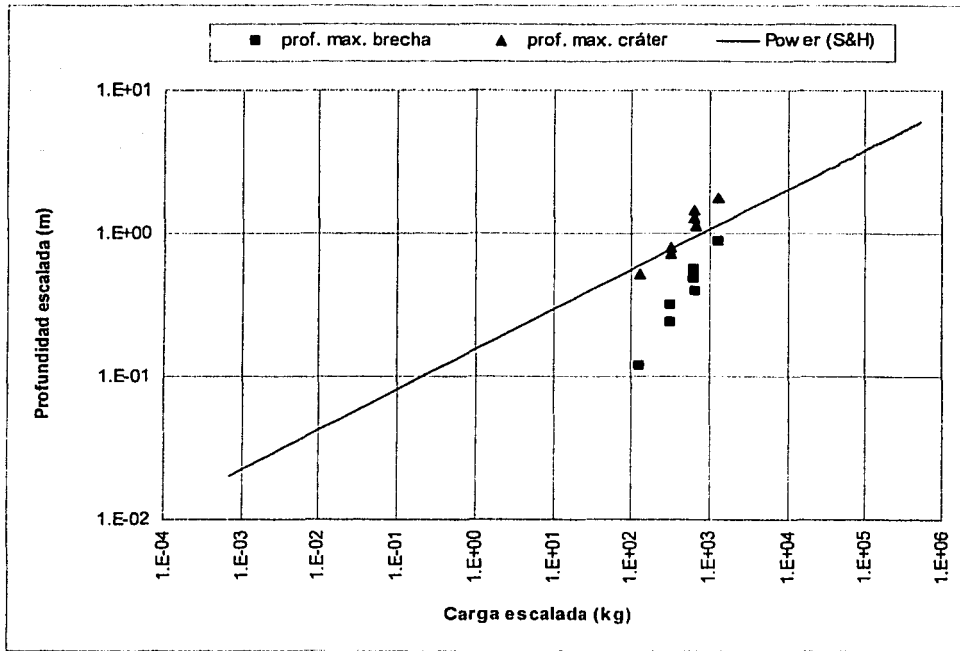


Figura 5.11 Profundidad escalada vs masa de la carga escalada

Si comparamos los resultados de la profundidad del cráter hechos en el terraplén contra las profundidades de los cráteres hechos en la segunda serie de pruebas, se puede ver (figura 5.12) que la profundidad del cráter en la presa es un poco más profunda que aquellas creadas en superficie plana, la diferencia es en promedio 34%.

Los cráteres DE-1b y DE-2b fueron hechos bajo las mismas circunstancias, ambos tenían un detonador RP-810 con una masa de carga de 628.3 mg. Presentaron una diferencia en el radio de 0.3% y en la profundidad de 11%. Los cráteres DE-3b y DE-4b usaron la misma carga (dos detonadores RP-810), su radio fue el mismo y presentaron una diferencia del 12% en la profundidad. Hay que notar que la diferencia en estos experimentos fue menor que la obtenida para pruebas similares en superficies planas. Lo anterior se puede deber a que la compactación fue diferente ya que en los experimentos de la segunda serie de pruebas la parte superior del modelo, donde se realizaron las explosiones, fue la capa que se

compactó al último, contrario a lo que pasó en el terraplén donde la cresta fue lo primero que se compactó, por lo que tuvo una compactación mejor.

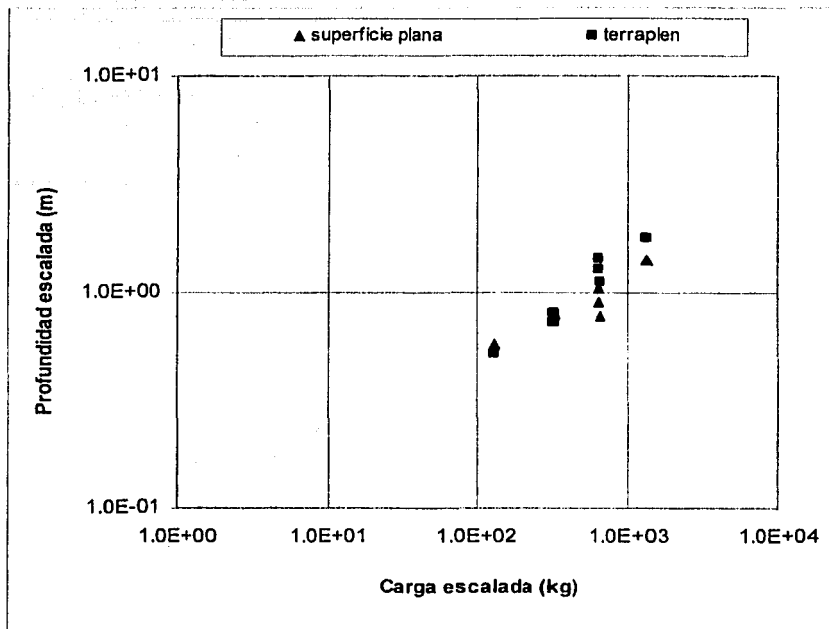


Figura 5.12 Profundidad escalada vs masa de la carga escalada

Al comparar los cráteres creados con un detonador RP-830 y el hecho con dos detonadores RP-810, que tienen casi la misma carga explosiva, se puede observar que el radio es 7% mayor usando dos detonadores y un 21% más profundo.

En las figuras 5.13 y 5.14 se muestra la profundidad máxima de la abertura en el talud y el ancho máximo de ésta, graficados contra la carga escalada. La profundidad de la brecha crece a medida que la carga es mayor, pero no pasa lo mismo para el ancho porque al parecer el ancho tiende a estabilizarse, ya que la diferencia es menor según aumenta la carga.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

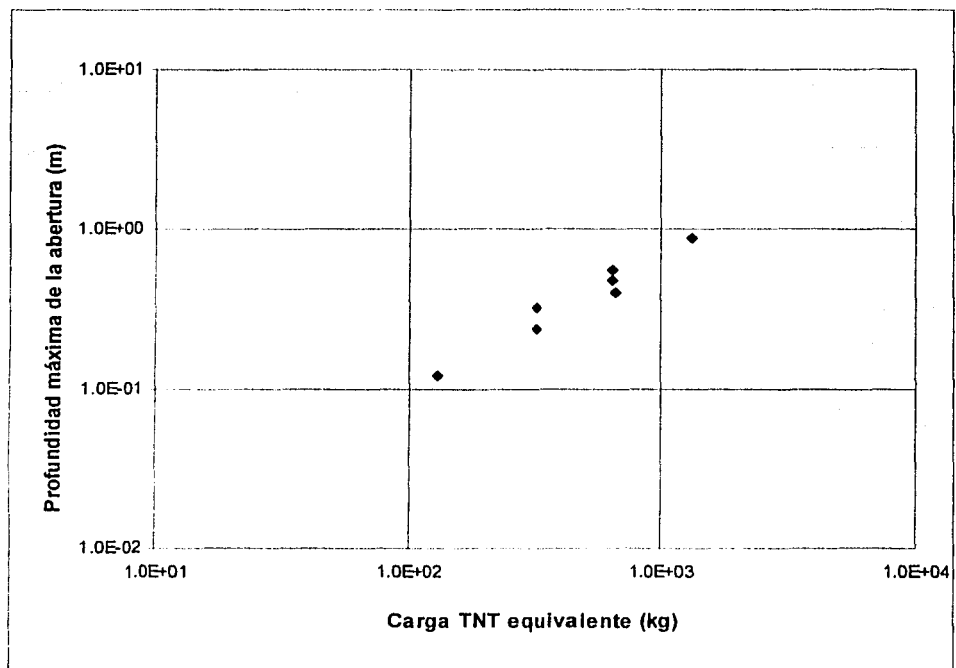
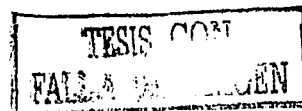


Figura 5.13 Profundidad de la brecha máxima vs la masa de la carga escalada

Como podemos ver en la tabla 5.3 la profundidad máxima de la brecha en el talud es de 0.56 m, menor que los 0.9 m del bordo libre así que aparentemente el agua no fluiría por encima del terraplén, pero todavía queda una pregunta sobre la resistencia que tendría esta parte del terraplén y si será suficiente para soportar la presión del agua. La profundidad máxima del cráter fue de 1.76 m, más profundo que el bordo libre, así que tal vez en esta parte la presión del agua podría producir un derrumbamiento, así pudiendo fluir el agua.

Después de cada prueba se observaron algunas fracturas en el terraplén (figura 5.15), las cuales podrían conducir a la falla del terraplén más que por el cráter en sí. Estas fracturas se presentaron en todos los cráteres.



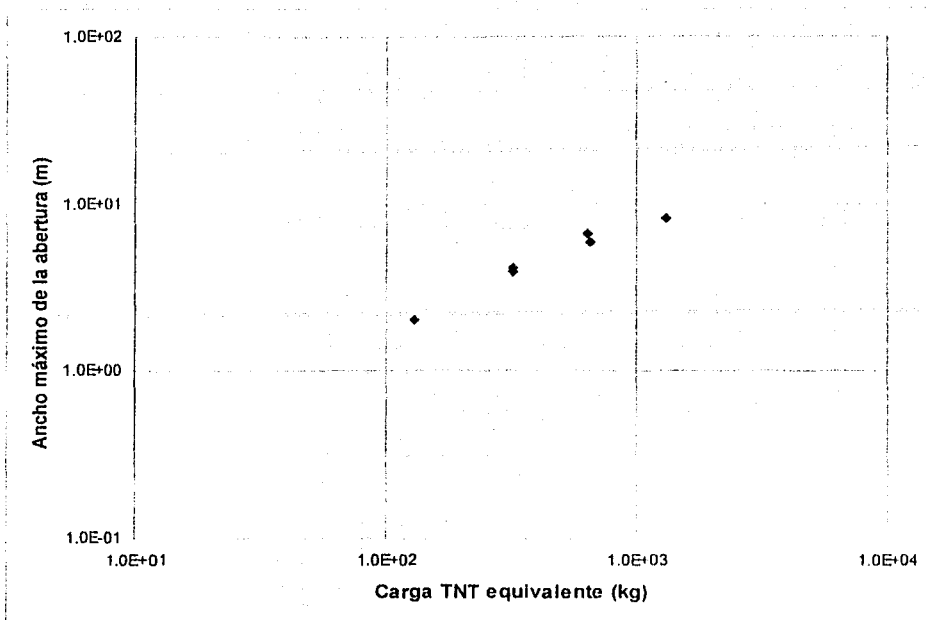


Figura 5.14 Ancho máximo de la brecha vs masa de la carga escalada

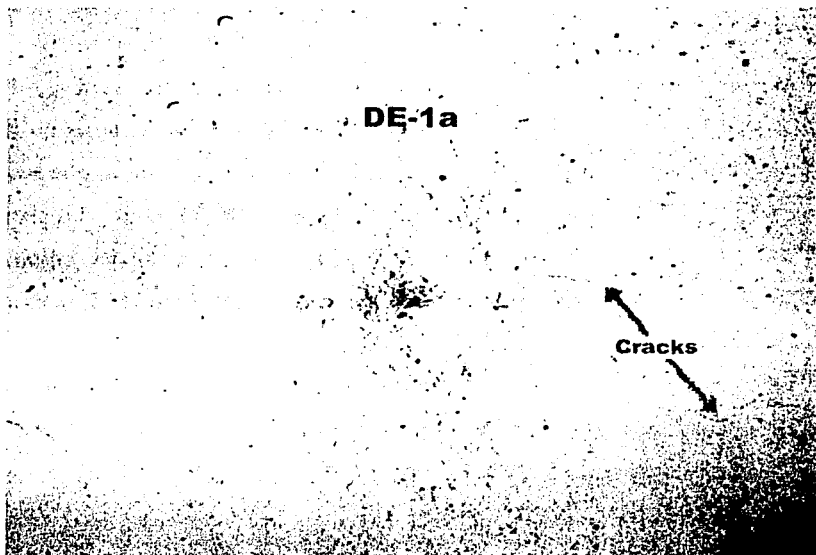


Figura 5.15 Fracturas después de la prueba

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

6. Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

En el presente trabajo se realizaron 21 pruebas; cinco de ellas fueron en una superficie plana de arena de Nevada seca, ocho en una superficie plana de una mezcla de 15% Kaolin y 85% arena de Nevada y las últimas ocho pruebas fueron realizadas en un modelo de terraplén con el mismo porcentaje de Kaolín y arena de Nevada. Las conclusiones de la primera serie fueron:

- En la primera serie de pruebas se modelaron explosiones en arena de Nevada seca. Se varió la posición de la carga y se mantuvo constante el detonador, se usaron RP-80 los cuales tienen una masa de 252.2 mg en equivalencia a TNT. El nivel de aceleración se mantuvo en 50g's. Los detonadores se colocaron en tres posiciones diferentes: en la superficie horizontalmente, medio enterrado verticalmente, y en la superficie verticalmente. El cráter más grande fue hecho por la carga que estaba medio enterrada en posición vertical, la cual presentó un volumen 26% mayor que el detonador que estaba en la superficie en posición horizontal, esta última fue la posición que se usó en el resto del trabajo.
- Los resultados fueron graficados contra la información de Schmidt y Holsaapple (1978), Serrano (1987) y Ferrero (1988) y se encontró que los resultados coincidían de buena manera.
- Se encontró que la relación de aspecto es influenciada por la posición de la carga: se obtuvo una relación de aspecto mayor para la carga que se colocó en una posición horizontal y tangente a la superficie.
- Se realizaron dos cráteres bajo las mismas condiciones y se encontró una diferencia de 1.6% para el radio, 3.7% para la profundidad y 12.3% para el volumen, esto se debió a las diferencias experimentales.

El modelo para la segunda serie de pruebas consistió en una superficie plana pero el material se cambió a una mezcla de 85% de arena de Nevada y 15% de Kaolín, el nivel de aceleración se incrementó a 80 g's, la posición de la carga se mantuvo constante y se utilizaron cinco diferentes cargas. La mezcla de arena de Nevada al 85% y Kaolín al 15% se seleccionó porque presentó una permeabilidad de 9.21×10^{-5} cm/seg. Se realizó una

prueba proctor para saber el contenido de agua óptimo el cual fue de 7.5%, con la cual se obtuvo un peso unitario seco de 18.512 KN/m^3 . También se realizó una prueba triaxial no consolidada no drenada (UU) con la que se obtuvo una resistencia al esfuerzo cortante no drenada de 2.81 kg/cm^2 . Las conclusiones para esta serie de experimentos son las siguientes:

- Los exponentes obtenidos para esta serie de pruebas fueron de 0.994, 0.277, y 0.338 para el volumen, radio, y profundidad respectivamente. Los exponentes se acercaron más a los obtenidos por de Schmidt y Holsapple para el aluvión.
- La dispersión de los resultados fue mayor que en los resultados hechos en arena, se observó una diferencia del 70%, 8%, y 9% en el volumen, radio, y profundidad respectivamente entre dos cráteres hechos bajo las mismas circunstancias. La dispersión fue atribuida a la manera en que el modelo fue compactado.
- Para poder ver la influencia que tenían dos detonadores juntos, dos detonadores RP-810 fueron colocados juntos y se compararon con los resultados obtenidos con un RP-830 ya que estas combinaciones tenía casi la misma carga. Los dos detonadores juntos crearon un cráter 26% mayor en profundidad, 20% mayor en el radio y 193% mayor para el volumen que con una sola carga.
- Se graficó la relación de aspecto contra la carga y no se encontró ninguna evidencia clara que la carga influyera en la relación de aspecto.

La última serie de pruebas consistió en detonaciones sobre la cresta de un terraplén homogéneo sin agua en el ambalse. El modelo fue probado a 80g's , el prototipo tenía una altura de 5.5 m, una base de 31.4 m y 3.7 m en la cresta. Se construyó con el mismo material usado en la prueba anterior, 85% de arena de Nevada y 15% de Kaolín y 7.5% de contenido de humedad. Las conclusiones para esta serie de experimentos son:

- Los cráteres no eran circulares, tenían una forma ovalada y esto se debió a que tenían una presión confinante mayor en la dirección longitudinal del terraplén, lo cual repercutió en un mayor radio en el plano transversal del terraplén.
- El volumen del cráter no se pudo calcular ya que se abrió una brecha en los taludes. El exponente para el radio medido longitudinalmente al terraplén fue de 0.318 y de 0.559 para la profundidad. El exponente para la profundidad fue mayor que el de

los experimentos que fueron hechos en superficies planas, lo cual significa que la profundidad del cráter se incrementa más rápido en función de la carga.

- Los radios fueron casi iguales que los que se obtuvieron en superficie plana. Las profundidades de los cráteres del terraplén fueron en promedio 34% mayor que los de superficie plana.
- Se observó menos dispersión que en la series sobre superficies planas. Se hicieron dos cráteres con una misma carga de 628.3 mg y se observó una diferencia de 0.3% en el radio y 11% en la profundidad. Otros dos cráteres fueron hechos con una carga de 1256.5 mg, y no presentó ninguna diferencia en el radio pero la profundidad tenía una diferencia del 12%. Esta diferencia es menor que para las pruebas realizadas en superficie plana y esto se debió al método de compactación; como la cresta del terraplén fue puesta primero, estaba mejor compactada que la de los experimentos de superficie plana ya que la parte superior fue colocada al final.
- También se registraron las dimensiones de la brecha creada en el talud, la mayor profundidad escalada fue de 0.56 m, la cual fue producto de una carga de 1 326 kg (equivalente a TNT), y el ancho fue de 7.2 m. Al comparar estos resultados con el bordo libre recomendado de 0.9m, la brecha es menos profunda, pero la profundidad máxima del cráter para esta misma carga fue de 1.76 m con un radio de 3.78 m.
- Se observaron fracturas en todos los experimentos.

Durante el desarrollo de este estudio, se observaron algunos detalles que pueden ser mejorados.

- Una de las cosas que debe mejorarse es el perfilómetro, ya que puede haber errores de 0.05mm en las lecturas si las varillas no están perfectamente derechas y también al momento de tomar la lectura, lo cual influye en que los resultados escalados presenten errores. Para el propósito de este estudio el perfilómetro fue una buena herramienta para medir el cráter, nos dio una idea precisa de la profundidad y el radio del cráter.
- La manera en que el terraplén fue construido producía un error en el plano vertical como en el horizontal. En el plano vertical la diferencia entre un extremo y el otro

era de 1mm, esto se debía a que la base de madera no estaba totalmente apoyada o la base no estaba uniforme. En el plano horizontal algunas veces el terraplén se encontraba inclinado mas o menos unos 5mm de un extremo a otro, lo cual también se debió a que la base de madera no fue hecha exactamente del mismo tamaño que el contenedor por razones practicas.

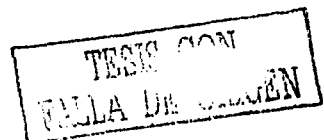
- Mejorar el método de compactación para obtener muestras más homogéneas y reproducibles.
- En este estudio se obtuvo un rango pequeño de información, así que para tener una mejor tendencia se recomienda tener un mayor rango de información, variando el nivel de aceleración en un mayor rango o aumentando el tamaño de las cargas.
- También se recomienda hacer los experimentos poniendo la carga sin ningún soporte para estudiar la influencia de la viga que sostenía a los detonadores en la forma del cráter.

Para obtener un mejor entendimiento del fenómeno de formación de cráteres en terraplenes es necesario hacer más investigación, a continuación se presentan algunas líneas de estudio:

- Estudiar el comportamiento del terraplén en una condición donde el agua se encuentre en su nivel más alto de diseño, ya que se presentan varias preguntas sobre la forma del cráter y la estabilidad del terraplén, además de que presenta el estado más crítico.
- Cuál es el origen de las fracturas y su influencia en la estabilidad de la estructura.
- Cómo influye la geometría del terraplén en la forma del cráter.

Apéndice A

Líneas de contorno para la primera serie de pruebas



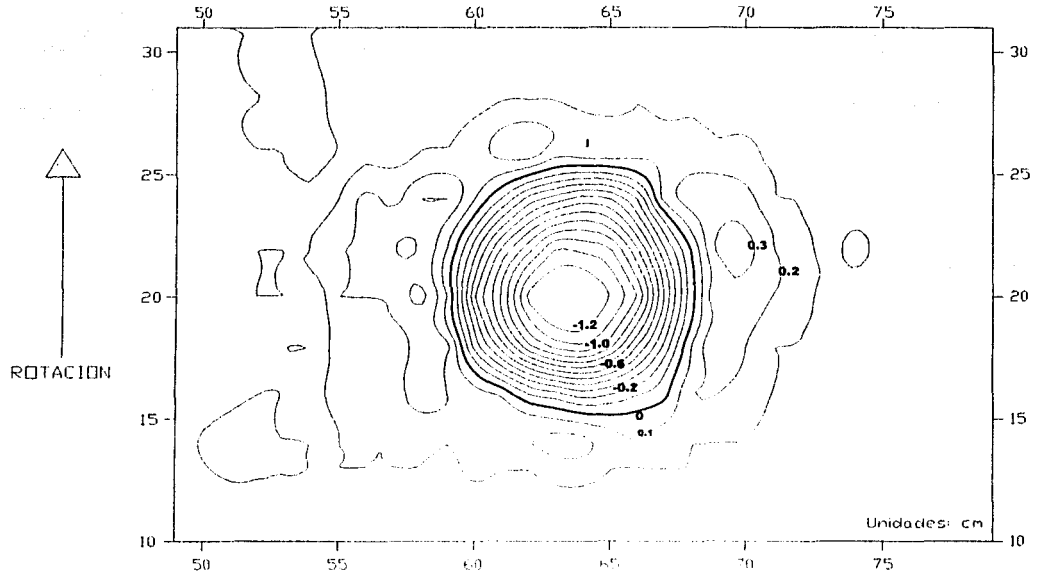


Figura A.1 cráter LG-2-bu-ve

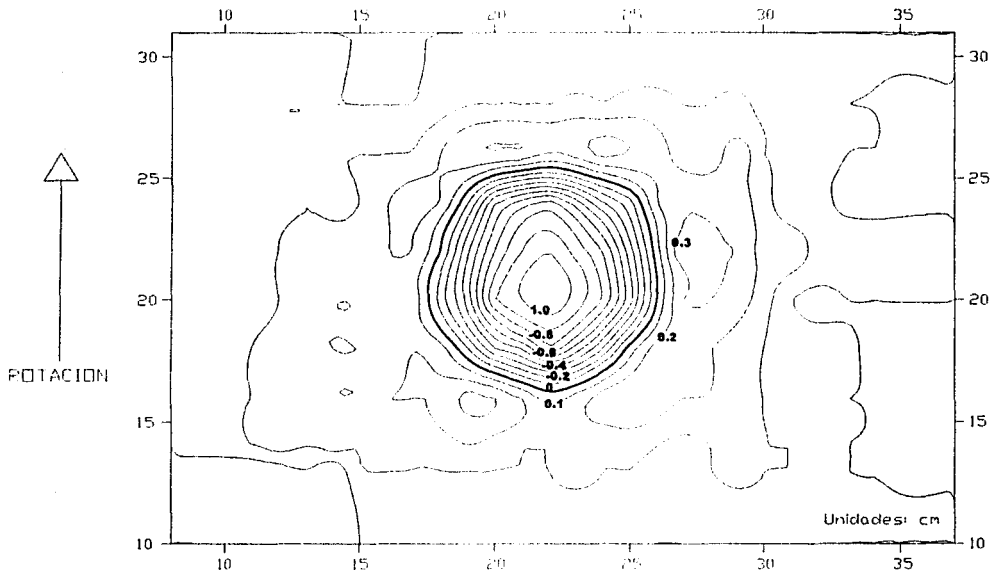
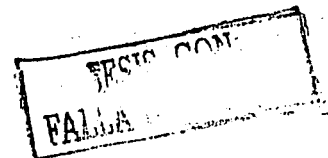


Figura A.2 cráter LG-2-su-ve



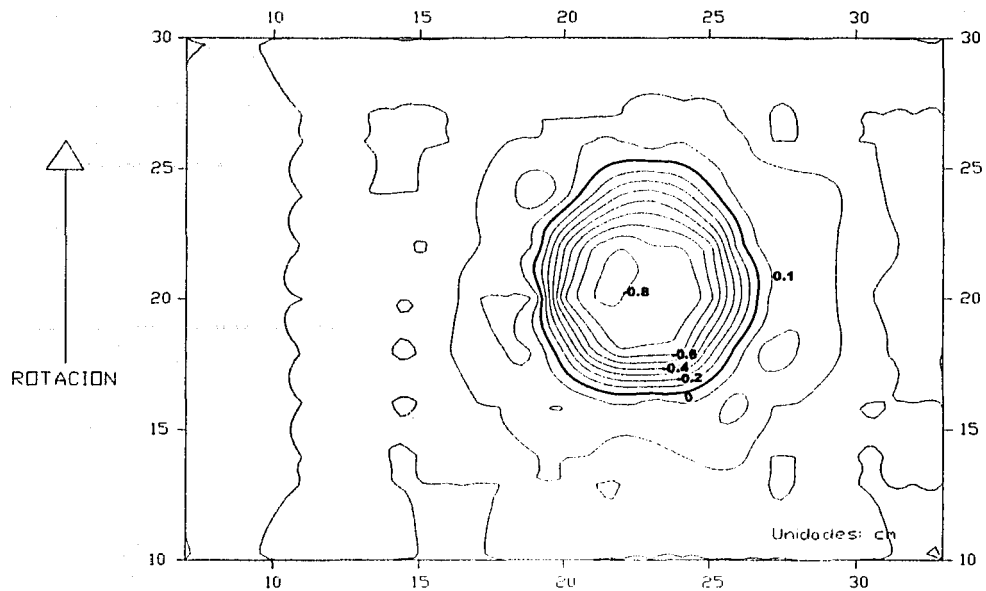


Figura A.3 cráter LG-3-su-ho

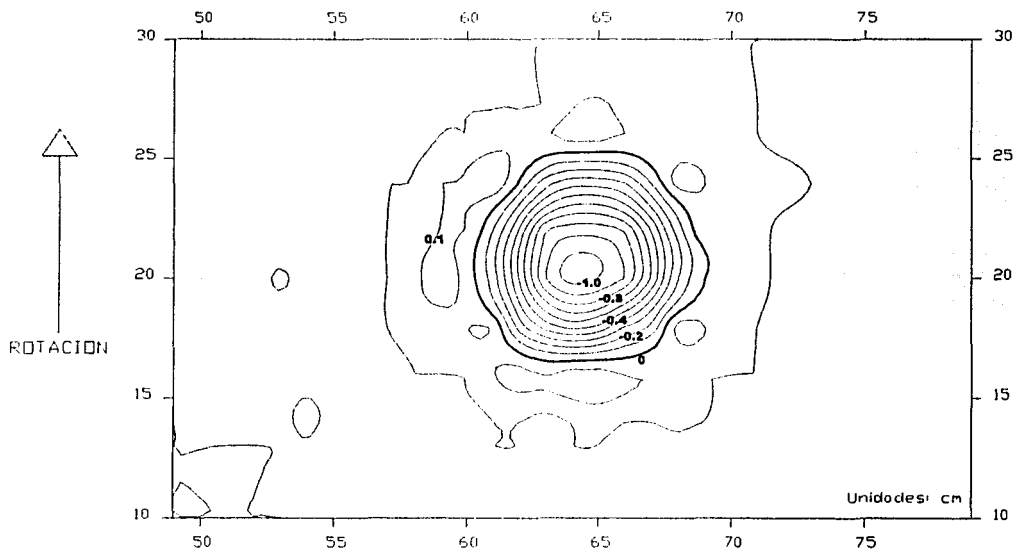


Figura A.4 cráter LG-3-su-ve

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Apéndice B

Líneas de contorno para la segunda serie de pruebas

ROTACION

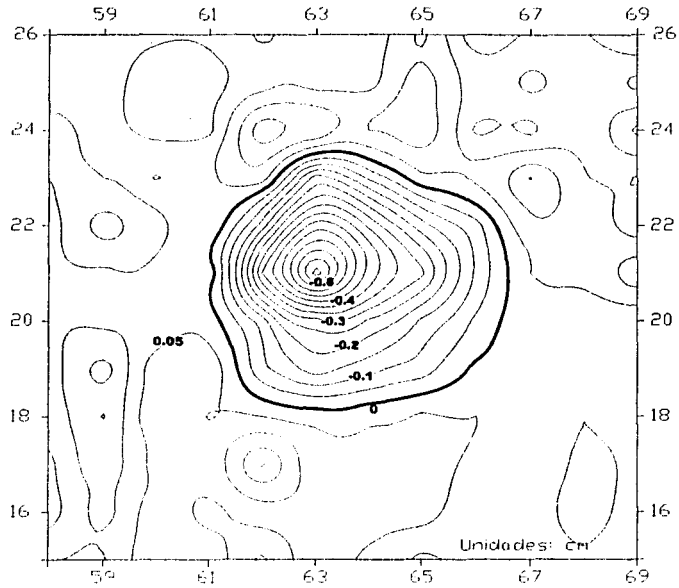


Figura B.1 cráter LG-4a

ROTACION

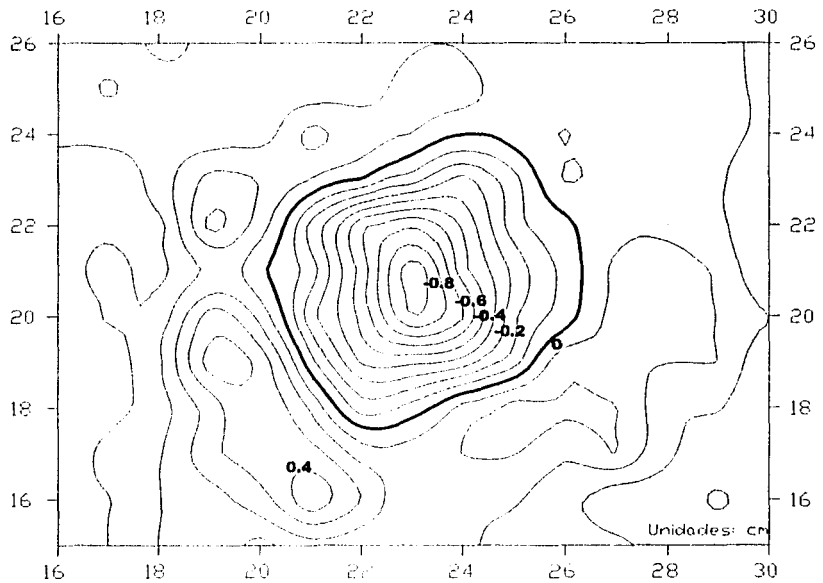
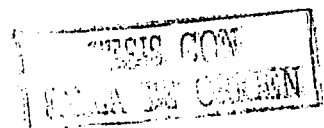


Figura B.2 cráter B.2 LG-4b



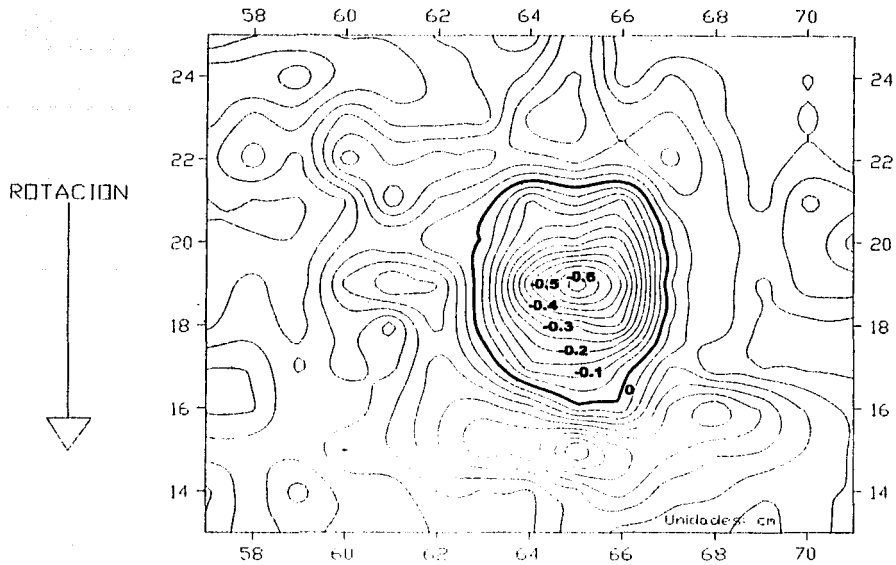
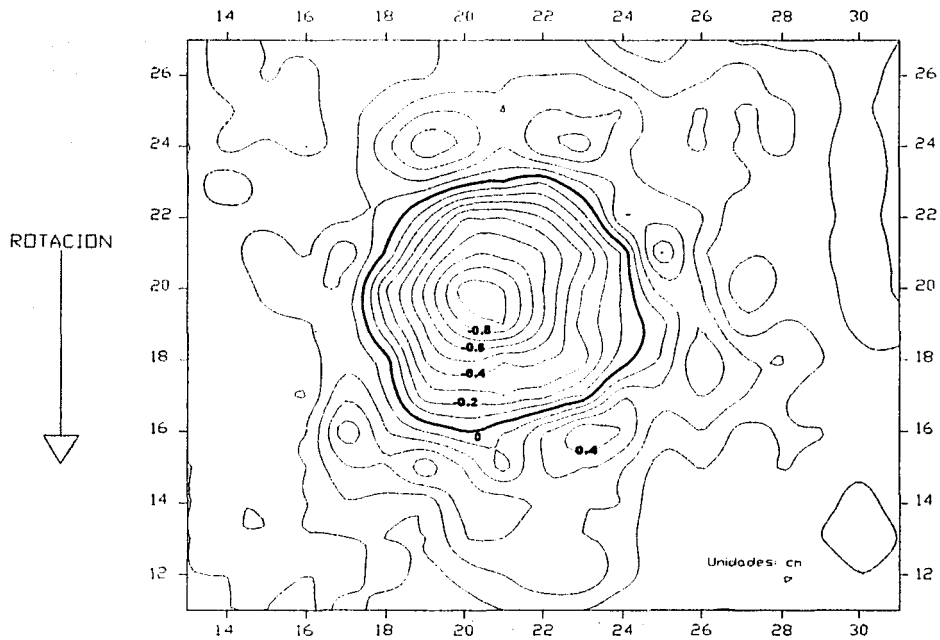


Figura B.3 cráter LG-5a



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura B.4 cráter LG-5b

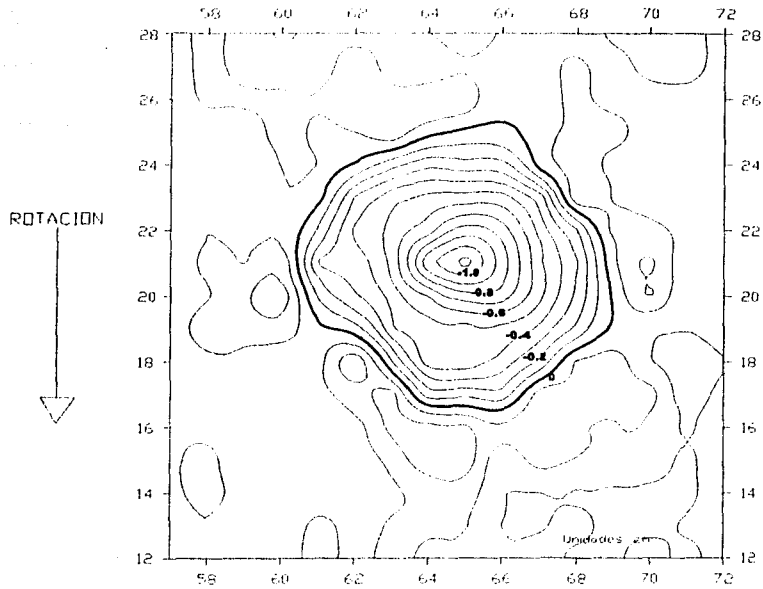


Figura B.5 cráter LG-6a

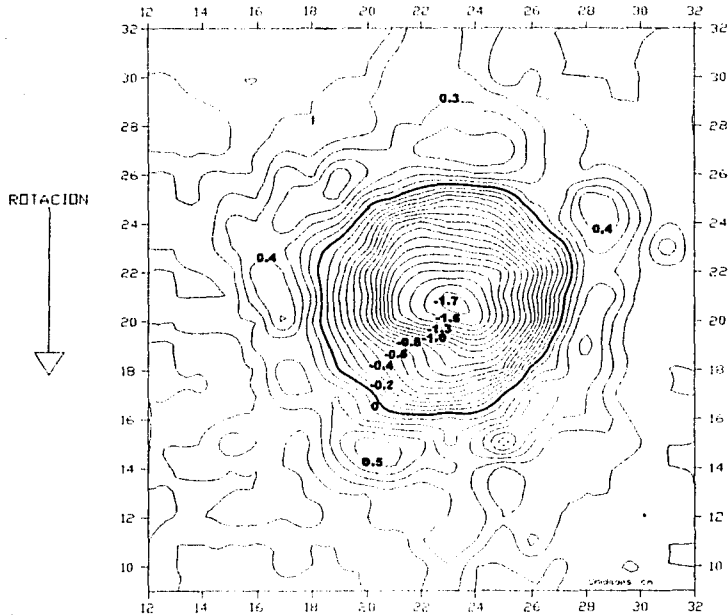
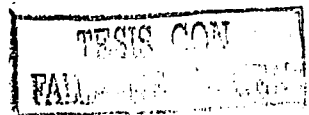


Figura B.6 cráter LG-6b



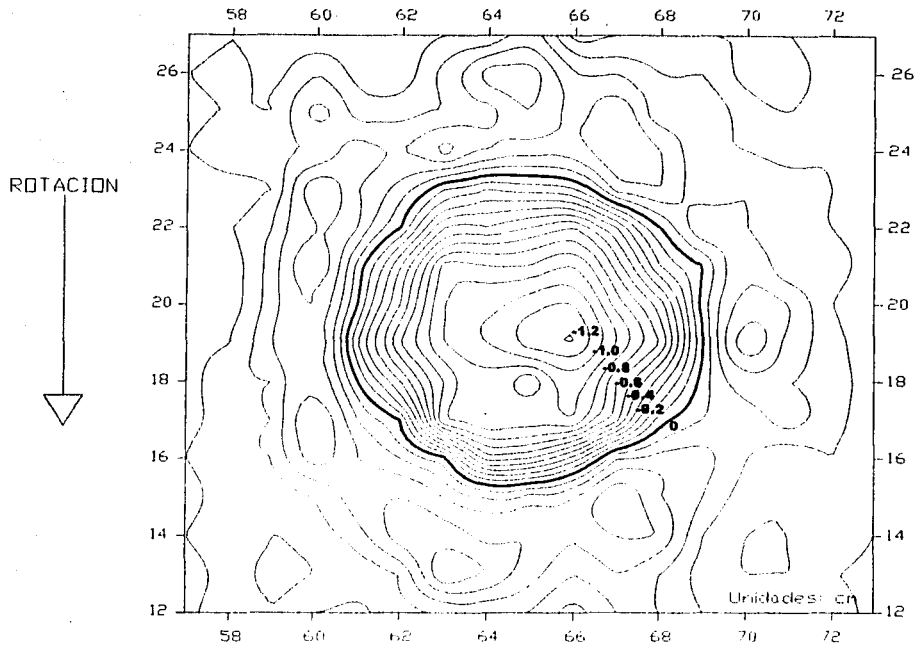


Figura B.7 cráter LG-7a

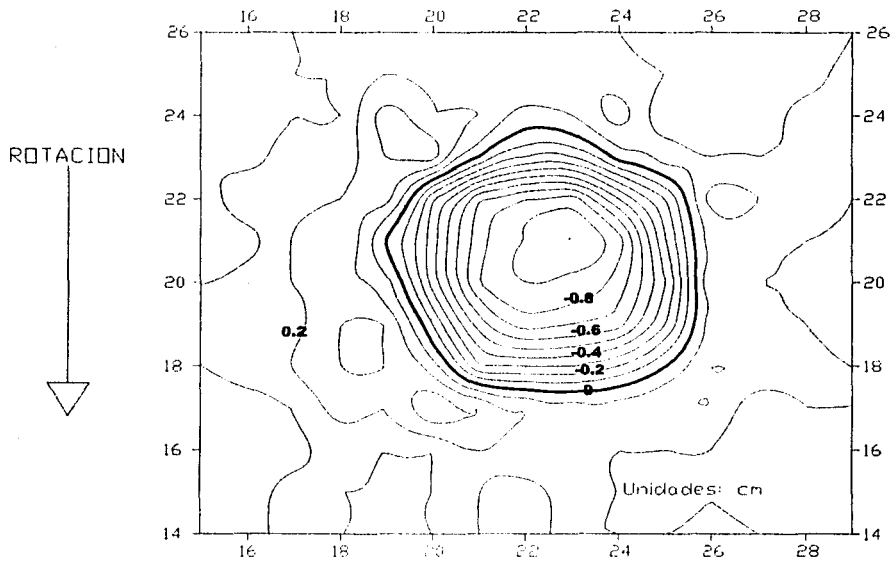
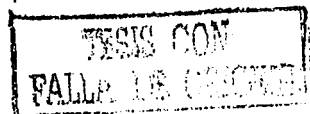


Figura B.8 cráter LG-7b

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Apéndice C

**Líneas de contorno para la tercera serie
de pruebas**



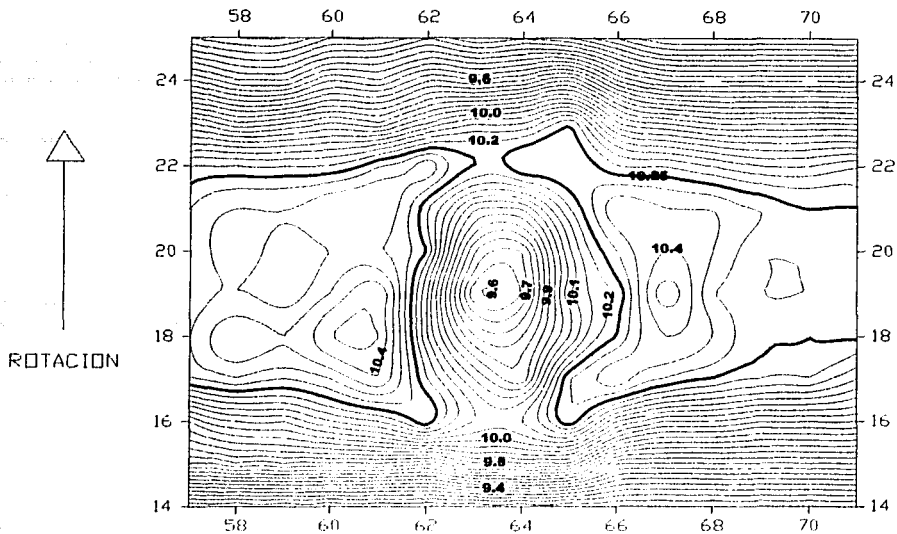


Figura C.1 cráter DE-1a

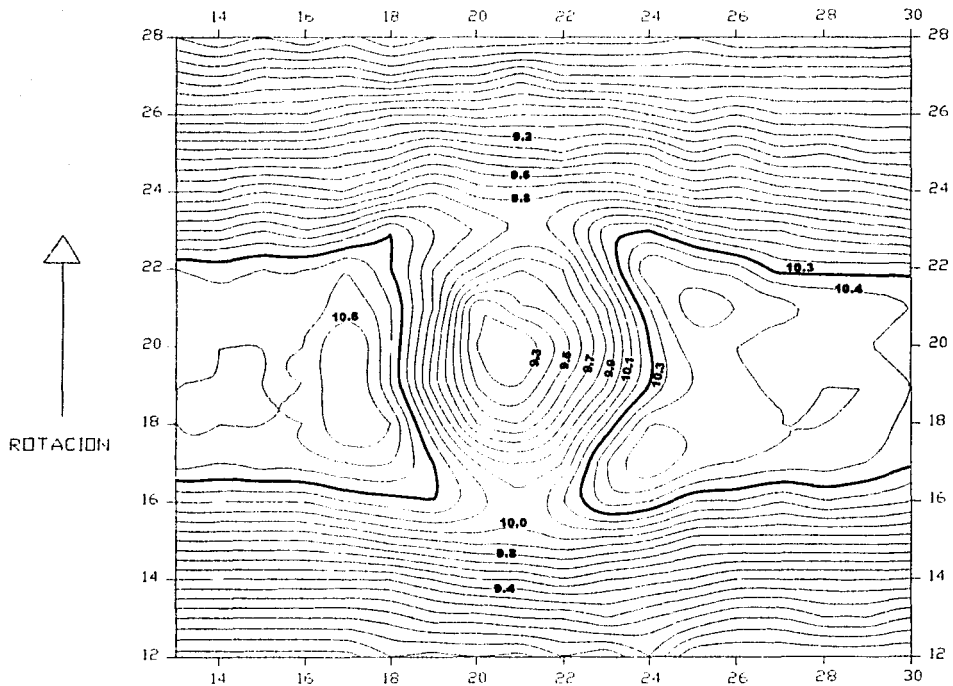
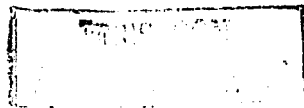


Figura C.2 cráter DE-1b



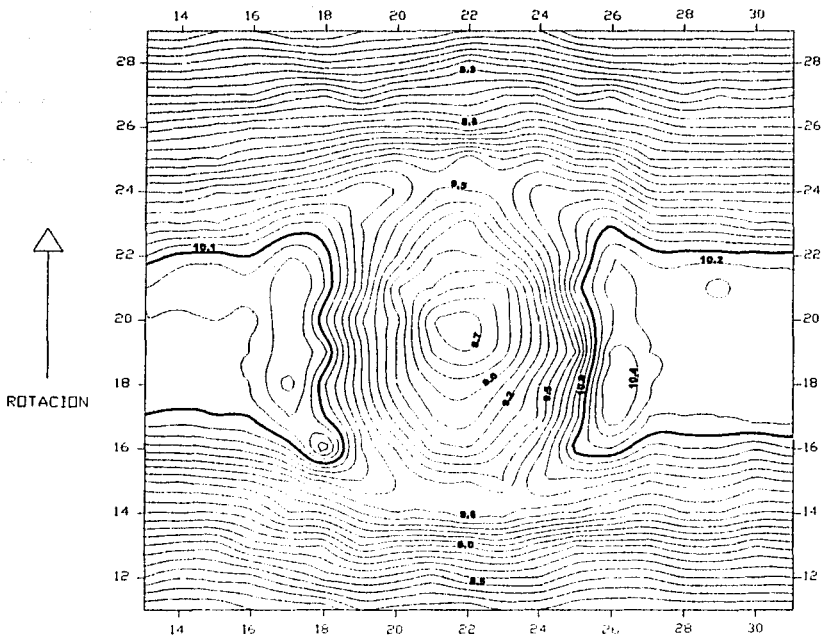


Figura C.3 cráter DE-2a

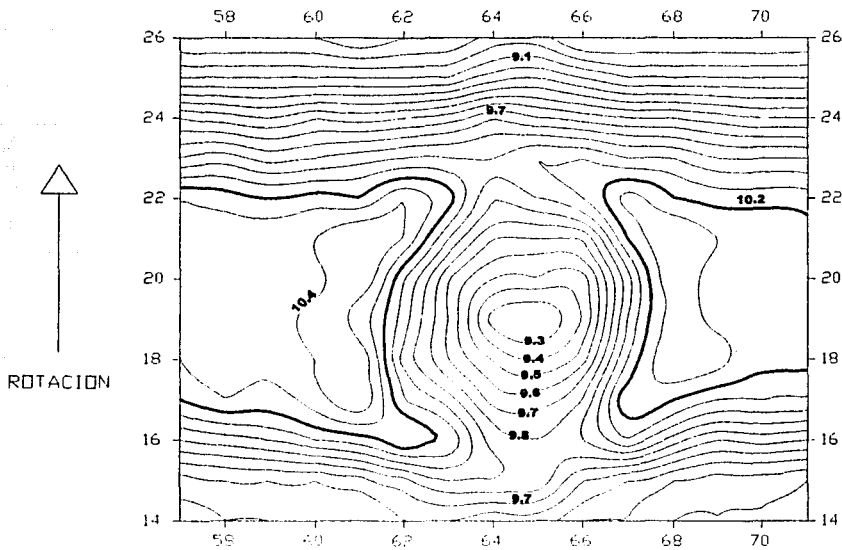


Figura C.4 cráter DE-2b

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

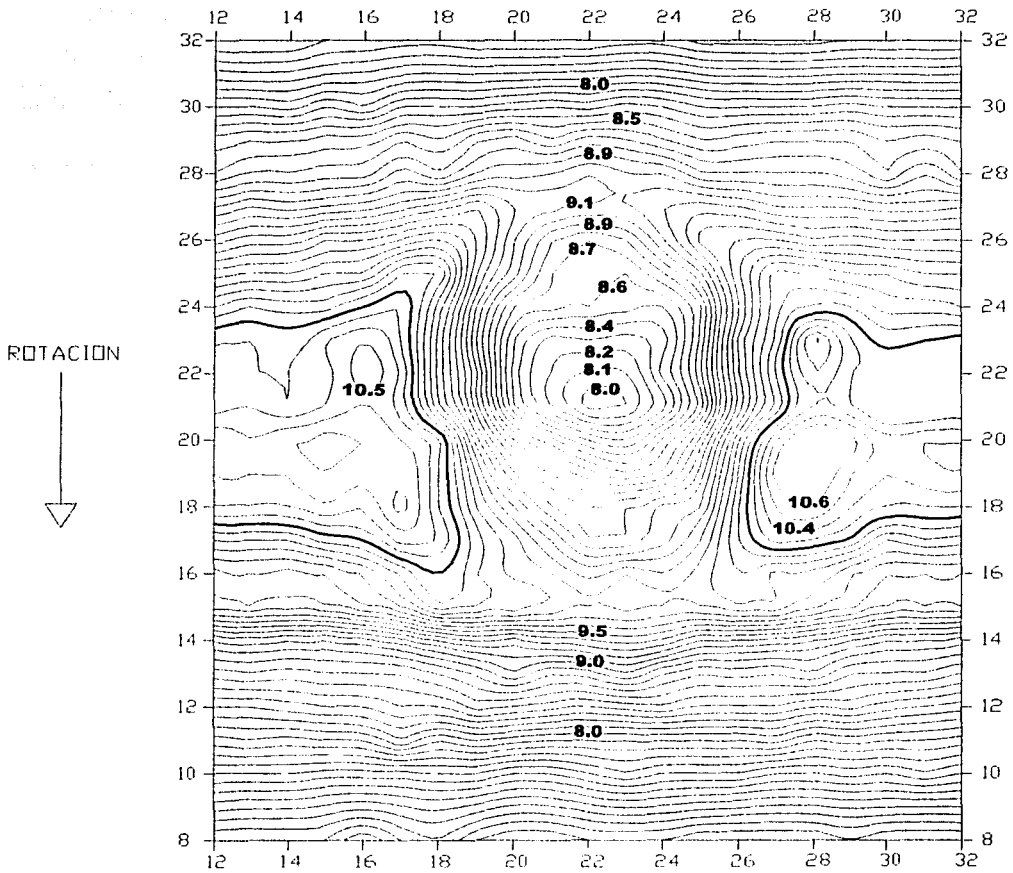


Figura C.5 cráter DE-3a

TESIS CON
 FALLA DE CINCEN

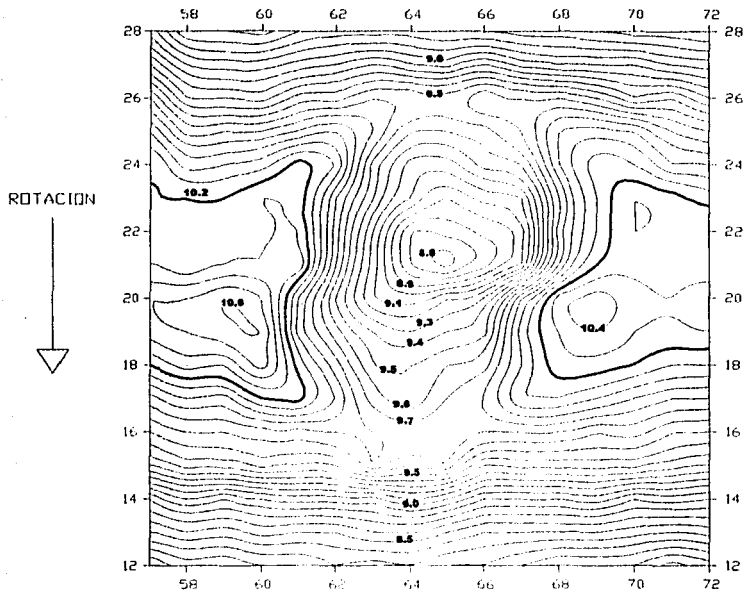


Figura C.6 cráter DE-3b

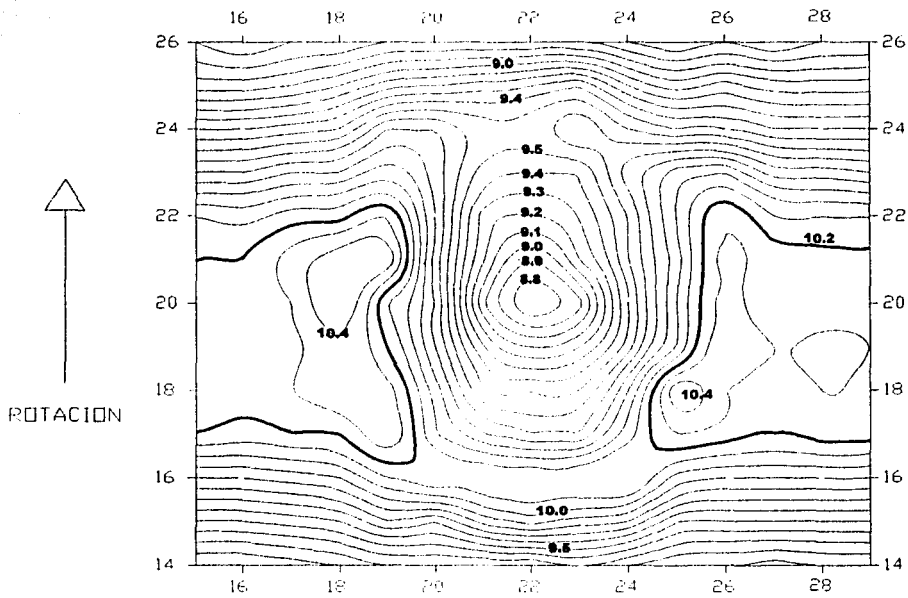


Figura C.7 cráter DE-4a

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

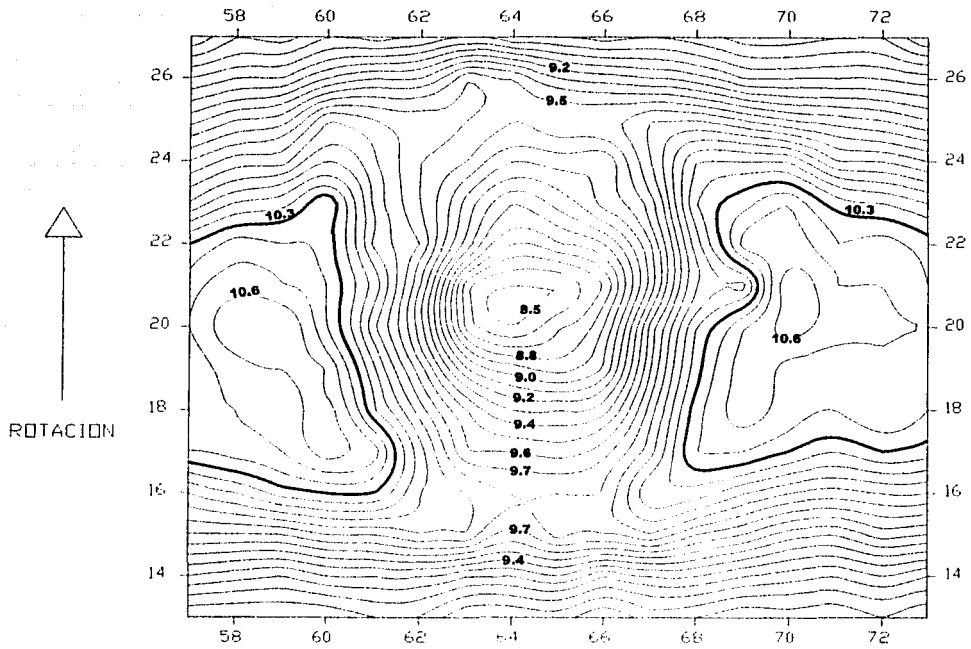


Figura C.8 cráter DE-4b

TESIS CON
FALLA EN EL
ENCUADRE

Apéndice D

Figuras en 3-D para la tercera serie de pruebas

TESIS CON
FALLA DE CORTEN

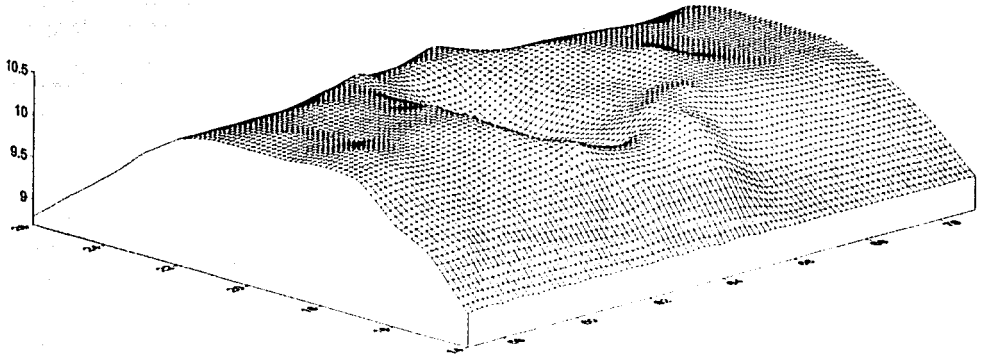


Figura D.1 cráter DE-1a

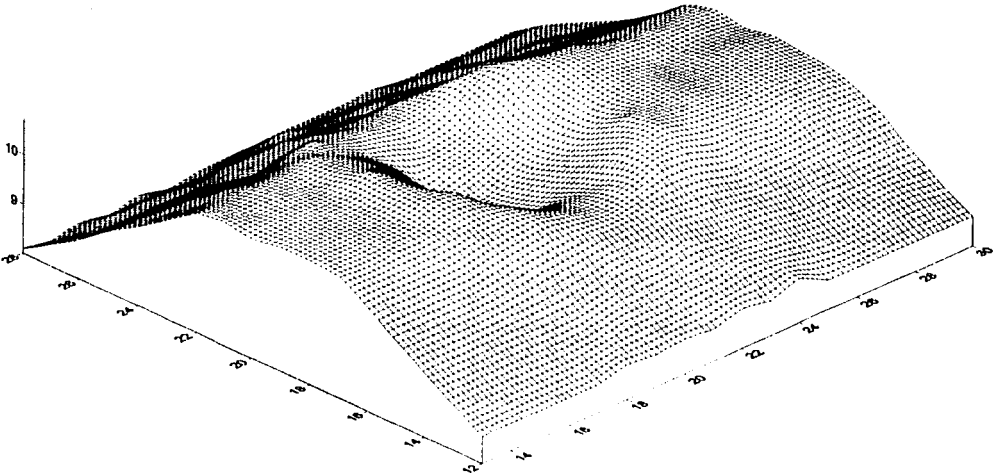


Figura D.2 cráter DE-1b

TESIS CON
FALLA DE CUBIEN

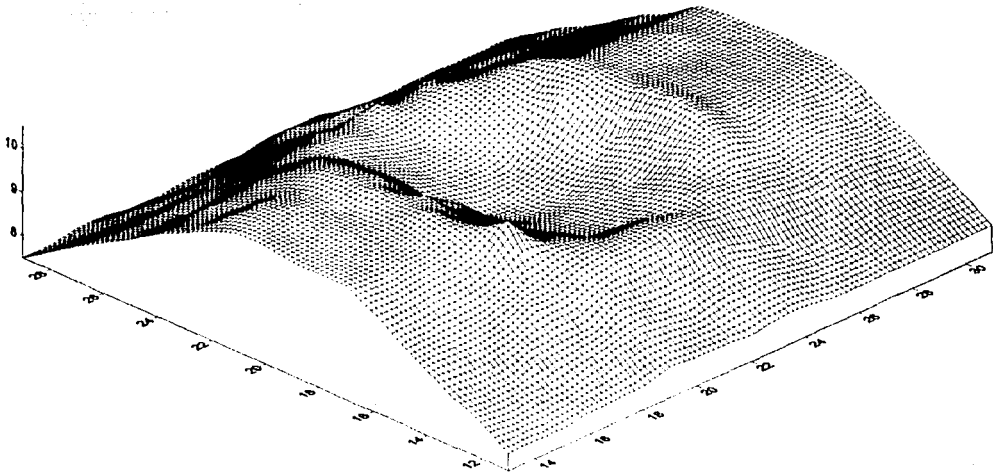


Figura D.3 cráter DE-2a

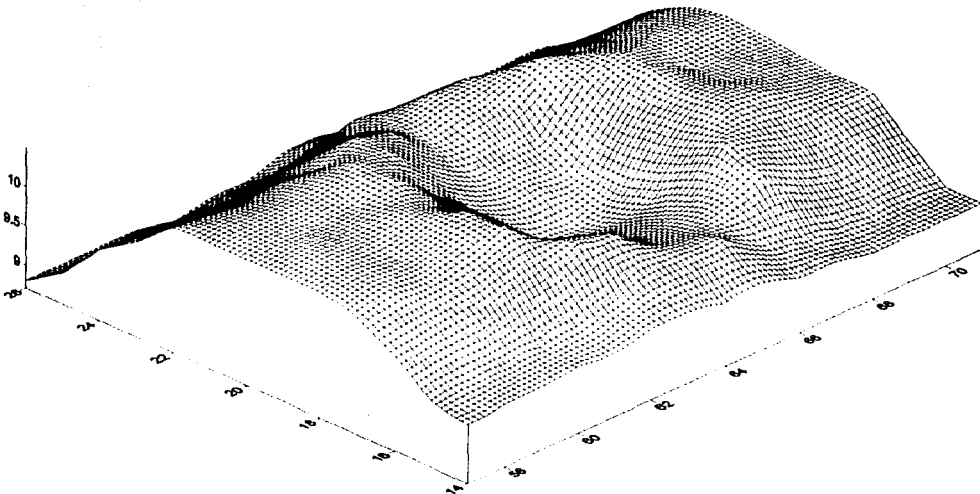


Figura D.4 cráter DE-2b

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

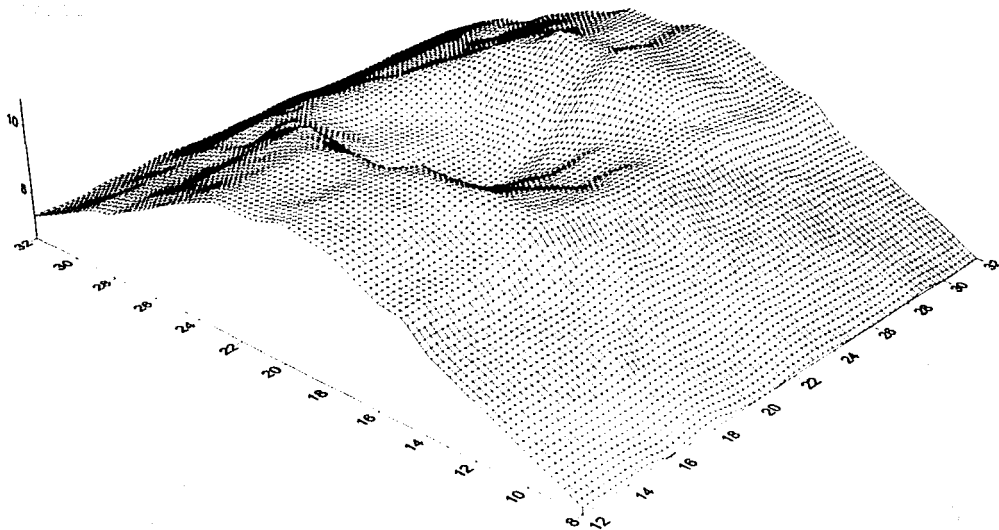


Figura D.5 cráter DE-3a

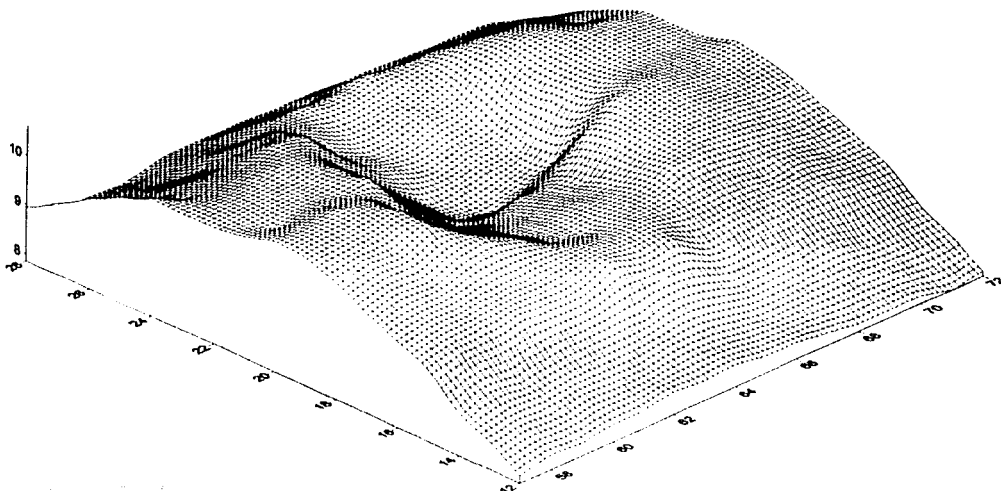


Figura D.6 cráter DE-3b

TESIS CON
FOLIO DE ORIGEN

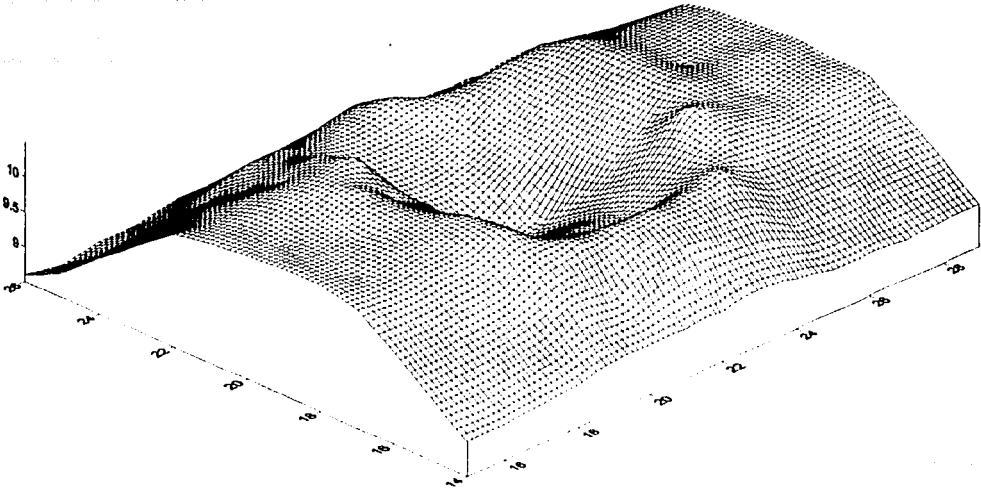


Figura D.7 cráter DE-4a

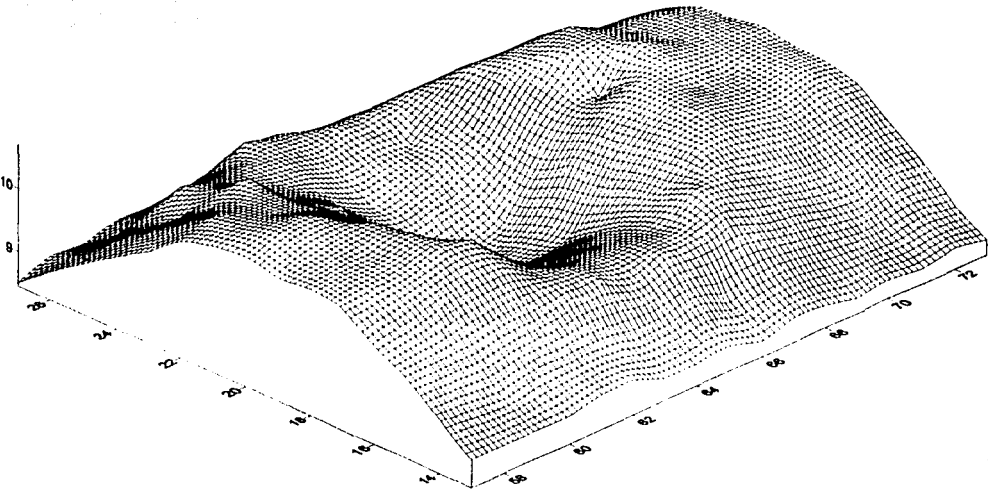


Figura D.8 cráter DE-4b

Bibliografia

Allersma H. G. B., W. J. Van Niekerk, (1994), Simulation of Cratering in Small Geotechnical Centrifuge, Centrifuge 94, Leung, Lee & Tan (eds.), Rotterdam, Balkema, 325-330

Brownell, K. C., (1992), Centrifuge Modeling of Explosion-Induced Craters in Unsaturated Sand, Master Thesis, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, CO.

Brownell K. C., Taylor T. and Charlie W. A., (1994), Moisture Content Effects on Explosion-Induced Craters in Sand, Centrifuge 94, Leung, Lee & Tan (eds.), Rotterdam, Balkema, 331-336

Bruce L. Kutter, L. Moquette O'Leary, P. Y. Thompson and Rachel Lather, (1988), Gravity-Scaled Tests on Blast-Induced Soil-Structure Interaction, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 114, 431-447

Campbell D. J., J. A. Cheney and B. L. Kutter, (1991), Boundary Effects in Dynamic Centrifuge Model Tests, Centrifuge 91, Ko (ed.), Rotterdam, Balkema, 441-448

Casagrande and Wilson, (1951), Effect of Rate of Loading on the Strength of Clays and Shales at Constant Water Content, Harvard Soil Mechanics Series, No. 39

Chabai, A. J., (1959), Crater Scaling Laws for Desert Alluvium, SC-4391 (RR), Sandia Corporation, Albuquerque, New Mexico

Chabai, A. J., (1965), On Scaling Dimensions of Crater Produced by Buried Explosives, Journal of Geophysical Research, Vol. 70, No.2, p.p. 5075-5098

Chaun-Ping, L., Goodings, D. J., Bernold, L. E., Dick, R. D., Fournay, W. L., (1994), Model Studies of Effects on Lunar soil of Chemical Explosions, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 10, pp 1684-1702

Cheney J., (1988), American Literature on Geotechnical Centrifuge Modelling 1931-1984, Centrifuge 88, Craig, James and Schofield (eds.), Balkema, Rotterdam, 77-80

Craig, W. H., (1989), Edouard Phillips (1821-89) and the idea of centrifuge modeling, Geotechnique 39, No. 4, 697-700

Craig, W. H. (1995), Geotechnical Centrifuges: Past, Present and Future, Geotechnical centrifuge technology, R. N. Taylor (ed.), Geotechnical Engineering Research Center, City University, London, Chap 1, 1-18

Davies M. C. R., (1994), Dynamic Soil Structure Interaction Resulting from Blasting Loading, Centrifuge 94, Leung, Lee & Tan (eds.), Rotterdam, Balkema, 319-324

Del Castillo R. y López G., (1979), Densificación de Suelos por Medio de Explosivos, Mejoramiento Masivo de Suelos, Reunión Técnica.

Dillon, L. A., (1972), The influence on soil and rock properties on the dimension of explosion-produced craters, U.S. Air force Weapons Laboratory, Technical Report 891 964.

Elgamal, A.-W., Dobry, Ricardo, Van Laak, Paul and Nicolas-Font, J. (1991), Design, Construction and Operation of 100 g-ton centrifuge at RPI, Centrifuge 91, Ko (ed.), Rotterdam, Balkema, 27-34

Ferrero, V. H., (1988), Further Checks for Scaling Effects on Explosion Induced Craters, M.S. Thesis, University of Maryland, College Park, MD

Fragaszy R. F., K. L. Olen, M. Purcell, K. C. Brownell, (1994), Assessing the Reliability of Results in a Dynamic Centrifuge Test, Centrifuge 94, Leung, Lee & Tan (eds.), Rotterdam, Balkema, 313-318

Fuglsang L. D., N. K. Kerbs Ovensen, (1988), The Application of the Theory of Modelling to Centrifuges Studies, Centrifuge 88, Craig, James and Schofield (eds.), Balkema, Rotterdam, 119-138

Gaffney, E. S. (1978), Effect of Gravity on Explosion Craters, Proc. 9th Lunar Planetary Sci. Conference, pp 3831-3842

Gaffney, E.S., C.W. Felice, and R. S. Steedman (1989). Cratering by Buried Charges in Wet Media: Comparison of Centrifuge and Field Events, Proceedings of the Fourth International Symposium on the Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures (volume 1), Panama City Beach, Florida, April 17-21, pp 402-407.

Gill J. J., S. T. Kuennen, (1991), Half-Space Modeling of Explosively-Formed Craters, Centrifuge 91, Ko (ed.), Rotterdam, Balkema, 465-472

Gonzalez, L., (2002), Study of Effect of High Confining Stress on the Development of Soil Liquefaction Using Centrifuge Modeling, Master thesis, Department of Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, N.Y.

Goodings, D. J., W. L. Fournay and R. D. Dick, (1988), Geotechnical Centrifuge Modeling of Explosion Induced Craters – A Check for Scaling Effects, U.S. Air Force Office for Scientific Research, Washington, D.C., Report No. AFOSR-86-0095, July

Hird C. C., A. Warsland, A. N. Schofield, (1978), The Develop of Centrifugal Models to Study the Influence of Uplift Pressures on the Stability of a Flood Bank, Geotechnique 28, No. 1, 85-106

Holsapple, K. A., R. M. Schmidt and R. L. Dyrdaahl, (1978), Gravity-Scaling Methods Applied to Crater-Induced Ground Motions and Effects, Nuclear blast and shock simulation symposium, Defense Nuclear Agency – SPSS, San Diego, California, Nov 28-30

Housen, K. R., R. M. Schmidt, K. A. Holsapple, (1983), Crater Ejecta Scaling Laws: Fundamental Forms Based on Dimensional Analysis, Journal of Geophysical Research, Vol. 88, No. B3, pp 2485-2499

Hubert K. Law, Hon-Yim Ko and Robert Scavuzzo, (1994), Simulation of O'Neil Forebay Dam California Subjected to the 1989 Loma Prieta Earthquake, Centrifuge 94, Leung, Lee & Tan (eds.), Rotterdam, Balkema, 245-250

Johnson S. W., J. A. Smith, E. G. Franklin, L. K. Moraski and D. J. Teal, (1969), Gravity and Atmospheric Pressure Effects on Crater Formation in Sand, Journal of Geophysical Research, Vol. 74, No. 20, 4838-4850

Lary R. Lenke, Ronald Y. S. Pak and Hon-Yim Ko, (1991), Boundary Effects in Modeling of Foundations Subjected to Vertical Excitation, Centrifuge 91, Ko (ed.), Rotterdam, Balkema, 473-480

Lee F. H., A. N. Schofield, (1988), Centrifuge Modeling of Sand Embankments and Islands in Earthquakes, Geotechnique 38, No. 1, 45-58

Lee F. H., S. H. Goh, T. S. Tan and S. Anand, (1998), Blast Test on Underground Structures in Saturated Sand, Centrifuge 98, Kimura, Kusakabe & Takemura (eds.), Rotterdam, Balkema, 421-426

Limin Zhang, Ting Hi and Jun Zhang, (1994), Evaluation of the Cut-off Structures of a Rockfill Sam, Centrifuge 94, Leung, Lee & Tan (eds.), Rotterdam, Balkema, 593-598

Mikasa M., N. Takada, K. Yamada, (1969), Centrifugal Model Test of a Rockfill Dam, Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. Fdn. Engng., Mexico 2, 325-333

Nielsen J. P., (1983), The Centrifugal Simulation of Blast Parameters, ESL-TR-83, Engineering and Services Laboratory, Air Force Engineering and Services Center Tyndall air Force Base, Florida

Nordyke M.D., (1961), Nuclear Craters and Preliminary Theory of the Mechanics of Explosive Crater Formation, Journal of Geophysical Research, Vol. 66, No. 10, 3439-3459

Phillips, R. (1995), Centrifuge modeling: practical considerations, Geotechnical centrifuge technology, R. N. Taylor (ed.), Geotechnical Engineering Research Center, City University, London, Chap 3, 34-60

Piekutowski, A. J., (1974), Laboratory-Scale High Explosive Cratering and Ejecta Phenomenology Studies, AFWL-TR-72-155, Air Force Weapons Lab, Albuquerque, New Mexico, April.

Pokrovsky, G. I. and Fyodorov, I. S. (1968). Centrifugal Modeling in the Construction Industry, Draft translation prepared by Building Research Establishment Library Translation Service, England, 1975

Richard D. Woods, (1968), Screening of Surface Waves in Soils, Journal of the soil mechanics and foundations division, ASCE, Vol. 94, SM4, 951-979

Rooke, A. D., Davis L. K. and Strange J. N. (1965), Cratering Sun Beam-Shot Small Boy, Defense Nuclear Agency, Technical report A995 5361

Rooke, A. D., Cranes, B. L. and Davis L. K., (1974), Cratering by explosions: A compendium and an Analysis, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Technical Report B024 657.

Santoyo E., (1969), Cambios en la Resistencia al Corte de las Arcillas del Lago de Texcoco debido a Consolidación y a Explosiones, El Hundimiento de la ciudad de México, proyecto Texcoco, Nabor Carrillo, Secretaria de Hacienda y Crédito Publico.

Schmidt, R.M., Holsapple, K.A., (1978), Centrifuge Cratering Experiment I: Dry Granular Soils, Defense Nuclear Agency Report DNA 4568F, Washington, D.C.

Schmidt, R. M. and K. A. Holsapple (1979), Centrifuge crater scaling experiment II, material strength effects, Interim Report for Period 31 January 1978 – 31 January 1979, Prepared for the Defense Nuclear Agency, Washington, D. C., Contract No. DNA 001-78-C-0149, May

Schmidt R. M., K. A. Holsapple, (1980), Theory and Experiments on Centrifuge Cratering, Journal of geophysical research, Vol. 85, No. B1, 235-252

Schmidt, R. M., K. A. Holsapple, and K. R. Housen (1986), Gravity effects in cratering, Technical Report DNA-TR-86-182, Defense Nuclear Agency, Washington, D.C., 30 May.

Schmidt, R. M., and K. R. Housen (1987), Some Recent Advances in the Scaling of Impact and Explosion Cratering, International Journal of Impact Engineering, Vol. 5, pp 643-560

Schmidt R. M., (1988), Centrifuge Contributions to Cratering Technology, Centrifuges in Soil Mechanics, Craig, James & Schofield (eds.), Balkema Rotterdam, 199-202

Schofield A. N., (1980), Cambridge Geotechnical Centrifuge Operations, Geotechnique 30 No.3, 227-268

Schofield A. N., (1988), An Introduction to Centrifuge Modelling, Centrifuge 88, Craig, James and Schofield (eds.), Balkema, Rotterdam, 1-9

Semblant J. F., J. J. Briost, (1998), Numerical Modeling of Wave Propagation in Centrifuged Medium, Centrifuge 98, Kimura, Kusakabe & Takemura (eds.), Rotterdam, Balkema, 427-432

Serrano Herminio Carlos, (1987), A Check for Scaling Effects on Explosion Induced Craters – Centrifuge Model Testing, M.S. Thesis, University of Maryland, College Park, MD

Sedov, L. E., (1959), Similarity and Dimensional Methods in Mechanics, Academics Press, New York

Steedman R. S. and Zeng X., (1995), Dynamics, Geotechnical centrifuge technology, R. N. Taylor (ed.), Geotechnical Engineering Research Center, City University, London, Chap 7, 168-195

Taboada-Urtuzuástegui Victor Manuel, (1995), Centrifuge Modeling of Earthquake-induced lateral spreading in Sand Using a Laminar Box, Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, N.Y.

Tahmeed M. Al-Hussaini, Shahid Ahmad, (1991), Design of Wave Barriers for Reduction of Horizontal Ground Vibration, Journal of geotechnical engineering, ASCE, Vol. 117, No. 4, 616-634

Taylor, R. N., (1995), Centrifuges in Modeling: Principles and Scale Effects, Geotechnical centrifuge technology, R. N. Taylor (ed.), Geotechnical Engineering Research Center, City University, London, Chap 2, 19-33

United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Design of Small Dams, third edition, 1965.

Vortman, L. J., (1968), Craters from surface Explosions and Scaling Laws, Journal of Geophysical Research, Vol. 73, No. 14, 4621-4636

Vutsel V. I., Scherbuna V.I., (1988), Centrifugal Model Test of Dams and Embankments, Centrifuge 88, Craig, James and Schofield (eds.), Balkema, Rotterdam, 139-147

Westine, P.S., (1970), Explosive Cratering, Journal of Terramechanics, Vol. 7, No. 2, p.p. 9-19

Wilmot N. Hess and M. D. Nordyke, (1961), Throwout Calculations for Explosions Craters, Journal of Geophysical Research, Vol. 66, No. 10, p.p. 3405-3412

Zimmie, T; (1995), Geoenvironmental Research Using Centrifuges, Sinoff (ed.), Gulf Publishing Co., Houston TX, Vol. 9, Chap 10, 335-366

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN