

T-381

D

DES

92

0537

01149

35

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS SUPERIORES

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO
DE CORTINAS DE ENROCAMIENTO MEDIANTE
MODELOS DE MATERIAL DELEZNABLE

TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA (MECÁNICA DE SUELOS)

PRESENTA
JORGE ABRAHAM DÍAZ RODRÍGUEZ

MÉXICO, D. F.
1970

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

M EN I ABRAHAM DIAZ RODRIGUEZ
SUBJEFE DEL AREA DE INGENIERIA
CIVIL
P R E S E N T E .

México, D. F., 7 de abril de 1981.

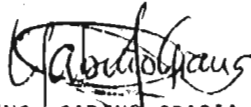
Tema propuesto para el exámen del alumno MILTON ESTUPIÑAN BUJASE para obtener el Diploma de Especialización en Construcción.

Realizar la cuantificación, precios unitarios, programa de ruta crítica y de recursos (humanos, materiales y financieros), de la obra negra de una casa residencial a base de desniveles y superficies irregulares, de los siguientes elementos:

1. Cimentación
2. Estructura
3. Instalación Hidráulica y Sanitaria
4. Instalación Eléctrica

El plazo máximo para el desarrollo del tema será de 30 días.

ATENTAMENTE



ING. GABINO GRACIA CAMPILLO

Actividades:

- 1) Analisis de costos por m², global y por las partidas 1 a 4 anteriores
- 2) Perfil de uso de recursos humanos y financieros a lo largo del periodo de construcción



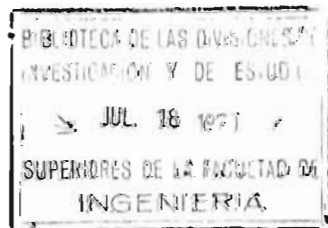
M EN I CARLOS SILVA ECHARTEA



ING. CARLOS URIEGAS TORRES

A MIS PADRES

| | | |
|-----|---|----|
| | RESUMEN | |
| 1. | INTRODUCCION | 1 |
| 1.1 | <u>Objetivos</u> | 3 |
| 1.2 | <u>Alcance</u> | 3 |
| 2. | CONDICIONES DE SIMILITUD | 4 |
| 2.1 | <u>Teoría de los modelos</u> | 4 |
| 2.2 | <u>Ecuaciones de similitud</u> | 6 |
| 3. | CARACTERISTICAS DEL PROTOTIPO | 7 |
| 4. | COMPOSICION DEL MATERIAL DELEZNABLE | 8 |
| 4.1 | <u>Características y descripción</u> | 8 |
| 4.2 | <u>Parámetros</u> | 10 |
| 4.3 | <u>Producción del material granular</u> | 11 |
| 5. | SELECCION DEL MATERIAL PARA MODELOS | 15 |
| 5.1 | <u>Escalas</u> | 15 |
| 5.2 | <u>Variables escaladas por el material deleznable</u> | 15 |



| | | |
|-----|--|----|
| 5.3 | <u>VARIABLES NO ESCALADAS POR EL MATERIAL DELEZNOBLE</u> | 16 |
| 5.4 | <u>PRUEBAS TRIAXIALES</u> | 19 |
| 6. | PRUEBAS PRELIMINARES DE VIBRACION FORZADA | 23 |
| 6.1 | <u>CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES, DEL MODELO Y DEL EQUIPO UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS PRELIMINARES</u> | 24 |
| 6.2 | <u>DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS</u> | 28 |
| 7. | INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS | 29 |
| 8. | RECOMENDACIONES PARA LA SEGUNDA ETAPA | 31 |
| 9. | PROGRAMA DE TRABAJO (SEGUNDA ETAPA) | 32 |
| 10. | RECONOCIMIENTO | 34 |
| 11. | REFERENCIAS | 36 |
| 12. | BIBLIOGRAFIA | 37 |
| | TABLAS Y FIGURAS | 39 |

RESUMEN

Para los fines de este estudio se desarrolló un material granular que supera algunas de las limitaciones inherentes a las pruebas con modelos a escala reducida que se mencionan en la literatura. Una de las principales restricciones ha sido la falta de similitud en la resistencia a la rotura de los granos y, en consecuencia, la influencia de este factor en el comportamiento del material granular en condiciones estáticas y dinámicas.

Se describen en este trabajo las características físicas y mecánicas del material desarrollado y las pruebas preliminares de vibración efectuadas con modelos de 10 cm de altura.

Por último, se presenta el programa de ensayos que se realizarán en modelos de 1 m de altura.

ABSTRACT

A granular material which overcomes some of the limitations inherent to tests with small-scale models was developed. One of the main restrictions, reported in the literature about this, is the lack of similitude in the crushing strength of the grains. This factor, in turn, influences the behavior of the granular material under static and dynamic conditions.

The physical and mechanical properties of the developed material are discussed in this work, together with the preliminary vibration tests on models 10 cm high.

The program for future tests on 1 m high models is described.

1. INTRODUCCION

Considerando la gran importancia que ha adquirido en nuestro país la construcción de cortinas de enrocamiento de gran altura, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) se ha trazado un amplio programa para estudiar el comportamiento estático y dinámico de dichas estructuras. El programa se ha tratado en el primer caso, con mayor aproximación que en el segundo, ya que el comportamiento dinámico, se analiza como un problema estático, incorporando el efecto del temblor como si se tratara de una fuerza horizontal expresada como el producto del peso (W) de la región considerada por un coeficiente sísmico (C_s), de origen obscuro y sin justificación razonable, fuera de que ha sido utilizado por mucho tiempo. Con frecuencia, el coeficiente sísmico se toma constante con la altura. Esto implica que la sección considerada responde como un cuerpo rígido, lo cual ignora la flexibilidad de la cortina.

La experiencia sobre comportamiento de presas que hayan sido afectadas por temblores severos es muy escasa. Por lo tanto no hay forma eficaz de estimar si los valores que se toman para el coeficiente sísmico son o no adecuados. Además se desconoce el carácter alternante y la frecuencia de aplicación de dicha fuerza durante la acción sísmica, por lo que se hace necesario estudiar los efectos de los esfuerzos pulsantes superpuestos a los efectos iniciales debidos a la carga muerta sobre la configuración de la cortina.

Durante un sismo, las fuerzas de inercia a las que está sujeta una cortina pueden en ciertas zonas, ser lo suficientemente fuertes como para reducir el factor de seguridad varias veces, pero por breves periodos de tiempo; durante tales periodos ocurrirían desplazamientos permanentes pero el movimiento será contrareestado cuando la magnitud de la aceleración disminuya o se invierta.

Este tipo de problema cae en el campo de los muchos que hay, en que el número de variables o la complejidad de las situaciones hacen que la aplicación del procedimiento analítico sea tedioso, conduciendo a soluciones matemáticas incómodas a causa de la indeterminación de las condiciones de frontera. Es en este caso cuando el empleo de modelos es una valiosa herramienta, que si no contesta todas las preguntas acerca del problema, sí llena su función de orientar el trabajo analítico.

De las razones anteriores, surgió la necesidad de preparar un material idóneo para el estudio del comportamiento dinámico de modelos

de cortinas de enrocamiento. Dicho material debería eliminar los inconvenientes señalados en trabajos previos sobre modelos¹⁻⁸, principalmente el relativo a utilizar arena para representar el enrocamiento, ya que en ese caso, aunque las dimensiones y los esfuerzos entre las partículas hayan reproducido debidamente las condiciones del prototipo, la resistencia individual de las rocas no se tomó en cuenta. En efecto, muchas de las rocas de una cortina sujetas a diferentes niveles de esfuerzos sufrirán fracturas y, en presencia de sollicitaciones sísmicas, se producirán rotura de granos y asentamientos por reacomodo de partículas.

Por esta razón se emprendió el estudio del comportamiento dinámico en modelos de cortinas construidas de material granular deleznable. Se ha denominado deleznable, en este trabajo, aquel material debidamente escalado (es decir, que cumpla las condiciones de similitud que exige el análisis dimensional para el trabajo con modelos), principalmente en cuanto a peso volumétrico y resistencia al esfuerzo cortante. Esta última, considerada a través de las curvas esfuerzo desviador-deformación axial y de la rotura de granos.

1.1 Objetivos

La investigación completa abarca los siguientes puntos:

1. Establecimiento de las condiciones de similitud
2. Determinación del material deleznable que permita escalar adecuadamente las propiedades geométricas y mecánicas del enrocamiento
3. Estudio de las propiedades físicas y mecánicas del material

granular

4. Interpretación de los resultados de los ensayos, y calibración de los modelos

5. Planeación y ejecución de pruebas de modelos en mesa vibradora

6. Interpretación de los resultados de las pruebas.

1.2 Alcance

En este trabajo se cubren los tres primeros puntos y algunos aspectos de los dos siguientes.

2. CONDICIONES DE SIMILITUD

2.1 Teoría de los modelos

Los principios para fundamentar el diseño de modelos y las pruebas de estos, se establecen mediante la aplicación directa del análisis dimensional, entre las características del modelo y las del prototipo⁹⁻¹¹, por lo tanto se deben satisfacer las condiciones de similitud que se citan a continuación:

a) Similitud geométrica (forma y dimensiones). Las dimensiones de los elementos del modelo deberán ser proporcionales a las de elementos homólogos del prototipo

b) Similitud sinemática (relaciones espacio-tiempo). Cada evento en el modelo debe tener una duración proporcional a la del evento correspondiente en el prototipo

c) Similitud dinámica (fuerzas). Partes homólogas de ambos sistemas

deben experimentar fuerzas netas proporcionales.

El primer paso para establecer las condiciones de similitud consiste en identificar las variables importantes del problema planteado. En este caso, el problema consiste en determinar los efectos destructivos de un sismo sobre una cortina de enrocamiento (colapso total, pérdida de bordo libre, rotura del corazón impermeable, etc.), siendo necesario considerar las siguientes variables:

- a aceleración
- d desplazamiento
- E módulo de elasticidad
- F fuerza de inercia
- g aceleración gravitacional
- l longitud
- m masa
- t tiempo
- u coeficiente de viscosidad
- v velocidad
- δ densidad
- $\dot{\epsilon}$ velocidad de deformación
- μ relación de Poisson
- σ_c esfuerzo crítico
- ϕ coeficiente de fricción

Con las variables anteriores pueden formarse 12 grupos

numéricos adimensionales¹².

2.2 Ecuaciones de similitud

De los grupos adimensionales se obtienen las siguientes ecuaciones, en que las variables con prima se refieren al modelo y los parámetros ρ, λ, τ y ξ representan las escalas de densidades, longitudes, tiempos y esfuerzos, respectivamente.

$$a = a' \quad (2.2.1)$$

$$\tau = \lambda^{1/2} \quad (2.2.2)$$

$$\frac{d}{d'} = \lambda \quad (2.2.3)$$

$$\frac{v}{v'} = \lambda^{1/2} \quad (2.2.4)$$

$$\frac{F}{F'} = \rho \lambda^3 \quad (2.2.5)$$

$$\frac{E}{E'} = \rho \lambda \quad (2.2.6)$$

$$\mu = \mu' \quad (2.2.7)$$

$$\xi = \rho \lambda \quad (2.2.8)$$

$$\frac{u}{u'} = \frac{E}{E'} \lambda^{1/2} = \rho \lambda^{3/2} \quad (2.2.9)$$

$$\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}'} = \lambda^{-1/2} \quad (2.2.10)$$

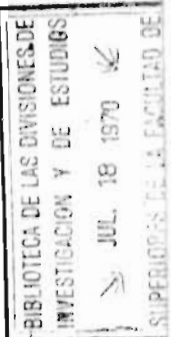
$$\theta = \theta' \quad (2.2.11)$$

Por la dificultad de satisfacer simultáneamente las once ecuaciones de similitud, fue necesario cumplir en primer término con las condiciones de esfuerzo crítico, peso volumétrico y longitud, esenciales en el comportamiento inelástico de modelos. Estas condiciones quedan involucradas en la ec 2.2.8. Al satisfacer esta ecuación, quedan también rigurosamente satisfechas las ecs 2.2.1 a 2.2.5 y 2.2.10, 2.2.11, mientras que las ecs 2.2.6, 2.2.7 y 2.2.9 solo se satisfacen en forma aproximada.

3. CARACTERISTICAS DEL PROTOTIPO

El análisis dimensional anterior es aplicable a cualquier tipo de cortinas, independientemente de su geometría, dimensión y materiales.

Debido a la variación de las propiedades de las rocas y los enrocamientos, se consideró conveniente elegir un espécimen para escalar sus características. Esta elección se basó en la necesidad de contar con datos referentes al comportamiento del material, tanto en estructuras ya construidas como en pruebas triaxiales a diferentes presiones de confinamiento. Es por esto que se escogió para el estudio el producto de excavación con explosivos en la cantera 5, que fue el material usado para construir gran parte de los respaldos de la presa El Infiernillo. Esta roca es una diorita sana, con densidad de sólidos media de 2.73 y resistencia a la compresión simple, R_c , de 1 052 kg/cm². Cabe hacer notar que este último dato corresponde a la roca antes de ser extraída de la cantera, y que no revela el efecto de la explosión en la resistencia final del producto



(material granular).

El promedio del peso volumétrico seco del enrocamiento compactado formado con esta roca es de $1\ 850\ \text{kg/m}^3$ ($116\ \text{lb/ft}^3$). En las refs 13 y 14 se encuentran datos más completos acerca de las características físicas y mecánicas de este material.

4. COMPOSICION DEL MATERIAL DELEZNABLE

4.1 Características y descripción

Para satisfacer en forma práctica las necesidades de similitud, se preparó un gran número de mezclas distintas, constituidas fundamentalmente por dos o más de las siguientes componentes: yeso (Y), cemento (C), plásticos líquidos (PL), arcillas (O, K), litargirio (óxido de plomo, L), barita (B), retardadores (R) y agua. El litargirio y la barita se utilizaron principalmente para incrementar el peso volumétrico de cada tipo de mezcla, empleando como aglutinantes el yeso, el cemento, los plásticos o la arcilla. Los retardadores sirvieron como elementos para controlar la velocidad de las reacciones químicas.

La forma de identificar las diferentes mezclas es a base de literales (componentes) seguidas por el porcentaje. Por ejemplo Mezcla Y*L 1090 significa que los componentes son yeso y litargirio en porcentaje en peso de 10 y 90 por ciento, respectivamente; el asterisco indica que se utilizó retardador (acetato de amonio) a una concentración de 0.2 normal (15.4 gr/lt).

Se elaboró un mínimo de seis especímenes sólidos de cada mezcla. Cada espécimen fue de aproximadamente 5.4 cm de diámetro y 10 cm de altura. Estos se almacenaron a temperatura constante con objeto de que, al finalizar las reacciones químicas, el material tuviese un peso también constante y el contenido de agua estuviera en equilibrio con la humedad ambiente.

De cada espécimen sólido se determinaron el peso volumétrico y la resistencia a la compresión simple; con estos datos se calcularon las escalas ρ y λ como primera aproximación, ya que estas escalas deben calcularse para el material granular deleznable. En la ref 12 se presentan tabulados los resultados de las pruebas en la mayoría de las probetas ensayadas.

En términos generales se puede decir lo siguiente:

a) Para mezclas del tipo YB y CB se alcanzaron valores de peso volumétrico máximo de 2.3 ton/m^3 y resistencia a la compresión simple de 11.8 kg/cm^2 con la mezcla CB 0595

b) Para mezclas del tipo YL y CL se alcanzaron valores de peso volumétrico máximo de 4.75 ton/m^3 y resistencia a la compresión simple de 8.7 kg/cm^2 con la mezcla YL 0199

c) Las mezclas del tipo PLL presentaron dificultades para obtener bajas resistencias

d) Las mezclas del tipo QL y KL alcanzaron valores de peso volumétrico máximo de 4.5 ton/m^3 y resistencia a la compresión simple de 8.5 kg/cm^2

con la mezcla KL 0595. Sin embargo el comportamiento de este material en estado granular fue inconveniente debido a que la deformación no era continua sino que avanzaba por incrementos (step-strain).

Las consideraciones indicadas en 5.1 determinaron que el tipo de mezcla más adecuado era YL 0199 con la que se obtenía un elevado peso volumétrico y una baja resistencia.

En el proceso se consideraron, además de la composición, los parámetros que se mencionan en el siguiente subcapítulo.

4.2 Parámetros

Durante la elaboración de las mezclas se tuvieron en cuenta variables tales como:

a) Agua de preparación. Pequeñas variaciones en la cantidad de agua producen cambios apreciables en el peso volumétrico y principalmente en la resistencia. Es por esto que se decidió especificar y controlar estrictamente esta variable

b) Mezclado. Se adoptó un proceso mecánico, cuyo resultado es una mezcla homogénea que permite reproducir las características requeridas en mezclas sucesivas

c) Condiciones del ambiente. Debido a la presencia del yeso en el material deleznable, este sufre variaciones en sus propiedades físicas y mecánicas originadas por los cambios en las condiciones del ambiente, principalmente temperatura y humedad. Por esta razón, para garantizar la inva-

riabilidad de las propiedades del material deleznable, será indispensable acondicionar el local de la mesa vibradora para lograr condiciones controladas de humedad y temperatura

d) Rehabilitación del material. Teniendo en cuenta que:

I. El costo del material para modelos es elevado

II. En el proceso de fragmentación, una parte del material resultante tiene un tamaño menor que el requerido

III. En los modelos, después de probados a la falla habrá rotura de granos y, por consiguiente, se tendrá material de dimensiones menores que las iniciales, entonces se estudiará la posibilidad de rehabilitar el material que queda fuera de especificación para volverlo a usar, evitando con esto incrementar excesivamente el costo de la investigación.

4.3 Producción del material granular

El problema esencialmente consiste en producir grandes cantidades de material (10 ton), mediante un proceso eficiente y adecuado. Para que se lograra tal objetivo se fijaron los siguientes puntos:

- a) Estandarizar el proceso
- b) Semimecanizarlo
- c) Producir un mínimo de 500 kg diarios (turno de 8 hs).

El procedimiento de fabricación finalmente adoptado puede resumirse en los siguientes puntos

1. Recepción de materiales (yaso y litargirio)
2. Proporcionamiento (para 20 kgs)

3. Mezclado

- a) Revolver en seco y a baja velocidad, las cantidades ya proporcionadas de yeso y litargirio, por un periodo de 30 seg
- b) Al usar retardador, se deberá hacer por separado la mezcla de este y del agua previa dosificación
- c) Agregar el agua en un crater hecho en la revoltura de yeso-litargirio y permitir que esta absorba el agua, por espacio de 1 minuto
- d) Después de la absorción, la mezcla final se obtiene operando la batidora a baja velocidad por 3 periodos de tiempo de 90 seg; entre estos, existen 2 periodos en los cuales se suspende el batido con objeto de quitar de las paredes del recipiente (Tazón) el material adherido a estas, y colocarlo al centro del mismo.

4. Tendido, esta operación consiste en extender la mezcla, hasta formar una placa de aproximadamente 5 mm de espesor, con los siguientes pasos:

- a) Disponer de charolas de lámina galvanizada de aproximadamente 40 x 30 x 1 cm, en número suficiente para contener el volumen total de mezcla de un turno de trabajo de 8 hs
- b) Colocar una hoja de polietileno en la charola sobre la cual se verterá la mezcla. El polietileno tiene como finalidad el poder desocupar la charola de lámina al iniciarse el siguiente turno, la pastilla de material estará aún en estado plástico y podrá colocarse en el suelo hasta su secado final

c) Colocar la charola sobre una superficie sujeta a vibración con objeto de acortar el tiempo de extensión de la mezcla.

5. Secado final, se deja reposar el material hasta lograr condiciones de equilibrio con el medio ambiente.

6. Trituración, este aspecto es el más delicado del proceso, su solución requirió bastante tiempo, la principal dificultad está en la baja resistencia del material, ya que no se puede emplear equipo convencional de trituración.

Para encontrar el dispositivo adecuado, se ensayaron diversas formas como son:

- a) Fracturamiento por impacto
- b) Fracturamiento por flexión, colocando la placa de material deleznable sobre una membrana de latex e inmediatamente después tratar de que la placa adoptara una forma semiesférica
- c) Corte por medio de cuchillas
- d) Corte por medio de puntas agudas, colocadas en una superficie plana, se ensayaron diversos arreglos variando separación, profundidad y distribución relativa.
- e) Otros más.

El dispositivo que finalmente se adoptó consta de 2 cilindros con puntas agudas que giran en sentidos opuestos, en la parte superior se localiza una pequeña tolva de alimentación y en la inferior una banda transportadora que recibe el material triturado y lo conduce hacia las

mallas para su tamizado. Un motor de corriente continua de $1/3$ de H. P. y 1230 rpm mueve a los rodillos y a la banda transportadora, debido a la alta velocidad del motor, se empleó un reductor mecánico de velocidad para que los rodillos trituradores giren a una velocidad de aproximadamente 30 rpm.

7. Tamizado, el dispositivo consta de las mallas necesarias para la separación por tamaños, accionadas por 2 motores para generar vibraciones, el conjunto de mallas descansa en 4 resortes que proporcionan la amplitud necesaria, mejorando el funcionamiento del sistema. Las mallas tienen una inclinación de aproximadamente 25° con objeto de que los granos rueden hacia las charolas receptoras que posteriormente servirán para su almacenamiento.

8. Almacenaje, teniendo en cuenta que el peso propio del material produce rotura de granos, el material se almacena en charolas de plástico con una altura no mayor de 7 cm.

9. Teñido, se juzgó conveniente disponer de material de diferentes colores, con objeto de poder observar los movimientos de los granos durante las pruebas de vibración. Básicamente el proceso consta de 3 puntos

- a) Impermeabilización de los granos, utilizando un mordente
- b) Teñido del material mediante inmersión empleando anilinas
- c) Secado.

Después de obtener el material granular delaznable, se

realizaron una serie de pruebas triaxiales que permitieron estimar en forma rápida la granulometría más conveniente para escalar las curvas esfuerzo desviador-deformación axial, y satisfacer la escala de pesos volumétricos en estado granular.

5. SELECCION DEL MATERIAL PARA MODELOS

5.1 Escalas

Las limitaciones impuestas por las dimensiones de la mesa vibradora (4.47 x 4.47 m) y la conveniencia de estudiar cortinas con taludes hasta de 2:1, obliga a que la altura de los modelos quede limitada a un metro. Se eligió como altura del prototipo 140 m, ya que esta medida corresponde aproximadamente a dos de las principales presas que pertenecen a la CFE: El Infiernillo y La Angostura.

Las consideraciones anteriores dieron como resultado una escala de longitudes $\lambda = 140$.

Ya se mencionó la importancia de la ec 2.2.8, en la que intervienen, además de la escala de longitudes, las de pesos volumétricos y de esfuerzos. Con los datos señalados en el subcapítulo 4.1, se pudieron determinar las escalas que satisfacen la ecuación citada. Entre ellas, se escogió $\rho = \frac{2.60}{4.25} = 0.69$ y $\xi = \frac{1\ 052}{12.30} = 85.5$ como un primer tanteo. Los valores finales de las escalas se presentan en la tabla 1.

5.2 Variables escaladas por el material deleznable

En general, los materiales que se emplean para construir modelos a escala reproducen solamente aquellas variables que tienen efectos considerables en el comportamiento del modelo. Así, los fines que se persiguen en las pruebas determinan las relaciones de similitud necesarias que deben respetarse para obtener la información que se desea, ya que, tratar de considerarlas todas, no solo resulta antieconómico, sino con frecuencia inconveniente. Las variables escaladas mediante el material fabricado son:

Peso volumétrico de especímenes sólidos

Peso volumétrico de especímenes granulares

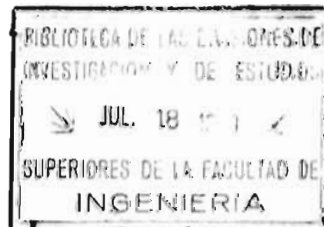
Angulo de fricción interna del material granular.

En la lista anterior, aparentemente se han omitido variables importantes como son forma y dimensiones de las partículas, relación de vacíos, módulo de elasticidad, etc. La justificación para suprimirlas de la lista de variables escaladas y su influencia en el comportamiento de modelos aparecen en el inciso siguiente.

5.3 Variables no escaladas por el material deleznable

5.3.1 Forma y dimensiones de las partículas

El tamaño representativo de los granos del material deleznable empleado debería ser el de las rocas de muestras probadas en la cámara triaxial gigante de la CFE¹³⁻¹⁵, dividido entre la escala de longitudes (en este caso 140). Ahora bien, si las dimensiones representativas de las rocas ensayadas son de 20 cm o menores, las dimensiones de los granos



del material del modelo variarán aproximadamente de 1.5 mm a un tamaño menor que el de la malla No 200.

Cabe aclarar que el enrocamiento formado por material deleznable tiene una granulometría más uniforme que el material del prototipo. Además, no se respeta la escala de longitud, ya que los granos son mayores de lo que teóricamente deberían ser. Esto obedece a que al trabajar con materiales de granulometría muy fina, se introducen efectos que no se toman en cuenta en el prototipo, como son los de la tensión capilar que se produce por humedad entre los granos del modelo. Estos corresponderían a fuerzas elevadas de cohesión totalmente inexistentes en el prototipo. Por otra parte, al trabajar con un material mejor graduado se tendrían problemas de segregación que podrían conducir a zonificación de propiedades. Además, el procedimiento de trituración para obtener este material granular produciría un mayor porcentaje de tamaños inadecuados, y, finalmente, sería más difícil el teñido necesario para la zonificación por colores del modelo, y para observar los deslizamientos del material fino.

La granulometría del material seleccionado se presenta en la fig 1.

En esta figura aparecen, a la izquierda, las granulometrías iniciales utilizadas en los ensayos del material de la cantera No 5. De estas granulometrías se eligió la utilizada en la prueba No 44, cuyas características son:

$$\begin{array}{lll}
 D_{10} = 25 \text{ mm} & D_{30} = 50 \text{ mm} & D_{50} = 113 \text{ mm} \\
 C_u = 4.62 & C_c = 1.11 & D_{\text{máx}} = 200 \text{ mm}
 \end{array}$$

Si se dibuja una curva que tenga como tamaño máximo 3.36 mm (malla No 6), entonces $\lambda_1 = 200/3.36 = 59.5$. Aplicando este factor de reducción a todos los tamaños, pero conservando los valores originales de los porcentajes retenidos, se obtiene la curva (P) cuyas características son:

$$\begin{array}{lll}
 D_{10} = 0.56 \text{ mm} & D_{30} = 1.18 \text{ mm} & D_{60} = 1.5 \text{ mm} \\
 C_u = 2.68 & C_c = 1.66 & D_{\text{máx}} = 3.36 \text{ mm}
 \end{array}$$

Se aprecia que cambiaron el C_u y C_c porque la curva cambió su posición en la escala logarítmica.

La razón por la cual se eligió como tamaño máximo 3.36 mm fue que, según ref 16 (fig 8), el tamaño máximo de la roca colocada en la zona 4 de la cortina de la presa El Infiernillo fue de 45 cm, lo cual conduce a un tamaño máximo para las partículas del modelo de:

$$D_{\text{máx}} = 450 \text{ mm}/140 = 3.21 \text{ mm} \text{ igual a la abertura de la malla}$$

No 6, que es de 3.36 mm.

Tratando de respetar la forma de la curva (P), pero eliminando los tamaños menores de 0.420 mm (malla No 40) por los inconvenientes señalados antes, el material granular deleznable tendrá la granulometría según la curva (M) con las siguientes características:

$$D_{10} = 0.585 \text{ mm} \quad D_{30} = 1.68 \text{ mm} \quad D_{60} = 2.11 \text{ mm}$$

$$C_u = 2.14 \quad C_c = 1.35 \quad D_{\text{máx}} = 3.36 \text{ mm}$$

Con este material, se efectuaron pruebas drenadas de compresión triaxial a diferentes presiones confinantes (ver 5.4).

5.3.2 Relación de vacíos

Aunque esta variable es significativa al estudiar materiales granulares, en este caso quedó obligada por las relaciones de similitud que se respetan y por la granulometría adoptada. Cabe señalar que no se ha pretendido escalar esta variable dándole preferencia sobre otras, sino que se busca que el comportamiento de la muestra bajo compresión triaxial, sea similar al de los especímenes de material del prototipo. En esta forma, al comparar los comportamientos, la relación de vacíos pierde su preponderancia habitual, pues su influencia se refleja en el comportamiento de cada uno.

5.3.3 Constantes elásticas

Estos parámetros solo interesan cuando se estudian las respuestas elásticas de un modelo. En los casos en que sea de interés el intervalo lineal, las gráficas esfuerzo-deformación obtenidas de pruebas triaxiales con especímenes granulares de material deleznable permiten estimar en forma razonable el módulo de elasticidad.

5.4 Pruebas triaxiales

El material granular deleznable fue sometido a una serie de pruebas triaxiales drenadas, sobre especímenes secos de 3.5 cm de diámetro, a presiones confinantes de 0.016 a 0.3 kg/cm². Los objetivos principales de estos ensayos fueron:

1. Determinar las características mecánicas del material deleznable
2. Comparar dichas características con las del material prototipo.

Los resultados del punto 1 se presentan en las figs 2 y 3, y en la tabla 2. A partir de ellos, se pueden hacer los siguientes comentarios:

1. Las curvas esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) vs deformación axial (ϵ_a) son parabólicas ($y = a x^b$)
2. La relación de esfuerzos principales en la falla disminuye apreciablemente al aumentar σ_3
3. Las rectas que pasan por el origen de coordenadas, y son tangentes a los círculos de Mohr, tienen inclinaciones que varían para un mismo material de 53° para presiones confinantes de 0.016 kg/cm² a 35.4°, cuando σ_3 es de 0.3 kg/cm².

De lo anterior se concluye que el material granular deleznable sigue las mismas tendencias de comportamiento que los materiales granulares y las muestras de enrocamiento ensayadas en la cámara triaxial gigante. Es decir, al utilizar material deleznable en la construcción de modelos, el comportamiento de estos será muy parecido al comportamiento

real del prototipo. Esto no ocurre al utilizar arena, ya que no sigue las tendencias antes mencionadas.

Cabe aclarar que las curvas esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) vs deformación axial no son idénticas para prototipo y modelo, debido probablemente a:

a) La dificultad para reproducir tanto la microfisuración matricial de la roca, como la fisuración producida por el efecto de los explosivos. En este aspecto el material es más sano, ya que se obtiene de una mezcla homogénea, que se elabora bajo estricto control en el laboratorio y con un proceso de fragmentación que daña los granos lo menos posible.

b) La diferencia en angulosidad, es decir, el material para modelos es menos anguloso que el del prototipo, teniendo con esto menores concentraciones de esfuerzo en los puntos de contacto y resultado, por lo tanto, menos compresible.

La razón por la cual no se reproduce la angulosidad es que después de fragmentado el material, se hace necesario tamizarlo para poder separarlo por tamaños; este proceso destruye la angulosidad de las aristas dando como resultado un material con aristas redondeadas.

Respecto al segundo objetivo de las pruebas triaxiales, es decir, las comparaciones entre el comportamiento mecánico del material deleznable y el de los materiales cuyas características se trata de si-

mular, los materiales naturales con los que se hizo la comparación fueron:

- a) Material de la cantera No 5 de El Infiernillo
- b) Enrocamiento de El Infiernillo (material de calas)

Se puede afirmar que ambos materiales están constituidos por el mismo tipo de roca, pero mientras en el primero se considera que se conservan ciertos resultados del proceso de explotación, a saber: granos con bordes y esquinas angulosas y con ciertas debilidades, el segundo sufrió, además, el proceso de compactación en el campo, dando como resultado bordes y esquinas redondeadas. La diferencia entre estas características se puede apreciar en las tendencias de las curvas esfuerzo desviador-deformación axial, en las que se observa que las del material de calas tienen una pendiente mayor, que caracteriza a un material menos compresible y más resistente que el de la cantera No 5.

Teniendo en cuenta que los valores de las escalas aceptables para el material granular deleznable son:

$$\left. \begin{array}{l} \lambda = 140 \\ \rho = 0.55 \end{array} \right\} \xi = 77$$

se multiplicaron los valores de $(\sigma_1 - \sigma_3)$ y de σ_3 (figs 2 y 3) por 77, para poder efectuar las siguientes comparaciones:

- I. Rotura de granos-presión confinante (fig 4)
- II. Esfuerzo desviador-deformación axial (fig 5)
- III. Círculos de Mohr (fig 6)
- IV. Relación de esfuerzos principales-deformación axial.

En todas estas comparaciones se puede apreciar la marcada tendencia del material deleznable a situarse entre los dos comportamientos que caracterizan a los materiales prototipo.

De lo anterior se concluye que el material deleznable obtenido puede ser empleado en la construcción de modelos que reproduzcan satisfactoriamente las características del prototipo. La fig 7 presenta el aspecto de los granos de material deleznable antes y después de la prueba triaxial. Es importante hacer notar que el material desarrollado deberá emplearse con los procedimientos adecuados de construcción, instrumentación, ejecución de pruebas e interpretación de resultados, a fin de lograr la mayor semejanza entre modelo y prototipo. Esto permitirá inferir valiosas conclusiones que constituyen la finalidad del estudio.

6. PRUEBAS PRELIMINARES DE VIBRACION FORZADA

Con objeto de descubrir las dificultades que pudieran presentarse al preparar los modelos principales de material deleznable y someterlos a pruebas de vibración forzada en la mesa vibradora, se decidió efectuar una serie de pruebas preliminares con modelos más pequeños utilizando como fuente de excitación el vibrador programado Ling. Estos modelos son representativos del principal, y aunque no satisfacen todas las relaciones de similitud que este último cumple, sí establecen lineamientos relacionados con las pruebas del modelo principal.

Los objetivos definidos para las pruebas preliminares

fueron:

a) Dominar la técnica de colocación del material deleznable para formar el modelo principal. Esto es importante dada la baja resistencia del material. Una técnica inadecuada conduciría a un alto porcentaje de rotura de granos antes de aplicar las solicitaciones dinámicas, o bien a una relación de vacíos demasiado alta en el modelo principal.

b) Seleccionar los parámetros que van a definir las características de falla del modelo principal. Teniendo en cuenta la rotura de granos es preciso determinar, en diferentes etapas de la falla, parámetros relacionados con la pérdida de bordo libre, la evolución del perfil de la sección media y de secciones intermedias, el porcentaje de granos rotos, las relaciones de vacíos inicial y final, los modos y frecuencias naturales de vibración del modelo principal, etc.

c) Resolver problemas relacionados con la instrumentación del modelo principal.

d) Estudiar la posibilidad de recuperar parte del material para las siguientes pruebas.

6.1 Características de los materiales, del modelo y del equipo utilizados en las pruebas preliminares

6.1.1 Materiales

Se utilizaron dos tipos de material en las pruebas preliminares:

1. Arena fina, seca, que pasa la malla No 16 (1.19 mm) y es rate-

nida en la No 70 (0.210 mm). La granulometría de la arena se presenta en la fig 8 y puede resumirse como sigue:

$$D_{10} = 0.62 \text{ mm} \quad D_{30} = 0.75 \text{ mm} \quad D_{60} = 0.84 \text{ mm}$$

$$C_u = 1.35 \quad C_c = 1.08$$

Los contenidos de agua determinados fueron menores del 0.9 por ciento.

2. Material deleznable, designado Y*L 2000, previamente quebrado, hasta un tamaño de granos que pasa la malla No 20 (0.040 mm) y se retiene en la No 70 (0.210 mm). La granulometría de este material se presenta en la fig 8 y puede resumirse como sigue:

$$D_{10} = 0.28 \text{ mm} \quad D_{30} = 0.46 \text{ mm} \quad D_{60} = 0.65 \text{ mm}$$

$$C_u = 2.32 \quad C_c = 1.162$$

Los contenidos de agua determinados resultaron menores de 4.4 por ciento.

6.1.2 Modelos

Se prepararon modelos pequeños, como el que se muestra en la fig 9. La altura de cada uno fue de 10 cm y los taludes 1.6:1 se conservaron constantes para los dos tipos de material. Las dimensiones de los modelos pequeños estuvieron limitados por la capacidad del vibrador programado. Se utilizaron capas de material pintado de diferentes colores para estudiar el desplazamiento de los granos.

Cada modelo se construyó en una caja de madera de 50 x 50 x 15 cm, con paredes laterales de lucita engrasadas cuidadosamente a fin de disminuir la fricción del material sobre las mismas. La fig 10 muestra la caja de prueba donde se colocaron los modelos, y la fig 11 una vista general del sistema de soporte del conjunto.

Para la fabricación del modelo se utilizó un molde que retenía al material con el talud 1.6:1 (ver fig 10). La colocación se efectuó por capas de espesor menor de 0.5 cm. Cada capa se compactó con la ayuda de un pisón ligero, con objeto de ayudar al acomodamiento de los granos. Una vez alcanzada la altura de 10 cm, se procedió a vibrar todo el modelo con la cimbra aún colocada, a fin de asegurar que la vibración en el momento de la prueba no provocara asentamientos por compactación. La frecuencia de vibración se seleccionó de los resultados que se obtuvieron de ensayos efectuados para este fin; estos consistieron en someter a vibración una cierta cantidad de material colocado en un recipiente graduado y observar el cambio de volumen. De esa manera se obtuvieron las gráficas que aparecen en la fig 12.

6.1.3 Equipo

En la fig 11 se muestra la caja de prueba en la que se ha colocado el modelo y, suspendido a manera de péndulo, se liga el vástago de un vibrador programado Ling, cuyas características son las siguientes:

Máximo desplazamiento del vástago: 1 pulg

Máxima fuerza desarrollada: 150 lb vector

Intervalo de frecuencias: 1 a 10 000 cps

Tipo de excitación: programable a voluntad

Para las pruebas preliminares se utilizó únicamente vibración armónica, aplicándose la excitación en dirección horizontal y perpendicular a la cresta del modelo. El perfil del modelo se determinó durante las diferentes etapas de ejecución de cada prueba mediante el perfilómetro mostrado en la fig 13.

La aceleración producida en la base del modelo se midió por medio de un servoacelerómetro Donner, cuyas características principales son:

Rango lineal, salida a + 1g: 7.539 volts DC

salida a - 1g: -7.537 volts DC

Frecuencia natural: 101 cps

Coefficiente de amortiguamiento: 0.74 del crítico

Este detector enviaba una señal a un atenuador cuyo propósito era aumentarla o disminuirla para obtener un registro adecuado en un oscilógrafo Honeywell Tipo Visicorder 1508, de 29 canales, que grafica la señal en papel fotográfico de 7 pulgadas de ancho. Tanto la velocidad del papel como las marcas de tiempo se variaron según la frecuencia de excitación. Para cuantificar la aceleración aplicada al modelo en el momento de la prueba se utilizó como monitor un osciloscopio Tektronix 502, conectado

a la salida de voltaje del atenuador.

6.2 Descripción de las pruebas

Preparado el modelo pequeño y colocados los instrumentos de captación y registro debidamente calibrados, se procedió a determinar el perfil inicial en las secciones Z = 12, 24 y 35 (ver sistema de referencia, fig 9) y a fotografiar los taludes. Con cada tipo de material se efectuó la prueba de vibración forzada en dos etapas.

6.2.1 Primera etapa: determinación de las frecuencias de resonancia

Para determinar la frecuencia de falla a utilizar en la segunda etapa, la frecuencia de vibración armónica aplicada se hizo variar en intervalos discretos, desde 1.0 hasta 100 cps. Esto corresponde a un rango de frecuencias de 0.09 a 8.5 cps en el prototipo, en caso de tener $\lambda = 140$. Para cada incremento (2 a 4 cps), la amplitud del desplazamiento aplicado a la caja se fue variando paulatinamente desde cero hasta un valor máximo admisible, correspondiente al inciso del rodamiento de granos. Mediante una gráfica, en que las abscisas corresponden a las frecuencias aplicadas y las ordenadas representan las aceleraciones correspondientes cuando comienza a producirse rodamiento de granos, se determinaron las frecuencias de resonancia. Estas corresponden a los mínimos relativos de la fig 14.

6.2.2 Segunda etapa: características de la falla

Determinadas las frecuencias resonantes correspondientes

a cada modelo, se eligió una de ellas para excitar el modelo hasta la falla. Para esto, se volvió a determinar el perfil y a fotografiar los taludes y las secciones extremas. A continuación, con la frecuencia adoptada, se procedió a incrementar paulatinamente la amplitud de la excitación aplicada, permitiendo para cada incremento unos cuantos ciclos de vibración hasta alcanzar el régimen permanente. Después de cada incremento de aceleración, se detenía completamente la vibración para medir el perfil de las secciones transversales y fotografiar el estado de los taludes. La fig 15 muestra gráficas típicas de la pérdida de bordo libre en el centro de la cresta de ambos modelos, en función de la aceleración aplicada con la frecuencia resonante establecida previamente. Las figs 16 y 17 presentan la evolución de la sección transversal en el centro de los modelos de arena y de material deleznable, respectivamente, durante una prueba a la falla.

7. INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

Hasta el momento, de acuerdo con el objetivo de las pruebas, solamente se ha llegado a conclusiones de tipo cualitativo en lo que se refiere a los modos y frecuencias de resonancia y a las características de la falla de los modelos. Se han observado diferencias importantes en el comportamiento de los modelos de arena y los de material deleznable. Esto confirma tentativamente la hipótesis preliminar que dio origen al presente estudio, a saber: la rotura de los granos es importante en el comportamiento dinámico de una cortina de enrocamiento. Las principales conclusiones se

derivan de la observación de las gráficas correspondientes a las figs 14 a 17 y de las fotografías mostradas en las figs 18 y 19. La fig 18 corresponde a tres aspectos del talud en un modelo de arena, mientras que la fig 19 muestra los aspectos correspondientes en un modelo de material deleznable.

Las principales conclusiones, de carácter cualitativo, son:

a) La frecuencia fundamental de resonancia es menor en el modelo de material deleznable que en el modelo de arena, según se observa en la fig 14. Esto puede atribuirse a dos causas: en primer lugar, el modelo de material deleznable tiene mayor masa y, por lo tanto, menores frecuencias. En segundo, puede producirse en él la rotura de granos, lo que disminuye la rigidez del sistema y reduce las frecuencias naturales de vibración.

b) La pérdida de bordo libre para cualquier aceleración es mayor en el modelo de arena que en el de material deleznable. Esta conclusión aparentemente contradice la hipótesis relativa al reacomodo de los granos. Sin embargo, puede explicarse en función de la densificación producida por vibraciones, previas a la ejecución de la prueba. Posiblemente los granos de los modelos de material deleznable sufrieron ligeros fracturamientos durante la vibración, lo que ocasionó en ellos una menor relación de vacíos inicial que en los modelos de arena. Esta relación de vacíos inicial puede ser menor a la relación crítica para la cual la vibración produce aumento de volumen en vez de reducción.

c) La falla en el modelo de arena se produce siempre por rodamiento

de granos, como se observa en la fig 18. En cambio, en la fig 19 puede observarse claramente una superficie de falla en el talud, lo que indica no solo rodamiento, sino fractura y pulverización de los granos de material deleznable.

8. RECOMENDACIONES PARA LA SEGUNDA ETAPA

De las pruebas preliminares se derivan las siguientes recomendaciones:

I. Conviene colocar instrumentos de captación en la cresta, en los taludes y en el interior del modelo principal. Esto permitirá determinar, instrumentalmente, las frecuencias resonantes y los modos de vibración correspondientes.

Durante las pruebas preliminares, las frecuencias resonantes tuvieron que estimarse de manera burda mediante la observación del rodamiento de los granos.

II. Sería conveniente conocer los cambios relativos de posición de las capas en el interior del modelo durante su construcción, al final de cada movimiento y al terminar el ensaye. Actualmente, en la sección de instrumentación del Instituto de Ingeniería de la UNAM se trabaja en un aparato que permitirá medir los cambios antes mencionados. Este aparato consiste básicamente en un extensómetro lineal miniatura.

III. Sería conveniente modelar a escala la boquilla o idealizarla en forma más aproximada a la realidad

9. PROGRAMA DE TRABAJO (SEGUNDA ETAPA)

La investigación que se propone constará de los siguientes

puntos:

1. Fabricación del material granular deleznable que se utilizará en la construcción de los modelos
2. Ensayes de compresión confinada, y ensayes triaxiales a diversas presiones confinantes con medición de cambios volumétricos, para determinar las relaciones esfuerzo-deformación del material y calibrar los modelos
3. Adaptación del sistema de excitación para ser accionado mediante un vibrador
4. Ensaye del procedimiento de construcción, instrumentación y ejecución de pruebas
5. Construcción de modelos con las siguientes características:

| Modelo número | Altura media | Ancho cresta | Talud | Longitud |
|---------------|--------------|--------------|--------|----------|
| 1 | 1.00 | 0.07 | 1.75:1 | 3.57 |
| 2 | 1.00 | 0.07 | 1.75:1 | 3.57 |
| 3 | 1.00 | 0.07 | 2:1 | 4.07 |
| 4 | 0.50 | 0.50 | 1.75:1 | 1.62 |

El punto 1 abarcará la fabricación, quebrado, tamizado, teñido y almacenamiento del material necesario. Terminado este proceso

se muestreará el material y se someterá a los ensayos descritos en el punto 2. Al mismo tiempo, se llevará a cabo la adaptación a la mesa vibradora del sistema de excitación (vibrador armónico de cuatro masas), el cual posee un intervalo de frecuencias de 0 a 50 cps y desarrolla una fuerza máxima horizontal de 5 000 kg. Este punto también incluye la construcción de la boquilla idealizada sobre la que se construirán los modelos. Dicha boquilla estará formada por 2 planos perpendiculares entre sí, unidos mediante un segmento triangular que da lugar a la imagen trapezoidal indicada en la fig 20. Esta forma se escogió con objeto de acercarse más al comportamiento tridimensional del modelo, ya que una objeción a trabajos anteriores ha sido estudiar solo modelos bidimensionales, ignorando el efecto confinante de las laderas.

Antes de construir los modelos de material delaznable, se realizará un ensayo general que incluirá todas las etapas de construcción, colocación de los aparatos de captación, acabado de los modelos y pruebas a la falla. En tal caso, el material utilizado será arena, ya que esto permitirá detectar y corregir cualquier error posible con la ventaja de emplear un material de bajo precio. Mediante este modelo se probará el sistema con el que se pretende medir asentamientos o expansiones en el interior del mismo modelo. De los resultados de la prueba dependerá que el sistema se considere satisfactorio o no. El sistema de medición propuesto permitirá eliminar las siguientes deficiencias:

Desconocimiento de la distribución inicial del material por

capas.

Desconocimiento de sus variaciones durante la construcción y después de cada movimiento.

Si se solidifica y corta el modelo para estudiar su interior, no se puede continuar la prueba con el mismo.

La solidificación y el corte del modelo involucran materiales y equipo especial, y posiblemente la inutilización del material solidificado.

En el punto 5 se propone el ensaye de cuatro modelos, tres con una altura de 1 m y uno con 0.50 m.

10. RECONOCIMIENTO

La presente investigación fue desarrollada en forma conjunta por el Instituto de Ingeniería y el Centro de Investigación de Materiales de la UNAM. Participaron en ella los ingenieros Marco A. Córdova y Horacio Sandoval, y los señores Oscar Hernández y Antonio Villanuova, del Instituto de Ingeniería, el Quím. José Bellido y el Sr. Carlos A. Pastrana, del Centro de Investigación de Materiales.

Para el ensaye de materiales, se hizo uso de los laboratorios de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería y de la División de Estudios Superiores de la Facultad de Ingeniería.

El autor desea patentizar su agradecimiento a los ingenieros Jesús Alberro y Jorge Prince y al Dr. José A. Nieto por sus valiosos consejos para el desarrollo de este trabajo.

11. REFERENCIAS

1. R. W. Clough y D. Pirtz, "Earthquake Resistance of Rockfill Dams", Trans., ASCE, Vol 123 (1958)
2. J. V. Spietman, "Discussion of the Paper by Clough and Pirtz", Trans., ASCE, Vol 123 (1958), pp 813-814
3. J. I. Bustamante, "Dynamic Behavior of Non-Cohesive Embankment Models", Tesis Doctoral, Universidad de Illinois, Urbana (1964)
4. R. E. Goodman, "The Stability of Slopes in Cohesionless Materials during Earthquakes", Tesis Doctoral, Universidad de California, Berkeley (1963)
5. R. E. Davis y colaboradores, "Model Study of Stability of Portage Mountain Dam during Earthquakes", Berkeley (1960)
6. G. Oberti y E. Lалуetta, "Dynamic Tests on Models of Structures", Second World Conference on Earthquake Engineering, Japón (1960)
7. H. A. Sultan y H. B. Seed, "Stability of Sloping Core Earth Dams", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol 93, No SM4 (jul 1967)
8. H. B. Seed y H. A. Sultan, "Stability Analysis for a Sloping Core Embankment", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol 93, No SM4 (jul 1967)
9. H. L. Langhaar, "Dimensional Analysis and Theory of Models", John Wiley & Sons, Inc., Nueva York (1951)
10. G. Murphy, "Similitude in Engineering", The Ronald Press Co., Nueva York (1950)

11. P. W. Bridgeman, "Dimensional Analysis", Universidad de Yale (1931)
12. J. A. Nieto y J. A. Díaz, "Estudio del comportamiento dinámico de cortinas de enrocamiento mediante modelos de material deleznable", Informe preliminar, primera parte. Publicación 197, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D. F. (1968)
13. R. J. Marsal, "Investigación sobre el comportamiento de suelos granulares y muestras de enrocamiento", CFE, México, D. F. (1965)
14. R. J. Marsal, "Large Scale Testing of Rockfill Materials", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol 93, No SM2 (1967)
15. R. J. Marsal, "Comportamiento de suelos granulares", Curso Panamericano de Suelos, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas (1967)
16. R. J. Marsal y L. Ramírez de A., "Presa El Infiernillo. Observaciones en la cortina durante el periodo de construcción y primer llenado del embalse", CFE, México, D. F. (1965)

12. BIBLIOGRAFIA

1. J. L. Sherard, R. J. Woodward, S. F. Gizienski y W. A. Clevenger, "Earth and Earth-rock Dams", John Wiley & Sons, Inc., Nueva York (1963)
2. R. J. Marsal y D. Reséndiz, "Fundamentos del diseño y construcción de presas de tierra y enrocamiento", primera parte. Publicación No 130, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D. F. (1967)
3. K. Terzaghi y R. B. Peck, "Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley & Sons, Inc., Nueva York (1948)
4. D. W. Taylor, "Fundamentals of Soil Mechanics", John Wiley & Sons, Inc., Nueva York (1948)

5. A. W. Bishop y D. J. Henkel, "The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test", Edward Arnold (1964)
6. K. G. Stagg y D. C. Zienkiewicz, "Rock Mechanics in Engineering Practice", John Wiley & Sons, Inc., Londres, Nueva York, Sydney
7. I. W. Farmer, "Engineering Properties of Rocks", E. y F. N. Spon Ltd, Londres (1968)
8. L. Obert y W. I. Duvall, "Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock", John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, Londres, Sydney

TABLA 1

RESUMEN DE RELACIONES DE SIMILITUD



| No. | Variable | Símbolo | Prototipo | Modelo | Escala | Unidades |
|-----|-------------------------------|------------------|-----------|---------|-----------------|--------------------|
| 1 | Longitud | l | 140 | 1 | $\lambda = 140$ | m |
| 2 | Esfuerzo* | R | 1 | 0.013 | $\xi = 77$ | kg/cm ² |
| 3 | Peso volumétrico ⁺ | γ | 2.6 | 4.75 | $\rho = 0.55$ | ton/m ³ |
| 4 | Tiempo | t | 1 | 0.0847 | $\tau = 11.8$ | seg |
| 5 | Velocidad | v | 1 | 0.0847 | 11.8 | m/seg |
| 6 | Aceleración | a | 1 | 1 | 1 | m/seg ² |
| | Aceleración gravitacional | g | 1 | 1 | 1 | m/seg ² |
| 7 | Velocidad de deformación | $\dot{\epsilon}$ | 1 | 0.0847 | 11.8 | cm/seg |
| 8 | Desplazamiento | d | 1 | 0.00714 | 140 | cm |
| 9 | Peso volumétrico* | γ_m | 1.85 | 3.05 | 0.55 | ton/m ³ |
| 10 | Angulo de fricción* | ϕ | 1 | 1 | 1 | grados |
| 11 | Indice de rotura* | B | 1 | 1 | 1 | % |
| 12 | Frecuencia | f | 1 | 11.8 | 0.0847 | cps |

* de material granular

+ de especímenes cilíndricos sólidos

MATERIAL DELEZNABLE - PRUEBAS TRIAXIALES, ESPECIMENES EN ESTADO SECO DE 3.5 CM DE DIAMETRO, PRESIONES CONFINANTES DE 0.016 A 0.3 kg/cm².
RESULTADOS

| Prueba No. | 30 | 31 | 32 | 34 |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| peso volumétrico, en ton/m ³ (γ_m) | 3.36 | 3.37 | 3.42 | 3.35 |
| relación de vacíos (e) | 0.74 | 0.73 | 0.70 | 0.725 |
| σ_3 en kg/cm ² | 0.10 (77) (7.7) | 0.20 (77) 15.4 | 0.30 (77) 23.1 | 0.016 (77) 1.23 |
| esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) máx, en kg/cm ² | 0.420 (77) 32.4 | 0.615 (77) 47.4 | 0.828 (77) 63.8 | 0.129 (77) 10.0 |
| (σ_1) máx, en kg/cm ² | 0.520 (77) 40.04 | 0.815 (77) 62.75 | 1.128 (77) 86.85 | 0.145 (77) 11.16 |
| (σ_1 / σ_3) máx | 5.2 | 4.07 | 3.76 | 9.06 |
| ϕ al origen | 42.7° | 37.3° | 35.4° | 53.2° |
| deformación axial unitaria en la falla (ϵ_2) f, en porcentaje | 14 | 14 | 14 | 14 |
| rotura de granos (B), en porcentaje | 11.06 | 13.21 | 24.8 | 12.80 |

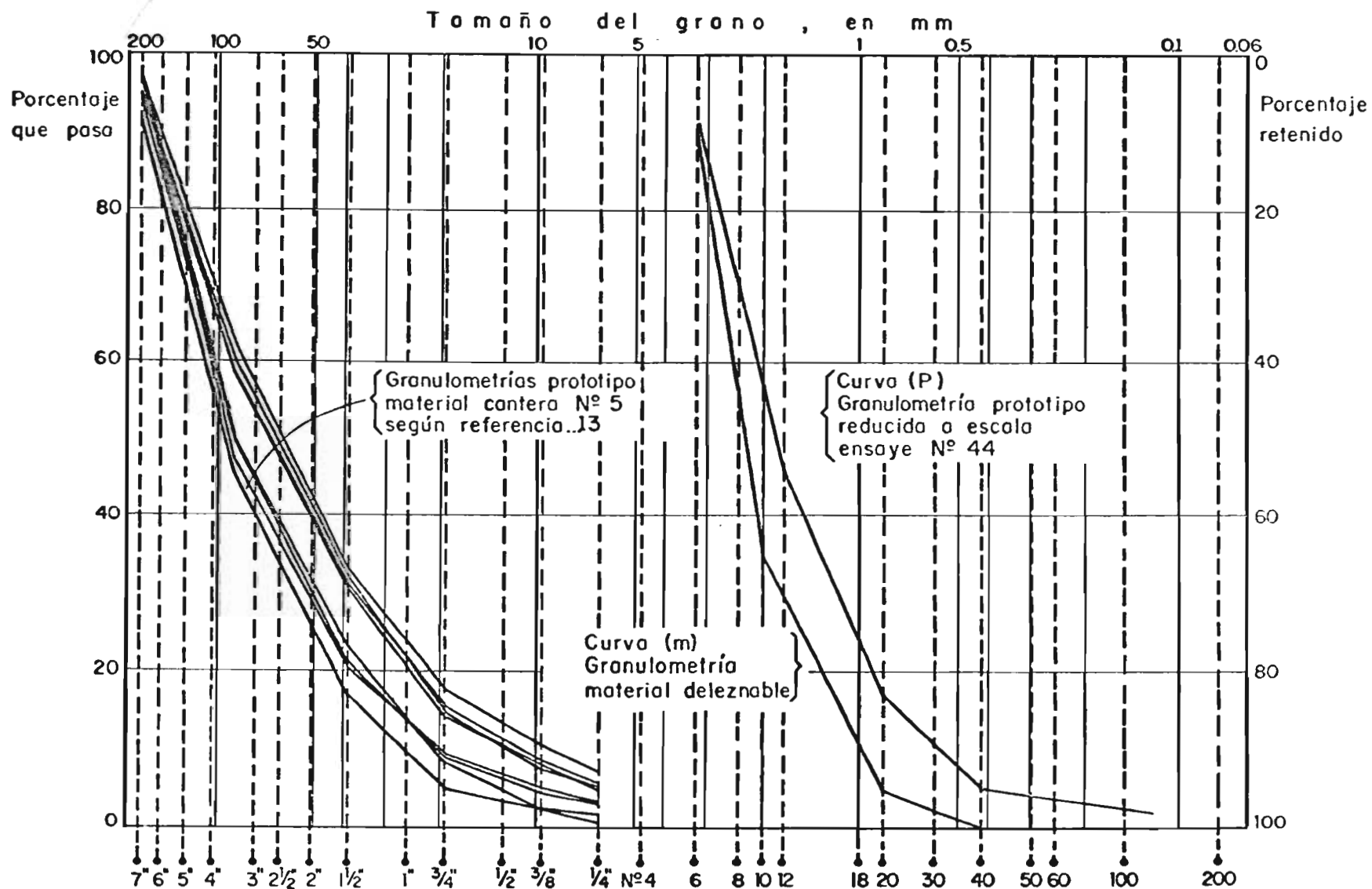


Fig 1 Granulometrías iniciales

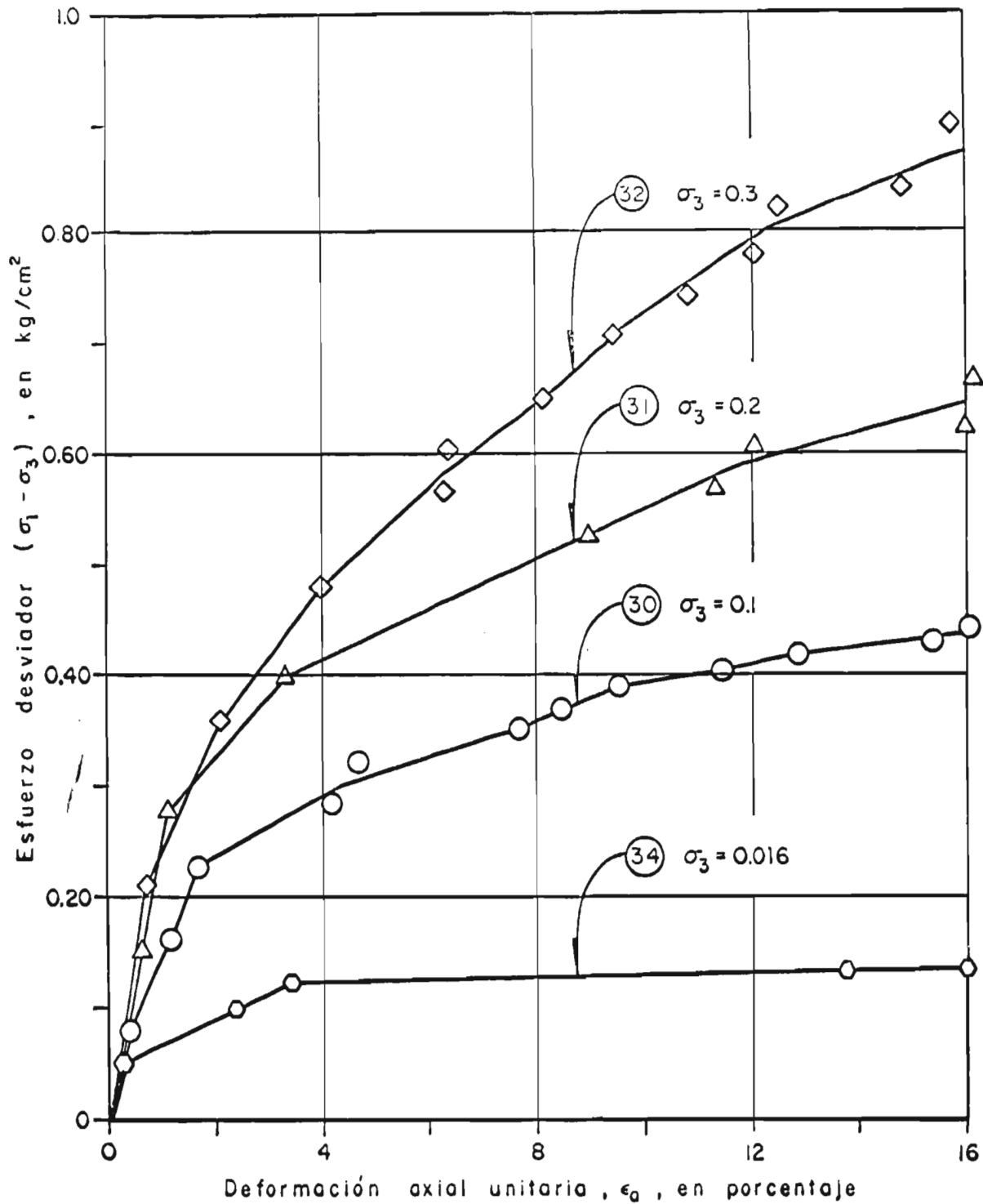


Fig 2 Diagramas esfuerzo—deformación
Pruebas triaxiales, material deleznable

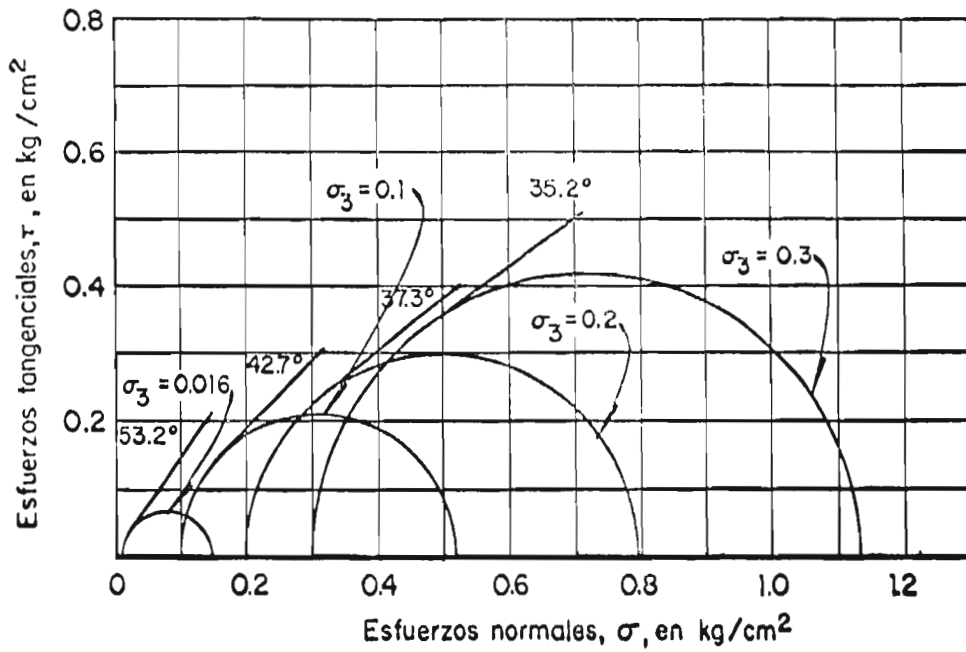


Fig 3 Círculos de Mohr
Pruebas triaxiales, material deleznable

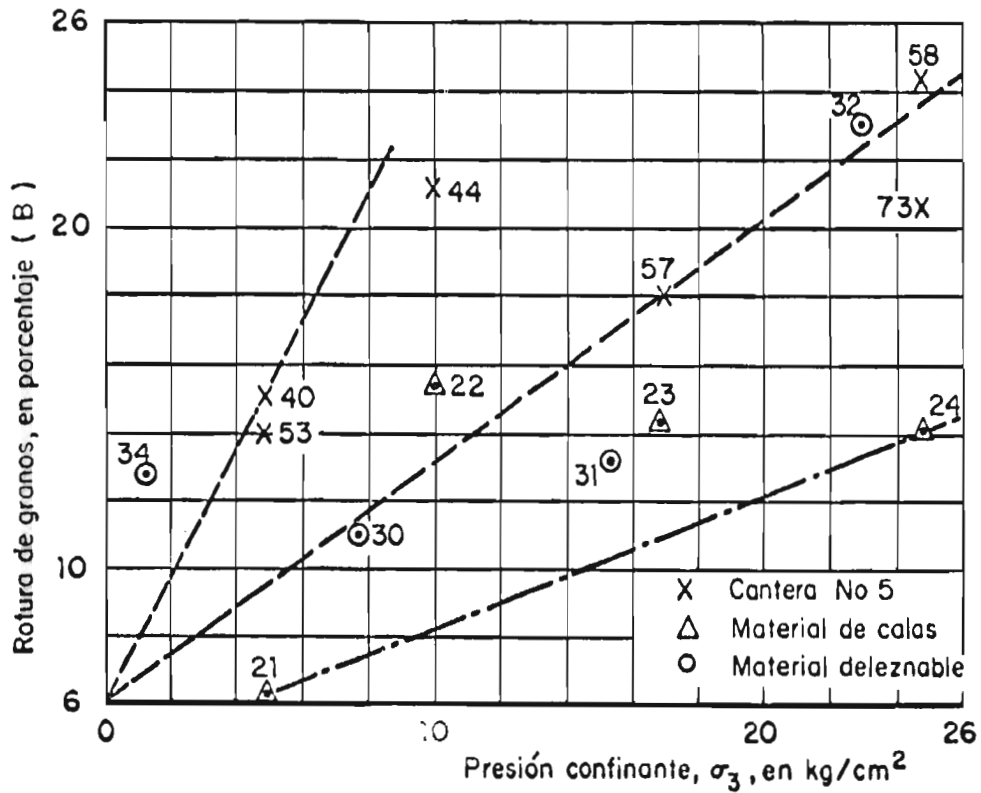


Fig 4 Rotura de granos, presión confinante
Pruebas triaxiales

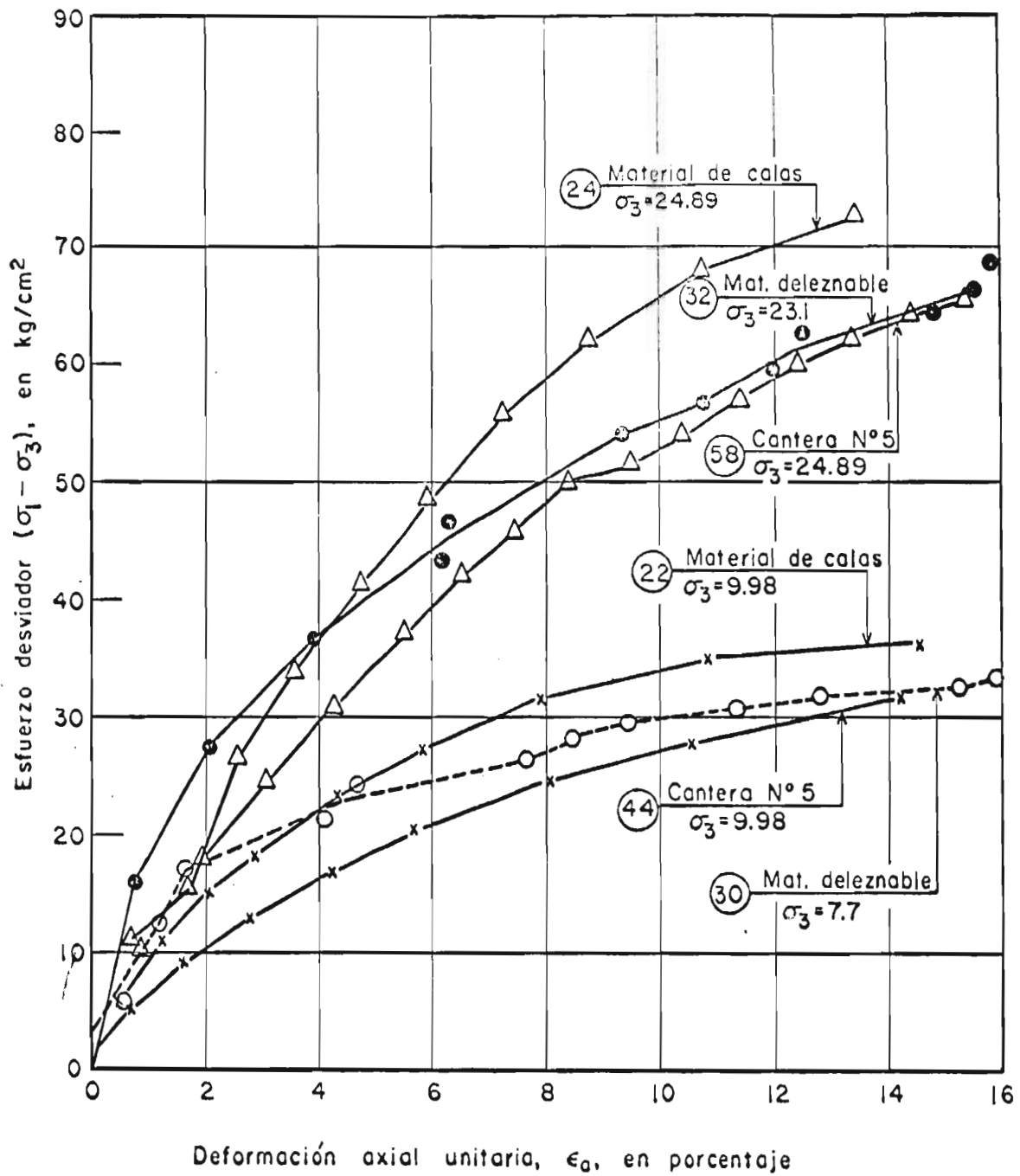


Fig 5 Comparación de curvas esfuerzo-deformación, para diferentes presiones confinantes

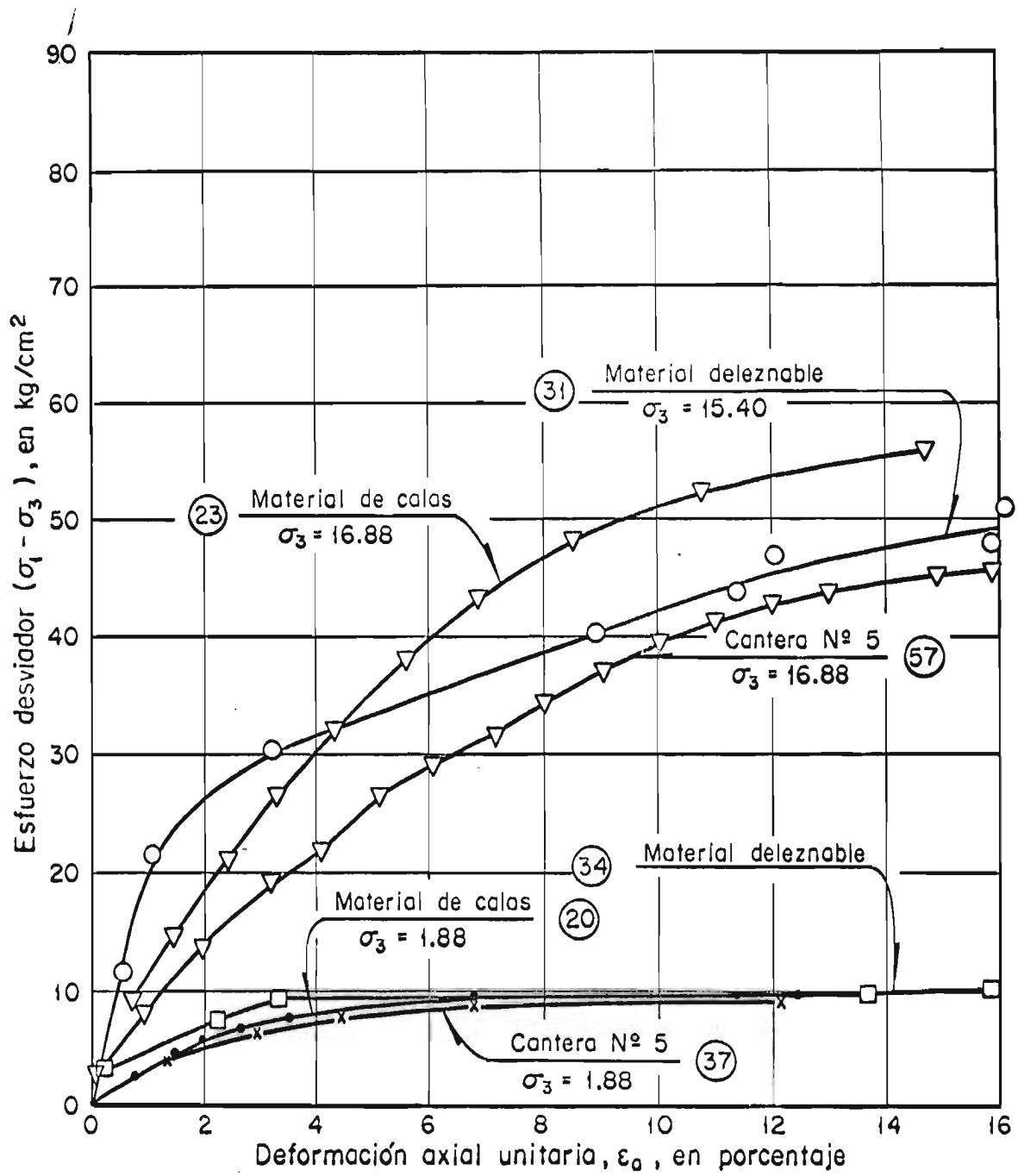
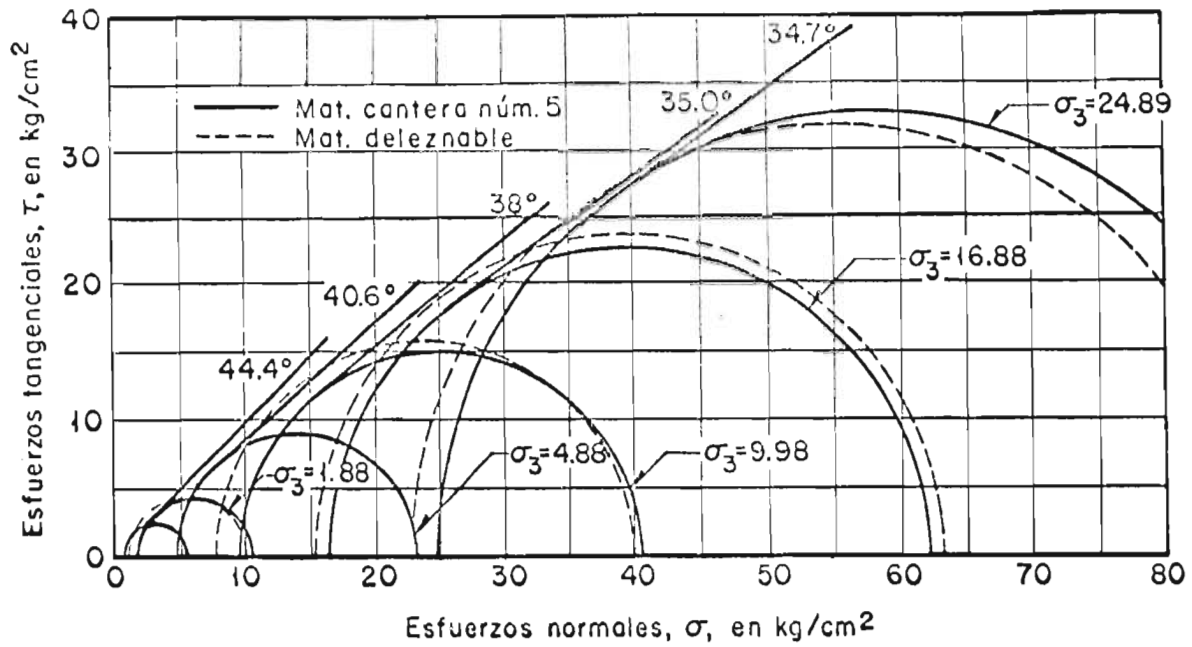
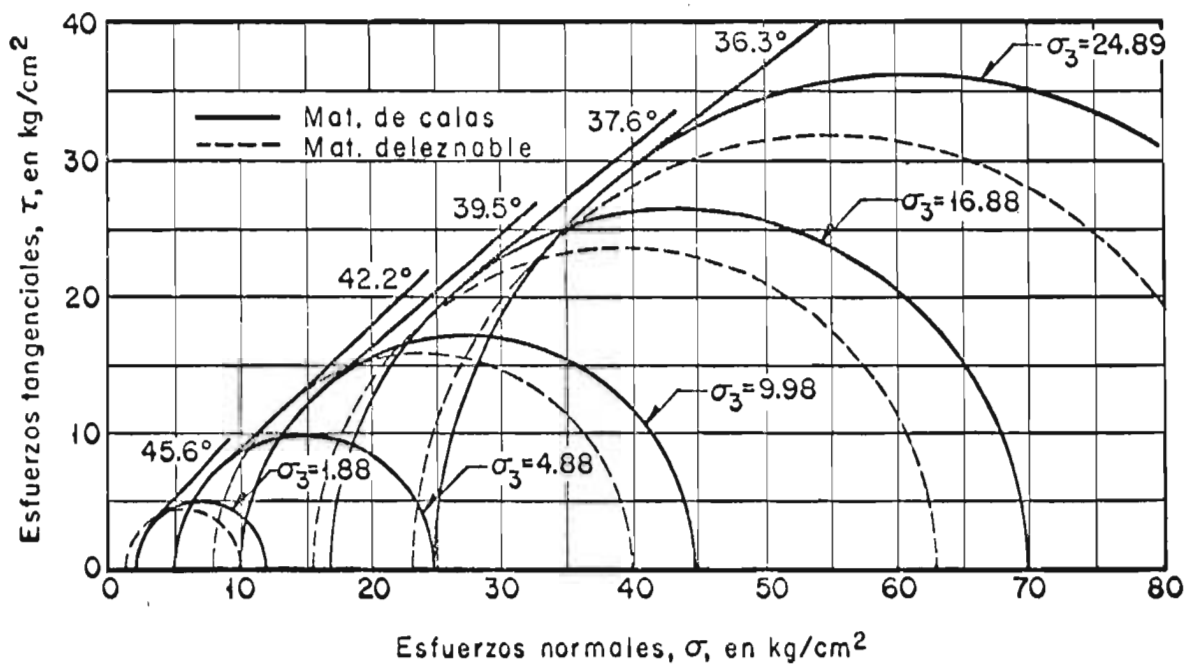


Fig 5 (Continuación)

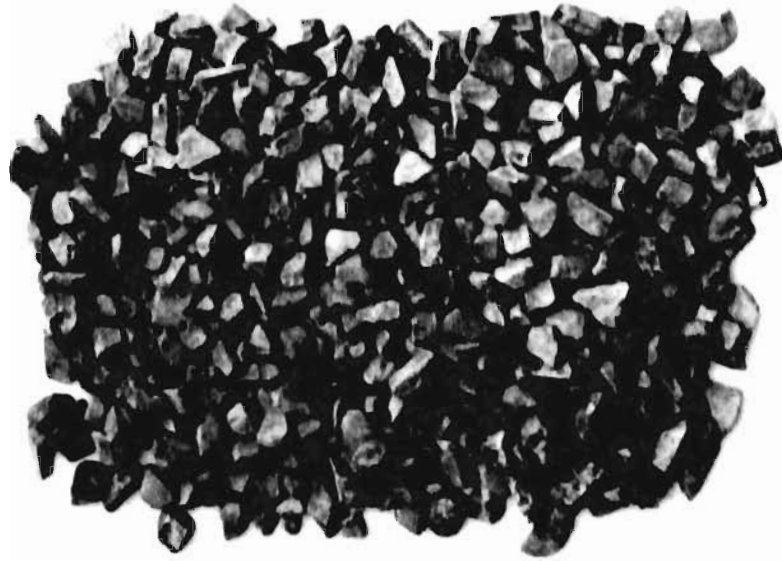


a. Material deleznable vs material de cantera No 5



b. Material deleznable vs material de calas

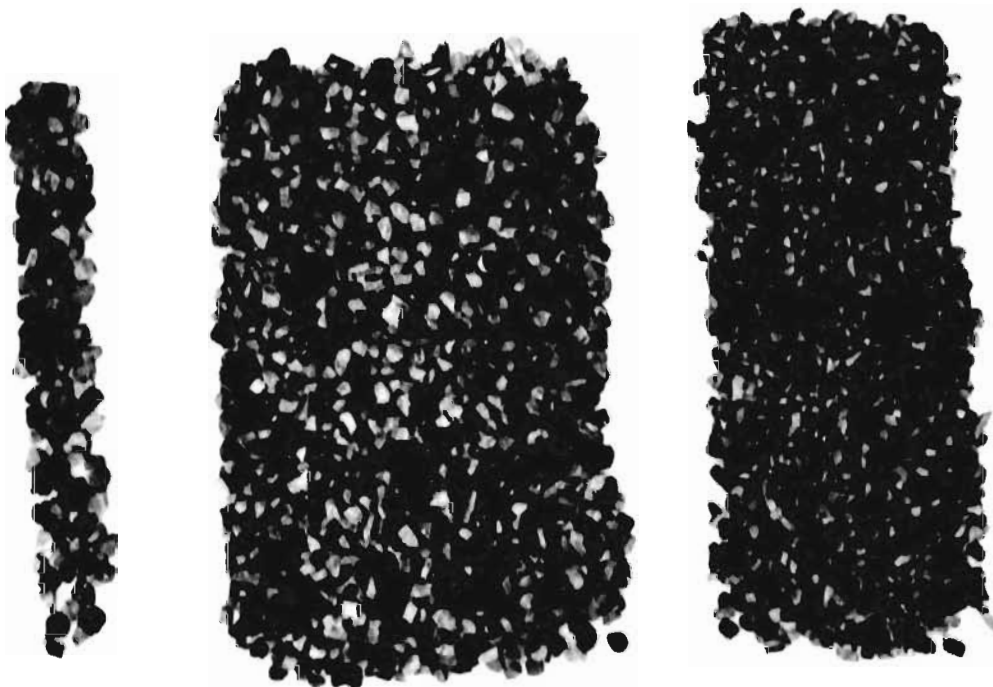
Fig 6 Comparación de círculos de Mohr



a) Material original antes de la prueba.

Fig 7 ROTURA DE GRANOS EN PRUEBA TRIAXIAL

b) Material fracturado después de la prueba.





c) Material fracturado después de la prueba.

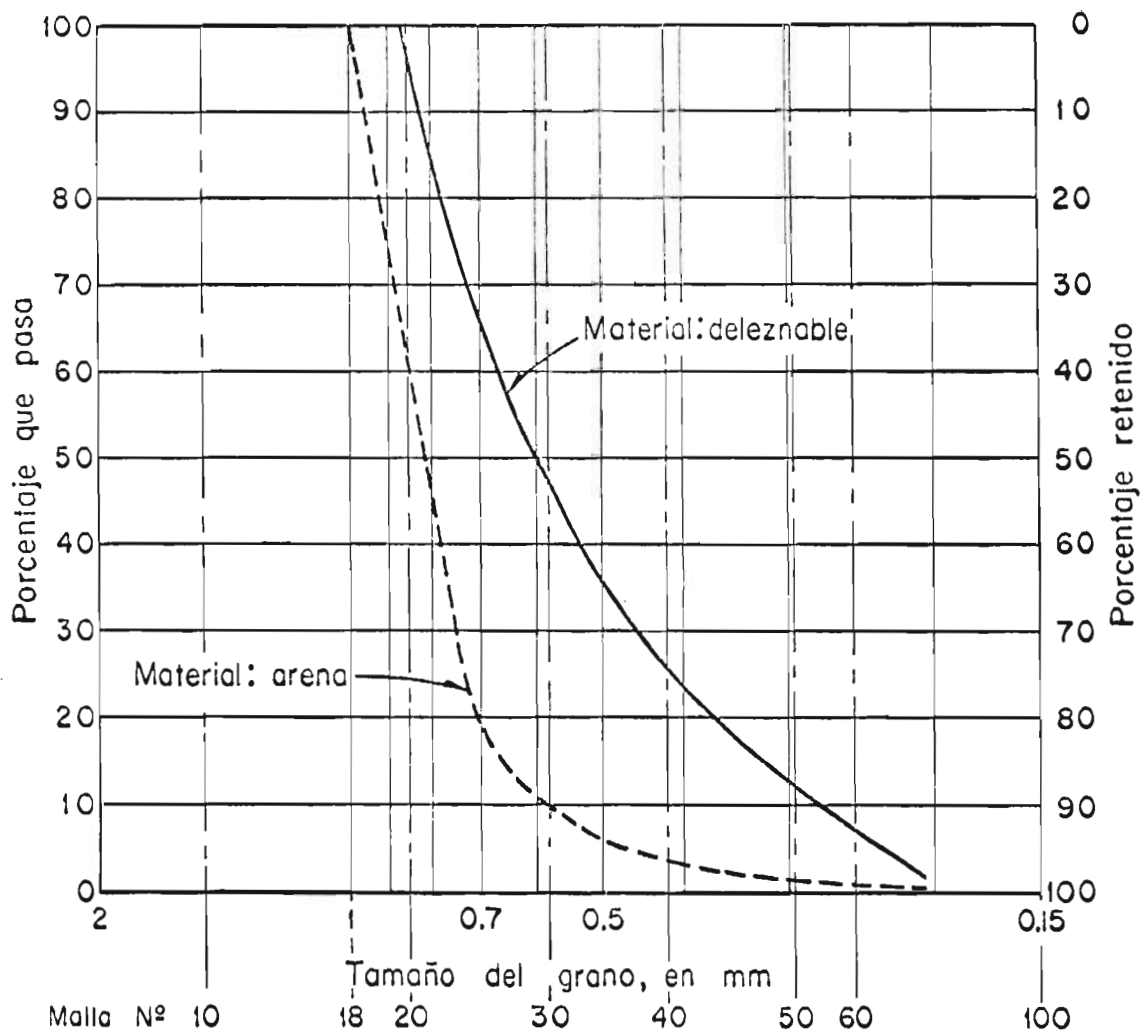


Fig 8 Granulometrías de los materiales utilizados en modelos preliminares

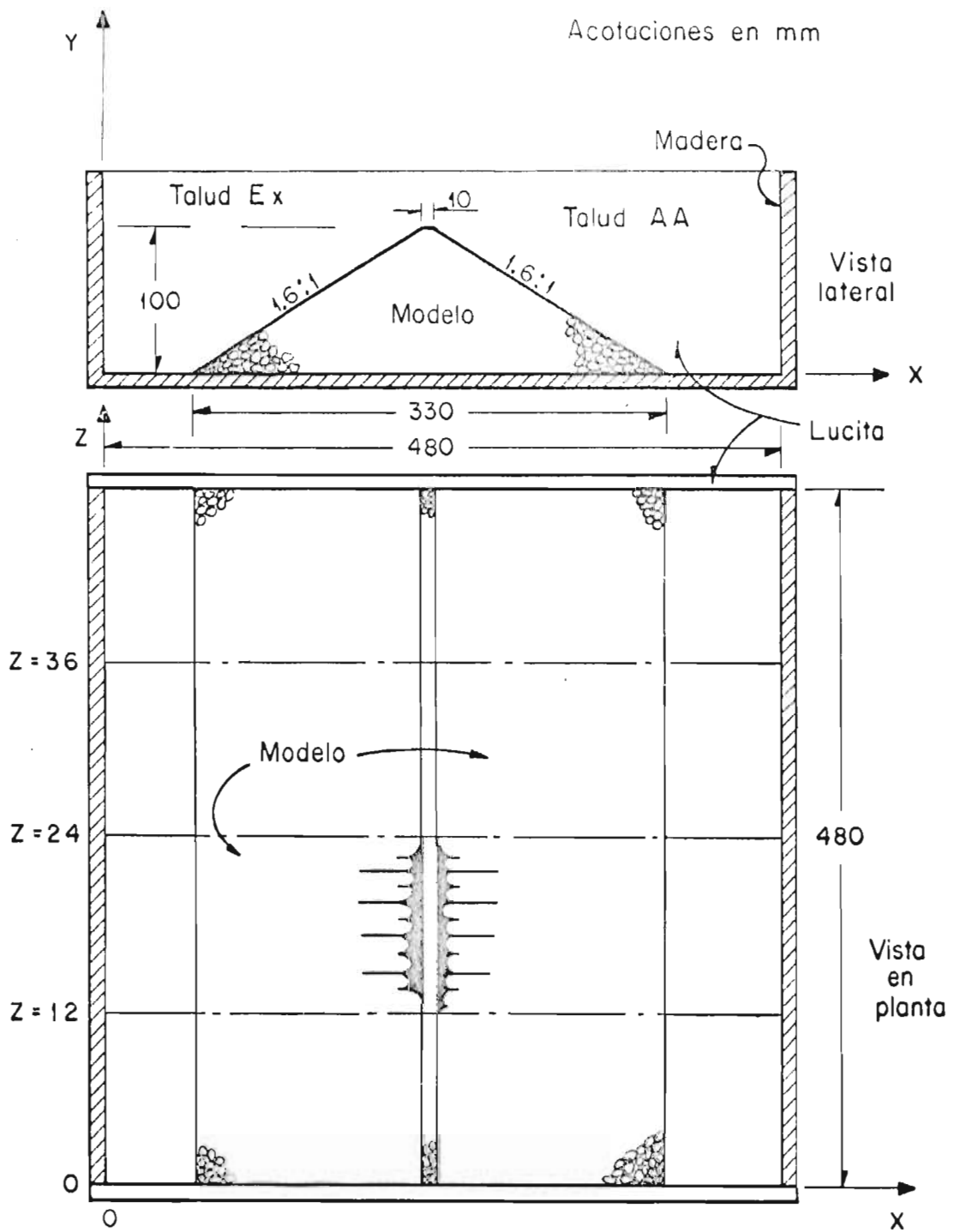


Fig 9 Geometría de los modelos preliminares



Fig 10 Preparación de los modelos preliminares



Fig 11 Aspecto general del sistema de excitación

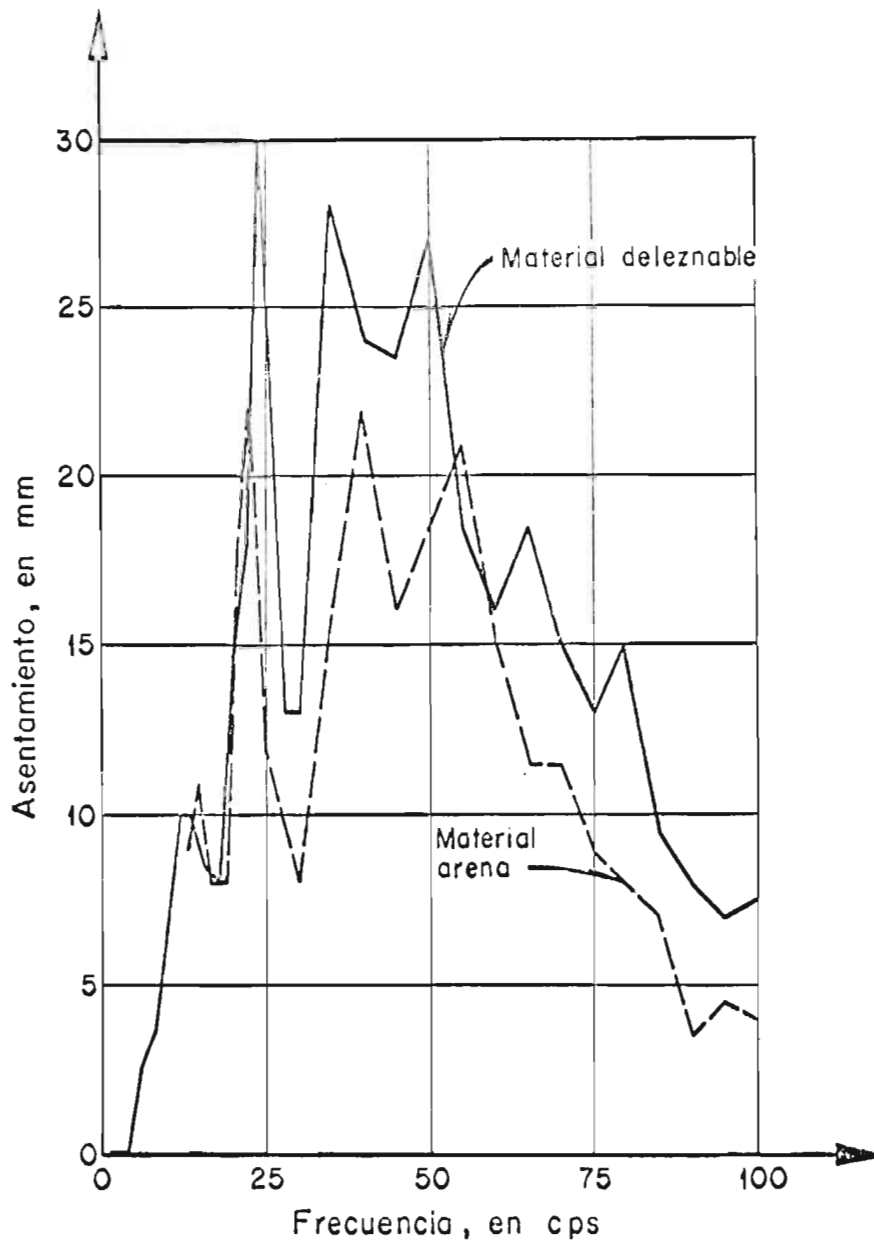


Fig 12 Densificación en recipiente graduado, mediante vibración armónica horizontal



Fig 13 Detalle del sistema de medición

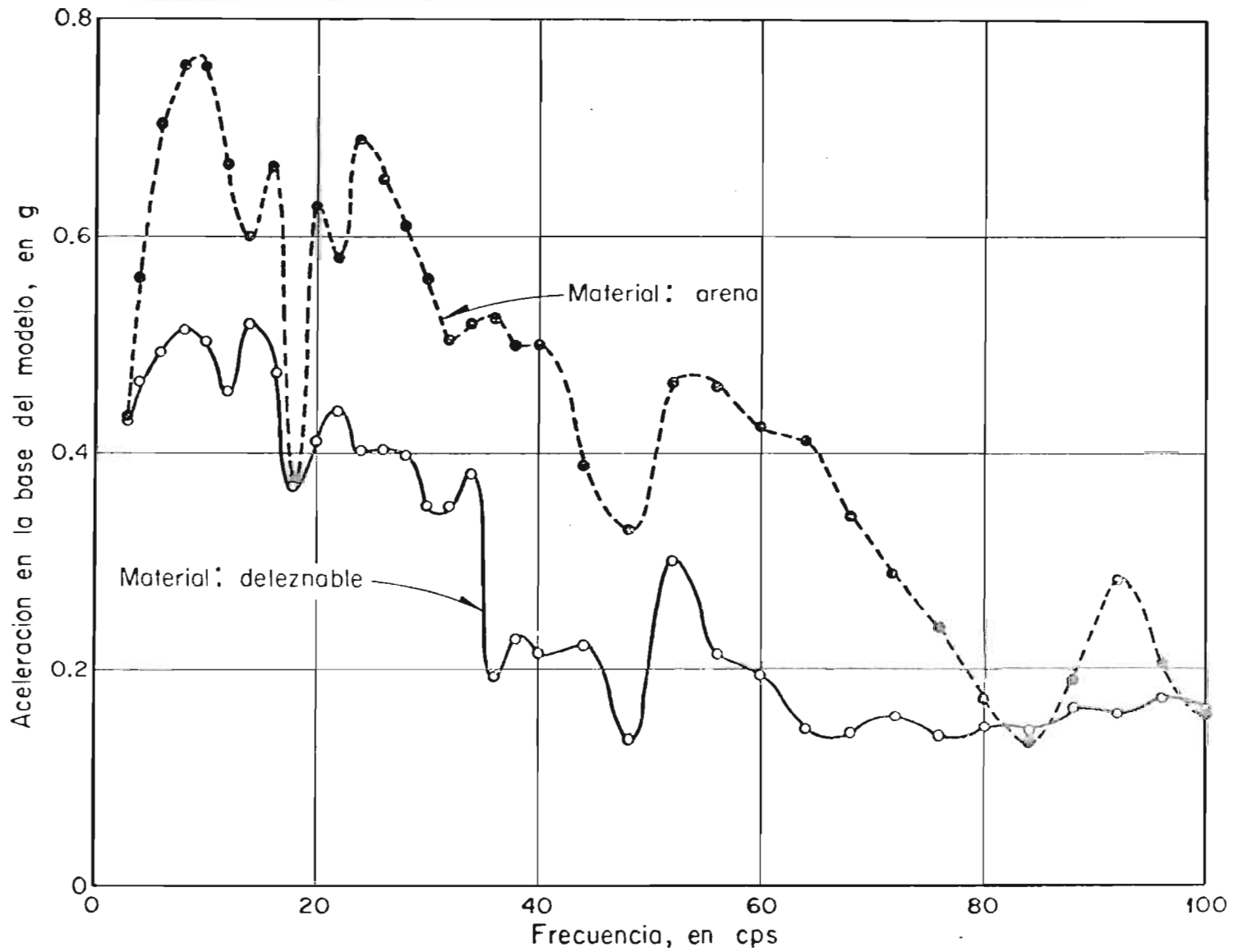


Fig 14 Determinación de frecuencias resonantes en modelos preliminares

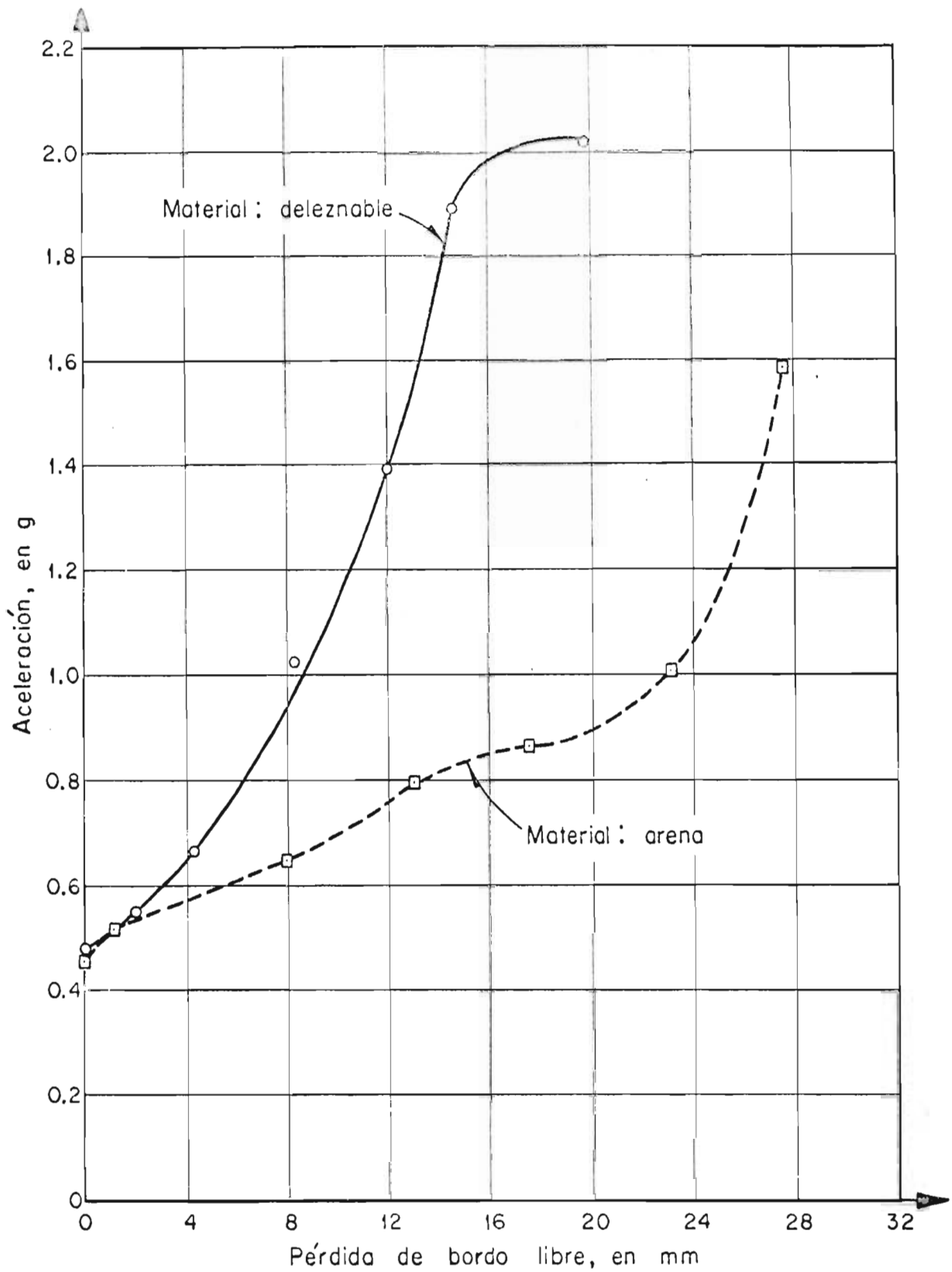


Fig 15 Pérdida de bordo libre en pruebas a la falla Modelos preliminares

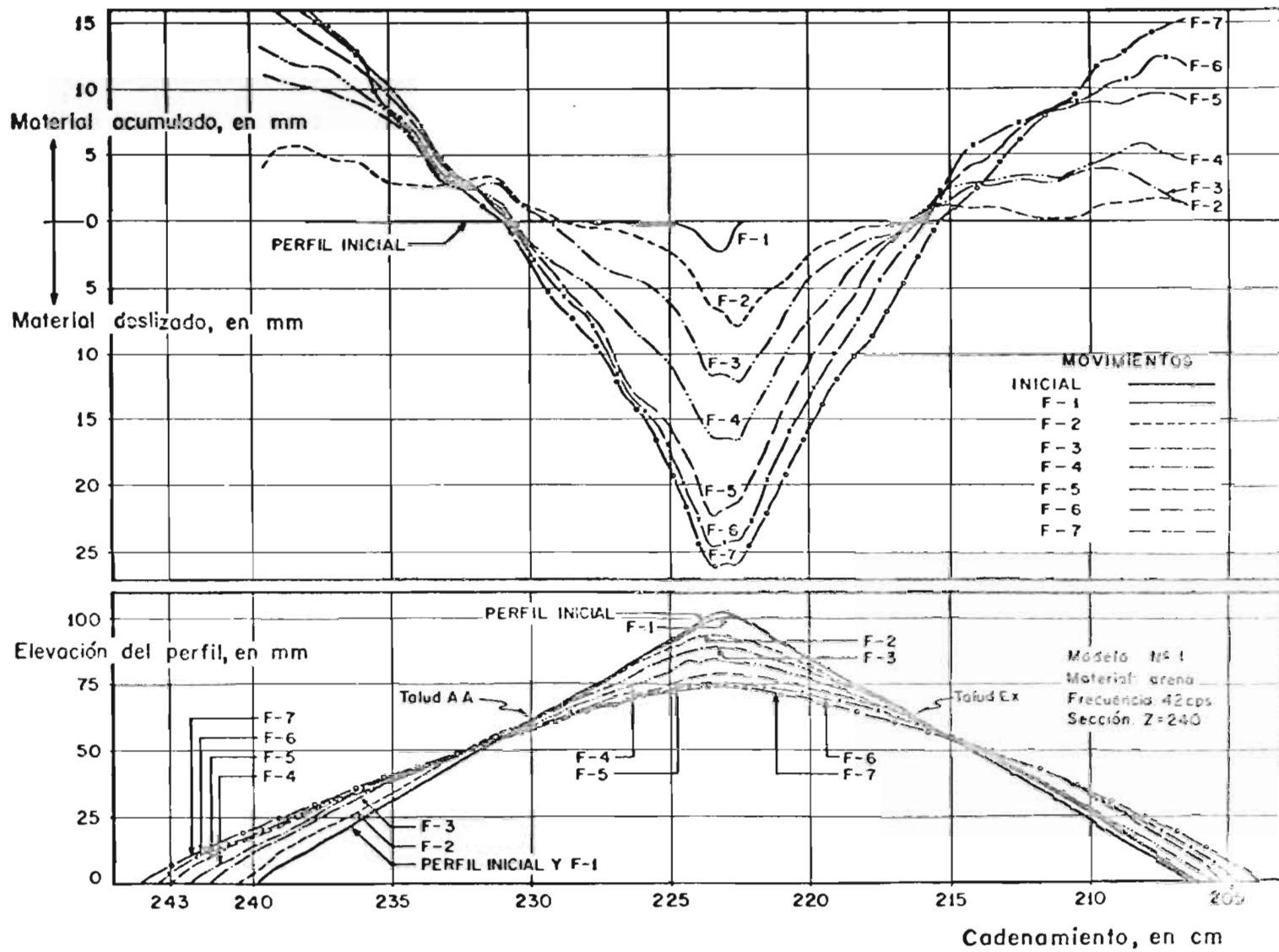


Fig 16 Variación del perfil durante la prueba dinámica
Modelo de arena

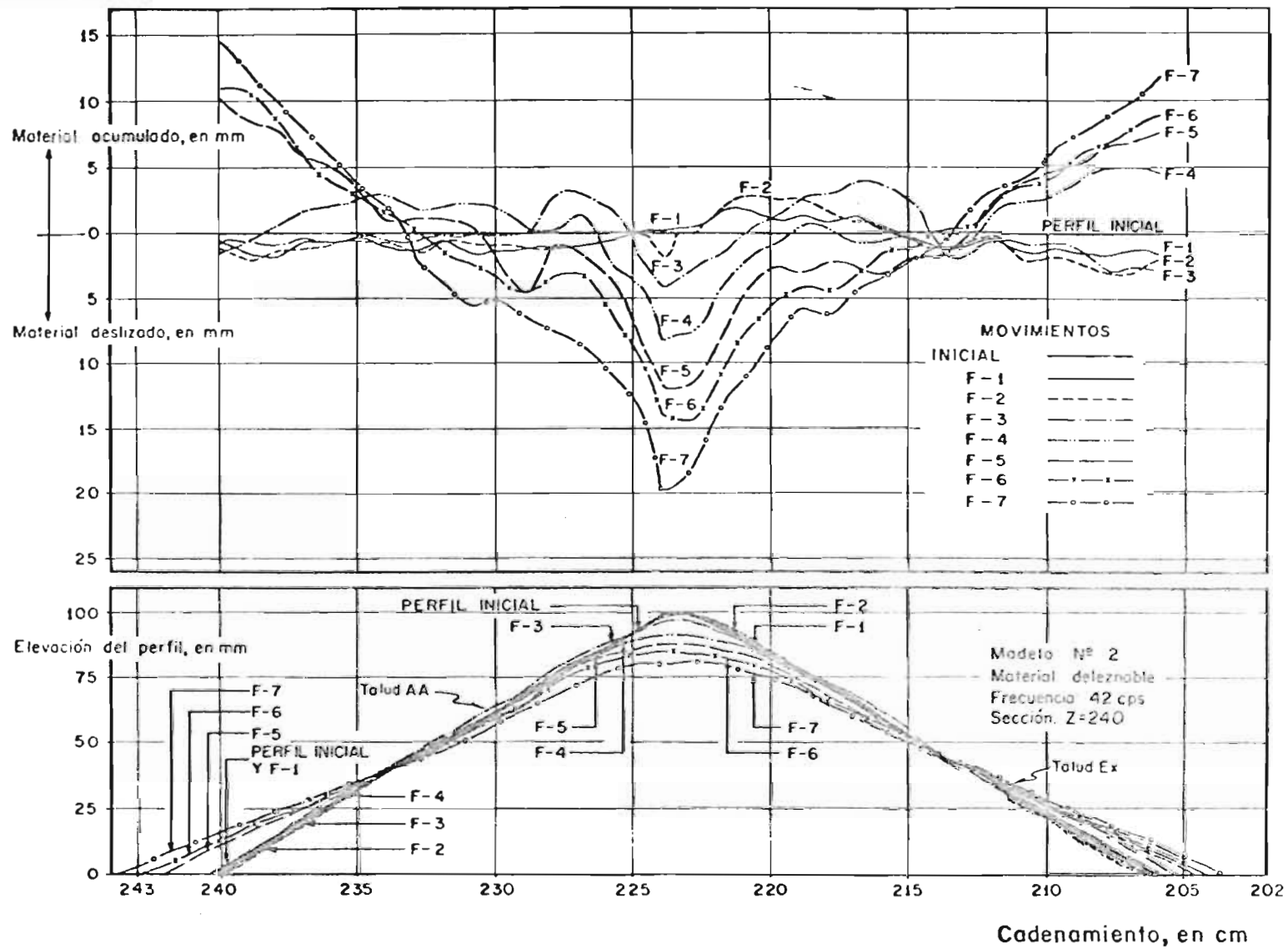


Fig 17 Variación del perfil durante la prueba dinámica
Modelo de material deleznable

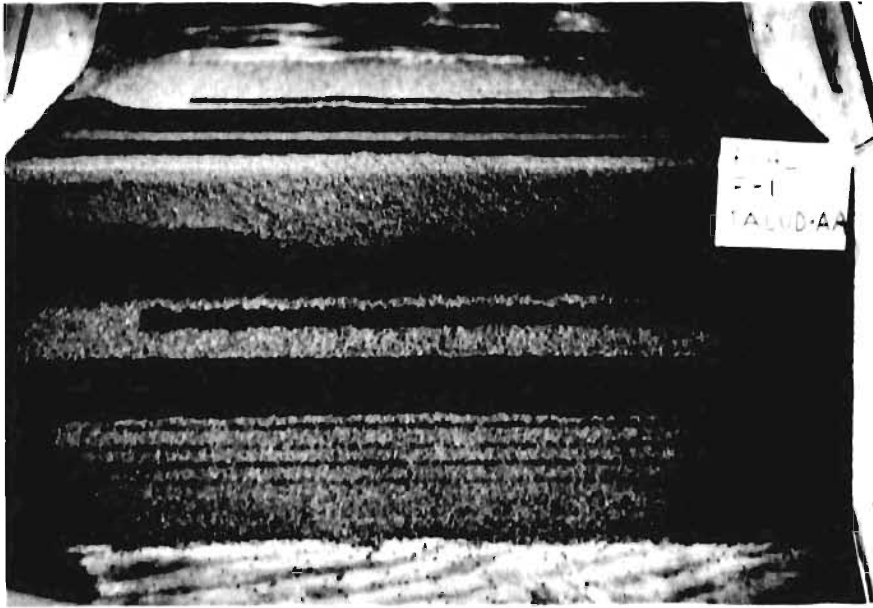
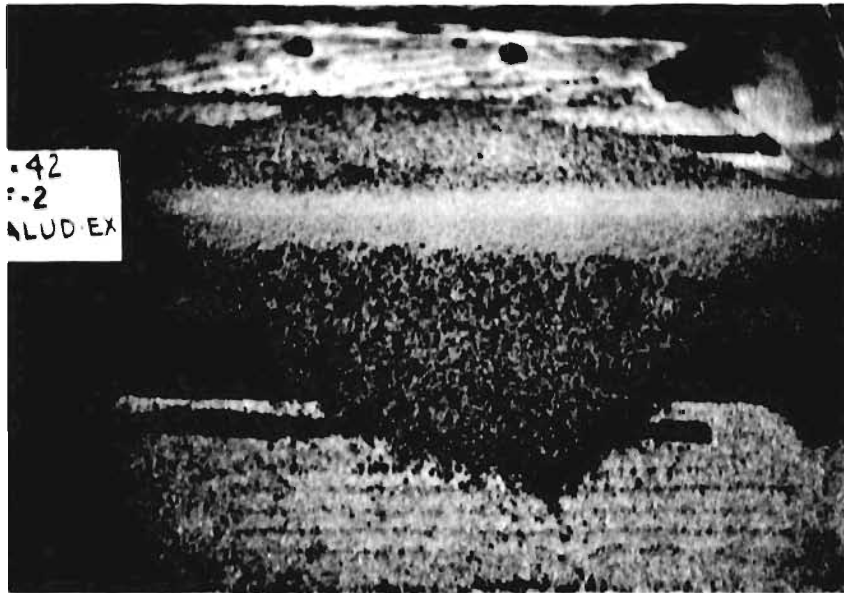


Fig 18

DIVERSOS ASPECTOS DE LA PRUEBA DINAMICA EN UN MODELO DE ARENA.

a) Principio de la falla.



b) Falla generalizada.

c) Sección extrema al final de la prueba



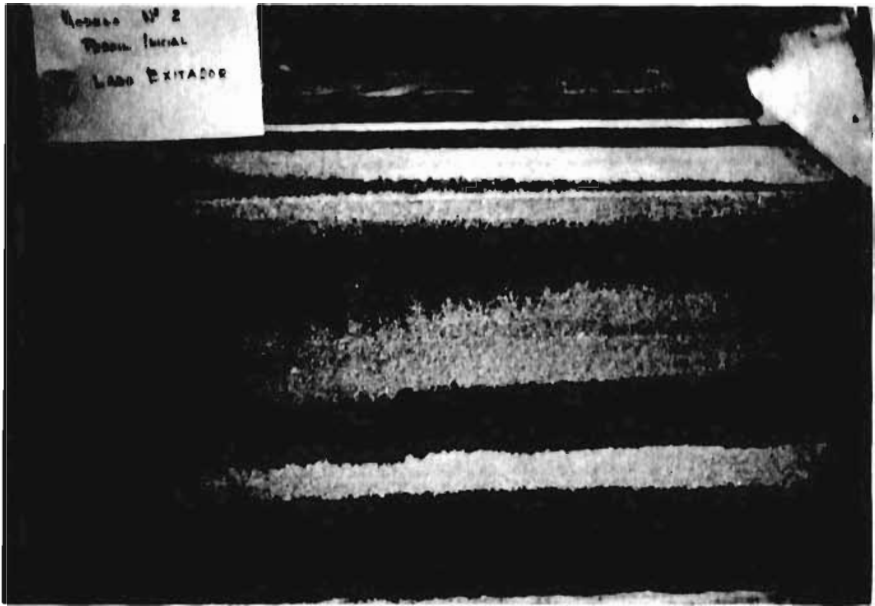
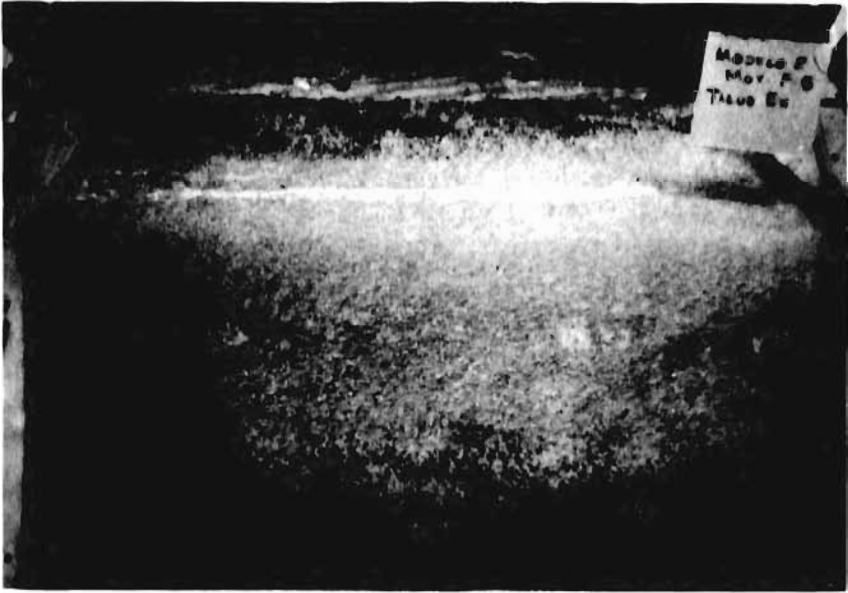


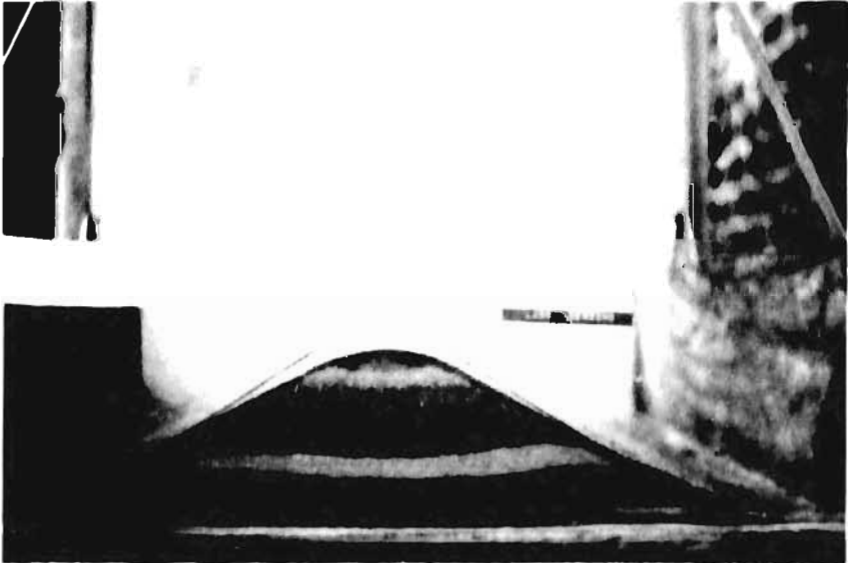
Fig 19

DIVERSOS ASPECTOS DE LA PRUEBA DINAMICA EN UN MODELO DE MATERIAL DELEZNABLE.

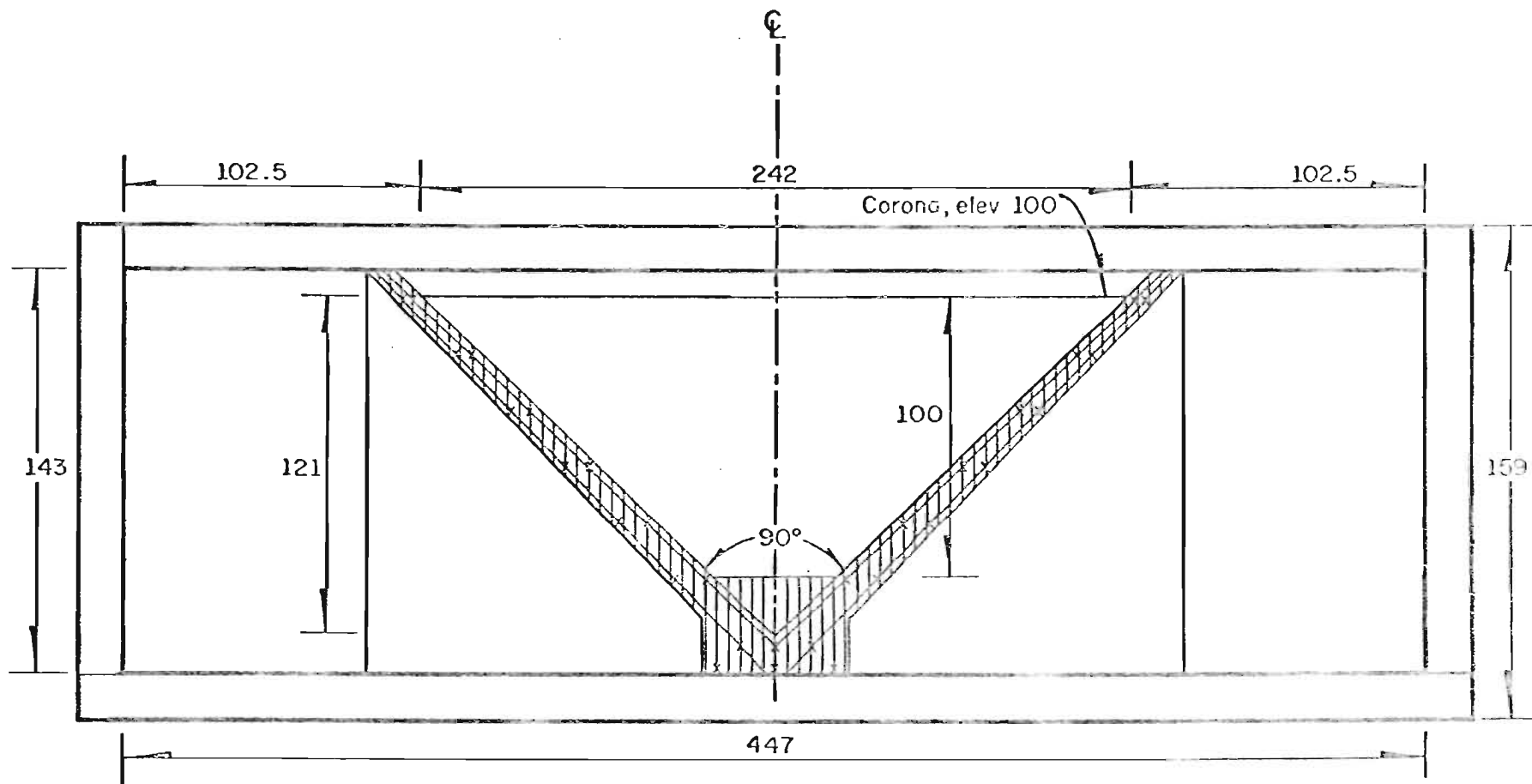
a) Iniciación de la falla.
Rodamiento de granos.



b) Falla generalizada. Rotura de granos y superficie de falla



c) Sección extrema.



Esc 1:20

Fig 20 Boquilla propuesta para modelos principales