



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ACTUALIZACIÓN DEL SISTEMA DE APLICACIÓN
DE CARGAS DEL CUBO TRIAXIAL CT-65-100**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

P R E S E N T A :

DAVID SOLIS VILLALOBOS

TUTOR:

Dr. JUAN MANUEL MAYORAL VILLA



MÉXICO, D. F. MAYO DE 2010



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dr. MIGUEL PEDRO ROMO ORGANISTA
Secretario:	Dr. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO
Vocal:	Dr. JUAN MANUEL MAYORAL VILLA
1 ^{er} . Suplente:	M.I. AGUSTÍN DEMÉNEGUI COLINA
2 ^{do} . Suplente:	Dr. OSVALDO FLORES CASTRELLÓN

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. JUAN MANUEL MAYORAL VILLA

AGRADECIMIENTOS

A mis padres.

Al Instituto de Ingeniería, UNAM, que me brindo todas las facilidades para la realización de este trabajo de tesis.

Al CONACYT que me otorgó la beca para realizar los estudios de maestría.

A todas las personas que directa o indirectamente estuvieron involucradas en la elaboración de esta tesis.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	i
INTRODUCCIÓN	ii
OBJETIVO	iii
ALCANCES	iii
ANTECEDENTES DE CÁMARAS TRIAXIALES CONVENCIONALES Y CUBOS TRIAXIALES	1
1.1 CÁMARAS TRIAXIALES CONVENCIONALES	1
1.2 CUBOS TRIAXIALES	2
1.2.1 USO ACTUAL DE LOS CUBOS TRIAXIALES	3
1.2.2 CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS CUBOS TRIAXIALES	3
1.3 INFLUENCIA DEL ESFUERZO PRINCIPAL INTERMEDIO EN LA RESISTENCIA DE LOS SUELOS	7
2.4 TABLA RESUMEN DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS APARATOS DE LABORATORIO ANALIZADOS	10
ESTADO ACTUAL DEL CUBO TRIAXIAL: VENTAJAS Y LIMITACIONES.	12
2.1 EMPLEO DE 3 CELDAS DE HULE	14
2.2 EMPLEO DE 3 JUEGOS DE CELDAS TIPO FREYSSINET	15
2.2.1 MEDICIÓN DE LOS ESFUERZOS	17
2.2.2 MEDICIÓN DE LAS DEFORMACIONES	18
2.2.3 LA FRICCIÓN EN LAS CARAS DEL CUBO	18
2.3 EMPLEO DE 6 JUEGOS DE CELDAS TIPO FREYSSINET	19
2.4 CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS REALIZADAS CON LOS SISTEMAS DE ACTUADORES DE TIPO FLEXIBLE	22

ANÁLISIS DE UN NUEVO SISTEMA DE ACTUADORES, PARA LA APLICACIÓN DE CARGAS EN EL CUBO TRIAXIAL DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM	23
3.1 MODELACIONES NUMÉRICAS	25
3.1.1 CALIBRACIÓN DEL SOFTWARE UTILIZADO	29
3.1.3 RESULTADOS DE LAS MODELACIONES	33
3.2 CONCLUSIONES DE LAS MODELACIONES REALIZADAS	52
APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO PARA DETERMINAR LA DEFORMABILIDAD DE ENROCAMIENTOS	53
4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ESTUDIOS REALIZADOS EN LA PRESA EL CARACOL	53
4.2 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS IN SITU CONTRA LAS MODELACIONES NUMÉRICAS	57
CONCLUSIONES	59
REFERENCIAS	61
ANEXOS	64

RESUMEN

Uno de los objetivos de la Ingeniería Geotécnica, es caracterizar fielmente las propiedades de los materiales in situ, con ello en mente, se han desarrollado aparatos de laboratorio en los cuales se varía la magnitud de los tres esfuerzos principales de forma independiente, estos reciben el nombre de cubos triaxiales. En esta tesis se describen las principales características y tipos de cubos triaxiales, entre ellas, los sistemas de aplicación de cargas que emplean asimismo, se contrastan sus ventajas y desventajas con respecto a las cámaras triaxiales convencionales, ya que muchas de las relaciones constitutivas de la ingeniería geotécnica se obtienen de ensayos realizados en ellas.

En este trabajo también se detalla el proceso de desarrollo del cubo triaxial diseñado por el profesor Raúl J. Marsal en 1973, el tipo de celdas para la aplicación de cargas que se han utilizado y sus distintas configuraciones, además de la forma en que se han medido los esfuerzos y deformaciones de la muestra analizada. Al final de esta parte se mencionan las conclusiones a las que llegaron antes de abandonar el proyecto.

Dicho aparato de laboratorio se encuentra actualmente en el laboratorio de enrocamientos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, y se desea actualizar su sistema de aplicación de cargas.

Una opción es emplear un grupo de gatos hidráulicos, a los cuales se les colocará en la parte frontal una placa de acero de sección cuadrada, con el objetivo de transmitir los esfuerzos a la muestra. Sin embargo, con el fin de evitar que dos placas contiguas interfieran entre si al desplazarse, se tendrá que dejar una separación entre ellas, lo cual ocasionará que estas no cubran la superficie total de las caras de la muestra. Ello generará una falta de uniformidad en los esfuerzos en las aristas del material ensayado, lo cual puede comprometer la calidad de los resultados obtenidos en las pruebas.

Por esa razón se debe evaluar el cambio en la distribución de esfuerzos dentro de la muestra, debido a la reducción del área de las placas con que se aplicarán los esfuerzos, con relación al área de las caras de la probeta. Con esto en mente, se desarrolló un modelo numérico en el cual se simula el sistema de actuadores propuesto. Para ello se emplearon dos softwares, uno de elemento finito (Plaxis 2D) y uno de diferencias finitas (FLAC 3D).

Como primer paso, se calibraron los programas de computación en base a soluciones analíticas conocidas, como son la teoría de distribución de esfuerzos para la aplicación de una carga lineal de longitud infinita, en un medio semi-infinito, isótropo y homogéneo de Boussinesq y la distribución de esfuerzos bajo una carga circular en un medio semi-infinito, isótropo y homogéneo, también de Boussinesq.

Posteriormente se evaluó la presión de contacto entre actuadores y muestra, tomando en cuenta la rigidez de las placas con que se aplicarán los esfuerzos. Estos análisis se contrastaron con la teoría de distribución de esfuerzos bajo una placa infinitamente rígida, en un medio semi-infinito, isótropo y homogéneo de Boussinesq. A continuación se generó un modelo numérico en el cual se incluyen los seis actuadores y la muestra.

Finalmente, para determinar si utilizando el sistema de actuadores propuesto para el cubo triaxial del Instituto de ingeniería de la UNAM se podrá predecir el comportamiento mecánico de los materiales en campo, se llevó a cabo una comparación entre la deformabilidad (medida in situ) de los materiales de la presa "El Caracol" (Alberro *et al*, 1998), con los datos que arroja el modelo numérico.

INTRODUCCIÓN

En 1973, el Profesor Raúl J. Marsal desarrolló un cubo triaxial en el Instituto de ingeniería de la UNAM, con objeto de evaluar las características esfuerzo-deformación de materiales representativos en la construcción de presas de enrocamiento, bajo un estado de esfuerzos tridimensional. En él se han utilizado diversos métodos para la aplicación de los esfuerzos, el primer sistema de cargas empleado fue un grupo de celdas de hule, sin embargo éstas fallaron repetidamente debido a la penetración del material granular del cual estaba conformada la probeta. Después se cambiaron por celdas tipo Freyssinet, las cuales consisten en un par de láminas soldadas perimetralmente, en la cámara que se forma, se les inyecta aceite a presión. Con ellas se realizaron diversos ciclos de pruebas, a lo largo de estos se cambió varias veces tanto su tamaño como la configuración en que se colocaban, pero no se encontró reproductibilidad en los resultados de los ensayos. Por esta razón se abandonó el proyecto.

En la investigación bibliográfica realizada durante esta tesis, se concluyó que los cubos triaxiales pueden dividirse en tres grupos, de acuerdo al sistema de actuadores con que se aplican las cargas. Estos pueden ser de tipo flexible, de tipo rígido, o una combinación de actuadores rígidos y flexibles.

En el cubo triaxial del instituto de Ingeniería de la UNAM, se han empleado actuadores de tipo flexible sin resultados satisfactorios y según algunos investigadores que han trabajado con cubos triaxiales (Sture y Desai, 1979), utilizar una combinación de actuadores, rígidos y flexibles, trae como consecuencia una falta de uniformidad en los esfuerzos dentro de la muestra, lo que resulta comúnmente en una falla prematura del espécimen.

Actualmente se contempla el uso de actuadores de tipo rígido, una opción es emplear un grupo de gatos hidráulicos de acción simple, a los cuales se les colocará una placa de acero con forma cuadrada en la parte frontal. Sin embargo, para evitar la interferencia entre placas al

desplazarse, éstas tendrán un área menor que la de la cara de la probeta con la cual estén en contacto. Debido a ello se originará una falta de uniformidad de los esfuerzos en las aristas de la probeta. Por esa razón, en esta tesis, se caracterizará por medio de modelaciones numéricas el estado de esfuerzos dentro de la muestra de suelo. Con base en la interpretación de los resultados que se obtengan como producto de esta investigación, se definirá si es factible o no actualizar el sistema de aplicación de cargas en el cubo triaxial del Instituto de Ingeniería de la UNAM (CT – 65 – 100), con el sistema de actuadores propuesto.

Cabe mencionar, que el diseño mecánico de los actuadores está fuera de los alcances del presente estudio.

OBJETIVO

Decidir si la propuesta de emplear actuadores de tipo "rígido", utilizando gatos hidráulicos de acción simple, es una buena opción para actualizar el sistema de cargas del cubo triaxial de Instituto de Ingeniería de la UNAM.

ALCANCES

Dentro de los alcances de esta tesis se encuentran:

- Generar un modelo numérico tridimensional, de una probeta de suelo representativa de los materiales que se ensayarán en el cubo triaxial del Instituto de Ingeniería de la UNAM, tomando en cuenta las condiciones de frontera a las que estará sometida.
- Caracterizar el estado de esfuerzos dentro de la muestra de suelo analizada, al aplicarle cargas con el sistema de actuadores propuesto.
- Comparar la deformabilidad de los materiales de un enrocamiento (medida *in situ*), con las que arroja el modelo numérico.

CAPÍTULO 1

“...hoy en día hay muy poca información inútil.” Oscar Wilde

ANTECEDENTES DE CÁMARAS TRIAXIALES CONVENCIONALES Y CUBOS TRIAXIALES

A continuación se analizarán algunas de las diferencias y similitudes que existen entre los cubos triaxiales y las cámaras triaxiales convencionales, así como las ventajas y desventajas de ambos equipos.

En la práctica profesional las pruebas para conocer la respuesta esfuerzo-deformación de los suelos, se realizan generalmente en aparatos de laboratorio que no toman en cuenta su anisotropía, como en el caso de la cámara triaxial convencional (Silvestri *et al*, 1988), ya que ensayar muestras de suelos en aparatos de laboratorio donde se puede variar a voluntad la magnitud de los tres esfuerzos principales, se complica debido a la preparación del espécimen y la ejecución del experimento.

1.1 CÁMARAS TRIAXIALES CONVENCIONALES

La cámara triaxial convencional es uno de los aparatos de laboratorio empleados con mayor frecuencia, para determinar las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante y deformación en los suelos, debido a su forma de uso relativamente simple (Esaki *et al* 1988; Green y Bishop, 1969; Ibsen y Praastrup 2002; Michelis, 1988; AnhDan *et al*, 2005). Por esa razón, muchas de las relaciones constitutivas en la ingeniería geotécnica son obtenidas de ensayos efectuadas en ellas (Silvestri *et al*, 1988).

Su concepto es el siguiente: un espécimen de suelo de forma cilíndrica, es contenido dentro de una membrana de hule delgado, también de forma cilíndrica. Estas membranas se cierran tanto por su parte superior como inferior mediante aros de hule, los cuales también tienen la función de sujetar el la probeta a las placas con que se transmite el esfuerzo axial a la muestra. Posteriormente, todo el conjunto se ubica dentro de una celda, que se llena con un fluido, éste se presuriza y le aplica esfuerzos a las caras verticales de la probeta.

Debido a la forma de la muestra ensayada, los dos esfuerzos principales horizontales son iguales a la presión de la celda donde está contenida. Esto permite realizar sólo tres tipos de pruebas: $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ (compresión isotrópica), $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ (compresión axial) y $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ (extensión).

Donde:

σ_1 .- Esfuerzo principal mayor

σ_2 .- Esfuerzo principal intermedio

σ_3 .- Esfuerzo principal menor

Un inconveniente de la manera en que se realiza la prueba, es que la diferencia de rigideces de las interfaces con que se aplican los esfuerzos, hace que estos se distribuyan de manera heterogénea en la muestra. Además, un problema que puede presentarse, es la generación de esfuerzos cortantes entre la probeta y las placas con que se le transmite el esfuerzo principal vertical. Cuando esto ocurre en pruebas de compresión axial, la muestra toma la conocida forma de barril (Ko y Scott, 1967).

1.2 CUBOS TRIAXIALES

Los cubos triaxiales se emplean principalmente en laboratorios de investigación, por lo tanto no están estandarizados, sin embargo, en todos se ensayan muestras de forma cúbica, a la cual se le aplican esfuerzos en sus caras mediante actuadores. Dichos actuadores pueden ser: rígidos (por ejemplo, utilizando placas de acero) o flexibles (empleando membranas impermeables y un fluido).

Hay que señalar que aunque los cubos triaxiales no son aparatos de uso común, el interés de los investigadores en ellos se ha venido incrementando a partir de los años 70's a la fecha, gracias al surgimiento de las computadoras, que han permitido realizar la modelación de los resultados de las pruebas de este tipo de ensayos de laboratorio. Ello utilizando poderosos métodos numéricos capaces de tomar en cuenta geometrías tridimensionales, como el de diferencias finitas o el de elementos finitos.

Sin embargo, las soluciones obtenidas mediante estas técnicas son tan buenas como la calidad de los datos con que se está trabajando, los cuales usualmente están dados en forma de relaciones esfuerzo-deformación, que a su vez dependen del tiempo y la temperatura (Sture y Desai, 1979).

1.2.1 USO ACTUAL DE LOS CUBOS TRIAXIALES

Los cubos triaxiales se emplean en la validación de modelos constitutivos, buscando una continua retroalimentación entre el trabajo analítico y el experimental (Reddy et al, 1992). Con los resultados obtenidos de las pruebas, se mejoran las relaciones constitutivas existentes o incluso se plantean otras totalmente nuevas, para representar la respuesta del suelo bajo condiciones generalizadas de esfuerzos (Silvestri *et al*, 1988).

1.2.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS CUBOS TRIAXIALES

En los cubos triaxiales se ensaya un espécimen de forma cúbica, al cual se le aplican esfuerzos en cada una de sus seis caras, estos esfuerzos se le pueden transmitir mediante:

- Paredes rígidas
- Paredes flexibles
- Una combinación de paredes rígidas y flexibles

Cada opción tiene ventajas y desventajas, las cuales analizaremos a continuación.

1.2.2.1 CUBOS TRIAXIALES DE PAREDES RÍGIDAS

Un punto importante con respecto a este tipo de aparatos de laboratorio, es que el uso de placas rígidas para transmitir los esfuerzos, da como resultado que las deformaciones en el sentido de aplicación de la carga, sean uniformes en toda la cara.

En 1969 Hambly, un investigador en el laboratorio de suelos en Cambridge, conceptualizó el funcionamiento de un cubo triaxial de paredes rígidas (ver figura 1.1). En él se aplican los esfuerzos a la muestra mediante placas de acero. La parte complicada de este diseño es que éstas tienen que moverse mediante actuadores que cuenten con tres grados de libertad. Por ejemplo, si se está realizando una prueba de compresión isotrópica, la placa "y1" se moverá sobre el eje "y" en sentido negativo, (ver figura 1.1) al mismo tiempo que la placa "x1" se está moviendo en sentido "x" negativo, para ello, la placa "y1" necesita también moverse sobre el eje "x" en sentido negativo, si no, interferiría con la "x1". Mientras esto ocurre, la "z2" se está moviendo en

sentido “z” positivo, por lo tanto la “y1” además tiene que moverse sobre el eje “z” en sentido positivo. Este concepto aplica para las seis placas.

En 1971 Pearce, llevó a la práctica este concepto construyendo un cubo triaxial de paredes rígidas (ver figura 1.1), en el que puede ensayar una muestra cúbica de 10 cm y aplicar deformaciones lineales de hasta $\pm 30\%$ en cualquiera de los tres ejes principales.

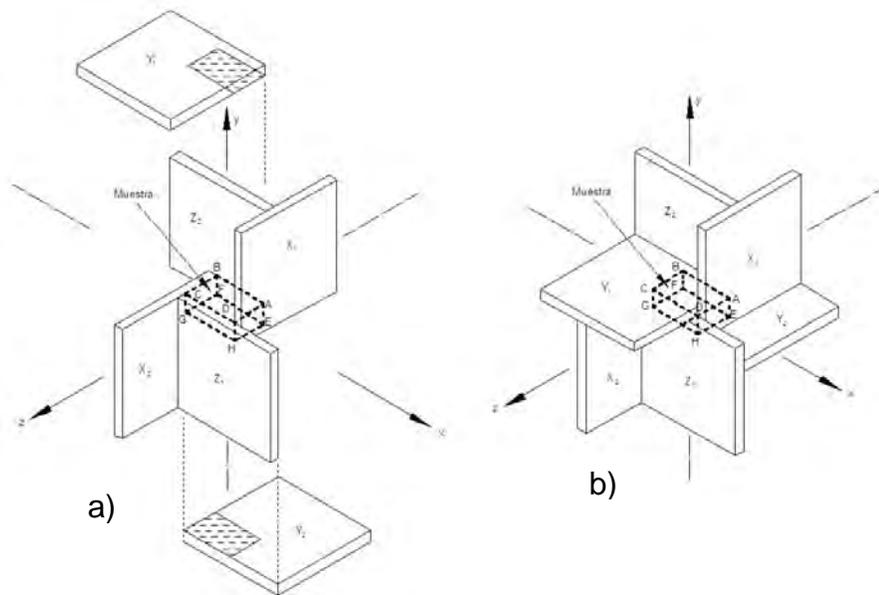


Figura 1.1 Diagrama esquemático del cubo triaxial (a) parcialmente ensamblado, (b) ensamblado (Hambly, 1969)

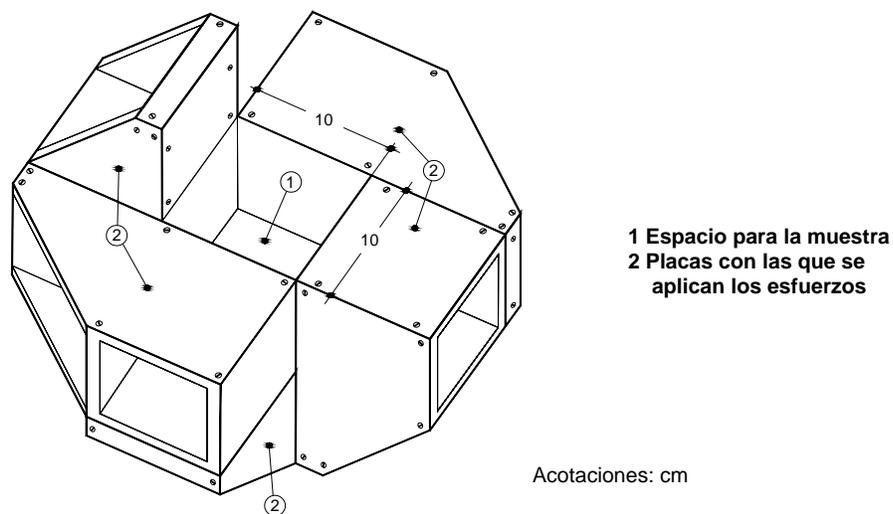


Figura 1.2 Contenedor para la muestra del cubo triaxial de paredes rígidas de Pearce, la placa superior ha sido removida (Modificado de Pearce, 1971)

1.2.2.2 CUBOS TRIAXIALES DE PAREDES FLEXIBLES

Se tratan básicamente de cajas rígidas, dentro de las cuales se coloca un espécimen de suelo. Las cargas se aplican mediante bolsas de hule que se instalan en cada una de las caras de la muestra (entre la caja y el espécimen), las cuales posteriormente se presurizan. De esta forma la caja sirve como marco de reacción.

El uso de una membrana flexible para transmitir los esfuerzos a las caras de muestra, da como resultado que su distribución sea uniforme.

Ko y Scott, desarrollaron en 1967, uno de los primeros cubos con paredes flexibles (figura 1.3). Los actuadores consisten en membranas de látex (figura 1.3a), que se amoldan perfectamente a las paredes de un marco (figura 1.3b). En la figura 1.3c se aprecia el sistema una vez armado.

El espacio entre cada membrana y su pared, se llena con agua, que después se presuriza. Cada par de celdas opuestas están interconectadas, por lo que ambas aplican la misma presión al espécimen ensayado. La deformación promedio en cada una de las direcciones de los esfuerzos principales se obtiene midiendo la cantidad de agua que se inyecta o se extrae, de cada uno de los tres sistemas de celdas.

En este aparato se pueden ensayar muestras cúbicas de 10.16 cm por lado y aplicar presiones de hasta 0.68 MPa (7 kg/cm²).

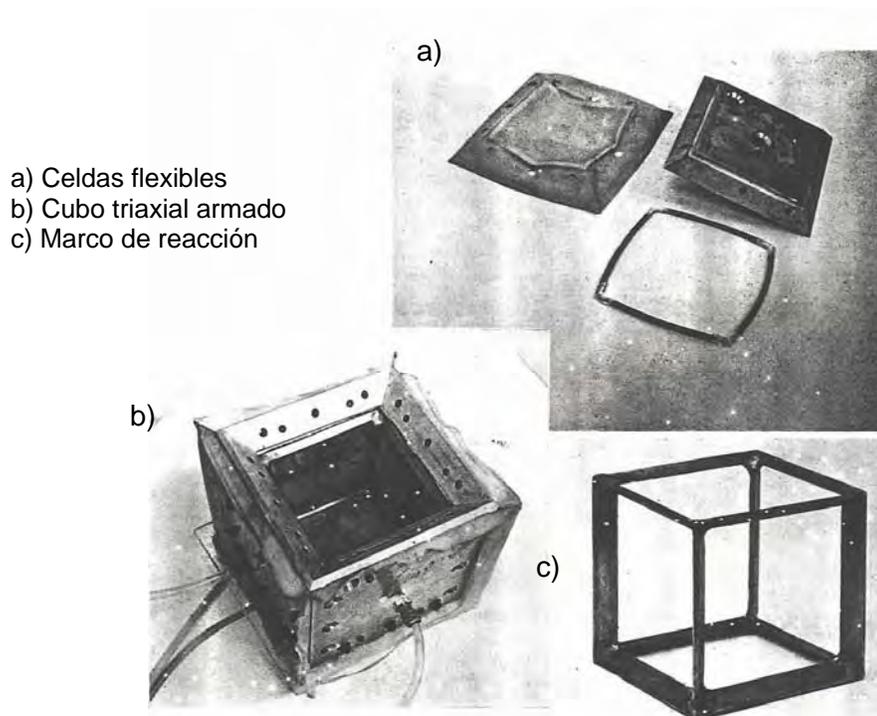


Figura 1.3 Partes del cubo triaxial desarrollado por Ko y Scott en 1967 (Ko y Scott, 1967)

1.2.2.3 CUBOS TRIAXIALES DE PAREDES MIXTAS

Este tipo de aparato utiliza una celda que se presuriza mediante un fluido, (similar a las que se emplean en las cámaras triaxiales convencionales), la cual se encarga de proveer el esfuerzo principal menor.

El esfuerzo principal mayor se trasmite a la muestra, de forma similar que en las cámaras triaxiales convencionales, la diferencia radica en que aquí existe un tercer sistema de aplicación de cargas en sentido horizontal, que puede ser una placa rígida o una celda flexible con un marco de reacción. Este suministra el esfuerzo principal intermedio.

Un ejemplo de este tipo de el cubo es el desarrollado por Green en 1971 (ver figura 1.4) en él se puede aplicar un esfuerzo principal mayor de hasta 1.76 MPa (18 kg/cm²), y se han realizado pruebas con presiones de confinamiento de hasta 1.27 MPa (13 kg/cm²).

Dicho aparato puede acomodar muestras de 7.5 cm por lado.

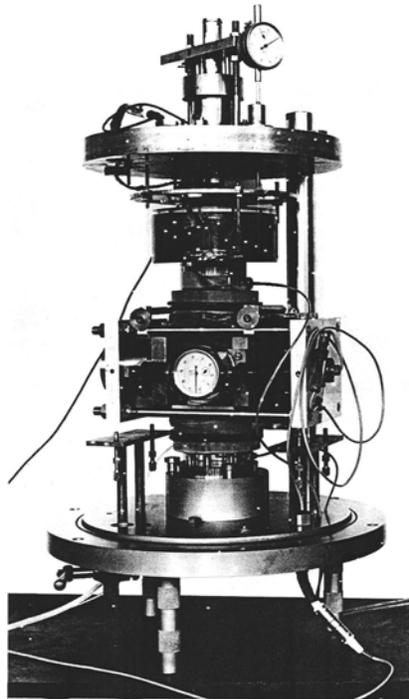


Figura 1.4 Cubo triaxial de paredes mixtas (se ha removido el cilindro de acrílico que sirve para contener el fluido que aplica el esfuerzo principal menor) (Green, 1971)

Según Sture y Desai (1979) este tipo de cubos no son muy recomendables, ya que se ha encontrado que cuando se mezclan las condiciones de frontera (paredes rígidas y flexibles), se tiene como consecuencia una falta de uniformidad de esfuerzos en las muestras, lo que ocasiona comúnmente una falla prematura del espécimen.

1.2.2.4 ELECCIÓN DEL TIPO DE FRONTERA MÁS CONVENIENTE

Algunos puntos que se deben tener en cuenta en la elección del tipo de frontera a utilizar son:

- Con el uso de paredes flexibles no se garantiza la uniformidad de las deformaciones en las paredes de la muestra.
- Con el uso de paredes rígidas no garantiza la uniformidad de los esfuerzos, en las paredes de la muestra.
- Cuando se emplea una combinación de paredes rígidas y flexibles (como en el cubo triaxial de paredes mixtas), cada cara “hereda” las propiedades de la condición de frontera correspondiente.
- Se ha descubierto que existe alguna ventaja en mantener la “isotropía” de las condiciones de frontera. Cuando se construyen aparatos triaxiales con condiciones de frontera mixtas, se da preferencia a la formación de ciertas superficies de falla, porque cerca de las paredes flexibles las deformaciones son mayores que en el resto de la probeta (Airey y Wood, 1988).

Por lo tanto, la mejor opción es emplear solo paredes rígidas o solo paredes flexibles para la aplicación de los esfuerzos.

1.3 INFLUENCIA DEL ESFUERZO PRINCIPAL INTERMEDIO EN LA RESISTENCIA DE LOS SUELOS

Se conoce que in situ, muchas veces los suelos están sujetos a tres esfuerzos principales diferentes. Un ejemplo de ello es el estudio realizado por Alberro et al (1998). En él, se instalaron celdas de presión, extensómetros, piezómetros, inclinómetros deformímetros, y acelerógrafos, en la presa el Caracol (estado de Guerrero). Después de analizar los datos obtenidos, los autores señalan en sus conclusiones: “Estrictamente, los estados de esfuerzos y deformaciones en el cuerpo de la presa son tridimensionales”.

Por otro lado, estudios como los realizados por Zhang y Zhu (2007), Sture y Desai (1979), Shibata y Karube (1965) y, Shuterland y Mesdary (1969), reconocen que el esfuerzo principal intermedio juega un papel importante en la respuesta esfuerzo-deformación de los suelos y demuestra que cuando el esfuerzo principal intermedio (σ_2) varía, aunque σ_3 y σ_1 se mantengan constantes, la resistencia del suelo cambia.

Como una forma de relacionar la magnitud del esfuerzo principal intermedio con los esfuerzos principales mayor y menor, se ha creado el parámetro "b". Éste se define como: $\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$.

Por lo tanto si: $b=0$; $\sigma_2 = \sigma_3$ y si $b=1$; $\sigma_2 = \sigma_1$. (Sutherland y Mesdary, 1965; Wang y Lade, 2001; Shibata y Karube, 1965)

Un ejemplo de la influencia que tiene la variación del parámetro "b" en las propiedades del suelo, es una serie de 12 ensayos realizados por Wang y Lade en el 2001.

En ellas se empleó un aparato triaxial de paredes mixtas, en el que tanto el esfuerzo principal mayor como el menor se aplican de forma similar que en las cámaras triaxiales convencionales, mientras que el esfuerzo principal intermedio se transmite mediante un sistema de placas rígidas.

Las muestras empleadas fueron de arena de la playa de Santa Mónica, EUA, la cual contiene 45% de cuarzo, 45% de feldespatos, 8% de magnetita y 2% de otros minerales. El tamaño de las partículas se mantuvo dentro de los 0.075 mm y los 0.60 mm. La dimensión de las muestras fue de 76 mm de ancho por 76 mm de largo y 188 mm de alto.

Las pruebas se realizaron de la siguiente forma:

- Fueron de compresión.
- Las 12 probetas se llevaron a la falla aumentando σ_1 .
- Se dejó fija la placa con que transmite el esfuerzo principal intermedio (σ_2).
- En todas se empleó un esfuerzo de confinamiento $\sigma_3 = 49 \text{ kPa}$ (0.5 kg/cm^2).
- Cada espécimen se llevó a la falla manteniendo constante el parámetro "b".
- Se manejaron 12 valores de "b" diferentes.

En la figura 1.5 se observa que la prueba en la que $b=0$ ($\sigma_2 = \sigma_3 = 49 \text{ kPa}$), la probeta falló al aplicar un esfuerzo principal mayor $\sigma_1 = 254 \text{ kPa}$ (2.59 kg/cm^2), mientras que en la que $b=0.9$ ($\sigma_2 = 348 \text{ kPa} = 3.54 \text{ kg/cm}^2$) la falla ocurre cuando $\sigma_1 = 382 \text{ kPa}$ (3.89 kg/cm^2). Cuando $b=0.9$, hay un 150% de aumento en la resistencia del suelo ensayado con relación al caso en que $b=0$.

Otro ejemplo son las pruebas efectuadas por Sutherland y Mesdary en 1969. En ellas se buscaba conocer la influencia del esfuerzo principal intermedio en el ángulo de fricción interna de las arenas. El cubo triaxial empleado fue de paredes de tipo mixto. El esfuerzo principal mayor (σ_1) se aplicó mediante dos placas horizontales de acero inoxidable, el esfuerzo principal menor (σ_3) mediante presión de agua, como en una cámara triaxial convencional y el esfuerzo principal intermedio (σ_2) se transfirió a la muestra mediante bolsas de hule delgado.

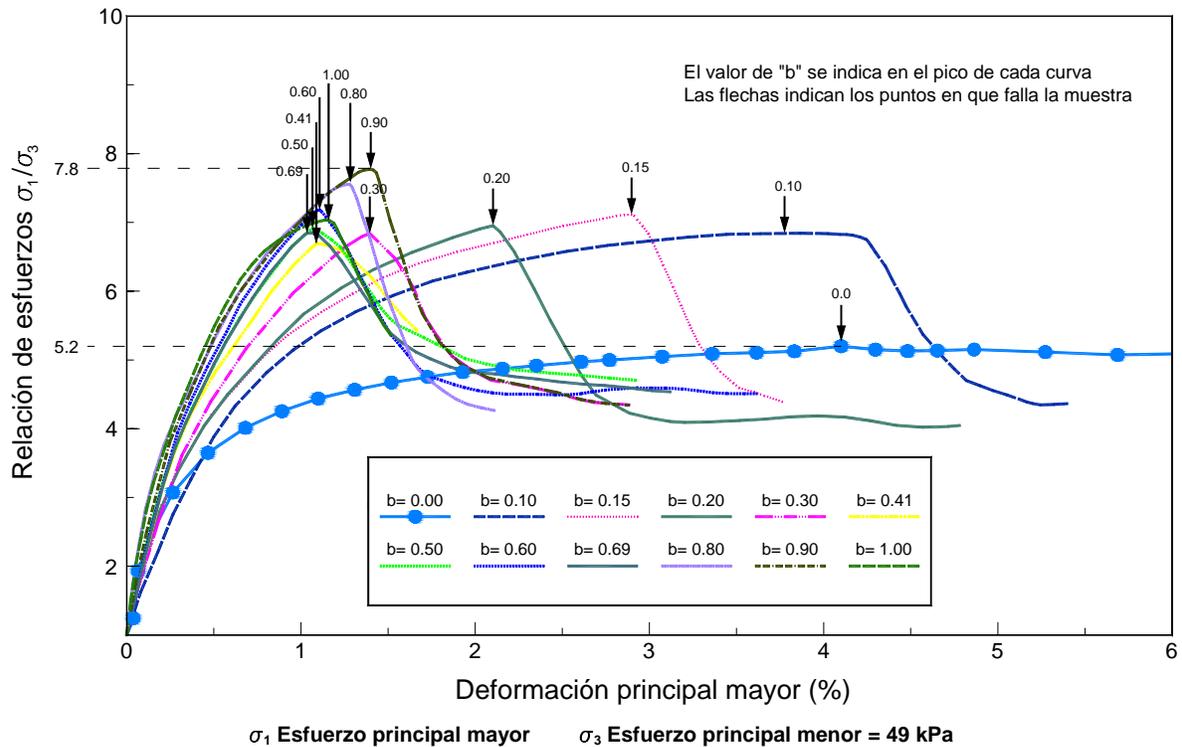


Figura 1.5 Comparación de las características esfuerzo-deformación en un cubo triaxial, de un espécimen prismático de arena densa de la playa de Santa Mónica, EUA. (Modificado de Wang y Lade, 2001)

Las muestras ensayadas se conformaron de arena, con un contenido de óxido de silicio de 99.8% y un diámetro de partículas menor a 0.6 mm (criba 25 British Standard). Su forma era cúbica de 10.16 cm por lado. Se realizaron 6 series de pruebas variando el parámetro "b" en un rango comprendido entre 0 y 1, sus porosidades de 0.34 a 0.44 y los esfuerzos entre 137 kPa (1.40 kg/cm²) y 550 kPa (5.6 kg/cm²).

En la figura 1.6, se observa una gráfica de valores de $\sin \phi$ (donde ϕ es el ángulo de fricción interna del material) contra el factor "b" ($\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$). En ella podemos apreciar diferencias de hasta 5.5° en el ángulo de fricción interna.

Los ejemplos anteriormente vistos, demuestran la importancia de tomar en cuenta el esfuerzo principal intermedio al determinar las propiedades mecánicas de los suelos.

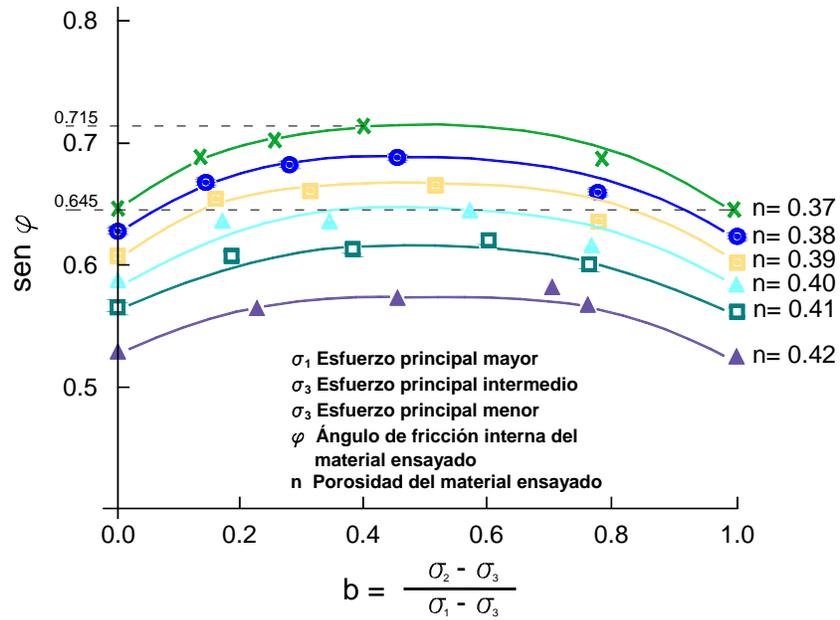


Figura 1.6 Relación de $\text{sen } \varphi$ con "b" (Modificado de Sutherland y Mesdary, 1969)

2.4 TABLA RESUMEN DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS APARATOS DE LABORATORIO ANALIZADOS

En la tabla 1.1, se muestran las principales ventajas y desventajas de las cámaras triaxiales convencionales y de los tres tipos de cubos triaxiales analizados durante este capítulo.

Tabla 1.1 Comparativa entre las cámaras triaxiales convencionales y los diversos tipos de cubos triaxiales

Cámaras triaxiales convencionales	Cubos triaxiales		
	Control de deformaciones (todas las paredes rígidas)	Control de esfuerzos (todas las paredes flexibles)	Mezcla de paredes rígidas y flexibles
Ventajas			
<ol style="list-style-type: none"> Muchas de las relaciones constitutivas de la Ingeniería Geotécnica se obtienen de pruebas realizadas en ellas La preparación de la muestra es relativamente sencilla 	<ol style="list-style-type: none"> Las deformaciones se pueden medir con certeza Son posibles deformaciones uniformes Se pueden alcanzar deformaciones uniaxiales grandes Se pueden seguir trayectorias de deformaciones complicadas Las paredes se pueden instrumentar fácilmente con sensores de presión y de desplazamiento 	<ol style="list-style-type: none"> Se asegura la aplicación de esfuerzos principales normales en cada una de las caras Es posible una distribución de esfuerzos uniforme en cada una de las caras Se pueden seguir trayectorias de esfuerzos complicadas y predeterminadas 	<ol style="list-style-type: none"> Se pueden instalar sensores de presión de poro fácilmente en las paredes del cubo Se pueden modelar pruebas de deformación plana
Desventajas			
<ol style="list-style-type: none"> Solo se pueden aplicar esfuerzos axialmente simétricos La uniformidad de esfuerzos o de deformaciones en las direcciones normales a las caras rígidas o flexibles es difícil de alcanzar Ocurren esfuerzos o deformaciones heterogéneas en las caras normales a las caras rígidas o flexibles 	<ol style="list-style-type: none"> Es difícil de verificar la uniformidad de los esfuerzos inducidos Ocurren interferencias en las placas cuando se aplican deformaciones multiaxiales grandes Es difícil seguir trayectorias de esfuerzos predeterminadas El aparato usualmente es grande y difícil de manejar 	<ol style="list-style-type: none"> Puede ocurrir una interferencia entre las paredes si no se toman las precauciones adecuadas Es difícil seguir trayectorias de deformaciones predeterminadas No es fácil acomodar sensores de presión o de deformación en las paredes del cubo 	<ol style="list-style-type: none"> Es casi imposible seguir trayectorias de esfuerzos o de deformaciones predeterminadas complicadas La uniformidad de esfuerzos o de deformaciones en las direcciones normales a las caras rígidas o flexibles es difícil de alcanzar Ocurren esfuerzos o deformaciones heterogéneas en las caras normales a las caras rígidas o flexibles

(Modificado de Sture y Desai, 1979)

CAPÍTULO 2

“Estudia el pasado si vas a definir el futuro.” Confucio

ESTADO ACTUAL DEL CUBO TRIAXIAL: VENTAJAS Y LIMITACIONES.

Con objeto de predecir el comportamiento de suelos granulares bajo una condición axialmente no simétrica de esfuerzos y deformaciones, el profesor Raúl J. Marsal (1973) diseño y construyó un cubo triaxial para el Instituto de Ingeniería de la UNAM (ver figura 2.1).

Las dimensiones generales en dicho equipo de laboratorio fueron elegidas tomando en cuenta que debería ser capaz de ensayar muestras de enrocamientos, las cuales incluirían partículas con un diámetro máximo de hasta 10 cm.

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Éste consiste en un cilindro de acero de 10 cm de espesor, su base está formada por una placa soldada de acero de 15 cm de espesor y tiene una tapa de acero de 10 cm de espesor, que se cierra por medio de 54 tornillos de 1 1/8" (2.85 cm) de diámetro. Dentro del cilindro existe una caja construida con placa de acero de 6 mm de espesor de forma cúbica que mide 1 m por lado, la cual está embebida en concreto, dentro de la cual se coloca la muestra de suelo (ver figura 2.2).

En él se han empleado distintos sistemas de aplicación de cargas de tipo "flexible", tales como celdas de hule y celdas de tipo Freyssinet, en varios tamaños y configuraciones. Sin embargo, con ninguno se ha llegado a establecer un estado de esfuerzos o deformaciones en la muestra.

A continuación se describirán las distintas etapas de desarrollo por las que ha pasado el cubo triaxial del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

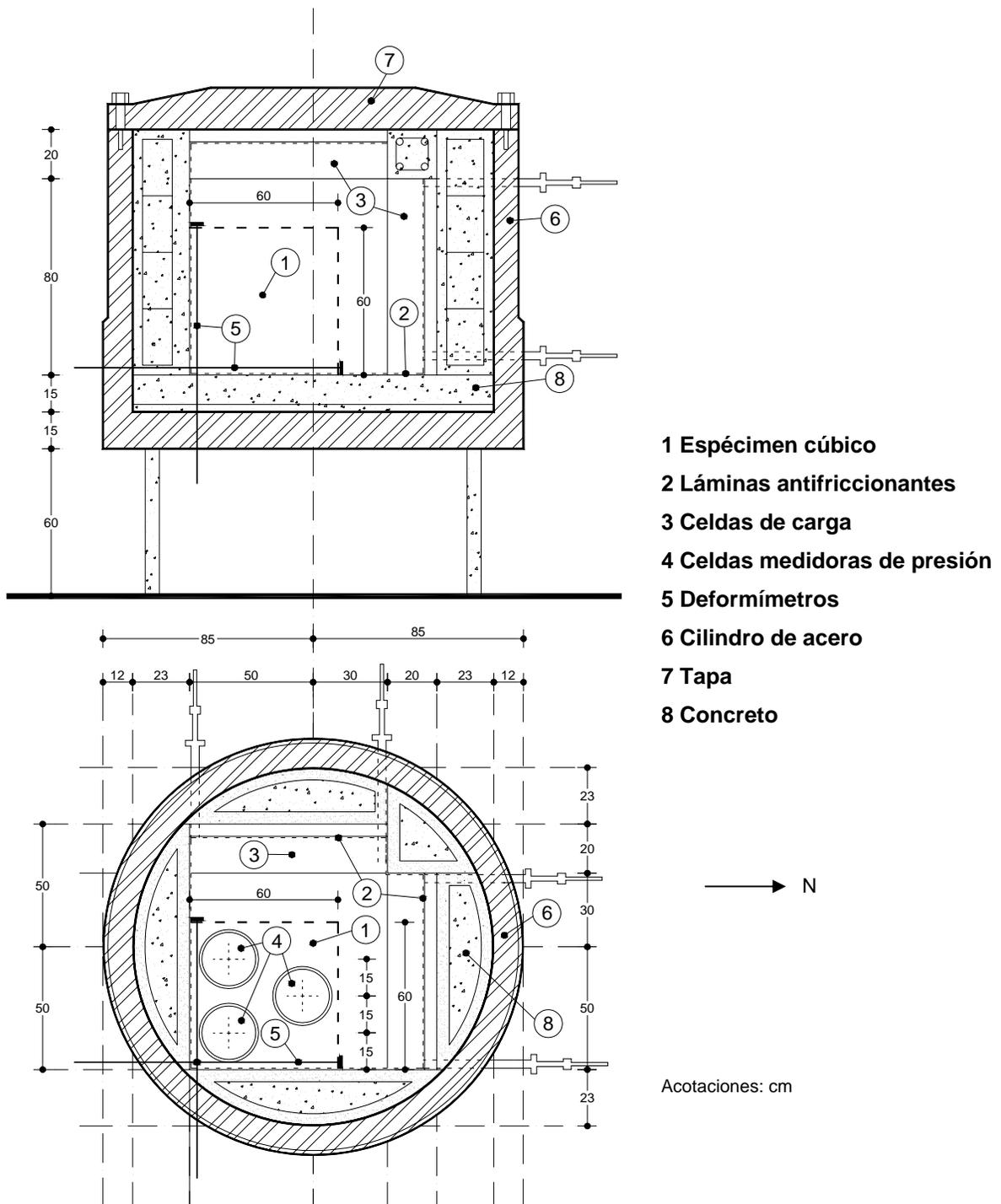


Figura 2.1 Diagrama del cubo triaxial del Instituto de Ingeniería (modificado de Marsal, 1973)

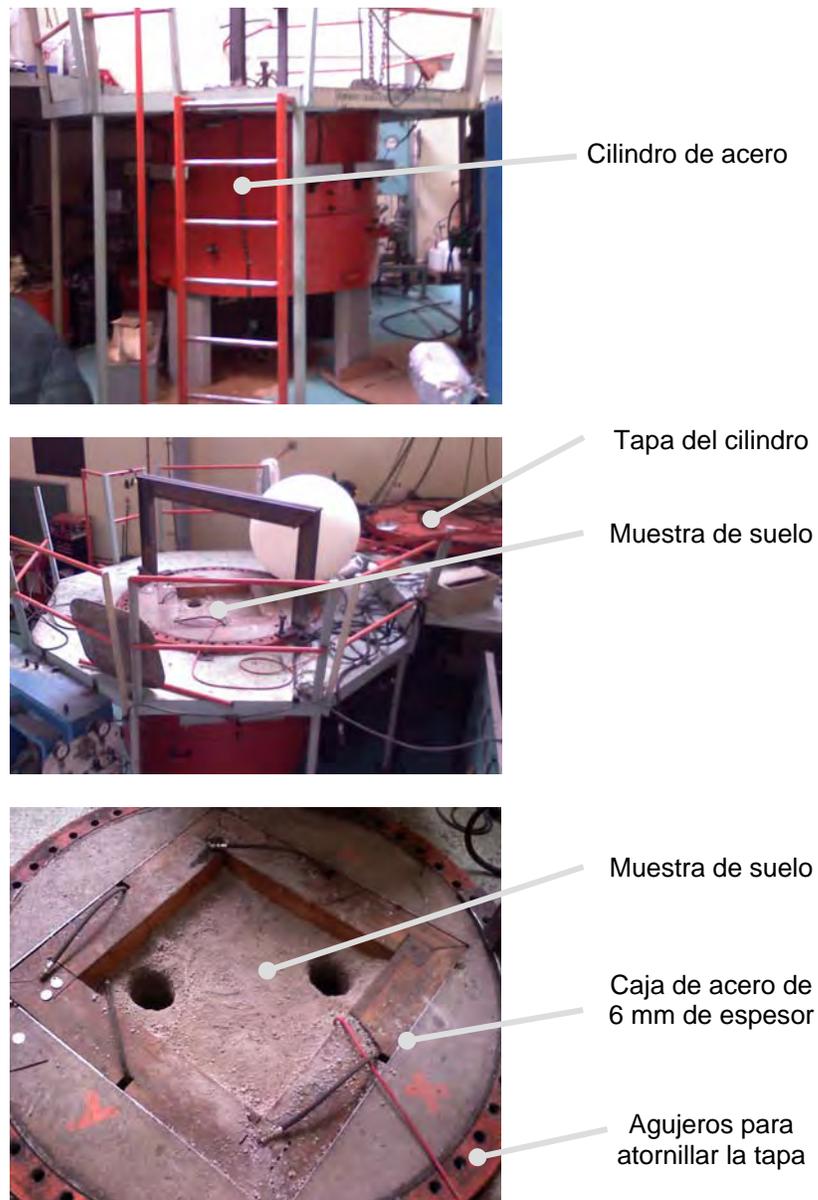


Figura 2.2 Fotos del cubo triaxial del Instituto de Ingeniería

2.1 EMPLEO DE 3 CELDAS DE HULE

El primer sistema utilizado para aplicar cargas a la muestra, fueron tres celdas de hule, las cuales se llenaban de agua, éstas se confinaban por la parte de atrás con las paredes del aparato y en frente con una placa de madera de 1 cm de espesor, la cual a su vez, estaba en contacto con la muestra.

Este tipo de celdas fallaron repetidamente debido a la penetración de partículas de la muestra (Marsal, 1973), por lo tanto, se cambiaron por bolsas de hule vulcanizado de forma cuadrada, de 80 cm por lado, con las esquinas redondeadas.

Ya que se generaba fricción lateral entre la muestra y la placa de madera que se colocaba para que las celdas no estuvieran en contacto directo con el material granular, se cubría totalmente la superficie del espécimen con tres capas conformadas por placas cuadradas de poliestireno de alto impacto engrasadas.

Para conocer los esfuerzos actuantes en los tres ejes ortogonales, las paredes opuestas a las celdas de hule, se instrumentaron con celdas para medir presión (ver figura 2.3) (Marsal, 1973).

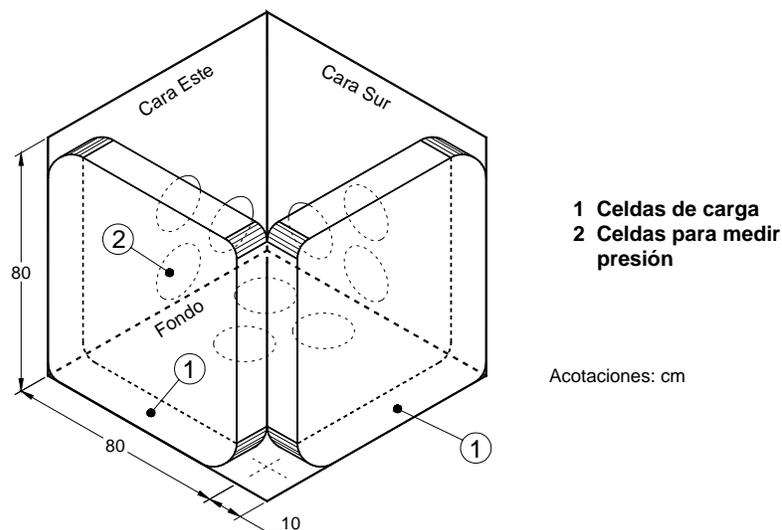


Figura 2.3. Localización de las celdas de carga y de las celdas para medir presión (modificado de Mazari y Fuentes, 1977)

2.2 EMPLEO DE 3 JUEGOS DE CELDAS TIPO FREYSSINET

Las bolsas de hule vulcanizado no resolvieron los problemas debidos a la penetración del material granular (Hernández, 2008), por ello se cambiaron por un sistema por celdas tipo Freyssinet (ver figura 2.4).

Estas celdas se construyeron moldeando láminas de fierro de 1 mm de espesor mediante un troquel y un gato hidráulico. Después se soldaron las orillas de dos de ellas, de manera tal que se formaran celdas con un toroide perimetral de aproximadamente 2 cm de diámetro, luego se introduce aceite en su interior y se presuriza (Mazari y Fuentes, 1977).

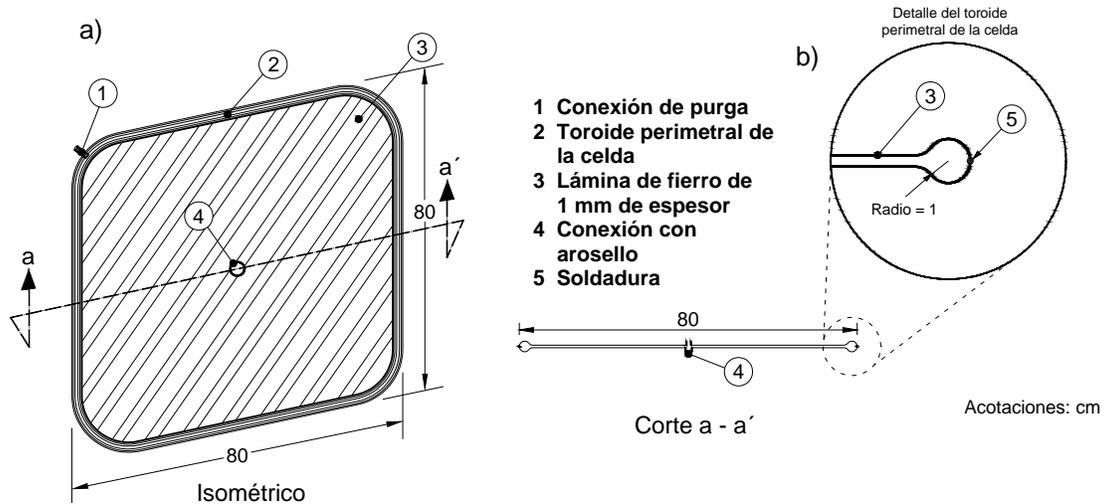


Figura 2.4 Esquema de una celda tipo Freyssinet (modificado de Mazari y Fuentes, 1977)

Este tipo de celdas admiten una deformación máxima en el sentido de aplicación de la carga igual al diámetro de su toroide perimetral, por lo que para lograr las deformaciones en la muestra que requería el proyecto, se formaron sistemas de 4 celdas (ver figura 2.5).

Luego se calibraron tres sistemas de celdas compuestas por cuatro celdas tipo Freyssinet cada uno, mediante un marco de carga, un edómetro y un sistema de inyección de aceite hasta presiones de 8.82 MPa (90 kg/cm²) (Mazari, 1977).

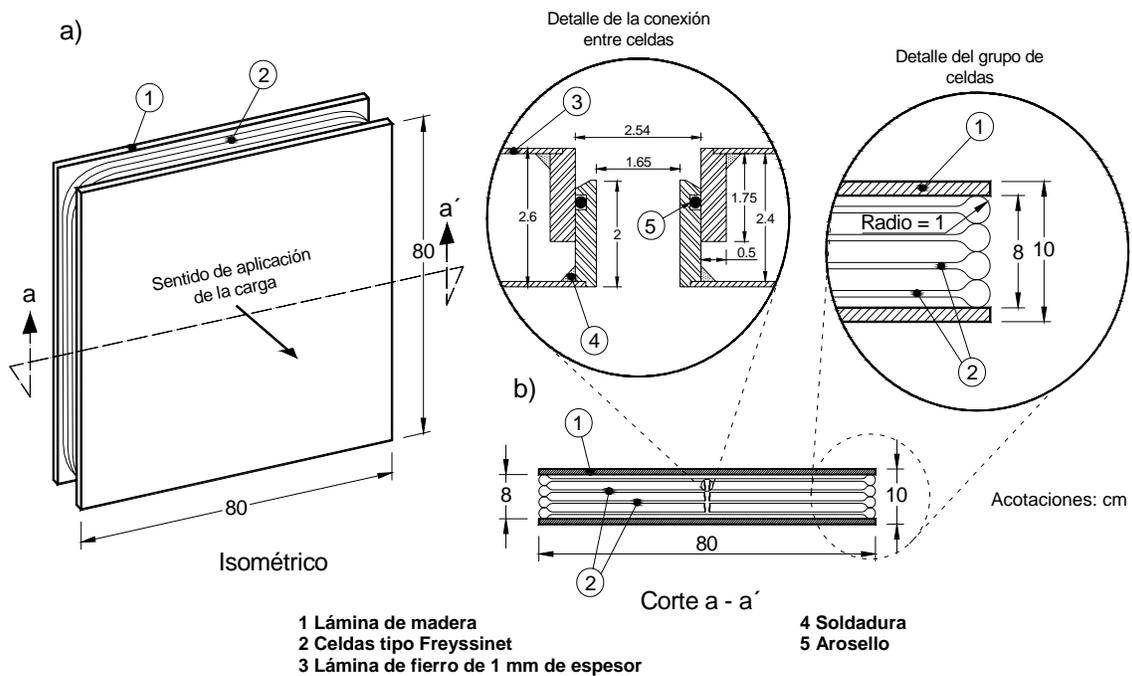


Figura 2.5 Sistema de 4 celdas tipo Freyssinet (modificado de Mazari y Fuentes, 1977)

Posteriormente el sistema se sometió a ciclos repetidos de carga y descarga, alcanzando presiones de hasta 9.31 MPa (95 kg/cm²) (Mazari y Fuentes, 1977).

En la primera etapa de ensayos con las celdas tipo Freyssinet, se buscó un material que no presentara problemas importantes por la rotura de sus granos y que al mismo tiempo no le ocasionara grandes daños a los elementos de cubo triaxial, por tal motivo se decidió emplear arena de la Angostura (Mazari y Fuentes, 1977).

Se fabricaron probetas con un volumen de 0.55 m³ colocando el material en capas de 10 cm de espesor, vibradas durante 10 minutos, las cuales alcanzaron relaciones de vacíos entre 0.439 y 0.494, se aplicó grasa entre las paredes del cubo y las celdas como antifricción. El tamaño máximo de las partículas fue de 5 mm.

2.2.1 MEDICIÓN DE LOS ESFUERZOS

Con objeto de poder relacionar la información obtenida en las direcciones de los tres esfuerzos principales, se utilizó el sistema octahédrico (σ_{oct} y τ_{oct}) en los sistemas de carga y medida donde:

$$\sigma_{oct} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

Los esfuerzos actuantes en las caras de los cubos, se registraron de dos formas:

- Por medio de la presión de aceite del sistema de celdas con que se aplicaba el esfuerzo
- Mediante el uso de celdas para medir presión, ubicadas en las caras opuestas

Después de varias pruebas se encontraron diferencias entre los esfuerzos medidos con ambos sistemas como se puede apreciar en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Comparación de los esfuerzos registrados con el sistema de carga y el de medición

	σ_1 kPa (kg/cm ²)	σ_2 kPa (kg/cm ²)	σ_3 kPa (kg/cm ²)
Sistema de carga	42.1 (0.44)	391.2 (3.99)	185.3 (1.89)
Sistema de medición	261.8 (2.67)	580.5 (5.92)	288.3 (3.96)
Promedio	152.9 (1.56)	486.8 (4.96)	287.3 (2.93)

Debido a los resultados anteriores, se optó por usar una representación en la que los esfuerzos octaédricos se dedujeran del promedio de los esfuerzos normales entre dos caras opuestas (el promedio de ambos sistemas).

2.2.2 MEDICIÓN DE LAS DEFORMACIONES

Las deformaciones se registraron con extensómetros eléctricos, adyacentes a las caras fijas del cubo. Estos consistían en una placa de acero unida a un alambre de acero de 1 mm de diámetro, dicho alambre se mantenía a tensión constante por medio de un par de resortes. Con objeto de evitar la fricción entre el alambre y la probeta, éste se encontraba rodeado por pequeños tubos telescópicos (ver figura 2.6) (Marsal, 1973).

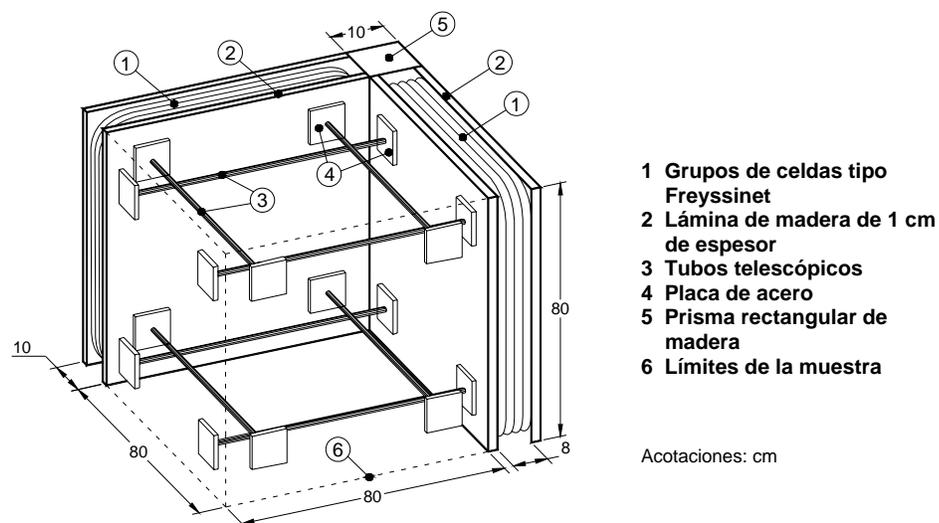


Figura 2.6 En la imagen se observa la colocación de los extensómetros con los que se median las deformaciones en las caras de las celdas (Modificado de Mazari y Fuentes, 1977)

2.2.3 LA FRICCIÓN EN LAS CARAS DEL CUBO

Buscando reducir la fricción que se producía entre la muestra y las paredes de las celdas se decidió mezclar la grasa que se utilizó como antifricción con polvo de molikote (un aditivo para aceite comúnmente usado para reducir la fricción en motores de trabajo pesado) el esfuerzo cortante en las caras disminuyó de niveles del 8.5% del σ_n (donde σ_n es el esfuerzo normal aplicado) a niveles del 7% del σ_n e incluso a niveles de 4.4% del σ_n , para la dirección en que se aplicaba el esfuerzo normal principal, esto en un intervalo de presiones de alrededor de 3.62 MPa (37 kg/cm²) (Mazari y Fuentes, 1977).

Se continuó experimentando con materiales antrifraccionantes, en una nueva serie de ensayos se empleó una lámina de plastilina de 5 mm, con ello se consiguió reducir la fricción en la cara del cubo hasta a un 2.5% del σ_n .

Luego se empezaron a fabricar las muestras en capas de 5 cm en vez de 10 y se vibraron los mismos 10 minutos por capa, con ello se logró que casi no se apreciaran las fronteras entre las capas al desmontar la plastilina de las paredes del cubo.

2.3 EMPLEO DE 6 JUEGOS DE CELDAS TIPO FREYSSINET

Después de investigar la contribución de la fricción en los resultados de las pruebas (Mazari *et al*, 1982), se colocaron sistemas de tres celdas Freyssinet en cada una de las caras del cubo (ver figura 2.7) buscando los siguientes objetivos:

- Que la aplicación de las cargas fuera simétrica.
- Poder aplicar las cargas simultáneamente.
- Tratar de disminuir los desplazamientos entre la muestra y las paredes del cubo y así reducir los problemas de fricción.
- Permitir deformaciones de 12 cm en cada dirección (utilizando un solo sistema de 4 celdas para aplicar los esfuerzos, eran como máximo de 8 cm).
- Poder medir los desplazamientos de las caras desde el exterior, para no colocar deformímetros que interfirieran con la formación de la muestra.

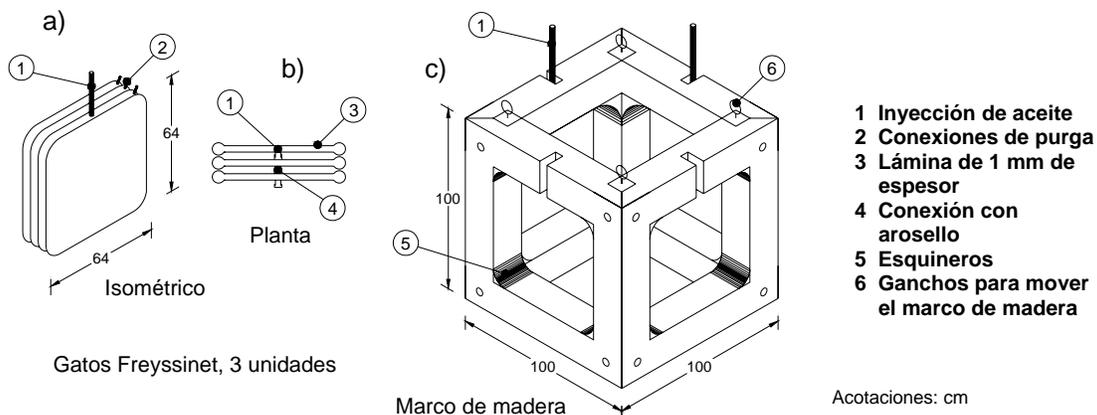


Figura 2.7 Sistema de aplicación de cargas a base de 6 grupos de tres celdas de tipo Freyssinet, uno en cada cara de la muestra (Modificado de Mazari y Fuentes, 1978)

Una vez realizadas las modificaciones, el área para la muestra fue de 64x64 cm, con medio centímetro de holgura de cada lado para flotar la muestra.

Se realizó un nuevo ciclo de pruebas, en las que se obtuvieron los siguientes resultados y conclusiones:

1. La muestra se construyó en capas de 10 cm, como resultado de la asimetría debida a la fuerza de gravedad, no se esperaba que las deformaciones en los tres ejes fueran iguales; sin embargo, sí que las deformaciones entre los ejes horizontales (ϵ_x y ϵ_y) fueran similares, esto no ocurrió, resultando más parecidas las deformaciones a lo largo de los ejes ϵ_y y ϵ_z , en cargas entre 0 y 1.17 MPa (12 kg/cm²).
2. No existió reproducibilidad en los resultados obtenidos de las pruebas salvo en los ángulos de fricción interna, aunque se cuidaba que los pesos volumétricos y las relaciones de vacíos de las diversas muestras ensayadas fueran similares.
3. Las deformaciones resultaron ser muy sensibles a la forma en que se construía la probeta.

En 1998, Alberro y Hernández, realizaron pruebas en el cubo triaxial con el objeto de evaluar un modelo de celdas de presión construidas por la CFE (ver figura 2.8), las cuales han sido instaladas en presas como La Villita, en Michoacán, La Angostura y Peñitas, en Chiapas, El Caracol, en Guerrero, entre otras.



Figura 2.8 Celdas de presión utilizadas por la CFE

En las pruebas se utilizó arena de Tarandacuao, que se retuvo en la malla 50, compactada en 8 capas con “bailarina”. El procedimiento fue el siguiente:

1. Primero se compactaron seis capas.
2. Luego se excavó el material de la parte central de las últimas tres capas, de tal manera que se formara un talud en el centro de la muestra.

3. En el talud formado se apoyó la celda.
4. Después se rellenó la excavación.
5. Finalmente se conformaron las últimas dos capas de material.

Para monitorear un posible cambio de posición de la celda, como resultado de la compactación del material al compactar las capas superiores, ésta se instrumentó con dos acelerómetros, los cuales proporcionaron su giro en las direcciones “x” y “y”.

Se comprobó que la máxima inclinación por efecto de la conformación del material encima de ellas fue de 2°.

A continuación se describe una de las pruebas realizadas:

Sabiendo que la celda se colocó sobre un talud de 21° respecto a la horizontal. Se determinaron los cosenos directores con respecto al sistema de ejes “x”, “y” y “z”.

Estos fueron:

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= 0.358 \\ \cos \beta &= 0.000 \\ \cos \gamma &= 0.933 \end{aligned}$$

El esfuerzo normal sobre la celda se calculó empleando:

$$\sigma_n = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \cos^2 \beta + \sigma_z \cos^2 \gamma$$

Se les llamó σ_x , σ_y y σ_z a los esfuerzos normales en las direcciones a los ejes “x”, “y” y “z”.

Los resultados que se obtuvieron son los siguientes:

- Al aplicar presiones de hasta 4.90 MPa (50 kg/cm²), todas las mediciones se mantuvieron dentro del margen: $0.85 \sigma_n < p < 1.15 \sigma_n$

Donde:

σ_n es el esfuerzo normal aplicado a la celda (calculado)

p es la presión medida con la celda

- En todas las pruebas realizadas los errores de medición se mantuvieron dentro del margen de $\pm 15\%$.
- Los máximos errores se presentaron dentro del rango de 0 a 0.58 MPa (6 kg/cm²).

2.4 CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS REALIZADAS CON LOS SISTEMAS DE ACTUADORES DE TIPO FLEXIBLE

- De los tipos de celdas empleados, la que dio mejores resultados fueron las de tipo Freyssinet.
- La formación de la probeta en capas de 5 cm vibradas durante 10 minutos, dio buenos resultados en lograr la homogeneidad de la misma.
- Se tiene que idear un método más efectivo para medir las deformaciones en la muestra, porque mediante tubos telescópicos se entorpece su formación, y ya su monitoreo es sólo en las esquinas (por la parte de afuera) no es suficiente para caracterizar completamente las deformaciones que sufre.
- Debido a las fricciones que se generan entre la muestra y las paredes del cubo, al haber movimientos relativos entre ellos se deben hacer pruebas con los materiales antifriccionantes que se colocará entre ambos.
- La plastilina mostró un buen comportamiento antifriccionante, sin embargo, sería conveniente experimentar con otro tipo de materiales que se puedan colocar con mayor facilidad.
- Las celdas Freyssinet se fabrican con lámina de acero y se construyen con un toroide perimetral, la rigidez de la cara de la celda con la cual se aplican los esfuerzos es variable, además, se coloca una placa de madera entre éstas y la muestra (para proteger las celdas), esto hace que no exista uniformidad en las presiones de contacto entre actuador y muestra. Ello contribuyó para que al final de los ensayos no se pudiera definir un estado de esfuerzos en la probeta.

CAPÍTULO 3

“El éxito no es el final y el fracaso no es fatal, es el coraje para continuar lo que cuenta.”

Winston Churchill

ANÁLISIS DE UN NUEVO SISTEMA DE ACTUADORES, PARA LA APLICACIÓN DE CARGAS EN EL CUBO TRIAXIAL DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM

En el desarrollo del cubo triaxial del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se han utilizado diversos sistemas de celdas para la aplicación de las cargas (celdas de hule, hule vulcanizado y tipo “Freysinet”).

Sin embargo, con ninguno de ellos se obtuvieron resultados que pudieran llevar a la creación de nuevas leyes de comportamiento de los materiales ensayados, ya que no se logró establecer cuáles eran los estados de esfuerzos, o los de deformaciones en las probetas ensayadas. Por esta razón se está evaluando un nuevo sistema de celdas para la aplicación de cargas.

Se ha mencionado anteriormente que las celdas con las cuales se aplican cargas en este tipo de aparatos son de dos clases, flexibles y rígidas. Con las celdas flexibles se garantiza que los esfuerzos sean uniformes en toda la cara del elemento, mientras que con las rígidas se garantiza esto mismo para las deformaciones.

Ya que no se obtuvieron resultados satisfactorios mediante el empleo de celdas flexibles en el cubo triaxial del Instituto de Ingeniería, se evaluó con un modelo numérico el comportamiento mecánico que tendrá la muestra empleando un sistema de aplicación de cargas utilizando celdas rígidas.

En la investigación bibliográfica realizada, para analizar el funcionamiento de los cubos triaxiales de paredes rígidas, se concluyó que la mayoría trabaja con el principio establecido por Hambly en 1969. Sin embargo una de las desventajas de este tipo de aparatos es su complejo sistema mecánico, ya que los actuadores con que se aplican los esfuerzos cuentan con tres grados de libertad. En la figura 3.1 se aprecia uno de estos cubos triaxiales, en el que el tamaño máximo de muestra que puede ensayarse es un cubo de 10 cm por lado.

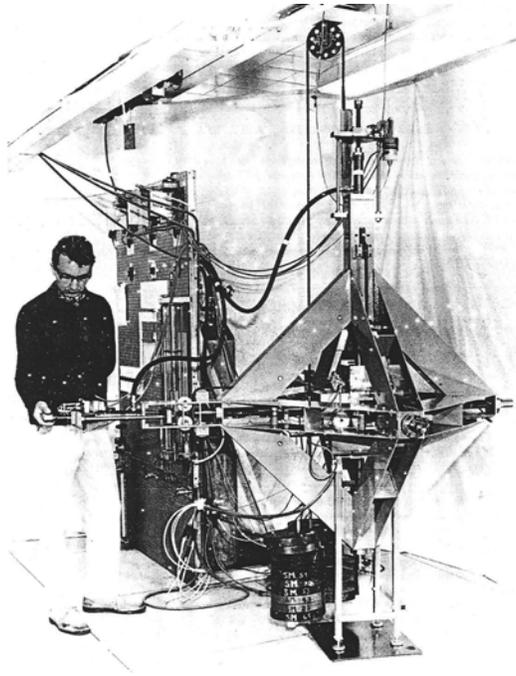


Figura 3.1 En la imagen se aprecia el sistema mecánico de un cubo triaxial de paredes rígidas, en el que el tamaño máximo de muestra que se puede ensayar mide 10 cm por lado (Pearce, 1971)

Uno de requisitos para la actualización del sistema de cargas del cubo triaxial del Instituto de Ingeniería de la UNAM, es ensayar muestras de al menos 50 cm por lado, ya que se piensa extrapolar los resultados obtenidos y utilizarlos en el diseño de presas de enrocamiento. Con esto en mente, y buscando emplear en la medida de lo posible las instalaciones con las que se cuenta en el laboratorio de enrocamientos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se analiza la posibilidad de usar un sistema de seis gatos hidráulicos de acción simple (uno en cada cara de la muestra).

Dichos gatos hidráulicos transmitirán la presión a las caras de la muestra, por medio de una placa de acero de forma cuadrada. Para evitar que dos placas contiguas interfirieran al moverse, el área de éstas será menor que el área de las caras de la probeta (ver figura 3.2).

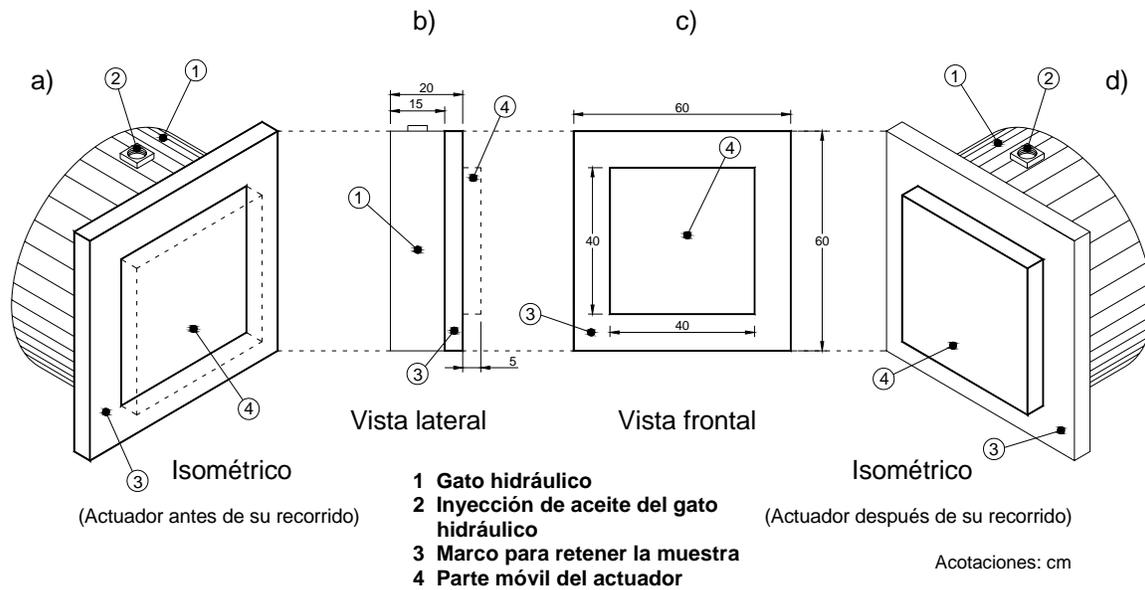


Figura 3.2 Sistema de aplicación de cargas propuesto

Ya que no se conocen las implicaciones que tendrá la reducción en tamaño de las placas con que se aplicarán los esfuerzos, con relación a las caras de la muestra, se resolvió efectuar modelaciones numéricas y a partir de ellas, decidir si es conveniente o no construir este sistema de actuadores rígidos.

Cabe señalar que el diseño mecánico de los actuadores y el contenedor están fuera del alcance de la presente investigación.

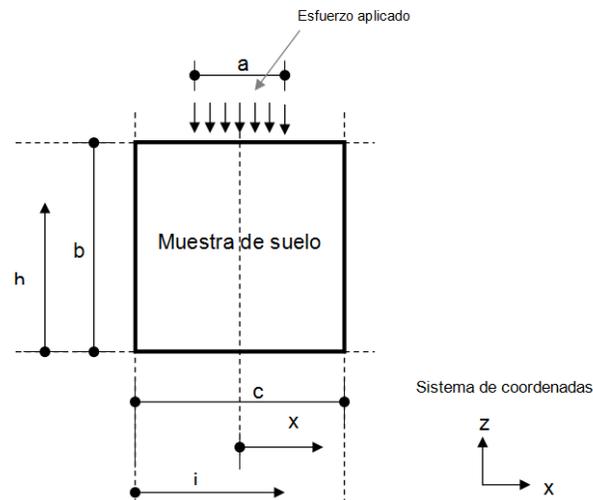
3.1 MODELACIONES NUMÉRICAS

Las modelaciones numéricas se realizaron empleando dos tipos de software, uno de elementos finitos (Plaxis 2D) y otro de diferencias finitas (FLAC 3D). El primero sirvió como marco de referencia para comparar los resultados obtenidos en FLAC 3D (modelo 2D vs 3D), mientras que este último se utilizó para tomar en cuenta los efectos tridimensionales en el modelo, como por ejemplo el modelado tridimensional vs la deformación plana, el efecto de incluir otros 2 actuadores con su respectivo aumento de confinamiento sobre la muestra, la aplicación de una carga uniformemente distribuida de forma cuadrada en lugar de una lineal uniformemente distribuida de longitud infinita, etc.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA A MODELAR

Con objeto de poder extrapolar fácilmente los resultados de las modelaciones a cubos de muestra de cualquier tamaño, se llevó a cabo un análisis dimensional

(Taylor, 1978), dando como resultado la nomenclatura que se muestra a continuación: (ver figuras 3.3 y 3.4).



$$\text{Donde: } 0 \leq \frac{h}{b} \leq 1, \quad 0 \leq \frac{i}{c} \leq 1 \quad \text{y} \quad 0 \leq \frac{x}{c/2} \leq 1$$

Figura 3.3 Nomenclatura empleada en los análisis realizados en Plaxis 2D

De la figura anterior:

b es la altura de la muestra

h es la altura de la muestra a la cual se realizan los cortes

c es el ancho de la muestra

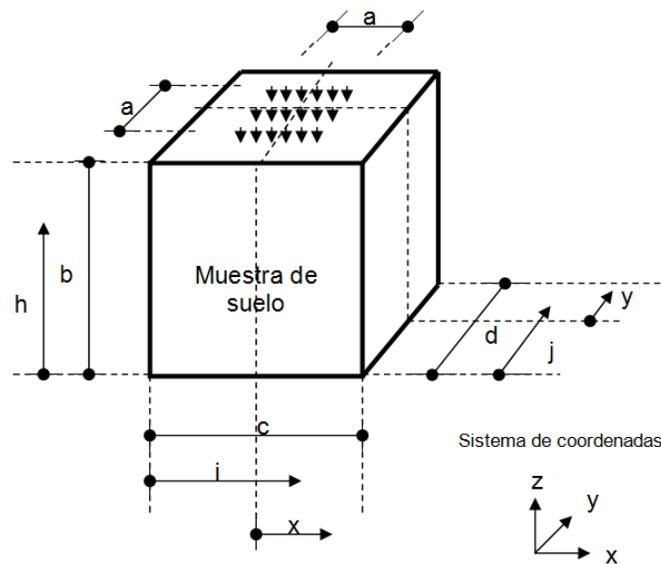
i es el ancho de la muestra a la cual se realizan los cortes

x es el semiancho de la muestra a la cual se realizan los cortes

En la tabla 3.1 se muestran las dimensiones de las probetas que se modelaron en esta investigación, con el software de elementos finitos (Plaxis 2D).

Tabla 3.1 Dimensiones de las probetas modeladas, siendo $b = c$

a (cm)	b (cm)	a/c
40	60	2/3
40	120	1/3
40	240	1/6
40	480	1/12
40	960	1/24



Donde: $0 \leq \frac{h}{b} \leq 1$, $0 \leq \frac{i}{c} \leq 1$, $0 \leq \frac{j}{d} \leq 1$, $0 \leq \frac{x}{c/2} \leq 1$ y $0 \leq \frac{y}{d/2} \leq 1$

Figura 3.4 Nomenclatura empleada en los análisis realizados en FLAC 3D

De la figura anterior:

a es el ancho de la carga aplicada

b es la altura de la muestra

h es la altura de la muestra a la cual se realizan los cortes

c es el ancho de la muestra

i es el ancho de la muestra a la cual se realizan los cortes

x es el semiancho de la muestra a la cual se realizan los cortes

d es la profundidad de la muestra

j es la profundidad de la muestra a la cual se realizan los cortes

y es la semiprofundidad de la muestra a la cual se realizan los cortes

En la tabla 3.2 se muestran las dimensiones de las probetas que se modelaron con el software de diferencias finitas (FLAC 3D).

Tabla 3.2 Dimensiones de las probetas modeladas, siendo $b = c = d$

a (cm)	b (cm)	a/c
40	60	2/3
40	120	1/3
40	240	1/6
40	480	1/12
40	960	1/24

Las propiedades del material “suelo” utilizado en las modelaciones, se supusieron tomando en cuenta estudios realizados por el profesor Raúl J. Marsal (1980), en los enrocamientos de las presas Malpaso y el Infiernillo. A los “actuadores” se les asignó las propiedades del acero. Los valores se muestran en las tablas 3.3 y 3.4.

Tabla 3.3 Parámetros empleados en las modelaciones numéricas en el material suelo

Parámetro	Magnitud
Módulo de elasticidad (E)	100 Mpa (1.0×10^3 kg/cm ²)
Módulo de deformación tangencial (G)	38 MPa (3.8×10^2 kg/cm ²)
Módulo de deformación volumétrica (K)	83 MPa (8.46×10^2 kg/cm ²)
Cohesión (c)	11.7 kPa (0.119 kg/cm ²)
Ángulo de fricción interna	40°
Relación de Poisson	0.3
Ley de comportamiento	Mohr-Coulomb

Tabla 3.4 Parámetros empleados en las modelaciones numéricas en el material de los actuadores

Parámetro	Magnitud
Módulo de elasticidad (E)	205 GPa (2.09×10^6 kg/cm ²)
Módulo de deformación tangencial (G)	78 GPa (7.95×10^5 kg/cm ²)
Módulo de deformación volumétrica (K)	17 GPa (1.73×10^5 kg/cm ²)
Relación de Poisson	0.3
Ley de comportamiento	Elástico-lineal

Los análisis se realizaron suponiendo los materiales sin peso, para evaluar únicamente los esfuerzos transmitidos por los actuadores.

MODELO EMPLEADO EN FLAC 3D

El modelo final en FLAC 3D (muestra y seis actuadores), se generó con 26112 elementos cúbicos tipo “brick-shaped mesh”, los cuales tienen una dimensión de 2.5 cm por lado, de los cuales 13824 corresponden a la muestra y 2048 a cada actuator. En la figura 3.5 se muestra un esquema de las geometrías elaboradas. Se llegó a dichas cifras buscando un equilibrio entre la precisión de los resultados y el tiempo de cómputo, después de haber efectuado varias modelaciones previas, de mallas con diferente número de elementos.

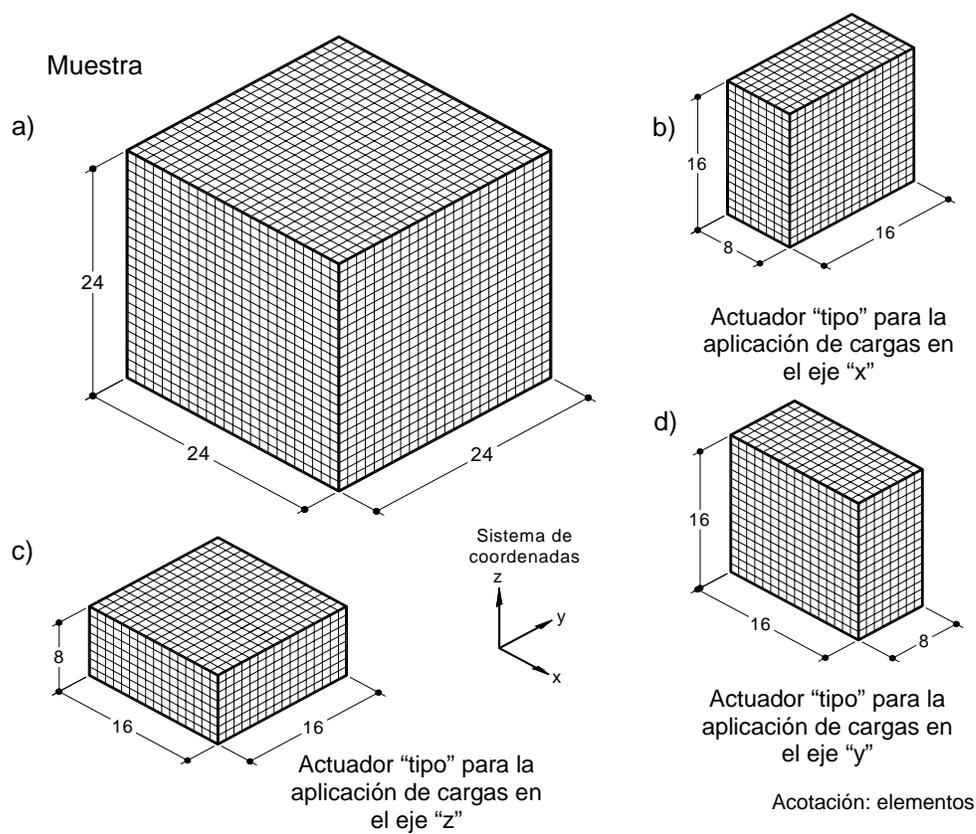


Figura 3.5 Diagrama de los elementos empleados en la modelación final en FLAC 3D

3.1.1 CALIBRACIÓN DEL SOFTWARE UTILIZADO

Ya que el modelo final (3D), en el que se representa la muestra y los seis actuadores (uno en cada cara) es relativamente complicado, se determinó empezar calibrando los resultados del software, presentando soluciones a problemas conocidos. La teoría de distribución de esfuerzos en una masa de suelo de Boussinesq, para una carga lineal de longitud infinita, fue el primer caso modelado.

Caso 1

En la figura (3.6) se muestra la distribución de esfuerzos obtenida mediante Plaxis 2D la cual se compara con una solución analítica del problema (Lambe, 2002).

El modelo del suelo tiene una sección transversal de 60 cm por 60 cm, se le aplicó una carga uniformemente distribuida de 100 kPa (1kg/cm^2) sobre una longitud de 20 cm (dimensión "a", según el modelo analítico). La placa del actuador en el modelo final medirá 40 cm por

40 cm, sin embargo, en esta primera aproximación al problema, se decidió aplicar una carga de las medidas antes mencionadas para minimizar los efectos de frontera al compararla con la solución analítica¹.

En la siguiente imagen se puede observar que ambas aproximaciones al problema tienen resultados similares.

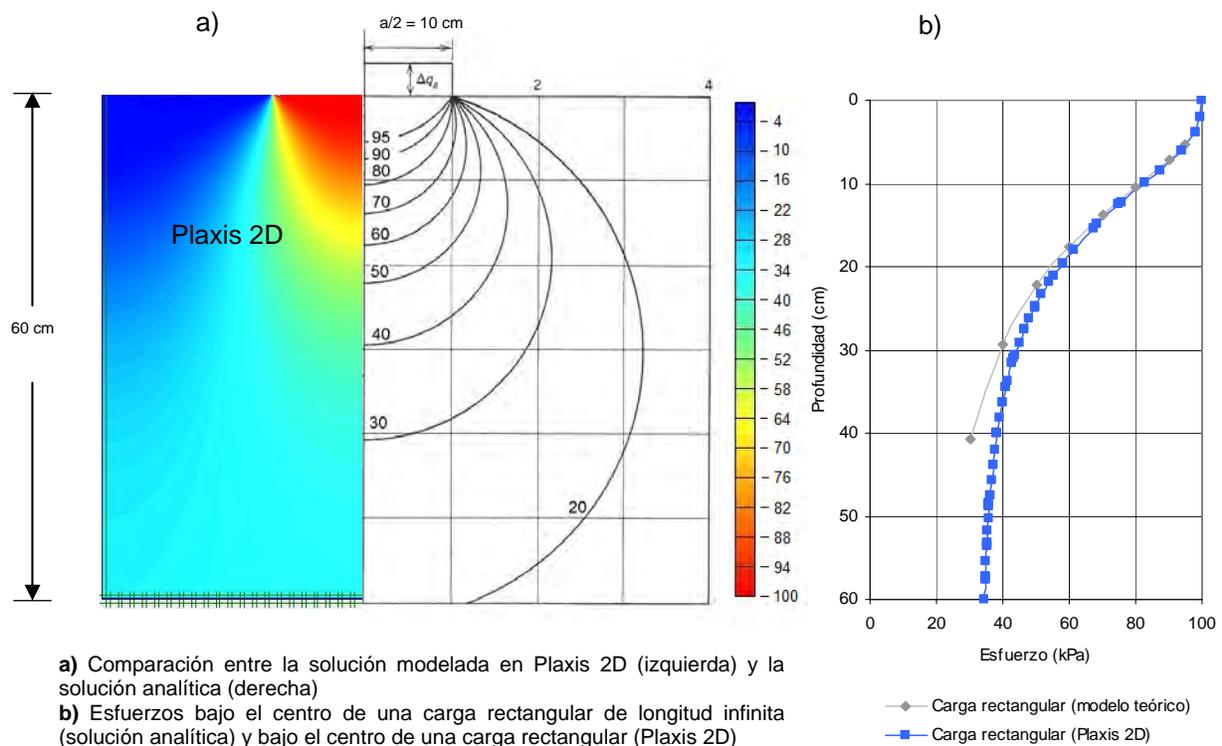


Figura 3.6 Distribución de esfuerzos de Boussinesq, comparada con el modelo numérico de una muestra de suelo de sección transversal de 60 cm por 60 cm, la carga aplicada fue de 100 kPa (1kg/cm^2) (Modificado de Lambe, 2002)

Caso 2

Se comparó la teoría de distribución de esfuerzos en una masa de suelo de Boussinesq, para una carga lineal de longitud infinita, con el modelo numérico en FLAC 3D, donde la carga aplicada es rectangular uniformemente distribuida, con una magnitud de 100 kPa (1kg/cm^2) sobre un cubo de 60 cm por lado (ver figura 3.7). Los resultados son similares en el centro de simetría de las figuras.

¹ En los anexos A1, A2, A3 y A4 se realiza un análisis de los efectos y las condiciones de frontera, tanto en modelos bidimensionales como tridimensionales, en términos de esfuerzos y deformaciones.

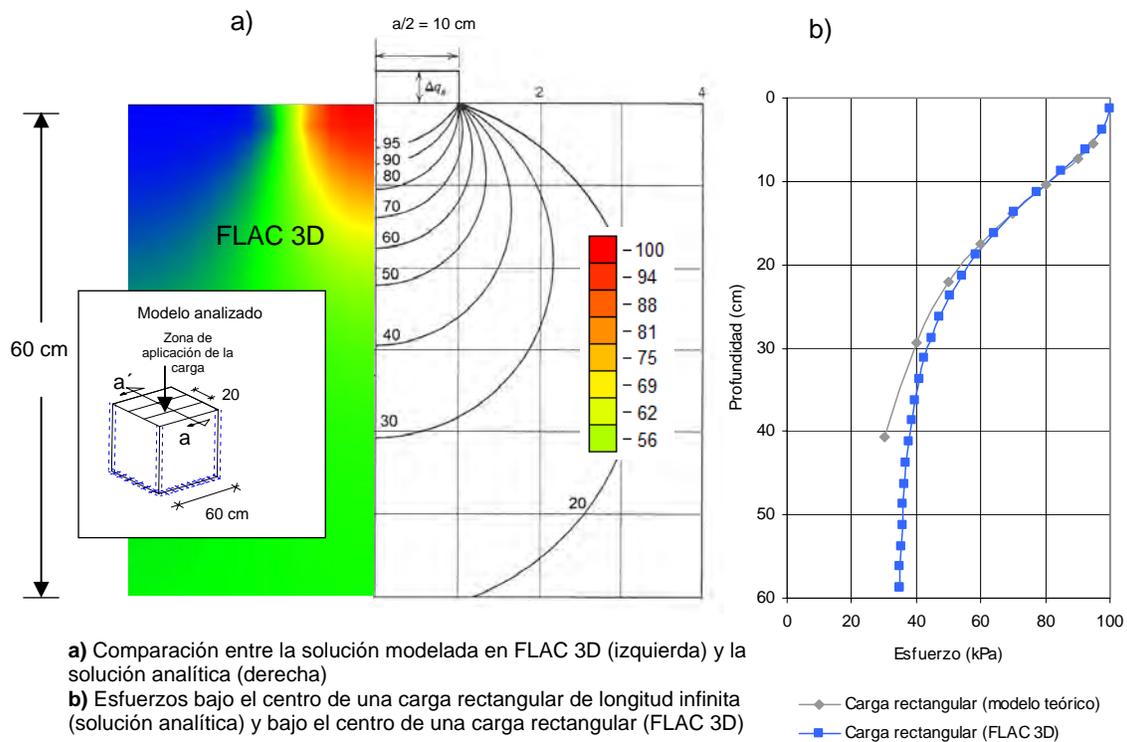


Figura 3.7 Distribución de esfuerzos de Boussinesq, comparada con el modelo numérico de una muestra de suelo de forma cúbica de 60 cm por lado, la carga aplicada fue de 100 kPa (1kg/cm²) con forma rectangular. (Modificado de Lambe, 2002)

Caso 3

Se modeló un cubo de material al cual se le aplica una carga uniformemente distribuida de forma cuadrada en la parte superior. Se buscó en la bibliografía una solución a este tipo de problema, sin embargo sólo se encontraron resultados de una distribución de esfuerzos bajo una carga circular (Lambe 2002). Con el propósito de hacer equivalente el área de aplicación de ambas cargas, ya que la zona de influencia de esfuerzos está en función de ésta, se utilizaron las siguientes relaciones:

$$A_{sa} = \pi r^2 \tag{1}$$

Donde:

A_{sa}.- Área del círculo donde se está aplicando la carga en la solución analítica

π.- Relación entre la longitud de una circunferencia y su diámetro ≈ 3.141592

r.- Radio de la circunferencia sobre la cual se aplica la carga

$$A_{mn} = L \cdot L \tag{2}$$

Donde:

A_{mn}.- Área del cuadrado sobre el cual se aplica la carga en el modelo numérico

L.- Longitud de un lado del cuadrado

Ya que el área de la circunferencia, debe ser igual que la del cuadrado, combinamos (1) y (2):

$$A_{sa} = \pi r^2 = A_{mn} = L \cdot L \quad (3)$$

$$\pi r^2 = L \cdot L \quad (4)$$

$$\pi r^2 = L^2 \quad (5)$$

Por último despejamos L de (5):

$$L = \sqrt{\pi r^2} \quad (6)$$

Si suponemos que en el modelo analítico se aplica una carga sobre un círculo de 10 cm de diámetro, el ancho del cuadrado equivalente mediría 17.72 cm \approx 18 cm. El siguiente paso fue modelar un cubo de material de 60 cm por lado al cual se le aplica una carga uniformemente distribuida de 100 kPa (1kg/cm²) sobre un área de 18 cm por 18 cm en sentido normal a su cara superior. En la figura 3.8 que se compara la solución numérica y la analítica, en ella se aprecia que la magnitud de los esfuerzos en el centro de simetría de los casos tratados, es similar.

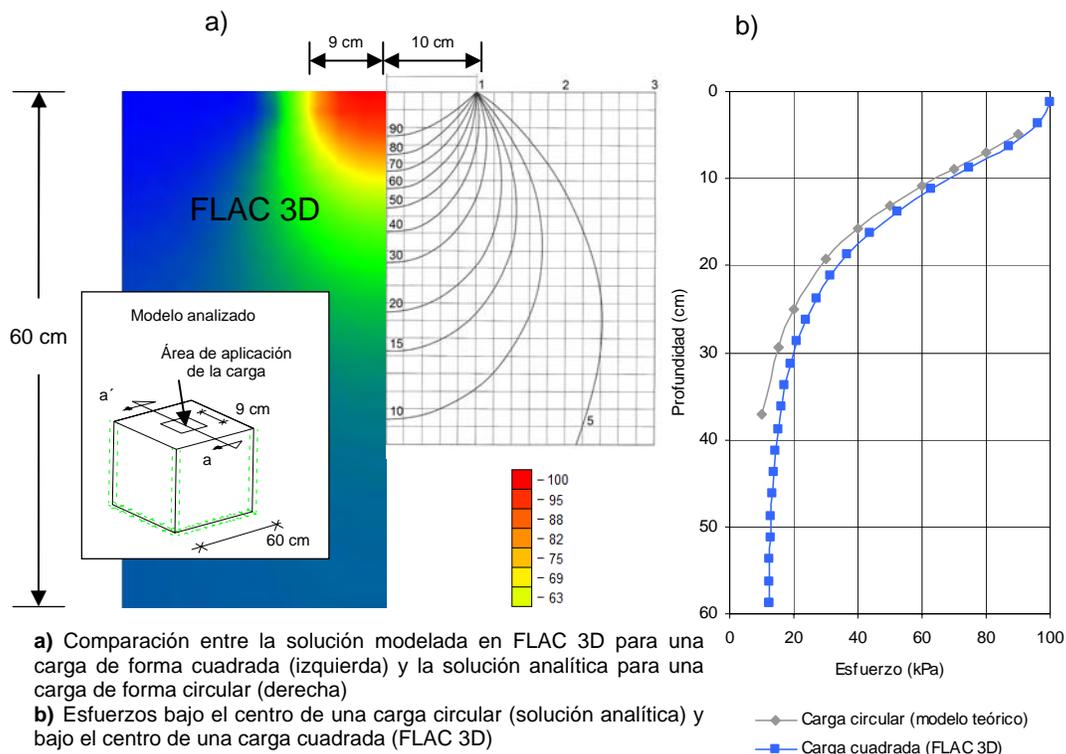
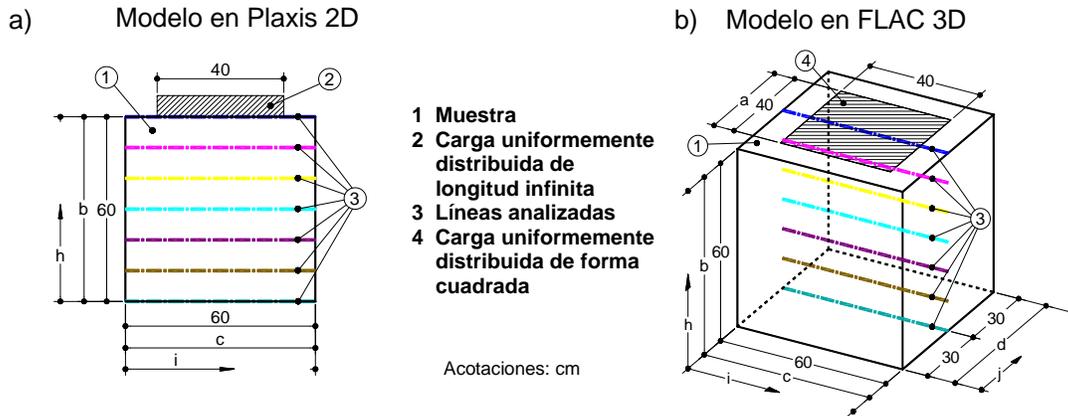


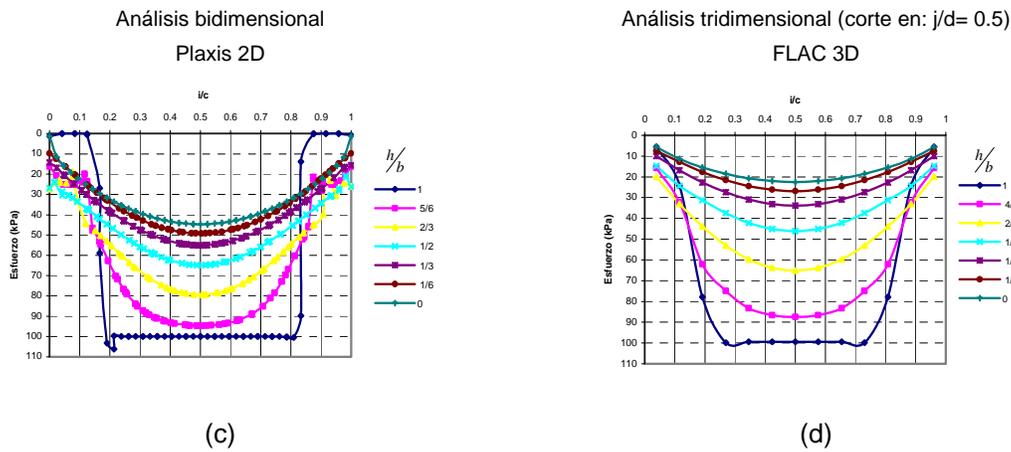
Figura 3.8 Comparación entre la distribución de esfuerzos en una muestra cúbica al aplicarle una carga de forma cuadrada uniformemente distribuida y la solución analítica debida a una carga circular uniformemente distribuida (Modificado de Lambe, 2002).

3.1.3 RESULTADOS DE LAS MODELACIONES

En la figura siguiente se muestran las gráficas de distribución de esfuerzos en la cara normal a la dirección z, en el eje z (σ_{zz}) para un cubo de 60 cm por 60 cm.



Los movimientos en las fronteras verticales de la muestra están restringidos en todas direcciones



Los movimientos en las fronteras verticales están restringidos sólo en sentido horizontal

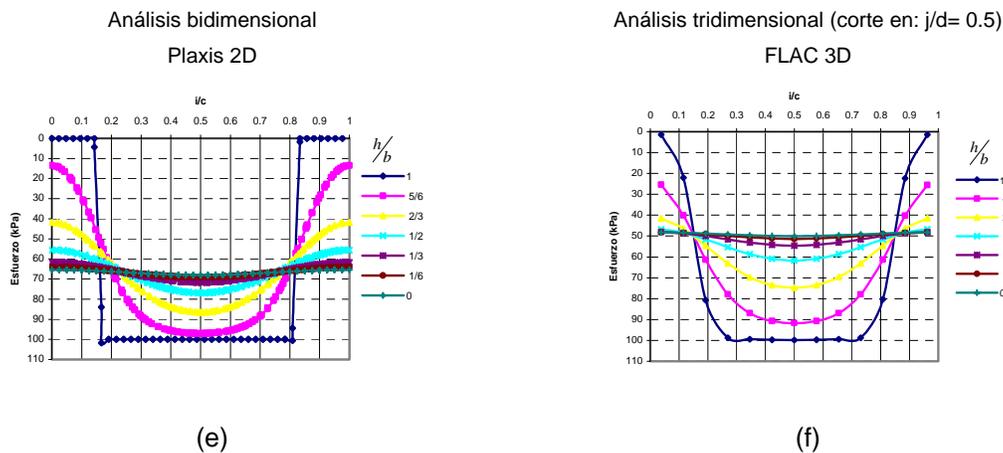


Figura 3.9 Análisis de las condiciones de frontera y el efecto tridimensional en las modelaciones

Las modelaciones se llevaron a cabo sobre una muestra que cuenta con las propiedades enunciadas en la tabla 3.1., a la cual se le aplicó una carga uniformemente distribuida de 100 kPa (1kg/cm²) (se utilizó esta presión en todos los análisis realizados para mantener los materiales dentro del rango elástico, al ocasionarles pequeñas deformaciones) sobre un área de 40 cm por 40 cm para los casos bidimensional y tridimensional. También se analizaron las condiciones de frontera, permitiendo el movimiento vertical de las caras verticales de la muestra en el primer caso y fijando las caras verticales de la muestra en todos los sentidos en el segundo.

En las gráficas anteriores (figura 3.9) se aprecia el incremento en los esfuerzos dentro de la muestra con relación a la profundidad, cuando se permite en el modelo los desplazamientos de las fronteras verticales en sentido vertical (el efecto de arqueado se minimiza), por ejemplo, si observamos los esfuerzos a la mitad de la muestra ($h/b=1/2$) en la figura 3.9e, notamos que son mayores que en la figura 3.9c para el mismo corte, lo mismo ocurre en el modelo tridimensional (figuras 3.9f y 3.9d). Se analizaron estos dos casos extremos para tomar en cuenta cómo influirá la condición de frontera en las caras de la muestra, en la distribución de esfuerzos dentro del cubo triaxial. En las figuras anteriores también se nota claramente un efecto tridimensional, en la reducción de los esfuerzos transmitidos en relación con la profundidad en el modelo en 3D.

3.1.3.1 COLOCACIÓN DE UNA INTERFAZ ENTRE LOS ACTUADORES Y LA MUESTRA

Una interfaz en FLAC 3D, es una conexión entre dos sub-mallas de tal forma que éstas se pueden separar, una interfaz puede representar una discontinuidad tal como una falla, o un plano de contacto. Se utilizó una interfaz con objeto de permitir el movimiento relativo entre los actuadores y el suelo, buscando representar de forma más precisa el comportamiento real del sistema. En los modelos numéricos realizados, el software calcula los esfuerzos normales y cortantes que están actuando en cada nodo de la interfaz y después se los trasfiere a la probeta.

Para caracterizar la interfaz, el software requiere los valores del módulo de rigidez normal (k_n), el módulo de rigidez al corte (k_s) y el ángulo de fricción de la interfase, el valor asignado para éste último fue de 40°, al igual que el ángulo de fricción interna del suelo. Por otro lado, cuando no se cuenta con datos experimentales para los valores de k_n y k_s , una buena práctica es asignarle a la rigidez normal un valor hasta diez veces más grande que la rigidez del medio en que se encuentra, dicho valor se puede calcular por medio de la siguiente formula:

$$k_n = \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{\min}}$$

Donde:

k_n .- Módulo de rigidez normal

K.- Módulo de deformación volumétrica

G.- Módulo de deformación tangencial

Δz_{\min} .- El ancho más pequeño de la zona circundante en la dirección normal (ver figura 3.10)

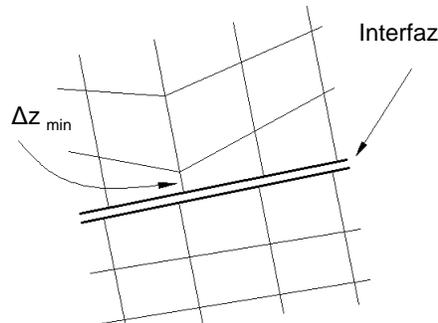


Figura 3.10.- Dimensiones de las zonas usadas en el cálculo de la rigidez

(Manual FLAC 3D)

En 1975, Kulhawy realizó una serie de estudios en las discontinuidades de varios macizos rocosos, con ello logró definir una relación entre el módulo de rigidez normal (k_n) y el de rigidez al corte (k_s), la expresión que obtuvo se muestra a continuación:

$$k_s = \frac{k_n}{2(1 + \nu)}$$

Donde:

k_s .- Módulo de rigidez al corte

k_n .- Módulo de rigidez normal

ν .- Relación de Poisson

Los parámetros utilizados para la caracterización de la interfaz, fueron los del suelo (ver tabla 3.3).

Las propiedades que se le asignaron a la interfase, fueron las que mencionan en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Parámetros empleados en las modelaciones numéricas en la interfaz

Parámetro	Magnitud
Coficiente de rigidez normal (k_n)	5.59 GPa/m ($5.70 \times 10^2 \text{ kg/cm}^3$)
Coficiente de rigidez al corte (k_s)	2.15 GPa/m ($2.19 \times 10^2 \text{ kg/cm}^3$)
Δz_{\min} (m)	0.025
Ángulo de fricción	40°

3.1.3.2 ANÁLISIS DE LA PRESIÓN DE CONTACTO ENTRE MUESTRA Y ACTUADORES

Ya que la carga se aplicará mediante placas cuadradas de 20 cm de espesor, se consideró importante analizar el cambio en la distribución de esfuerzos debida a la rigidez de ésta, con respecto a la aplicación de una carga uniformemente distribuida.

Boussinesq desarrolló la siguiente ecuación, para el caso de una carga aplicada mediante una placa perfectamente rígida de longitud infinita como se ilustra en la figura 3.11 (Carrillo, 1948).

$$q_x = \frac{P}{\pi\sqrt{b^2 - x^2}}$$

Donde:

q_x - Presión de contacto entre placa y suelo

P.- Carga por unidad de longitud aplicada sobre la placa

π .- Relación entre la longitud de una circunferencia y su diámetro ≈ 3.141592

b.- Semiancho de la placa con que se aplica la carga

x.- Distancia horizontal medida a partir del centro de la placa, a la que se quiere conocer la presión de contacto con el suelo

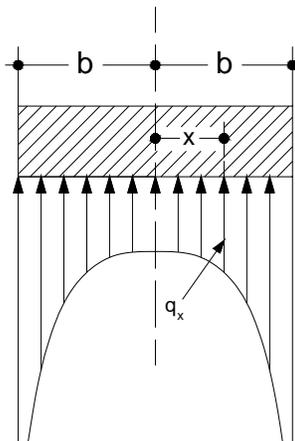


Figura 3.11 Caso Boussinesq para una carga aplicada mediante una placa perfectamente rígida de longitud infinita

Luego se comparó la solución de Boussinesq con los esfuerzos obtenidos de las modelaciones en FLAC 3D, bajo una placa de acero de 20 cm de espesor y un área de 40 cm por 40 cm, a la cual se aplica una carga de 100 kPa (1kg/cm^2), dicha placa se encuentra sobre un cubo de 60 cm por lado que tiene asignadas las propiedades que se muestran en la tabla 3.4.

Se modelaron los dos casos siguientes:

Caso I.- Los movimientos en las fronteras verticales de la muestra están restringidos en todas direcciones

Caso II.- Los movimiento en las fronteras verticales de la muestra están restringidos en sentido horizontal

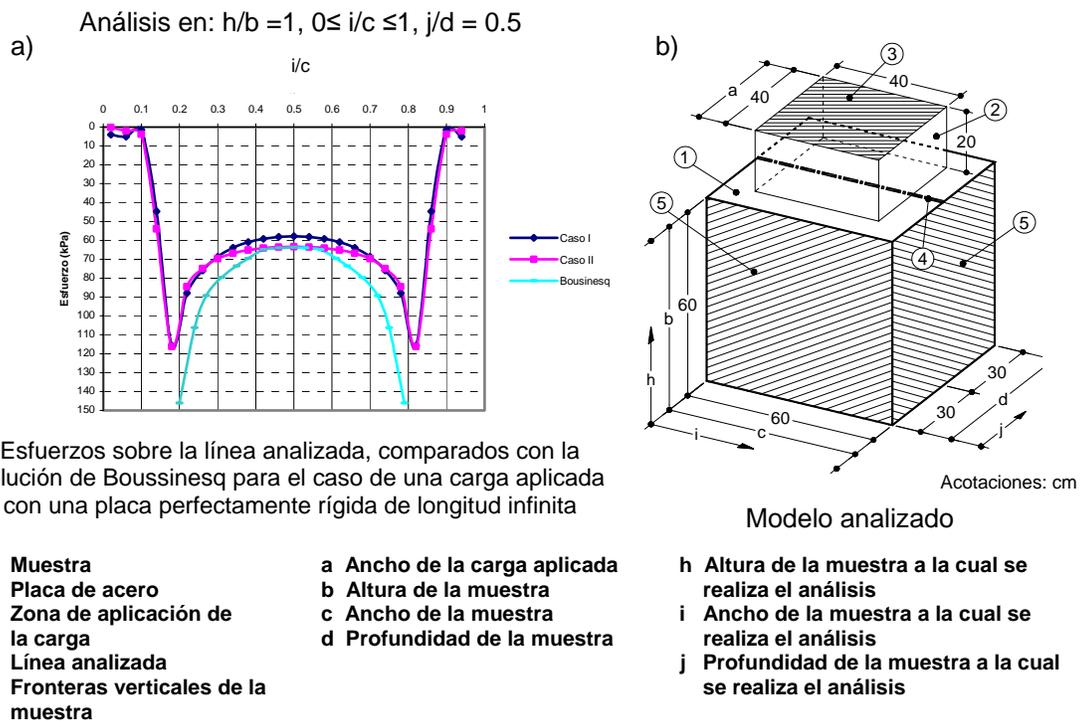
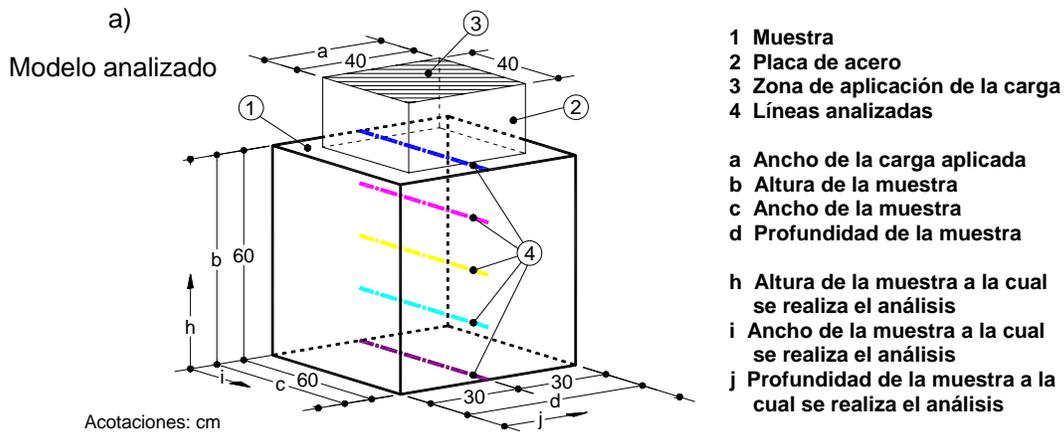


Figura 3.12 Comparación entre las modelaciones realizadas en FLAC 3D, con respecto a la solución de Boussinesq para una placa perfectamente rígida de longitud infinita

En la gráfica anterior (figura 3.12) se aprecia la concordancia entre el modelo teórico y el experimental, considerando que el modelo desarrollado por Boussinesq es para un caso bidimensional y la placa con que se aplica la carga se considera infinitamente rígida.

En la siguiente figura (3.13) se muestran los esfuerzos a diferentes profundidades para el caso anteriormente modelado².

² En el anexo A5, A6, A7 y A8 se pueden ver gráficas de los esfuerzos y desplazamientos en otros cortes realizados a la muestra, para las dos condiciones de frontera, empleando un actuador y dos actuadores, en términos de esfuerzos en la

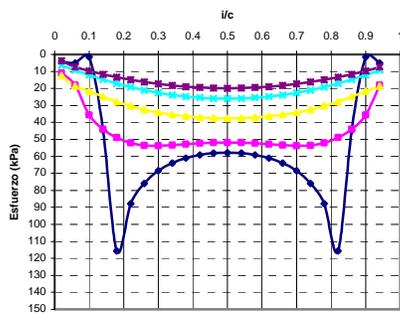


Los movimientos en las fronteras verticales de la muestra están restringidos en todas direcciones

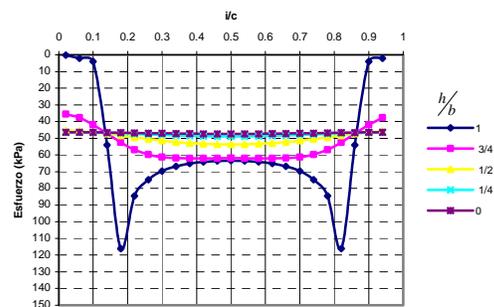
Los movimientos en las fronteras verticales de la muestra están restringidos en sentido horizontal

FLAC 3D

FLAC 3D



(b)

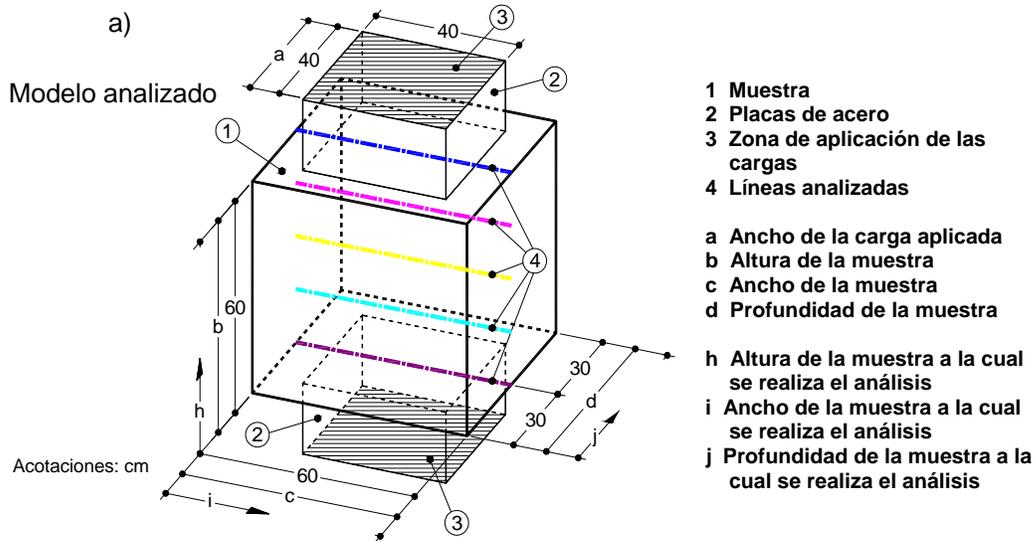


(c)

Figura 3.13 Distribución de esfuerzos (σ_{zz}) dentro de la muestra, empleando un actuador rígido en la aplicación de la carga

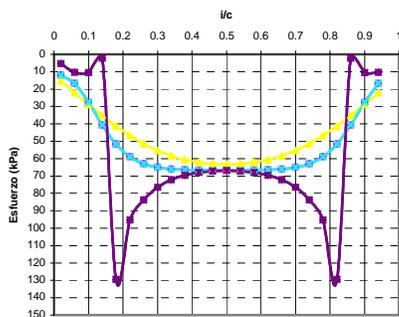
Después se aumentó un actuador en la parte inferior de la probeta de suelo, como paso intermedio hacia el modelo en que se emplean seis actuadores, ya que se deseaba verificar, que se formara una distribución de esfuerzos simétrica con respecto a un plano horizontal que cortara la muestra por la mitad (ver figura 3.14).

cara normal a la dirección z, en el eje z (σ_{zz}), esfuerzos normales octaédricos (σ_{oct}) y esfuerzos cortantes octaédricos (τ_{oct})



Los movimientos en las fronteras verticales de la muestra están restringidos en todas direcciones

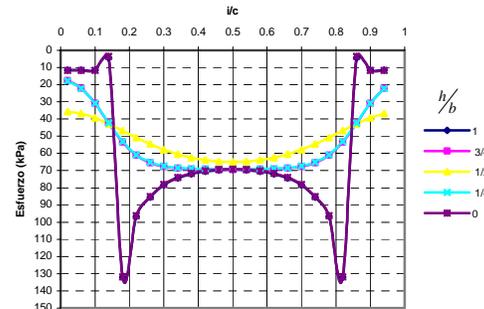
FLAC 3D



(b)

Los movimientos en las fronteras verticales de la muestra están restringidos en sentido horizontal

FLAC 3D



(c)

Figura 3.14 Distribución de esfuerzos (σ_{zz}) dentro de la muestra, empleando dos actuadores rígidos en la aplicación de la carga

En las figuras anteriores se destacan dos aspectos, primero la uniformidad de los esfuerzos a lo largo del eje z, para cortes equidistantes de las fronteras verticales (por ejemplo cuando b/h es 0 ó 1, así como para cuando h/b toma los valores de 1/4 y 3/4) y el aumento de éstos en toda la muestra con relación a la modelación con un solo actuador, incluso en la zona de contacto de las placas con que se aplican las cargas.

También en este caso se aprecia que el efecto de arqueo se minimiza cuando se permite el movimiento de las fronteras verticales en sentido vertical (ver la distribución de esfuerzos en los puntos c/i cuando toma los valores de 0 y 1 en las figuras 3.14(b) y 3.14(c)).

Como resultado de agregar un actuador en la parte inferior, los esfuerzos en la parte media de la muestra, (cuando b/h toma el valor de $1/2$) se incrementaron en un 155 %, cuando se restringen los movimientos en las fronteras verticales en todas direcciones y en 120 %, para el caso en que se permite el movimiento de las fronteras verticales en sentido vertical, con respecto a la modelación en donde se aplica la carga con un actuador en la parte superior.

4.1.3.3 CONDICIONES DE FRONTERA EN LA MODELACIÓN FINAL

El movimiento de los actuadores está restringido en las direcciones normales al sentido de aplicación de la carga, mientras que en la muestra se restringen los movimientos en sentido normal a las caras en las zonas que no están en contacto con los actuadores (ver figura 3.15). La zona de la muestra que está en contacto con los actuadores no tiene restricciones de movimiento, de esta manera la interacción actuador-suelo se lleva a cabo de la siguiente forma: el actuador transmite una presión de contacto las interfaces que se encuentran entre los actuadores y el material suelo, el software calcula los esfuerzos normales y cortantes que están actuando en cada nodo de la interfaz y después se los trasfiere a la probeta.

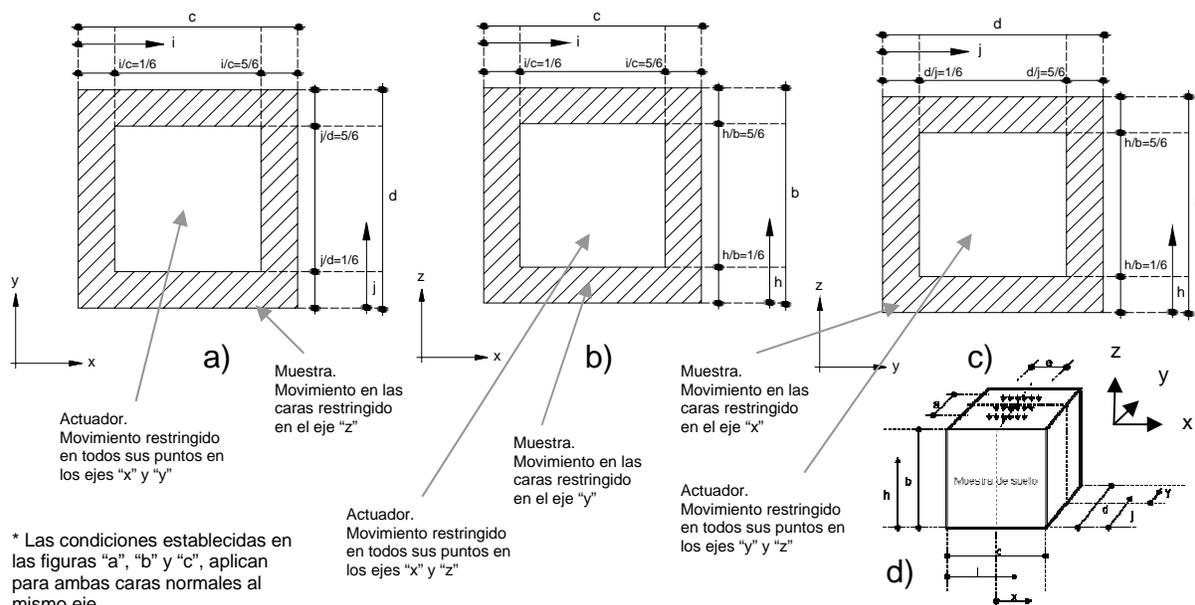


Figura 3.15 Condiciones de frontera en la modelación final

3.1.3.4 MODELACIÓN FINAL

Como último paso se modeló una probeta de 60 cm por lado y se le aplicaron cargas con seis actuadores (uno en cada cara) (ver figura 3.16). Se obtuvieron esfuerzos en la cara z en la dirección z para compararlas con los casos anteriores, y se buscó una representación que tomara

en cuenta el efecto tridimensional de las cargas aplicadas, por ello se obtuvieron también las distribuciones de esfuerzos normales octaédricos y cortantes octaédricos dentro de la muestra. Los resultados obtenidos aparecen en las gráficas de las figuras 3.17 a la 3.32³.

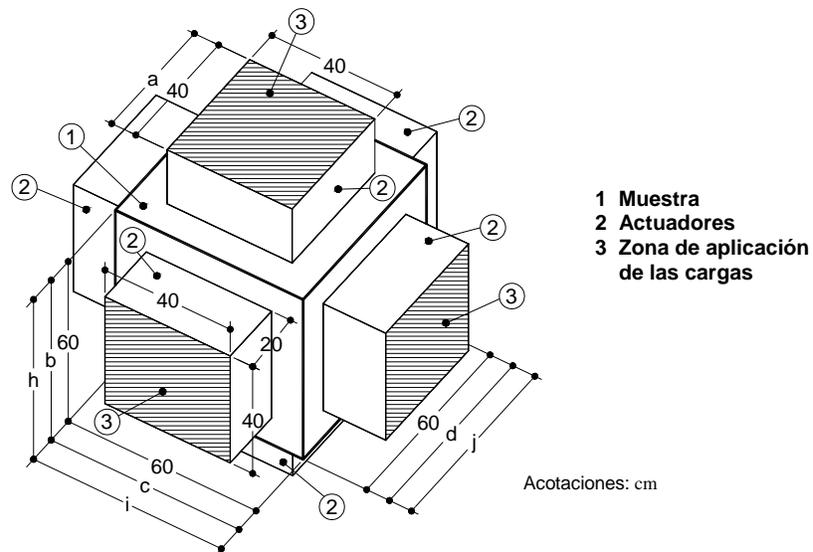


Figura 3.16 Modelo final

³ En el anexo A9 se muestran los desplazamientos en diferentes cortes de la muestra. Adicionalmente, se modeló un caso en que se aplica a la muestra una carga de 200 kPa ($1\text{kg}/\text{cm}^2$) con todos los actuadores y otro en el que se le aplica 100 kPa ($1\text{kg}/\text{cm}^2$) con todos los actuadores y después una carga en incrementos de 100 kPa ($1\text{kg}/\text{cm}^2$) en la parte superior, hasta llegar a los 400 kPa ($4\text{kg}/\text{cm}^2$). Los resultados y conclusiones se pueden encontrar en los anexos A10 y A11, en términos de esfuerzos en las caras z dirección z, normales octaédricos y cortantes octaédricos.

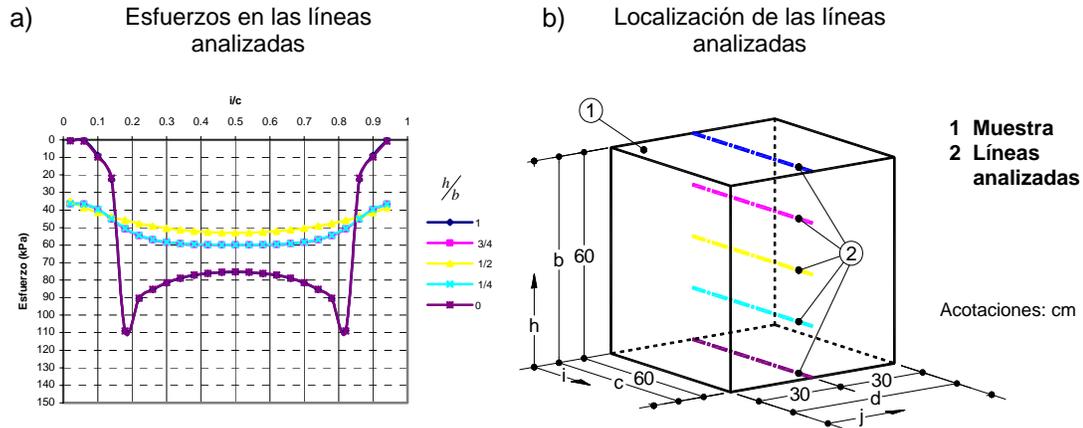


Figura 3.17 Esfuerzos en las caras z dirección z (corte en $j/d=0.5$)

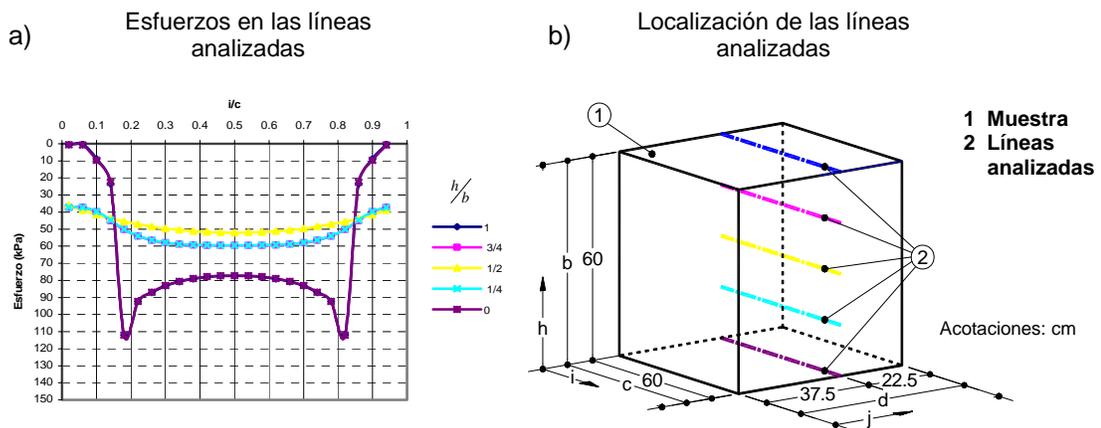


Figura 3.18 Esfuerzos en las caras z dirección z (corte en $j/d=0.625$)

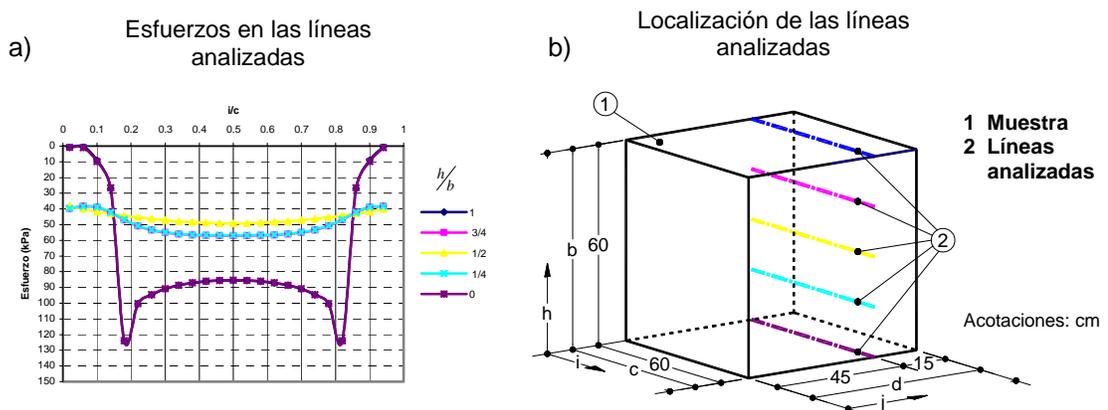


Figura 3.19 Esfuerzos en las caras z dirección z (corte en $j/d=0.75$)

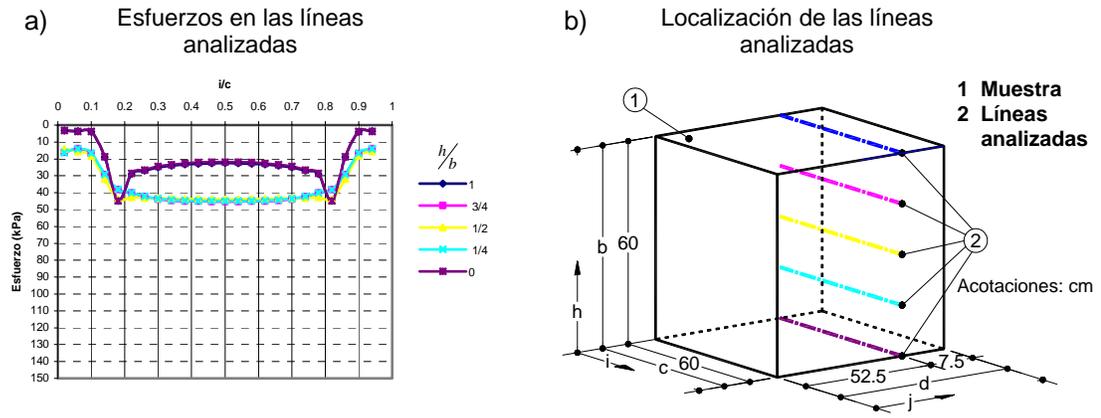


Figura 3.20 Esfuerzos en las caras z dirección z (corte en $j/d=0.875$)

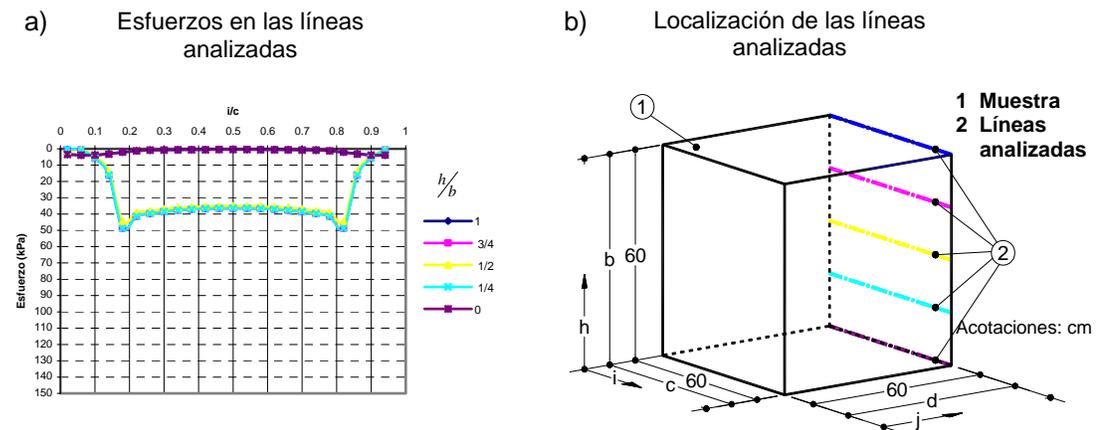


Figura 3.21 Esfuerzos en las caras z dirección z (corte en $j/d=1$)

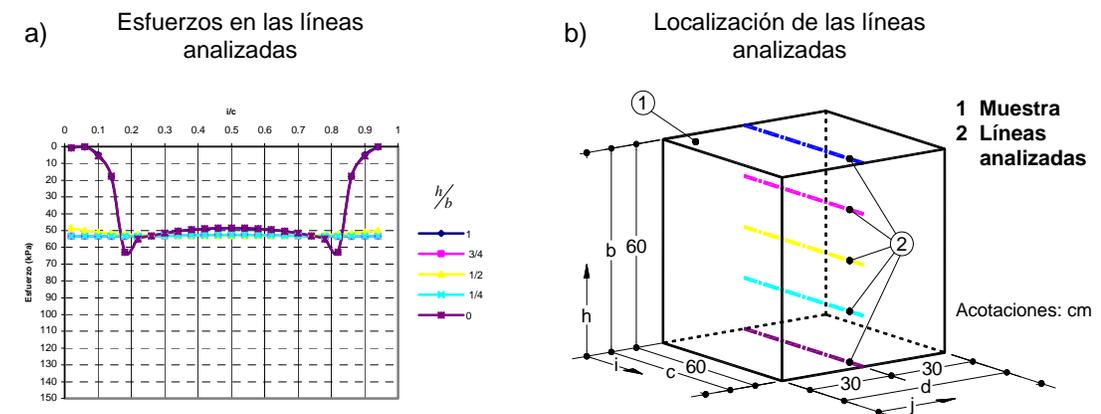


Figura 3.22 Distribución de esfuerzos normales octaédricos dentro de la muestra (corte en $j/d=0.5$)

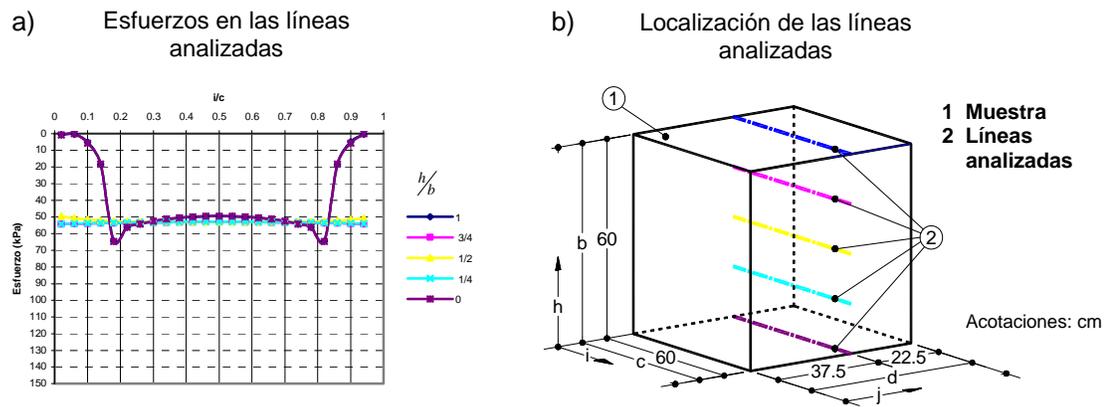


Figura 3.23 Distribución de esfuerzos normales octaédricos dentro de la muestra (corte en $j/d=0.625$)

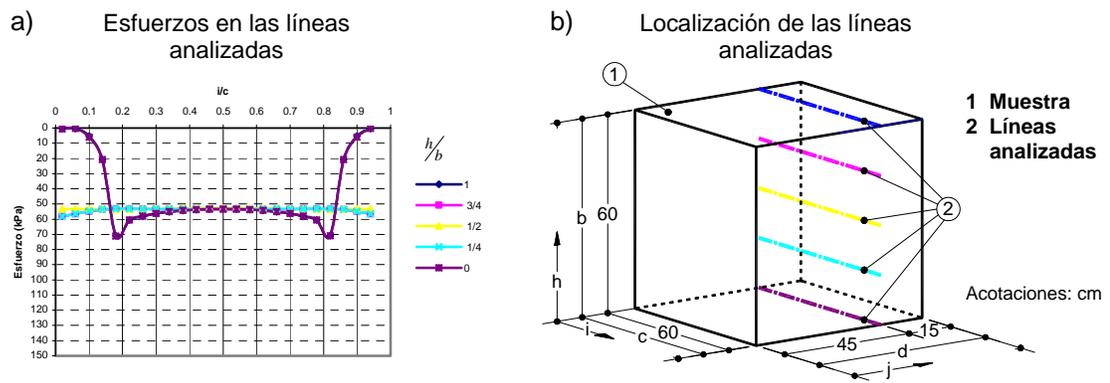


Figura 3.24 Distribución de esfuerzos normales octaédricos dentro de la muestra (corte en $j/d=0.75$)

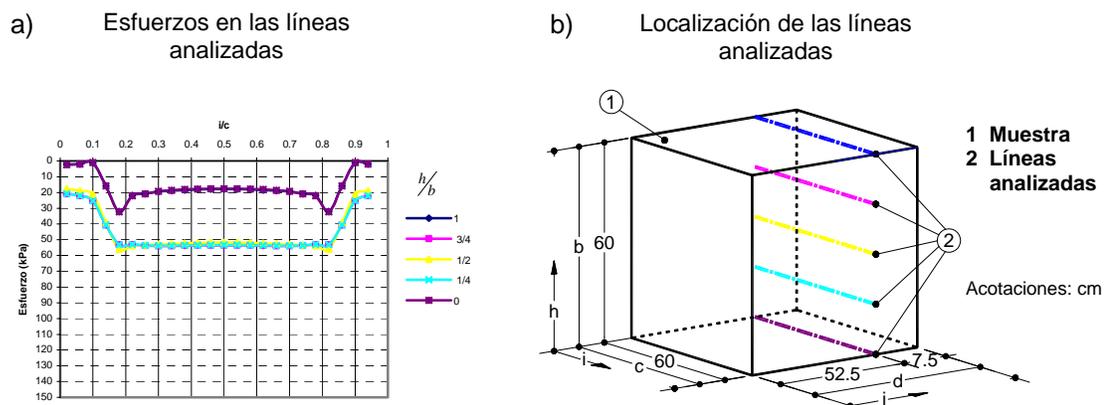


Figura 3.25 Distribución de esfuerzos normales octaédricos dentro de la muestra (corte en $j/d=0.875$)

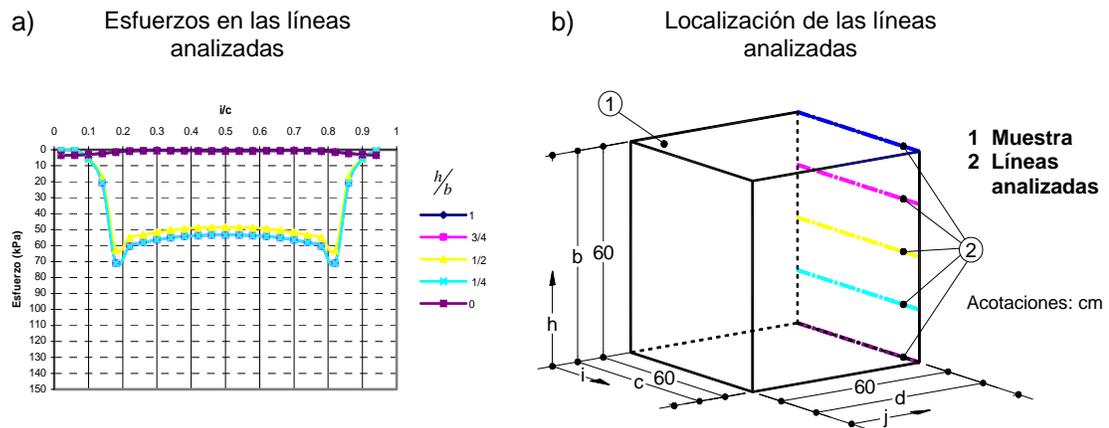


Figura 3.26 Distribución de esfuerzos normales octaédricos dentro de la muestra (corte en $j/d=1$)

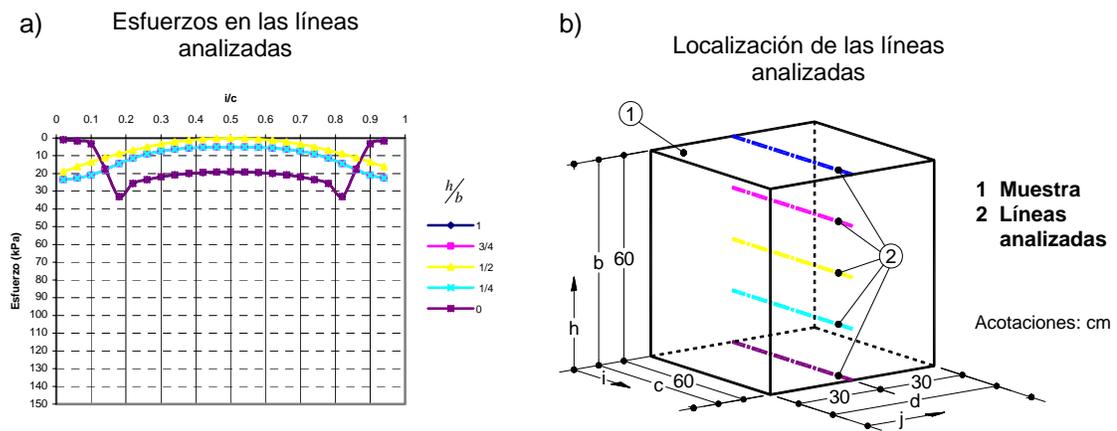


Figura 3.27 Distribución de esfuerzos cortantes octaédricos dentro de la muestra (corte en $j/d=0.5$)

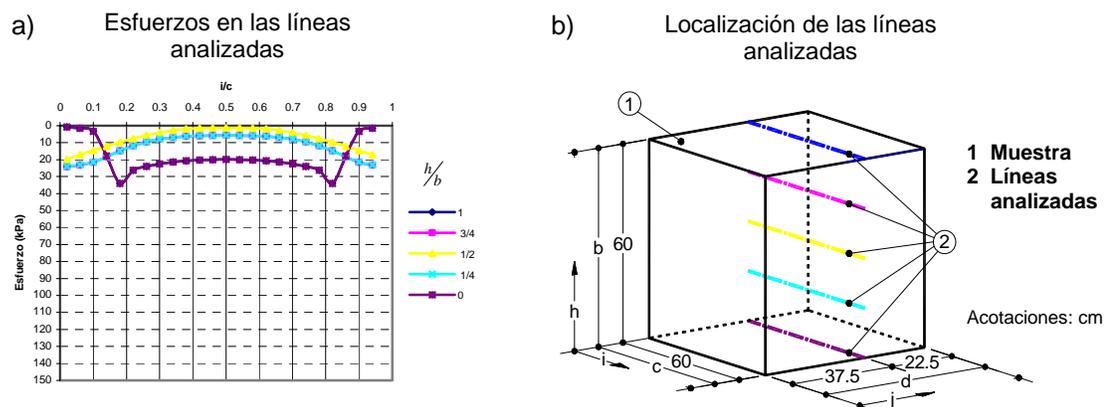


Figura 3.28 Distribución de esfuerzos cortantes octaédricos dentro de la muestra (corte en $j/d=0.625$)

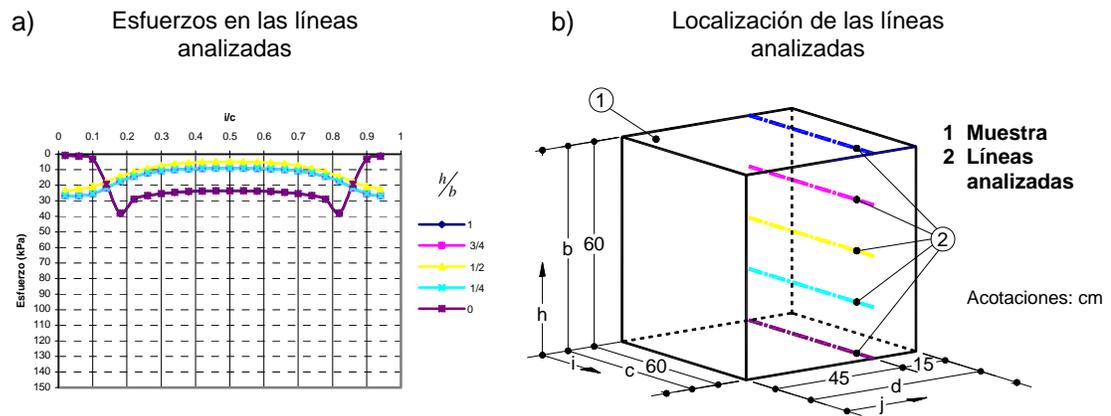


Figura 3.29 Distribución de esfuerzos cortantes octaédricos dentro de la muestra (corte en $j/d=0.75$)

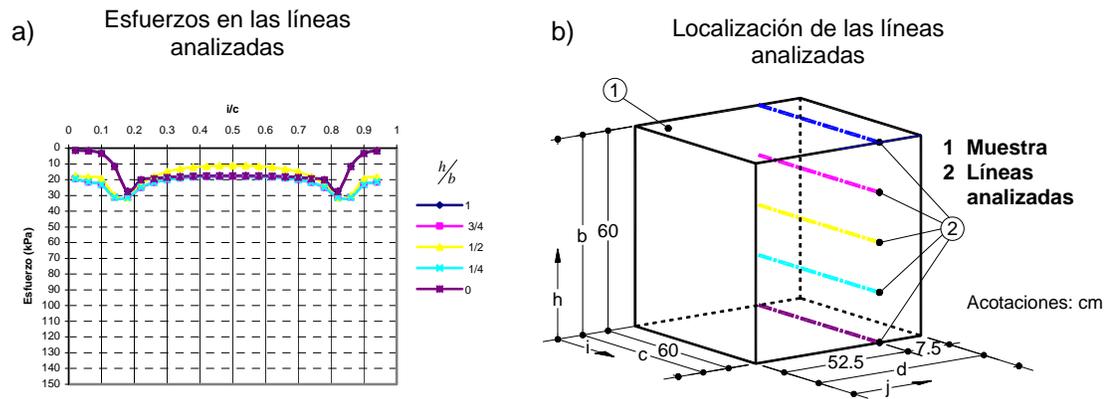


Figura 3.30 Distribución de esfuerzos cortantes octaédricos dentro de la muestra (corte en $j/d=0.875$)

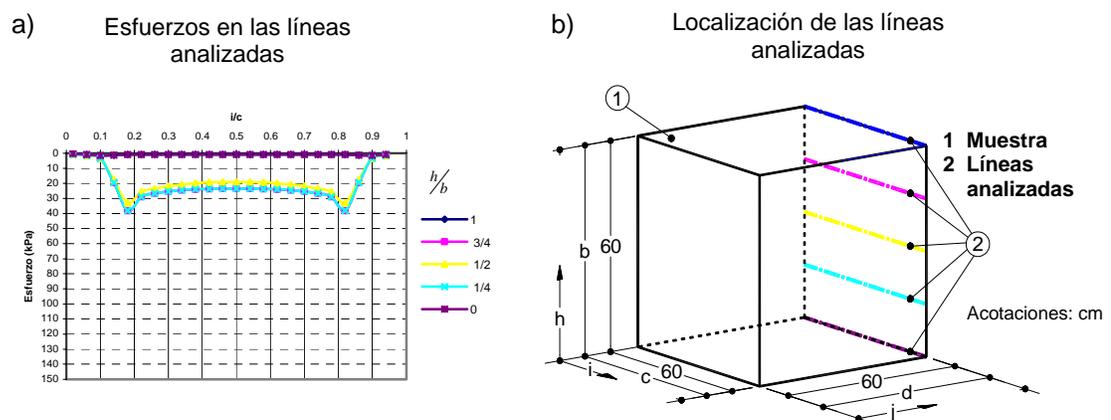


Figura 3.31 Distribución de esfuerzos cortantes octaédricos dentro de la muestra (corte en $j/d=1$)

De las gráficas anteriores (3.22 a la 3.31) se puede concluir, que aunque se están empleando actuadores de tipo rígido y como se ha establecido en el capítulo 1: en los cubos triaxiales en los que se aplican las cargas con actuadores de tipo “rígido” no se busca una uniformidad en los esfuerzos, la modelación está definiendo una zona (ver figuras 3.32) en la que tanto los esfuerzos normales y cortantes octaédricos son uniformes. En un cubo de 60 cm por lado esta mediría 30 cm por lado.

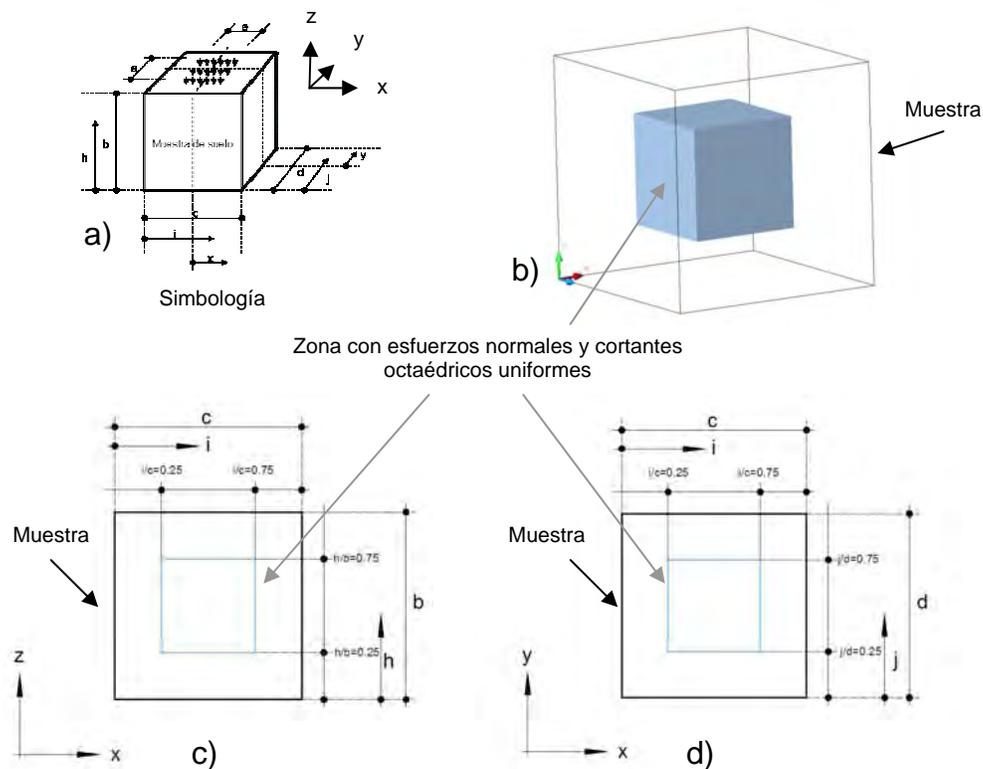


Figura 3.32 De las gráficas que aparecen en las figuras 3.21 a la 3.30 se puede concluir que existe una zona en la que los esfuerzos normales y cortantes octaédricos son homogéneos

Otro punto a tener en cuenta es que a la cara de la zona de esfuerzos normales y cortantes octaédricos uniformes, llega el 60 % del esfuerzo normal aplicado con los actuadores (ver figura 3.17 esfuerzos en el eje zz).

ANÁLISIS DE SENSITIVIDAD VARIANDO LAS PROPIEDADES EN LA INTERFAZ

En el capítulo 3 se mencionó que las características de la interfaz que se coloca entre los actuadores y el suelo influyen en la distribución de esfuerzos dentro de la muestra, también se dijo que es recomendable colocar un material antifriccionante entre los actuadores y la muestra, con objeto de disminuir los esfuerzos cortantes que se generan entre ellos y con esto el efecto de

arqueo, por ello se hizo un análisis de sensibilidad variando el módulo de reacción normal (k_n), el módulo de reacción al cortante (k_s) y el ángulo de fricción en la interfaz actuador-suelo.

El módulo de reacción aplicado a la interfaz que se empleó en las modelaciones realizadas el capítulo anterior, se calculó empleando la siguiente relación que marca el fabricante del software (FLAC 3D) cuando no se tienen datos experimentales sobre las propiedades mecánicas de la interfaz.

$$k_n = \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{\min}}$$

Donde:

k_n .- Módulo de rigidez normal

K.- Módulo de deformación volumétrica

G.- Módulo de deformación tangencial

Δz_{\min} .- El ancho más pequeño de la zona circundante en la dirección normal

El módulo de reacción al cortante se calculó siguiendo la recomendación de Kulhawy (1975) según la cual:

$$k_s = \frac{k_n}{2(1 + \nu)}$$

Donde:

k_s .- Módulo de rigidez al corte

k_n .- Módulo de rigidez normal

ν .- Relación de Poisson

El módulo de deformación tangencial (G) y el módulo de deformación volumétrica (K) utilizados para la caracterización de la interfaz, en las modelaciones donde no se analiza la sensibilidad de los esfuerzos con relación a la interfaz empleada se muestran en la tabla 3.3, las propiedades que se le asignaron a la interfaz en dichos casos son las que mencionan en la tabla 3.5.

Como primera etapa en el análisis de sensibilidad, se varió el valor de los módulos de reacción normal (k_n) y al esfuerzo cortante (k_s) disminuyéndolos uno y dos grados de magnitud respectivamente.

De esta forma, los parámetros asignados a la interfaz en la primera modelación fueron los que aparecen en la tabla 3.6

Tabla 3.6 Parámetros empleados en las modelaciones numéricas en la interfase en la primera modelación

Parámetro	Magnitud
Coeficiente de rigidez normal (k_n)	0.559 GPa/m (57 kg/cm ³)
Coeficiente de rigidez al corte (k_s)	0.215 GPa/m (21 kg/cm ³)
Δz_{\min} (m)	0.025
Ángulo de fricción	40°

Los parámetros utilizados en la interfaz para la segunda modelación fueron los que se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Parámetros empleados en las modelaciones numéricas en la interfaz en la segunda modelación

Parámetro	Magnitud
Coeficiente de rigidez normal (k_n)	55.9 MPa/m (5.70 kg/cm ³)
Coeficiente de rigidez al corte (k_s)	21.5 MPa/m (2.19 kg/cm ³)
Δz_{\min} (m)	0.025
Ángulo de fricción	40°

Adicionalmente, se realizó una tercera modelación, ahora aumentando el valor de los módulos de reacción normal (k_n) y de cortante (k_s), los valores utilizados se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Parámetros empleados en las modelaciones numéricas en la interfaz en la tercera modelación

Parámetro	Magnitud
Coeficiente de rigidez normal (k_n)	5.59 TPa (5.70x10 ⁵ kg/cm ³)
Coeficiente de rigidez al corte (k_s)	2.15 TPa (2.19x10 ⁵ kg/cm ³)
Δz_{\min} (m)	0.025
Ángulo de fricción	40°

A continuación se muestran los resultados obtenidos en términos de esfuerzos normales octaédricos⁴.

En la figura siguiente (3.33), los casos “b” y “e” son similares, por lo tanto, el incrementar los valores de k_n y k_s hasta 3 órdenes de magnitud, no influye en la magnitud o distribución de los esfuerzos dentro de la muestra. Por otro lado, el caso en donde los esfuerzos normales octaédricos son más uniformes, es cuando $k_n=0.559$ GPa (5.70x10³ kg/cm²) y $k_s=0.215$ GPa (2.19x10³ kg/cm²) por lo que se recomienda emplear una interfaz con módulos de rigidez en este rango de valores.

⁴ Análisis en términos de esfuerzos en las caras z dirección z (σ_{zz}), esfuerzos normales octaédricos y esfuerzos cortantes octaédricos para diversos cortes dentro de la muestra, se puede apreciar en el anexo A12.

Adicionalmente, se realizó un análisis variando el ángulo de fricción en la interfaz actuador-muestra, en la figura 3.34 se muestran los resultados en términos de esfuerzos normales octaédricos para los casos en que toma el valor de 40°, 20°, 10° y 0°⁵.

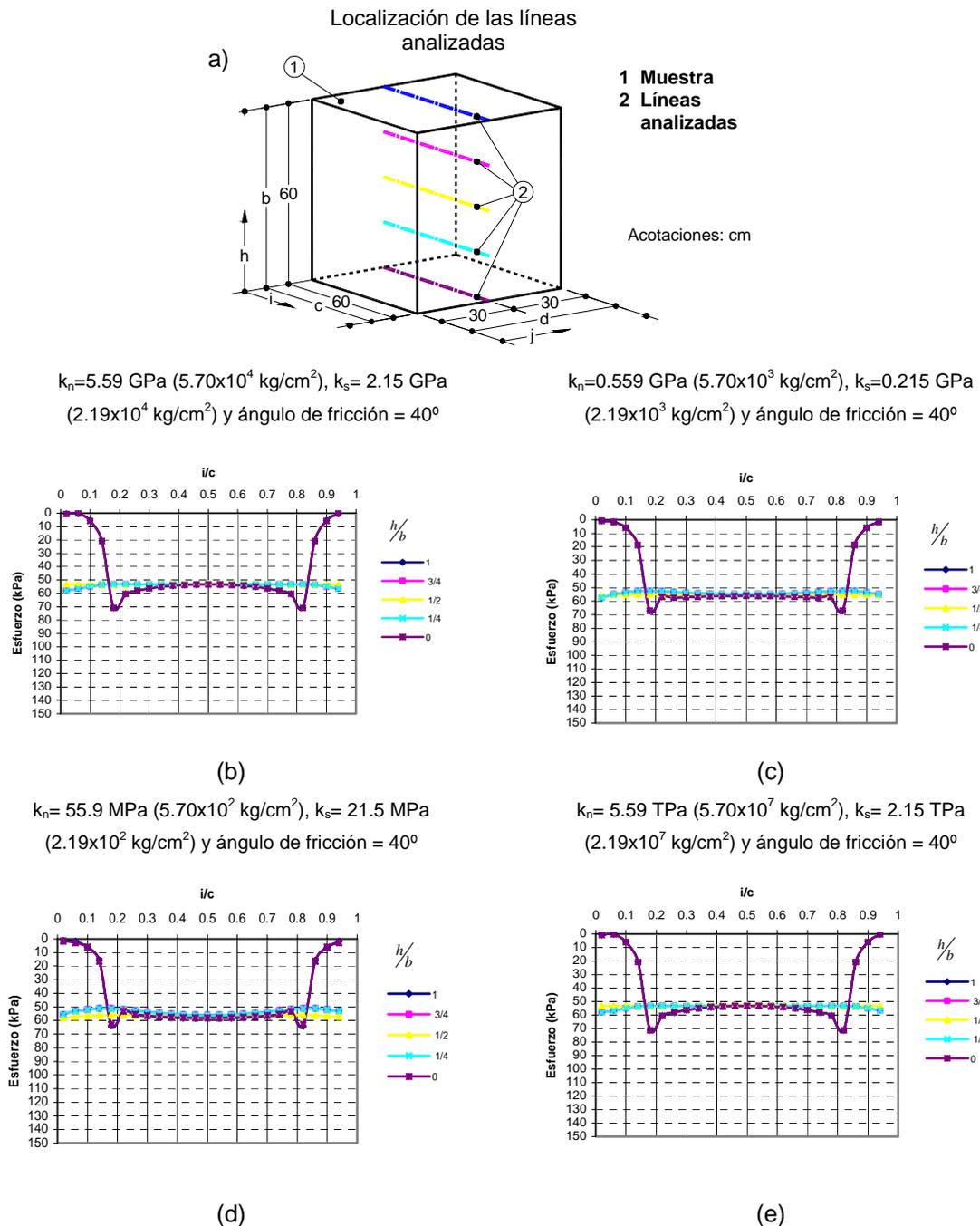
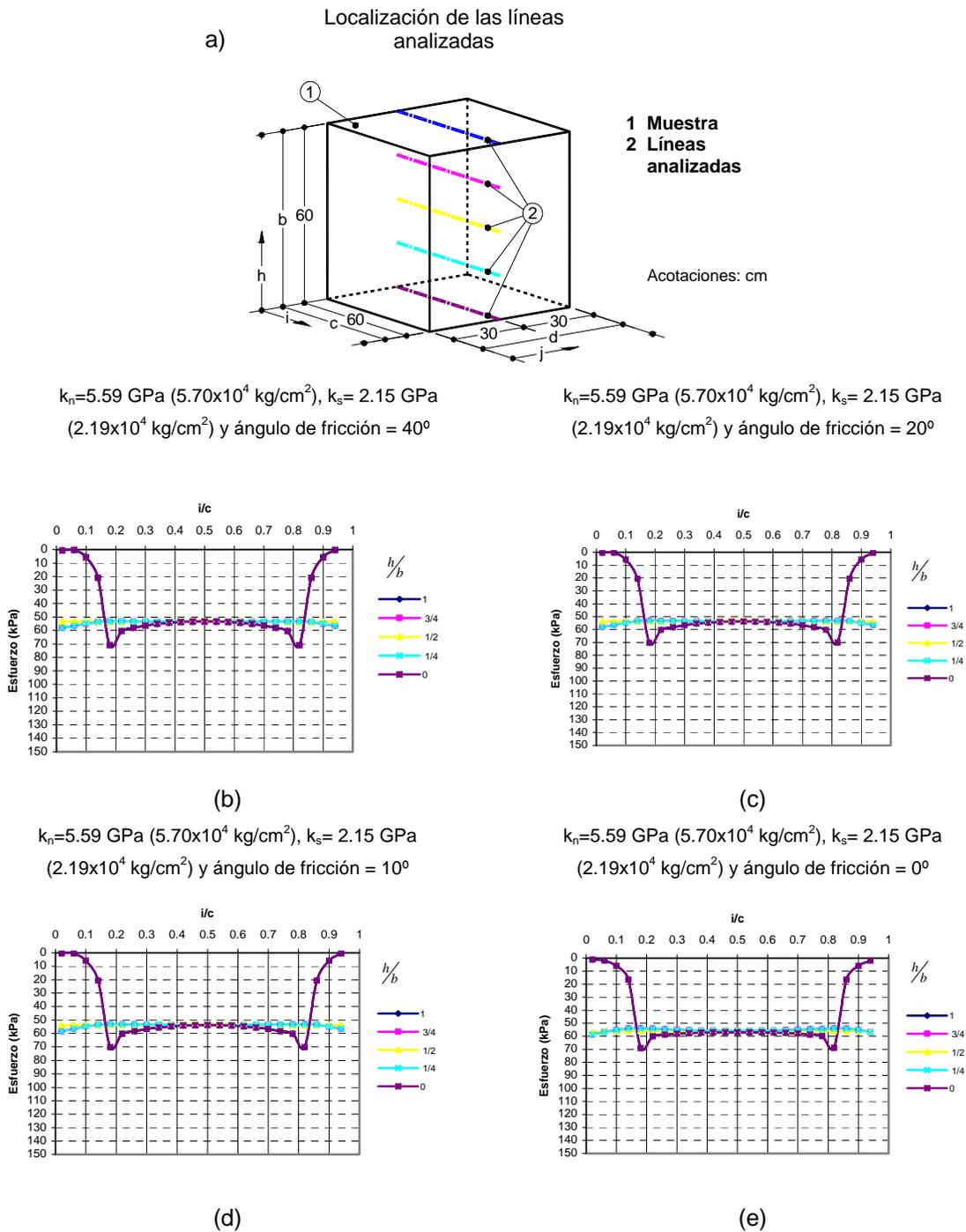


Figura 3.33 Distribución de esfuerzos normales octaédricos dentro de la muestra empleando distintos valores de k_n y k_s en la interfaz.

⁵ En el anexo A13 se pueden encontrar resultados para ángulos de fricción en la interfaz actuador-suelo con valores de 30°, 20°, 10° y 0°, en términos de esfuerzos en la cara z, dirección z, normales octaédricos y cortantes octaédricos.



En las gráficas anteriores (figura 3.33), se aprecia que al variar el ángulo de fricción de la interfaz actuador-suelo en el rango de 40° a 10° , no ocurren cambios significativos en la distribución de

esfuerzos normales octaédricos; sin embargo, cuando toma el valor de 0° , los esfuerzos normales octaédricos se vuelven casi uniformes en toda la muestra. Por lo tanto, lo ideal sería colocar una interfaz que elimine totalmente la fricción entre la muestra y los actuadores.

En 2008 González y Romo, presentaron un estudio en el cual obtuvieron coeficientes de fricción estática y dinámica en interfaces de distintos materiales, entre ellos los que se muestran en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Coeficientes y ángulos de fricción estáticos en interfaces de diversos materiales

Interfase	Coeficiente de fricción	Ángulo de fricción
Arena-Aluminio	0.57	30°
Arena-Polietileno	0.43	23.6°
Arena-Polietileno cristal	0.57	30°

Tomando en cuenta el rango de valores de la tabla anterior, se espera que el ángulo de fricción de la interfaz actuador-suelo esté entre 40° y 20° , en el cual la influencia en la distribución de esfuerzos, se verá más afectada por los coeficientes de rigidez normal (k_n) y cortante (k_s) de ésta, que por el ángulo de fricción.

3.2 CONCLUSIONES DE LAS MODELACIONES REALIZADAS

- Se está definiendo una zona en la muestra, en la cual los esfuerzos normales octaédricos y cortantes octaédricos son uniformes, en una probeta de 60 cm por lado ésta mediría 30 cm por lado.
- De acuerdo al análisis de sensibilidad (dentro del rango de valores analizado), el ángulo de fricción interna y los coeficientes de rigidez normal y de cortante de la interfase, no influyen en gran medida en la definición de la zona anteriormente mencionada.
- Sugerencias para la construcción
 - a).- Se recomienda caracterizar la interfase que se colocará entre los actuadores y la muestra, para conocer si sus propiedades se encuentran dentro de los rangos analizados en ésta investigación, sobre todo con respecto a los módulos de rigidez normal y de cortante.
 - b).-Igualmente, debido a la forma en que los actuadores aplicarán la carga (ver figura 3.2) se recomienda consultar con el fabricante, sobre una forma de proteger las partes móviles de estos, de tal forma que cuando apliquen la carga, las partículas en las aristas de la muestra no puedan causarles daño.

CAPÍTULO 4

“Todo debería de hacerse tan simple como sea posible...” Albert Einstein

APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO PARA DETERMINAR LA DEFORMABILIDAD DE ENROCAMIENTOS

En 1998 el Ingeniero Jesus Alberro Aramburu, realizó un estudio sobre la deformabilidad *in situ* de los materiales constitutivos de varias presas de tierra y enrocamiento. Éste tuvo como objetivo establecer leyes esfuerzo-deformación de los suelos y enrocamientos que conforman varias presas construidas en México, con base en mediciones instrumentales *in situ*. Las presas analizadas fueron el Caracol, Peñitas y Aguamilpa.

En dicho estudio, los datos que se reportan de la presa el Caracol son los más completos, (se muestran esfuerzos y deformaciones principales en diversos puntos de ésta), por ello, se utilizaron para establecer una comparación con los datos que se pueden obtener del modelo numérico desarrollado en el capítulo anterior (muestra y seis actuadores).

4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ESTUDIOS REALIZADOS EN LA PRESA EL CARACOL

La presa el Caracol es de tierra y enrocamiento, con una altura de 126 m, y se localiza sobre el río Balsas. Entre los diversos sistemas que se instalaron para medir la deformabilidad de sus materiales, así como su estado de esfuerzos, destacan 12 grupos de instrumentos, cada uno de los cuales consta de siete celdas de presión, seis extensómetros y un piezómetro neumático (ver figura 4.1).

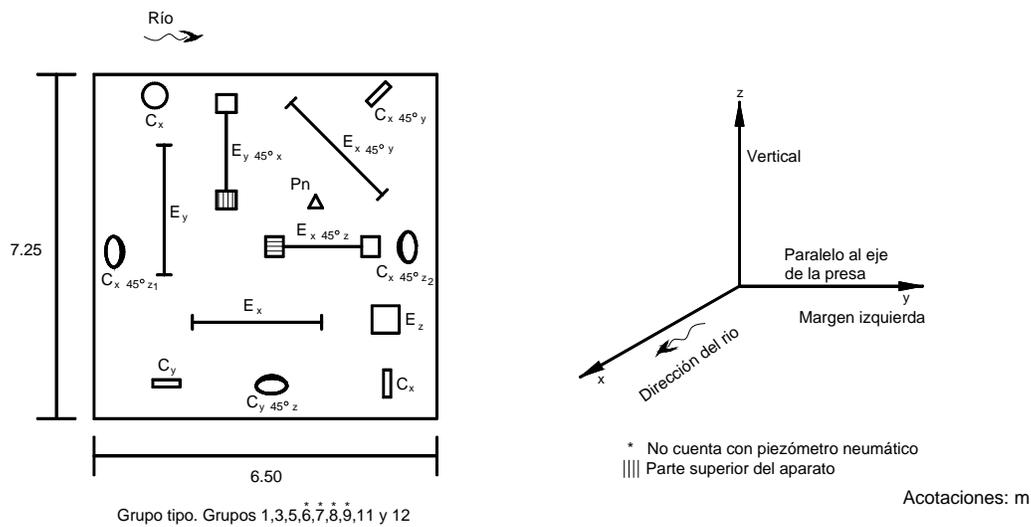


Figura 4.1 Croquis de instalación de los grupos de instrumentos en la presa el Caracol
(Alberro *et al*, 1998)

Estos permitieron conocer la dirección de los esfuerzos normales efectivos y las deformaciones principales al final de la construcción en 1985 (ver figuras 4.2 y 4.3). Como se puede apreciar en la imagen, faltan algunos datos en los resultados, por lo que las comparaciones entre éstos y el modelo del cubo triaxial se realizaron para los grupos 3, 6, 7 y 9. En estos grupos se conocen tanto los esfuerzos como deformaciones principales. El grupo 12 se excluyó debido a que el esfuerzo principal menor no es de compresión, también hay un posible error de signo en la deformación principal menor del grupo 8.

Conociendo el valor de los esfuerzos efectivos y de las deformaciones principales mediante la instrumentación, se pudo calcular ε_{oct} y σ_{oct} (deformación octaédrica y esfuerzo normal octaédrico, respectivamente)

Donde:

$$\varepsilon_{oct} = \frac{1}{3}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)$$

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3)$$

Siendo σ_1 , σ_2 , σ_3 , los esfuerzos efectivos principales y ε_1 , ε_2 , ε_3 , las deformaciones principales.

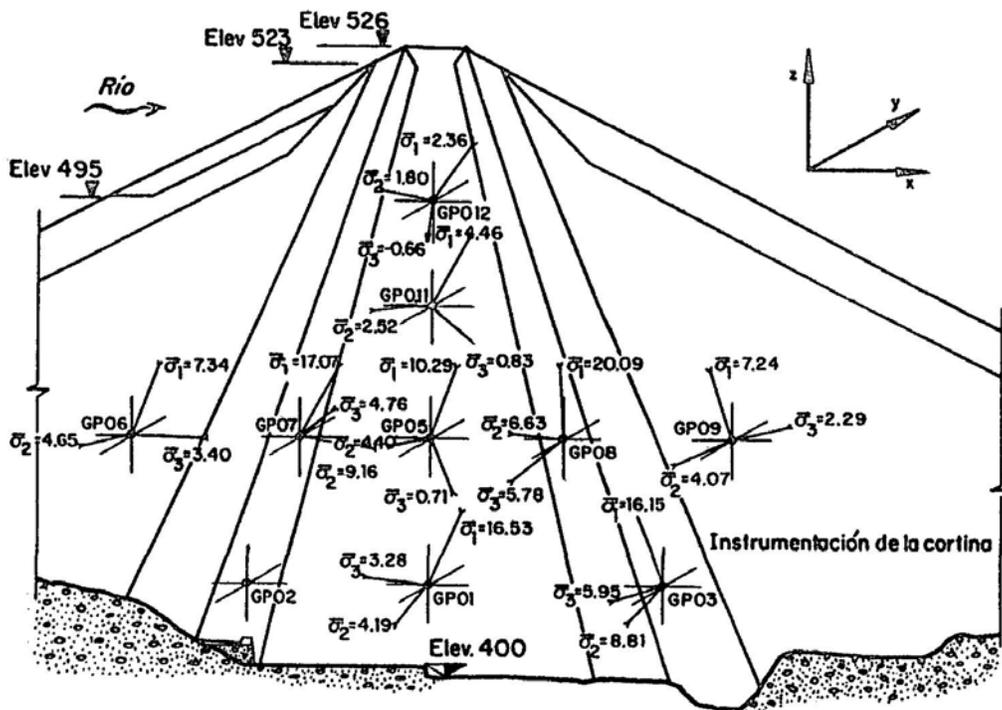


Figura 4.2 Esfuerzos principales, en kg/cm². Julio de 1985 (Alberro *et al*, 1998)

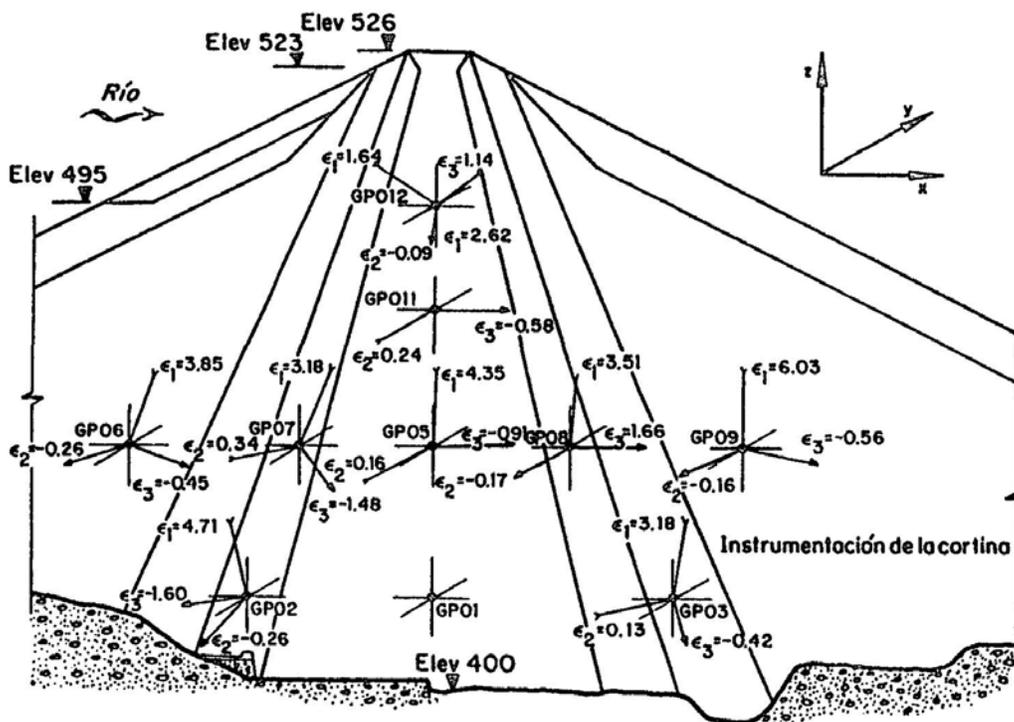


Figura 4.3 Deformaciones principales en porcentaje. Julio de 1985 (Alberro *et al*, 1998)

Ya que se observó un comportamiento lineal en las gráficas que se realizaron de ϵ_{oct} contra σ_{oct} , se utilizó la siguiente relación para obtener E (módulo de Young), K (coeficiente de deformabilidad volumétrica) y G (módulo de rigidez).

$$\sigma_{oct} = K\epsilon_{oct} = \frac{E}{1-2\nu}\epsilon_{oct}$$

Las propiedades mecánicas de los grupos analizados se muestran en la siguiente tabla

Tabla 4.1 Deformabilidad in situ de los materiales en la presa el Caracol

Grupo	G MPa (kg/cm ²)	K MPa (kg/cm ²)	E MPa (kg/cm ²)	v (Relación de Poisson)
03	14.70 (150)	112.77 (1150)	39.22 (400)	0.33
06	4.90 (50)	44.12 (450)	13.23 (135)	0.35
07	14.70 (150)	196.33 (2000)	41.67 (425)	0.42
09	3.43 (35)	29.41 (300)	9.80 (100)	0.34
11	4.41(45)	29.41(300)	11.27(115)	0.30

Las propiedades de la interfaz que se colocó entre la muestra y los actuadores en las modelaciones numéricas de este capítulo, se calcularon tomando en cuenta las propiedades la muestra, utilizando las siguientes relaciones:

$$k_n = \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{min}}$$

Donde:

k_n .- Módulo de rigidez normal

K.- Módulo de deformación volumétrica

G.- Módulo de deformación tangencial

Δz_{min} .- El ancho más pequeño de la zona circundante en la dirección normal

El módulo de reacción al cortante se calculó siguiendo la recomendación de Kulhawy (1975) según la cual:

$$k_s = \frac{k_n}{2(1+\nu)}$$

Donde:

k_s .- Módulo de rigidez al corte

k_n .- Módulo de rigidez normal

ν .- Relación de Poisson

A la interfaz se le asignó un valor para el ángulo de fricción de 40°.

4.2 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS *IN SITU* CONTRA LAS MODELACIONES NUMÉRICAS

Las modelaciones se realizaron aplicando las propiedades de la tabla 4.1 al material muestra, conjuntamente con los esfuerzos principales de la figura 4.2, para cada uno de los grupos de instrumentos analizados. Las deformaciones principales en el modelo numérico se calcularon tomando en cuenta el desplazamiento que presentan los actuadores al finalizar la simulación. La comparación entre las deformaciones principales obtenidas in situ y las de las modelaciones numéricas, se muestran en la tabla 4.2, por medio de la siguiente relación:

$$Er = \frac{|\epsilon_m - \epsilon_c|}{|\epsilon_m|}$$

Donde:

Er.- Error relativo de las deformaciones unitarias calculadas con el modelo numérico con respecto a las medidas en campo (ambas en porcentaje)

ϵ_m .- Deformación unitaria medida en campo (en porcentaje)

ϵ_c .- Deformación unitaria calculada con el modelo numérico (en porcentaje)

Tabla 4.2. Comparación entre los datos experimentales obtenidos en la presa el Caracol (Alberro 1998) y las modelaciones realizadas en FLAC 3D¹

Grupo	Deformación unitaria calculada			$\frac{ \epsilon_m - \epsilon_c }{ \epsilon_m }$		
	ϵ_1 %	ϵ_2 %	ϵ_3 %			
03	1.20	0.12	-0.19	0.62	0.08	0.55
06	1.33	0.26	-0.14	0.65	2.00	0.69
07	1.08	0.06	-0.42	0.66	0.82	0.72
09	2.21	0.28	-0.56	0.63	2.75	0.00
11	1.29	0.26	-0.49	0.51	0.08	0.16

ϵ_1 .- Deformación en % en el sentido en que se aplica el esfuerzo principal mayor

ϵ_2 .- Deformación en % en el sentido en que se aplica el esfuerzo principal intermedio

ϵ_3 .- Deformación en % en el sentido en que se aplica el esfuerzo principal menor

ϵ_m .- Deformación unitaria medida en campo

ϵ_c .- Deformación unitaria calculada con el modelo numérico

¹ En el anexo A14 se muestran los resultados de las modelaciones realizadas.

En los valores de las deformaciones (ϵ %), el signo positivo indica reducción de longitud y el negativo aumento

Como se puede apreciar en la tabla 4.2, con el modelo numérico se puede obtener, una predicción del comportamiento del material en campo, con un error relativo promedio de 72%.

CAPÍTULO 5

“Cada día se pueden hacer progresos...” Winston Churchill

CONCLUSIONES

De la investigación bibliográfica realizada durante esta investigación tenemos que:

- Si empleamos cubos triaxiales de paredes “rígidas”, las deformaciones en las caras de la muestra serán uniformes, pero no así los esfuerzos.
- Si utilizamos un cubo triaxial de paredes flexibles, los esfuerzos en las caras de las muestras serán uniformes, pero no las deformaciones.
- Si se mezclan condiciones de frontera (se aplican cargas empleando algunas paredes rígidas y otras flexibles), ocurren esfuerzos no homogéneos en las muestras, los cuales ocasionan fallas prematuras en los especímenes ensayados.
- La variación del esfuerzo principal intermedio altera la resistencia de la muestra analizada.

En las pruebas realizadas hasta el día de hoy, en el cubo triaxial del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se concluyó que:

- De los tipos de celdas para aplicar cargas que se han empleado, la que ha dado mejores resultados han sido las de tipo Freyssinet.
- Aun con celdas tipo Freyssinet, no ha existido reproductibilidad en los resultados de los ensayos.
- No se ha podido definir un estado de esfuerzos o deformaciones en las probetas modeladas.

De acuerdo a la interpretación de los resultados obtenidos, en las modelaciones numéricas realizadas durante esta investigación, se concluye que:

- Al aplicar un esfuerzo hidrostático con el sistema de actuadores propuesto, se define una zona en la que tanto los esfuerzos cortantes como normales octaédricos son uniformes, en una muestra de forma cúbica que mida 60 cm por lado, esta mediría 30 cm por lado.
- A las “caras” de la zona con esfuerzos normales y cortantes octaédricos uniformes, llega el 60% del esfuerzo normal aplicado con los actuadores.
- Al aplicar un esfuerzo hidrostático a la muestra, las características de la interfaz actuador-suelo, como son el coeficiente de rigidez normal (k_n), el coeficiente de rigidez al corte (k_s) y el ángulo de fricción interna (ϕ), no influyen en gran medida en la distribución de esfuerzos dentro de ésta.
- Al utilizar el sistema de actuadores propuesto es posible predecir la deformabilidad *in situ* de un material, con un error relativo promedio de 72%. Sin embargo, ya que en problemas similares (Alberro *et al*, 1971; Melis y Medina, 2005), los errores entre las modelaciones y datos medidos *in situ*, son iguales o superiores que los obtenidos durante esta tesis, en general se consideran satisfactorios los análisis realizados durante la presente investigación.
- Se recomienda utilizar la opción de los seis gatos hidráulicos de simple acción, para actualizar el sistema de aplicación de cargas del cubo triaxial del Instituto de Ingeniería.

REFERENCIAS

- Airey, D., and Wood, D. M., (1988) "The Cambridge True Triaxial Apparatus" Advanced Triaxial Testing of Soils and Rock, ASTM STP 977, Robert T. Donaghe, Ronald C. Chaney, and Marshall L. Silver, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 796-805
- Alberro, A. J. y León. J. L, (1971) "Estado de Esfuerzos y Deformaciones en la Presa La Villita", Series del Instituto de Ingeniería, No 298, UNAM, México.
- Alberro, A. J., y Hernández, H. R., (1998) "La Medición de Presiones en Estructuras Terreas", Series del Instituto de Ingeniería, No. 603, UNAM, México.
- Alberro, A. J., Macedo, G. G., González, V. F., (1998) "Deformabilidad in Situ de los Materiales Constitutivos de Varias Presas de Tierra y Enrocamiento", Series del Instituto de Ingeniería, No. 604, UNAM, México.
- Alshibli, K., and Williams, H., (2005) "A True Triaxial Apparatus for Soil Testing with Mixed Boundary Conditions" Geotechnical Testing Journal, Vol. 28, No.6, Paper ID GTJ12679, pp. 1-10
- AnhDan, L. Q., Koseki J., Hayano, K., and Sato, T., (2005) "True Triaxial Apparatuses with Two Rigid Boundaries" in Proceedings of the Sessions of the Geo-Frontiers 2005 Congress, Site Characterization and Modeling (GSP 138), January 24–26, Austin, Texas, pp. USA. 1-10
- Arthur, J. R. F., (1988) "Cubical Devices: Versatility and Constraints" Advanced Triaxial Testing of Soils and Rock, ASTM STP 977, Robert T. Donaghe, Ronald C. Chaney, and Marshall L. Silver, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 743-765
- Bishop, A. W., and Green, G. E., (1965) "The Influence of end Restraint on the Compression Strength of a Cohesionless Soil", Géotechnique, Vol. 15, pp. 243-266
- Carrillo, N., (1948) "Influence of the Rigidity of a Rectangular Slab on the Settlements and on the Distribution of Elastic Soil Reactions", in Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. VII, 14p.
- Esaki, T., Kimura, T., Aoki, K., and Nishida, T., (1988) "True Triaxial test of Rock Under Stress and Strain Rate Control" Advanced Triaxial Testing of Soils and Rock, ASTM STP 977, Robert T. Donaghe, Ronald C. Chaney, and Marshall L. Silver, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 834-843
- González, C. M., Romo M.P., "Coeficientes de Fricción Estática y Dinámica en Interfases de Distintos Materiales" Trabajo Presentado en el XVII Internacional Materials Research Congress, Agosto 17-21 de 2008, Cancun, México.

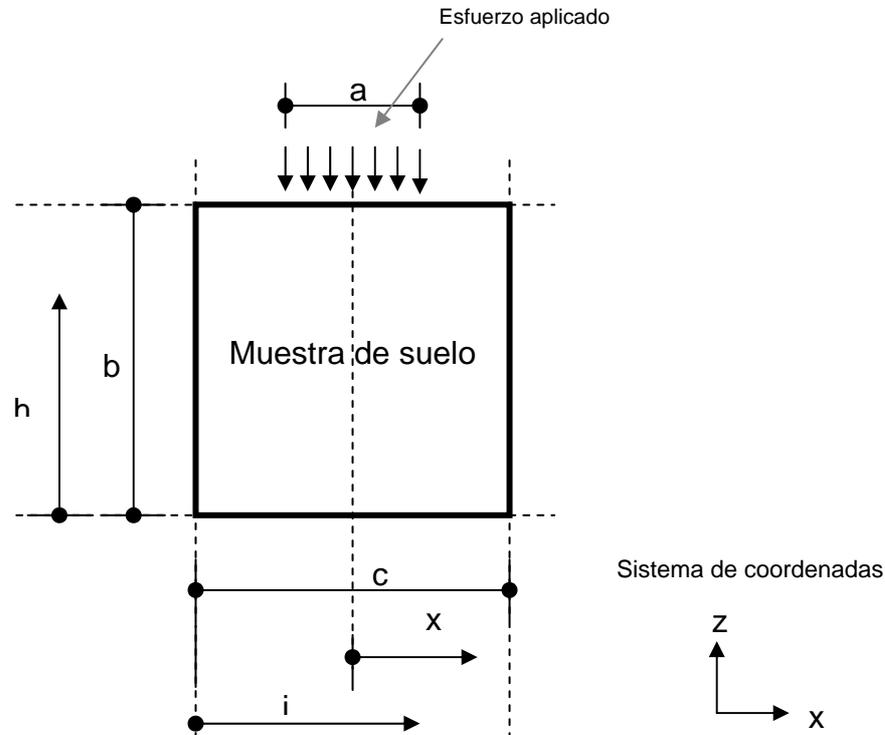
- Green, G. E., (1971) "Strength and Deformation of Sand Measured in an Independent Stress Control Cell" Proceedings, Roscoe Memorial Symposium, Cambridge University, Cambridge England, Foulis and Co., p290
- Green, G. E., and Bishop, A. W., (1969) "A Note on the Drained Strength of Sand Under Generalized Strain Conditions" Géotechnique, Technical Note, Vol. 19, No. 1, 1969, pp. 144-149
- Green, G. E., and Reades, D. W., (1975) "Boundary Conditions, Anisotropy and Sample Shape Effects on the Stress-Strain Behaviour of Sand in Triaxial Compression an Plain Strain" Géotechnique, Vol. 25, No. 2, pp. 333-356
- Haimson, B., and Chang, C., (2000) "A New True Triaxial Cell for Testing Mechanical Properties of Rock, and its Use to Determine Rock Strength and Deformability of Westerly Granite", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37, pp. 285-296
- Hambly, E. C., (1969) "A New True Triaxial Apparatus" Geotechnique, Vol. 1, pp. 307-309
- Hernández, R., (2008) Comunicación personal en el laboratorio de enrocamientos, Instituto de Ingeniería UNAM
- Ibsen, B., and Praastrup, U., (2002) "The Danish Rigid Boundary True Triaxial Apparatus for Soil Testing" Geotechnical Testing Journal, Vol. 25, No.3, Paper ID GTJ20029882_253, pp. 1-12
- ITASCA., "FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions Online Manual" Versión 3.0, Minneapolis, MN, US, Itasca Consulting Group.
- Ko, H., and Scott, R., (1967) "A New Soil Testing Apparatus" Géotechnique 17, pp. 40-57
- Kulhawy, F. H. (1975) "Stress Deformation Properties of Rock and Rock Discontinuities," Eng. Geol., 9, pp 327-350
- Lambe W. T., Whitman R. V., (2002) "Mecánica de Suelos", 2da edición, Limusa, México DF, pp 115, 119
- Lanier, J., (1988) "Special Stress Paths Along the Limit Surface of a Sand Specimen with the use of a True Triaxial Apparatus" Advanced Triaxial Testing of Soils and Rock, ASTM STP 977, Robert T. Donaghe, Ronald C. Chaney, and Marshall L. Silver, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 859-869
- Marsal, R. J., (1973) "A True Triaxial Apparatus to Test Rockfills" International conference on soil mechanics and foundation engineering. Moscou, Vol. I, pp 259-264
- Marsal, R. J.,(1980) "Contribuciones a la Mecánica de Medios Granulares" Comisión Federal de Electricidad, México DF, p 253.
- Mazari, M. (1976) "Cubo Triaxial CT-100-100 Etapa de Calibración", Elaborado para la Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Mazari, M. Fuentes A. (1978) "Cubo Triaxial CT-100-100 Segunda Etapa de Ensayos en Arena, Empleando Plastilina Como Antifriccionante", Reporte interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Mazari, M., Fuentes A., (1977) "Cubo Triaxial, Etapa de Ensayes Preliminares", Proyecto 7071, elaborado para la Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Mazari, M., Marsal, R.J., Alberro, J., (1982) "Cubo Triaxial, CT-65-100 Ensayos en Muestra Flotante", Reporte interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Melis, M., y Medina. L., (2005) "Predicted Versus Measured Soil Movements Induced by Shield Tunnelling in the Madrid Metro Extension", Canadian Geotechnical Journal, Volume 42, Number 4, pp 1160-1172.

-
- Michelis, P., (1988) "A true Triaxial Cell for Soil and Rock" Advanced Triaxial Testing of Soils and Rock, ASTM STP 977, Robert T. Donaghe, Ronald C. Chaney, and Marshall L. Silver, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 806-818.
- Pearce, J. A., (1971) "A New Triaxial Apparatus" in Proceedings, Roscoe Memorial Symposium, Cambridge University, Cambridge, England, G. T. Foulis and Co., Ltd., pp. 330-339
- Penumadu, D., and Prashant, A., (2005) "Automated Flexible-Boundary True Triaxial System for Cohesive Soils" Proceedings of the Sessions of the Geo-Frontiers 2005 Congress, Site Characterization and Modeling (GSP 138), January 24–26, Austin, Texas, USA. pp. 1-10
- Reddy, K. R., Saxena, S. K., and Budiman, J. S., (1992) "Development of True Triaxial Testing Apparatus" Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 15, No. 2, June, pp. 89-105
- Shibata, T., and Karube, D., (1965) "Influence of the Variation of the Intermediate Principal Stress on the Mechanical Properties of Normally Consolidated Clays", in Proceedings, Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Canada, Vol. 1, pp. 359-363
- Silvestri, V., Yong, R. N., and Mohamed, A. M. O., (1988) "A True Triaxial Testing Cell" Advanced Triaxial Testing of Soils and Rock, ASTM STP 977, Robert T. Donaghe, Ronald C. Chaney, and Marshall L. Silver, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 819-833
- Sture, S. and Desai, C. S., (1979) "Fluid Cushion Truly Triaxial or Multiaxial Testing Device" Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 2, No. 1, March, pp. 20-33
- Sutherland, H. B. and Mesdary, M. S., (1969) "The Influence of the Intermediate Principal Stress on the Strength of Sand", in Proceedings, Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, México, Vol 1, pp. 391-399
- Taylor, E., (1978) "Dimensional Analysis for Engineers", Oxford University Press, Ireland, pp 1-68.
- Wang, Q., and Lade, P. V., (2001) "Shear Banding in True Triaxial Tests and its Effect on Failure in Sand" Journal Engineering of Mechanics, 127(8), pp. 702-768
- Zhang, L., and Zhu, H., (2007) "Three-Dimensional Hoek-Brown Strength Criterion for Rocks" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, pp. 1128-1135

DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS CARAS Z
DIRECCIÓN Z, BAJO UNA CARGA UNIFORMEMENTE
DISTRIBUIDA PARA LOS CASOS: $a/c=2/3$, $a/c=1/3$, $a/c=1/6$,
 $a/c=1/12$, $1/24$
(ANÁLISIS EN PLAXIS 2D)

En este anexo se muestran las gráficas donde se analiza la influencia de las condiciones de frontera, en términos de esfuerzos σ_{zz} .

Nomenclatura empleada:



$$\text{Donde: } 0 \leq \frac{h}{b} \leq 1 \quad , \quad 0 \leq \frac{i}{c} \leq 1 \quad \text{y} \quad 0 \leq \frac{x}{c/2} \leq 1$$

Figura A1.1 Nomenclatura empleada en los análisis realizados en Plaxis 2D

En la tabla A1.1 Se muestran las dimensiones de las muestras analizadas en ésta investigación con el software de elementos finitos (Plaxis 2D).

Tabla A1.1 Dimensiones de las muestras modeladas, siendo $b = c$

a (cm)	b (cm)	a/c
40	60	2/3
40	120	1/3
40	240	1/6
40	480	1/12
40	960	1/24

La carga aplicada es de 100 kPa (1kg/cm^2)

Esfuerzos en las caras "z", direccion "z"

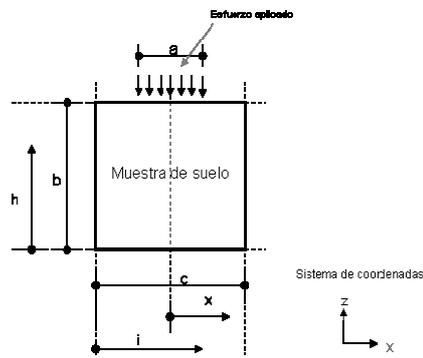
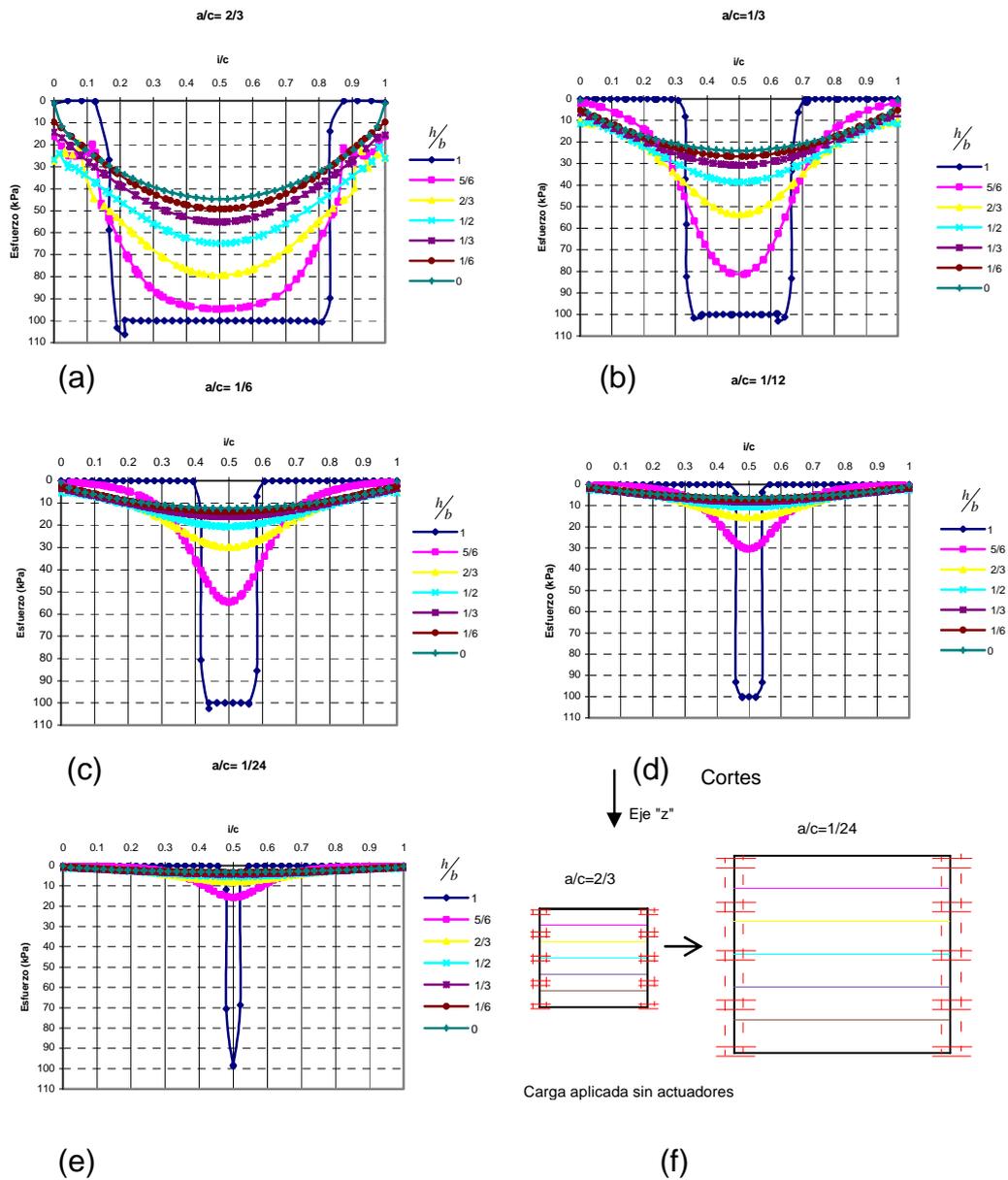


Figura A1.2

Análisis en PLAXIS 2D, restricciones de movimiento en las fronteras verticales en sentido horizontal
 Esfuerzos en las caras "z", dirección "z"

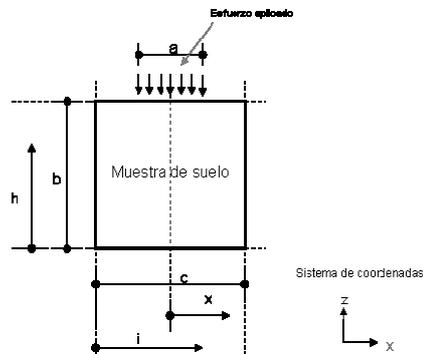
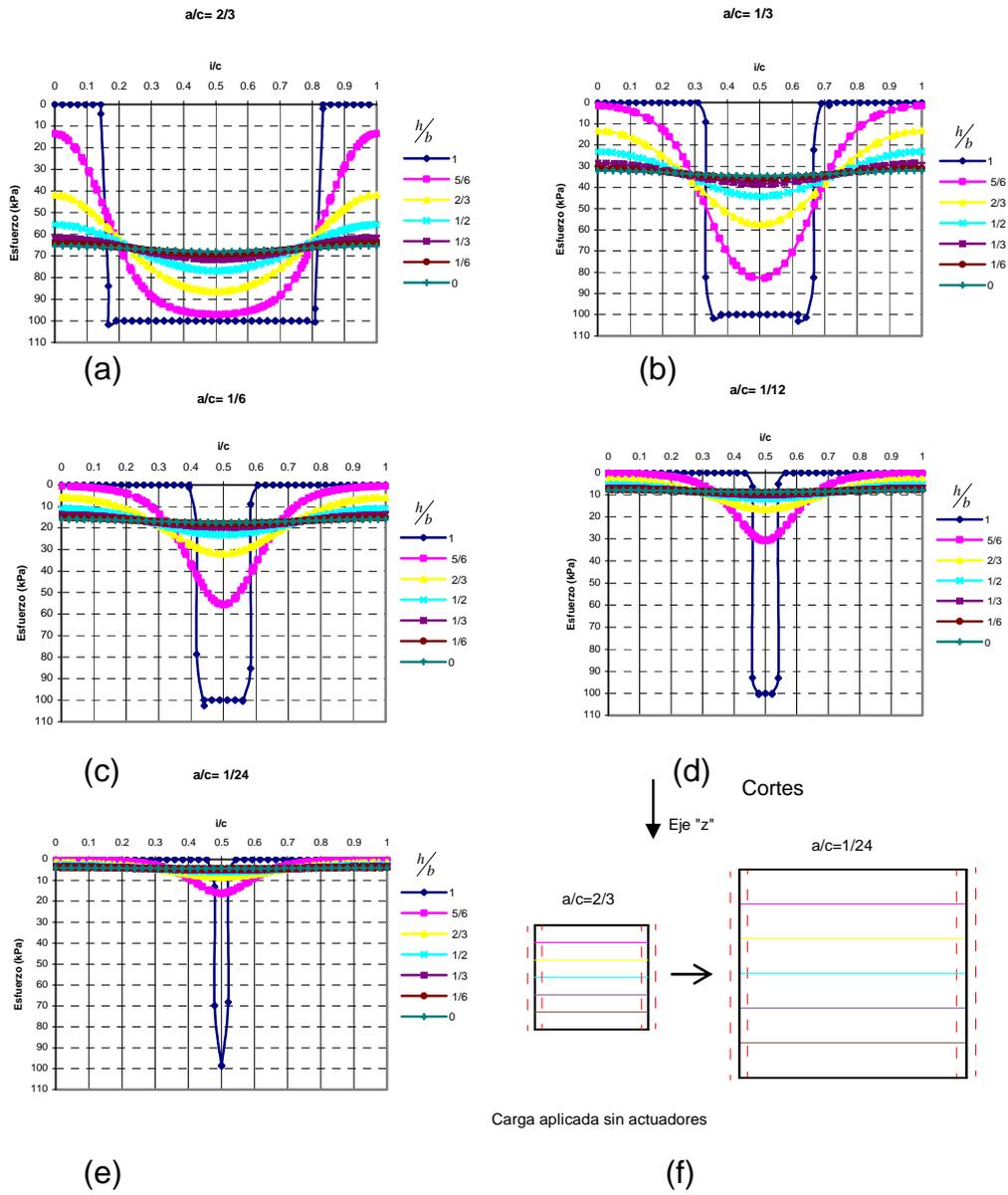


Figura A1.3

En las figuras anteriores se puede observar la influencia de las condiciones de frontera en las distribuciones de esfuerzos, si comparamos A1.2 a) con A1.3 a), notamos un aumento de la presión en función con la profundidad, cuando no se restringe el movimiento de las fronteras verticales en sentido vertical (el efecto de arqueado se minimiza). Por otro lado, conforme alejamos las fronteras de la carga (relaciones a/c menores) las condiciones de frontera influyen cada vez menos en la distribución de los esfuerzos, el caso $a/c=24$ es prácticamente igual tanto en la figura A1.2 e) como en la A1.3 e).

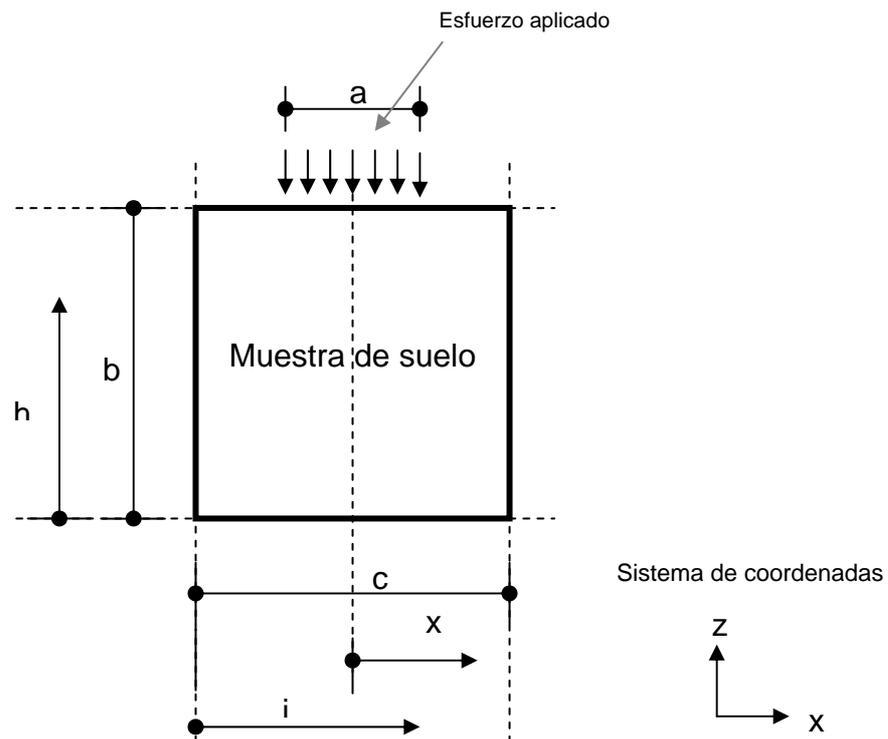
DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE Z, BAJO UNA CARGA
UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA PARA LOS CASOS:

$a/c=2/3$, $a/c=1/3$, $a/c=1/6$, $a/c=1/12$, $1/24$

(ANÁLISIS EN PLAXIS 2D)

En este anexo se muestran las gráficas donde se analiza la influencia de las condiciones de frontera, en términos de los desplazamientos sobre el eje z.

Nomenclatura empleada:



$$\text{Donde: } 0 \leq \frac{h}{b} \leq 1, \quad 0 \leq \frac{i}{c} \leq 1 \quad \text{y} \quad 0 \leq \frac{x}{c/2} \leq 1$$

Figura A2.1 Nomenclatura empleada en los análisis realizados en Plaxis 2D

Tabla A2.1 Dimensiones de las muestras modeladas, siendo $b = c$

a (cm)	b (cm)	a/c
40	60	2/3
40	120	1/3
40	240	1/6
40	480	1/12
40	960	1/24

La carga aplicada es de 100 kPa (1kg/cm^2)

Análisis en PLAXIS 2D, restricciones de movimiento en las fronteras verticales en todas direcciones

Desplazamientos

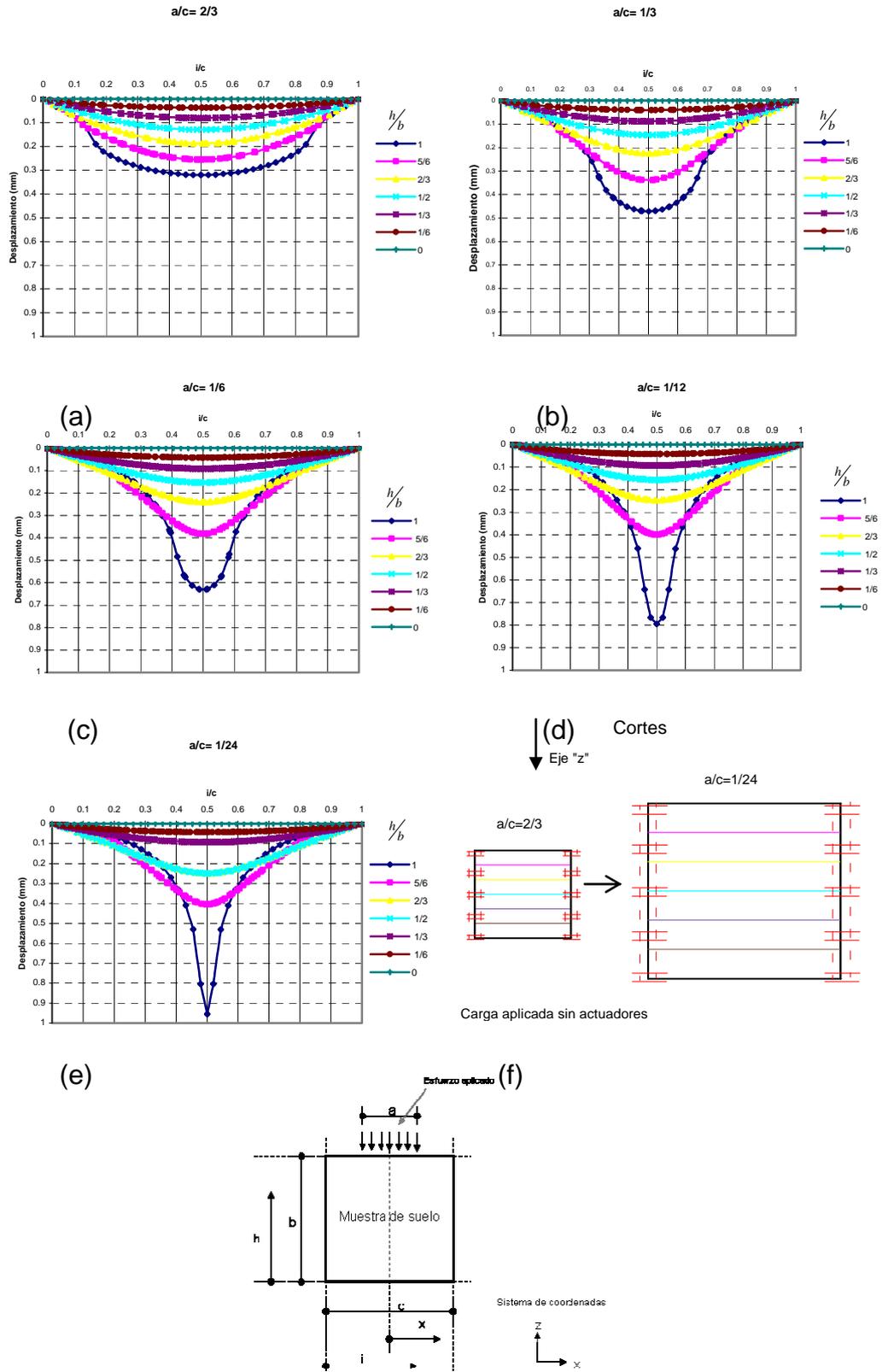


Figura A2.3

Análisis en PLAXIS 2D, restricciones de movimiento en las fronteras verticales en sentido horizontal
Desplazamientos

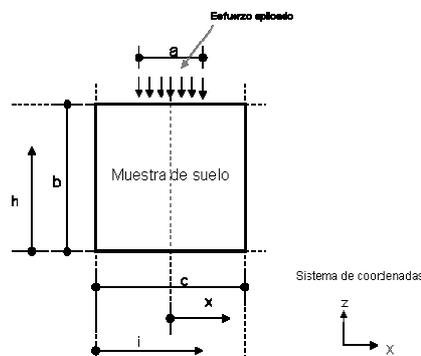
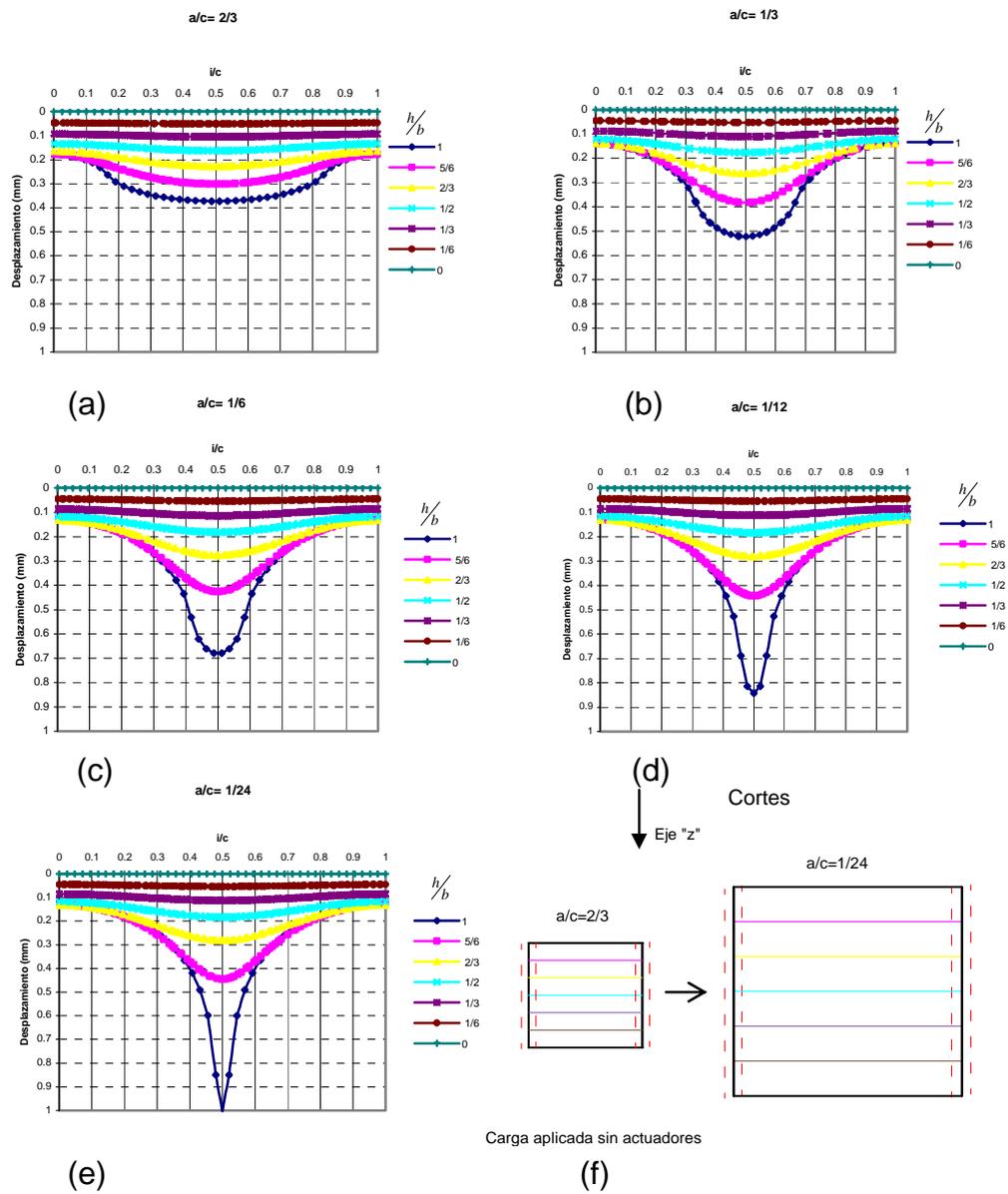


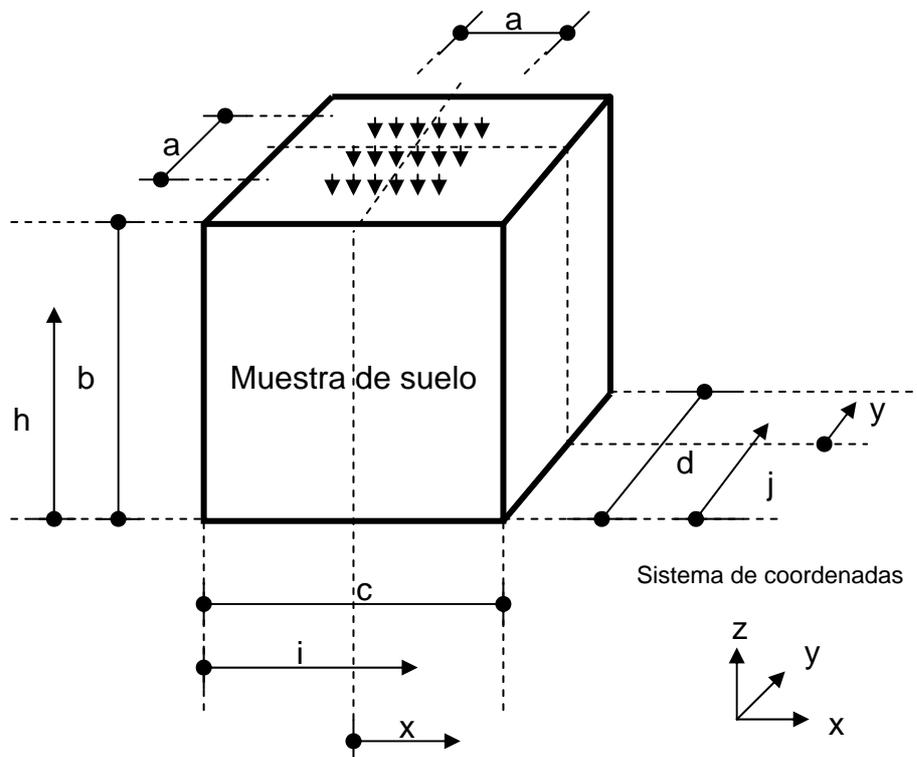
Figura A2.4

Si comparamos las figuras A2.3 a) y A2.4 a), se aprecia claramente la forma en que las condiciones de frontera modifican los desplazamientos del material dentro de la muestra. Por otro lado, conforme la relación a/c se va haciendo más pequeña, las deformaciones en el centro del modelo ($i/c=0.5$) aumentan, incluso, en las figuras $a/c=1/24$ notamos un fenómeno parecido a la aplicación de una carga puntual, a pesar que el ancho de la carga "a" se mantuvo constante (40 cm) y lo que se varió fue la dimensión "c".

DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS CARAS Z
DIRECCIÓN Z, BAJO UNA CARGA UNIFORMEMENTE
DISTRIBUIDA PARA LOS CASOS: $a/c=2/3$, $a/c=1/3$, $a/c=1/6$,
 $a/c=1/12$, $a/c=1/24$
(ANÁLISIS EN FLAC 3D)

En este anexo se muestran las gráficas donde se analiza la influencia de las condiciones de frontera, en términos de esfuerzos σ_{zz} .

Nomenclatura empleada:



Donde: $0 \leq \frac{h}{b} \leq 1$, $0 \leq \frac{i}{c} \leq 1$, $0 \leq \frac{j}{d} \leq 1$, $0 \leq \frac{x}{c/2} \leq 1$ y $0 \leq \frac{y}{d/2} \leq 1$

Figura A3.1 Nomenclatura empleada en los análisis realizados en FLAC 3D

En la Tabla A3.1 se muestran las dimensiones de las muestras modeladas con el software de diferencias finitas FLAC 3D.

Tabla A3.1 Dimensiones de las muestras modeladas, siendo $b = c = d$

a (cm)	b (cm)	a/c
40	60	2/3
40	120	1/3
40	240	1/6
40	480	1/12
40	960	1/24

La carga aplicada es de 100 kPa (1kg/cm^2)

Análisis en FLAC 3D, restricciones de movimiento en las fronteras verticales en todas direcciones. Corte: $d/j=1/2$

Esfuerzos en las caras "z", dirección "z"

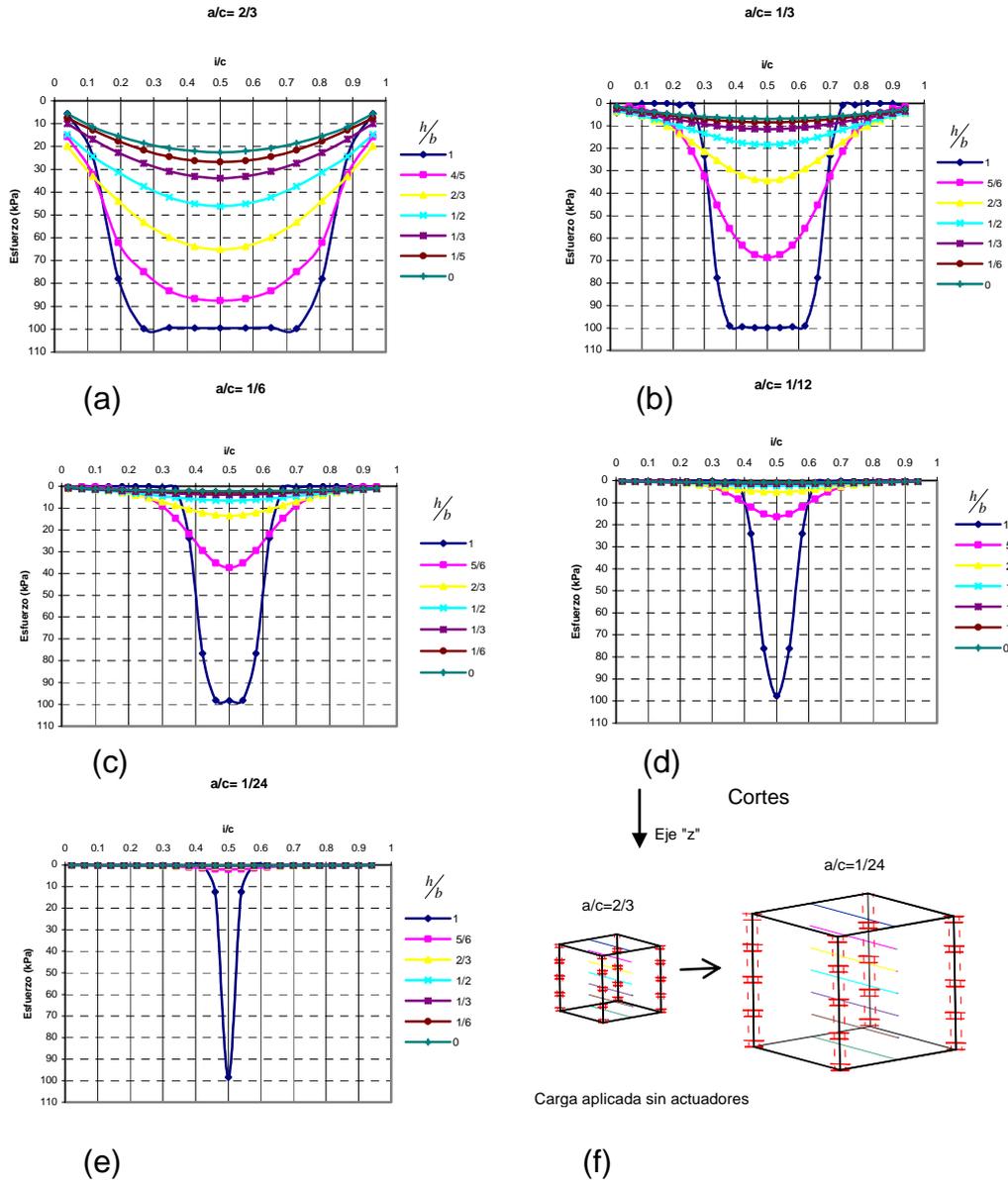


Figura A3.2

Análisis en FLAC 3D, restricciones de movimiento en las fronteras verticales en sentido horizontal. Corte: $d/j=1/2$
 Esfuerzos en las caras "z", dirección "z"

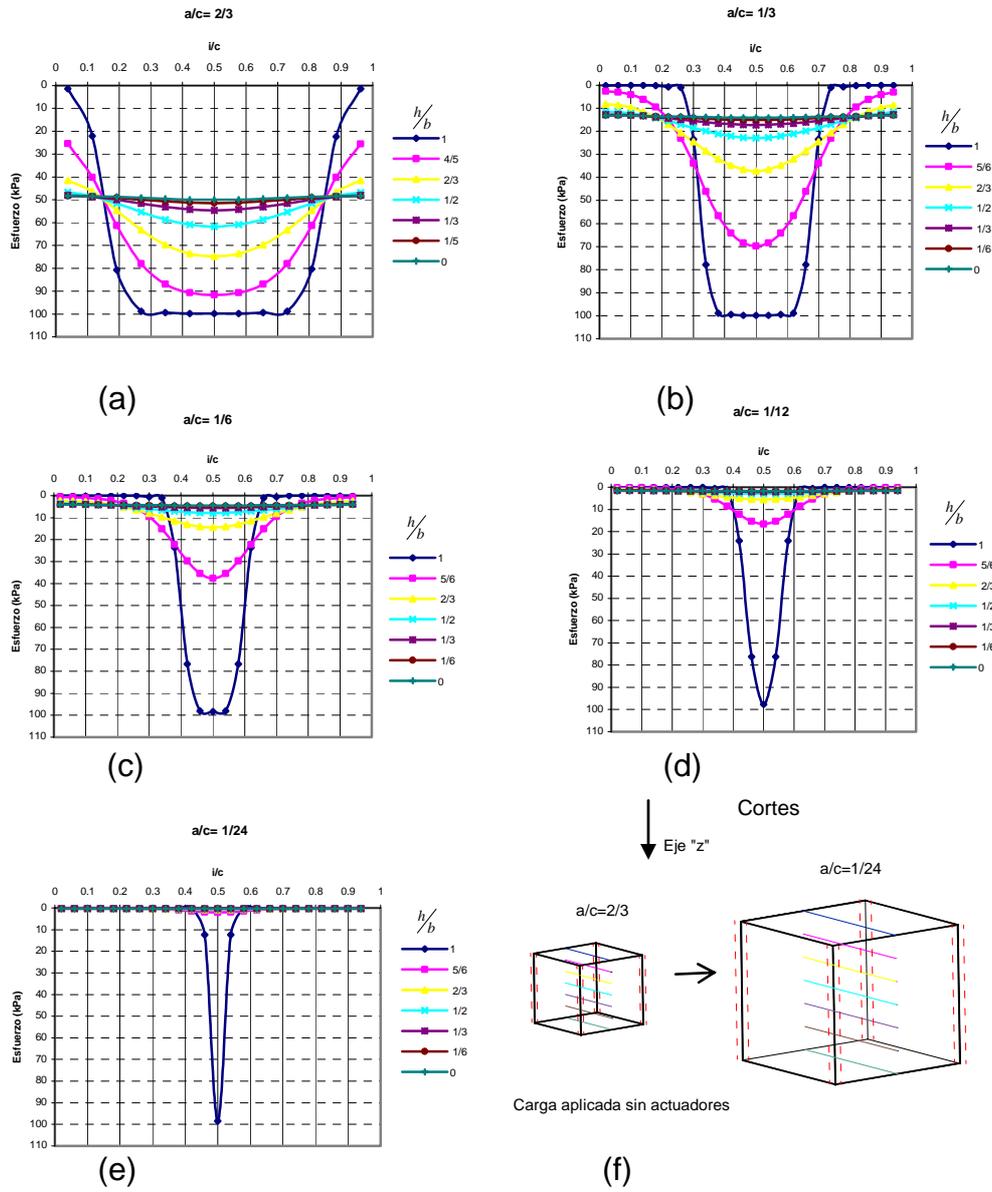


Figura A3.3

Aparte de lo ya mencionado en el anexo A1 con respecto al efecto de arqueamiento, lo cual también aplica para el caso en tres dimensiones, en las modelaciones realizadas en FLAC 3D se nota un efecto tridimensional, ya que si comparamos la magnitud de los esfuerzos con relación a la profundidad, veremos que son menores en la figura A2.2 que en la A1.2 o en la A2.3 que en la A1.3.

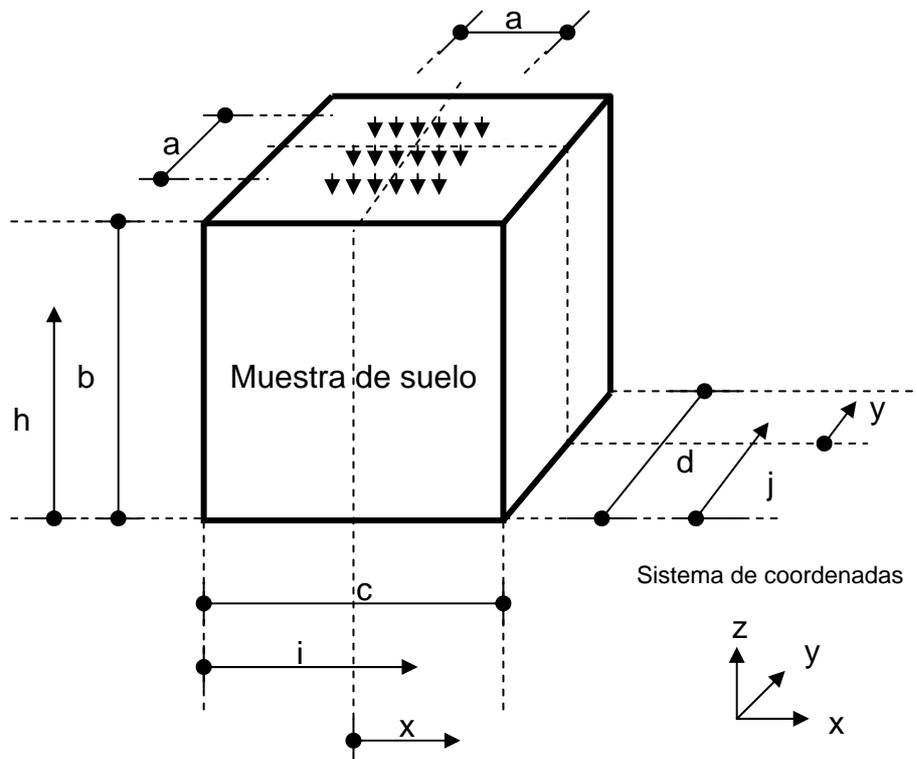
DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE Z, BAJO UNA CARGA
UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA PARA LOS CASOS:

$a/c=2/3$, $a/c=1/3$, $a/c=1/6$, $a/c=1/12$, $a/c=1/24$

(ANÁLISIS EN FLAC 3D)

En este anexo se muestran las gráficas donde se analiza la influencia de las condiciones de frontera, en términos de los desplazamientos en el eje z.

Nomenclatura empleada:



Donde: $0 \leq \frac{h}{b} \leq 1$, $0 \leq \frac{i}{c} \leq 1$, $0 \leq \frac{j}{d} \leq 1$, $0 \leq \frac{x}{c/2} \leq 1$ y $0 \leq \frac{y}{d/2} \leq 1$

Figura A4.1 Nomenclatura empleada en los análisis realizados en FLAC 3D

En la siguiente tabla (A4.1), se muestra el tamaño de las muestras modeladas con el software de diferencias finitas FLAC 3D.

Tabla A4.1 Dimensiones de las muestras modeladas, siendo $b = c = d$

a (cm)	b (cm)	a/c
40	60	2/3
40	120	1/3
40	240	1/6
40	480	1/12
40	960	1/24

La carga aplicada es de 100 kPa (1kg/cm²)

Análisis en FLAC 3D, restricciones de movimiento en las fronteras verticales en todas direcciones. Corte: $d/j=1/2$
Desplazamientos

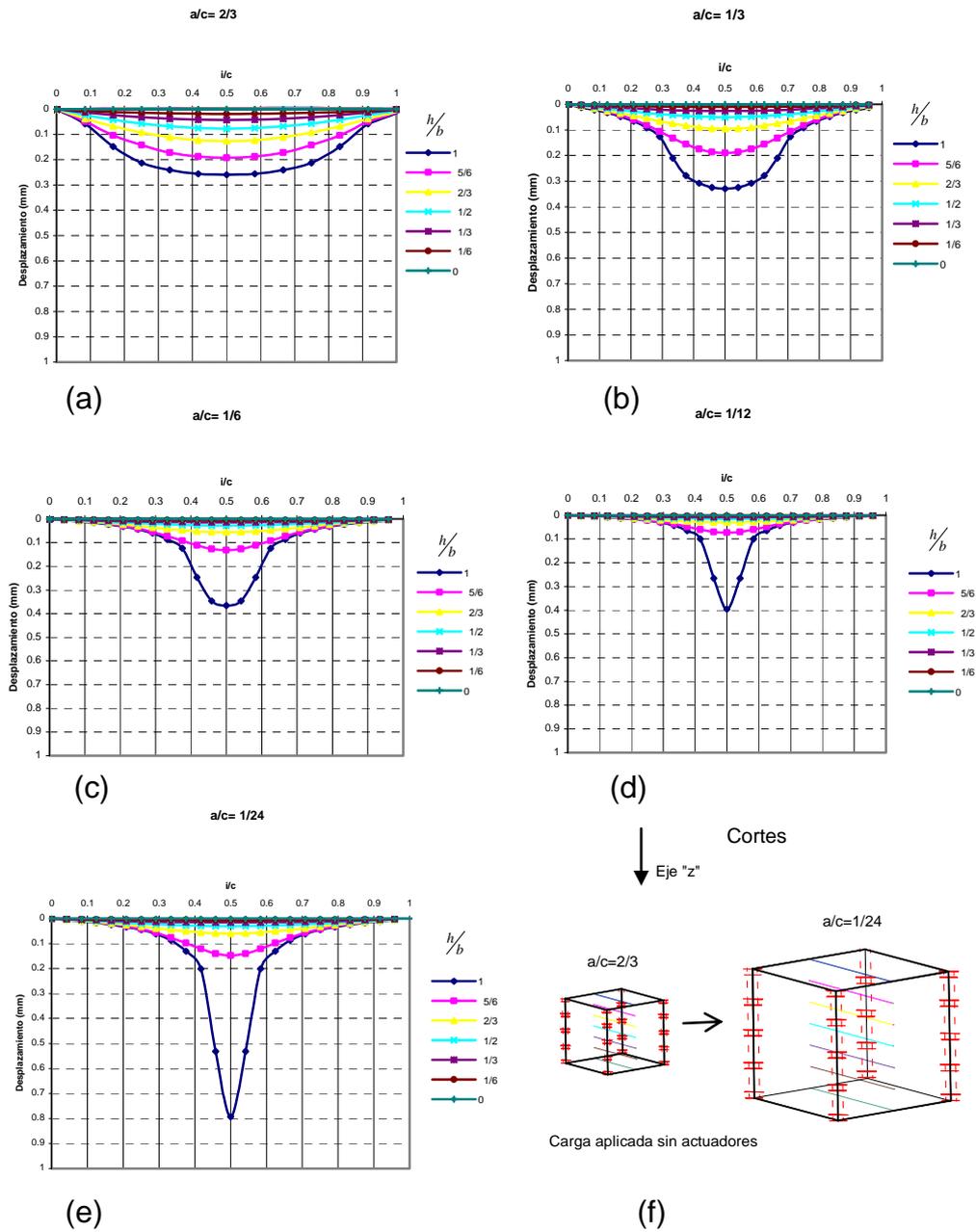


Figura A4.2

Análisis en FLAC 3D, restricciones de movimiento en las fronteras verticales en sentido horizontal. Corte: $d/j=1/2$

Desplazamientos

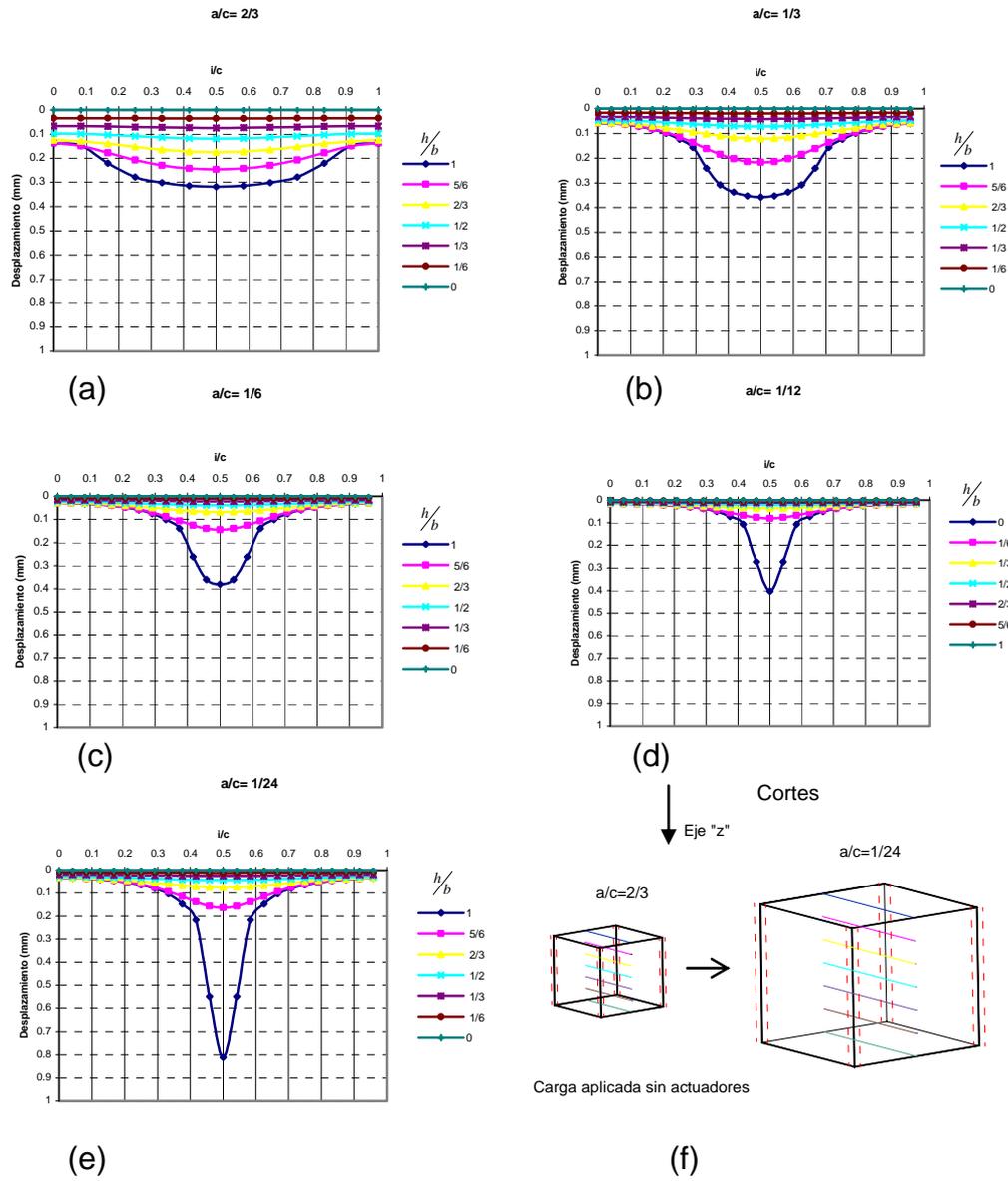


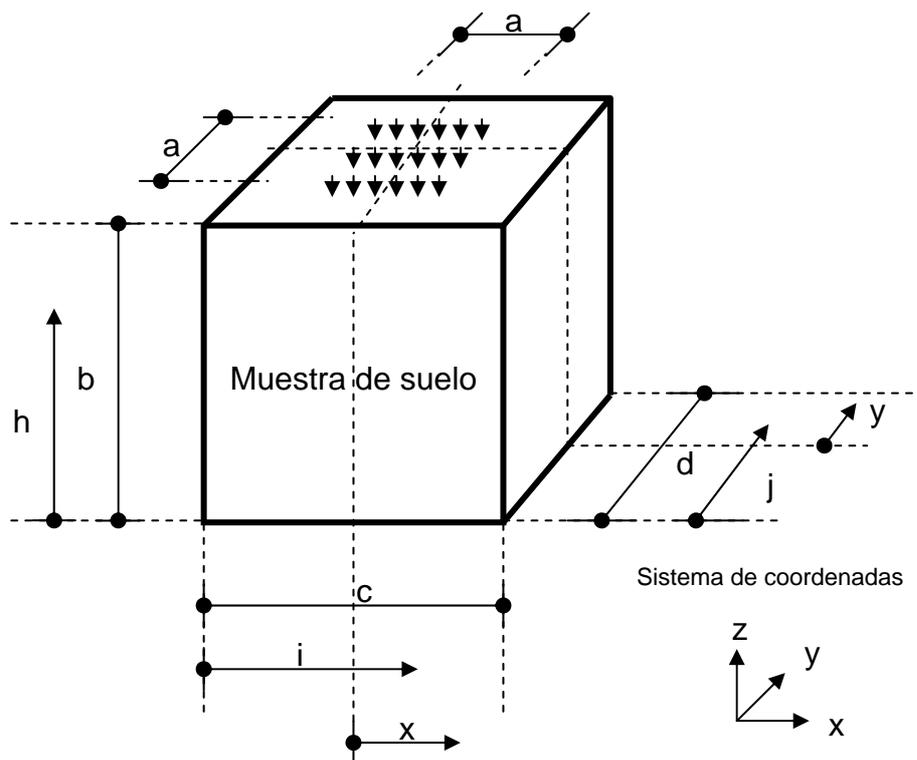
Figura A4.3

En las figuras anteriores, se muestra la influencia de las condiciones de frontera en la magnitud de los desplazamientos, misma que va disminuyendo a medida que alejamos la carga de éstas, algo que desde luego se esperaba. Sin embargo, si comparamos el presente anexo con el caso bidimensional (ver anexo 2), observaremos dos cosas interesantes, la primera es que las deformaciones son menores en el modelo tridimensional para casos similares (iguales condiciones de frontera y misma relación a/c) y la otra, es que el hecho de que se permita o no el desplazamiento vertical en las fronteras verticales, influyen más en la magnitud de los desplazamientos dentro de la muestra en el caso bidimensional que en el tridimensional, debido a que la influencia de la carga se reparte entre dos fronteras en un caso y cuatro en el otro.

ESFUERZOS EN LA CARA Z, DIRECCIÓN Z, NORMALES
OCTAÉDRICOS Y CORTANTES OCTAÉDRICOS PARA UN
CUBO DE 60 cm POR LADO Y CARGA APLICADA CON UN
ACTUADOR
(ANÁLISIS EN FLAC 3D)

En las siguientes modelaciones se muestran las gráficas de esfuerzos en la cara z dirección z (σ_{zz}), esfuerzos normales octaédricos y esfuerzos cortantes octaédricos, para diferentes cortes dentro de la muestra analizada.

Nomenclatura empleada:



Donde: $0 \leq \frac{h}{b} \leq 1$, $0 \leq \frac{i}{c} \leq 1$, $0 \leq \frac{j}{d} \leq 1$, $0 \leq \frac{x}{c/2} \leq 1$ y $0 \leq \frac{y}{d/2} \leq 1$

Figura A5.1 Nomenclatura empleada en los análisis realizados en FLAC 3D

En la tabla A5.1 se muestra la dimensión de la muestra modelada en este anexo.

Tabla A5.1 Dimensiones de la muestra modelada, siendo $b = c = d$

a (cm)	b (cm)	a/c
40	60	2/3

La carga aplicada es de 100 kPa (1kg/cm^2)

Análisis en FLAC 3D, restricciones laterales de movimiento en las fronteras verticales en todas direcciones. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos en la cara "z", dirección "z"

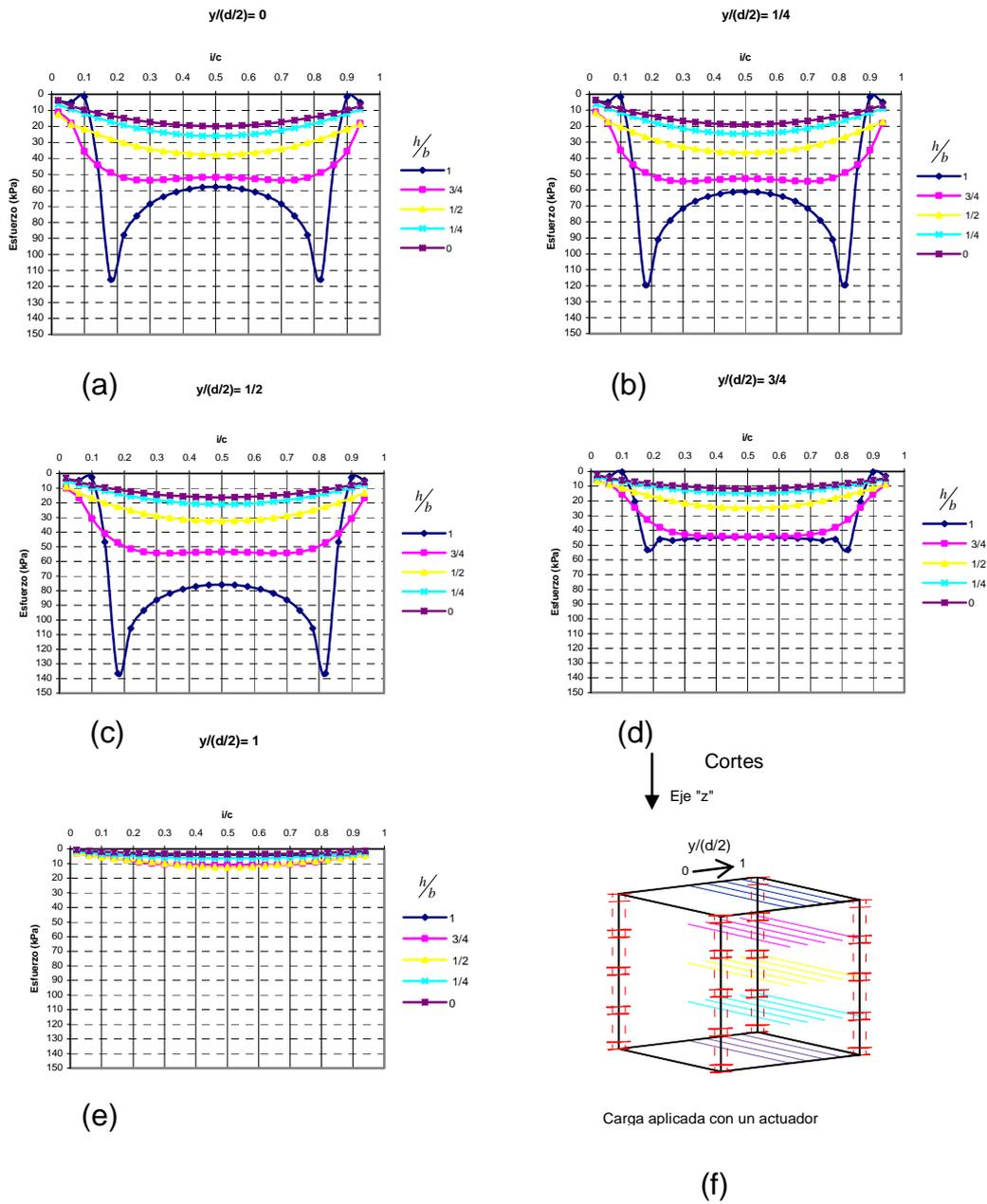
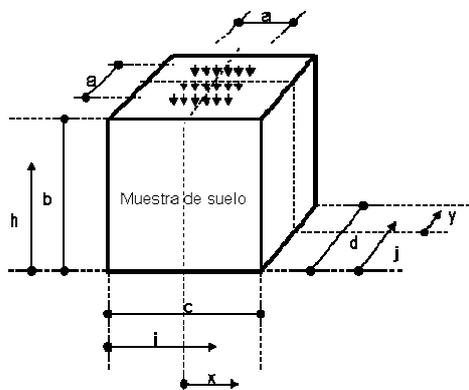


Figura A5.2



Análisis en FLAC 3D, restricciones laterales de movimiento en las fronteras verticales en sentido horizontal. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos en la cara "z", dirección "z"

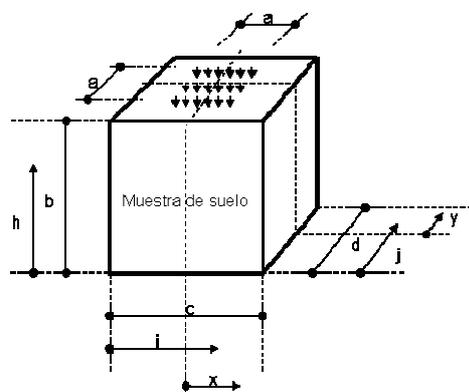
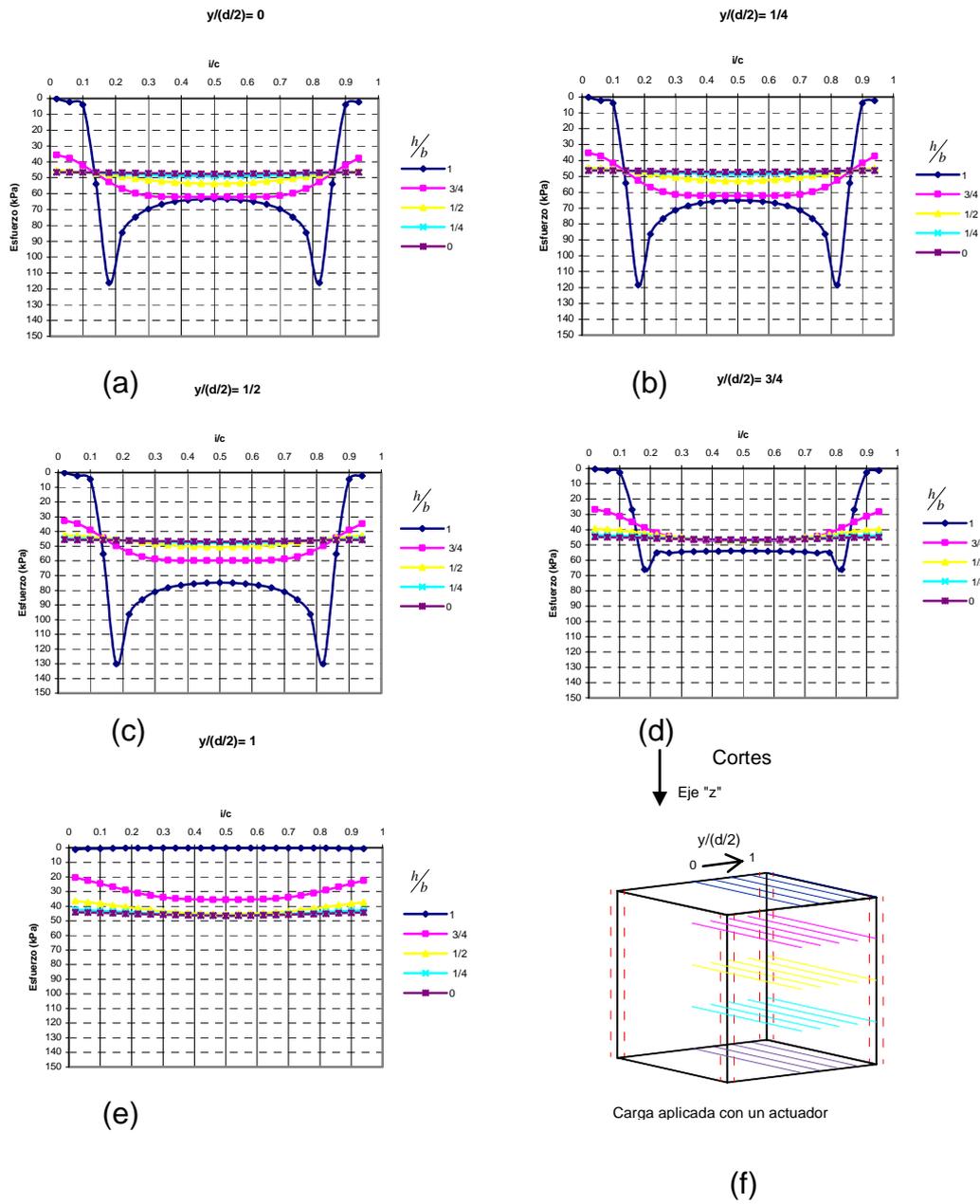


Figura A5.3

Análisis en FLAC 3D, restricciones laterales de movimiento en las fronteras verticales en todas direcciones. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos normales octaédricos

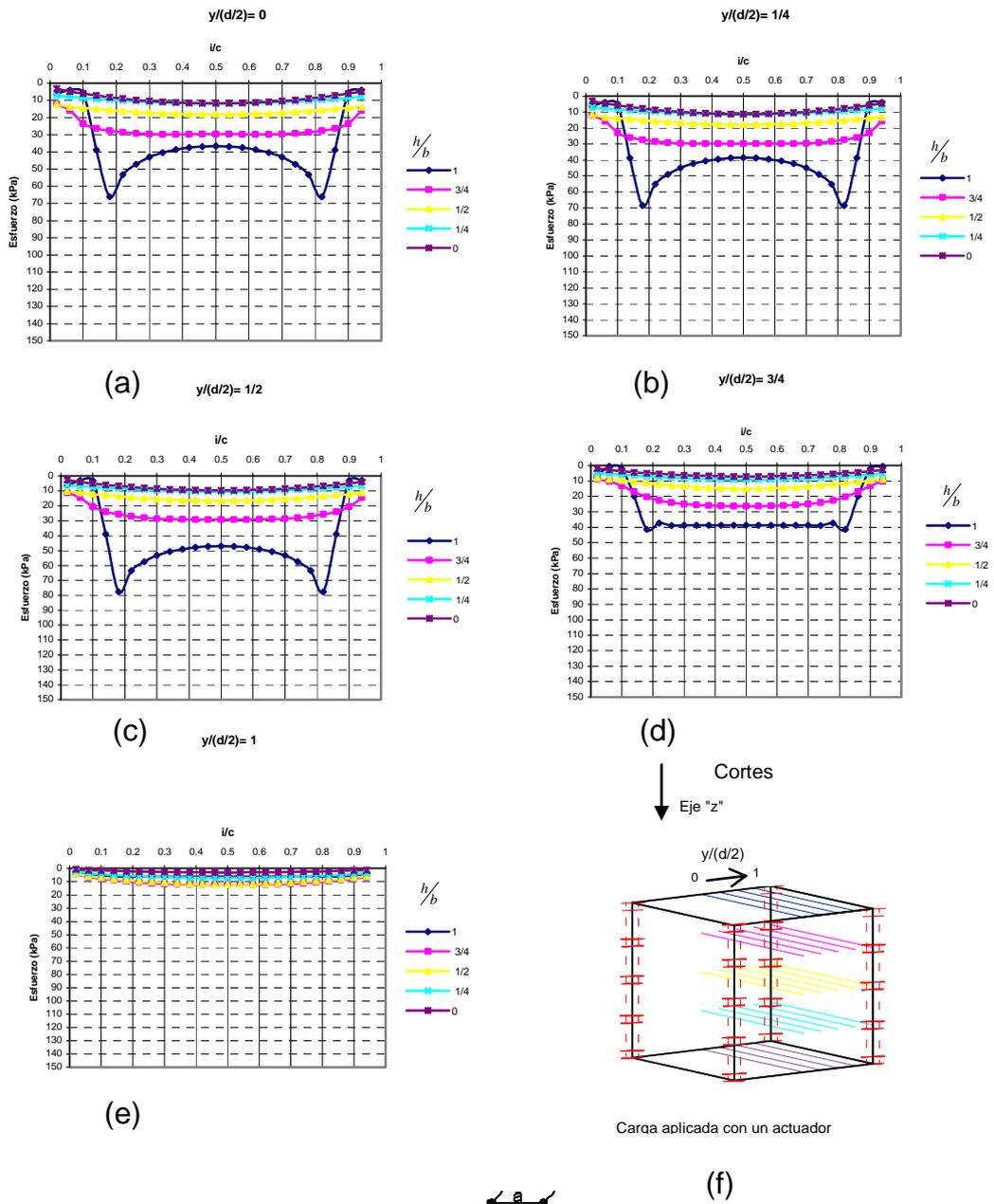


Figura A5.4

Análisis en FLAC 3D, restricciones laterales de movimiento en las fronteras verticales en sentido horizontal. Cubo: $a/c=2/3$
Esfuerzos normales octaédricos

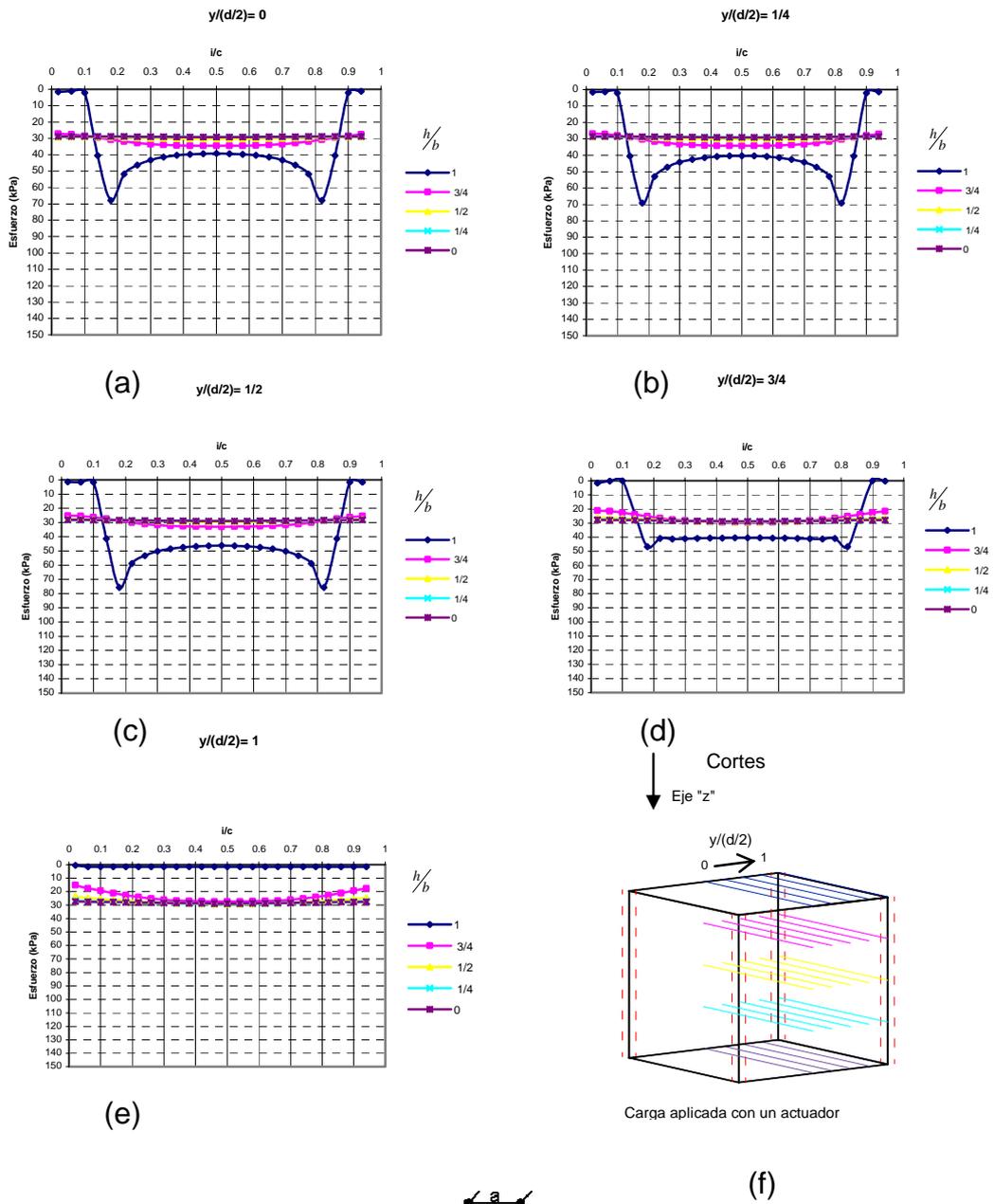


Figura A5.5

Análisis en FLAC 3D, restricciones laterales de movimiento en las fronteras verticales en todas direcciones. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos cortantes octaédricos

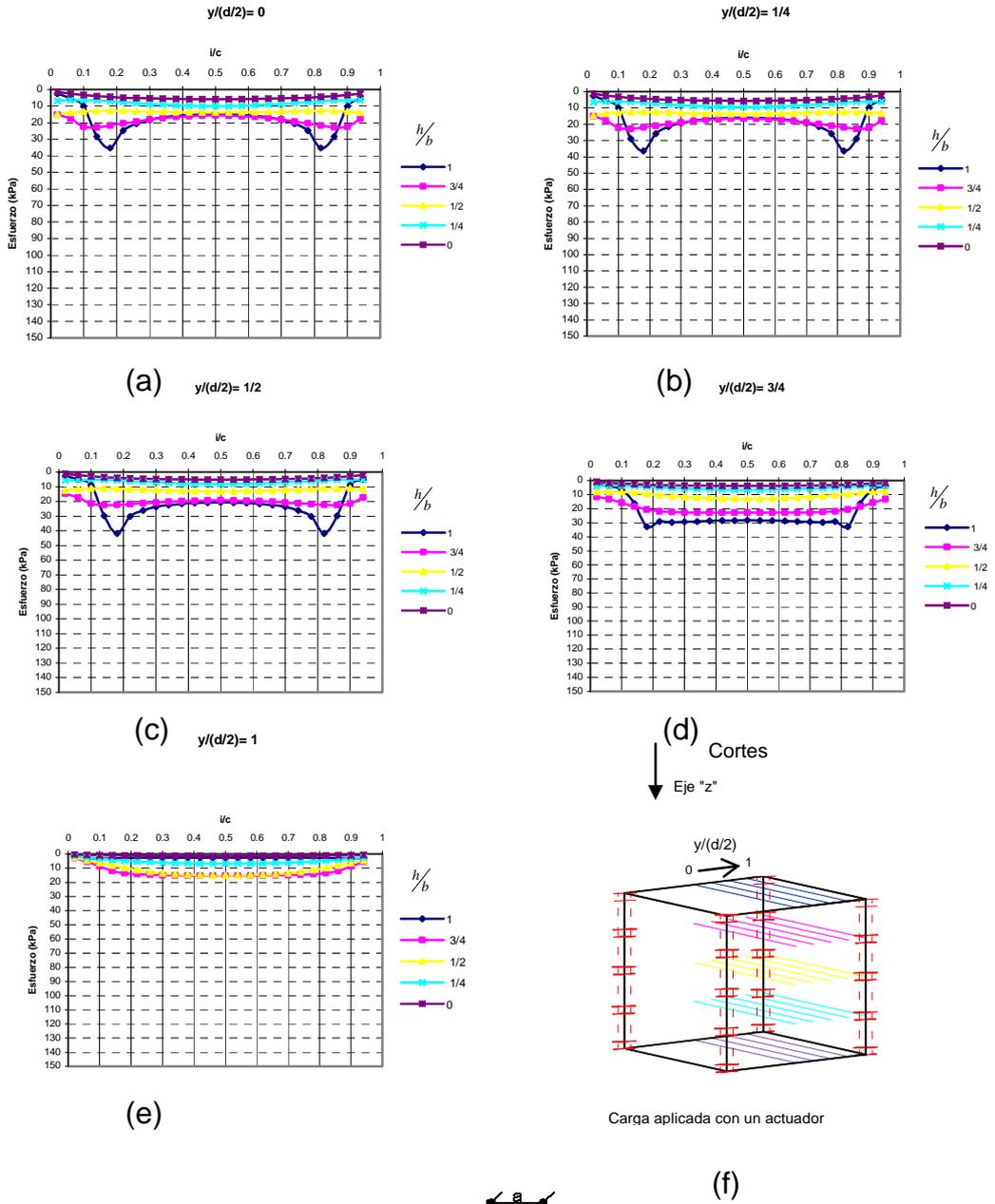


Figura A5.6

Análisis en FLAC 3D, restricciones laterales de movimiento en las fronteras verticales en sentido horizontal. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos cortantes octaédricos

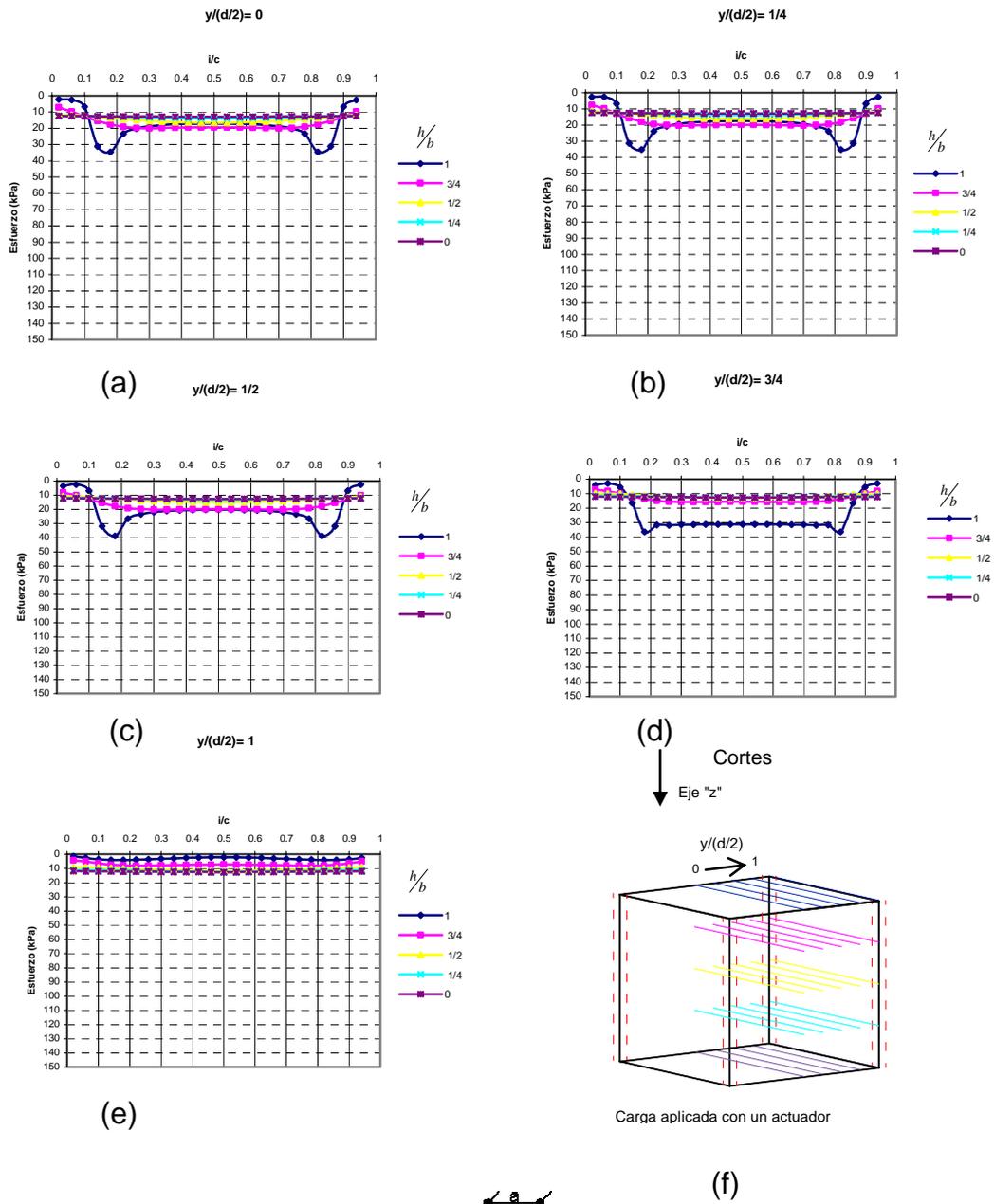


Figura A5.7

Si comparamos las figuras de las modelaciones donde se restringe el movimiento vertical en las fronteras verticales con los casos en los que se permite, notaremos cómo el efecto de arqueado se minimiza en el segundo caso (los esfuerzos dentro de la muestra con relación a la profundidad son mayores).

Por otro lado, analizando las figuras A5.4 y A5.5 (esfuerzos normales octaédricos), podemos observar que para $h/b < 3/4$, los esfuerzos tienden a ser iguales en la dimensión i/c , esto es más evidente en la primer figura mencionada debido a las condiciones de frontera.

En cuanto a los esfuerzos cortantes octaédricos los cuales se muestran en las figuras A.5.6 y A.4.7, vemos que su magnitud tiene una dispersión mayor cuando se restringen los movimientos de las fronteras verticales en sentido vertical.

DESPLAZAMIENTOS TOTALES EN UN CUBO DE 60 cm
POR LADO Y CARGA APLICADA CON UN ACTUADOR
(ANÁLISIS EN FLAC 3D)

En las siguientes figuras se muestran los “desplazamientos totales” en varios cortes de la muestra.

Dichos desplazamientos fueron calculados de acuerdo con la siguiente expresión:

$$dt = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$$

Donde:

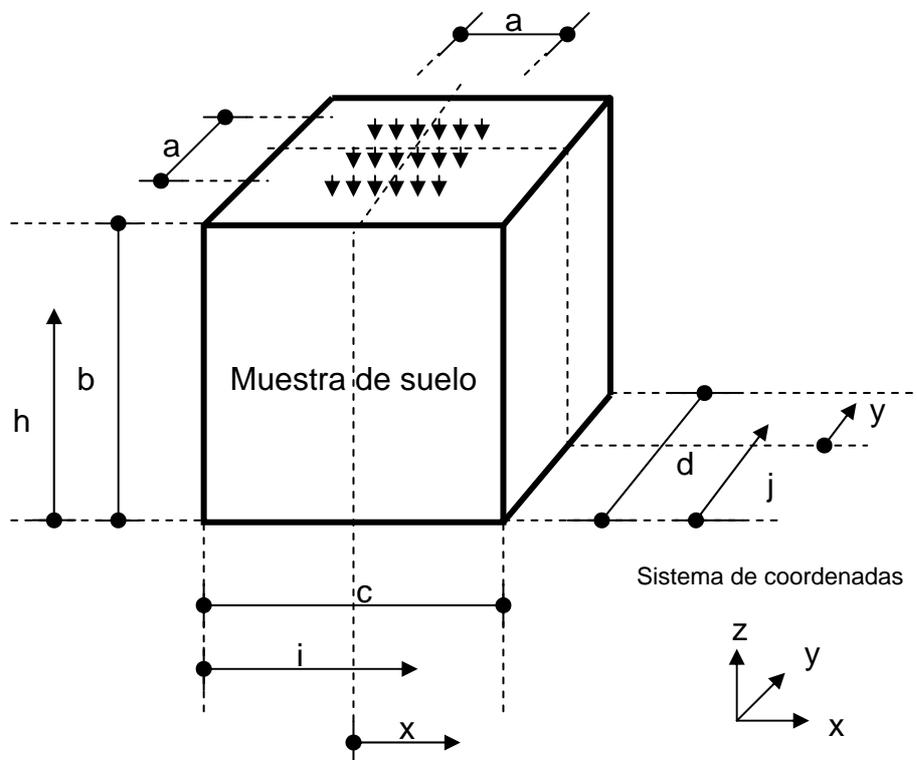
dt.- Desplazamiento total

dx.- Desplazamiento en el eje x

dy.- Desplazamiento en el eje y

dz.- Desplazamiento en el eje z

Nomenclatura empleada:



Donde: $0 \leq h/b \leq 1$, $0 \leq i/c \leq 1$, $0 \leq j/d \leq 1$, $0 \leq \frac{x}{c/2} \leq 1$ y $0 \leq \frac{y}{d/2} \leq 1$

Figura A6.1 Nomenclatura empleada en los análisis realizados en FLAC 3D

En la tabla A6.1 se muestran las dimensiones del modelo en FLAC 3D.

Tabla A6.1 Dimensiones de la muestra analizada, siendo $b = c = d$

a (cm)	b (cm)	a/c
40	60	2/3

La carga aplicada es de 100 kPa (1kg/cm²)

Análisis en FLAC 3D, restricciones laterales de movimiento en las fronteras verticales en todas direcciones. Cubo: $a/c=2/3$

Desplazamientos

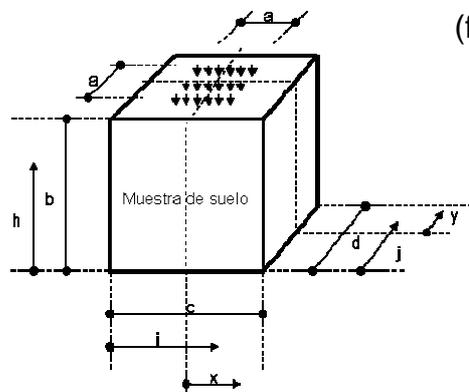
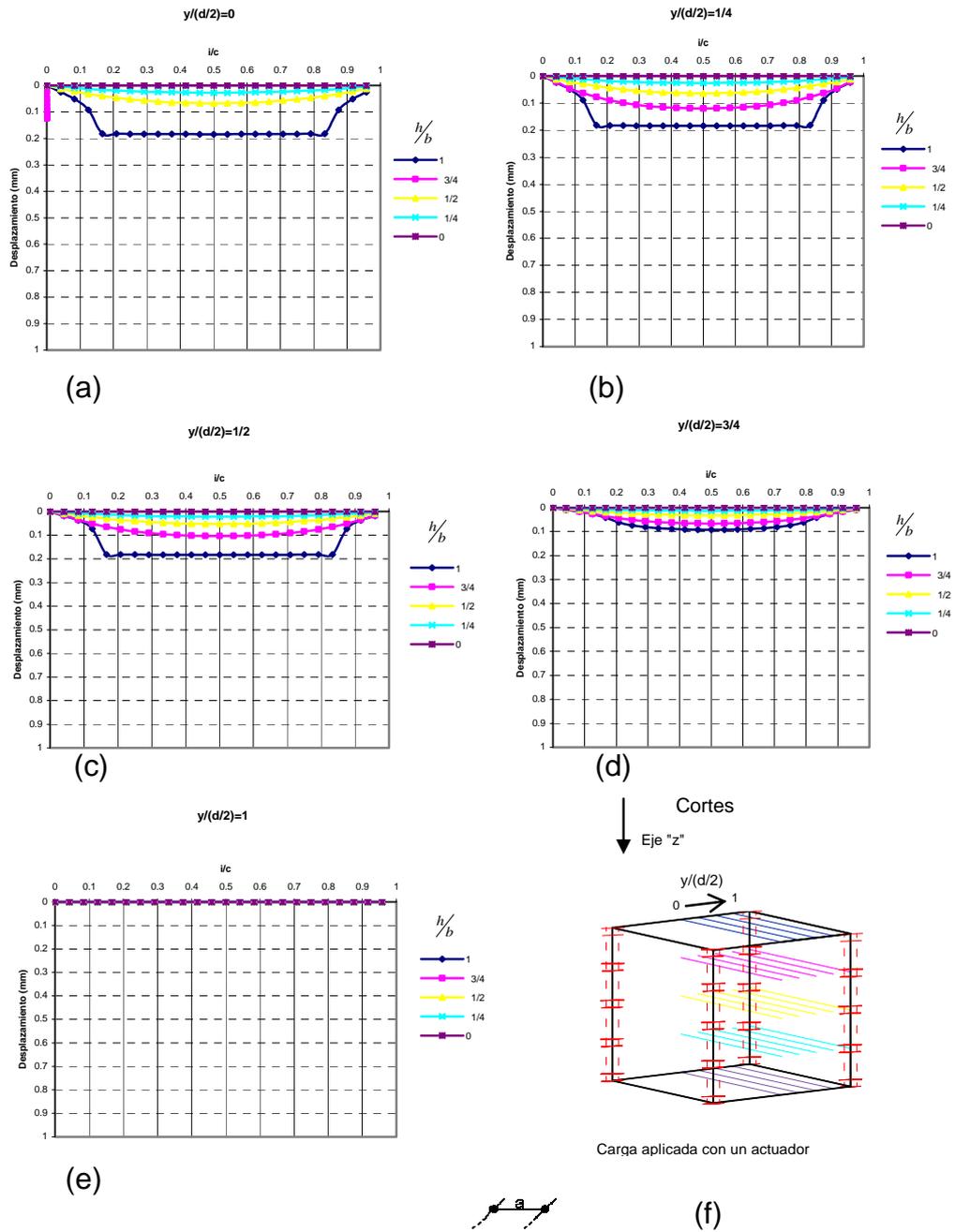


Figura A6.2

Análisis en FLAC 3D, restricciones laterales de movimiento en las fronteras verticales en sentido horizontal. Cubo: $a/c=2/3$

Desplazamientos

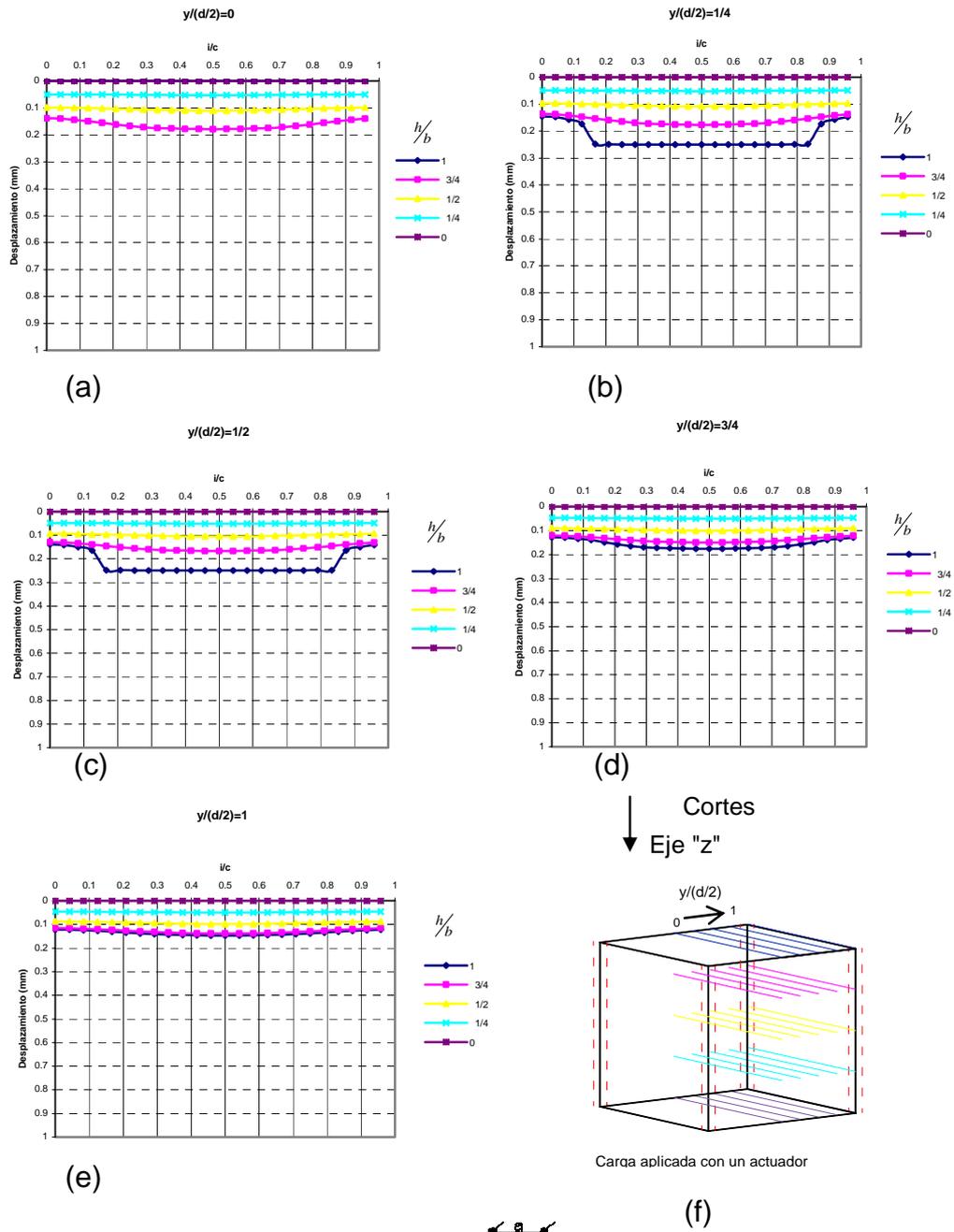


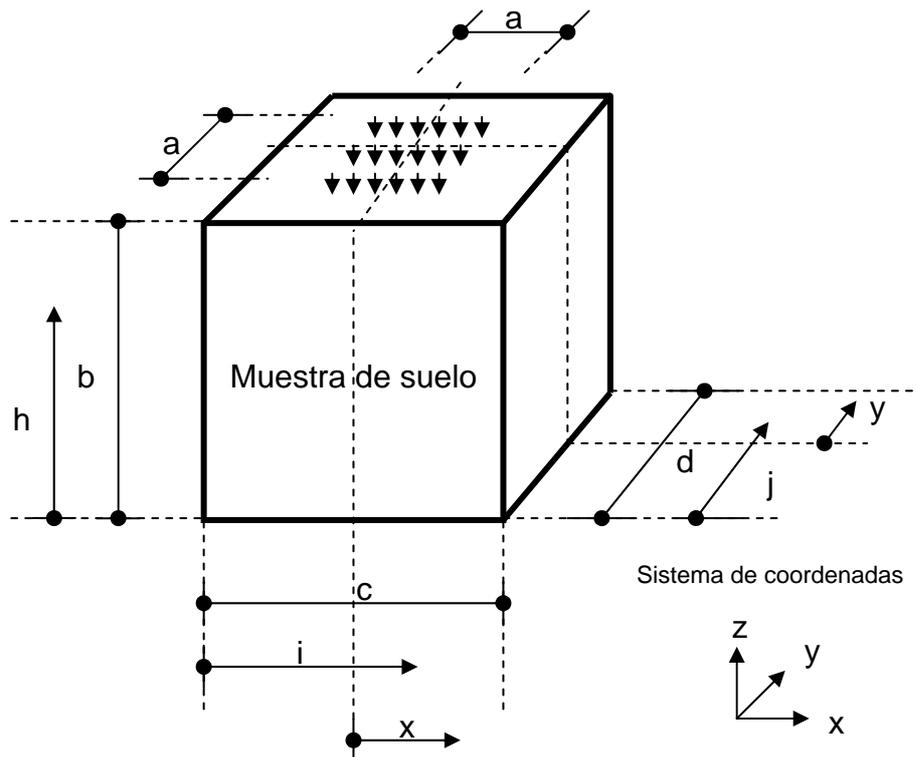
Figura A6.3

En las figuras A6.2 y A6.3, se puede observar que los desplazamientos son más uniformes con relación a la profundidad para el caso donde no se restringen los desplazamientos en las fronteras verticales en sentido vertical, pero aún en el caso en el que se hace, éstos muestran gran uniformidad dentro del rango $0.20 < i/c < 0.80$.

ESFUERZOS EN LAS CARAS Z DIRECCIÓN Z,
NORMALES OCTAÉDRICOS Y CORTANTES
OCTAÉDRICOS PARA UN CUBO DE 60 cm POR LADO Y
CARGA APLICADA CON DOS ACTUADORES
(ANÁLISIS EN FLAC 3D)

En las siguientes modelaciones se muestran las gráficas de esfuerzos en las caras z (dirección z (σ_{zz}), esfuerzos normales octaédricos y esfuerzos cortantes octaédricos, para diferentes cortes dentro de la muestra analizada.

Nomenclatura empleada:



Donde: $0 \leq \frac{h}{b} \leq 1$, $0 \leq \frac{i}{c} \leq 1$, $0 \leq \frac{j}{d} \leq 1$, $0 \leq \frac{x}{c/2} \leq 1$ y $0 \leq \frac{y}{d/2} \leq 1$

Figura A7.1 Nomenclatura empleada en los análisis realizados en FLAC 3D

En la tabla A7.1 se muestra las dimensiones de la muestra analizada.

Tabla A7.1 Dimensiones de la muestra analizada, siendo $b = c = d$

a (cm)	b (cm)	a/c
40	60	2/3

La carga aplicada es de 100 kPa (1kg/cm^2)

Análisis en FLAC 3D, restricciones laterales de movimiento en las fronteras verticales en todas direcciones. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos en la cara "z", dirección "z"

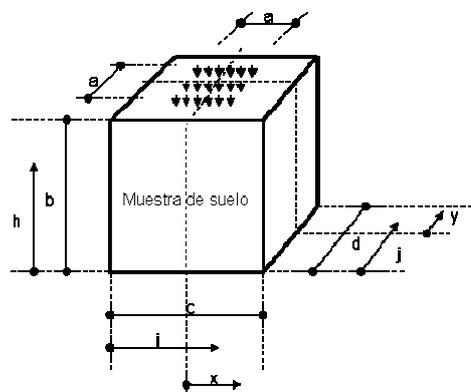
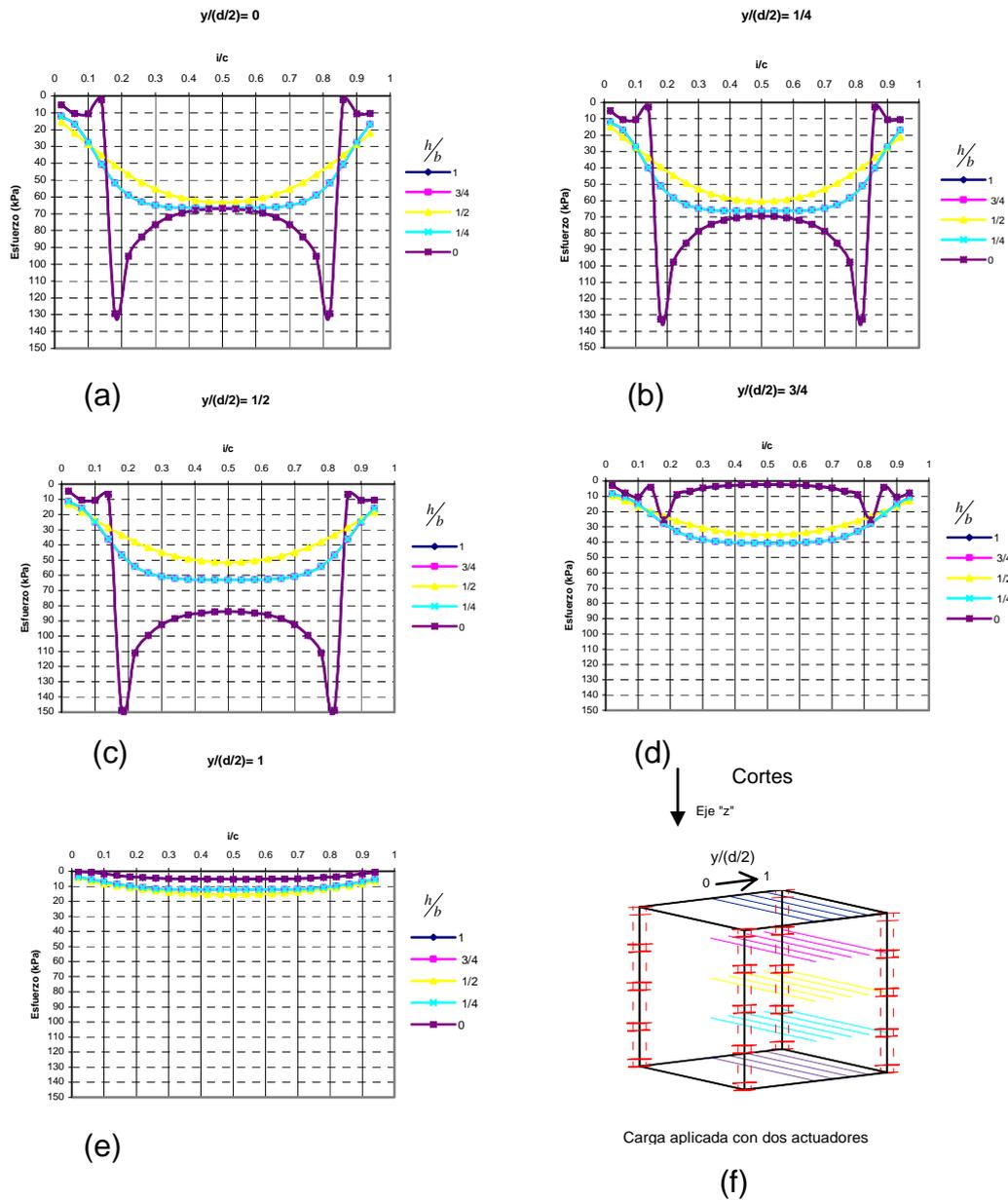


Figura A7.2

Análisis en FLAC 3D, restricciones laterales de movimiento en las fronteras verticales en sentido horizontal. Cubo: $a/c=2/3$
 Esfuerzos en la cara "z", dirección "z"

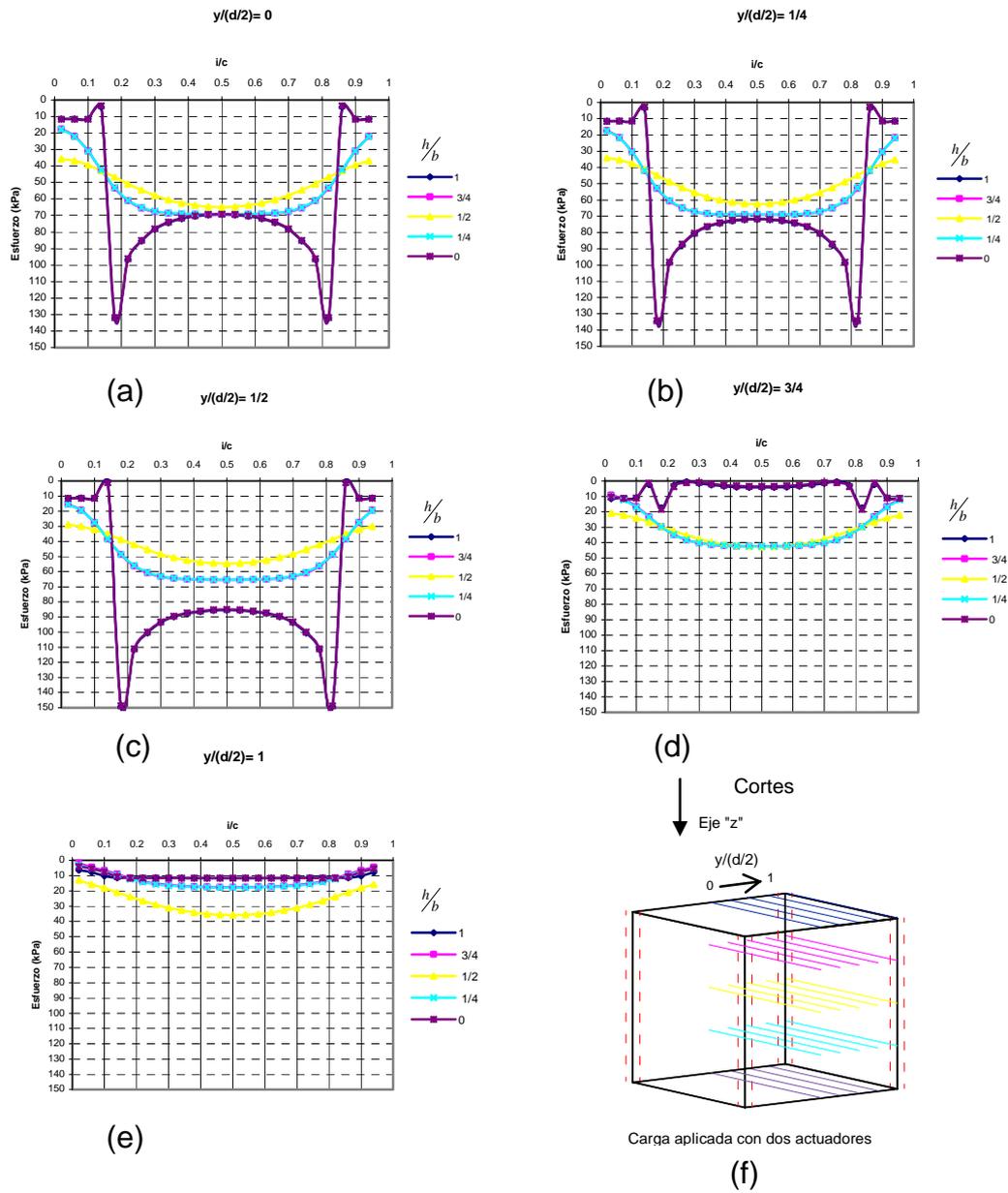


Figura A7.3

Análisis en FLAC 3D, restricciones laterales de movimiento en las fronteras verticales en todas direcciones. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos normales octaédricos

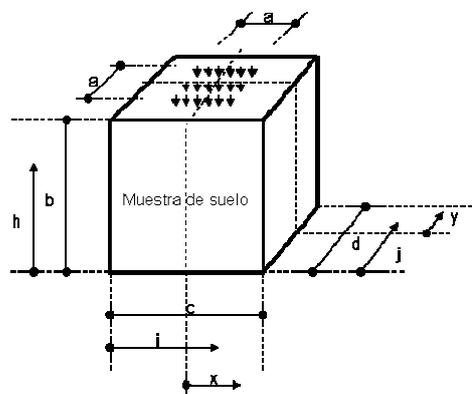
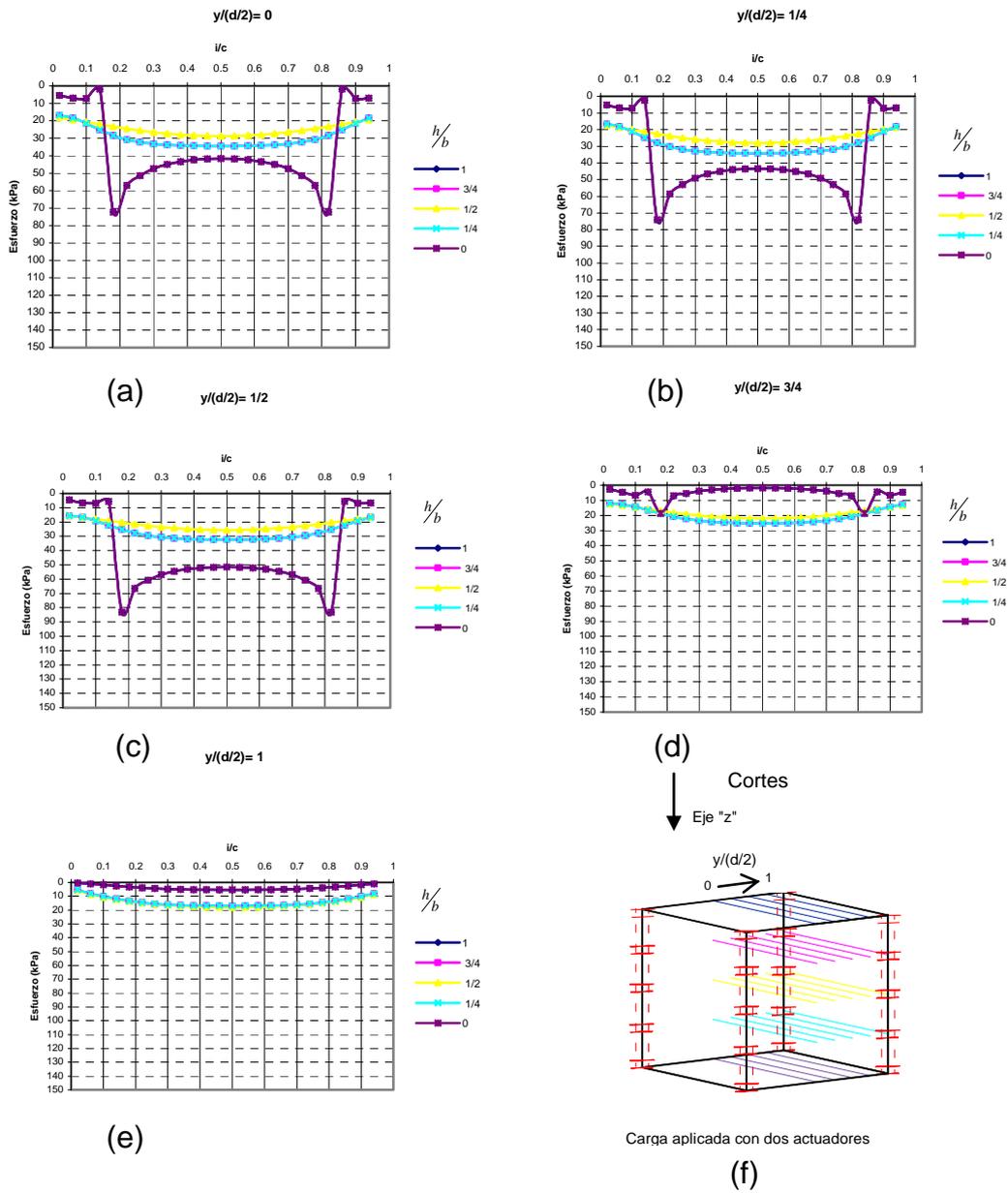


Figura A7.4

Análisis en FLAC 3D, restricciones laterales de movimiento en las fronteras verticales en sentido horizontal. Cubo: $a/c=2/3$
 Esfuerzos normales octaédricos

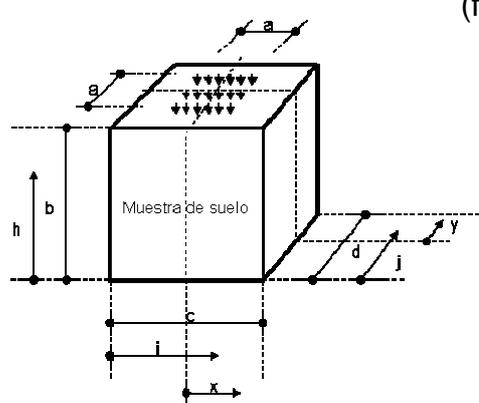
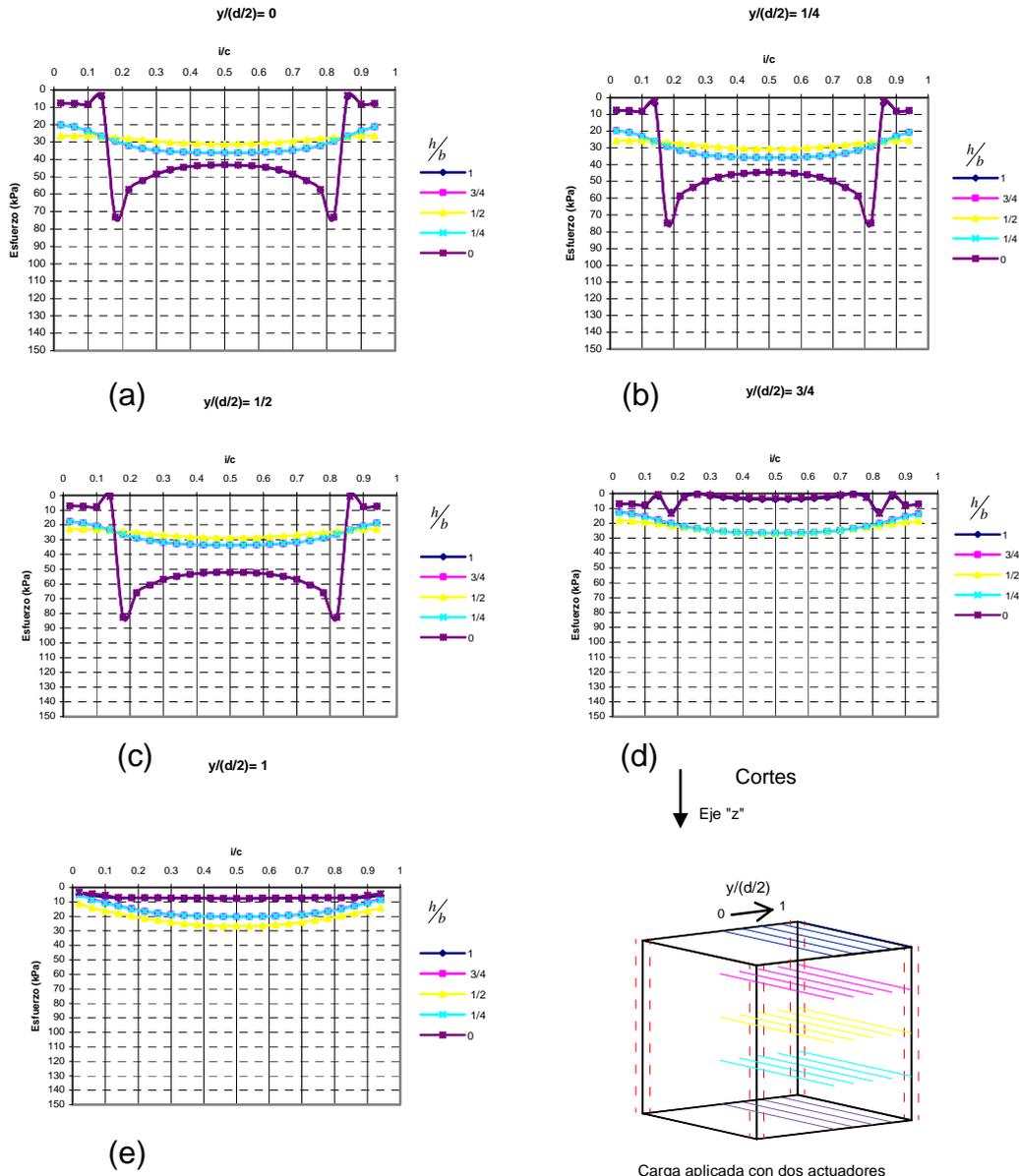


Figura A7.5

Análisis en FLAC 3D, restricciones laterales de movimiento en las fronteras verticales en todas direcciones. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos cortantes octaédricos

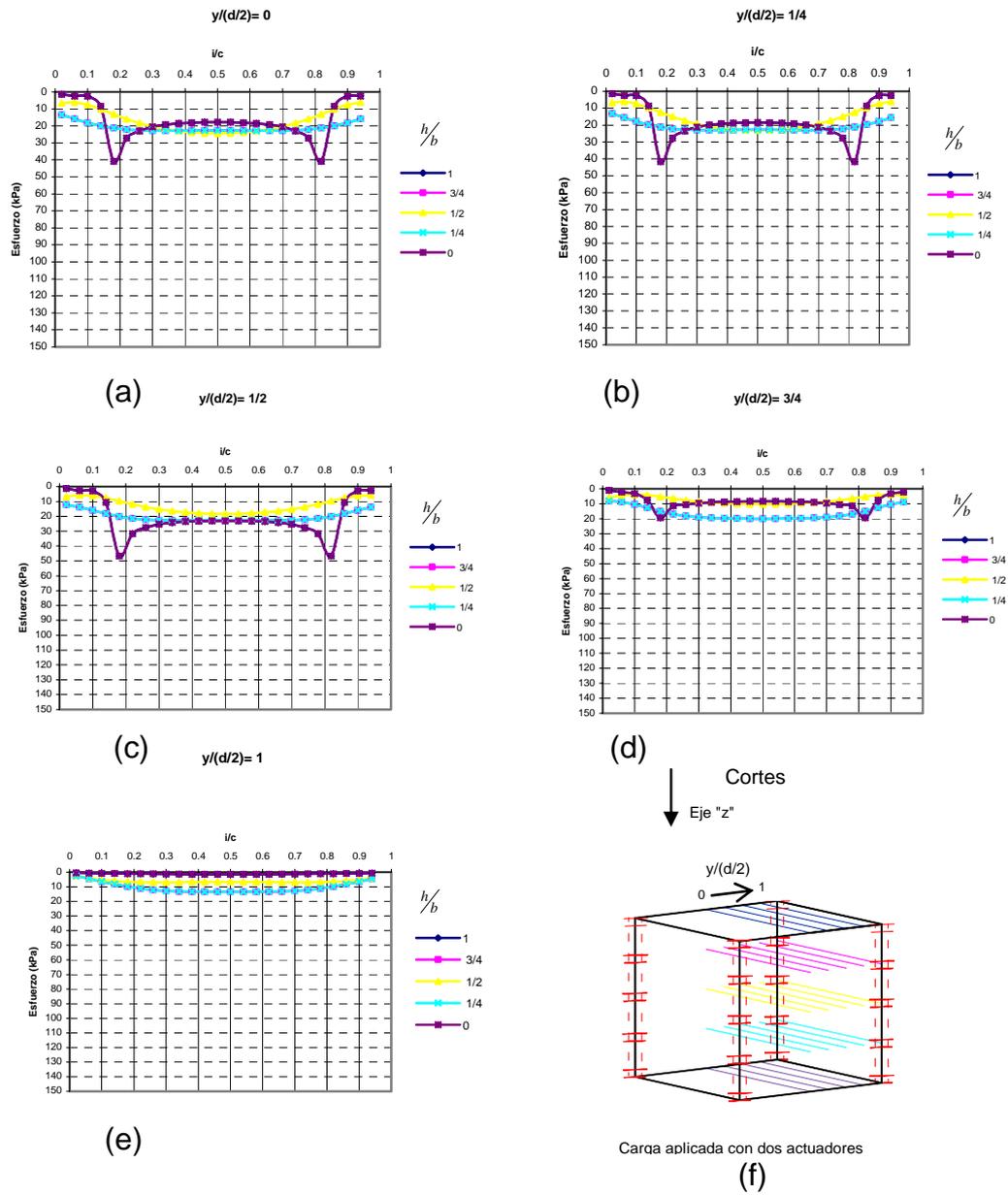
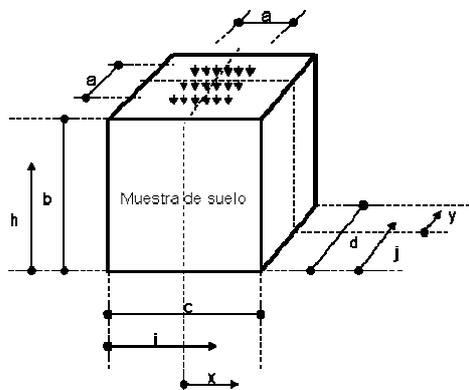


Figura A7.6



Análisis en FLAC 3D, restricciones laterales de movimiento en las fronteras verticales en sentido horizontal. Cubo: $a/c=2/3$
 Esfuerzos cortantes octaédricos

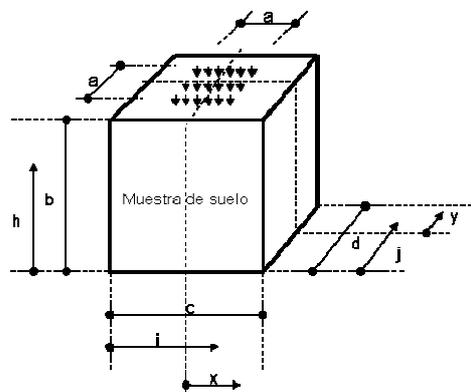
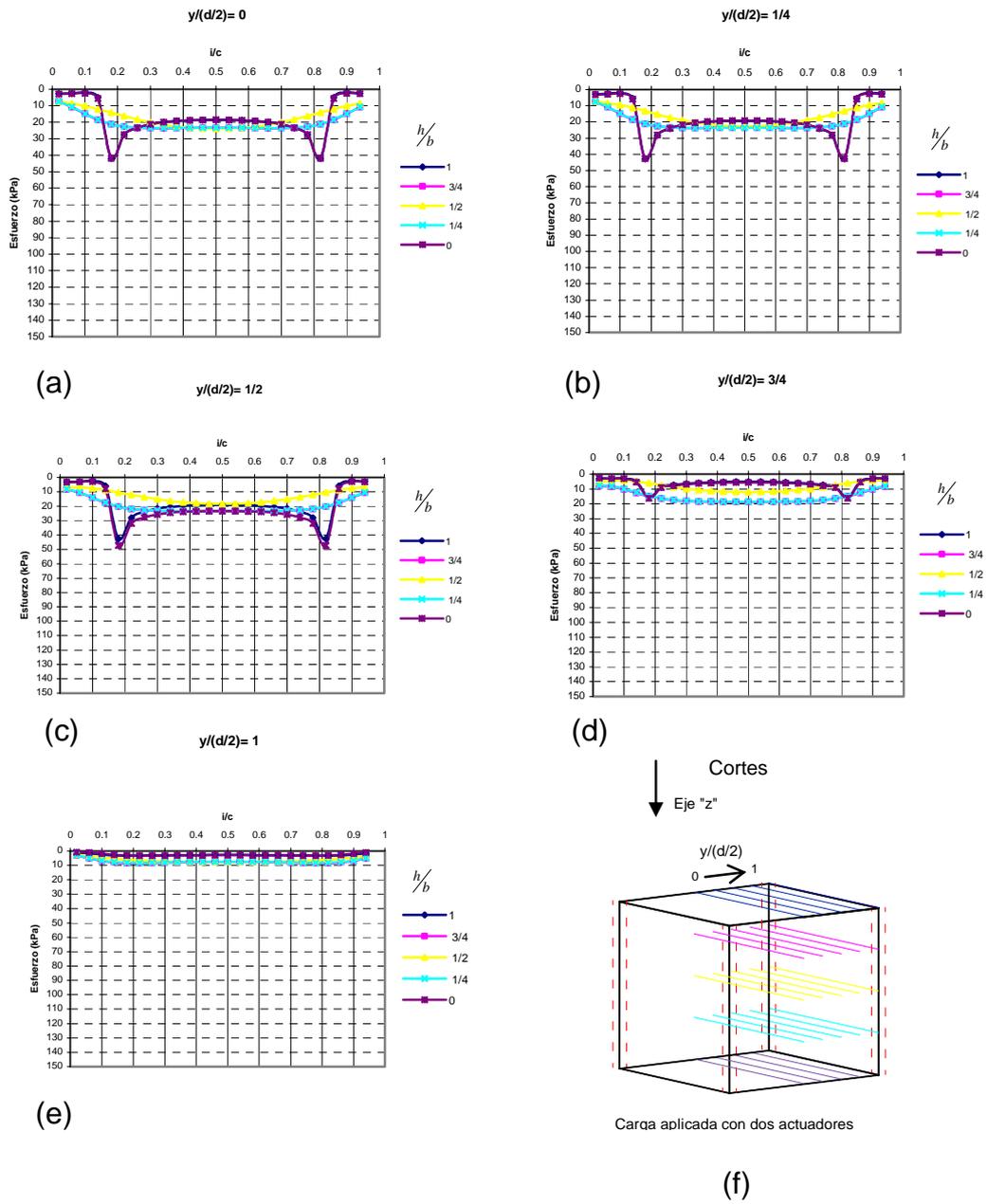


Figura A7.7

En este anexo se puede observar que los esfuerzos con relación a la profundidad son bastante uniformes dentro del rango $0.25 < i/c < 0.75$ y $1/4 < h/b < 3/4$, para todos los casos, esto se ve más claramente cuando no se restringen los desplazamientos de las fronteras verticales en sentido vertical.

Así mismo, se observa la existencia de un eje de simetría en los esfuerzos, en un plano horizontal que pasa por $h/b=1/2$.

DESPLAZAMIENTOS TOTALES EN UN CUBO DE 60 cm
POR LADO Y CARGA APLICADA CON DOS
ACTUADORES
(ANÁLISIS EN FLAC 3D)

En las siguientes figuras se muestran los “desplazamientos totales” en varios cortes de la muestra.

Dichos desplazamientos fueron calculados de acuerdo con la siguiente expresión:

$$dt = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$$

Donde:

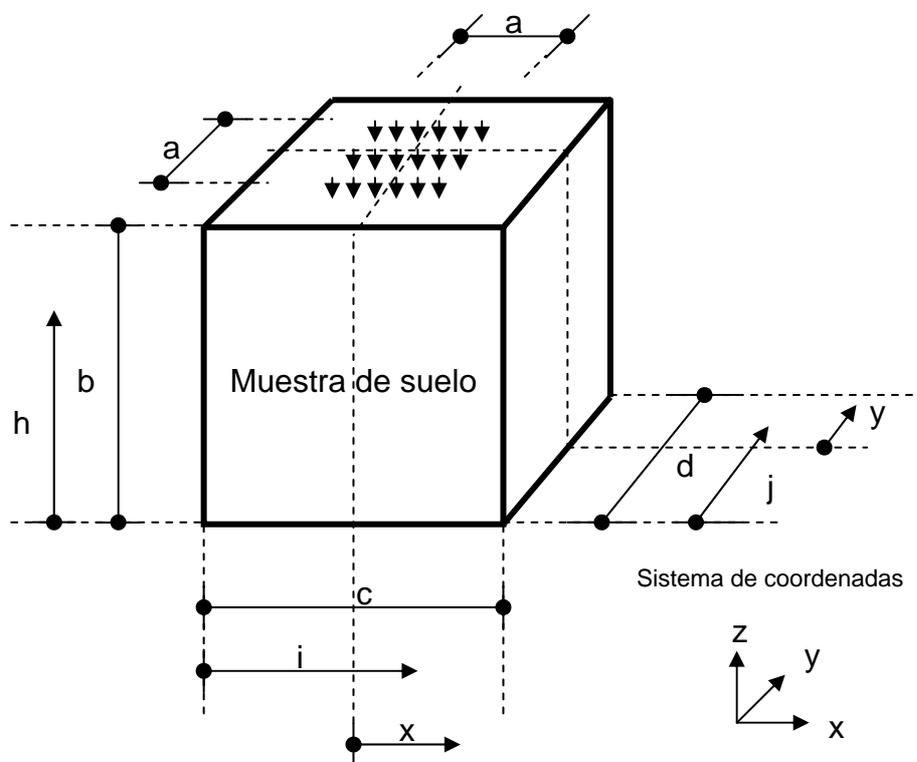
dt.- Desplazamiento total

dx.- Desplazamiento en el eje x

dy.- Desplazamiento en el eje y

dz.- Desplazamiento en el eje z

Nomenclatura empleada:



Donde: $0 \leq \frac{h}{b} \leq 1$, $0 \leq \frac{i}{c} \leq 1$, $0 \leq \frac{j}{d} \leq 1$, $0 \leq \frac{x}{c/2} \leq 1$ y $0 \leq \frac{y}{d/2} \leq 1$

Figura A8.1 Nomenclatura empleada en los análisis realizados en FLAC 3D

En la tabla A8.1 se muestran las dimensiones de la muestra modelada.

Tabla A8.1 Dimensiones de la muestra modelada, siendo $b = c = d$

a (cm)	b (cm)	a/c
40	60	2/3

La carga aplicada es de 100 kPa (1kg/cm²)

Análisis en FLAC 3D, restricciones laterales de movimiento en las fronteras verticales en todas direcciones. Cubo: $a/c=2/3$
Desplazamientos

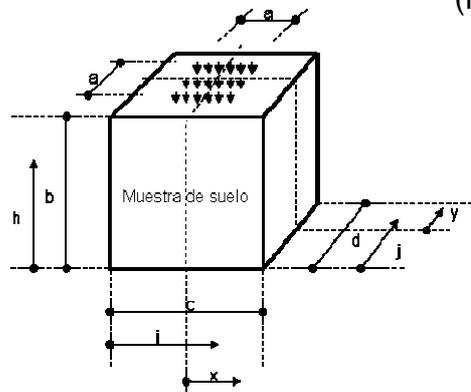
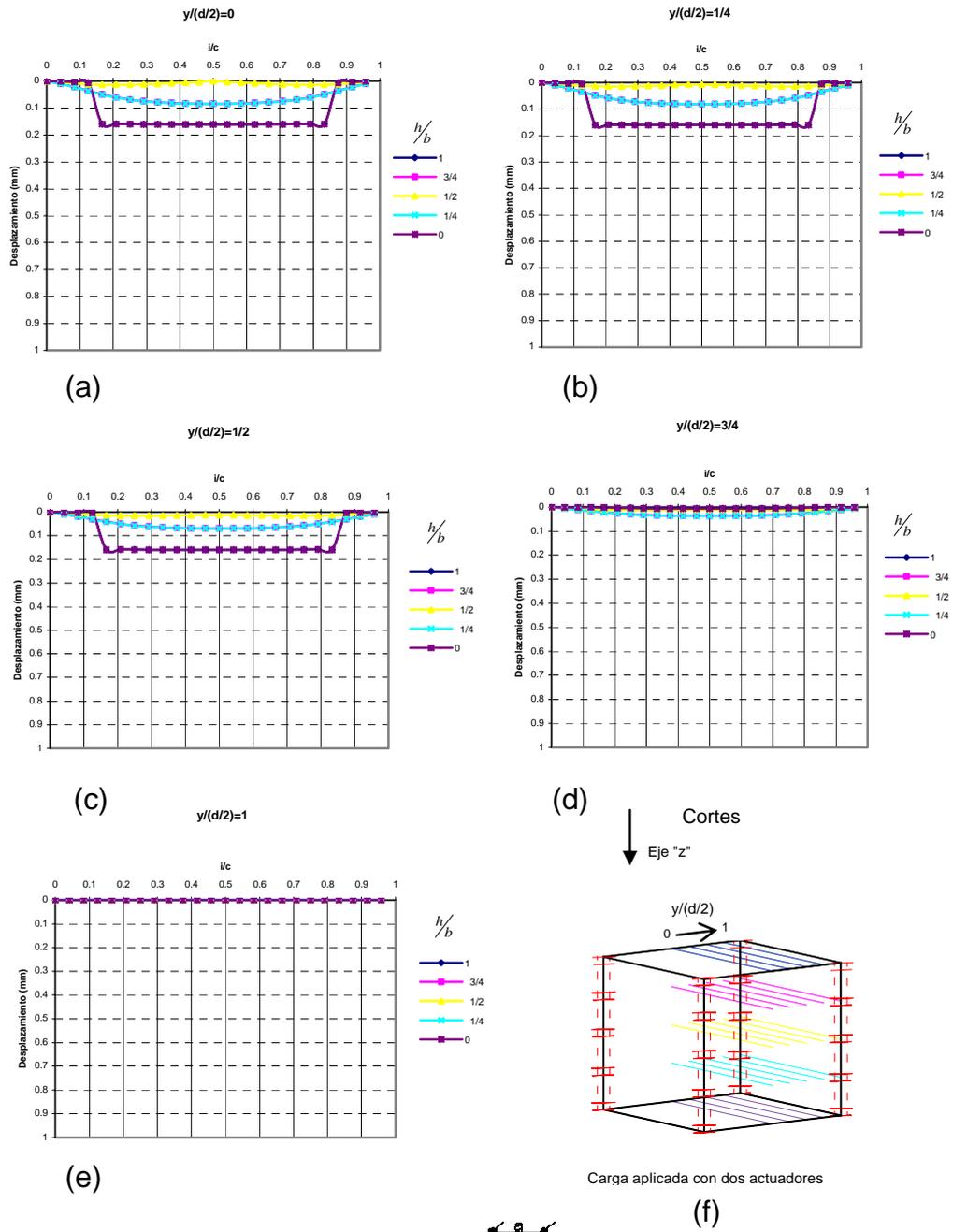


Figura A8.2

Análisis en FLAC 3D, restricciones laterales de movimiento en las fronteras verticales en sentido horizontal. Cubo: $a/c=2/3$

Desplazamientos

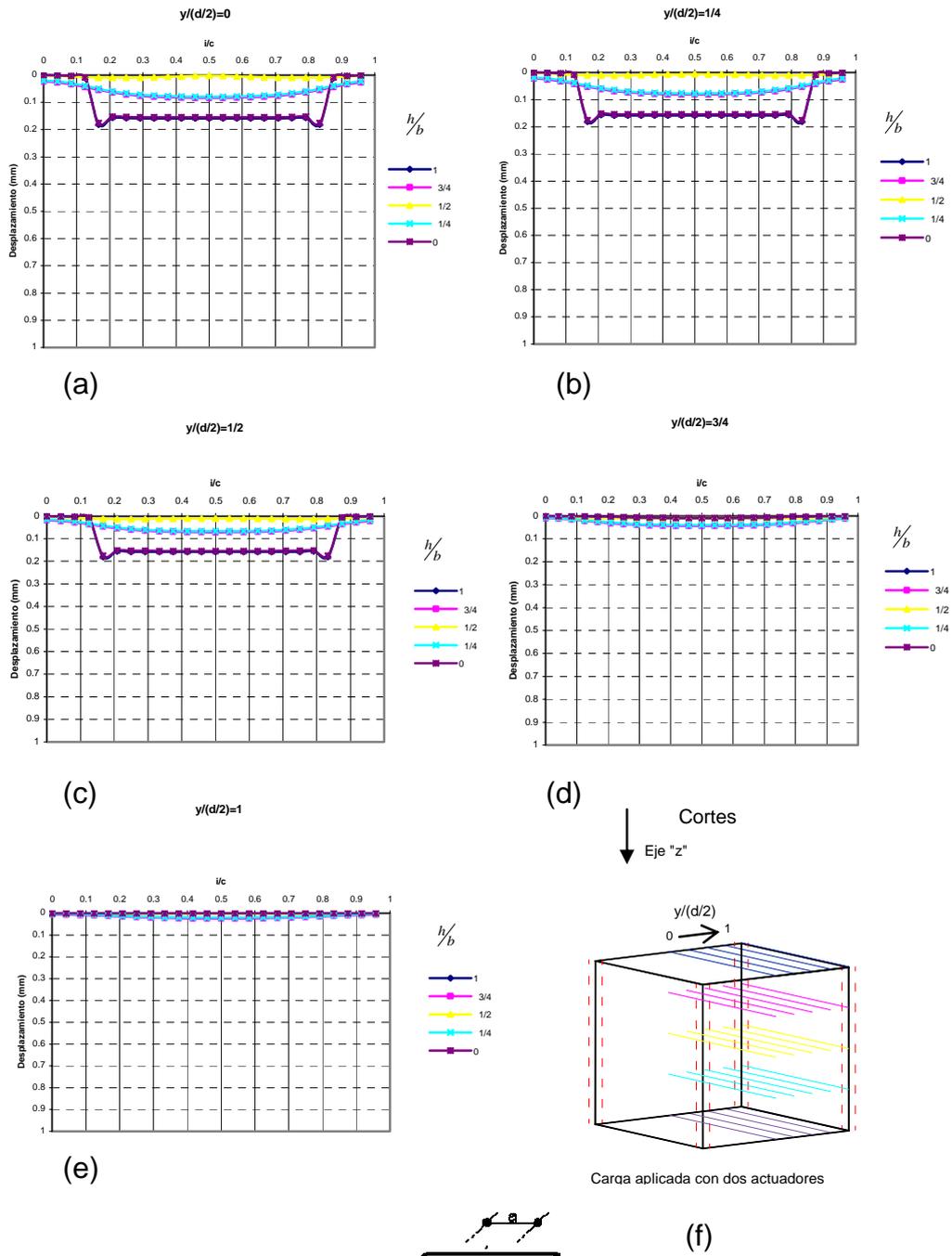


Figura A8.3

En las figuras se puede apreciar que los desplazamientos son prácticamente uniformes con relación a la profundidad dentro del rango $0.2 < i/c < 0.8$, para ambos casos de frontera.

DESPLAZAMIENTOS TOTALES EN UN CUBO DE 60 cm
POR LADO Y CARGA APLICADA CON SEIS
ACTUADORES
(ANÁLISIS EN FLAC 3D)

En las siguientes figuras se muestran los “desplazamientos totales” en varios cortes de la muestra.

Dichos desplazamientos fueron calculados de acuerdo con la siguiente expresión:

$$dt = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$$

Donde:

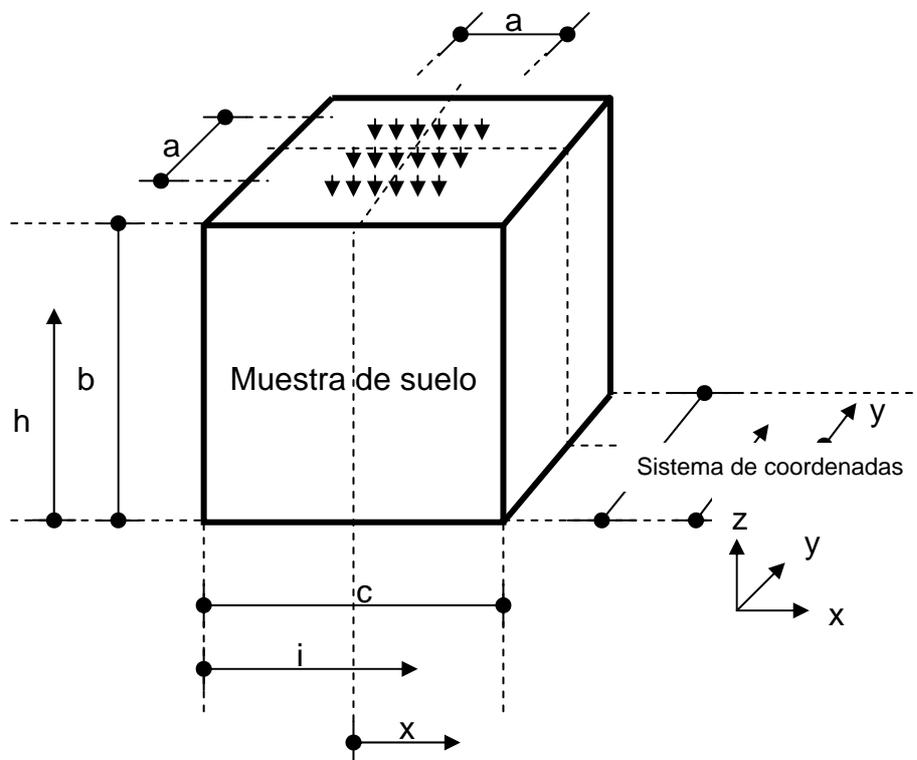
dt.- Desplazamiento total

dx.- Desplazamiento en el eje x

dy.- Desplazamiento en el eje y

dz.- Desplazamiento en el eje z

Nomenclatura empleada:



Donde: $0 \leq \frac{h}{b} \leq 1$, $0 \leq \frac{i}{c} \leq 1$, $0 \leq \frac{j}{d} \leq 1$, $0 \leq \frac{x}{c/2} \leq 1$ y $0 \leq \frac{y}{d/2} \leq 1$

Figura A9.1 Nomenclatura empleada en los análisis realizados en FLAC 3D

En la tabla A9.1 Se muestran las dimensiones de la muestra modelada.

Tabla A9.1 Dimensiones de la muestra modelada, siendo $b = c = d$

a (cm)	b (cm)	a/c
40	60	2/3

La carga aplicada es de 100 kPa ($1\text{kg}/\text{cm}^2$)

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Desplazamientos

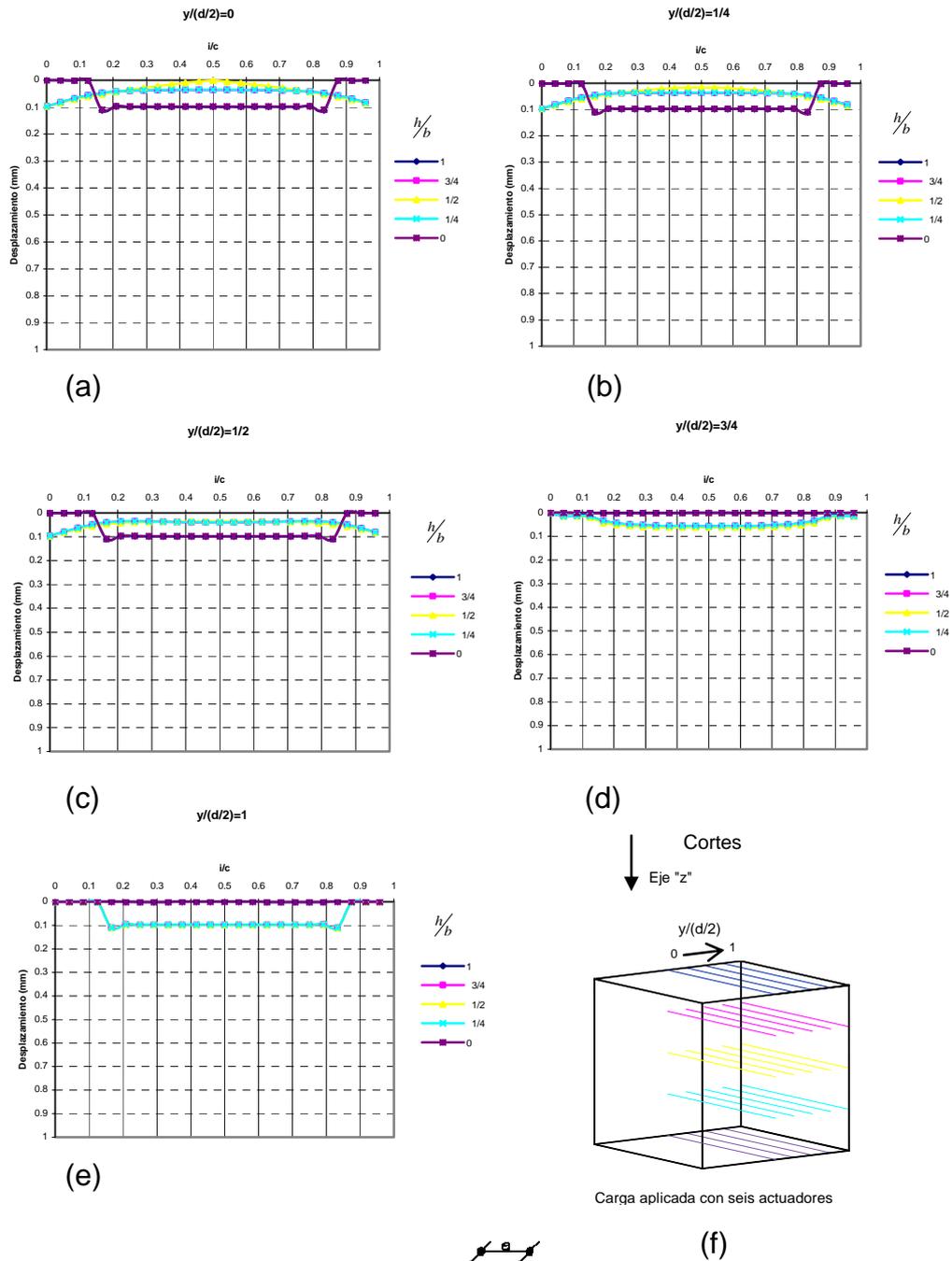


Figura A9.2

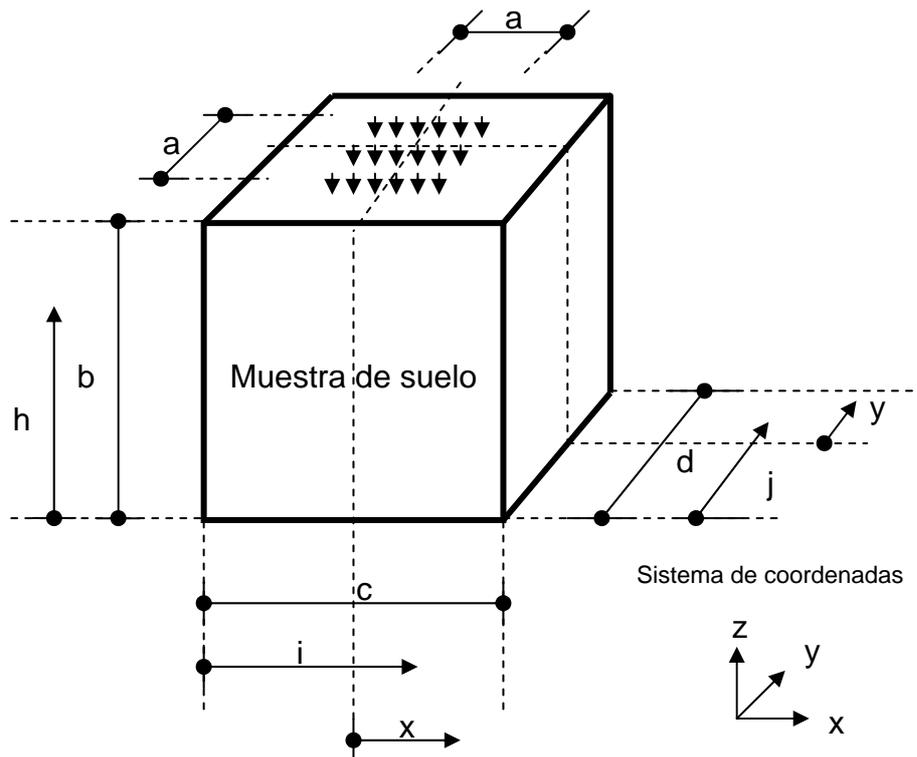
En la figura se puede apreciar que los desplazamientos son prácticamente uniformes con relación a la profundidad dentro del rango $0.2 < i/c < 0.8$ para todos los valores h/b .

ANEXO A10

ESFUERZOS EN LAS CARAS Z, DIRECCIÓN Z,
NORMALES OCTAÉDRICOS Y CORTANTES
OCTAÉDRICOS, EN UN CUBO DE 60 cm POR LADO.
CARGA DE 200 kPa (2 kg/cm²) APLICADA CON SEIS
ACTUADORES
(ANÁLISIS EN FLAC 3D)

En las siguientes modelaciones se muestran las gráficas de esfuerzos en las caras z dirección z (σ_{zz}), esfuerzos normales octaédricos y esfuerzos cortantes octaédricos, para diferentes cortes dentro de la muestra analizada.

Nomenclatura empleada:



$$\text{Donde: } 0 \leq \frac{h}{b} \leq 1, \quad 0 \leq \frac{i}{c} \leq 1, \quad 0 \leq \frac{j}{d} \leq 1, \quad 0 \leq \frac{x}{c/2} \leq 1 \quad \text{y} \quad 0 \leq \frac{y}{d/2} \leq 1$$

Figura A10.1 Nomenclatura empleada en los análisis realizados en FLAC 3D

En la tabla A10.1 se muestran las dimensiones de la muestra modelada.

Tabla A10.1 Dimensiones de la muestra modelada, siendo $b = c = d$

a (cm)	b (cm)	a/c
40	60	2/3

La carga aplicada es de 200 kPa (2kg/cm^2)

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$
 Esfuerzos en la cara "z", dirección "z"

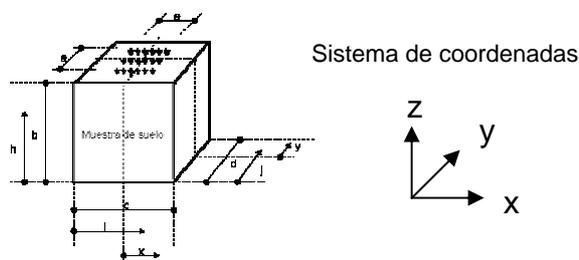
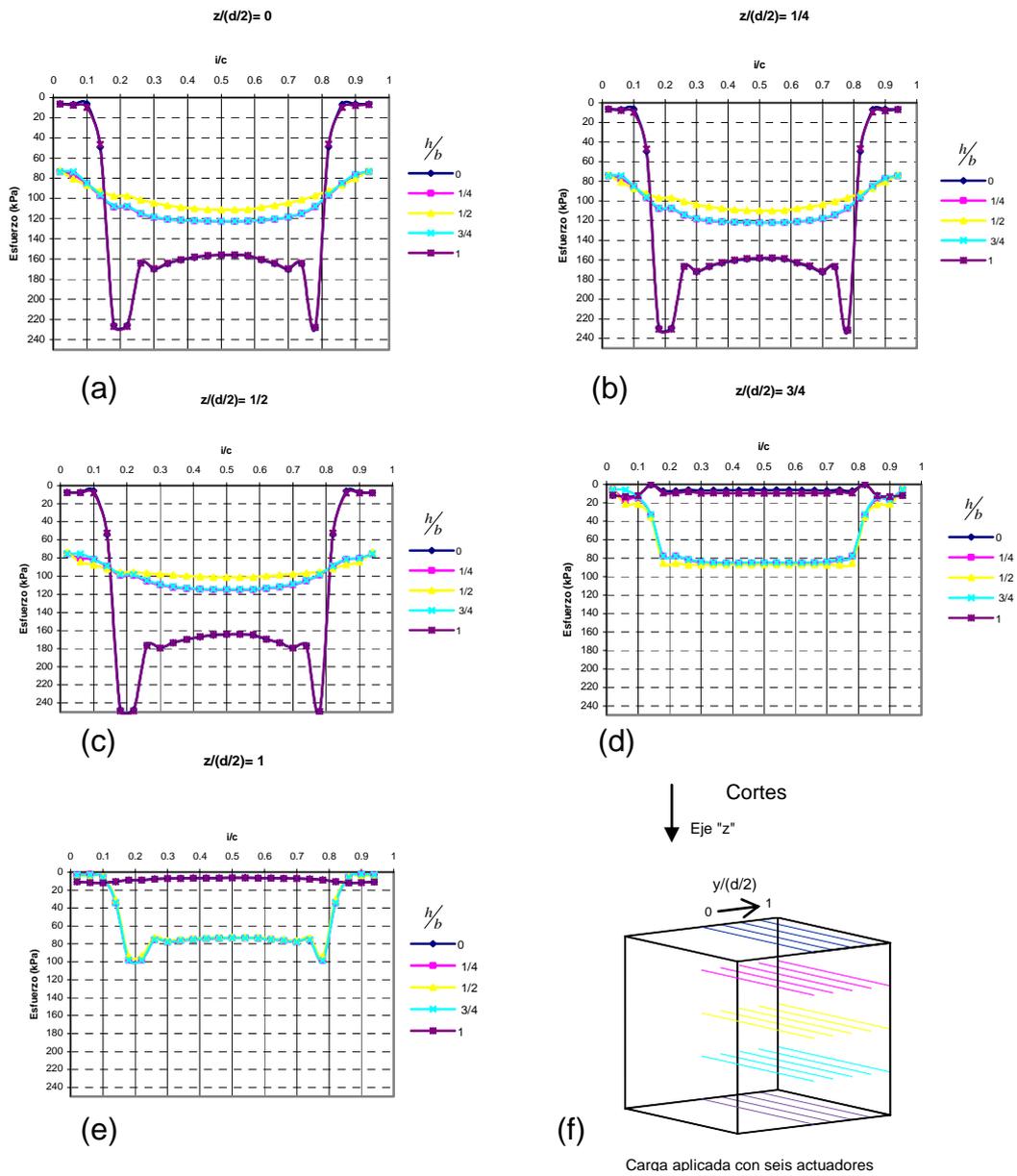


Figura A10.2

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$
 esfuerzos normales octaédricos

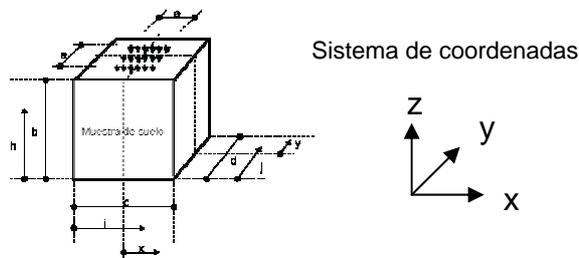
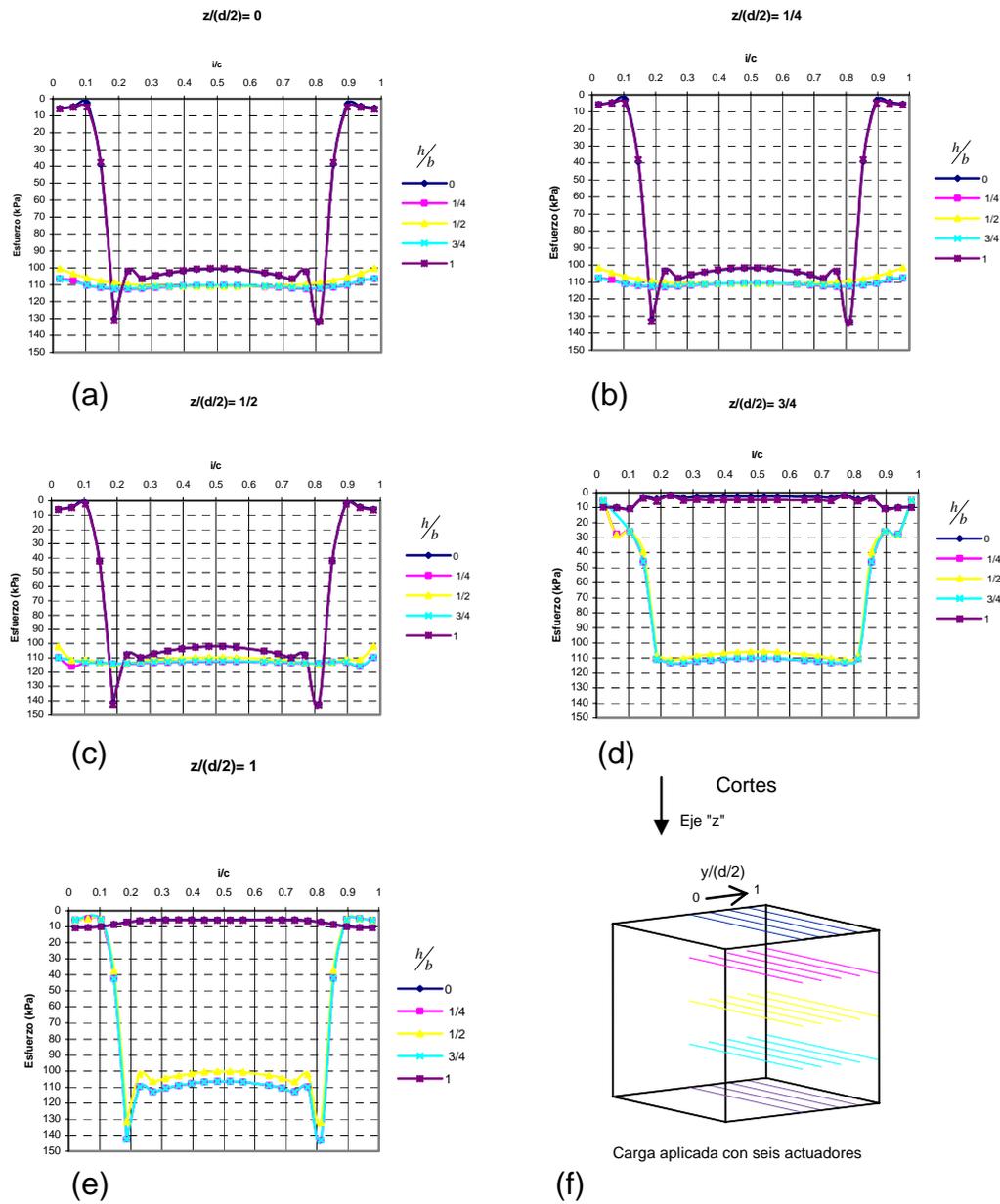


Figura A10.3

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$
esfuerzos cortantes octaédricos

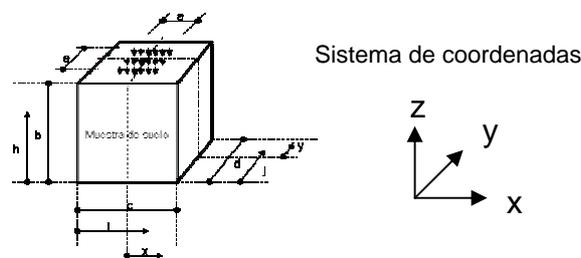
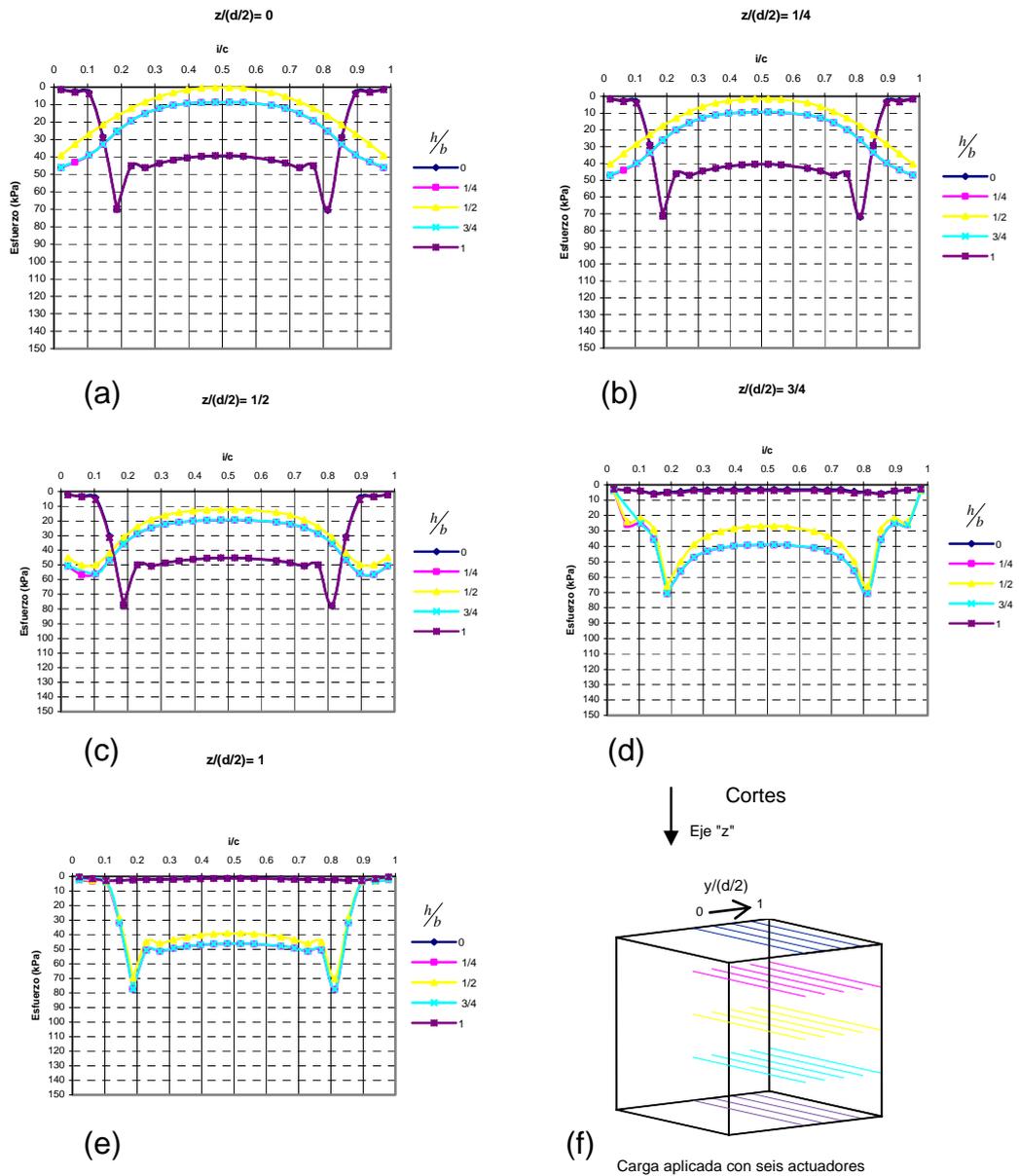


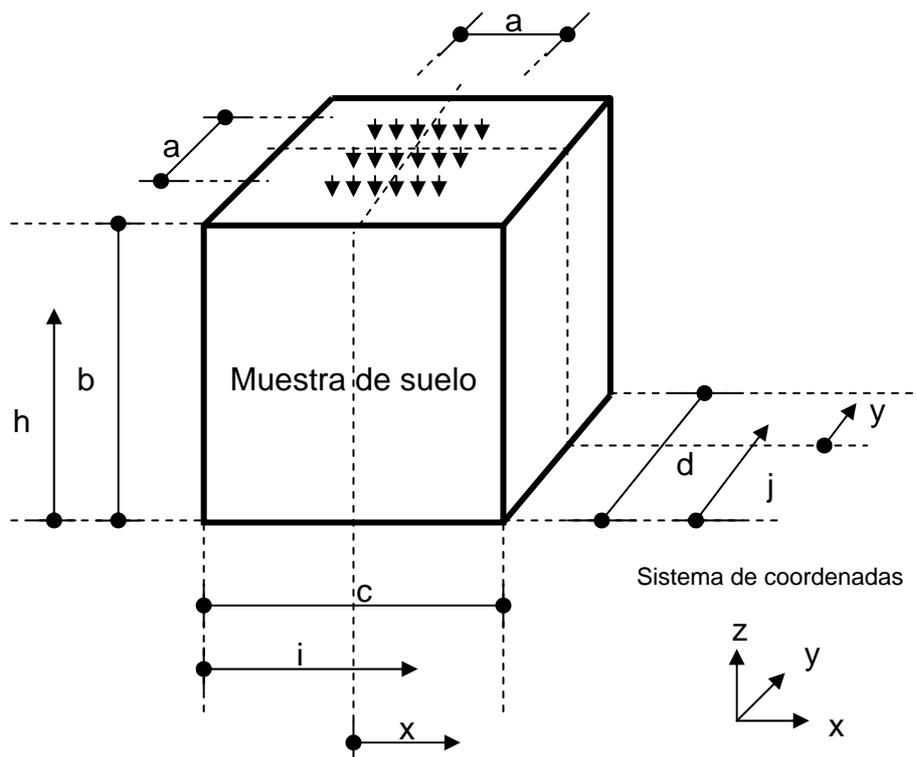
Figura A10.4

En las gráficas anteriores, podemos apreciar que los esfuerzos dentro de la muestra se duplican en magnitud, con respecto al análisis en donde se aplica 100 kPa (1 kg/cm²) en cada uno de los seis actuadores (ver figuras 4.15 a la 4.17 en el cuerpo de esta tesis). Por otro lado, se sigue identificando una zona con esfuerzos normales octaédricos uniformes en $1/4 < h/b < 3/4$ y $0.2 < i/c < 0.8$

ESFUERZOS EN LAS CARAS Z, DIRECCIÓN Z,
NORMALES OCTAÉDRICOS Y CORTANTES
OCTAÉDRICOS EN UN CUBO DE 60 cm POR LADO Y
CARGA DE 100 kPa (1 kg/cm²) APLICADA CON SEIS
ACTUADORES, LUEGO SE INCREMENTÓ LA CARGA EN
EL ACTUADOR SUPERIOR EN INTERVALOS DE
100 kPa (1 kg/cm²) HASTA ALCANZAR LOS
400 kPa (4 kg/cm²)
(ANÁLISIS EN FLAC 3D)

En los siguientes análisis, se le aplicó a la muestra una carga de 100 kPa (1 kg/cm²) en sus seis caras, después en el actuador superior se incrementó a 200 kPa (1 kg/cm²), luego a 300 kPa (3 kg/cm²) y por último a 400 kPa (4 kg/cm²). Los resultados se muestran en términos de esfuerzos en las caras z dirección z (σ_{zz}), esfuerzos normales octaédricos y esfuerzos cortantes octaédricos.

Nomenclatura empleada:



Donde: $0 \leq \frac{h}{b} \leq 1$, $0 \leq \frac{i}{c} \leq 1$, $0 \leq \frac{j}{d} \leq 1$, $0 \leq \frac{x}{c/2} \leq 1$ y $0 \leq \frac{y}{d/2} \leq 1$

Figura A11.1 Nomenclatura empleada en los análisis realizados en FLAC 3D

En la siguiente tabla se muestran las medidas de la muestra analizada.

Tabla A11.1 Dimensiones de la muestra analizada, siendo $b = c = d$

a (cm)	b (cm)	a/c
40	60	2/3

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos en la cara "z", dirección "z". Carga incremental, 200 kPa (2 kg/cm^2) en la parte superior.

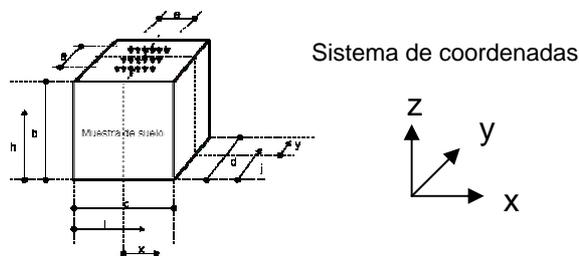
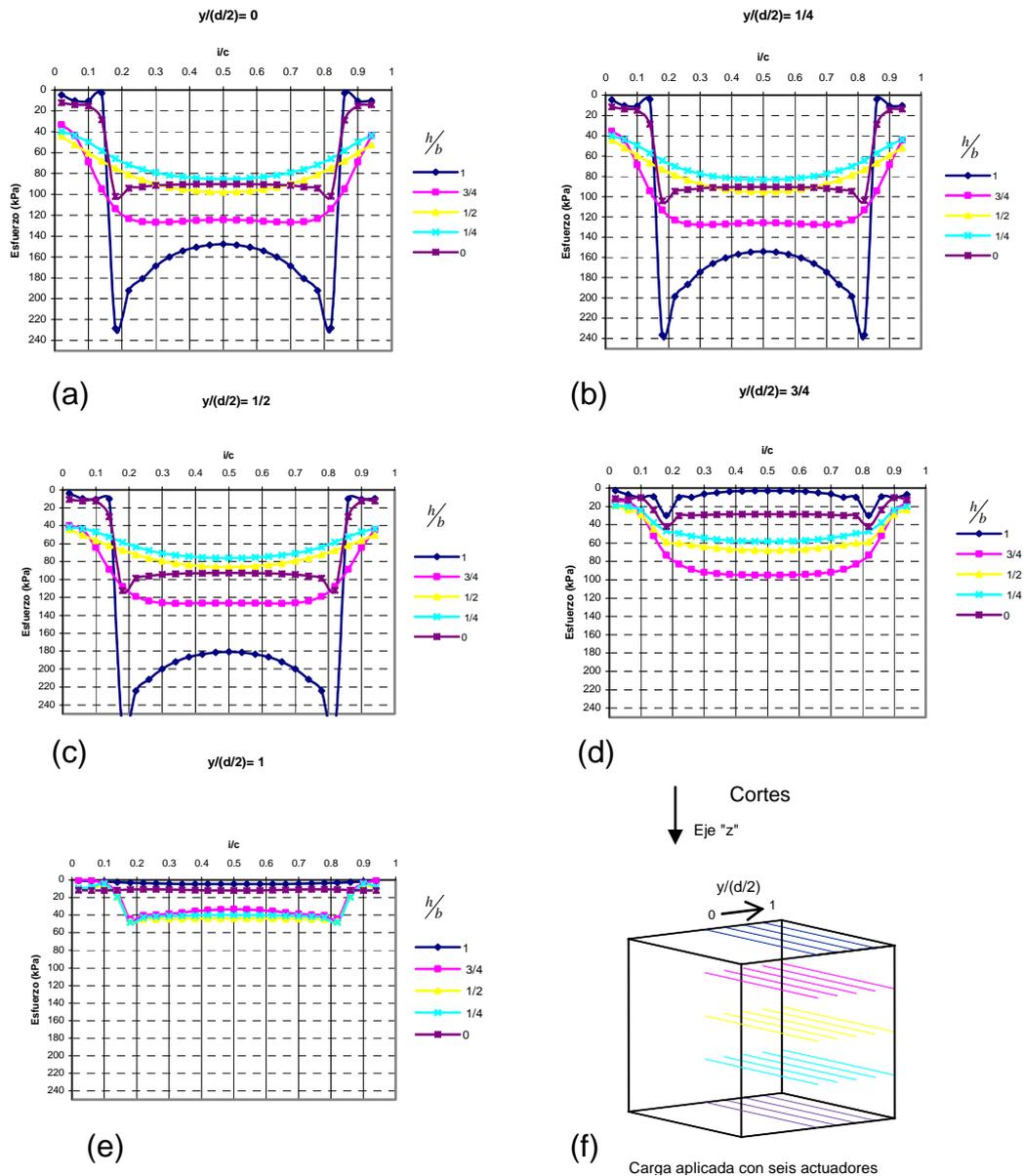


Figura A11.2

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos en la cara "z", dirección "z". Carga incremental, 300 kPa (3 kg/cm^2) en la parte superior.

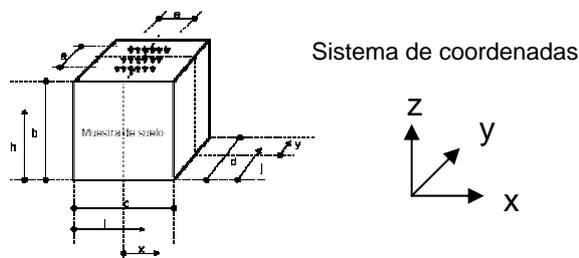
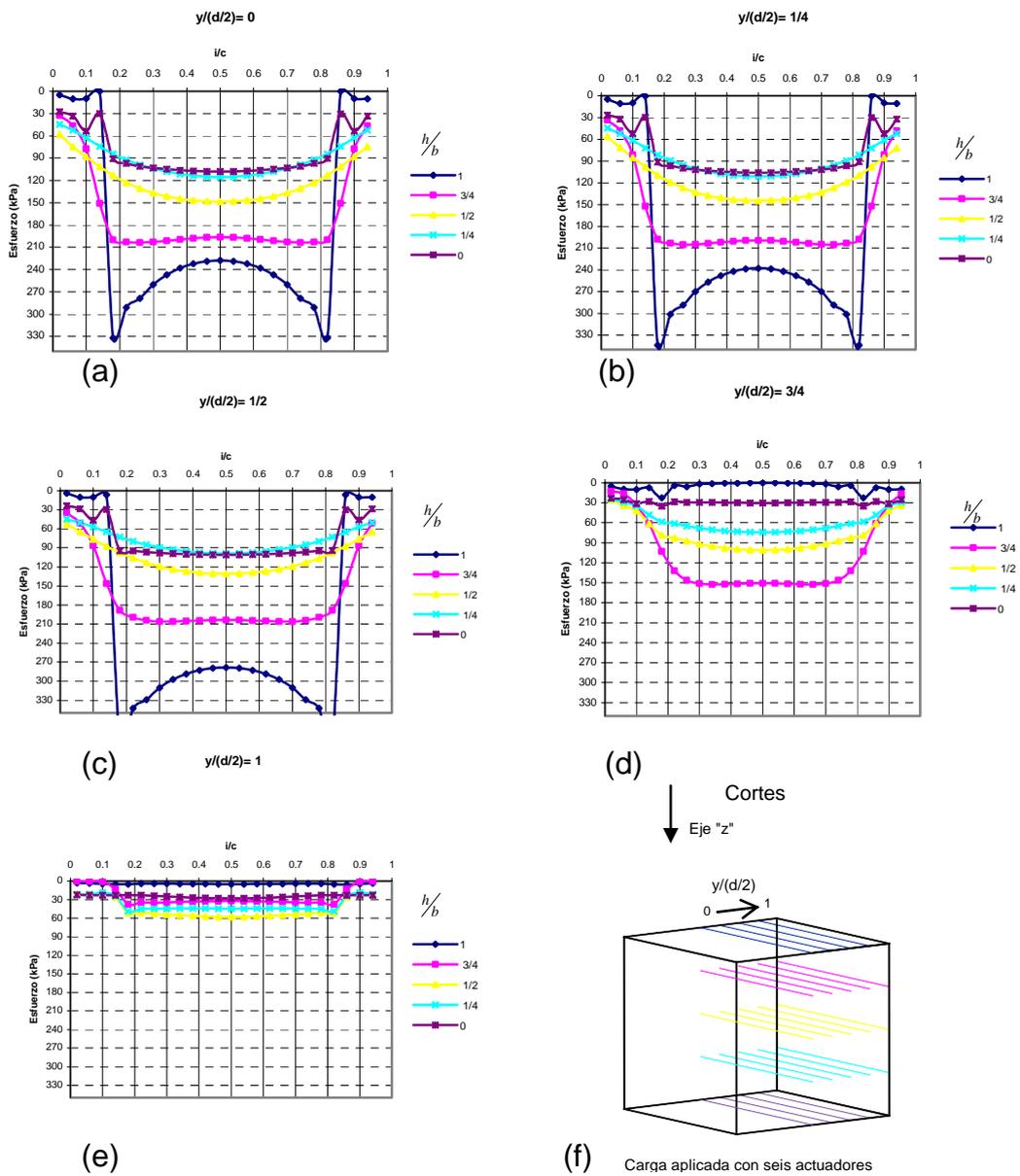


Figura A11.3

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos en la cara "z", dirección "z". Carga incremental, 400 kPa (4 kg/cm^2) en la parte superior.

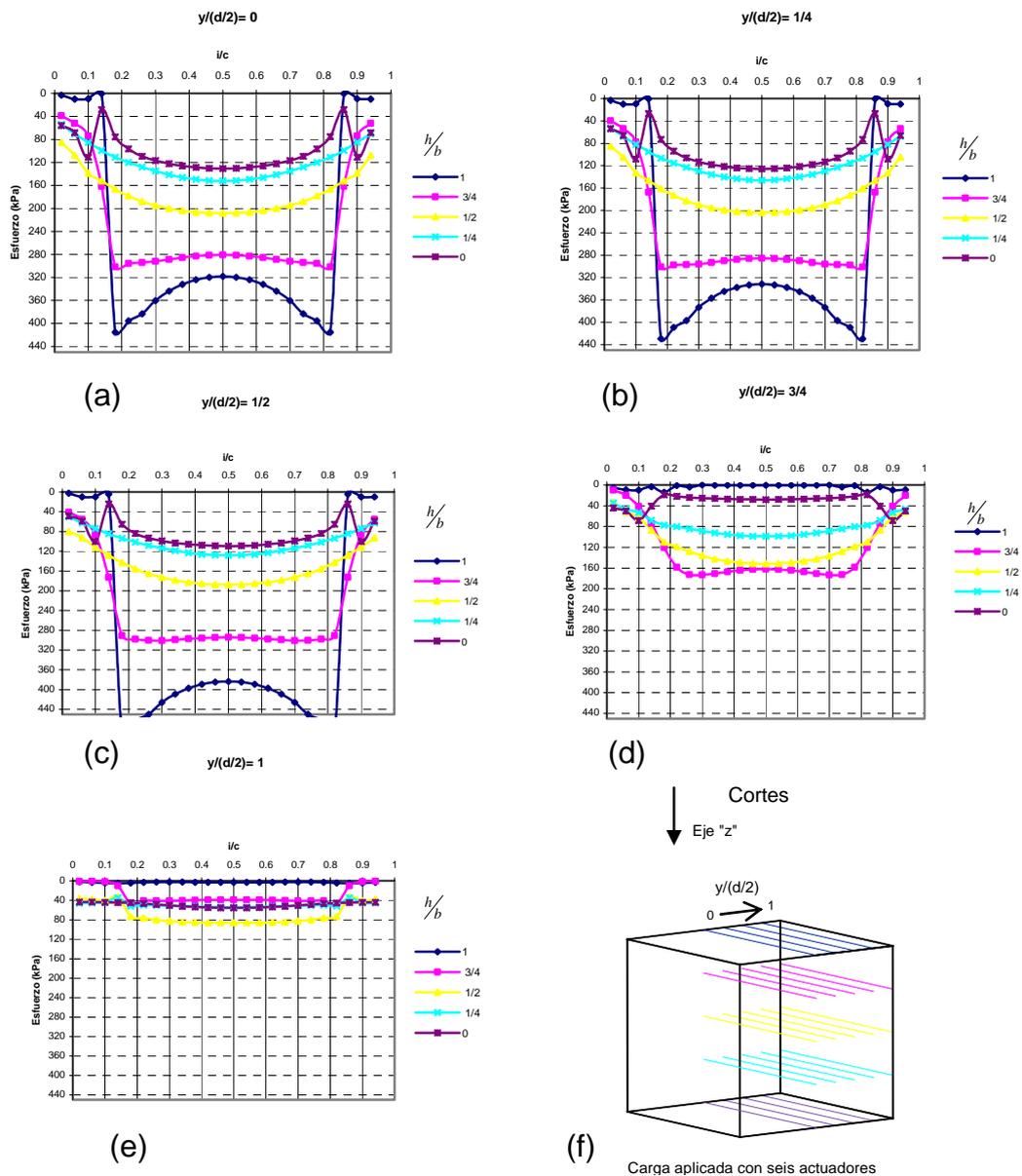
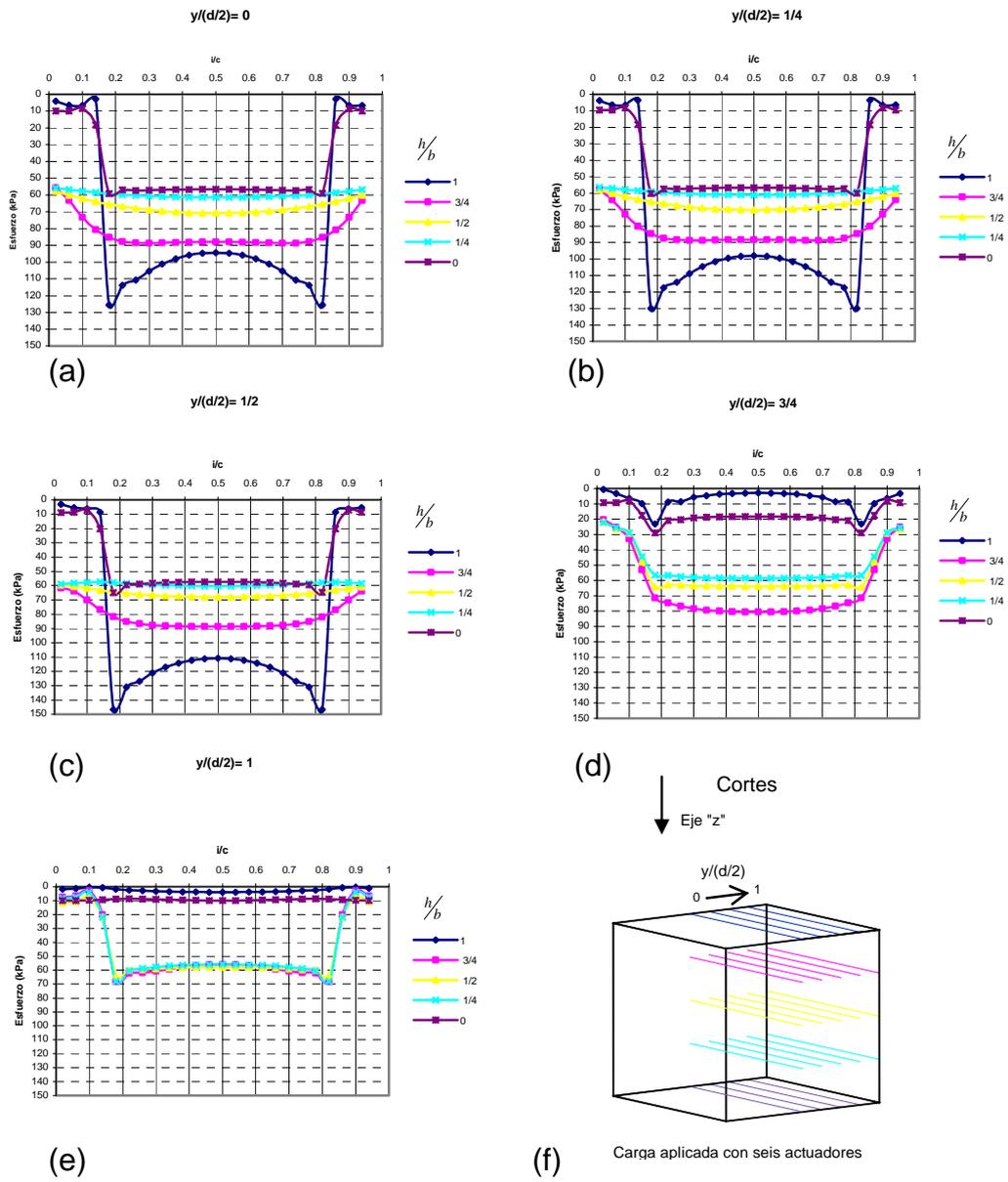


Figura A11.4

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos normales octaédricos. Carga incremental, 200 kPa (2 kg/cm^2) en la parte superior.



Sistema de coordenadas

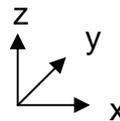


Figura A11.5

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos normales octaédricos. Carga incremental, 300 kPa (3 kg/cm^2) en la parte superior.

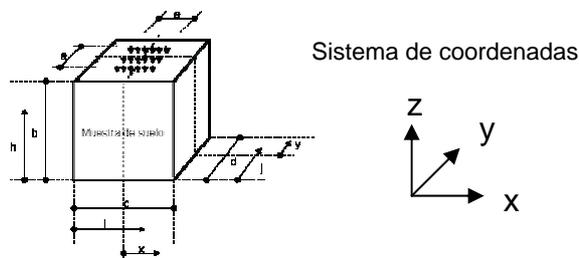
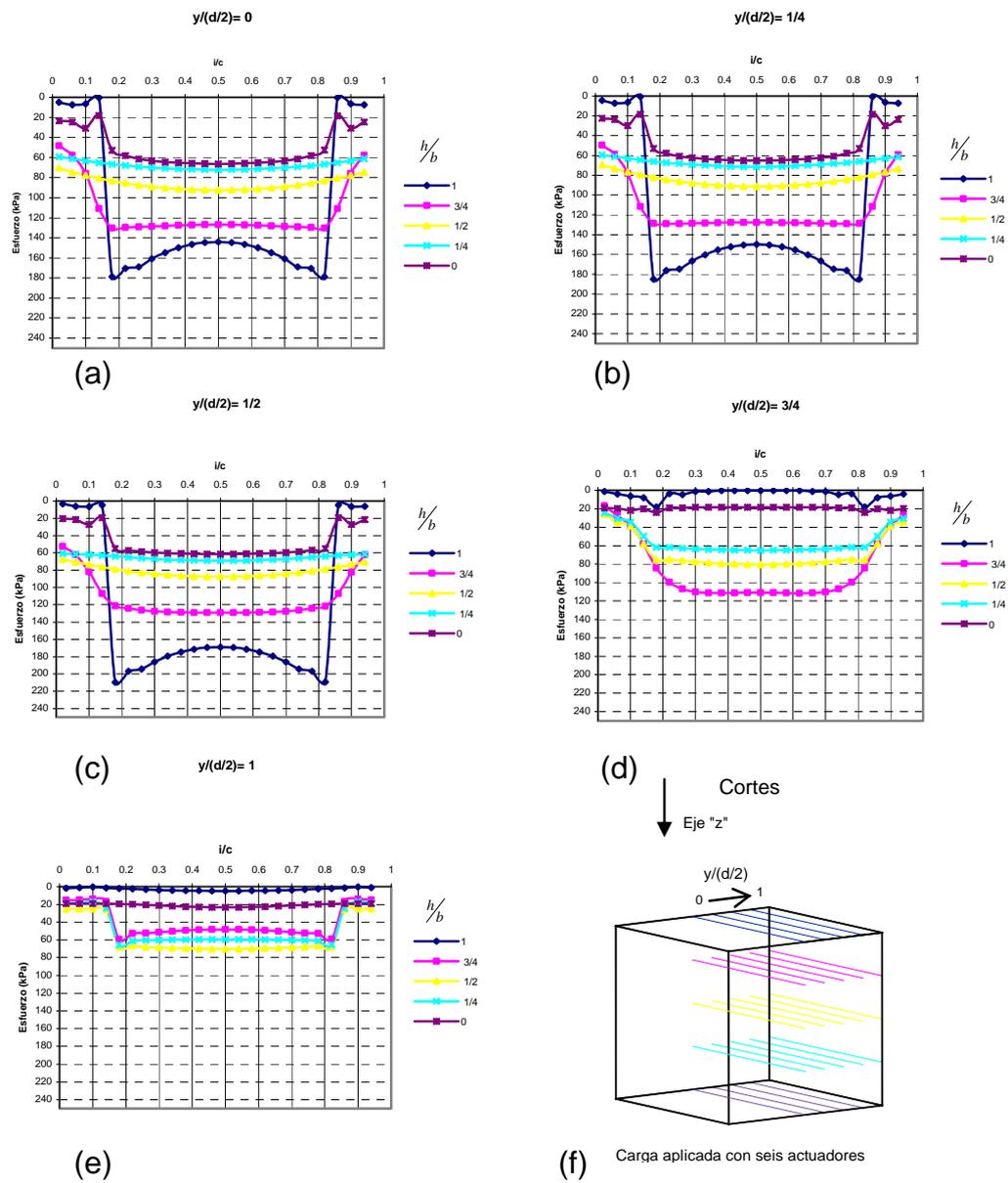
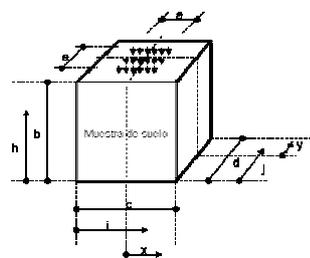
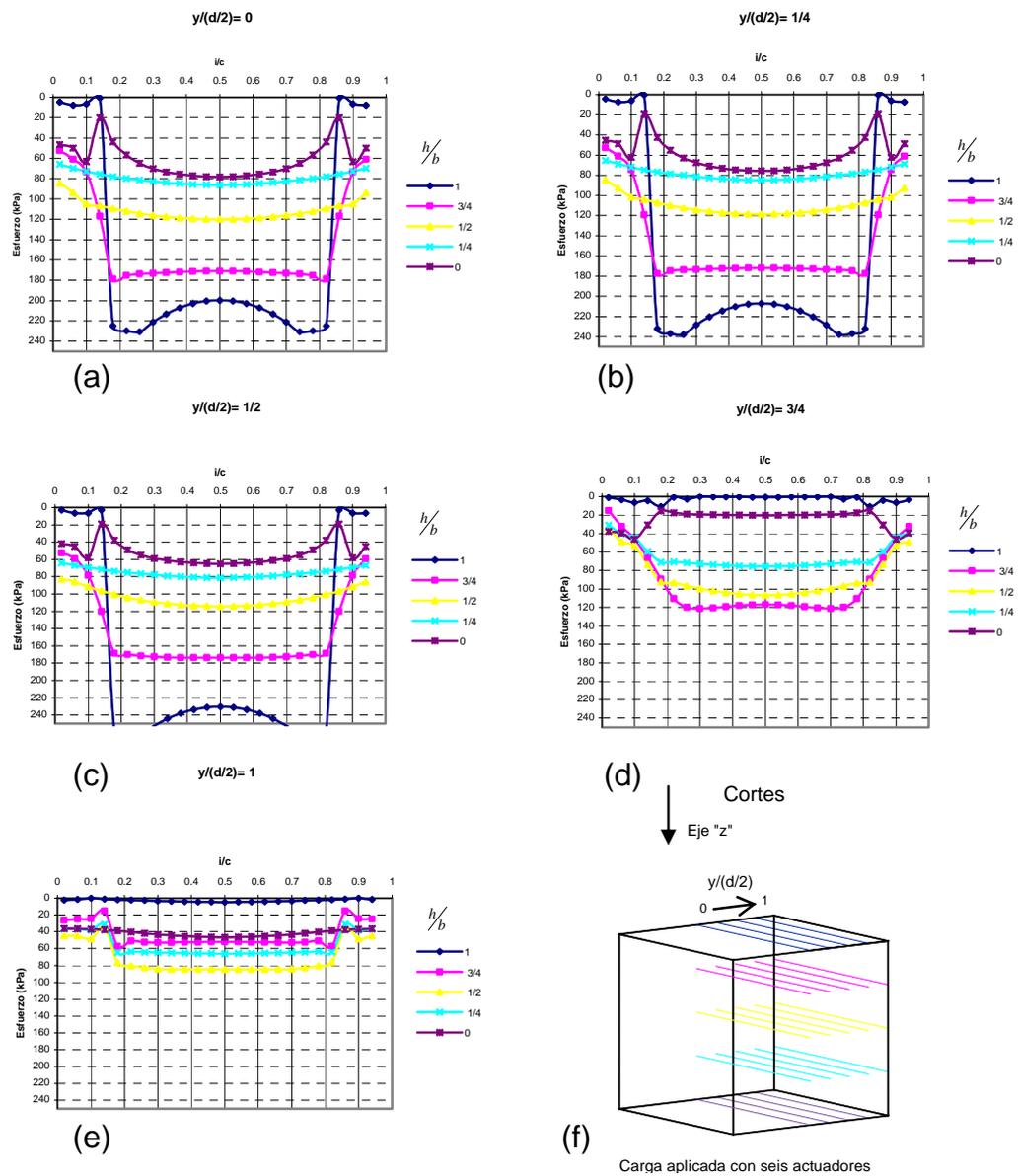


Figura A11.6

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos normales octaédricos. Carga incremental, 400 kPa (4 kg/cm^2) en la parte superior.



Sistema de coordenadas

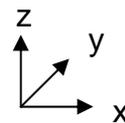


Figura A11.7

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos cortantes octaédricos. Carga incremental, 200 kPa (2 kg/cm^2) en la parte superior.

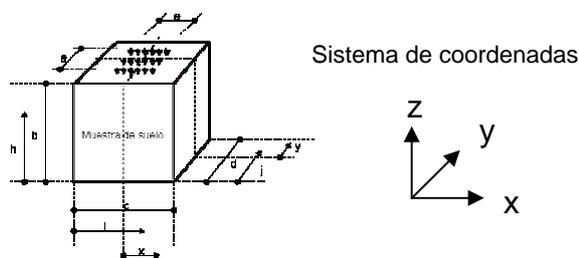
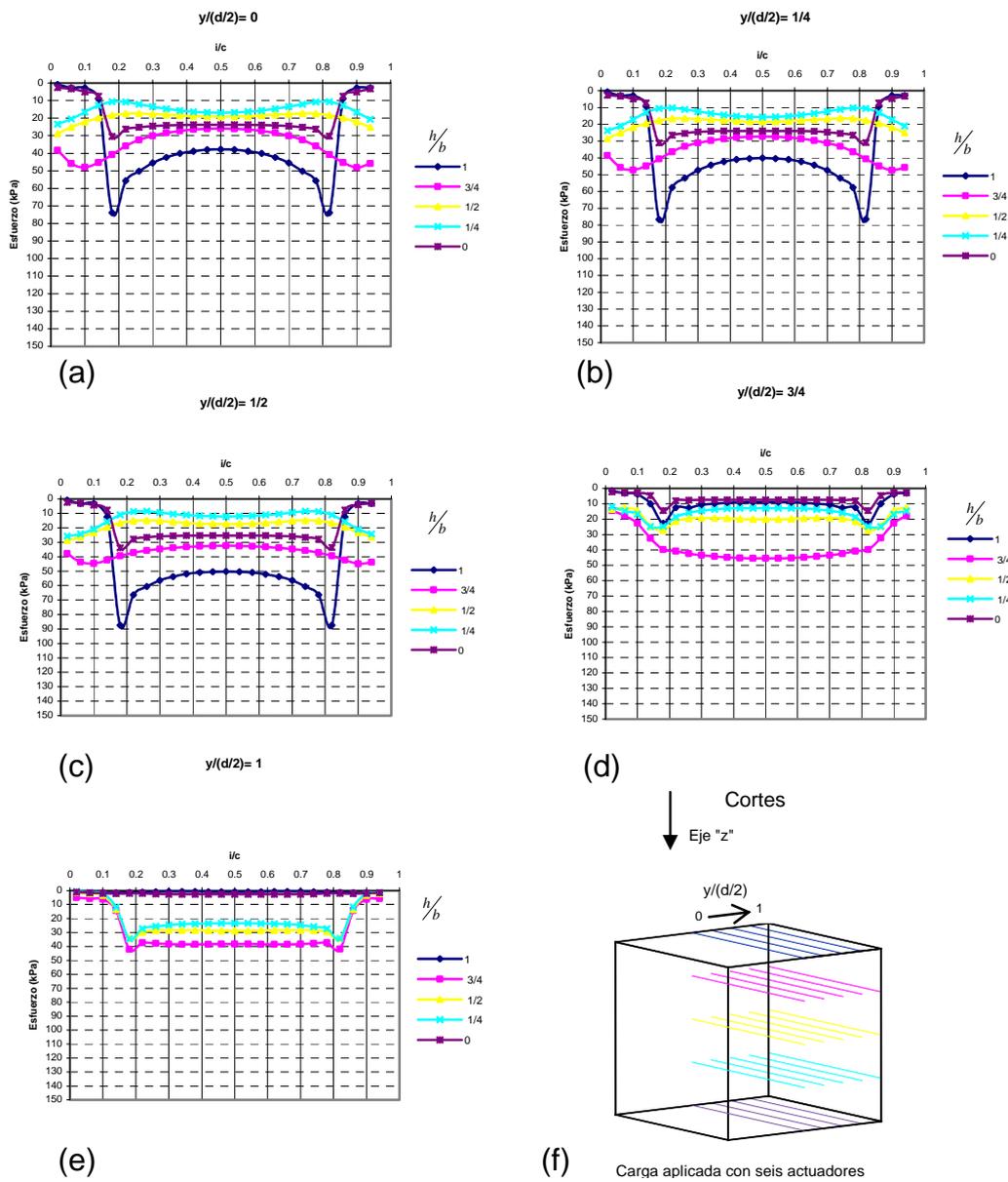


Figura A11.8

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos cortantes octaédricos. Carga incremental, 300 kPa (3 kg/cm^2) en la parte superior.

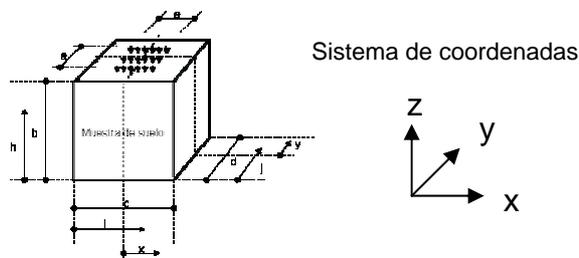
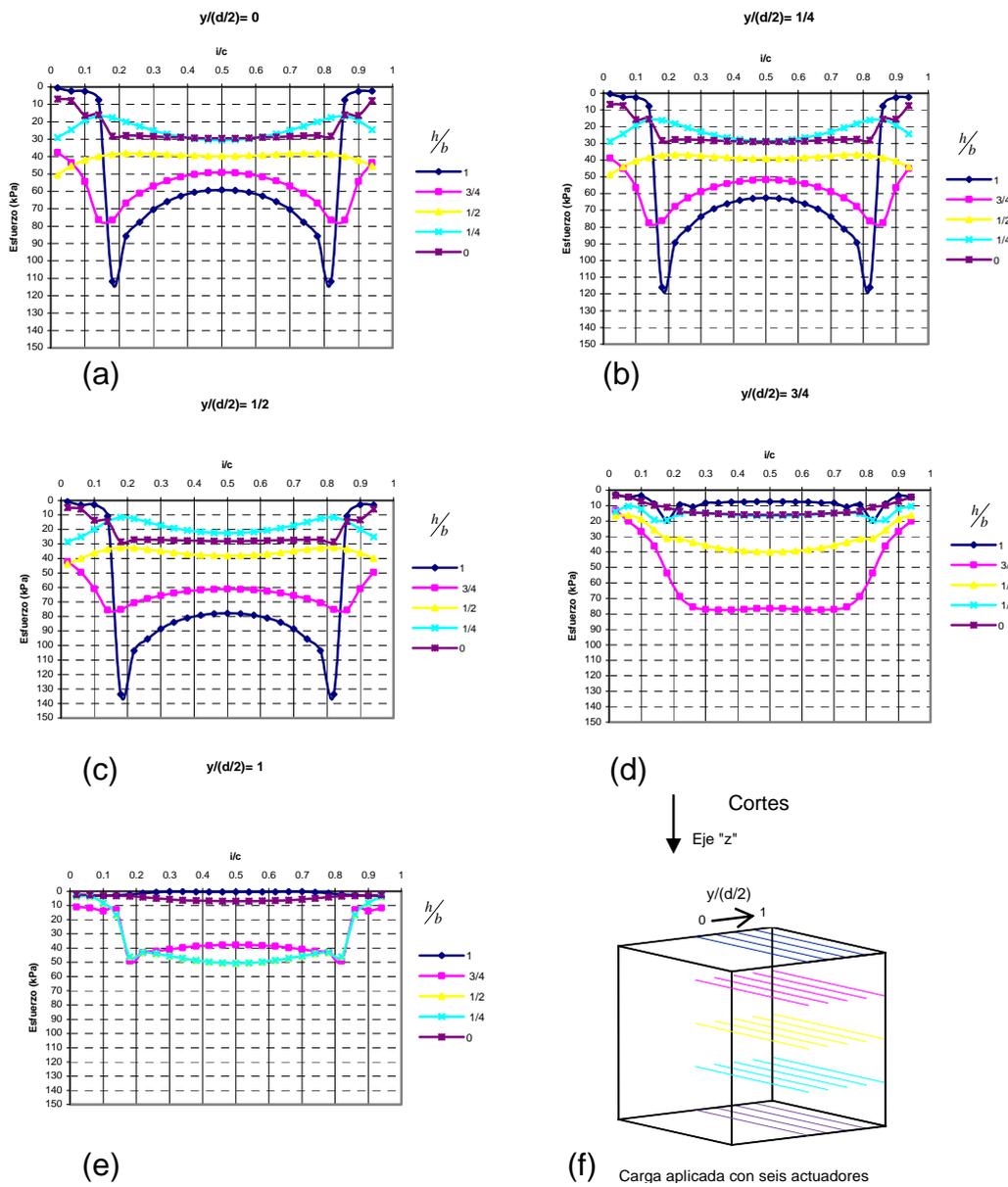
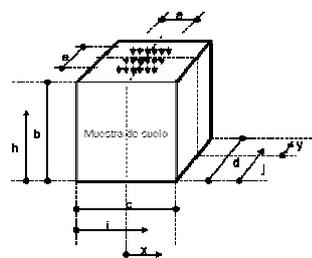
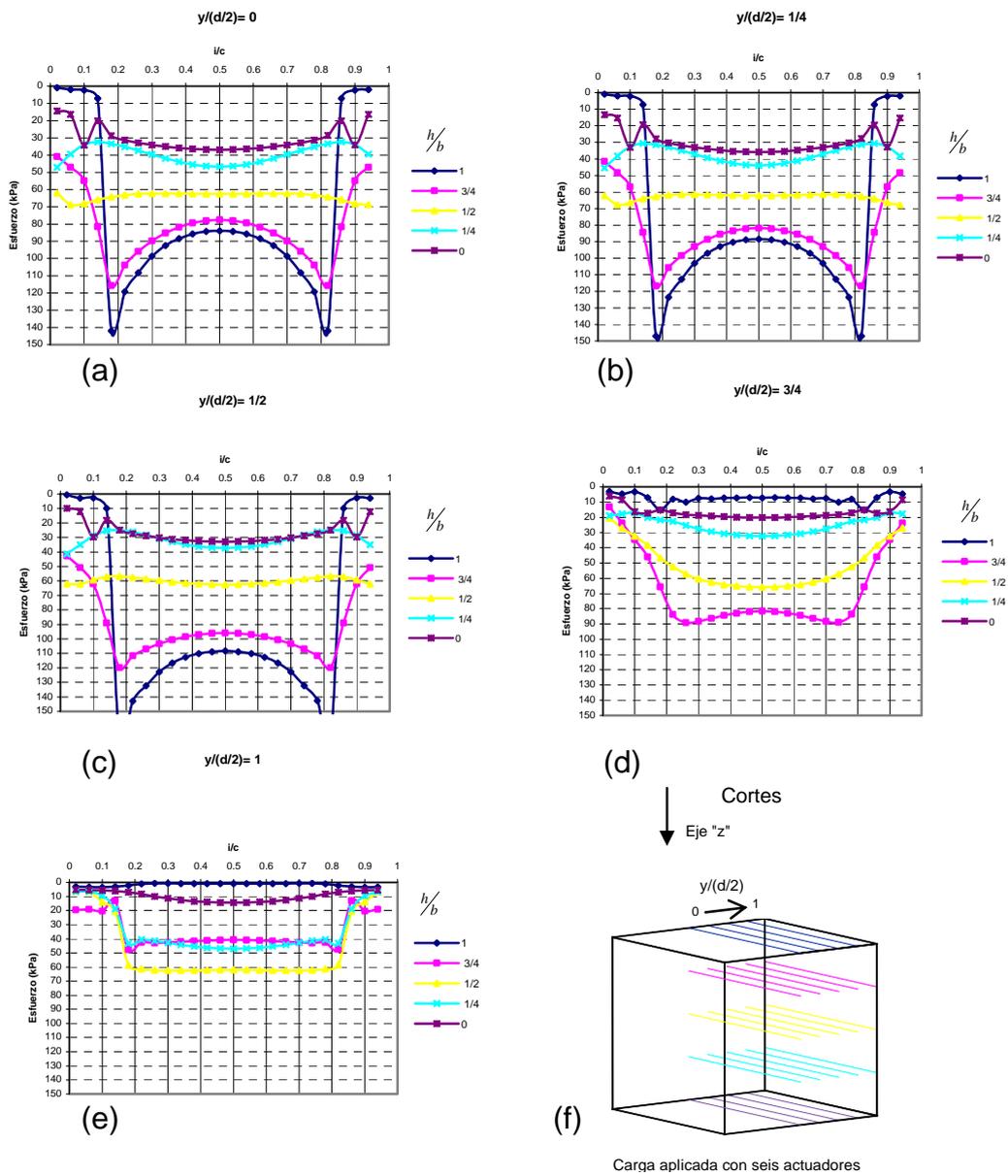


Figura A11.9

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos cortantes octaédricos. Carga incremental, 400 kPa (4 kg/cm^2) en la parte superior.



Sistema de coordenadas

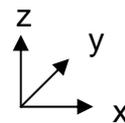


Figura A11.10

En las gráficas de este anexo, destaca la uniformidad de los esfuerzos normales octaédricos con relación con la profundidad entre las dimensiones $1/4 < h/b < 3/4$ y $0.2 < c/i < 0.8$ (ver figuras A11.5 a la A11.7) a pesar que se están graficando los esfuerzos de una carga no hidrostática. Por otro lado, los esfuerzos cortantes octaédricos son bastante uniformes en un plano que corta al modelo en $h/b = 0.5$, dentro de las dimensiones $0.2 < c/i < 0.8$ sobre todo cuando $y/(d/2) \leq 1/2$ (ver figuras A11.8 a la A11.10)

ESFUERZOS EN UN CUBO DE 60 cm POR LADO Y
CARGA DE 100 kPa (1 kg/cm^2) APLICADA CON SEIS
ACTUADORES, ANALISIS DE SENSITIVIDAD VARIANDO
LOS MÓDULO DE RIGIDEZ NORMAL Y DE RIGIDEZ AL
CORTE DE LA INTERFAZ ACTUADOR-SUELO
(ANALISIS EN FLAC 3D)

En los en los análisis que se muestran a continuación, se varió el módulo de rigidez normal (k_n) y de rigidez al corte (k_s) de la interfaz actuador-suelo, los valores que tomaron se muestran en las tablas A12.1 a la A12.3, los resultados se muestran en términos de esfuerzos en la cara z dirección z (σ_{zz}), esfuerzos normales octaédricos y esfuerzos cortantes octaédricos.

Tabla A12.1 Valores de k_n y k_s en la primera modelación

Parámetro	Magnitud
Coefficiente de rigidez normal (k_n)	0.559 GPa/m (57 kg/cm ³)
Coefficiente de rigidez al corte (k_s)	0.215 GPa/m (21 kg/cm ³)

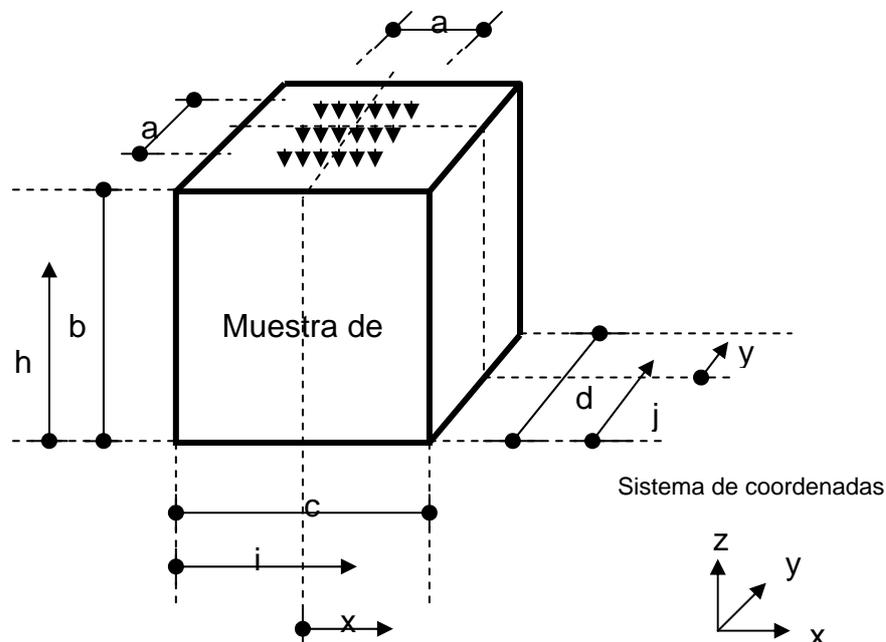
Tabla A12.2 Valores de k_n y k_s en la segunda modelación

Parámetro	Magnitud
Coefficiente de rigidez normal (k_n)	55.9 MPa/m (5.70 kg/cm ³)
Coefficiente de rigidez al corte (k_s)	21.5 MPa/m (2.19 kg/cm ³)

Tabla A12.3 Valores de k_n y k_s en la tercera modelación

Parámetro	Magnitud
Coefficiente de rigidez normal (k_n)	5.59 TPa/m (5.70x10 ⁵ kg/cm ³)
Coefficiente de rigidez al corte (k_s)	2.15 TPa/m (2.19x10 ⁵ kg/cm ³)

Nomenclatura empleada:



$$\text{Donde: } 0 \leq \frac{h}{b} \leq 1, \quad 0 \leq \frac{i}{c} \leq 1, \quad 0 \leq \frac{j}{d} \leq 1, \quad 0 \leq \frac{x}{c/2} \leq 1 \quad \text{y} \quad 0 \leq \frac{y}{d/2} \leq 1$$

Figura A12.1 Nomenclatura empleada en los análisis realizados en FLAC 3D

En la siguiente tabla se muestran las medidas de la muestra analizada.

Tabla A12.4 Dimensiones de la muestra modelada, siendo $b = c = d$

a (cm)	b (cm)	a/c
40	60	2/3

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos en la cara "z", dirección "z". $k_n=0.559 \text{ GPa}$ ($5.70 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$), $k_s=0.215 \text{ GPa}$ ($2.19 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$).

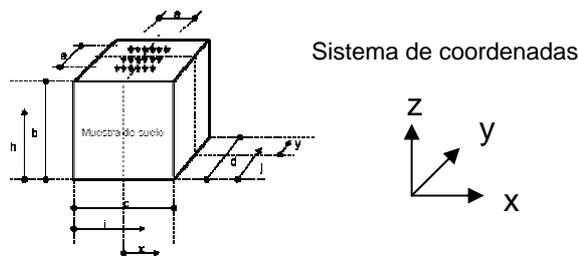
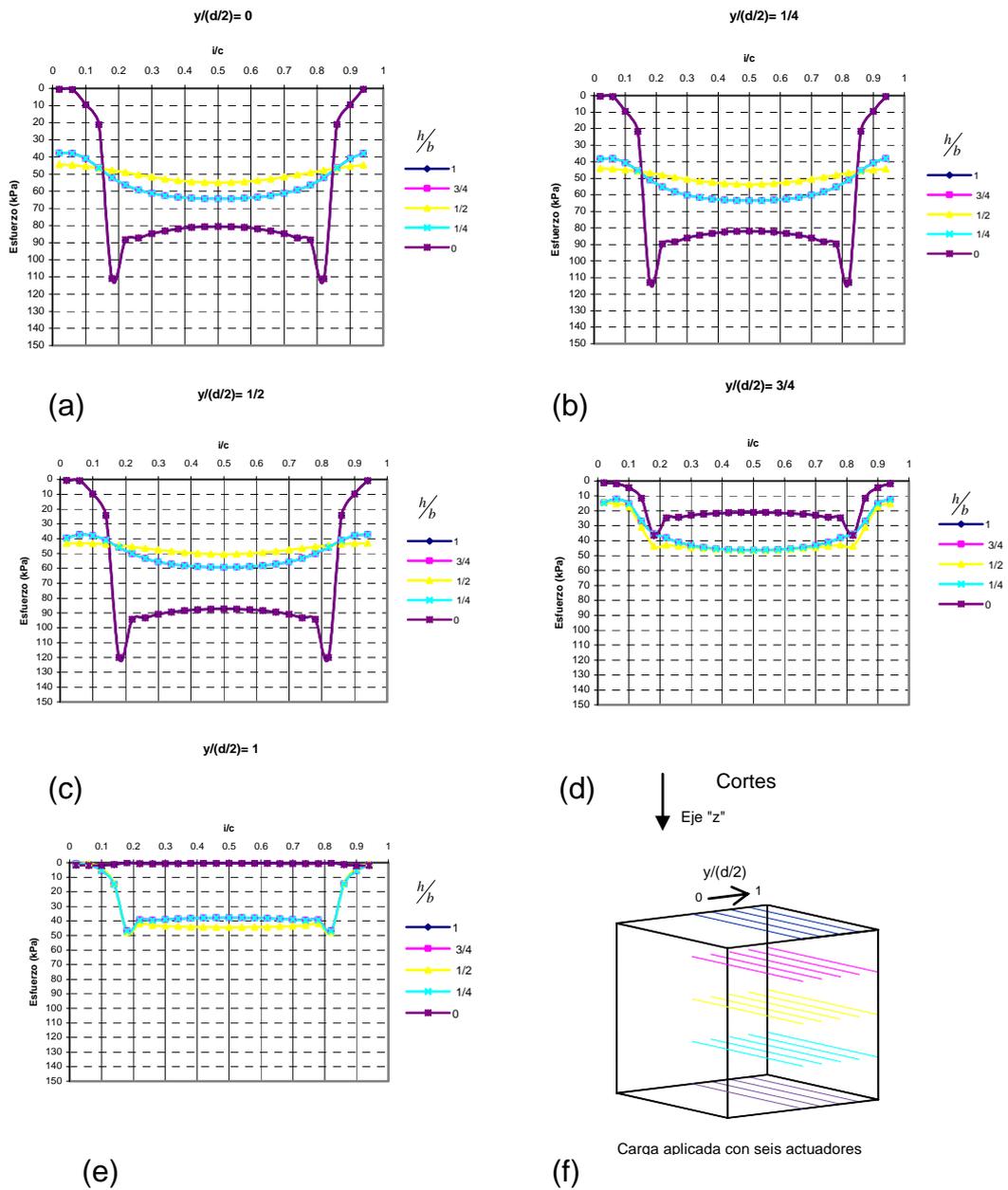
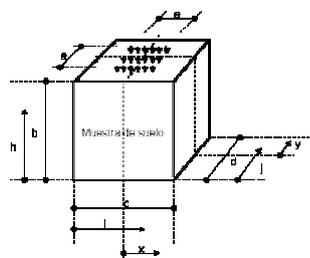
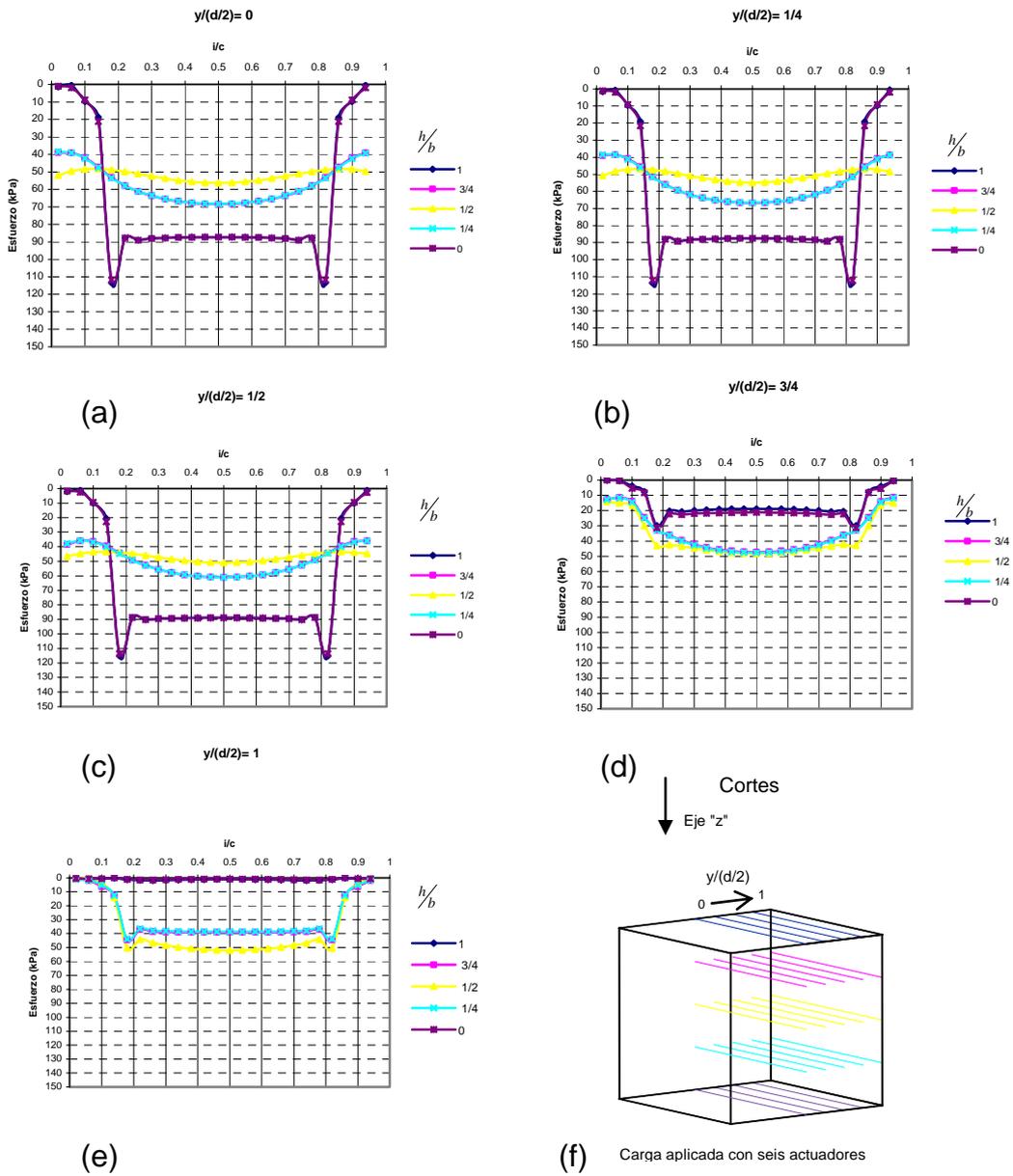


Figura A12.2

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos en la cara "z", dirección "z". $k_n=55.9 \text{ MPa}$ ($5.70 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$), $k_s=21.5 \text{ MPa}$ ($2.19 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$).



Sistema de coordenadas

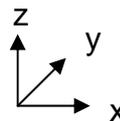
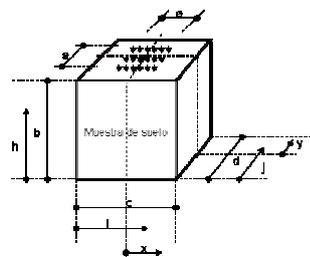
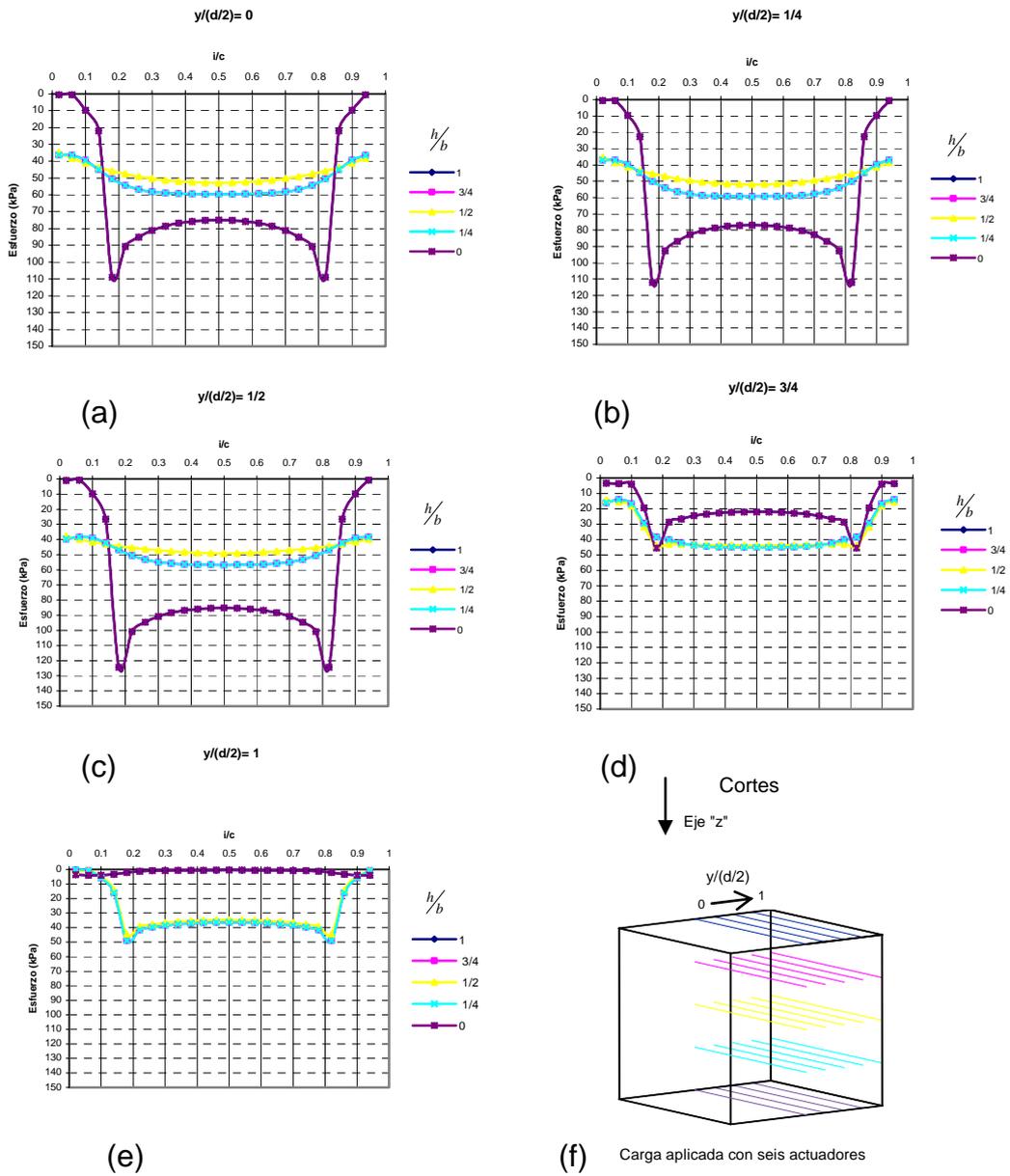


Figura A12.3

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos en la cara "z", dirección "z", $kn=5.59 \text{ Tpa}$ ($5.70 \times 10^7 \text{ kg/cm}^2$), $ks=2.15 \text{ TPa}$ ($2.19 \times 10^7 \text{ kg/cm}^2$).



Sistema de coordenadas

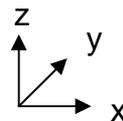


Figura A12.4

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos normales octaédricos. $k_n=0.559$ GPa (5.70×10^3 kg/cm²), $k_s=0.215$ GPa (2.19×10^3 kg/cm²).

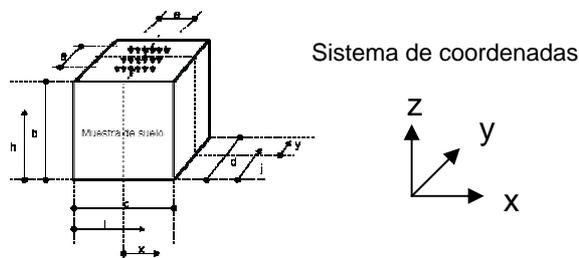
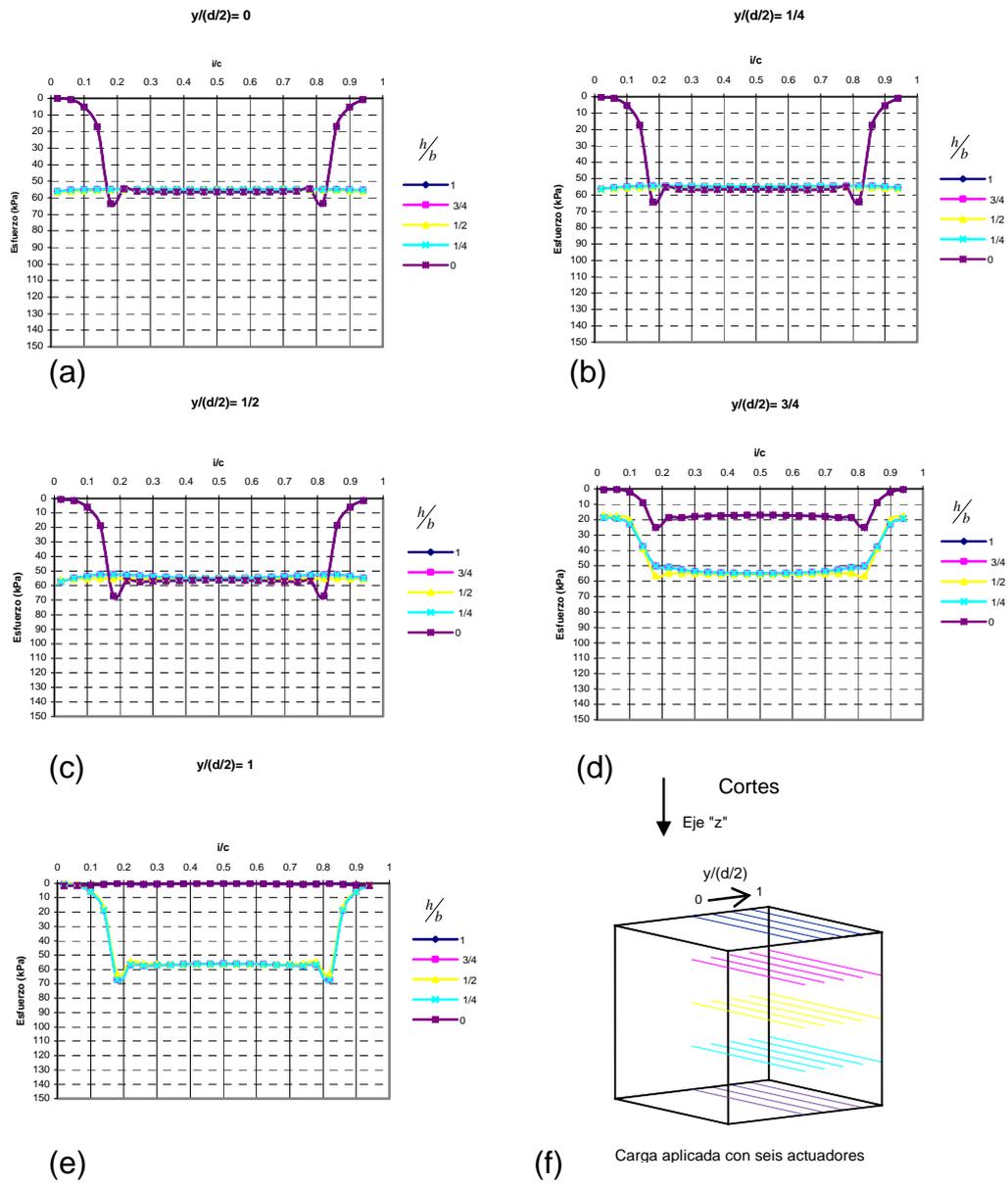


Figura A12.5

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos normales octaédricos. $k_n= 55.9 \text{ MPa}$ ($5.70 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$), $k_s= 21.5 \text{ MPa}$ ($2.19 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$).

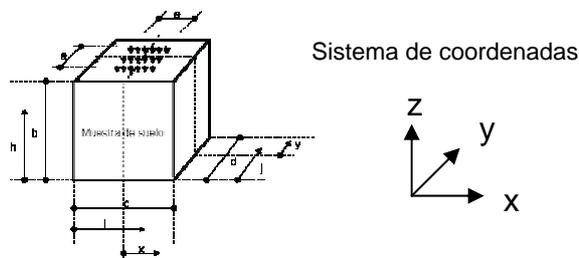
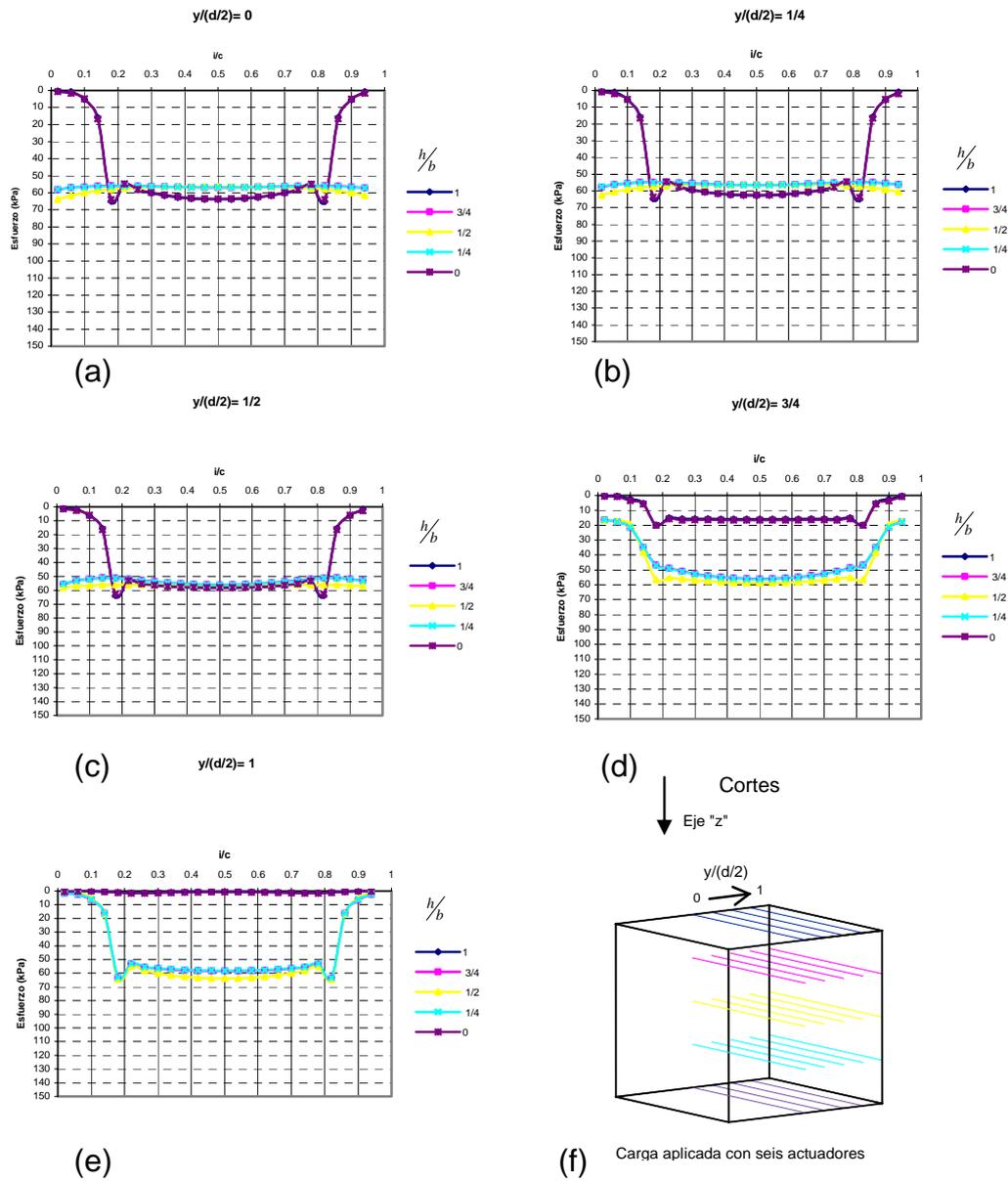


Figura A12.6

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos normales octaédricos, $k_n=5.59 \text{ Tpa}$ ($5.70 \times 10^7 \text{ kg/cm}^2$), $k_s=2.15 \text{ TPa}$ ($2.19 \times 10^7 \text{ kg/cm}^2$).

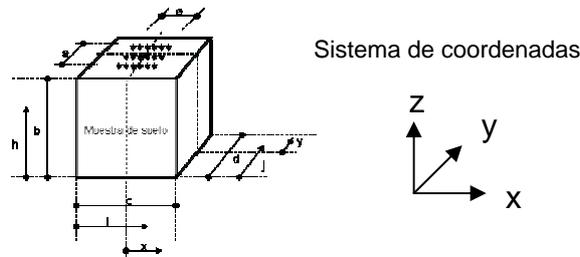
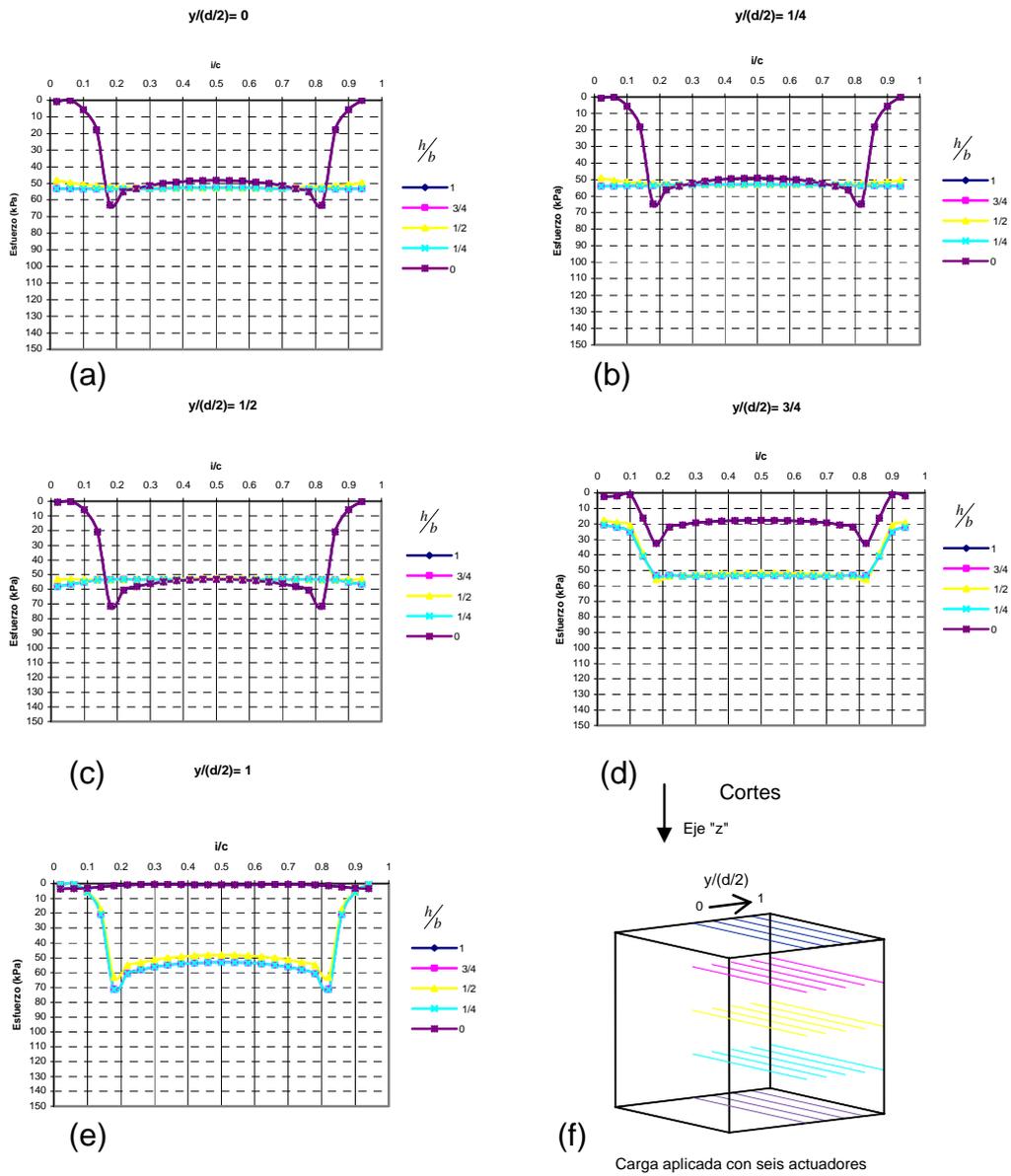


Figura A12.7

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos cortantes octaédricos. $k_n=0.559 \text{ GPa}$ ($5.70 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$), $k_s=0.215 \text{ GPa}$ ($2.19 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$).

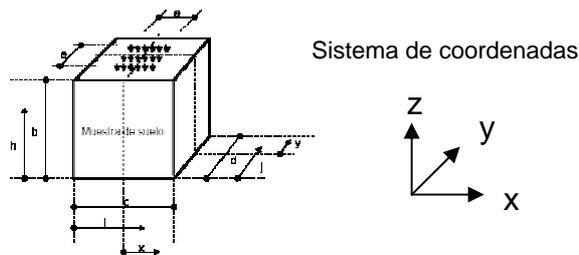
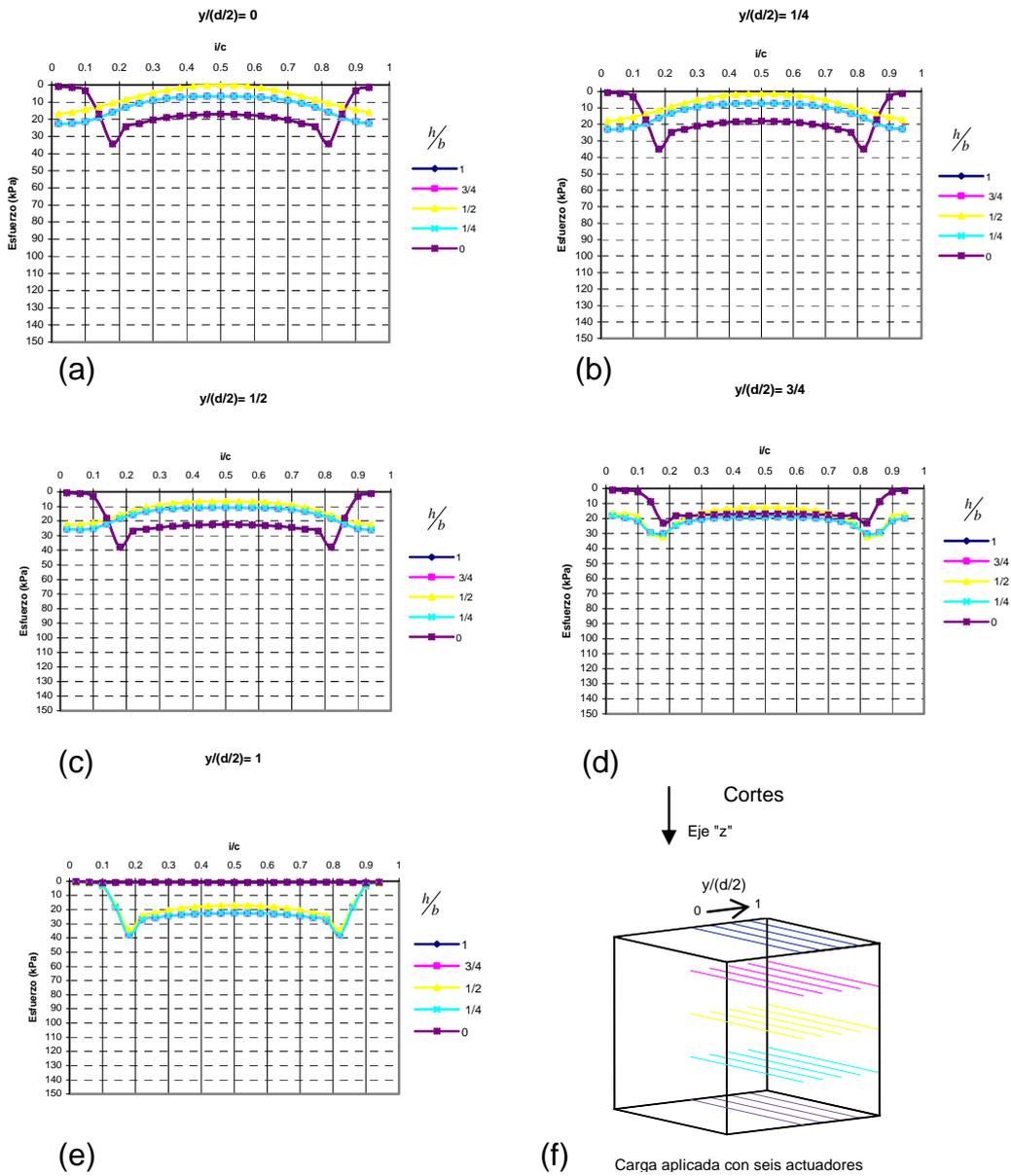


Figura A12.8

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos cortantes octaédricos. $k_n=55.9 \text{ MPa}$ ($5.70 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$), $k_s=21.5 \text{ MPa}$ ($2.19 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$).

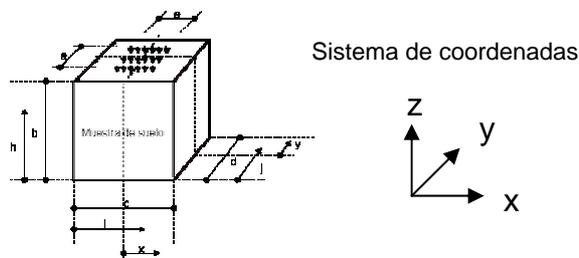
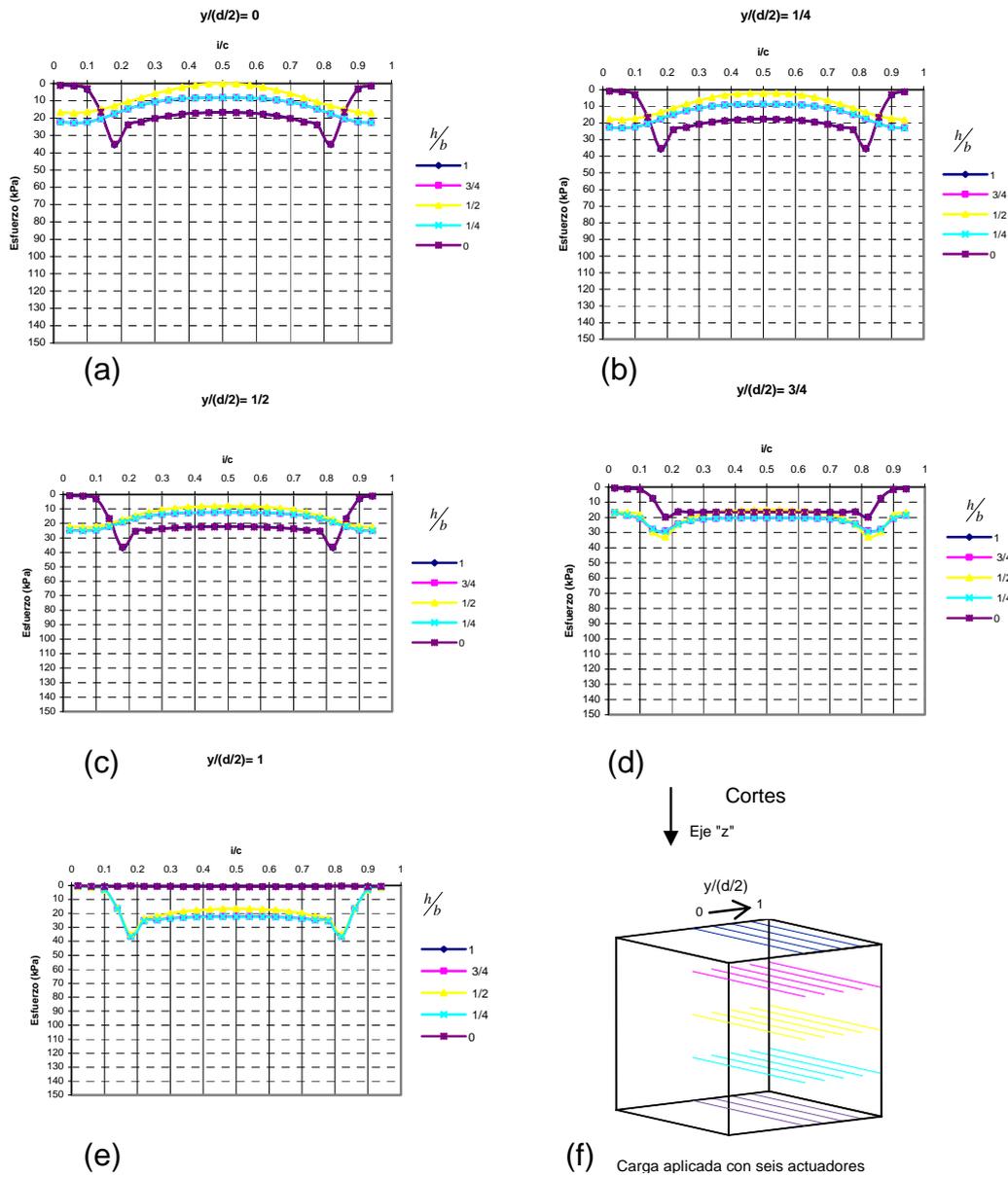


Figura A12.9

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos cortantes octaédricos, $k_n=5.59 \text{ Tpa}$ ($5.70 \times 10^7 \text{ kg/cm}^2$), $k_s=2.15 \text{ TPa}$ ($2.19 \times 10^7 \text{ kg/cm}^2$).

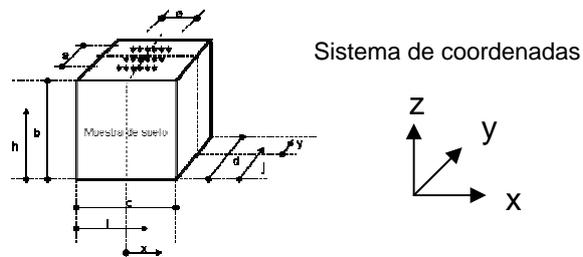
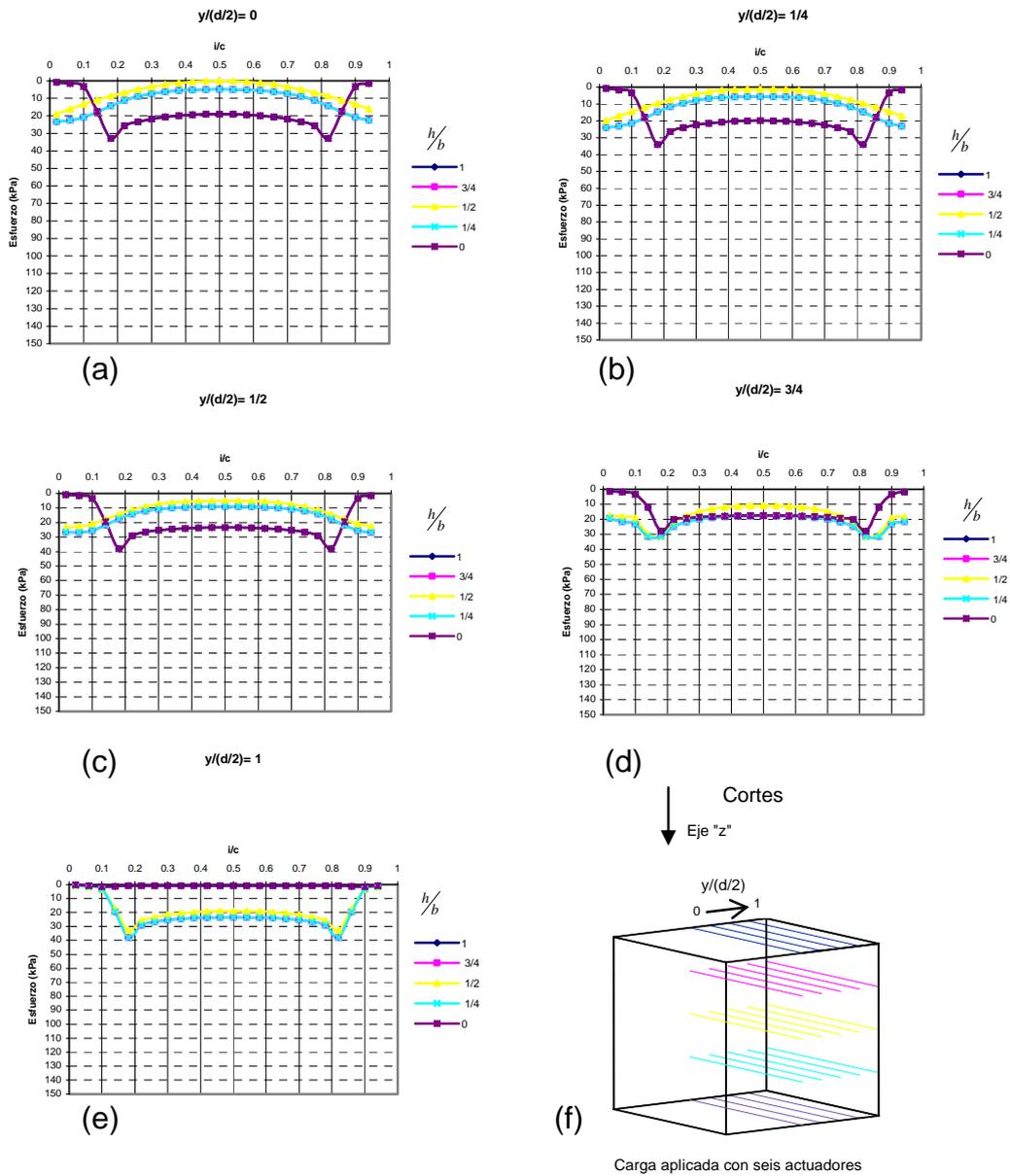


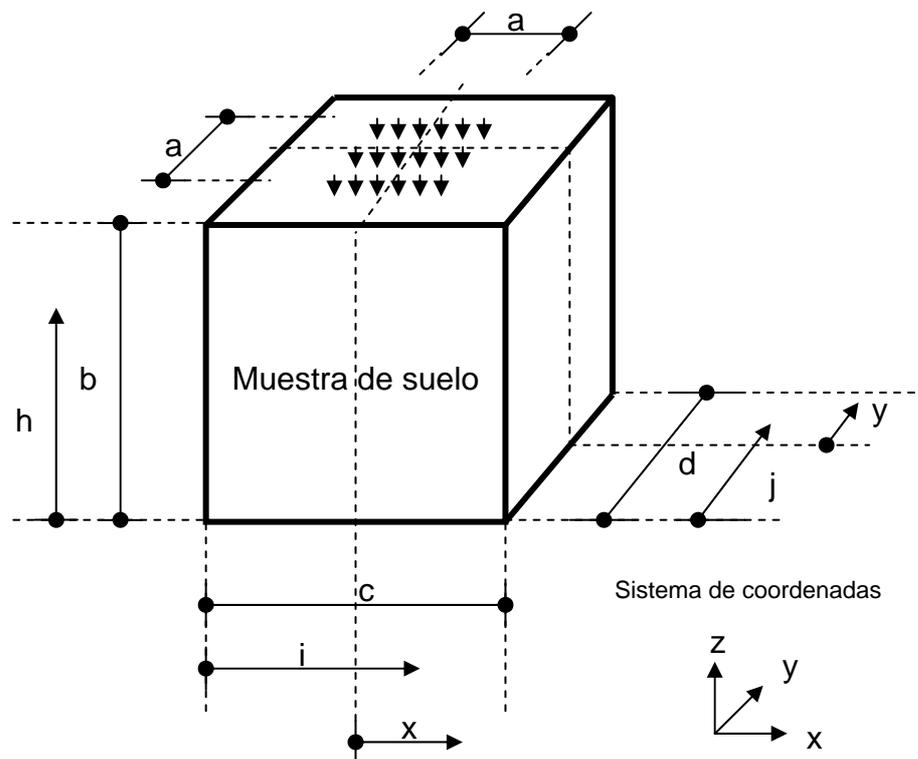
Figura A12.10

En las modelaciones anteriores se puede apreciar que al disminuir el valor de los módulos de rigidez, los esfuerzos en la cara z dirección z (σ_{zz}), se vuelven cada vez más uniformes en las caras del actuador, incluso en la modelación donde el $k_n=55.9$ MPa (5.70×10^2 kg/cm²) y $k_s=21.5$ MPa (2.19×10^2) éstos llegan a ser casi uniformes (ver figura A12.3a), sin embargo, si analizamos los esfuerzos normales octaédricos dentro de la muestra, la uniformidad se obtiene cuando $k_n=0.559$ GPa (5.70×10^3 kg/cm²) y $k_s=0.215$ GPa (2.19×10^3 kg/cm²), por lo que se recomienda que se emplee una interfaz con módulos de rigidez en este rango de valores. Por otra parte, como era de esperarse, la magnitud de los esfuerzos cortantes octaédricos están en función de los valores que toma el módulo el módulo de reacción al corte de la interfaz, disminuyendo, cuando el valor de éste también lo hace (comparar figuras A12.8, A12.9 y A12.10).

ESFUERZOS EN UN CUBO DE 60 cm POR LADO Y
CARGA DE 100 kPa (1 kg/cm^2) APLICADA CON SEIS
ACTUADORES, ANALISIS DE SENSITIVIDAD VARIANDO
EL ÁNGULO DE FRICCIÓN DE LA INTERFAZ
ACTUADOR-SUELO
(ANÁLISIS EN FLAC 3D)

En los siguientes análisis, se varió el ángulo de fricción de la interfaz, se realizaron modelaciones con valores para el ángulo de fricción en la interfaz actuador-suelo de 30°, 20°, 10° y 0°. Los resultados se muestran en términos de esfuerzos en la cara z dirección z (σ_{zz}), esfuerzos normales octaédricos y esfuerzos cortantes octaédricos.

Nomenclatura empleada:



Donde: $0 \leq \frac{h}{b} \leq 1$, $0 \leq \frac{i}{c} \leq 1$, $0 \leq \frac{j}{d} \leq 1$, $0 \leq \frac{x}{c/2} \leq 1$ y $0 \leq \frac{y}{d/2} \leq 1$

Figura A13.1 Nomenclatura empleada en los análisis realizados en FLAC 3D

En la siguiente tabla se muestran las medidas de la muestra analizada.

Tabla A13.1 Dimensiones de la muestra modelada, siendo $b = c = d$

a (cm)	b (cm)	a/c
40	60	2/3

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos en la cara "z", dirección "z". El ángulo de fricción de la interfase es de 30° .

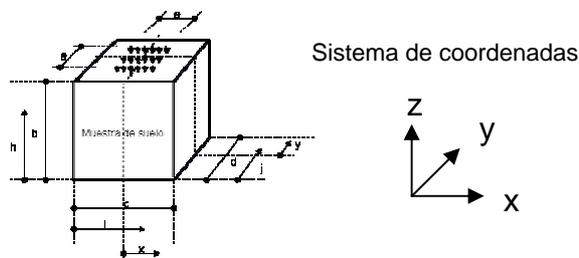
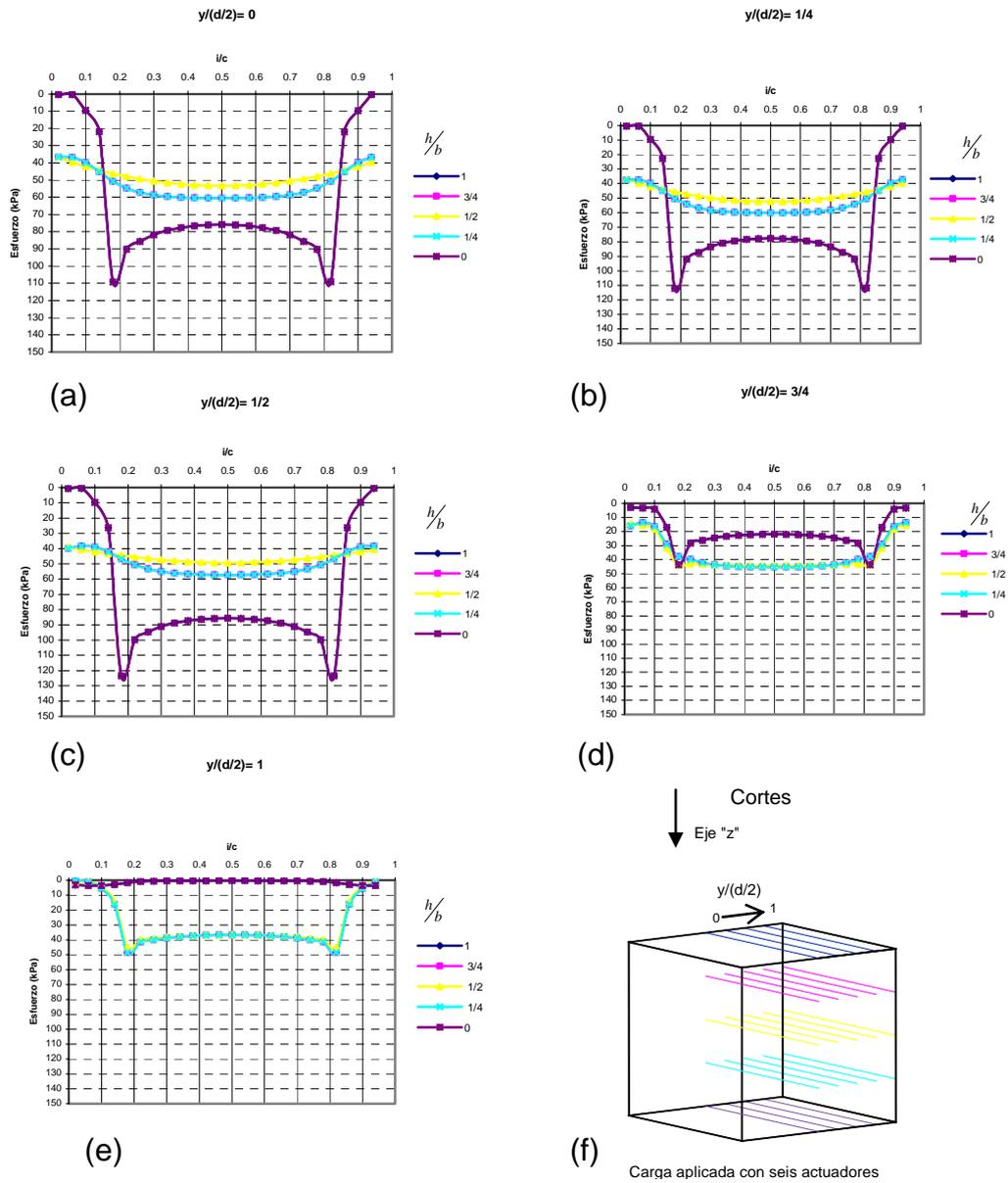


Figura A13.2

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos en la cara "z", dirección "z". El ángulo de fricción de la interfase es de 20° .

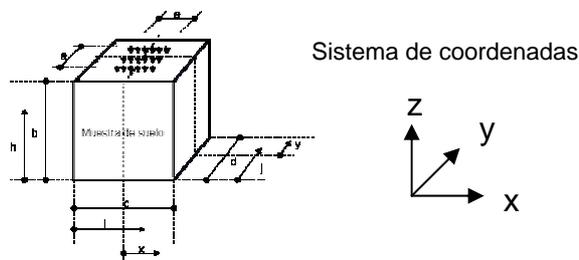
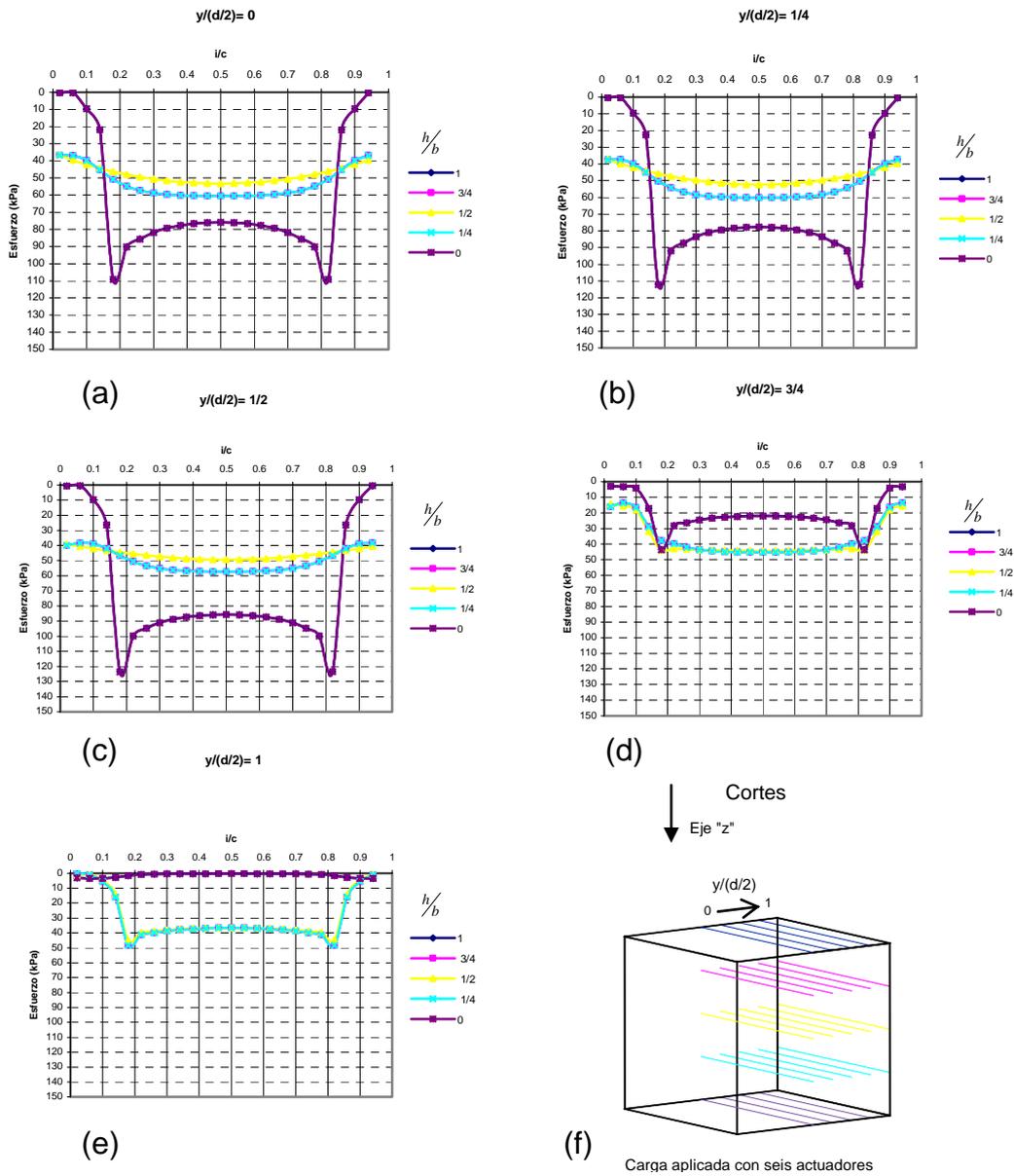
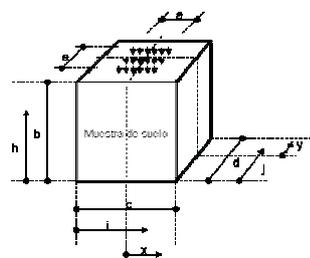
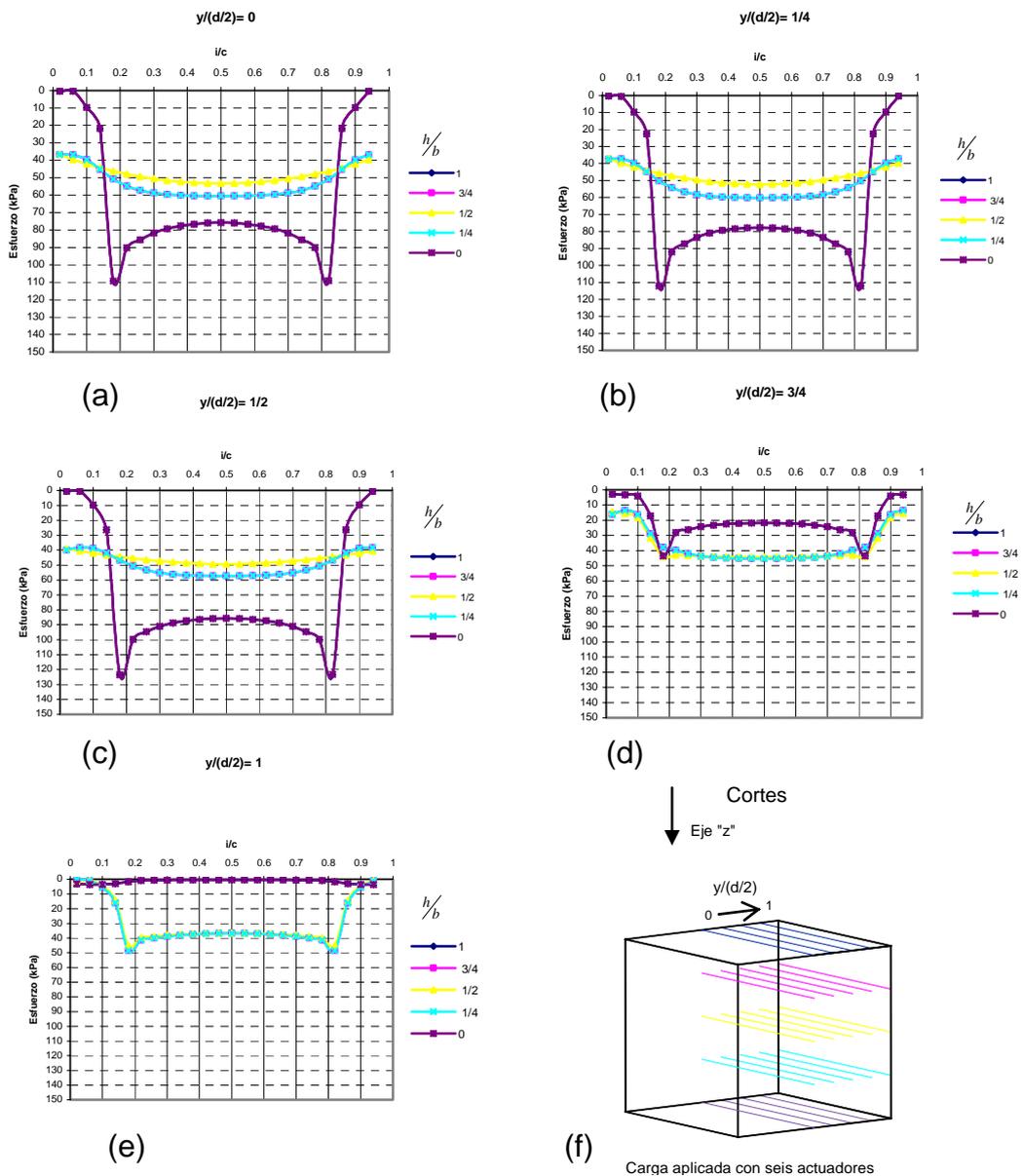


Figura A13.3

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos en la cara "z", dirección "z". El ángulo de fricción de la interfase es de 10° .



Sistema de coordenadas

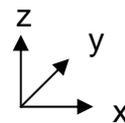
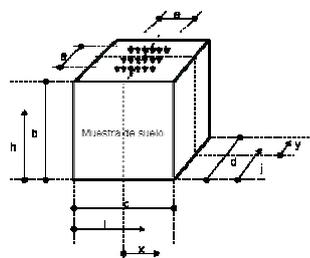
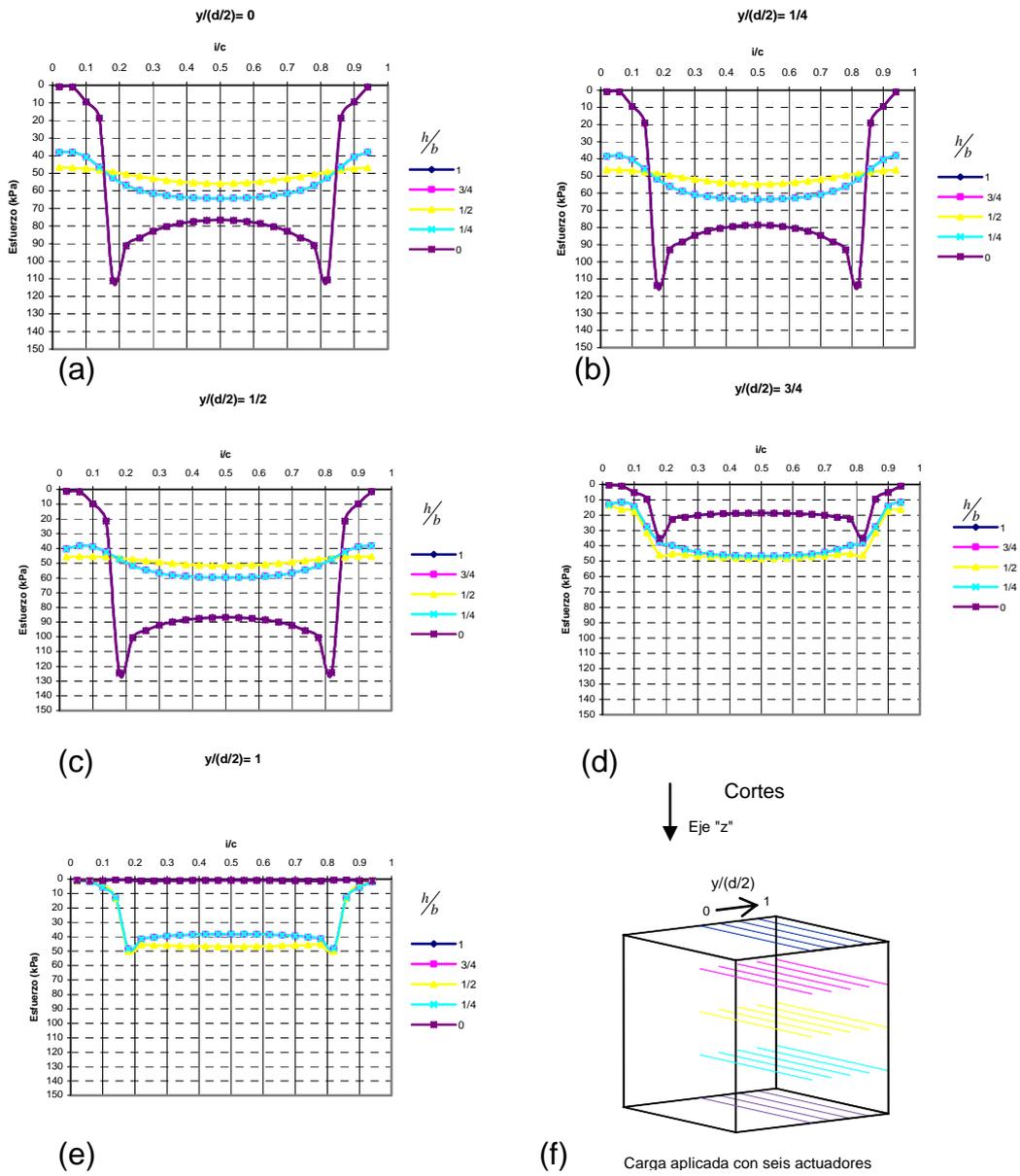


Figura A13.4

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos en la cara "z", dirección "z". El ángulo de fricción de la interfase es de 0° .



Sistema de coordenadas

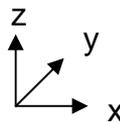


Figura A13.5

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos normales octaédricos. El ángulo de fricción de la interfase es de 30° .

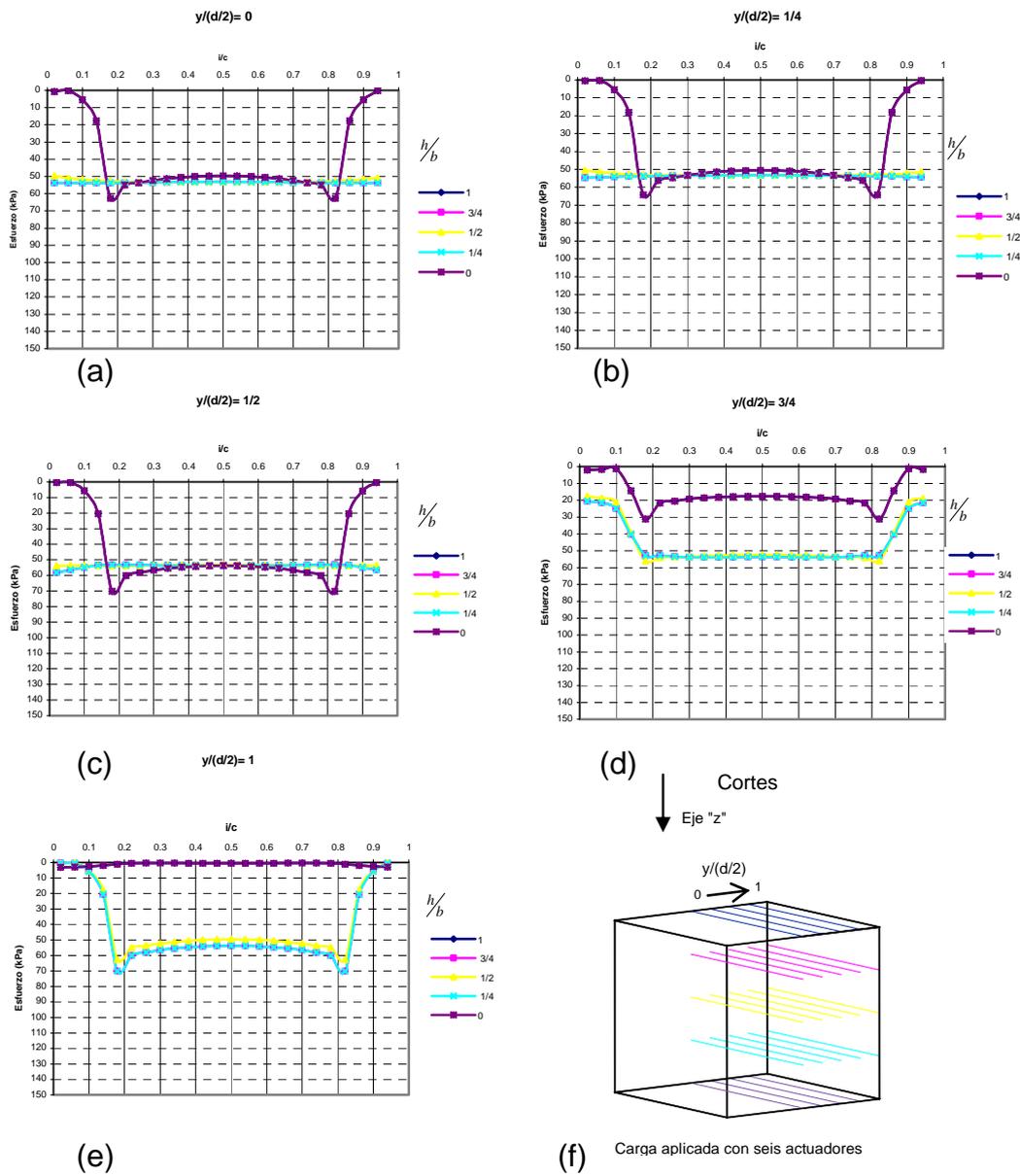


Figura A13.6

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos normales octaédricos. El ángulo de fricción de la interfase es de 20° .

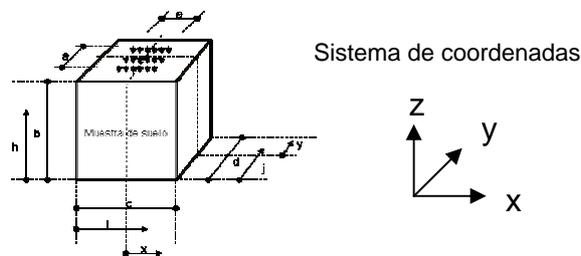
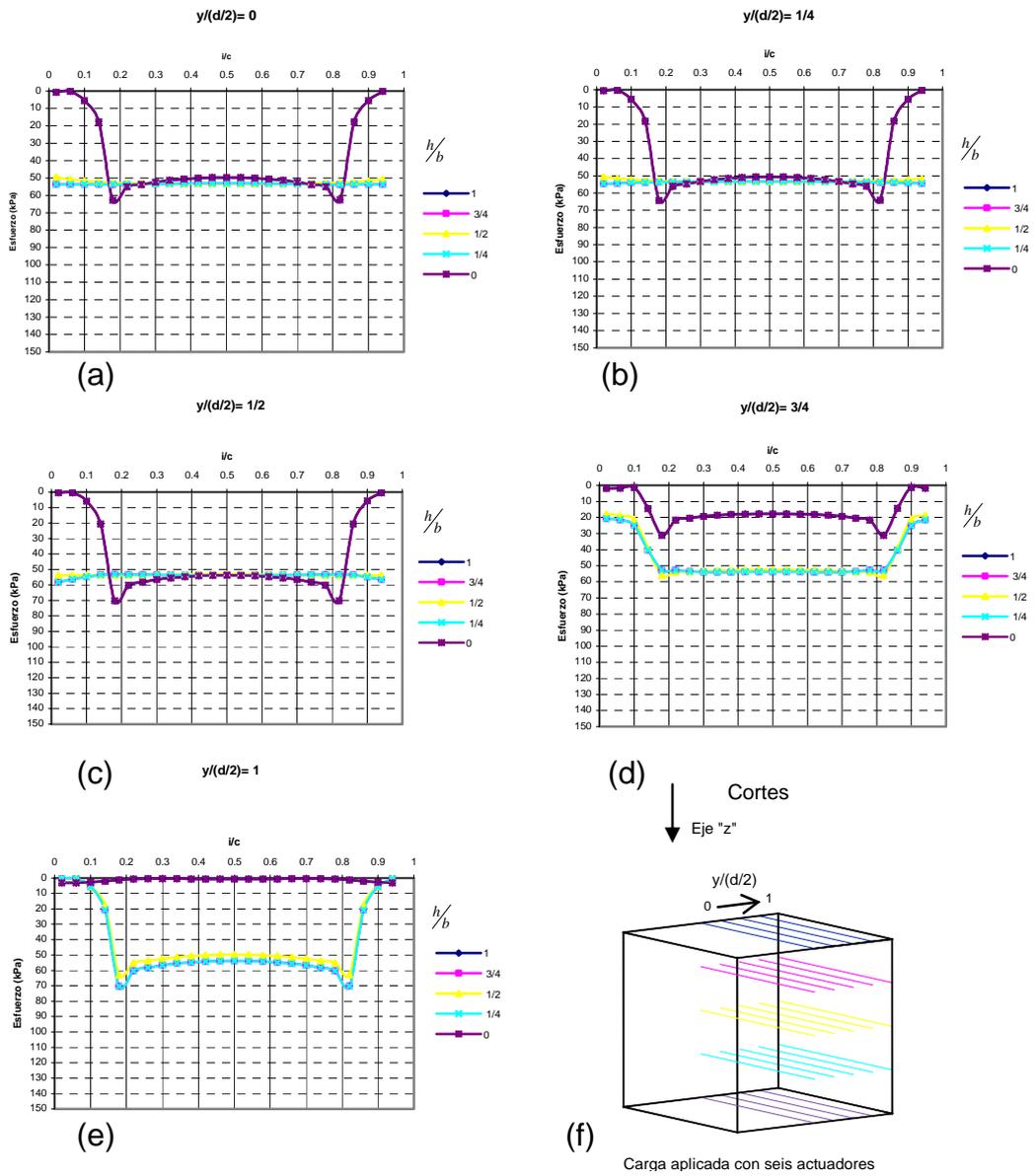


Figura A13.7

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos normales octaédricos. El ángulo de fricción de la interfase es de 10° .

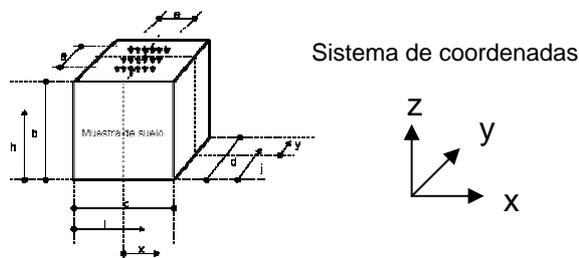
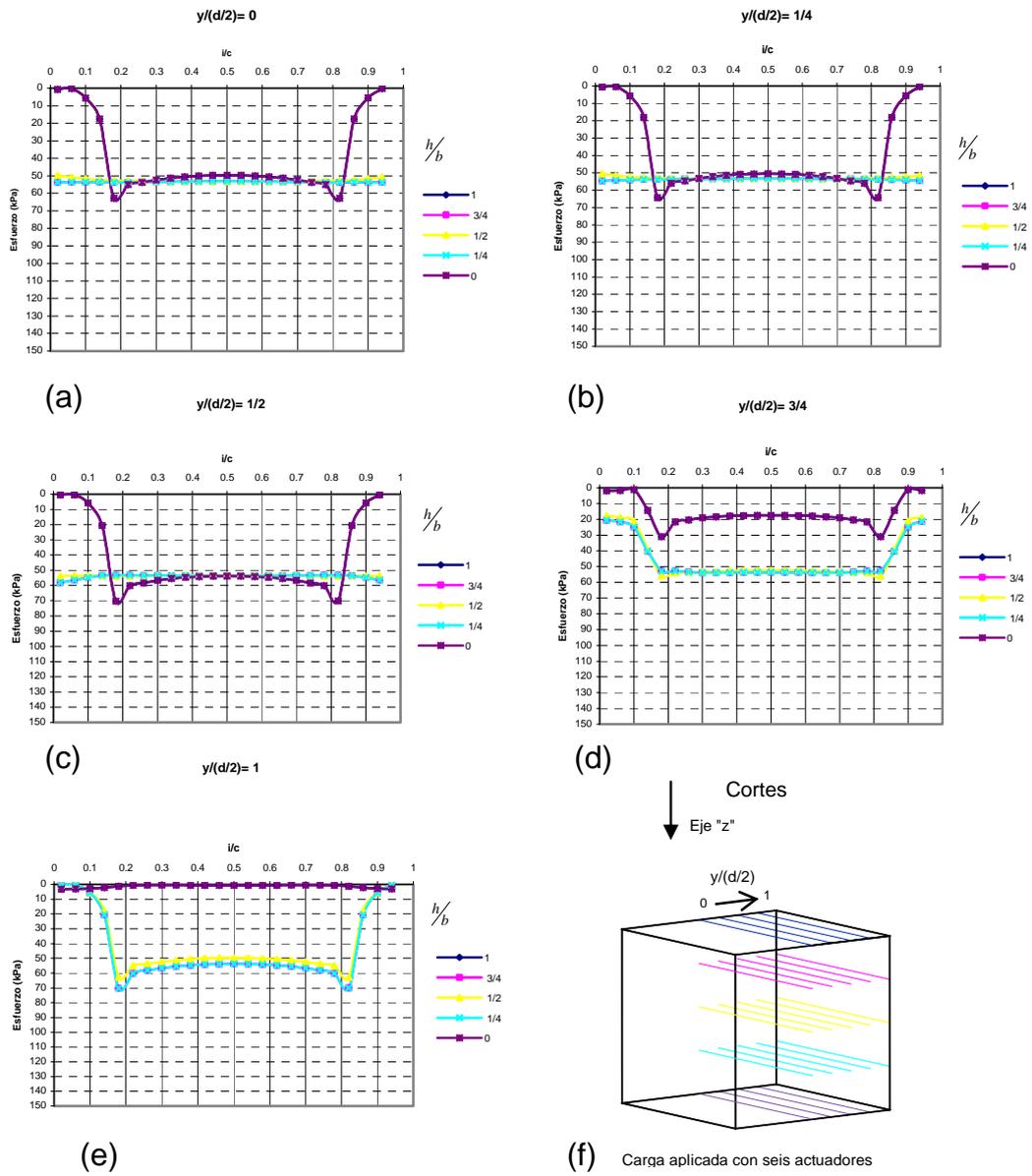


Figura A13.8

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos normales octaédricos. El ángulo de fricción de la interfase es de 0° .

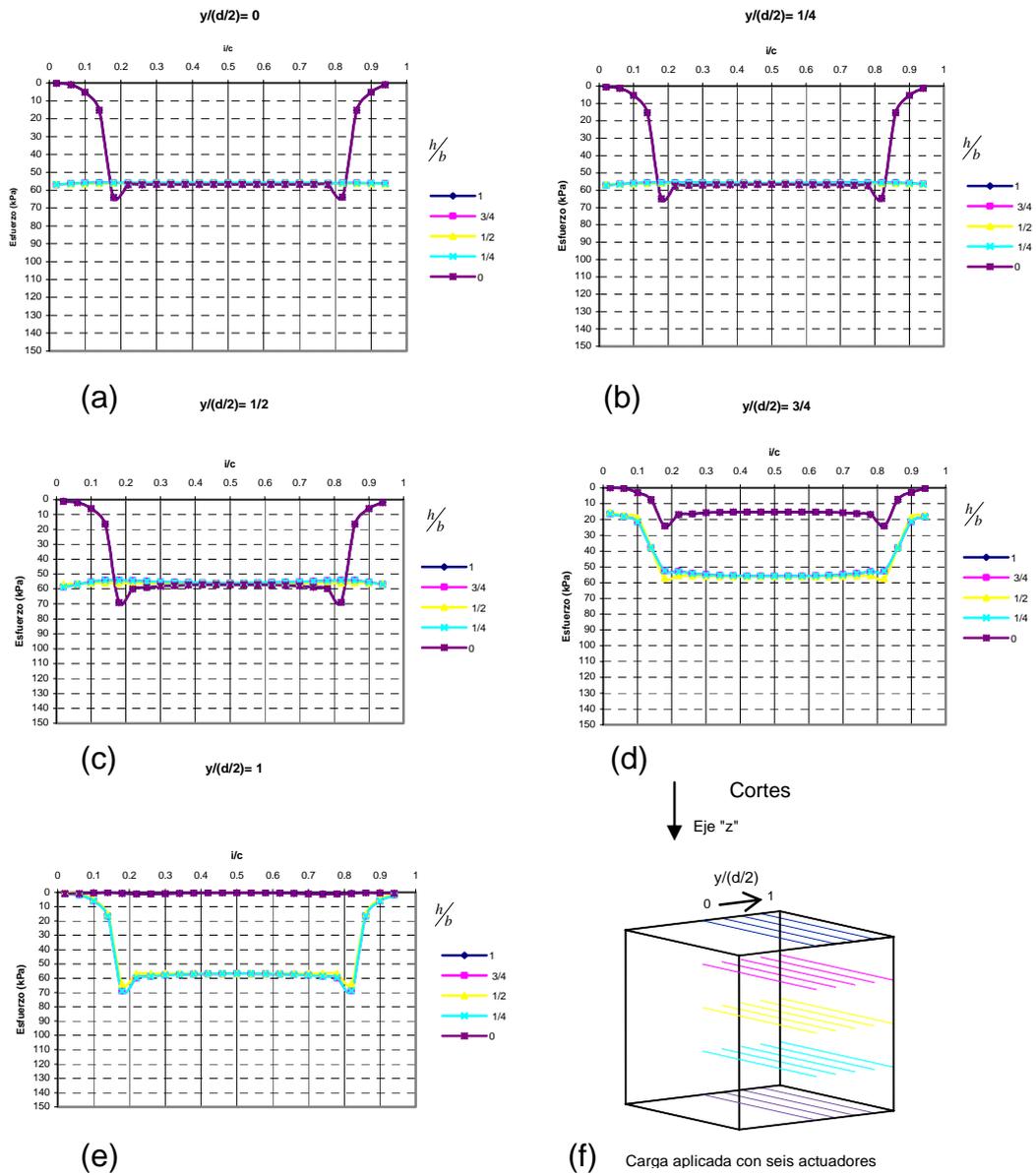


Figura A13.9

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos cortantes octaédricos. El ángulo de fricción de la interfase es de 30° .

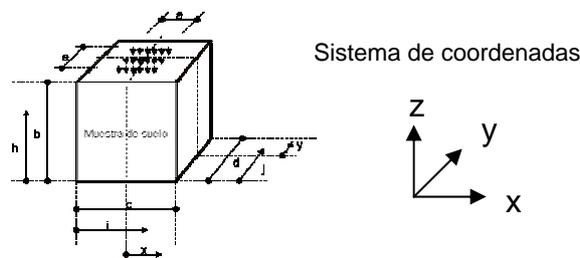
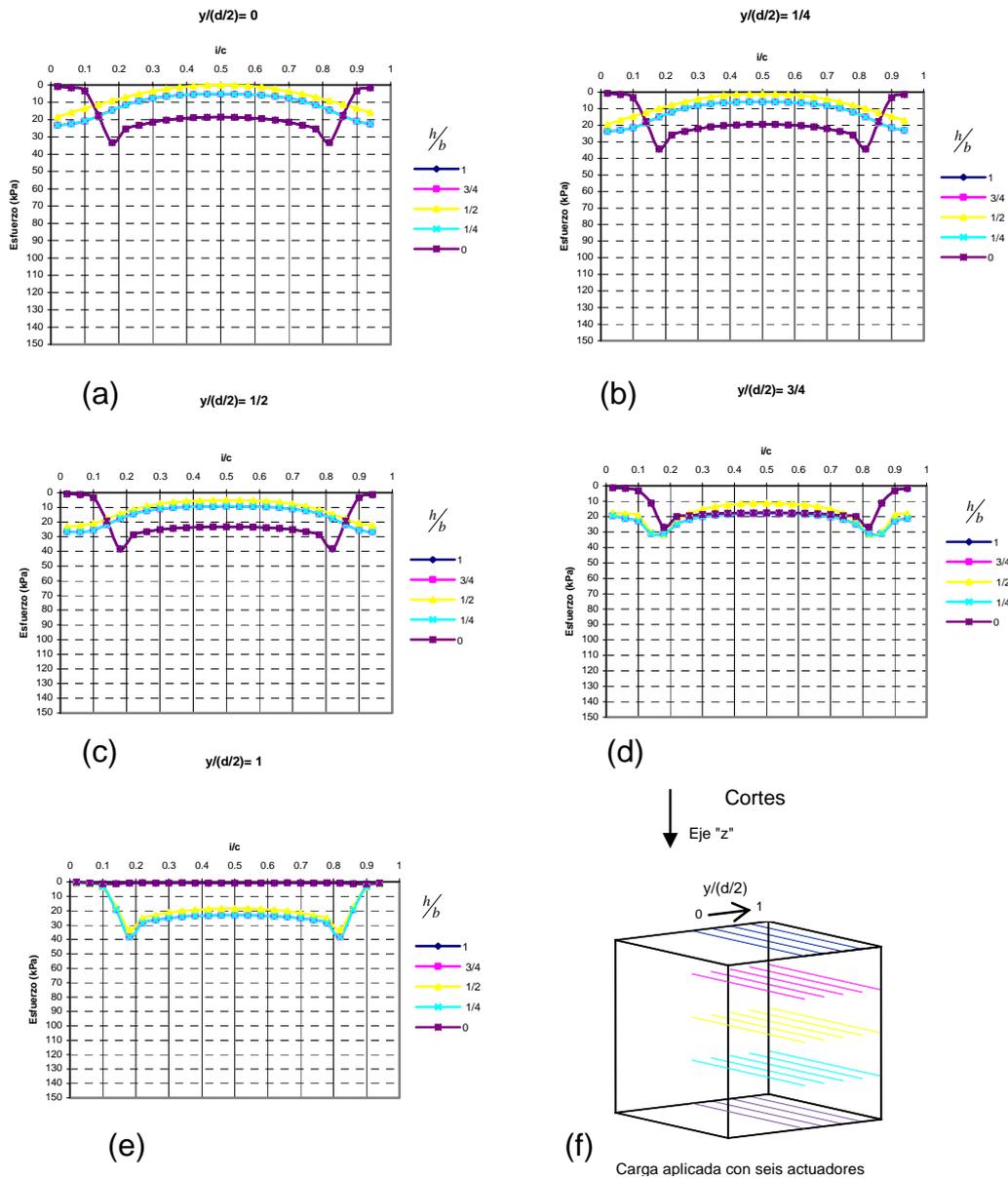


Figura A13.10

Esfuerzos cortantes octaédricos. El ángulo de fricción de la interfase es de 20°.

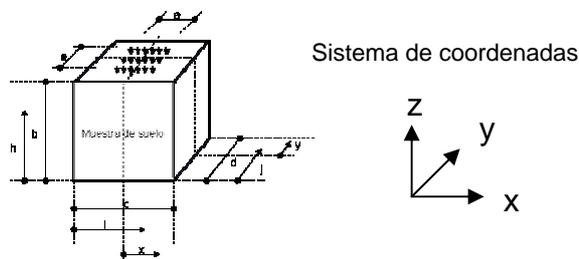
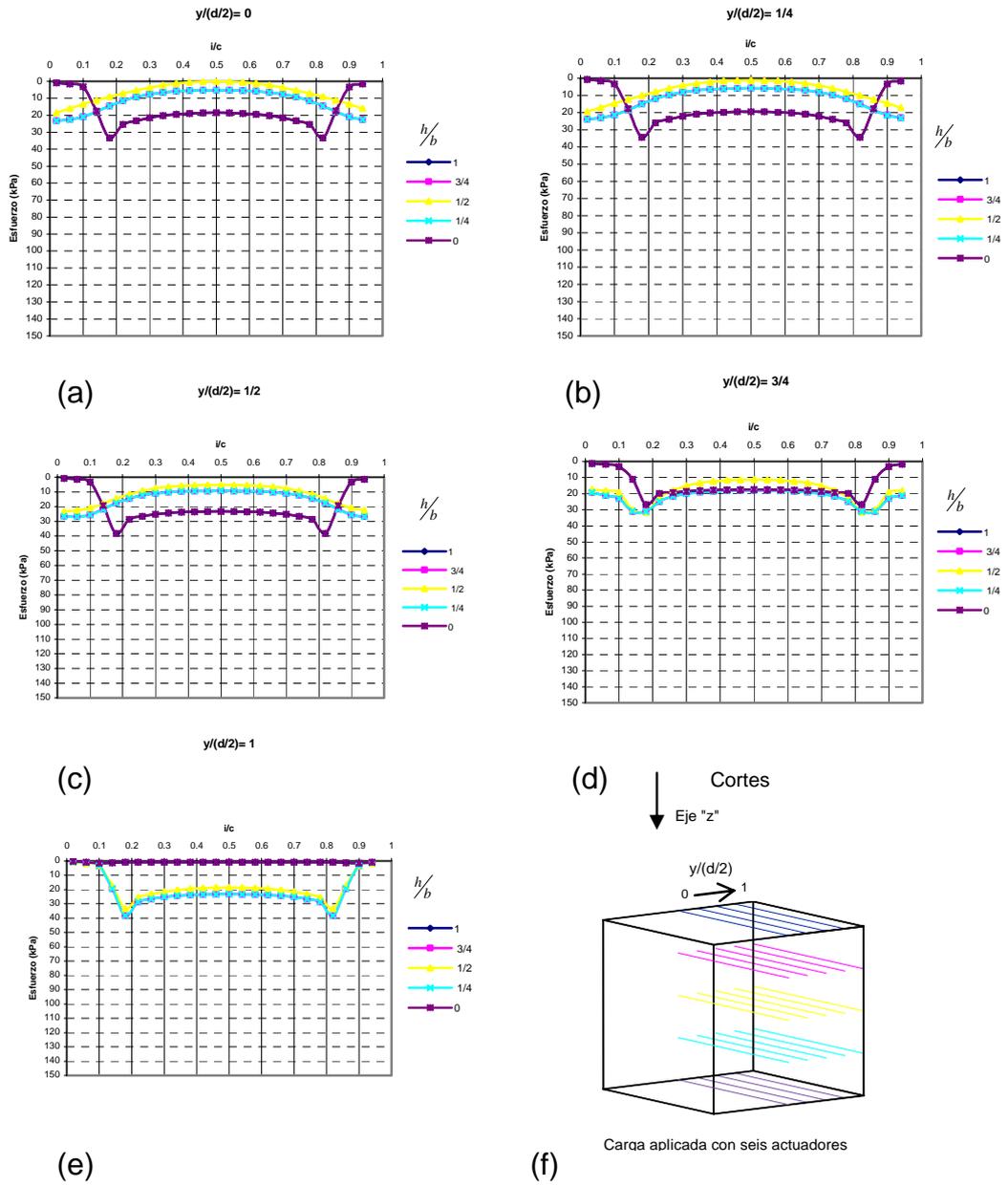


Figura A13.11

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos cortantes octaédricos. El ángulo de fricción de la interfase es de 10° .

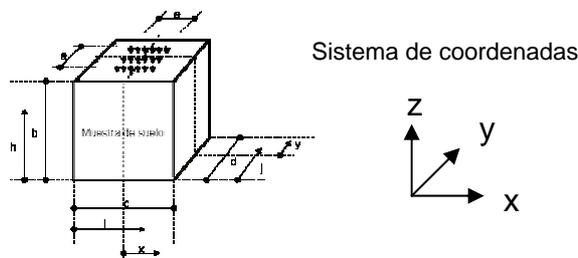
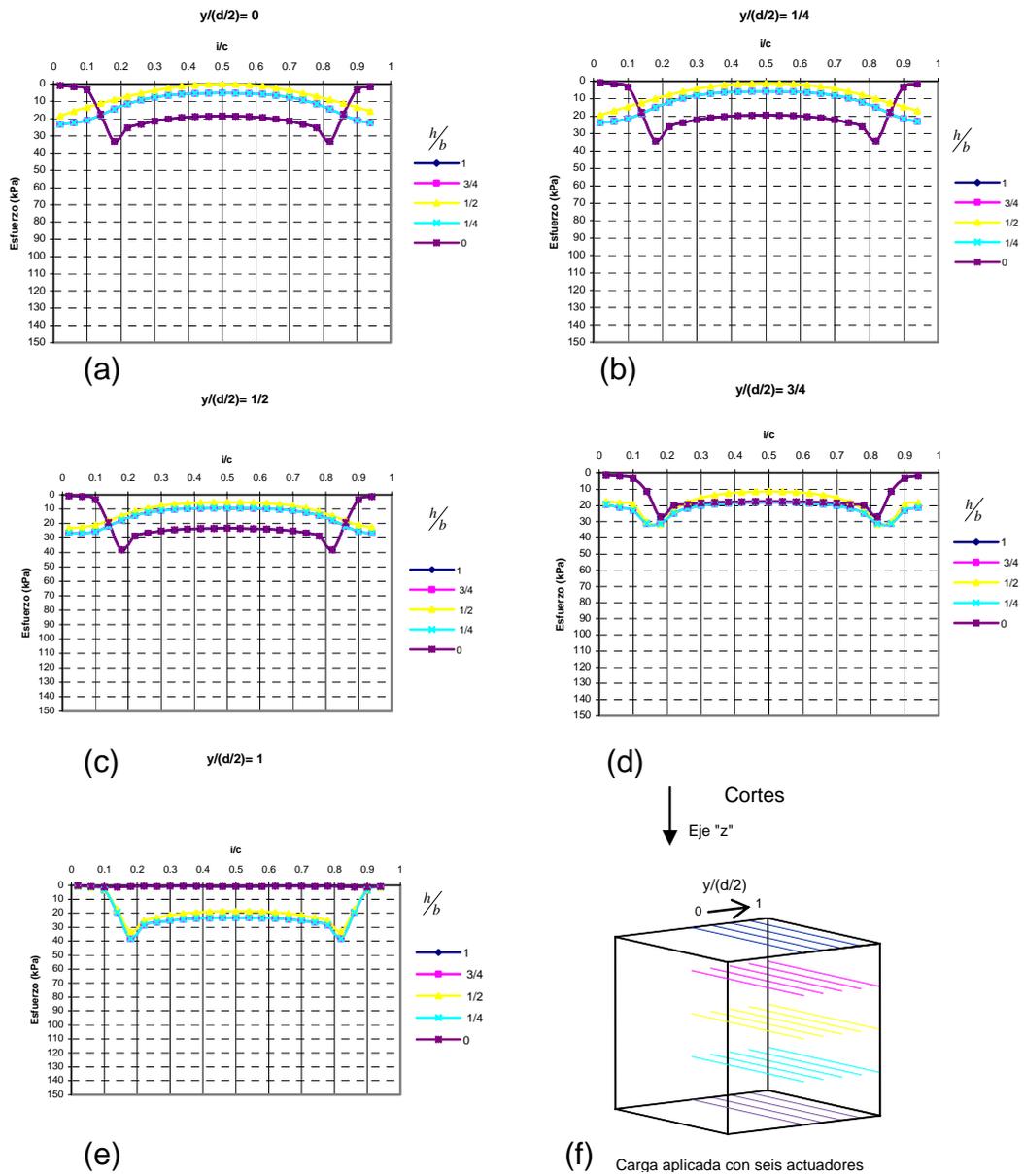
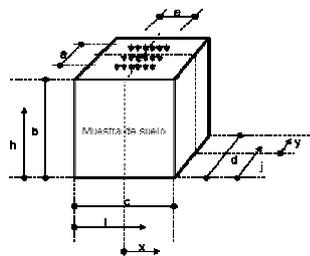
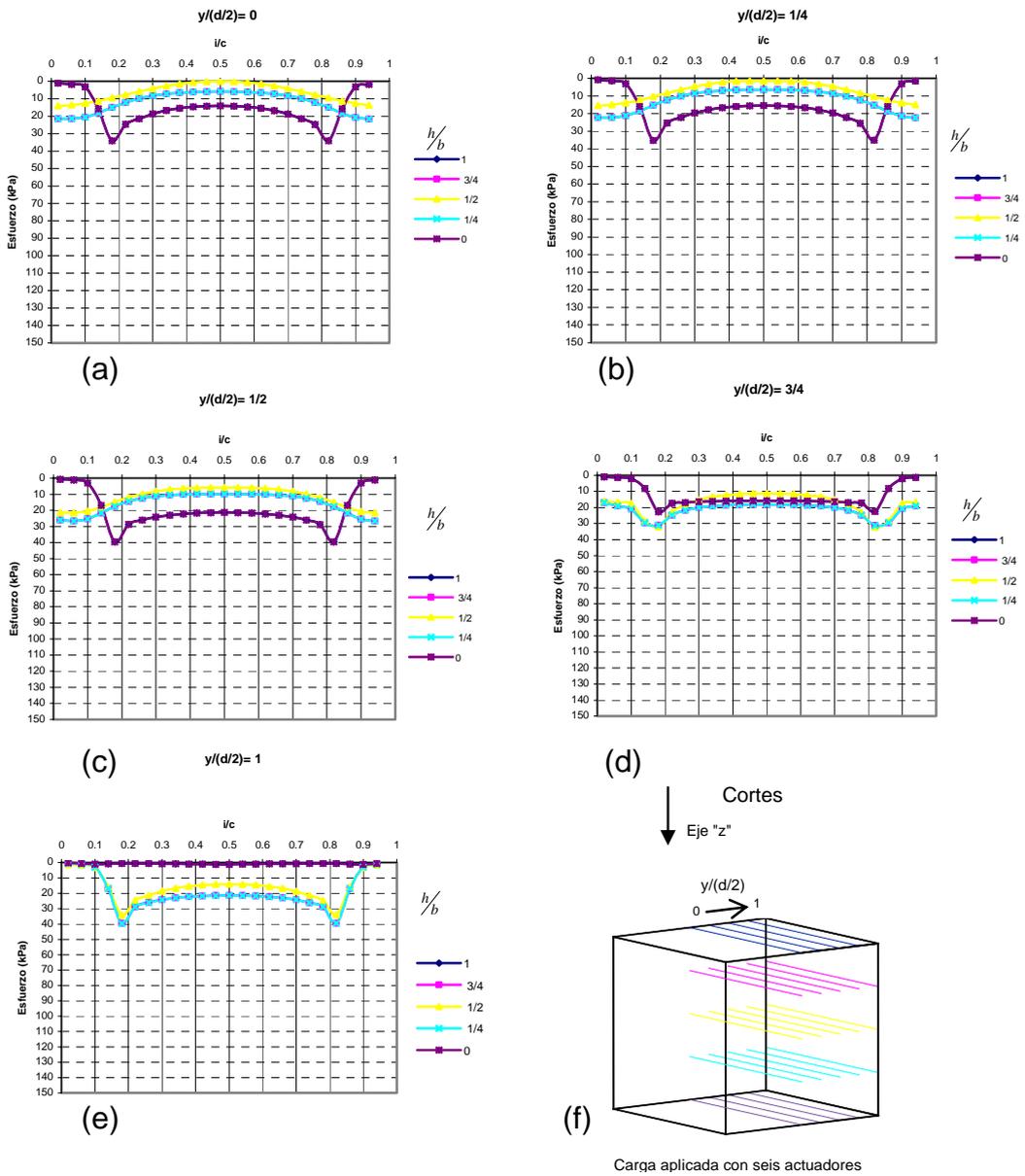


Figura A13.12

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Esfuerzos cortantes octaédricos. El ángulo de fricción de la interfase es de 0° .



Sistema de coordenadas

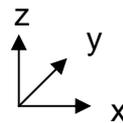


Figura A13.13

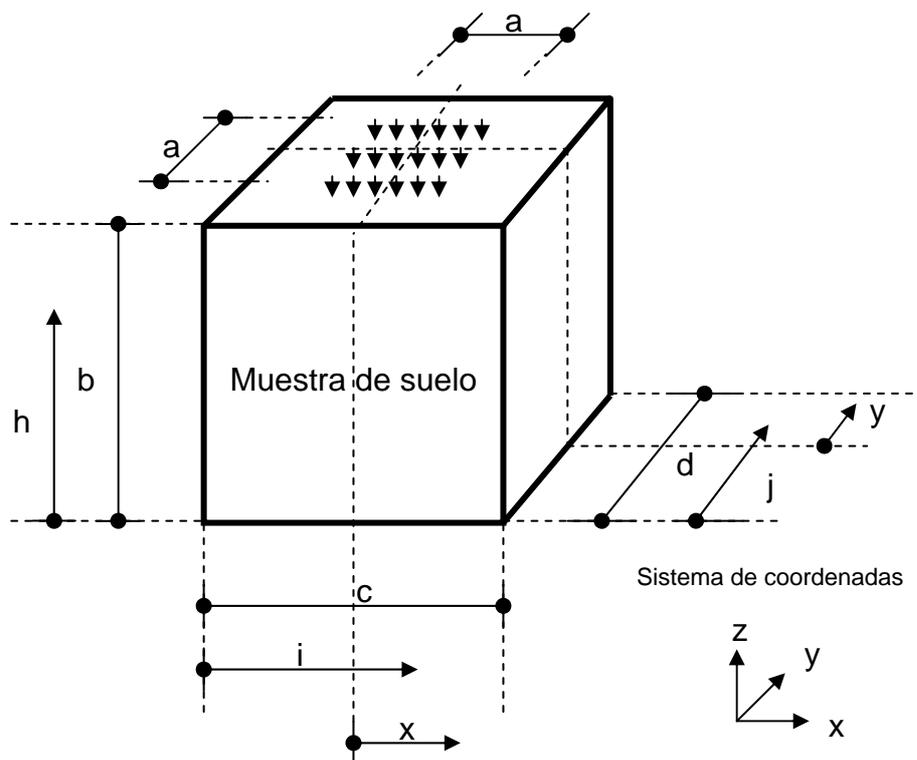
En las gráficas anteriores, se aprecia que cuando varía el ángulo de fricción de la interfaz actuador-suelo en el rango de 30° a 10° , no ocurren cambios significativos en la distribución de esfuerzos normales octaédricos, sin embargo cuando toma el valor de 0° (ver figura A13.9a), los esfuerzos normales octaédricos se vuelven casi uniformes en toda la probeta. Esto indica que la interfaz ideal, sería una que eliminara totalmente la fricción entre la muestra y los actuadores. De igual forma se puede apreciar que los esfuerzos cortantes octaédricos dentro de la muestra solo disminuyen en la modelación donde se le asigna al ángulo de fricción de la interfaz un valor de 0° (ver la figura A13.13a y compararla con las A13.10a, A13.11a y A13.12a). En lo que respecta a los esfuerzos en las caras z dirección z , son prácticamente iguales en todas las modelaciones.

ANEXO A14

DESPLAZAMIENTOS EN UN CUBO DE 60 cm, MODELOS
DE VALIDACIÓN DEL CAPITULO 5
(ANALISIS EN FLAC 3D)

Las siguientes gráficas muestran los desplazamientos en los ejes “z”, “x” y “y” de los análisis empleados en la validación del capítulo 5 del modelo numérico del cubo triaxial.

Nomenclatura empleada:



Donde: $0 \leq \frac{h}{b} \leq 1$, $0 \leq \frac{i}{c} \leq 1$, $0 \leq \frac{j}{d} \leq 1$, $0 \leq \frac{x}{c/2} \leq 1$ y $0 \leq \frac{y}{d/2} \leq 1$

Figura A14.1 Nomenclatura empleada en los análisis realizados en FLAC 3D

En la siguiente tabla se muestran las medidas de la muestra analizada.

Tabla A14.1 Dimensiones de la muestra modelada, siendo $b = c = d$

a (cm)	b (cm)	a/c
40	60	2/3

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Desplazamientos en el eje z. Grupo 03. Carga aplicada en el eje: $S1= 1.584 \text{ MPa}$ (16.15 kg/cm^2)

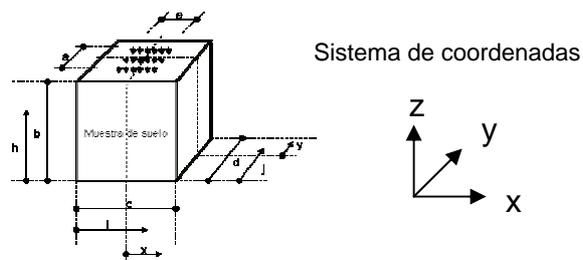
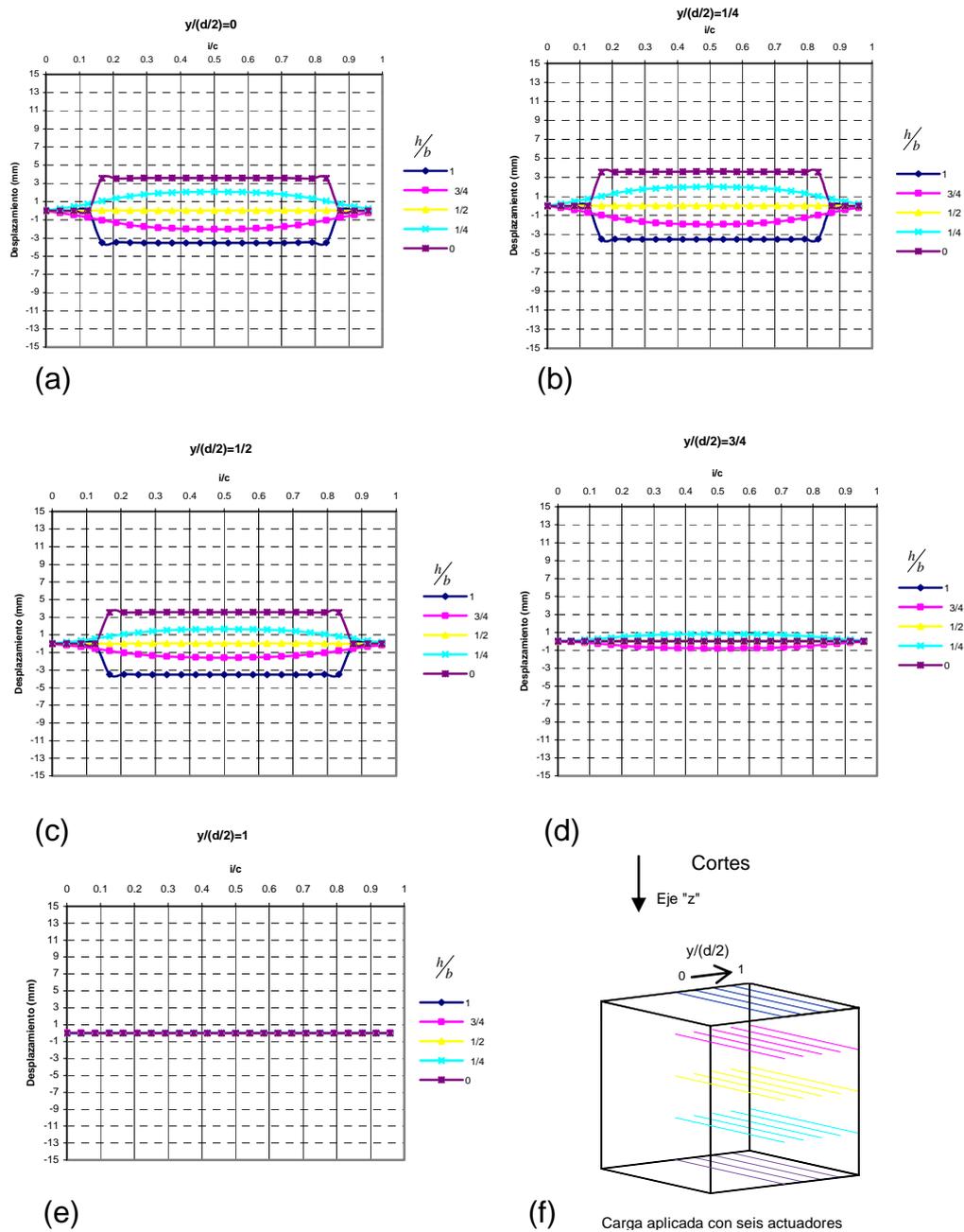


Figura A14.2

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Desplazamientos en el eje x. Grupo 03. Carga aplicada en el eje: $S_2=0.864\text{ MPa}$ (8.81 kg/cm^2)

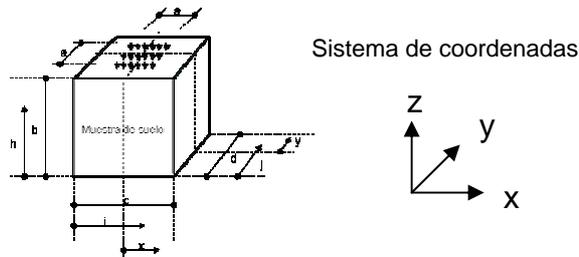
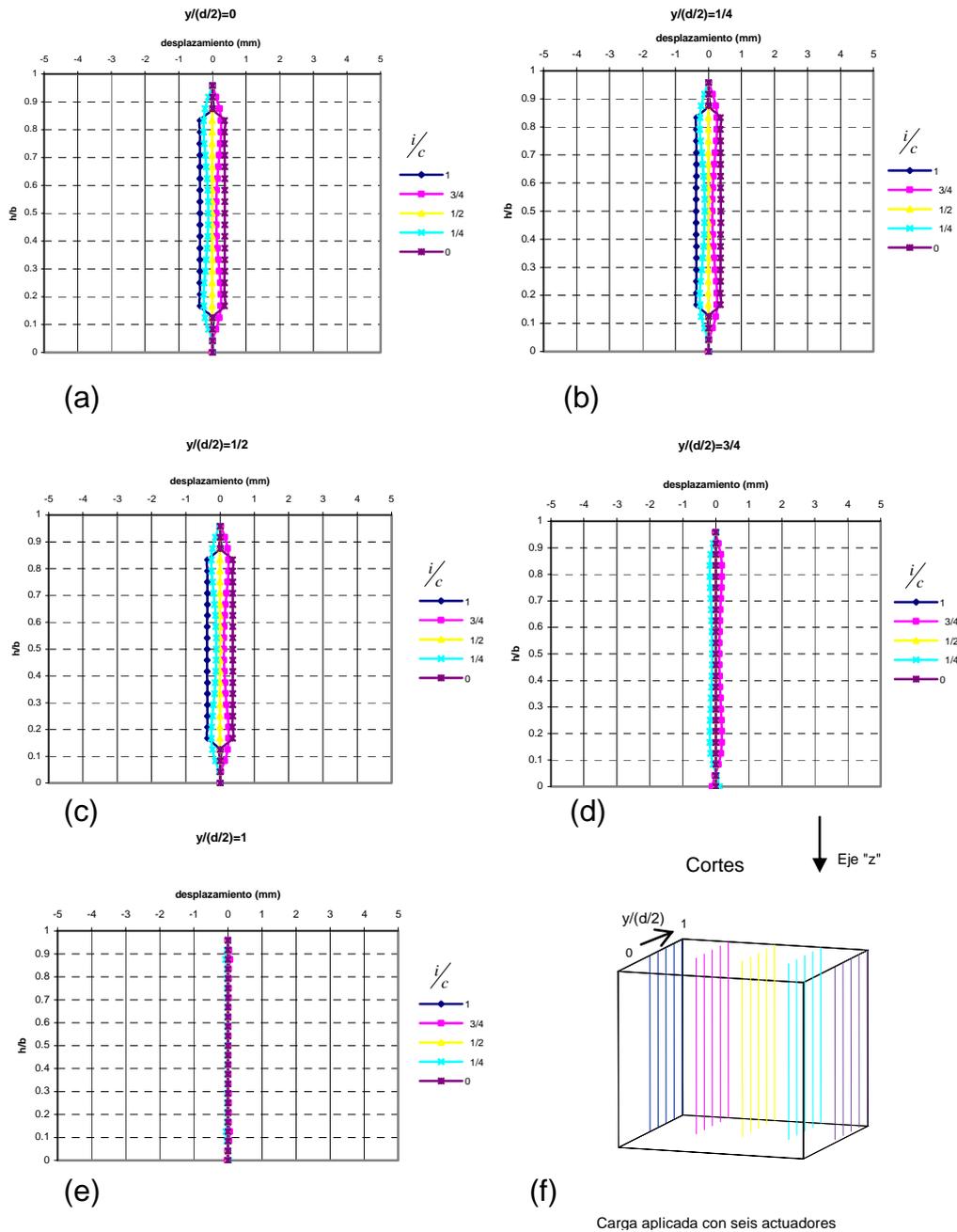
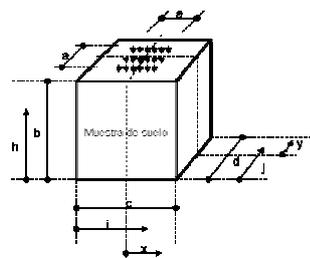
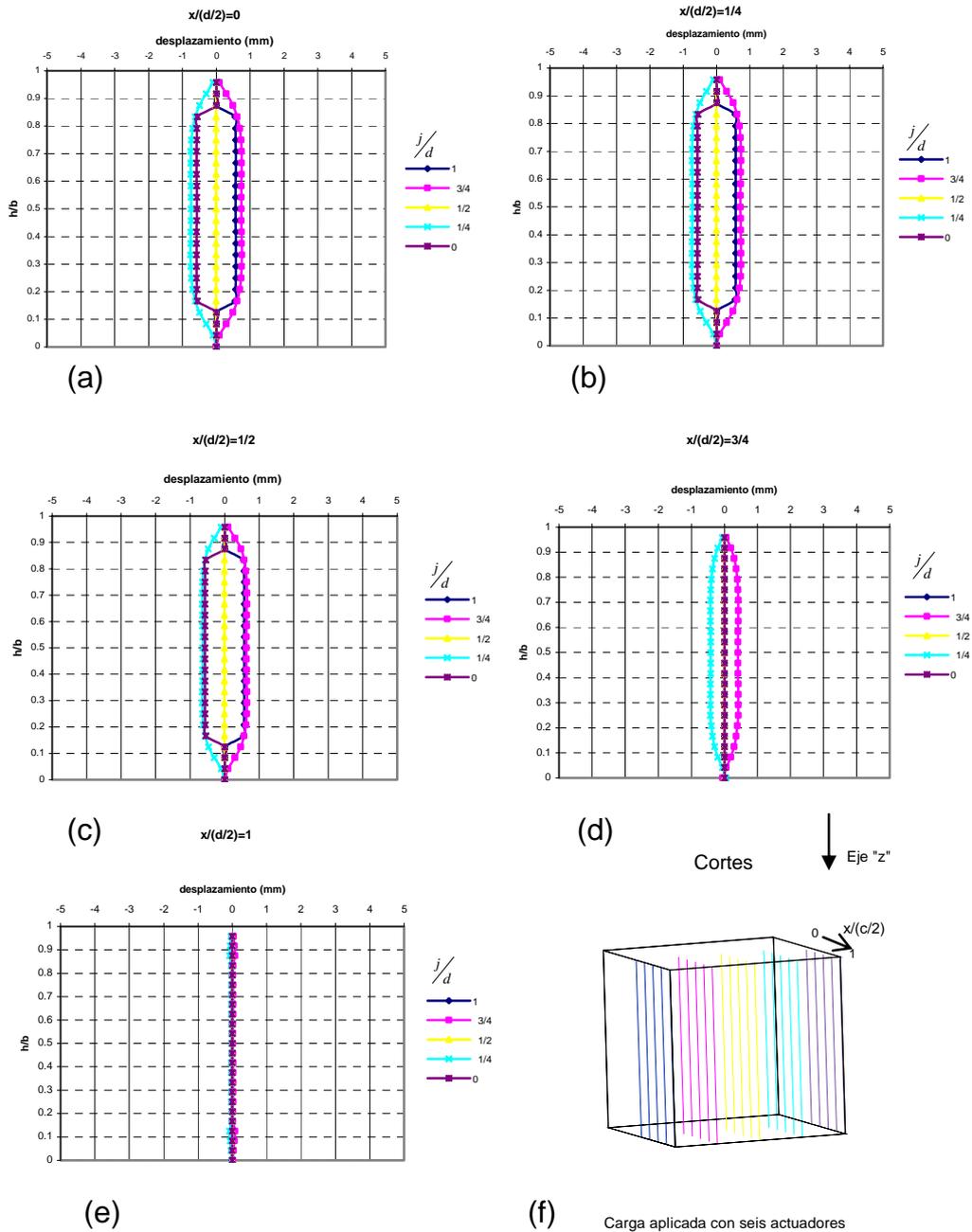


Figura A14.3

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Desplazamientos en el eje y. Grupo 03. Carga aplicada en el eje: $S3= 0.583 \text{ MPa}$ (5.95 kg/cm^2)



Sistema de coordenadas

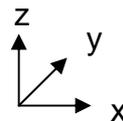


Figura A14.4

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Desplazamientos en el eje z. Grupo 06. Carga aplicada en el eje: $S1=0.720\text{ MPa}$ (7.34 kg/cm^2)

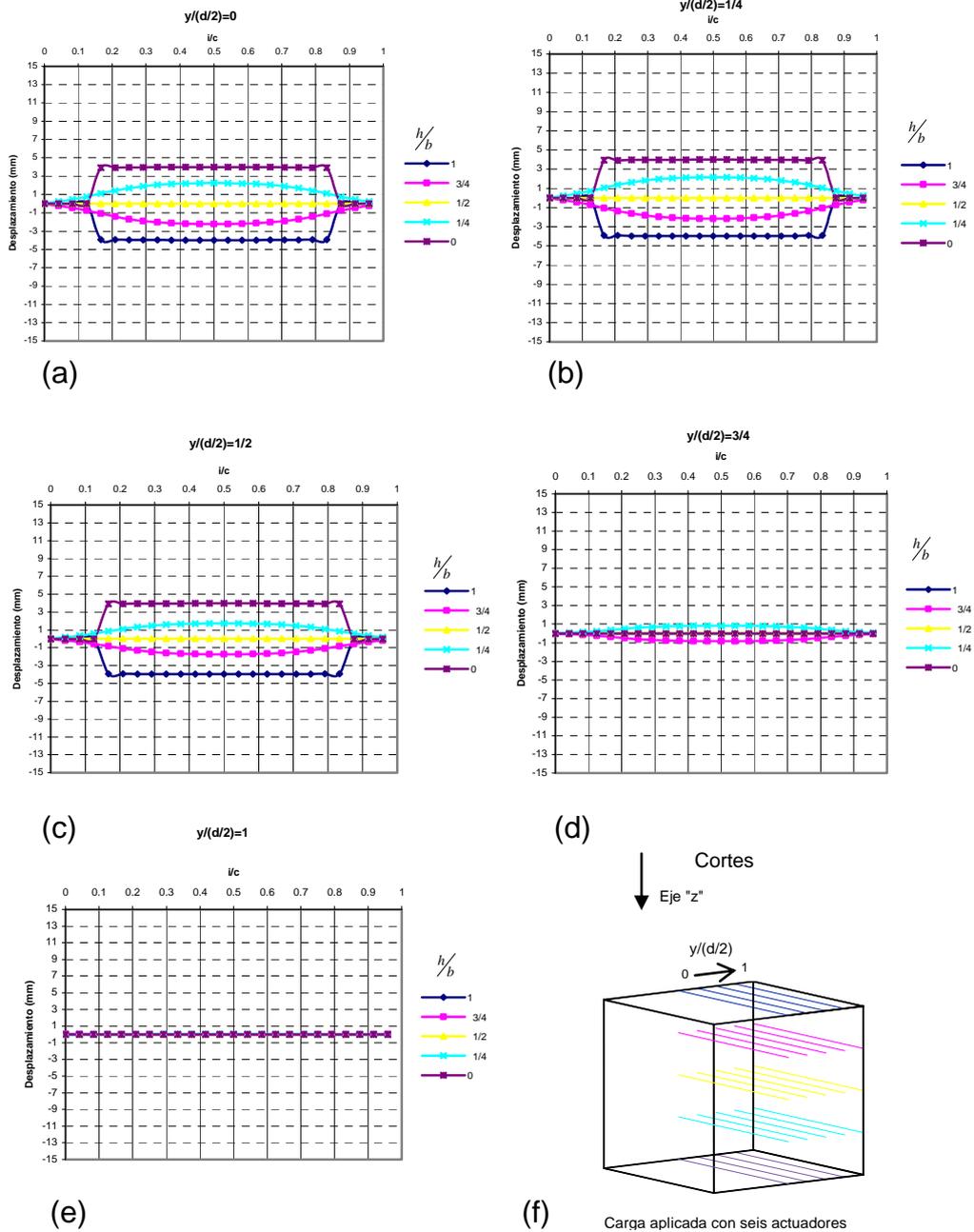


Figura A14.5

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Desplazamientos en el eje x. Grupo 06. Carga aplicada en el eje: $S_2=0.456 \text{ MPa}$ (4.65 kg/cm^2)

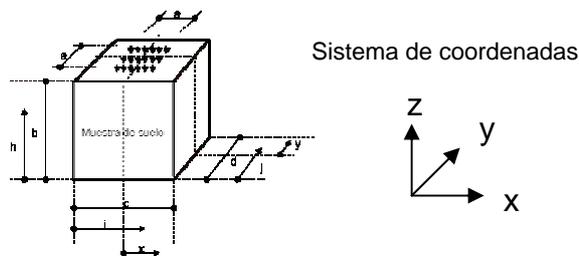
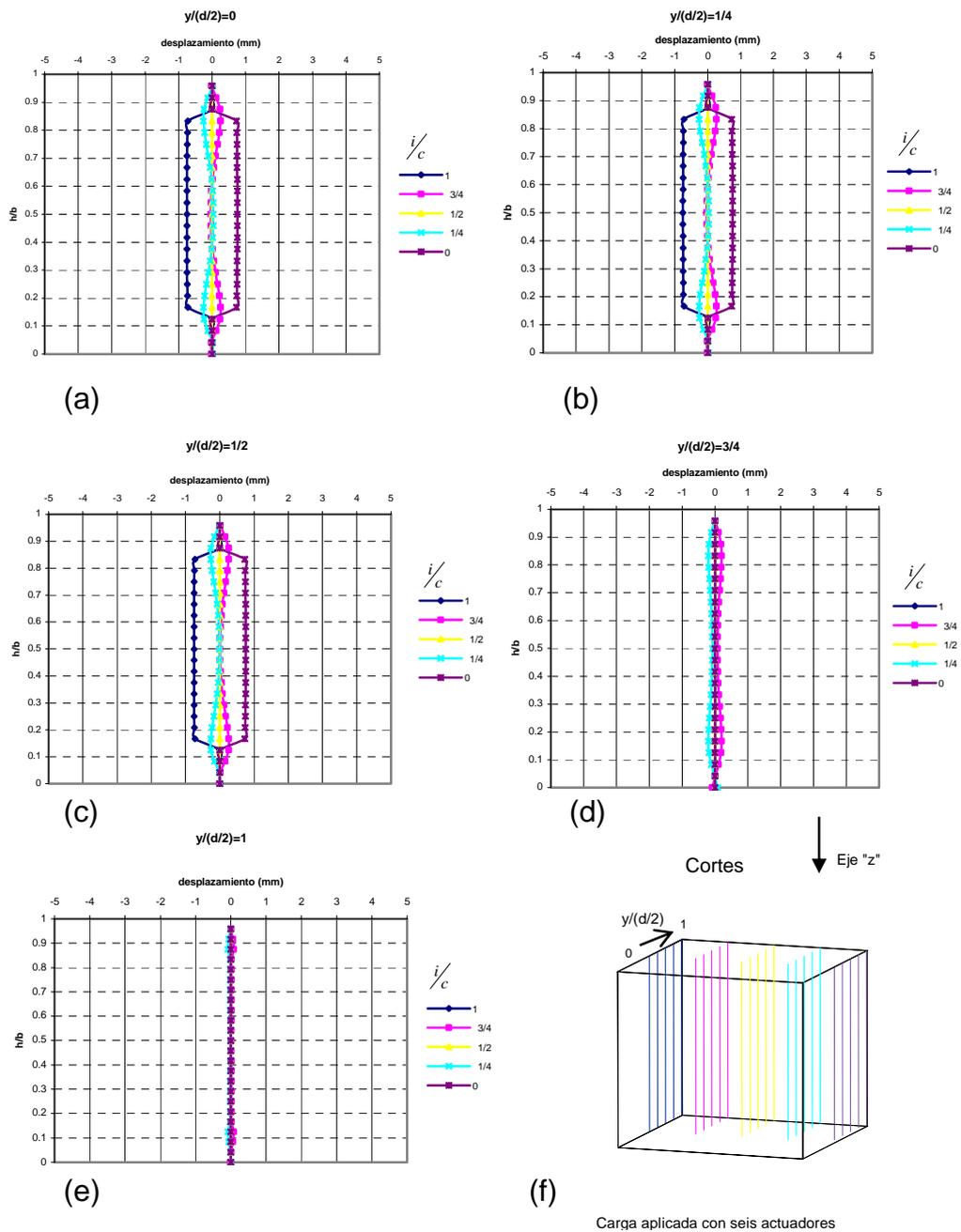
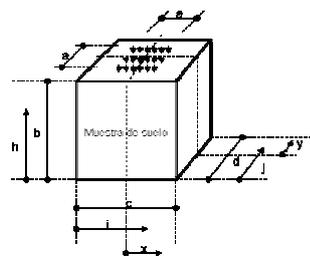
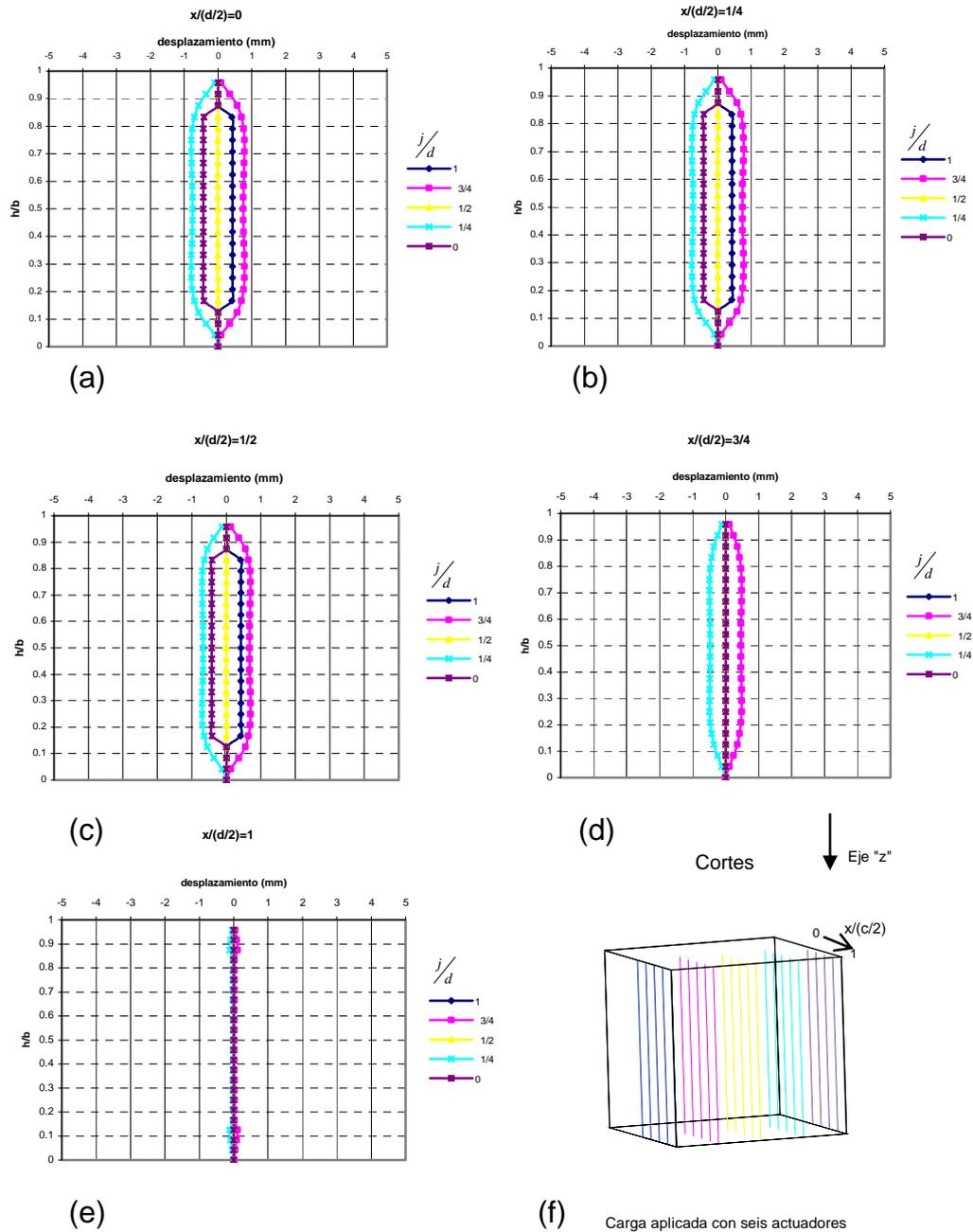


Figura A14.6

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Desplazamientos en el eje y. Grupo 06. Carga aplicada en el eje: $S3=0.333 \text{ MPa}$ (3.40 kg/cm^2)



Sistema de coordenadas

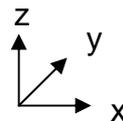


Figura A14.7

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Desplazamientos en el eje z. Grupo 07. Carga aplicada en el eje: $S1= 1.674 \text{ MPa}$ (17.07 kg/cm^2)

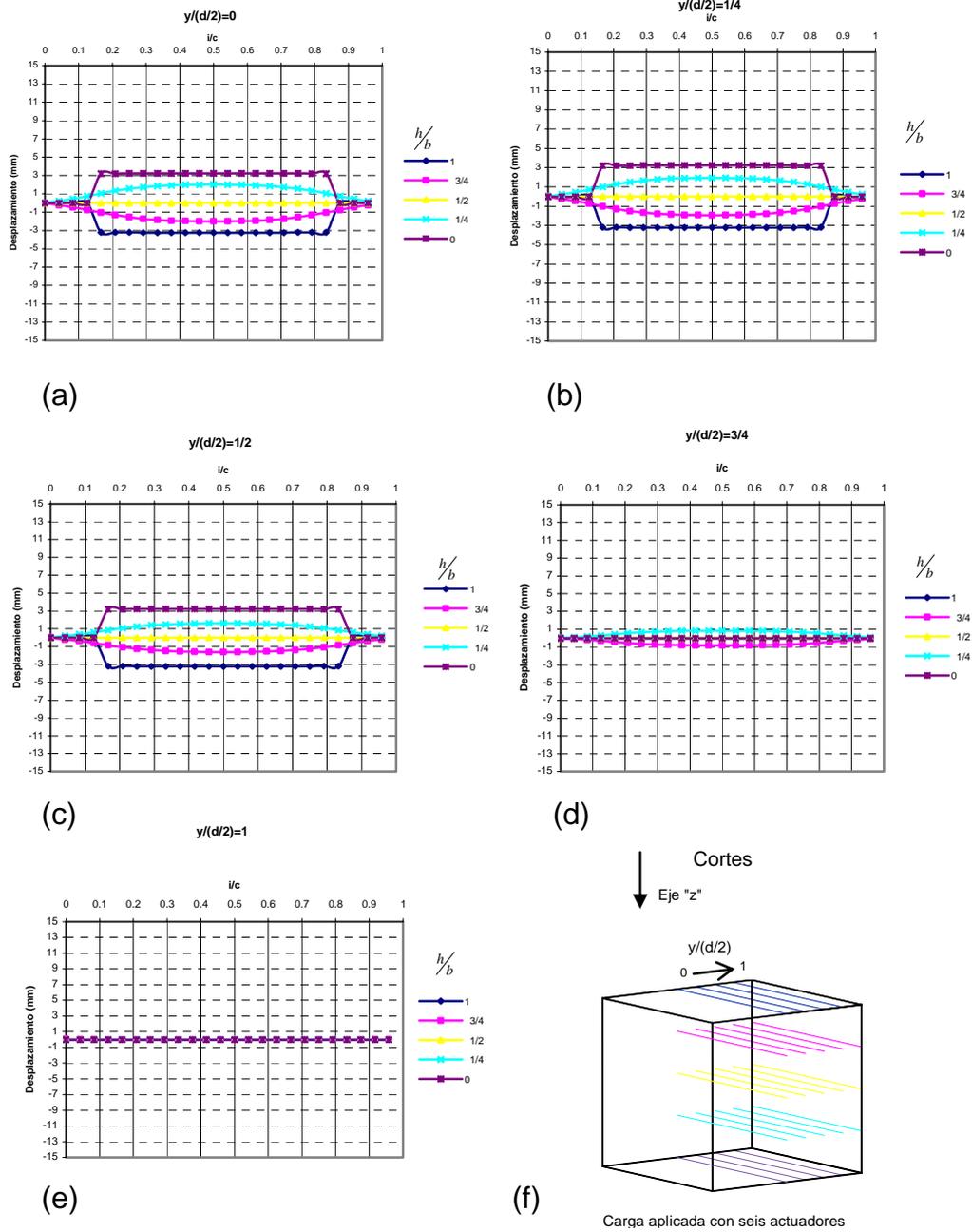


Figura A14.8

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Desplazamientos en el eje x. Grupo 07. Carga aplicada en el eje: $S_2=0.898 \text{ MPa}$ (9.16 kg/cm^2)

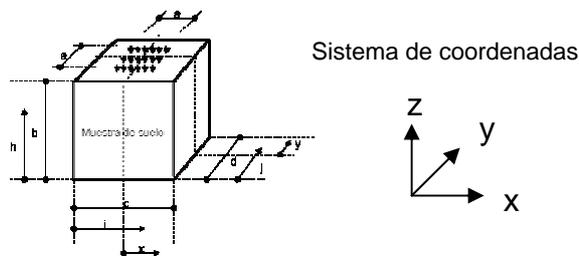
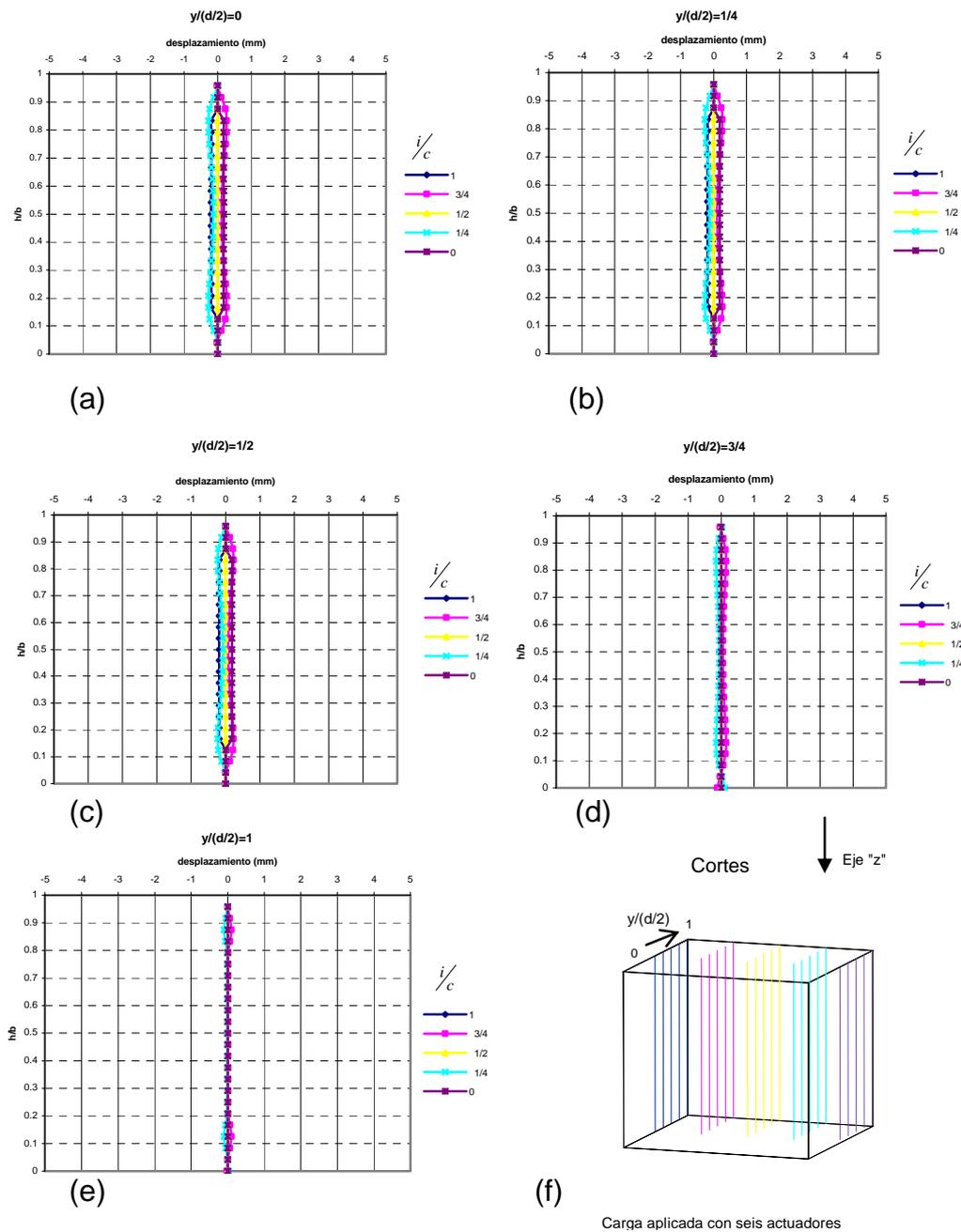


Figura A14.9

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Desplazamientos en el eje y. Grupo 07. Carga aplicada en el eje: $S3= 0.467 \text{ MPa}$ (4.76 kg/cm^2)

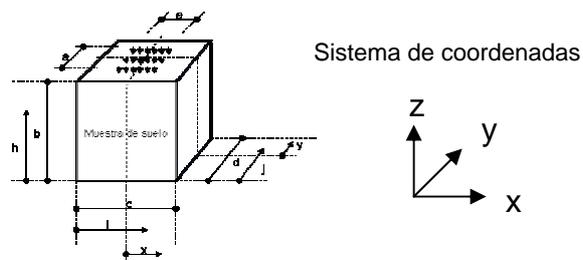
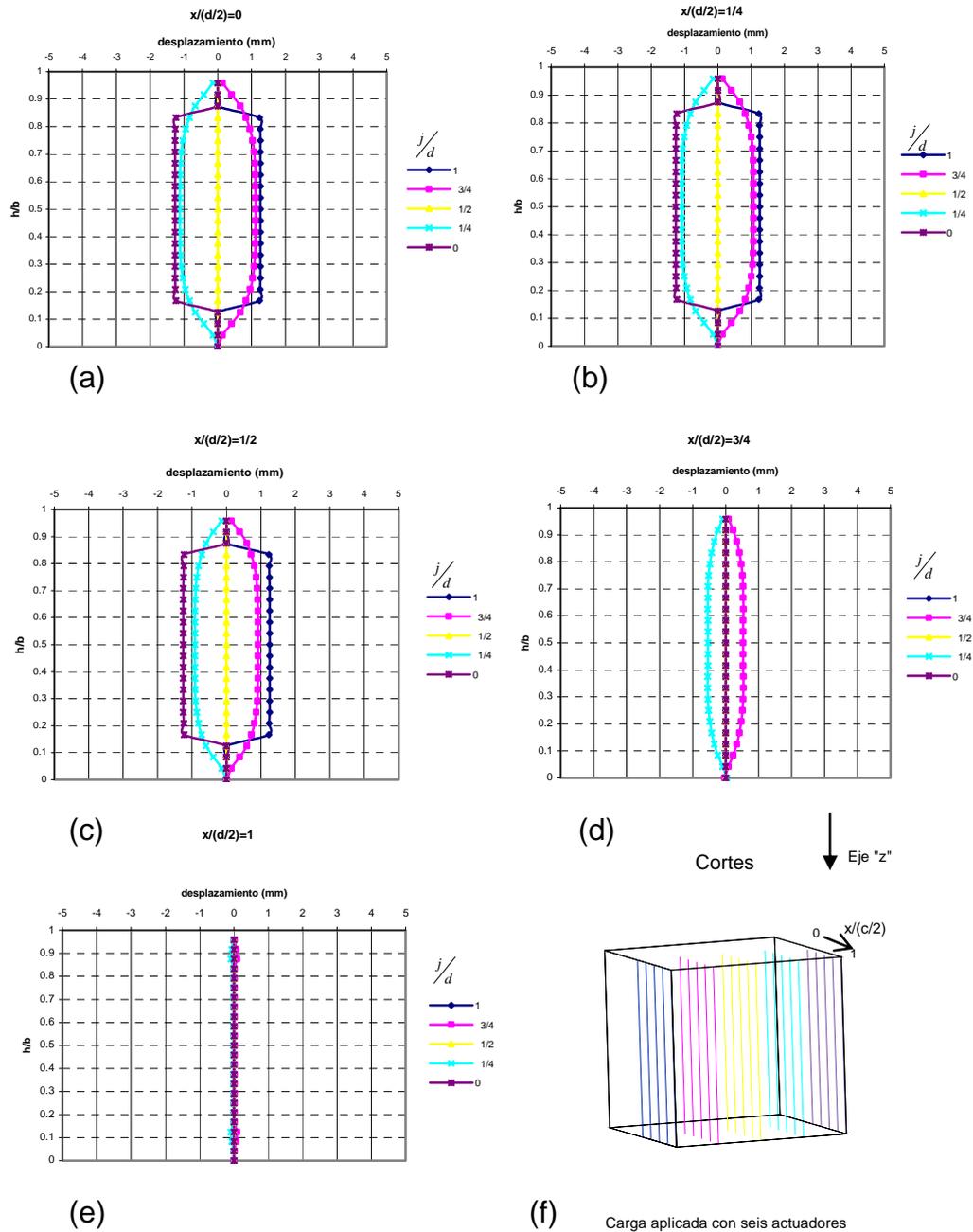
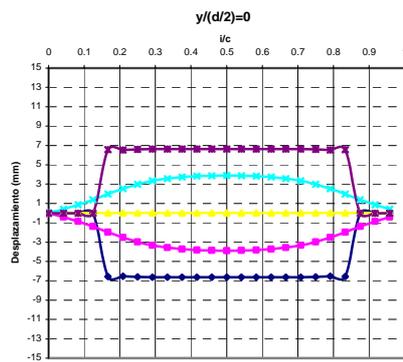


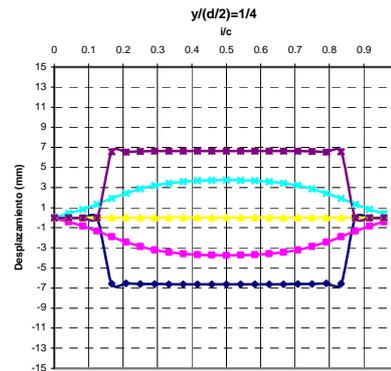
Figura A14.10

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

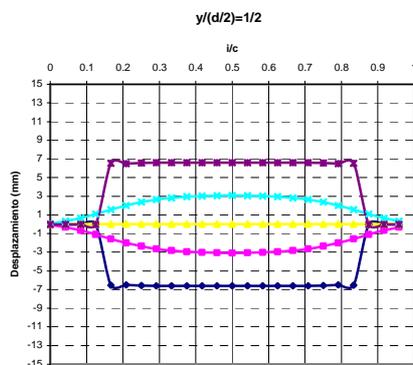
Desplazamientos en el eje z. Grupo 09. Carga aplicada en el eje: $S1=0.710\text{ MPa}$ (7.24 kg/cm^2)



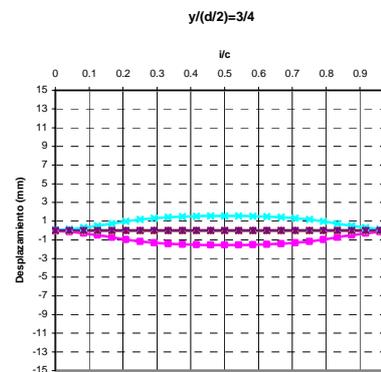
(a)



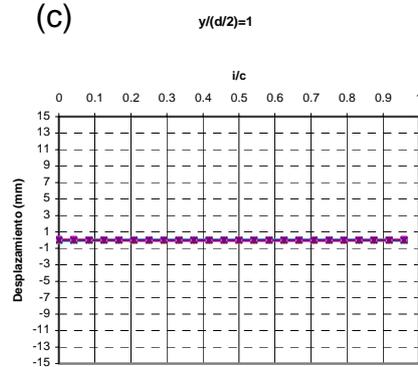
(b)



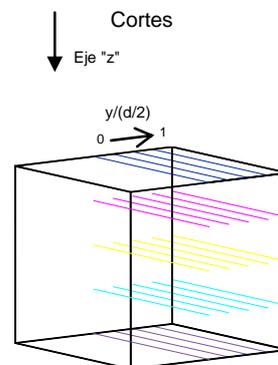
(c)



(d)

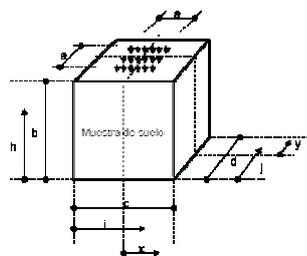


(e)



(f)

Carga aplicada con seis actuadores



Sistema de coordenadas

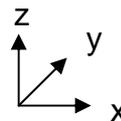


Figura A14.11

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Desplazamientos en el eje x. Grupo 09. Carga aplicada en el eje: $S_2=0.399\text{ MPa}$ (4.07 kg/cm^2)

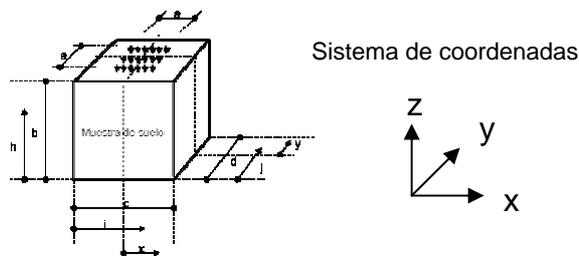
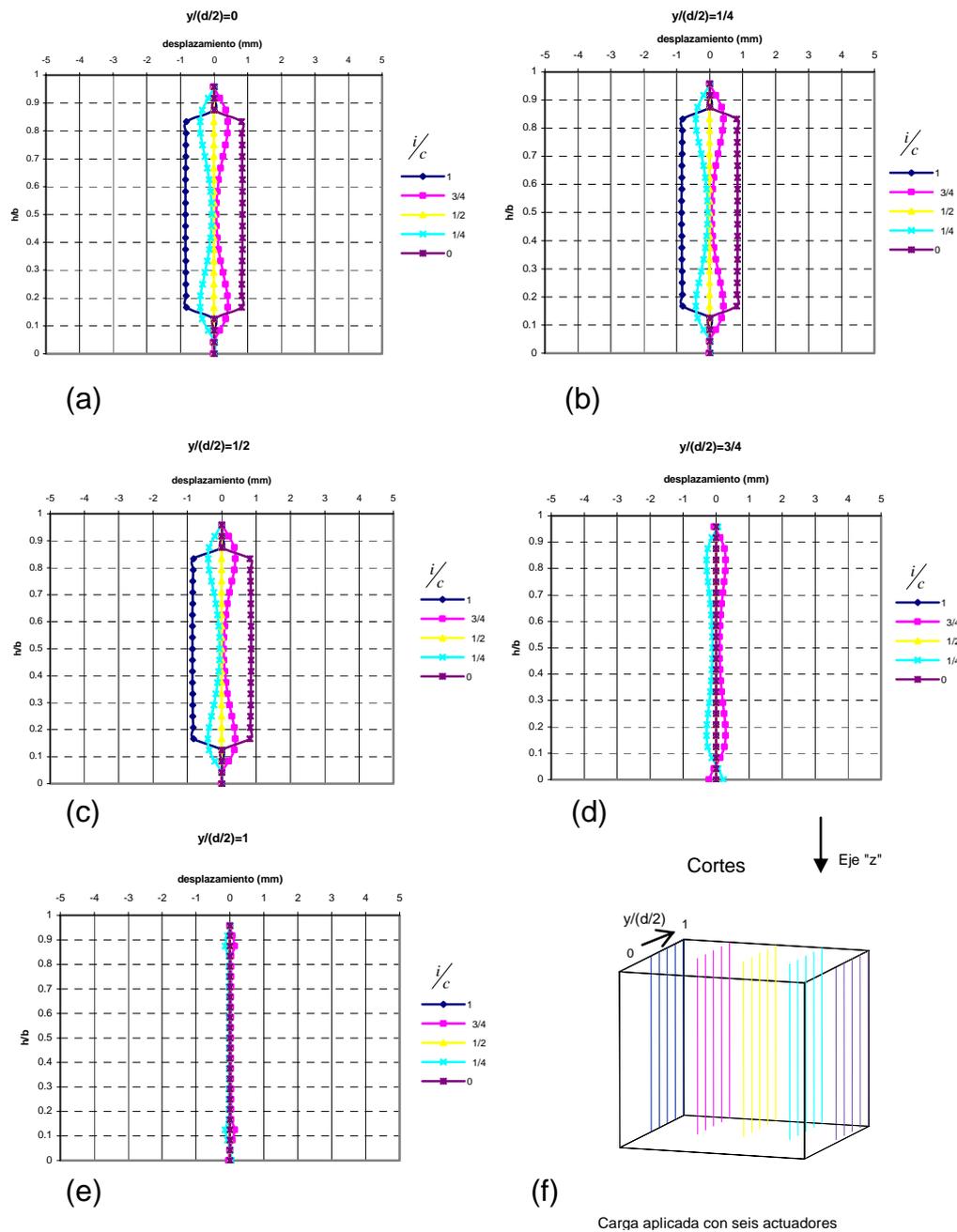


Figura A14.12

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Desplazamientos en el eje y. Grupo 09. Carga aplicada en el eje: $S3=0.225\text{ MPa}$ (2.29 kg/cm^2)

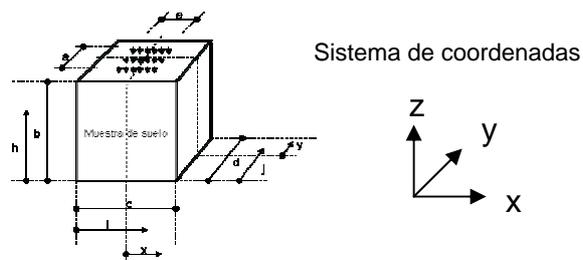
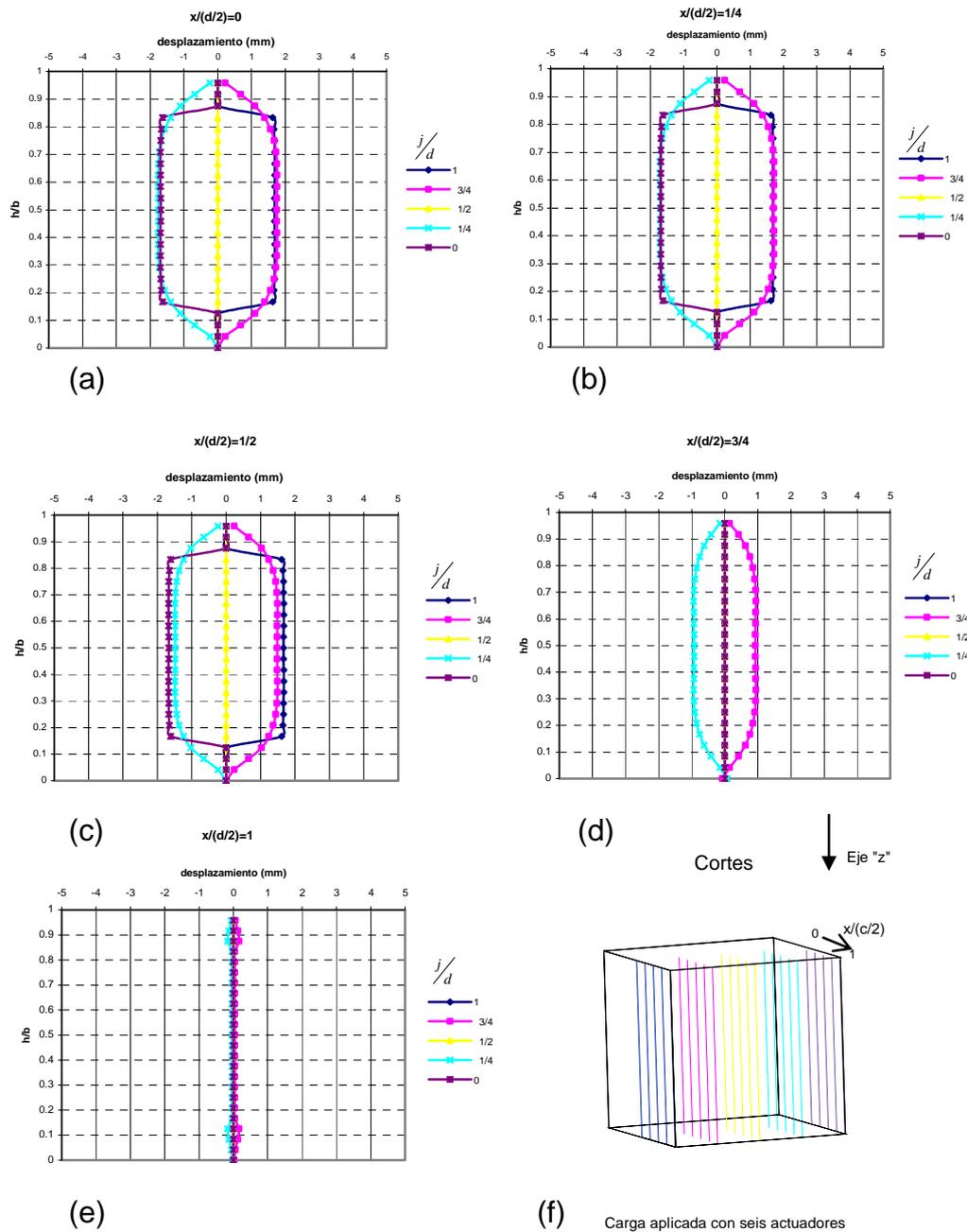


Figura A14.13

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Desplazamientos en el eje z. Grupo 11. Carga aplicada en el eje: $S1=0.437 \text{ MPa}$ (4.46 kg/cm^2)

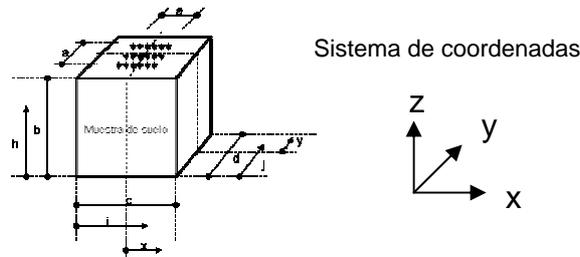
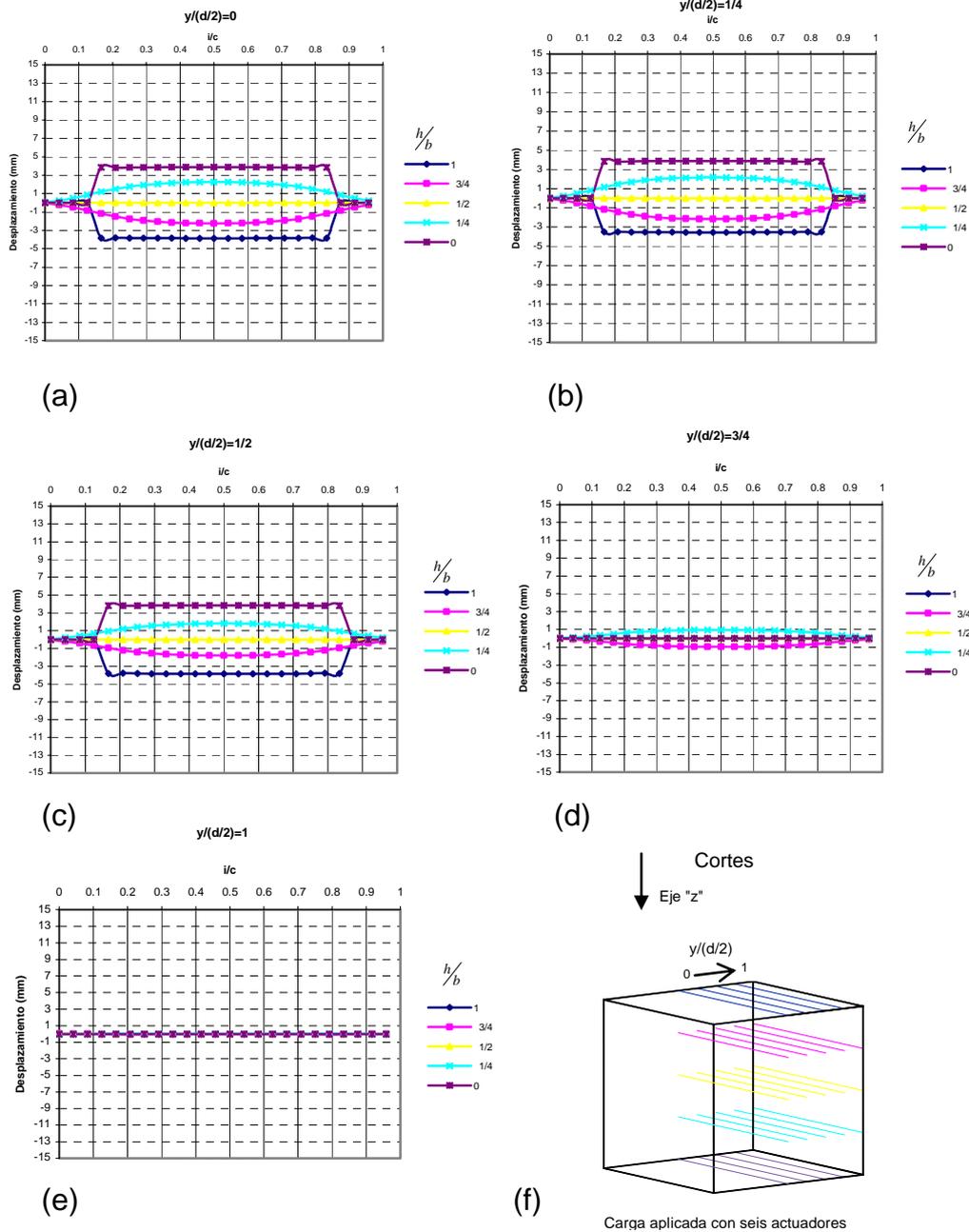


Figura A14.14

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Desplazamientos en el eje x. Grupo 11. Carga aplicada en el eje: $S_2=0.247\text{ MPa}$ (2.52 kg/cm^2)

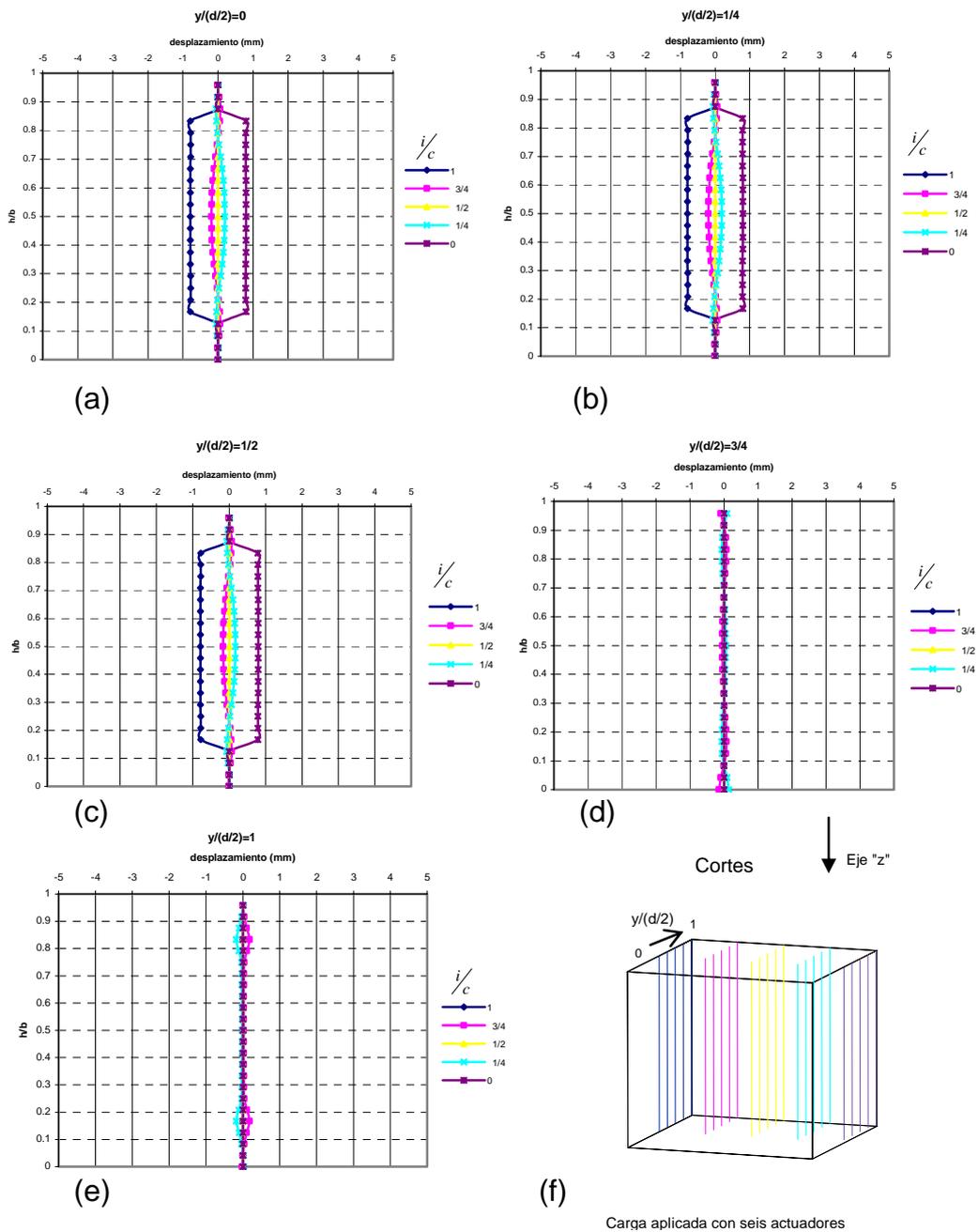


Figura A14.15

Análisis en FLAC 3D. Cubo: $a/c=2/3$

Desplazamientos en el eje y. Grupo 11. Carga aplicada en el eje: $S3= 0.081 \text{ MPa}$ (0.83 kg/cm^2)

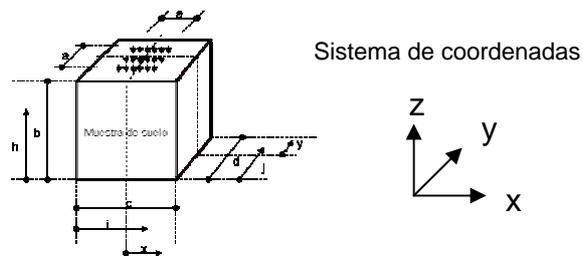
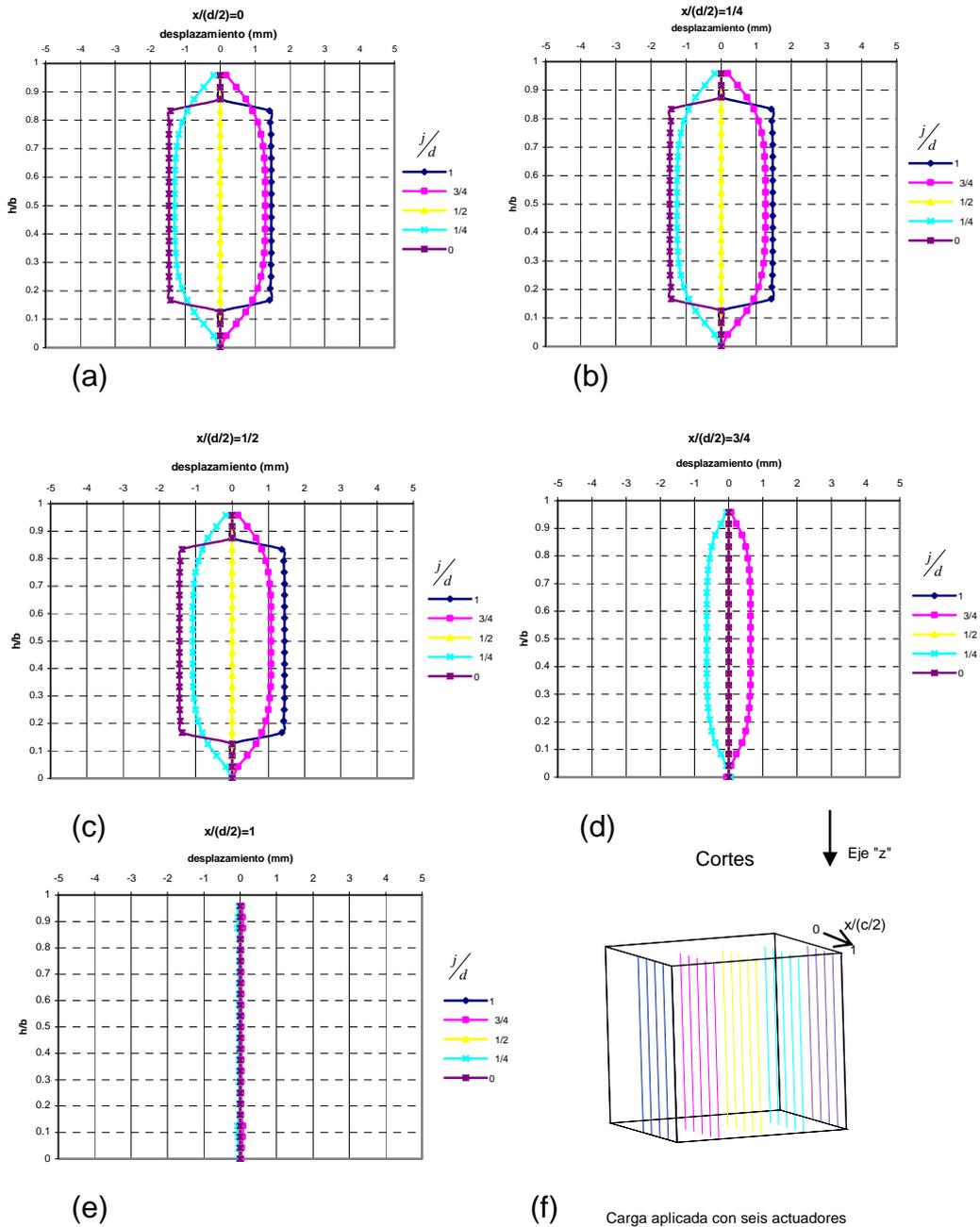


Figura A14.16

Los valores de los desplazamientos que se emplearon en la validación del modelo numérico, son los de los cortes $y/(d/2)=0$ y $x/(d/2)=0$ (parte "a" de las figuras mostradas), el desplazamiento de los actuadores normales al eje "z", se puede apreciar en $h/b=0$ y $h/b=1$, el de los normales al eje "x" en $i/c=0$ e $i/c=1$ y los del eje "y" en $j/d=0$ y $j/d=1$.

Se sumaron los desplazamientos de los dos actuadores, y se calculó la deformación unitaria en el eje, tomando en cuenta que las muestras analizadas miden 60 cm por lado.