



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

PROPIEDADES MECANICAS DE LA CANTERA UTILIZADA EN
CONSTRUCCIONES DE LA EPOCA COLONIAL

T E S I S

Que para obtener el titulo de :

INGENIERO CIVIL

presenta

JOSE LUIS LUNA ARROYO



MEXICO, D.F.

FEBRERO 1995

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-218/92

Señor:
LUNA ARROYO JOSE LUIS.
Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Abraham Roberto Sanchez Ramírez, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"PROPIEDADES MECANICAS DE LA CANTERA UTILIZADA EN CONSTRUCCIONES DE LA EPOCA COLONIAL"

- I.- INTRODUCCION
- II.- DESCRIPCION GENERAL DE LAS CARACTERISTICAS FISICAS DEL MATERIAL
- III.- CARACTERISTICAS ESFUERZO-DEFORMACION DE LA CANTERA
- IV.- RELACION VELOCIDAD DE PULSO-MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO DEL MATERIAL
- V.- ESTUDIO EXPLORATORIO PARA EVALUAR EL ESTADO DE DETERIORO EN EL MATERIAL MEDIANTE EMISION ACUSTICA
- VI.- RESULTADOS
- VII.- CONCLUSIONES

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 15 de enero 1993.
EL DIRECTOR.


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/RCR*nil

A mis padres:

"Por hacer que todo fuera propicio para llegar a la conclusión de ésta meta. Este trabajo constituye el resultado de todo su esfuerzo y sacrificios para lograr mi formación profesional".

Los quiero mucho.

A mi abuelita Irma:

"Todo el amor que me entregaste durante mis primeros 23 años ha sido y será fundamental en toda mi vida".

Te extraño.

A mis hermanos Julio y Blanca:

"Su cariño y compañía a través de los años me han dado la mayor motivación para seguir adelante".

A mis tíos Salvador, Jorge y Lupita:

"El amor y el cariño que me han dado desde que nací además del apoyo que siempre han dado a mis padres para lograr mi formación, hacen que ustedes sean de las personas más importantes en mi vida".

LISTA DE TABLAS

- | | |
|----------|--|
| Tabla 1 | Velocidades de carga para diferentes dimensiones de los cilindros. |
| Tabla 2 | Características físicas de los cilindros de las rocas dispersas. |
| Tabla 3 | Características físicas de los cilindros de la columna D-5. |
| Tabla 4 | Características físicas de los cilindros de la columna D-7. |
| Tabla 5 | Características físicas de los cilindros de la columna D-10. |
| Tabla 6 | Estadísticas de las características físicas. |
| Tabla 7 | Características mecánicas de los cilindros de las rocas dispersas. |
| Tabla 8 | Características mecánicas de los cilindros de la columna D-5. |
| Tabla 9 | Características mecánicas de los cilindros de la columna D-7. |
| Tabla 10 | Características mecánicas de los cilindros de la columna D-10. |
| Tabla 11 | Estadísticas de las características mecánicas. |
| Tabla 12 | Valores para determinar el módulo de elasticidad y la relación de Poisson en los cilindros de las rocas dispersas. |
| Tabla 13 | Valores para determinar el módulo de elasticidad y la relación de Poisson en los cilindros de la columna D-5. |
| Tabla 14 | Valores para determinar el módulo de elasticidad y la relación de Poisson en los cilindros de la columna D-7. |
| Tabla 15 | Valores para determinar el módulo de elasticidad y la relación de Poisson en los cilindros de la columna D-10. |
| Tabla 16 | Medidas de la velocidad de pulso en las columnas de la Catedral. |
| Tabla 17 | Estadísticas de la velocidad de pulso de las columnas de los ejes C y D. |

LISTA DE FIGURAS

- Fig 1 Planta arquitectónica de la Catedral Metropolitana.
- Fig 2 Marco de acero para apoyar el equipo de extracción de corazones.
- Fig 3 Extracción de corazones en la columna D-5.
- Fig 4 Corazones extraídos de la columna D-5.
- Fig 5 Prueba de Compresión en un espécimen de cantera.
- Fig 6 Compresión axial de un espécimen. Deformación unitaria longitudinal.
- Fig 7 Deformación unitaria transversal.
- Fig 8 Curvas esfuerzo-deformación axial, correspondientes a los cilindros de las rocas dispersas.
- Fig 9 Curvas esfuerzo-deformación axial, correspondientes a los cilindros de la columna D-5.
- Fig 10 Curvas esfuerzo-deformación axial, correspondientes a los cilindros de la columna D-7.
- Fig 11 Curvas esfuerzo-deformación axial, correspondientes a los cilindros de la columna D-10.
- Fig 12 Curvas esfuerzo-deformación transversal, correspondientes a los cilindros de las rocas dispersas.
- Fig 13 Curvas esfuerzo-deformación transversal, correspondientes a los cilindros de la columna D-5.
- Fig 14 Curvas esfuerzo-deformación transversal, correspondientes a los cilindros de la columna D-7.
- Fig 15 Curvas esfuerzo-deformación transversal, correspondientes a los cilindros de la columna D-10.
- Fig 16 Módulo de elasticidad mediante el criterio del módulo secante.
- Fig 17 Relación módulo de elasticidad contra resistencia a compresión en cilindros de rocas dispersas.

- Fig 18** Relación módulo de elasticidad contra resistencia a compresión en cilindros provenientes de columnas.
- Fig 19** Relación módulo de elasticidad contra resistencia a compresión en cilindros provenientes de columnas.
- Fig 20** Relación módulo de elasticidad contra resistencia a compresión en los dos tipos de cantera encontrados.
- Fig 21** Cilindro a compresión lineal diametral (tensión indirecta).
- Fig 22** Métodos de propagación de la velocidad de pulso.
- Fig 23** Relación resistencia a compresión contra velocidad de pulso.
- Fig 24** Relación módulo de elasticidad contra velocidad de pulso.
- Fig 25** Esquema de la cadena de emisión acústica.
- Fig 26** Curvas típicas esfuerzo-deformación.
- Fig 27** Cambio de material en las columnas.
- Fig 28** Relación resistencia a compresión contra peso volumétrico.
- Fig 29** Relación resistencia a compresión contra absorción.
- Fig 30** Relación resistencia a compresión contra peso específico.

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

A	área, absorción
A(%)	absorción en por ciento
a	acortamiento total
d	diámetro
E	módulo de elasticidad
e₁	deformación lateral 1
e₂	deformación lateral 2
e_t	deformación lateral total
f_{esb}	resistencia reducida por esbeltez
f_m	resistencia a compresión de la cantera
f_{máx}	resistencia máxima a compresión
f_t	resistencia a tensión
f_{tam}	resistencia reducida por tamaño
G	módulo de rigidez por cortante
L/D	relación de esbeltez
l	longitud de medición, largo
P	carga
P_{H2O}	peso del agua
P_n	peso neto
P_s	peso seco
P_{ss}	peso superficialmente seco
P_t	peso total
P.V.	peso volumétrico
S	esfuerzo, desviación estándar
S₁	esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal $\epsilon_1 = 0.00005$
S₂	esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última

$S_{m\acute{a}x}$	esfuerzo máximo correspondiente a la carga última
T	esfuerzo de tensión transversal
V	volumen
V_p	velocidad de pulso
δ	desplazamiento
δ_x	desplazamiento en el eje x
δ_y	desplazamiento en el eje y
ϵ_1	deformación unitaria igual a 0.00005
ϵ_2	deformación longitudinal producida por el esfuerzo S_2 .
ϵ_{t1}	deformación transversal a la mitad del espécimen producida por el esfuerzo S_1 .
ϵ_{t2}	deformación transversal a la mitad del espécimen producida por el esfuerzo S_2 .
ϵ_x	deformación unitaria en el eje x
ϵ_y	deformación unitaria en el eje y
ν	relación de Poisson

ÍNDICE

LISTA DE TABLAS.

LISTA DE FIGURAS.

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.

ÍNDICE.

1.	INTRODUCCIÓN.	1
	1.1 Objetivos.	3
2.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL MATERIAL.	4
	2.1 Extracción de corazones de cantera.	4
	2.2 Identificación de los materiales.	5
	2.3 Pruebas para determinar las características físicas.	6
3.	CARACTERÍSTICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE LA CANTERA.	9
	3.1 Resistencia a compresión, módulo de elasticidad y relación de Poisson.	9
	3.1.1 Descripción del equipo.	9
	3.1.2 Procedimiento.	11
	3.1.3 Curvas esfuerzo-deformación.	12
	3.1.4 Módulo de elasticidad y relación de Poisson.	12
	3.2 Resistencia a tensión (prueba brasileña).	14
	3.2.1 Procedimiento.	15

4.	RELACIÓN VELOCIDAD DE PULSO-MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL MATERIAL.	17
	4.1 Aspectos generales.	17
	4.2 Descripción del método utilizado para las pruebas.	17
	4.3 Estimación del módulo de elasticidad.	18
5.	ESTUDIO EXPLORATORIO PARA EVALUAR EL ESTADO DE DETERIORO EN EL MATERIAL MEDIANTE EMISIÓN ACÚSTICA. . .	20
	5.1 Aspectos generales.	20
	5.2 Descripción del método.	22
	5.3 Comentarios.	22
6.	RESULTADOS.	23
	6.1 Identificación Petrográfica..	23
	6.2 Características físicas.	24
	6.2.1 Peso específico.	24
	6.2.2 Absorción.	25
	6.2.3 Peso volumétrico.	25
	6.3 Características mecánicas.	25
	6.3.1 Curvas esfuerzo-deformación.	25
	6.3.2 Resistencia a compresión.	26
	6.3.3 Deformación unitaria asociada al esfuerzo máximo..	27
	6.3.4 Módulo de elasticidad, relación de Poisson y módulo de rigidez por cortante..	27
	6.3.5 Resistencia a tensión.	28
	6.4 Velocidad de pulso.	28
	6.5 Correlaciones.	29
	6.5.1 Correlación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión.	29

6.5.2	Correlación entre la resistencia a compresión y el peso volumétrico.	32
6.5.3	Correlación entre la resistencia a compresión y la absorción.	32
6.5.4	Correlación entre la resistencia a compresión y el peso específico.	33
6.5.5	Correlación entre la resistencia a compresión y la velocidad de pulso.	33
6.5.6	Correlación entre el módulo de elasticidad y la velocidad de pulso.	33
7.	CONCLUSIONES.	34
	AGRADECIMIENTOS.	37
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	38
	TABLAS.	41
	FIGURAS.	57

1. INTRODUCCIÓN.

Las propiedades físicas y mecánicas de los materiales de construcción son indispensables para desarrollar, tanto el diseño estructural de una obra nueva como la revisión de una ya existente. Estas propiedades se han estudiado con bastante detalle en materiales tales como concreto, acero y mampostería, comunes en la construcción de estructuras modernas; sin embargo, en materiales de edificaciones de la época colonial, el conocimiento de sus propiedades físicas y mecánicas es muy limitado.

En la Ciudad de México, existe una gran cantidad de obras construidas durante la época de la colonia. En ellas el tipo de construcción que predomina es la mampostería de tezontle unido con mortero de cal y arena, empleada comúnmente en muros y bóvedas. Es interesante destacar que éste tipo de mampostería fue empleada por los aztecas en la construcción de sus obras.

También predomina el uso de la cantera en la construcción de columnas, bóvedas, arcos, recubrimientos de muros, imágenes y elementos decorativos. Este material fue de uso común entre los aztecas para elaborar elementos decorativos e imágenes; la mampostería de adobe también se usó en construcción de muros, la madera jugó un papel importante en la construcción de sistemas de piso y el carbón vegetal resultó de gran utilidad para construir rellenos de sistemas de piso.

Actualmente, la Catedral y el Sagrario Metropolitanos se encuentran sometidos a un complejo proceso de rehabilitación para preservar su integridad; como apoyo de dicho proyecto, el Instituto de Ingeniería, I de I, de la UNAM realiza una serie de estudios estructurales. Dentro de estos estudios se incluye el conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de la cantera y de la mampostería, con las que están contruidos los templos. Respecto a la mampostería se han determinado sus propiedades mecánicas (Ref 1). En éste trabajo se estudian exclusivamente las propiedades físicas y mecánicas de la cantera. Se describen las diferentes pruebas realizadas para determinar esas características, así como los resultados y conclusiones obtenidas en todas y cada una de las pruebas realizadas.

Para ello se ensayaron 72 especímenes de cantera y entre las características físicas de los cilindros que se determinaron en éste trabajo destacan: peso específico, absorción y peso volumétrico; en lo que se refiere a las características mecánicas, se obtuvo: resistencia a compresión, resistencia a tensión, módulo de elasticidad, relación de Poisson y módulo de rigidez por cortante. Los procedimientos realizados para la obtención de las características físicas y mecánicas, son los recomendados por la ASTM (American Society of Testing Materials).

Se incluyen además ensayos de velocidad de pulso y los resultados de una búsqueda bibliográfica sobre la técnica de emisión acústica.

A partir de los resultados obtenidos se establecieron diferentes correlaciones entre las características físicas y mecánicas, con el objeto de obtener valores de las características mecánicas asociadas de las características físicas, ya que éstas tienen un procedimiento de obtención más sencillo y en algunos casos no destructivo.

1.1 Objetivos.

Los objetivos que se formulan para el desarrollo de este trabajo son:

Efectuar un muestreo de la cantera empleada en la construcción de la Catedral.

Realizar una investigación petrográfica sobre la cantera.

Determinar las propiedades físicas de la cantera.

Realizar un estudio de velocidad de pulso para definir la relación que existe entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión con dicha velocidad.

Determinar las propiedades mecánicas.

Establecer correlaciones entre las características físicas y mecánicas.

Revisar referencias bibliográficas sobre la técnica de emisión acústica y su aplicación.

Es importante destacar que la información que se obtuvo en éste trabajo ha sido de gran utilidad para el caso de la Catedral Metropolitana, y también podría ser utilizada como apoyo en otras revisiones de tipo estructural en edificios de la época colonial que utilicen la cantera en sus elementos de soporte.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL MATERIAL.

2.1 Extracción de corazones de cantera.

Las columnas en las que se extrajeron los corazones fueron las denominadas con la nomenclatura D-5, D-7 y D-10, de acuerdo con la intersección de los ejes del plano de la Fig 1. La extracción de los corazones se hizo de lado a lado de las columnas y en diferentes sillares de las mismas: 3 extracciones en la columna D-5 ,sillares 5, 11 y 20; 2 extracciones en la columna D-7, sillares 6 y 21; y 2 extracciones en la columna D-10, sillares 11 y 20, en donde el número del sillar se cuenta a partir del plinto.

La extracción de núcleos de cantera, de las columnas de la Catedral, resultó una actividad delicada, ya que fue necesario tener especial cuidado con las columnas para no producirles daños estructurales ni estéticos. Para ello se

diseño un marco de acero (Fig 2) que se afianza firmemente a las columnas sin maltratarlas y sirve de apoyo a un equipo de extracción de corazones. Además, el agua que utilizó el equipo para la extracción se canalizó a dispositivos para evitar que los escurrimientos de agua con material ensuciaran la superficie de las columnas. En la Fig 3 aparecen algunas vistas sobre el proceso de extracción de corazones.

Es importante hacer notar que los núcleos no resultaron de un mismo material, en los extremos de los corazones extraídos el material es de cantera y en la zona central de las muestras el material es de mampostería de tezontle, un caso típico aparece en la Fig 4. En todos los casos se presentó la misma situación, esta característica indica que las columnas tienen un núcleo central de mampostería de tezontle unido con mortero de cal y arena, algunos canteros definen a éste núcleo como "caja".

Los corazones fueron cortados en secciones de 7 x 14 cm, para poder realizar las pruebas físicas y mecánicas.

También se extrajeron núcleos cilíndricos de las rocas dispersas, utilizando el mismo equipo; en éste caso se obtuvo un total de 24 piezas; 16 de 15 x 30 cm y 8 de 10 x 20 cm. Los especímenes de 15 x 30 cm tienen tamaño estándar para el desarrollo de la mayoría de las pruebas, los resultados que se obtuvieron en éstos especímenes permitió tener una referencia para los cilindros de otros tamaños.

2.2 Identificación de los materiales.

Mediante un estudio petrográfico (Ref 2) se determinaron las características geológicas de la cantera en estudio y el posible banco de extracción.

2.3 Pruebas para determinar las características físicas.

Las características físicas de los materiales de construcción brindan un apoyo muy importante en el diseño estructural, ya que a través de ellas se pueden inferir características fundamentales de cualquier estructura, como pudiera ser su peso total, la cantidad de agua que puede absorber cierto material, etc.

Las características físicas obtenidas fueron las siguientes:

Peso específico. Con frecuencia, en nuestro medio se acostumbra llamar densidad a lo que en la literatura técnica se conoce como peso específico en masa o peso específico aparente, en condición saturada y superficialmente seca. La densidad de un material se define como la masa de un volumen unitario del material, a una temperatura especificada donde, si el material es un sólido, el volumen debe de ser de la porción impermeable. La densidad tiene unidades de masa entre volumen. El peso específico de un material se define como la relación entre la masa de un volumen unitario del material y la masa de igual volumen de agua destilada, libre de aire y a una temperatura definida, en el caso de un material sólido, el volumen debe ser de la porción impermeable. Si en vez de las masas, se opera con los pesos de los volúmenes unitarios, a esta relación se le llama peso específico aparente. Si, además, en este último caso, el volumen unitario del material incluye la porción permeable, la relación de pesos recibe el nombre de peso específico en masa. Por tratarse de una relación de conceptos con unidades iguales, el peso específico es adimensional.

Absorción. Es la capacidad de los diferentes materiales para absorber agua.

Peso volumétrico. Relación entre el peso de un cuerpo sólido y su volumen.

Para determinar las características físicas mencionadas en la cantera se siguió el siguiente procedimiento (Ref 3):

1) Se mantuvieron sumergidos los cilindros en agua por 48 horas para garantizar que sus huecos fueran cubiertos por el agua.

2) Transcurridas las 48 horas bajo el agua, los especímenes se pesaron estando aún sumergidos con una balanza hidrostática, obteniéndose un peso total P_t ; posteriormente se determinó el peso sumergido de la muestra saturada P_{sm} , restándole al peso total, la tara de la canastilla que sostiene al espécimen mientras permanece sumergido.

$$P_{sm} = P_t - tara.$$

3) Se sacaron los cilindros del agua, se secaron superficialmente y se pesaron para obtener el peso superficialmente seco P_{ss} .

4) Al restarle al peso superficialmente seco el peso sumergido, se obtienen el peso del volumen de agua desalojada, de donde se deriva el volumen del cilindro.

$$P_{H_2O} = P_{ss} - P_{sm}$$

5) Dividiendo el peso superficialmente seco entre la resta del peso superficialmente seco menos el peso sumergido, obtenemos el peso específico en masa (condición saturado y superficialmente seco).

$$P_s = \frac{P_{ss}}{P_{ss} - P_{sm}}$$

6) Se colocan los cilindros en un horno donde permanecen 24 horas a una temperatura constante de 100°C, para que queden totalmente secos. Después, se pesan para obtener el peso seco P_s .

7) Para determinar la absorción, en por ciento, la resta entre el peso superficialmente seco y el peso seco se divide entre el peso seco.

$$A(\%) = \frac{P_{ss} - P_s}{P_s} \times 100$$

8) Finalmente para obtener el peso volumétrico se divide el peso seco entre el volumen.

$$PV = \frac{P_s}{V}$$

En las tablas 2 a 5 se muestran cada una de las características físicas determinadas.

3. CARACTERÍSTICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE LA CANTERA.

3.1 Resistencia a compresión, módulo de elasticidad y relación de Poisson.

El conocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales con los que está construida una estructura es indispensable para realizar una revisión racional de su capacidad. Los métodos y el equipo utilizados para determinar estas propiedades se describen a continuación.

3.1.1 Descripción del equipo.

Máquina universal. Todos los ensayos fueron realizados en la máquina universal perteneciente al I de I, se trata de una máquina hidráulica con capacidad de 230 t que satisface los requerimientos establecidos en la norma ASTM C 39-86 (Ref 4).

Compresómetro. Este equipo se utiliza para determinar el módulo de elasticidad en especímenes de 15 x 30 cm y de 10 x 20 cm de acuerdo con la norma ASTM C 469-65 (Ref 5); consta de dos horquillas, una de ellas está rígidamente ligada al espécimen, y la otra a dos puntos diametralmente opuestos, para que pueda rotar libremente. En un punto de la horquilla que rota, a la mitad de los dos puntos de soporte, una barra pivote se utiliza para mantener una distancia constante entre las horquillas, así que, en el punto opuesto de la circunferencia, el cambio de la distancia entre las horquillas es igual a la suma de las deformaciones de dos ejes diametralmente opuestos (Fig 5).

Extensómetro. Se utiliza en los mismos especímenes para medir la deformación transversal, con él se determina la relación de Poisson. Para ello se utiliza una combinación de compresómetro y extensómetro. El extensómetro contiene una tercera horquilla, que consta de dos segmentos iguales, se localiza a la mitad de las dos horquillas del compresómetro y se une al espécimen en dos puntos diametralmente opuestos. A la mitad de estos dos puntos una barra pivote corta, adyacente a la barra pivote larga, se utiliza para mantener constante la distancia entre la parte baja y la horquilla de la mitad. La horquilla media cuenta con una bisagra para permitir la rotación a los dos segmentos de la horquilla en el plano horizontal. En el punto opuesto sobre la circunferencia, los dos segmentos se conectan a un extensómetro (Ref 5) (Fig 5).

Para medir la deformación transversal en los cilindros de 7 x 14 cm, no se utilizó el dispositivo descrito anteriormente, sino que se utilizaron dos extensómetros diametralmente opuestos.

Equipo de adquisición de datos. Las deformaciones medidas por el compresómetro y el extensómetro, fueron transmitidas a un equipo de adquisición

de datos (TML Data Logger, modelo TDS-302), que registra e imprime los valores de las cargas y de las deformaciones a intervalos constantes de tiempo (Fig 5).

3.1.2. Procedimiento.

En total, se probaron 72 cilindros: 48 de ellos se obtuvieron de los núcleos de las columnas de la Catedral, y tenían una dimensión de 7 x 14 cm. El número restante de especímenes fue obtenido de las rocas dispersas; 8 cilindros de 10 x 20 cm y 16 de 15 x 30 cm.

El proceso de las pruebas se llevó a cabo de la manera siguiente:

- 1) Se diferenciaron los cilindros de acuerdo al tipo de material y al tamaño de cada uno de ellos.
- 2) Se probaron algunos cilindros para determinar la carga máxima dependiendo de cada material.
- 3) Se aplicaron 5 precargas a los siguientes cilindros, la magnitud de ellas correspondían al 30% de la carga máxima obtenida, de acuerdo con el inciso anterior.
- 4) Se instrumentaron y posteriormente se les aplicó la carga a una velocidad que depende de sus dimensiones (Tabla 1).
- 5) Se registraron los valores de las deformaciones y de las cargas a cada tiempo determinado hasta llegar a la falla.

Para el caso de cilindros de 10 x 20 cm y 7 x 14 cm se hizo una corrección en la resistencia máxima obtenida correspondiente al tamaño de los especímenes, y en todos los cilindros se verificó también la esbeltez, corrigiéndose la resistencia máxima de acuerdo con las curvas que aparecen en la Ref 6.

3.1.3. Curvas esfuerzo-deformación.

Las curvas esfuerzo-deformación se obtuvieron del ensaye de los cilindros sujetos a carga axial repartida uniformemente sobre el área total, A , de la sección transversal del cilindro (Fig 6).

El valor de la deformación unitaria, ϵ_y , es la relación entre el acortamiento axial, δ_y , y la longitud de medición, l , (Fig 6 y Figs 8 a 11), esto es:

$$\epsilon_y = \frac{\delta_y}{l}$$

De la misma manera, la deformación transversal, ϵ_x , se define como la relación entre el ensanchamiento total a la mitad del espécimen, δ_x , y el diámetro original de éste, d (Fig 7 y Figs 12 a 15), esto es:

$$\epsilon_x = \frac{\delta_x}{d}$$

3.1.4. Módulo de elasticidad y relación de Poisson.

Módulo de elasticidad. Del estudio de las curvas esfuerzo-deformación obtenidas, resulta obvio que el concepto convencional del módulo de elasticidad no tiene sentido en este material, ya que como en el caso de las curvas esfuerzo-deformación del concreto, éstas no presentan una relación totalmente lineal. Para fines prácticos el módulo de elasticidad se puede definir a partir del módulo tangente inicial ó tangente a un punto determinado de la curva esfuerzo-

deformación, o bien a partir del módulo secante entre dos puntos de la misma curva (Fig 16).

De acuerdo con la norma ASTM C 469-65 (Ref 5), para determinar el módulo de elasticidad se usó el criterio del módulo secante, haciendo pasar una recta por el 40% del esfuerzo máximo y por la deformación unitaria correspondiente a 50 millonésimas. De esta manera, el módulo de elasticidad, E, quedó definido como:

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - 0.000050)}$$

donde:

E = Módulo de Elasticidad, kg/cm².

S₂ = Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última, kg/cm².

S₁ = Esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal,

$\epsilon_1 = 0.00005$, kg/cm².

ϵ_2 = Deformación longitudinal producida por el esfuerzo S₂.

Relación de Poisson. Es la relación que existe entre la deformación lateral y la deformación axial que se miden durante una prueba de compresión axial. Para obtener la relación de Poisson, ν , de acuerdo con la ASTM (Ref 5) se relacionan las deformaciones transversales medidas a la mitad del espécimen, producidas por los esfuerzos al 40% de la carga última y el correspondiente a una deformación unitaria de 50 millonésimas, con las respectivas deformaciones transversales; es decir,

$$\nu = \frac{(\epsilon_{t2} - \epsilon_{t1})}{(\epsilon_2 - 0.000050)}$$

donde:

ν = Relación de Poisson.

ϵ_{t2} = Deformación transversal a la mitad del espécimen producida por el esfuerzo S_2 .

ϵ_{t1} = Deformación transversal a la mitad del espécimen producida por el esfuerzo S_1 .

Módulo de rigidez por cortante. Una vez conocidos los valores del módulo de elasticidad y la relación de Poisson se determinó el módulo de rigidez por cortante, G, empleando la expresión:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión. Conviene relacionar el módulo de elasticidad con la resistencia a compresión del material, y expresarlo en función de la raíz cuadrada de ésta última, dado que con una curva de esta naturaleza se alcanzó una correlación satisfactoria, teniendo así una manera más práctica para obtener el módulo de elasticidad a partir de la resistencia a compresión. De acuerdo con la Ref 7 la ecuación de cada una de las curvas se ajusta con bastante aproximación a los puntos obtenidos (Figs 17 a 20).

3.2 Resistencia a tensión (prueba brasileña).

En esencia éste método consiste en someter un cilindro a compresión lineal diametral. La carga se aplica a través de un material relativamente suave. Si el

material ensayado fuera perfectamente elástico, se originarían esfuerzos de tensión uniformemente distribuidos en todo el plano diametral de carga (Fig 21).

3.2.1. Procedimiento.

El espécimen utilizado para esta prueba fue el marcado con la nomenclatura M3-5 que corresponde a los cilindros extraídos de rocas dispersas. Con el fin de tener más datos de las pruebas de tensión se tiene planeado ensayar más cilindros, pero esto será una vez que se encuentre material disponible, dado que todos los demás cilindros fueron utilizados en pruebas de compresión. El procedimiento para realizar la prueba se basa en la norma ASTM C 496-90 (Ref 8), y es el siguiente:

- 1) Se dibujan líneas diametrales en cada extremo del espécimen teniendo la seguridad que estas dos líneas se encuentran sobre el mismo plano axial. Se unen las líneas diametrales dibujando un par de líneas longitudinales en el cilindro.
- 2) Se determina el diámetro del espécimen con una aproximación de 0.25 mm tomando el promedio de 3 diámetros medidos, dos de ellos en las caras superior e inferior del cilindro y el otro a la mitad de éste. Se mide el largo del espécimen con una aproximación de 2.5 mm, promediando al menos dos medidas longitudinales tomadas en las líneas marcadas.
- 3) Se coloca el material suave sobre las líneas longitudinales, en este caso se utilizaron dos tablas de triplay de 12 mm de espesor.
- 4) Con el objeto de distribuir la carga a través de toda la longitud del cilindro, se coloca una barra de acero sobre la tabla de triplay superior, finalmente se aplica la carga a una velocidad de 2 ton/min.

El esfuerzo de tensión transversal en el espécimen se calcula a partir de la expresión:

$$T = \frac{2P}{\pi ld}$$

donde:

T = Esfuerzo de tensión transversal, kg/cm².

P = Carga máxima aplicada, kg.

l = largo, cm.

d = diámetro, cm.

4. RELACIÓN VELOCIDAD DE PULSO-MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL MATERIAL.

4.1 Aspectos generales.

Como complemento al programa de pruebas, se determinó la velocidad de pulso en los materiales para establecer una correlación entre ésta y el módulo de elasticidad. Esta velocidad se determinó a través de una prueba ultrasónica que ha llegado a ser un método no destructivo bien establecido para la inspección de muchos tipos de materiales. Este método se utilizó tanto en los cilindros extraídos como en los diferentes elementos estructurales y no estructurales de la Catedral.

4.2 Descripción del método utilizado para las pruebas.

Se utiliza un aparato que genera pulsos acústicos y mide con gran precisión el tiempo, t , en el que éstos se transmiten a través del material. La distancia, d ,

recorrida por el pulso a través del material también debe ser medida con precisión para determinar finalmente su velocidad, la cual se define como:

$$V_p = \frac{d}{t}$$

El equipo utilizado para realizar la prueba se denomina V-Meter, usa dos transductores; un transmisor de energía ultrasónica y un receptor, que se colocan sobre el material. A través de circuitos electrónicos se mide el tiempo que tarda la señal en pasar por el material de un transductor a otro.

Tanto tiempos como distancias se deben medir con una precisión del 1%. La Fig 22 muestra la manera en que se pueden ubicar los transductores sobre la superficie del espécimen de prueba; la transmisión puede ser directa, indirecta o semidirecta.

La transmisión directa es la más representativa porque los pulsos se propagan con mayor intensidad en la dirección normal de la cara del transductor. En la transmisión indirecta se colocan los transductores sobre la misma cara del material. En la transmisión semidirecta los sensores se colocan a 90°.

En este trabajo se aplicaron las mediciones directa e indirecta, la primera se realizó en los cilindros extraídos de las columnas y la segunda directamente en el sitio, sobre las columnas de la estructura de la Catedral.

4.3 Estimación del módulo de elasticidad.

La estimación del módulo de elasticidad se determina a través de una curva que proporciona el fabricante del equipo (Ref 9), que está basada en un estudio

exhaustivo de pruebas que correlacionan la velocidad de pulso con el módulo de elasticidad del material. En el caso de la cantera se obtuvieron los puntos de correlación entre la velocidad de pulso y el módulo de elasticidad, y se verificó que éstos estuvieran apreciablemente cercanos a la curva de correlación (Fig 24).

También se estableció una relación entre la velocidad de pulso y la resistencia a compresión siguiendo los criterios utilizados en la Ref 10 (Fig 23).

5. ESTUDIO EXPLORATORIO PARA EVALUAR EL ESTADO DE DETERIORO EN EL MATERIAL MEDIANTE EMISIÓN ACÚSTICA.

Se realizó una búsqueda de bibliografía sobre la técnica de emisión acústica para explorar la posibilidad de aplicarla en la evaluación del deterioro de los materiales utilizados en las construcciones coloniales, los principales artículos consultados aparecen en las referencias 11, 12 y 13.

A continuación se presenta un resumen sobre las bases de ésta prueba, sobre las principales características de la misma y sobre sus aplicaciones.

5.1 Aspectos generales.

La emisión acústica es una técnica no destructiva cuyo principio de operación consiste en captar una serie de señales acústicas a través de fisuras o grietas presentes en elementos estructurales. En base al análisis de esas

señales se realiza un estudio estadístico para determinar si esa fisura o grieta puede llegar a causar daños mayores en el material.

La emisión acústica es un sistema de detección y control que permite vigilar la evolución de fisuras en sitios geológicos y grandes estructuras, dando una indicación del desarrollo de éstas en un material frágil como roca o concreto. En esos materiales los defectos se forman bajo el efecto de diversos factores: acción mecánica, física y química. Cuando las fisuras en curso de desarrollo no son detectadas oportunamente, se puede llegar a tener una ruptura frágil del material bajo esfuerzos superiores a su resistencia. Para evitar esta situación se ha desarrollado ésta técnica, capaz de detectar el desarrollo de tales fisuras, y de pronosticar un riesgo de ruptura de forma oportuna.

Una ventaja suplementaria del control de la evolución de las fisuras en una estructura con la ayuda de la técnica acústica, reside en el hecho que ésta permite analizar los diferentes tipos de mecanismos de la fisuración y prevé la ruptura.

El principio en el que se basa la técnica acústica es el siguiente, cuando se aplica una carga sobre las muestras de roca o de concreto, se provoca una deformación que desencadena ondas llamadas "ondas acústicas". La formación de fisuras en el material y en particular de aquellas que resultan de la fatiga, se ha constatado que se desarrollan por incrementos discontinuos. En cada progresión de fisura, una cierta cantidad de energía acústica es liberada y se propaga a través del material. El análisis de los espectros de frecuencias revelan que las emisiones en bajas frecuencias están ligadas a la separación granular para niveles de carga débiles. Cuando los niveles de carga son más elevados, las emisiones se enriquecen en altas frecuencias características de una propagación de fisura.

5.2 Descripción del método.

El seguimiento de la cadena de medición aparece en la Fig 25 y se presenta de la manera siguiente: primero se adhiere un receptor sobre el material y se enlaza a un preamplificador de las señales acústicas, después las señales se amplifican y se filtran, la información que sobrepasa un límite prestablecido es colocada en intervalos de tiempo regulares por un contador y transcrita por medio de un registrador gráfico. A la salida de la etapa de amplificación, otra rama, de la cadena de medición, se dirige hacia un grabador magnético ligado a un osciloscopio, con el objeto de tener una grabación magnética y poder interpretar las señales en frecuencias y amplitudes (Ref 11).

5.3 Comentarios.

Una alternativa de control de grietas en edificios históricos pudiera ser la técnica acústica, que a pesar de ser una técnica prometedora no ha sido empleada con mucha frecuencia hasta ahora en la rehabilitación de este tipo de edificios, en todo el mundo; actualmente está siendo empleada para la torre inclinada de Pisa, pero como se mencionó anteriormente el mayor uso de esta técnica es en sitios geológicos y en grandes obras como es el caso de las presas.

Dada la constante vigilancia y extremo cuidado que merece la aplicación correcta de esta técnica, y además de la gran cantidad de tiempo para la obtención de resultados, en este capítulo no se presentan ni pruebas, ni obviamente resultados, sino solamente una introducción a la técnica acústica y una alternativa más para la diagnosis estructural y rehabilitación de edificios históricos.

6. RESULTADOS.

Los resultados obtenidos en cada una de las pruebas que se realizaron para determinar las características de dos tipos de cantera, se presentan a continuación:

6.1 Identificación Petrográfica.

Esta identificación se realizó exclusivamente en los especímenes extraídos de las columnas. Aunque se detectaron propiedades físicas y mecánicas distintas entre la cantera utilizada en los extremos superiores de las columnas respecto a los inferiores, se encontró que la clasificación y el origen del material es el mismo.

Esto es:

Clasificación: Toba Vítreo-Lítica Andesítica.

Origen: Volcánica Piroclástica.

Esto hace suponer que el material procede de una misma fuente próxima a la Ciudad de México, existen dos sitios donde se encuentran rocas de éstas características;

- a) Las Minas de Santa Fe en la zona poniente del Distrito Federal. En ellas se explotaron este tipo de productos durante varios años, y actualmente están por cerrarse.
- b) La zona de minas al noreste del área metropolitana. Es una franja que va desde Los Reyes hasta Texcoco, y actualmente se explota para la producción de grava y arena, para el consumo de las obras que se realizan en el D.F.

6.2 Características físicas.

6.2.1 Peso específico.

La cantera de los sillares superiores de las columnas y de los especímenes más porosos obtenidos de rocas dispersas tienen un peso específico que varía entre 1.940 y 2.000. El material proveniente de los sillares inferiores y de las rocas dispersas menos porosas, presenta promedios entre 2.058 y 2.144. La diferencia del peso específico entre un material y otro es aproximadamente del 6 por ciento.

En las tablas 2 a 5 se muestran los resultados obtenidos en los especímenes extraídos de las columnas y de las rocas dispersas, y en la tabla 6 se muestran los resultados estadísticos de todos los cilindros, en ella se aprecia que los coeficientes de variación son reducidos, lo cual indica una buena homogeneidad del material.

6.2.2 Absorción.

En los sillares superiores de las columnas y en las rocas dispersas porosas, la absorción varía en promedio entre 15.60 y 17.85 por ciento.

En el material del primer tramo del fuste de las columnas y el de las rocas dispersas menos porosas, la absorción varía en promedio desde 2.84 hasta 4.41 por ciento lo que implica una diferencia notable con el material anterior.

Los resultados de la absorción medida en los cilindros ensayados aparecen en las tablas 2 a 5.

6.2.3 Peso volumétrico.

En los cilindros provenientes de sillares superiores y de rocas dispersas porosas, el promedio del peso volumétrico varía entre 1631 kg/m³ y 1774 kg/m³, y en el caso de los cilindros de sillares inferiores y rocas menos porosas los promedios fluctuaron de 1955 kg/m³ a 2096 kg/m³.

En las tablas 2 a 6 se pueden observar los resultados finales así como las estadísticas del peso volumétrico.

6.3 Características mecánicas.

6.3.1 Curvas esfuerzo - deformación.

Estas curvas se obtuvieron con base en las mediciones de la deformación axial y transversal en función del esfuerzo inducido en el material; la deformación axial se midió en dos ejes diametralmente opuestos, la deformación se determinó mediante el promedio de las deformaciones de los dos puntos. Para el caso de la deformación transversal se tuvieron dos tipos de mediciones, el primero en

cilindros de 7x14 cm en los que la deformación fue medida directamente a través de dos extensómetros diametralmente opuestos, en este caso se suman las deformaciones registradas por cada uno de ellos. En el segundo caso los cilindros eran de 10x20 cm y 15x30 cm, y la medición se realizó con un equipo completo de compresómetro y extensómetro, en el cual se registraba una sola medición de la deformación transversal.

Las curvas se presentan en las figuras 8 a 15 distribuidas por sillares en el caso de las columnas y por tipo de cantera en el caso de rocas dispersas.

A través de las curvas esfuerzo deformación se determinan el módulo de elasticidad, la relación de Poisson y las deformaciones unitarias asociadas a los esfuerzos máximos.

6.3.2 Resistencia a compresión.

En las tablas 7 a 10 se muestran los resultados de las pruebas de los cilindros sometidos a compresión, ahí mismo se presentan las correcciones hechas por esbeltez y tamaño de los cilindros.

En la cantera de las rocas dispersas se distinguen dos calidades por su resistencia a compresión. Las rocas dispersas de menor calidad tienen una resistencia promedio de 105 kg/cm² y la de mayor calidad alcanza un promedio de 394 kg/cm².

En el caso de la cantera de las columnas sucede algo similar; la de mayor calidad correspondiente a los sillares del primer tramo del fuste tiene una resistencia promedio que varía entre 252 kg/cm² y 327 kg/cm². La de menor calidad se localiza en el extremo superior del fuste y tiene una resistencia promedio de 80.51 kg/cm² en la columna D-5, 96.34 kg/cm² en la columna D-7 y 112.96 kg/cm² en la columna D-10.

En la tabla 11 se muestran las estadísticas sobre las resistencias obtenidas en todos los cilindros.

6.3.3 Deformación unitaria asociada al esfuerzo máximo.

La deformación unitaria asociada al esfuerzo máximo de la cantera de los sillares superiores y de las rocas dispersas más porosas tiene un promedio de $\epsilon = 0.0036$ con una desviación estándar de 0.0011 y un coeficiente de variación de 32.02% en un total de 22 cilindros. El material de mayor calidad que corresponde a los sillares inferiores y a las rocas dispersas menos porosas tiene un promedio de $\epsilon = 0.0030$ con una desviación estándar de 0.0017 y un coeficiente de variación de 56.92% en una muestra de 28 cilindros.

En la figura 26 se muestran dos curvas esfuerzo deformación típicas.

6.3.4 Módulo de elasticidad, relación de Poisson y módulo de rigidez por cortante.

En las tablas 12 a 15 se presentan cada uno de los valores necesarios para determinar el módulo de elasticidad, E, y la relación de Poisson, ν , de cada cilindro, así como los resultados finales de E y ν .

En los cilindros de mayor resistencia correspondientes a rocas dispersas y sillares inferiores de las columnas, los promedios del módulo de elasticidad variaron desde 180209 kg/cm² a 231224 kg/cm², en los de menor resistencia, para el caso de roca dispersa fueron de 36341 kg/cm² y en el de sillares superiores los promedios variaron de 38911 kg/cm² a 80504 kg/cm².

Cabe señalar, que para el caso del módulo de elasticidad hubo una gran dispersión en los resultados obtenidos, lo que se ve reflejado en la desviación estándar tanto de las rocas dispersas (canteras), como en el de las columnas.

Los valores promedio obtenidos para la relación de Poisson en el caso del material de mayor calidad varía de 0.09 a 0.26, y en la cantera de menor calidad varía de 0.08 a 0.30.

El módulo de rigidez por cortante de la cantera de sillares inferiores y rocas dispersas menos porosas tiene promedios que varían entre 61251 kg/cm² y 111021 kg/cm², en el caso del material de sillares superiores y de rocas dispersas más porosas la variación es de 13886 kg/cm² a 28583 kg/cm².

Los valores estadísticos finales del módulo de elasticidad, de la relación de Poisson y del módulo de rigidez por cortante se encuentran en la tabla 11.

6.3.5 Resistencia a tensión.

La única prueba realizada para obtener la resistencia a tensión del material, indicó un valor de 37.15 kg/cm². Esta prueba se realizó en un cilindro de 15 x 30 cm proveniente de las rocas dispersas menos porosas, el valor de la resistencia a tensión es prácticamente nula en comparación con la resistencia a la compresión, y en la práctica es conveniente considerarla igual a cero.

6.4 Velocidad de pulso.

Las medidas directas se realizaron en todos los cilindros extraídos, tanto los provenientes de las rocas dispersas como los obtenidos de los sillares de las columnas. Las medidas indirectas se tomaron en sillares de las columnas de los ejes C y D de la estructura de la Catedral.

Mediante la observación se detectó un cambio de textura y de coloración del material de las columnas a partir del sillar No. 18, las diversas pruebas realizadas indican que dichos cambios están asociados con la calidad del material.

Los valores promedio obtenidos para la relación de Poisson en el caso del material de mayor calidad varía de 0.09 a 0.26, y en la cantera de menor calidad varía de 0.08 a 0.30.

El módulo de rigidez por cortante de la cantera de sillares inferiores y rocas dispersas menos porosas tiene promedios que varían entre 61251 kg/cm² y 111021 kg/cm², en el caso del material de sillares superiores y de rocas dispersas más porosas la variación es de 13886 kg/cm² a 28583 kg/cm².

Los valores estadísticos finales del módulo de elasticidad, de la relación de Poisson y del módulo de rigidez por cortante se encuentran en la tabla 11.

6.3.5 Resistencia a tensión.

La única prueba realizada para obtener la resistencia a tensión del material, indicó un valor de 37.15 kg/cm². Esta prueba se realizó en un cilindro de 15 x 30 cm proveniente de las rocas dispersas menos porosas, el valor de la resistencia a tensión es prácticamente nula en comparación con la resistencia a la compresión, y en la práctica es conveniente considerarla igual a cero.

6.4 Velocidad de pulso.

Las medidas directas se realizaron en todos los cilindros extraídos, tanto los provenientes de las rocas dispersas como los obtenidos de los sillares de las columnas. Las medidas indirectas se tomaron en sillares de las columnas de los ejes C y D de la estructura de la Catedral.

Mediante la observación se detectó un cambio de textura y de coloración del material de las columnas a partir del sillar No. 18, las diversas pruebas realizadas indican que dichos cambios están asociados con la calidad del material.

Estas diferencias también se comprobaron mediante la técnica de velocidad de pulso; se encontraron diferencias significativas en los tiempos medidos a partir del sillar No. 18 (Fig 27).

En la tabla 16 se presenta un resumen de las velocidades de pulso obtenidas en las columnas de la Catedral, y en la tabla 17 aparecen las estadísticas asociadas a esos resultados. En las tablas 2 a 5 se presentan las velocidades de pulso obtenidas en cada cilindro y en la tabla 6 las estadísticas asociadas.

6.5 Correlaciones.

Dada la dificultad que representa el extraer cilindros de los elementos estructurales de los monumentos históricos, se trataron de relacionar las características mecánicas con las características físicas, con el fin de obtener las características mecánicas a partir de las características físicas.

La importancia de estas correlaciones radica, sobre todo, en que en revisiones posteriores de monumentos históricos con material semejante al estudiado, no siempre se permitirá la extracción de cilindros de elementos estructurales para determinar características mecánicas; sin embargo, por medio de las correlaciones que aquí se establecen, se lograrán determinar con buena aproximación las características mecánicas mediante el conocimiento de la absorción, del peso volumétrico, del peso específico o de la velocidad de pulso.

6.5.1 Correlación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión.

Se determinaron distintas gráficas en las que se establece la correlación entre el módulo de elasticidad en función de la resistencia a compresión; 2 para

rocas dispersas y 3 para columnas. En el caso de rocas dispersas (Fig 17), se obtuvieron los resultados siguientes:

Rocas dispersas menos porosas.

$$E=9124\sqrt{f\bar{m}}$$

Promedio.	181012 kg/cm ²
Desviación Estándar.	24454 kg/cm ²
Coeficiente de Variación.	13.51 %

Rocas dispersas más porosas.

$$E=4326\sqrt{f\bar{m}}$$

Promedio.	47310 kg/cm ²
Desviación Estándar.	2516 kg/cm ²
Coeficiente de Variación.	5.32 %

Las gráficas de las columnas (Figs 18 y 19) se dividieron en sillares superiores, medios e inferiores, de las columnas de las cuales se extrajeron cilindros.

Sillares inferiores.

$$E=13327\sqrt{f\bar{m}}$$

Promedio.	237128 kg/cm ²
Desviación Estándar.	56342 kg/cm ²
Coeficiente de Variación.	23.76 %

Sillares medios.

$$E=6616\sqrt{f_m}$$

Promedio.	107529 kg/cm ²
Desviación Estándar.	26299 kg/cm ²
Coefficiente de Variación.	24.46 %

Sillares superiores.

$$E=4542\sqrt{f_m}$$

Promedio.	42770 kg/cm ²
Desviación Estándar.	7840 kg/cm ²
Coefficiente de Variación.	18.33 %

En el cálculo de estos valores se utilizaron exclusivamente los datos que quedaban dentro de un intervalo definido por el valor promedio del módulo de elasticidad más o menos la desviación estándar.

Una vez que se reconocieron dos tipos de materiales, se determinaron dos gráficas más (Fig 20); una para cada material, las cuales resumen a las anteriores y contienen una mayor cantidad de puntos para las estadísticas.

Sillares superiores y rocas dispersas más porosas.

$$E=4090\sqrt{f_m}$$

Promedio.	42850 kg/cm ²
Desviación Estándar.	8204 kg/cm ²
Coefficiente de Variación.	19.15%

Sillares inferiores y rocas dispersas menos porosas.

$$E=9284\sqrt{f_m}$$

Promedio.	171802 kg/cm ²
Desviación Estándar.	41150 kg/cm ²
Coefficiente de Variación.	23.95%

6.5.2 Correlación entre la resistencia a compresión y el peso volumétrico.

Por medio de mínimos cuadrados, se obtuvo la relación entre la resistencia a compresión, f_m , y el peso volumétrico, PV, (Fig 28), tomando en cuenta los datos de los 70 cilindros extraídos de rocas dispersas y columnas. Esta relación es la siguiente:

$$f_m=0.487 PV-692.47$$

Coefficiente de Correlación 0.75

6.5.3 Correlación entre la resistencia a compresión y la absorción.

En este caso también se estableció una relación lineal entre la resistencia a compresión, f_m , y la absorción, A, por medio de mínimos cuadrados (Fig 29), teniendo como resultado:

$$f_m=-16.574A+379.54$$

Coefficiente de Correlación -0.91

6.5.4 Correlación entre la resistencia a compresión y el peso específico.

También, por mínimos cuadrados, se obtuvo la relación lineal entre los datos de la resistencia a compresión, f_m , y los del peso específico, P_e , (Fig 30), obteniendo la siguiente relación:

$$f_m = 1.208P_e - 2250.05$$

Coefficiente de Correlación 0.87

6.5.5 Correlación entre la resistencia a compresión y la velocidad de pulso.

Ajustando una curva a los datos de resistencia a compresión, f_m , y velocidad de pulso, V_p , obtenidos (Fig 23), se pudo encontrar la siguiente relación:

$$f_m = 0.000281V_p^{1.71}$$

Coefficiente de Correlación 0.93

6.5.6 Correlación entre el módulo de elasticidad y la velocidad de pulso.

El fabricante del equipo de ultrasonido V-Meter, proporciona una curva que relaciona el módulo de elasticidad de cualquier material con la velocidad de pulso. En la Figura 24 se reproduce esta curva, ubicando también los puntos de relación entre el módulo de elasticidad y la velocidad de pulso obtenidos, teniendo una correlación satisfactoria.

7. CONCLUSIONES.

Las diversas pruebas que se llevaron a cabo para determinar las características del material indican dos tipos de cantera utilizados en la construcción de la Catedral Metropolitana, esta variación en el material es probablemente debida a una práctica constructiva, la cual consistió en ubicar el material de mayor resistencia en la parte baja de los elementos estructurales y el material menos resistente en la parte alta.

El estudio petrográfico indicó que la clasificación y el origen de los dos tipos de cantera es el mismo, aunque se detectaron características físicas y mecánicas distintas entre ellos.

Todas las pruebas para obtener las características físicas y mecánicas de la cantera se realizaron satisfactoriamente de acuerdo con las normas especificadas por la ASTM.

Se buscó tener la mayor cantidad de cilindros estándar de 15 x 30 cm, sin embargo, en el caso de los cilindros de 7 x 14 cm extraídos de las columnas, no fue posible cumplir con este requerimiento, por lo que se hicieron las correcciones por esbeltez y tamaño recomendadas en la literatura, para hacer más homogéneos los resultados.

Las características físicas y mecánicas, constituyen un parámetro indicativo para diferenciar los materiales del mismo origen.

Se lograron establecer diversas correlaciones entre las características físicas y mecánicas, mediante ecuaciones y gráficas. Todas las correlaciones resultaron aceptables, sobre todo la correlación entre la resistencia a compresión y la absorción, no sólo por tener el coeficiente de correlación más cercano a la unidad, sino porque existe una diferencia franca entre los dos tipos de materiales.

Las correlaciones obtenidas entre la velocidad de pulso, la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, resultaron ser satisfactorias, ya que el coeficiente de correlación estuvo muy cercano a la unidad, teniéndose así una alternativa más para determinar la resistencia y el módulo de elasticidad del material, mediante una prueba sencilla no destructiva.

En la Catedral Metropolitana se han detectado diversos agrietamientos, originados algunos por la acción de las cargas de la propia estructura y otros más debidos al hundimiento que ha sufrido toda la estructura por la extracción indiscriminada del agua del subsuelo para abastecer a la Ciudad de México. Una alternativa de control para éstas grietas pudiera ser la técnica acústica, ya que en algunos países ha sido empleada en la rehabilitación de edificios históricos y los resultados han sido alentadores.

Los resultados obtenidos en este trabajo han sido de gran utilidad para los estudios realizados en la Catedral Metropolitana (Refs 15, 16 y 17).

El conocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales en la evaluación de la seguridad estructural de los edificios de la época colonial cada vez toma más importancia, ya que cada día existe una mayor preocupación por preservar nuestro patrimonio cultural. Este trabajo constituyó un intento más por conocer las características de éstos materiales; sin embargo aún faltaría por explorar más al respecto, por lo que sería deseable que éste trabajo lograra motivar el desarrollo de más investigaciones que enriquezcan el conocimiento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme dado la oportunidad de formarme profesionalmente y por darme una gran parte de la conciencia que ahora poseo.

A la Facultad de Ingeniería por ser el medio para lograr mi formación.

Al Instituto de Ingeniería por darme todo el apoyo para la realización de éste trabajo.

Al Ingeniero Roberto Sánchez Ramírez por su atinada dirección, apoyo y paciencia durante el desarrollo de éste trabajo.

A los Ingenieros Carlos Aire y Alberto Fuentes por su apoyo y orientación en el desarrollo de ésta tesis.

A Concepción Hernández Rivera y a José Rosales Enríquez por contribuir con su apoyo y experiencia a realizar todas las pruebas que se requirieron en éste trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] El impacto de los materiales en la calidad de las obras (memoria). Segundo Simposio Nacional sobre materiales de construcción. Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán. México, 1991.
- [2] Uribe Afif, Roberto. "Estudio petrográfico de cuatro rocas". Informe al Instituto de Ingeniería, UNAM. México, abril de 1994.
- [3] Manual de concreto. Secretaría de Recursos Hidráulicos, Dirección de proyecto, Departamento de ingeniería experimental. México, 1970.
- [4] ASTM C39, "Compressive strength of cylindrical concrete specimens". *ASTM Standards, Parte 14, Concrete & Mineral Aggregates, Manual of concrete testing, 1986.*
- [5] ASTM 469, "Static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression". *ASTM Standards, Parte 14, Concrete & Mineral Aggregates, Manual of concrete testing, 1975.*

- [6] Robles Fernández-Villegas, Francisco y González Cuevas, Oscar. Aspectos fundamentales de concreto reforzado. Segunda edición. Noriega-Limusa. México, 1990.
- [7] Javier Mendoza, Carlos. Propiedades mecánicas de los concretos fabricados en el Distrito Federal. Series del Instituto de Ingeniería, No. 495. México, noviembre de 1985.
- [8] ASTM 496, "Splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens". *ASTM Standards, Parte 14, Concrete & Mineral Aggregates, Manual of concrete testing, 1990.*
- [9] Instruction Manual for V-Meter (Model C-4902 and c-4901). James Instruments Inc.; Chicago, Illinois; January, 1980.
- [10] Aire, Carlos; Meli Piralla, Roberto. "Resultados de las mediciones de velocidad de pulso en las columnas de la Catedral" en: Estudios estructurales para el proyecto de rehabilitación de la Catedral Metropolitana. Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM. México, mayo de 1993.
- [11] Reymond M. C. Controle de l'évolution de fissures en Génie Civil a l'aide d'un dispositif de surveillance acoustique. CNRS.LCPC France.
- [12] Macchi Giorgio. "Structural diagnosis and rehabilitation of historical buildings" en: Pathology, rehabilitation and strengthening of reinforced concrete structures. Barcelona, octubre de 1991.

- [6] Robles Fernández-Villegas, Francisco y González Cuevas, Oscar. Aspectos fundamentales de concreto reforzado. Segunda edición. Noriega-Limusa. México, 1990.
- [7] Javier Mendoza, Carlos. Propiedades mecánicas de los concretos fabricados en el Distrito Federal. Series del Instituto de Ingeniería, No. 495. México, noviembre de 1985.
- [8] ASTM 496, "Splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens". *ASTM Standards, Parte 14, Concrete & Mineral Aggregates, Manual of concrete testing, 1990*.
- [9] Instruction Manual for V-Meter (Model C-4902 and c-4901). James Instruments Inc.; Chicago, Illinois; January, 1980.
- [10] Aire, Carlos; Meli Piralla, Roberto. "Resultados de las mediciones de velocidad de pulso en las columnas de la Catedral" en: Estudios estructurales para el proyecto de rehabilitación de la Catedral Metropolitana. Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM. México, mayo de 1993.
- [11] Reymond M. C. Controle de l'évolution de fissures en Génie Civil a l'aide d'un dispositif de surveillance acoustique. CNRS.LCPC France.
- [12] Macchi Giorgio. "Structural diagnosis and rehabilitation of historical buildings" en: Pathology, rehabilitation and strengthening of reinforced concrete structures. Barcelona, octubre de 1991.

- [13] Reymond M. C. y Brachet M. Essai de caractérisation de l'endommagement du béton par analyse de l'émission acoustique. France, 1982.
- [14] Neville, Adam M. Properties of Concrete. Pitman Publishing, LTD, London 1975.
- [15] García Rodríguez, Pedro. Estudio sobre el comportamiento estructural de la Catedral Metropolitana previos al proceso de restauración. *Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil*. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, 1993.
- [16] Cortés Quezada, Miguel Angel. Modelo de elemento finito para el análisis estructural de la Catedral Metropolitana. *Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil*. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, 1992.
- [17] Meli Piralla, Roberto y Sánchez Ramírez, Roberto. Rehabilitación de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México. Aspectos estructurales. Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM. México, julio de 1993.

Tabla 1 *Velocidades de carga para diferentes dimensiones de los cilindros.*

DIMENSIÓN (cm)	VELOCIDAD (ton/min)
7 x 14	5
10 x 20	10
15 x 30	25

Tabla 2 Características físicas de los cilindros de las rocas dispersas.

PROBETA	P.E.	ABSORCION %	P.V. (kg/m ³)	V (m/s)
M2-4	1.897	19.32	1665.90	1228.62
M2-3	1.908	19.47	1657.66	1120.98
M1-2	1.941	15.47	1580.75	1843.98
M1-1	1.947	15.21	1586.81	1920.78
M4-9	1.945	15.53	2084.93	1932.30
M4-7	1.947	16.75	2065.45	2045.92
M4-8	1.951	15.94	1653.78	2000.66
M5-11	1.947	16.37	1671.03	2000.00
M5-10	1.950	16.00	1665.40	2023.03
M6-1	1.983	18.13	1674.61	1878.40
M3-6	2.105	1.06	1658.44	3727.50
M3-5	2.121	1.19	1650.63	3721.46
M7-3	2.117	2.77	2045.65	3522.04
M7-2	2.130	2.91	2038.68	3619.23
M7-4	2.198	3.85	2102.62	3367.36
M7-5	2.211	3.48	2113.25	3333.33
M8-2	2.130	2.84	2084.02	3722.22
M8-7	2.131	3.58	2089.38	3820.00
M8-1	2.134	3.09	2124.21	3706.56
M8-5	2.138	2.59	2096.59	3796.46
M8-6	2.139	3.14	2082.28	3701.56
M8-8	2.141	3.33	2049.71	3659.09
M8-4	2.146	2.93	2001.70	3713.24
M8-3	2.175	3.00	2038.42	3758.17

P.E. - Peso específico.
P.V. - Peso Volumétrico.
V - Velocidad de Pulso.

Tabla 3 Características físicas de los cilindros de la columna D-5.

PROBETA		P.E.	ABSORCION %	P.V. kg/m ³	V m/s
SILLAR 5					
(18)	3-II	2.170	3.46	2091.57	3500.00
(10)	3-I	2.180	3.72	2047.65	3608.25
(11)	II-XII (1)	2.020	3.96	1901.84	3439.80
(2)	2-I	2.010	4.70	1842.62	3473.95
(15)		2.170	3.46	1892.43	3365.10
SILLAR 11					
(3)	3-I	2.080	3.29	1959.82	3333.33
(12)	1-II	2.070	3.39	1990.17	3589.74
(13)	4-I	2.090	2.89	1118.37	3076.92
(6)	2-II	2.070	1.95	1967.49	3500.00
(9)	3-II	2.110	2.80	2002.23	3414.63
SILLAR 20					
(4)	1-II	1.940	17.70	1648.28	1624.13
(5)	2-II	1.930	17.80	1640.16	1776.65
(7)	4-II	1.920	18.50	1802.15	1605.50
(8)	5-II	1.960	17.60	1614.97	1508.62
(17)	2-I	1.940	17.90	1542.17	1754.39
(1)		1.930	17.80	1615.67	1625.20
(14)		1.960	17.60	1607.09	1661.50
(16)		1.940	17.90	1576.50	1584.80

P.E. - Peso específico.
P.V. - Peso Volumétrico.
V - Velocidad de Pulso.

Tabla 4 Características físicas de los cilindros de la columna D-7.

PROBETA		P.E.	ABSORCION %	P.V. kg/cm ³	V m/s
SILLAR 6					
(1)	1-III	2.150	3.00	2067.03	3721.80
(4)	2-I	2.150	3.00	2071.39	3405.80
(5)	4-I	2.170	2.60	2110.31	3856.10
(6)	3-II	2.180	4.10	2208.68	3814.70
(7)	3-I	2.170	2.60	2101.03	3921.60
(2)		2.150	3.00	2065.89	3797.00
(3)		2.140	4.00	2044.57	3671.50
SILLAR 21					
(8)	1-II	2.000	15.60	1704.44	1871.70
(10)	2-II	2.000	15.60	1734.14	2031.70
(12)	4-I	2.000	15.60	1757.66	1832.50
(13)	3-II	2.000	15.60	2067.03	1923.10
(14)	3-I	2.000	15.60	1710.49	1963.30
(9)		2.000	15.60	1724.42	1853.90
(11)		2.000	15.60	1716.63	2175.90

P.E. - Peso específico.
P.V. - Peso Volumétrico.
V. - Velocidad de Pulso.

Tabla 5 Características físicas de los cilindros de la columna D-10.

PROBETA	P.E.	ABSORCION %	P.V. kg/cm ³	V m/s
SILLAR 11				
(1) 3-II	2.068	5.29	2022.03	2669.20
(2) 2-II	2.068	5.29	1950.67	2709.90
(3) 5-I	2.062	3.17	1995.83	3389.40
(4) 4-II	2.068	5.29	1971.87	3256.30
(5) 3-I	2.062	3.17	1972.20	2468.90
(6) 4-I	2.062	3.17	1933.99	2978.70
(7)	2.018	4.81	1982.29	2642.40
SILLAR 20				
(8) 4-I	1.946	17.75	1633.57	1583.60
(9) 3-III	1.964	18.46	1674.14	1758.80
(10) 5-II	1.965	17.42	1721.71	2351.90
(11) 6-II	1.965	17.42	1683.50	2406.80
(12) 5-I	1.946	17.75	1695.44	2563.60
(13) 2-I	1.946	17.75	1571.30	1700.00
(14)	1.988	15.92	1637.81	1749.10
(15)	1.981	16.01	1703.28	2405.50
(16)	1.969	15.13	1711.73	2622.90

P.E. - Peso específico.
P.V. - Peso Volumétrico.
V - Velocidad de Pulso.

Tabla 6 Estadísticas de las Características Físicas.

	Datos estadísticos	Cantera * + porosa	Cantera * - porosa	Col. D5 Sillar 5	Col. D5 Sillar 11	Col. D5 Sillar 20	Col. D7 Sillar 6	Col. D7 Sillar 21	Col. D10 Sillar 11	Col. D1 Sillar 20
P.E.	n	10	14	5	5	8	7	7	7	9
	Promedio	1.942	2.144	2.110	2.084	1.940	2.159	2.000	2.058	1.963
	Desv. Est.	0.023	0.030	0.086	0.0163	0.014	0.014	0.000	0.018	0.015
	Coef.Var.(%)	1.22	1.41	4.12	0.80	0.73	0.68	0.00	0.88	0.78
Absorción (%)	n	10	14	5	5	8	7	7	7	9
	Promedio	16.82	2.84	3.86	2.86	17.85	3.19	15.60	4.31	17.07
	Desv. Est.	1.59	0.80	0.51	0.57	0.29	0.62	0.00	1.08	1.11
	Coef.Var.(%)	9.45	28.17	13.21	19.93	1.62	19.44	0.00	25.06	6.50
P.V. (kg/m ³)	n	10	14	5	5	8	7	7	7	9
	Promedio	1730.00	2013.00	1955.00	1808.00	1631.00	2096.00	1774.00	1976.00	1670.00
	Desv. Est.	185.00	155.00	108.00	386.00	77.00	55.00	131.00	29.00	48.00
	Coef.Var.(%)	10.69	7.70	5.52	21.35	4.72	2.62	7.38	1.47	2.87
V (m/s)	n	10	14	5	5	8	7	7	7	9
	Promedio	1799.00	3655.00	3477.00	3383.00	1643.00	3741.00	1950.00	2874.00	2127.00
	Desv. Est.	336.35	148.19	88.98	195.95	87.94	169.31	120.95	343.84	418.17
	Coef.Var.(%)	18.70	4.05	2.56	5.79	5.35	4.53	6.20	11.96	19.66

P.E. - Peso específico.

P.V. - Peso Volumétrico.

V - Velocidad de Pulso.

* Material extraído de rocas dispersas.

n - número de especímenes ensayados.

Tabla 7 Características mecánicas de los cilindros de las rocas dispersas.

PROBETA	A cm ²	D cm	L/D	f _t kg/cm ²	f _{max} kg/cm ²	f _{esb.} kg/cm ²	f _{tan.} kg/cm ²	E kg/cm ²	v	G kg/cm ²
M2-4	174.37	14.90	2.03		72.83	72.83	72.83	14,508	0.30	5,580
M2-3	174.37	14.90	2.01		78.00	78.00	78.00	14,296	0.27	5,628
M1-2	165.81	14.53	1.96		110.36	110.36	110.36	*	*	*
M1-1	167.42	14.60	1.93		*	*	*	*	*	*
M4-9	180.67	15.17	1.93		126.15	126.15	126.15	44,044	0.31	16,811
M4-7	177.49	15.03	1.99		116.06	116.06	116.06	50,175	0.33	18,863
M4-8	178.30	15.07	2.01		118.34	118.34	118.34	47,385	0.34	17,681
M5-11	179.08	15.10	2.00		118.94	118.94	118.94	47,638	0.27	18,755
M5-10	179.08	15.10	1.75		120.62	117.68	117.68	*	*	*
M6-1	70.88	9.50	2.00		88.88	88.88	88.88	*	*	*
M3-6	176.71	15.00	2.00		561.94	561.94	561.94	219,694	0.22	90,039
M3-5	180.67	15.17	1.88	37.15		37.15	37.15	*	*	*
M7-3	70.88	9.50	2.00		468.10	468.10	468.10	*	*	*
M7-2	70.88	9.50	2.02		283.00	283.00	283.00	*	*	*
M7-4	70.88	9.50	2.00		318.98	318.98	301.75	168,480	0.09	77,284
M7-5	70.88	9.50	2.02		377.26	377.26	356.88	169,561	0.27	66,756
M8-2	179.08	15.10	2.00		376.93	376.93	376.93	*	*	*
M8-7	70.88	9.50	2.01		337.05	337.05	318.84	205,855	0.21	85,064
M8-1	179.79	15.13	1.90		436.62	432.30	432.30	174,051	0.43	60,857
M8-5	180.74	15.17	1.98		426.03	426.03	426.03	176,464	0.27	69,474
M8-6	70.88	9.50	2.01		424.08	424.08	401.17	166,994	0.20	69,581
M8-8	70.88	9.50	1.36		430.15	399.21	399.21	*	*	*
M8-4	180.74	15.17	2.00		372.35	372.35	372.35	142,236	*	*
M8-3	179.79	15.13	1.90		426.05	421.83	421.83	205,773	0.40	73,490

* No Instrumentadas

Tabla 8 Características mecánicas de los cilindros de la columna D-5.

PROBETA		A cm ²	D cm	L/D	f _{md.} kg/cm ²	f _{un.} kg/cm ²	f _{cm.} kg/cm ²	E kg/cm ²	v	G kg/cm ²
SILLAR 5										
(18)	3-II	38.48	7.00	2.00	297.82	297.82	276.97	49,647	0.06	23,418
(10)	3-I	38.48	7.00	2.00	273.91	273.91	254.74	266,647	0.24	107,519
(11)	II-XII (1)	38.48	7.00	2.00	267.12	267.12	248.42	404,094	0.06	190,610
(2)	2-I	37.18	6.88	2.03	243.14	243.14	226.12	78,424	0.06	36,992
(15)		37.94	6.95	1.53	350.32	336.31	312.77	.	.	.
SILLAR 11										
(3)	3-I	38.48	7.00	2.00	243.24	243.24	226.21	69,937	0.08	32,378
(12)	1-II	38.26	6.98	2.01	293.00	293.00	272.49	61,305	0.05	29,193
(13)	4-I	38.16	6.97	2.01	250.79	250.79	233.23	42,525	0.08	19,688
(6)	2-II	38.16	6.97	2.01	293.84	293.84	273.27	282,813	0.39	101,731
(9)	3-II	38.16	6.97	2.01	275.98	275.98	256.66	444,463	0.23	180,676
SILLAR 20										
(4)	1-II	38.26	6.98	2.01	75.53	75.53	70.24	215,487	0.58	68,192
(5)	2-II	38.48	7.00	2.00	91.47	91.47	85.07	77,422	0.26	30,723
(7)	4-II	38.16	6.97	2.01	88.07	88.07	81.91	6,107	0.02	2,994
(8)	5-II	38.16	6.97	2.01	81.77	81.77	76.05	44,908	0.11	20,229
(17)	2-I	38.48	7.00	1.71	66.26	64.94	60.39	58,594	0.41	20,778
(1)		37.61	6.92	1.32	96.52	90.73	84.38	.	.	.
(14)		38.26	6.98	1.53	107.93	103.61	96.36	.	.	.
(16)		37.61	6.92	1.63	99.44	96.46	89.71	.	.	.

* NO INSTRUMENTADAS

Tabla 9 Características mecánicas de los cilindros de la columna D-7.

PROBETA		AREA cm ²	D cm	L/D	f _{máx.} kg/cm ²	f _{resb.} kg/cm ²	f _{com.} kg/cm ²	E kg/cm ²	v	G kg/cm ²
SILLAR 6										
(1)	1-III	38.48	7.00	2.03	352.09	352.09	327.44	210,753	0.05	100,359
(4)	2-I	38.48	7.00	2.01	353.39	353.39	328.65	155,523	-	-
(5)	4-I	38.48	7.00	2.00	348.71	348.71	324.30	282,284	0.14	123,809
(6)	3-II	38.48	7.00	2.00	387.69	387.69	360.55	203,523	0.16	87,725
(7)	3-I	38.48	7.00	2.00	359.11	359.11	333.97	304,039	0.15	132,191
(2)		38.48	7.00	1.44	350.27	332.76	309.47	•	•	•
(3)		38.48	7.00	1.09	368.98	328.39	305.40	•	•	•
SILLAR 21										
(8)	1-II	38.48	7.00	2.04	73.01	73.01	67.90	48,495	0.06	22,875
(10)	2-II	38.48	7.00	2.01	112.77	112.77	104.88	37,129	0.05	17,680
(12)	4-I	38.48	7.00	2.00	106.80	106.80	99.32	32,966	0.04	15,849
(13)	3-II	38.48	7.00	2.00	112.77	112.77	104.88	40,047	0.10	18,203
(14)	3-I	38.48	7.00	1.99	109.40	109.40	101.74	35,917	0.14	15,753
(9)		38.48	7.00	1.41	107.58	102.20	95.05	•	•	•
(11)		38.48	7.00	1.34	115.11	108.20	100.63	•	•	•

* NO INSTRUMENTADAS

Tabla 10 Características mecánicas de los cilindros de la columna D-10.

PROBETA		AREA cm ²	D cm	L/D	f _{max.} kg/cm ²	f _{esb.} kg/cm ²	f _{com.} kg/cm ²	E kg/cm ²	v	G kg/cm ²
SILLAR 11										
(1)	3-II	38.48	7.00	2.03	327.40	327.40	304.48	92,337	0.05	43,970
(2)	2-II	38.48	7.00	2.03	331.56	331.56	308.35	168,928	0.09	77,490
(3)	5-I	38.48	7.00	2.01	383.53	383.53	356.68	162,052	0.11	72,996
(4)	4-II	38.48	7.00	2.01	301.16	301.16	280.08	136,486	0.06	64,380
(5)	3-I	38.48	7.00	1.99	258.03	258.03	239.97	119,245	0.13	52,763
(6)	4-I	38.48	7.00	2.00	290.00	290.00	269.70	119,642	0.07	55,907
(7)		38.48	7.00	1.19	248.67	226.29	210.45	•	•	•
SILLAR 20										
(8)	4-I	38.48	7.00	2.03	99.00	99.00	92.07	38,471	0.18	16,301
(9)	3-III	38.48	7.00	2.00	102.64	102.64	95.46	40,644	0.15	17,671
(10)	5-II	38.48	7.00	1.99	150.71	150.71	140.16	50,524	0.12	22,555
(11)	6-II	38.48	7.00	2.03	151.75	151.75	141.13	65,491	0.04	31,486
(12)	5-I	38.48	7.00	2.01	144.73	144.73	134.60	64,603	0.12	28,841
(13)	2-I	38.48	7.00	1.82	99.00	97.02	90.23	25,806	0.01	12,775
(14)		38.48	7.00	1.41	103.94	98.74	91.83	•	•	•
(15)		38.48	7.00	1.36	133.56	125.55	116.76	•	•	•
(16)		38.48	7.00	1.14	136.68	123.01	114.40	•	•	•

* NO INSTRUMENTADAS

Tabla 11 Estadísticas de las Características Mecánicas.

	Datos estadísticos	Cantera * + porosa	Cantera * - porosa	Col. D5 Sillar 5	Col. D5 Sillar 11	Col. D5 Sillar 20	Col. D7 Sillar 6	Col. D7 Sillar 21	Col. D10 Sillar 11	Col. D1 Sillar 20
fm (kg/cm ²)	n	9	13	5	5	8	7	7	7	9
	Promedio	105.25	393.87	263.80	252.37	80.51	327.11	96.34	281.39	112.96
	Desv. Est.	19.86	73.97	32.82	21.85	11.36	18.07	12.99	47.99	21.58
	Coef.Var.(%)	18.87	18.78	12.44	8.66	14.11	5.52	13.48	17.05	19.10
E (kg/cm ²)	n	6	9	4	5	5	5	5	6	6
	Promedio	36341	181012	199703	180209	80504	231224	38911	133115	47590
	Desv. Est.	17105	24454	166816	177209	79862	60881	5929	28872	15649
	Coef.Var.(%)	47.07	13.51	83.53	98.34	99.20	26.33	15.24	21.69	32.88
v	n	6	8	4	5	5	4	5	6	6
	Promedio	0.30	0.26	0.11	0.17	0.28	0.13	0.08	0.09	0.10
	Desv. Est.	0.03	0.11	0.09	0.14	0.23	0.05	0.04	0.03	0.07
	Coef.Var.(%)	10.00	42.31	81.82	82.35	82.14	38.46	50.00	33.33	70.00
G (kg/cm ²)	n	6	8	4	5	5	4	5	6	6
	Promedio	13886	74068	89635	72733	28583	111021	18072	61251	21605
	Desv. Est.	6459	9680	76750	68612	24285	20559	2896	12733	7382
	Coef.Var.(%)	46.51	13.07	85.63	94.33	84.96	18.52	16.02	20.79	34.17

* Material extraído de rocas dispersas.
n - número de especímenes ensayados.

Tabla 12 Valores para determinar el módulo de elasticidad y la relación de Poisson en los cilindros de las rocas dispersas.

PROBETA	S_{max} kg/cm ²	S_2 kg/cm ²	S_1 kg/cm ²	ϵ_2	E kg/cm ²	ϵ_{12}	ϵ_{11}	ν
CILINDROS 10X20								
M8-6	424.10	169.64	9.66	0.001008	166,994	0.000193	0.000000	0.20
M8-7	337.05	134.82	9.66	0.000658	205,855	0.000125	0.000000	0.21
M7-5	377.26	150.90	9.66	0.000883	169,561	0.000223	0.000000	0.27
M7-4	318.99	127.60	9.66	0.000750	168,480	0.000065	0.000000	0.09
CILINDROS 15X30 *								
M2-3	78.00	31.20	0.32	0.002210	14,296	0.000581	0.000000	0.27
M2-4	72.83	29.13	0.32	0.002036	14,508	0.000603	0.000000	0.30
M4-7	116.06	46.42	2.32	0.000929	50,175	0.000290	0.000000	0.33
M4-8	118.34	47.34	2.32	0.001000	47,385	0.000323	0.000000	0.34
M4-9	126.15	50.46	2.32	0.001143	44,044	0.000339	0.000000	0.31
M5-11	118.94	47.58	2.32	0.001000	47,638	0.000258	0.000000	0.27
CILINDROS 15X30 **								
M8-1	436.62	174.65	9.30	0.001000	174,051	0.000405	0.000000	0.43
M8-3	426.05	170.42	9.30	0.000833	205,773	0.000311	0.000000	0.40
M8-5	426.03	170.41	9.30	0.000963	176,464	0.000243	0.000000	0.27
M3-6	561.94	224.78	9.30	0.001031	219,649	0.000216	0.000000	0.22

* MATERIAL MENOS RESISTENTE.

** MATERIAL MAS RESISTENTE.

Tabla 13 Valores para determinar el módulo de elasticidad y la relación de Poisson en los cilindros de la columna D-5.

PROBETA	$S_{máx}$ kg/cm ²	S_2 kg/cm ²	S_1 kg/cm ²	ϵ_2	E kg/cm ²	ϵ_{12}	ϵ_{11}	ν
SILLAR 5								
(18)	297.87	119.15	6.25	0.002324	49,647	0.000143	0.000017	0.06
(10)	273.91	109.56	72.50	0.000189	266,647	0.000048	0.000014	0.24
(11)	267.12	106.85	72.50	0.000135	404,094	0.000026	0.000021	0.06
(2)	243.14	97.26	58.75	0.000541	78,424	0.000038	0.000010	0.06
SILLAR 11								
(3)	243.24	97.30	37.50	0.000905	69,937	0.000100	0.000029	0.08
(12)	293.00	117.20	31.25	0.001452	61,305	0.000100	0.000024	0.05
(13)	250.79	100.32	6.25	0.002262	42,525	0.000182	0.000000	0.08
(6)	293.84	117.54	37.50	0.000333	282,813	0.000135	0.000024	0.39
(9)	275.98	110.39	37.50	0.000214	444,463	0.000049	0.000012	0.23
SILLAR 20								
(4)	75.53	30.21	5.00	0.000167	215,487	0.000068	0.000000	0.58
(5)	91.47	36.59	5.00	0.000458	77,422	0.000108	0.000000	0.26
(7)	88.07	35.23	5.00	0.005000	6,107	0.000108	0.000000	0.02
(8)	81.77	32.71	5.00	0.000667	44,908	0.000068	0.000000	0.11
(17)	66.26	26.50	5.00	0.000417	58,594	0.000149	0.000000	0.41

Tabla 14 Valores para determinar el módulo de elasticidad y la relación de Poisson en los cilindros de la columna D-7.

PROBETA	$S_{med.}$ kg/cm ²	S_2 kg/cm ²	S_1 kg/cm ²	ϵ_2	E kg/cm ²	ϵ_2	ϵ_{11}	ν
SILLAR 6								
(1)	352.09	140.84	16.07	0.000642	210,753	0.000045	0.000016	0.05
(4)	353.39	141.36	7.14	0.000913	155,523	-	-	-
(5)	348.71	139.48	50.00	0.000367	282,284	0.000045	0.000000	0.14
(6)	387.69	155.08	16.07	0.000733	203,523	0.000112	0.000000	0.16
(7)	359.11	143.64	50.00	0.000358	304,039	0.000070	0.000023	0.15
SILLAR 21								
(8)	73.01	29.20	10.00	0.000446	48,495	0.000047	0.000024	0.06
(10)	112.77	45.11	3.82	0.001162	37,129	0.000059	0.000000	0.05
(12)	106.80	42.72	3.82	0.001230	32,966	0.000047	0.000000	0.04
(13)	112.77	45.11	3.82	0.001081	40,047	0.000100	0.000000	0.10
(14)	109.40	43.76	3.82	0.001162	35,917	0.000159	0.000000	0.14

Tabla 15 Valores para determinar el módulo de elasticidad y la relación de Poisson en los cilindros de la columna D-10.

PROBETA	$S_{máx.}$ kg/cm ²	S_2 kg/cm ²	S_1 kg/cm ²	ϵ_2	E kg/cm ²	ϵ_{12}	ϵ_{11}	ν
SILLAR 11								
(1)	327.40	130.96	8.06	0.001381	92,337	0.000071	0.000000	0.05
(2)	331.56	132.62	10.32	0.000774	168,928	0.000067	0.000000	0.09
(3)	383.53	153.41	10.32	0.000933	162,052	0.000100	0.000000	0.11
(4)	301.16	120.46	10.32	0.000857	136,486	0.000052	0.000000	0.06
(5)	258.03	103.21	10.32	0.000829	119,245	0.000100	0.000000	0.13
(6)	290.00	116.00	10.32	0.000933	119,642	0.000062	0.000000	0.07
SILLAR 20								
(8)	99.00	39.60	12.67	0.000750	38,471	0.000125	0.000000	0.18
(9)	102.64	41.06	5.33	0.000929	40,644	0.000133	0.000000	0.15
(10)	150.71	60.28	21.33	0.000821	50,524	0.000258	0.000167	0.12
(11)	151.75	60.70	6.67	0.000875	65,491	0.000033	0.000000	0.04
(12)	144.73	57.89	12.67	0.000750	64,603	0.000083	0.000000	0.12
(13)	99.00	39.60	2.00	0.001507	25,806	0.000017	0.000000	0.01

Tabla 16 *Medidas de la velocidad de pulso en las columnas de la Catedral.*

COLUMNA	UBICACION	SILLARES	SILLAR SUPERIOR	SILLAR INFERIOR
C-3	8.245	13-12	1781.47	2595.56
C-4	11.575	19-18	1059.70	1740.14
C-5	10.155	19-18	1661.13	2664.3
C-6	10.185	19-18	898.74	2994.01
C-7	10.220	19-18	1269.57	1815.98
C-8	I			
C-9	10.600	19-18	1992.03	2392.34
C-10	10.270	19-18	2021.58	2008.03
C-11	10.230	19-18	1495.51	2770.08
C-12	10.225	19-18	1943.01	2431.12
PROMEDIO			1569.19	2379.02
D-3	I			
D-4	10.165	19-18	1089.32	3027.25
D-5	10.150	19-18	1721.17	2685.77
D-6	10.170	19-18	2102.31	2958.58
D-7	10.185	19-18	1672.24	2473.21
D-8	I			
D-9	10.200	19-18	1982.82	2094.97
D-10	10.280	19-18	1231.02	2742.23
D-11	10.230	19-18	2039.43	2079.00
D-12	10.200	19-18	1397.95	2695.42
PROMEDIO			1654.43	2594.44

I: INACCESIBLE.

Tabla 17 *Estadísticas de la velocidad de pulso de las columnas de los ejes C y D.*

DATOS ESTADISTICOS	EJE	SILLAR No. 19	SILLAR No. 18
Promedio	C	1569.19	2379.02
D. Estándar		391.72	411.63
Coef. Var.		24.96%	17.30%
Promedio	D	1654.53	2594.44
D. Estándar		358.09	333.53
Coef. Var.		21.64%	12.85%

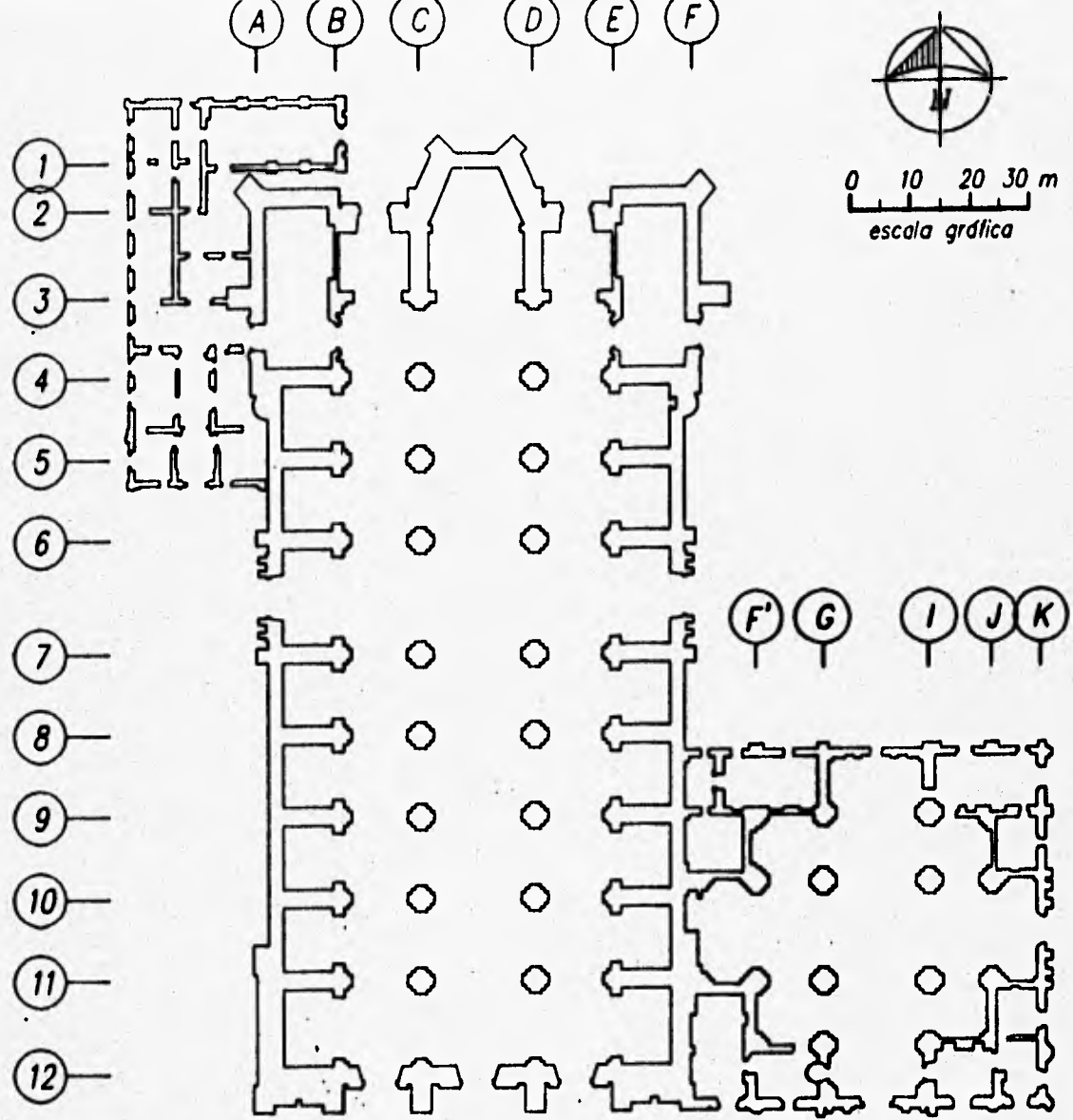
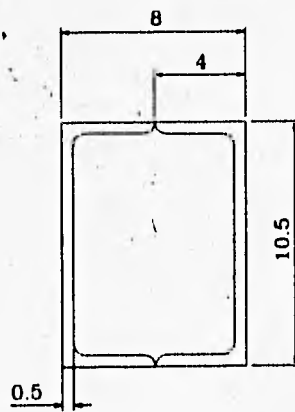
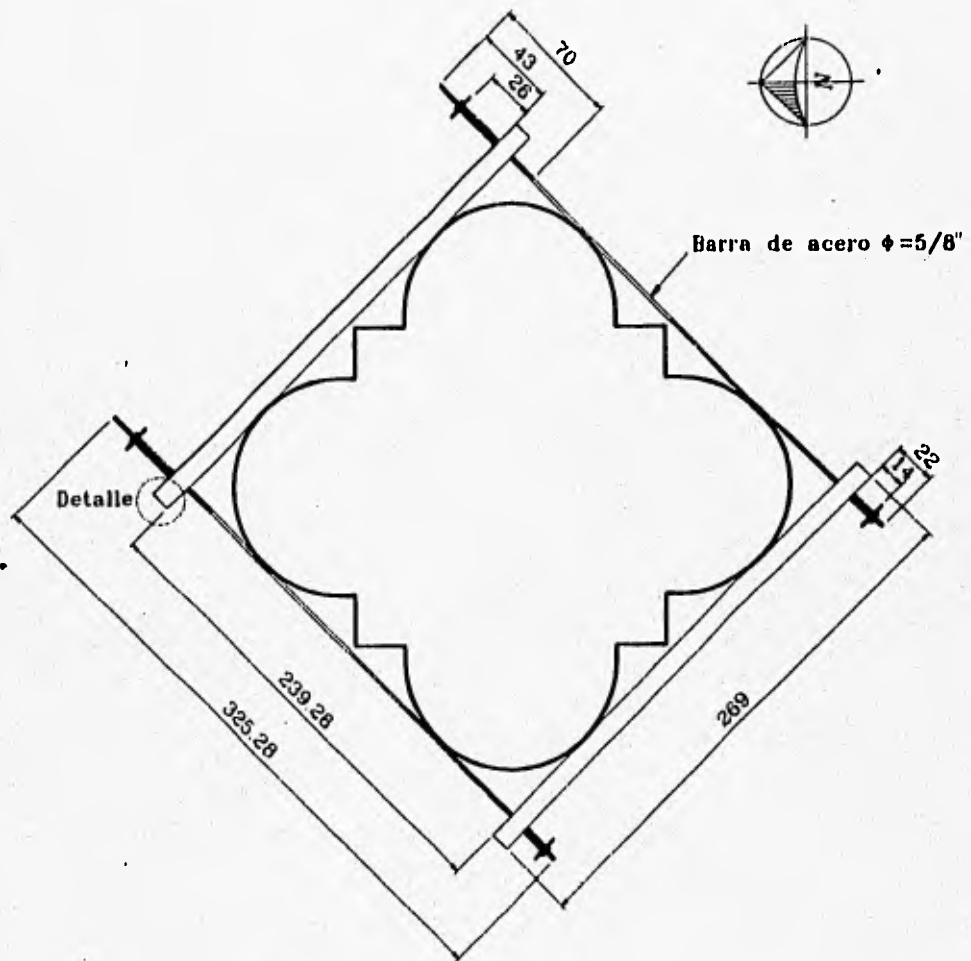


Fig 1 *Planta arquitectónica de la Catedral Metropolitana.*



Detalle

Acotaciones en cm

Fig 2 Marco de acero para apoyar el equipo de extracción de corazones.



Fig 3 Extracción de corazones en la columna D-5.

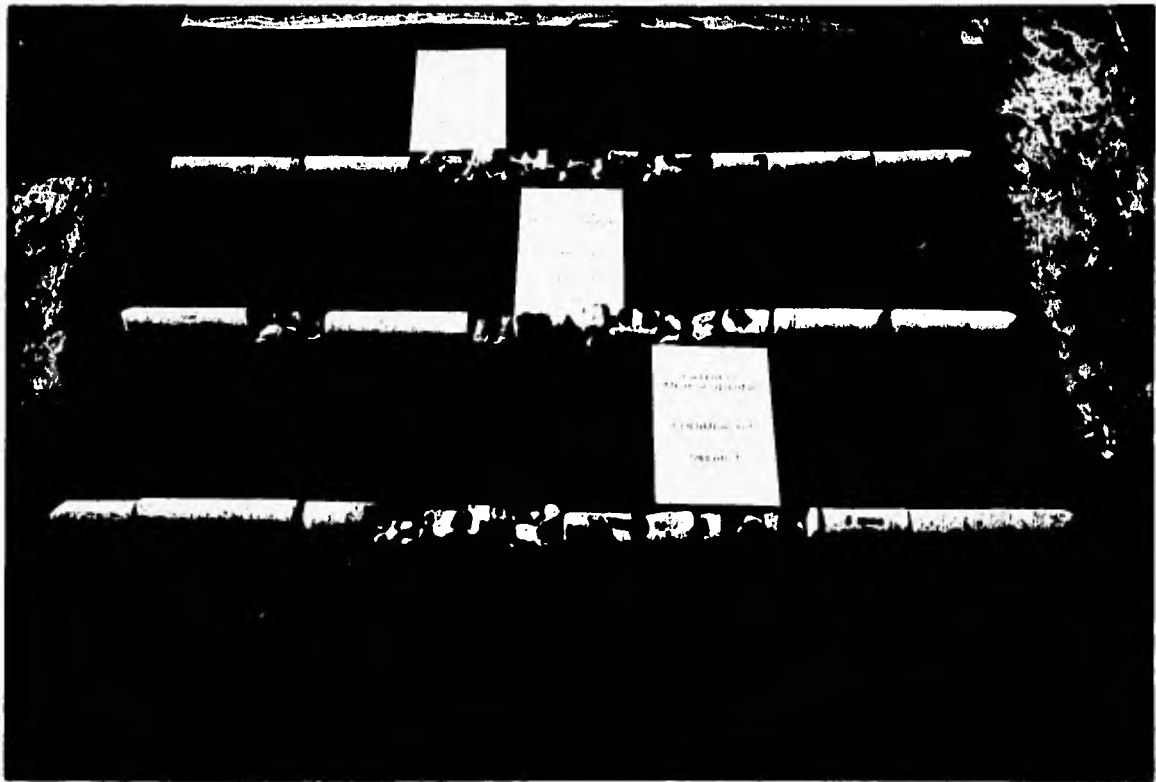
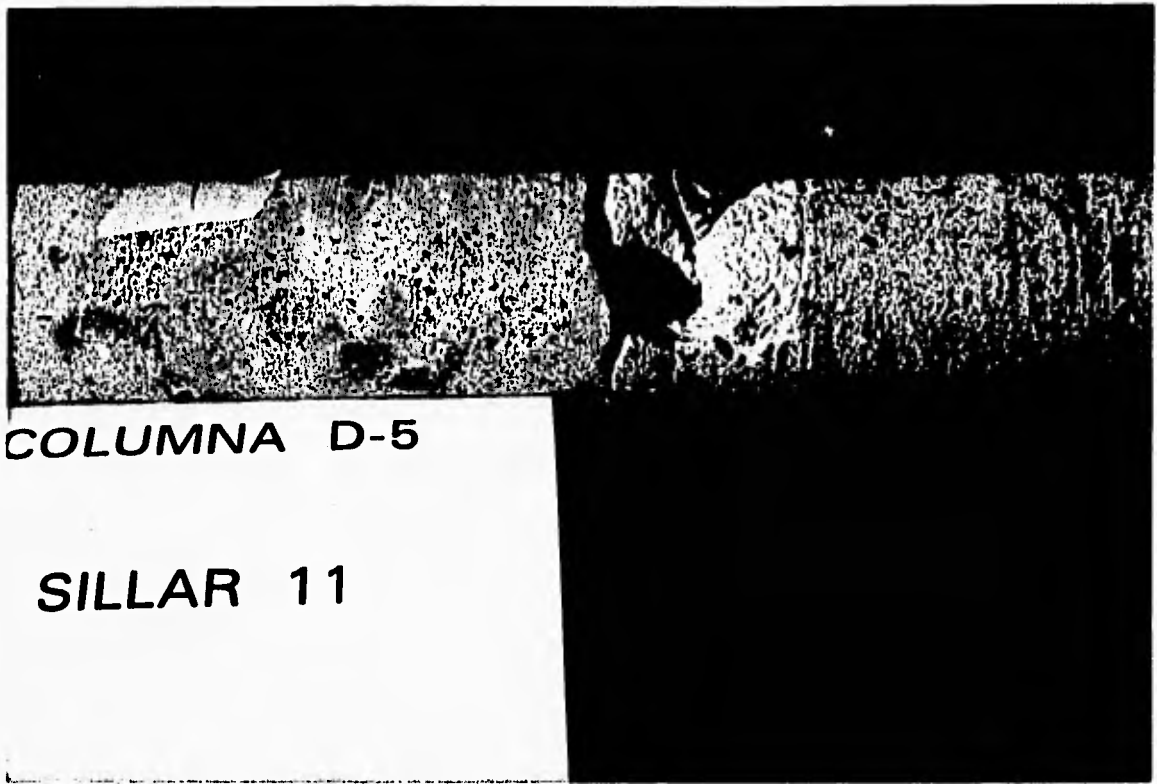


Fig 4 Corazones extraídos de la columna D-5.

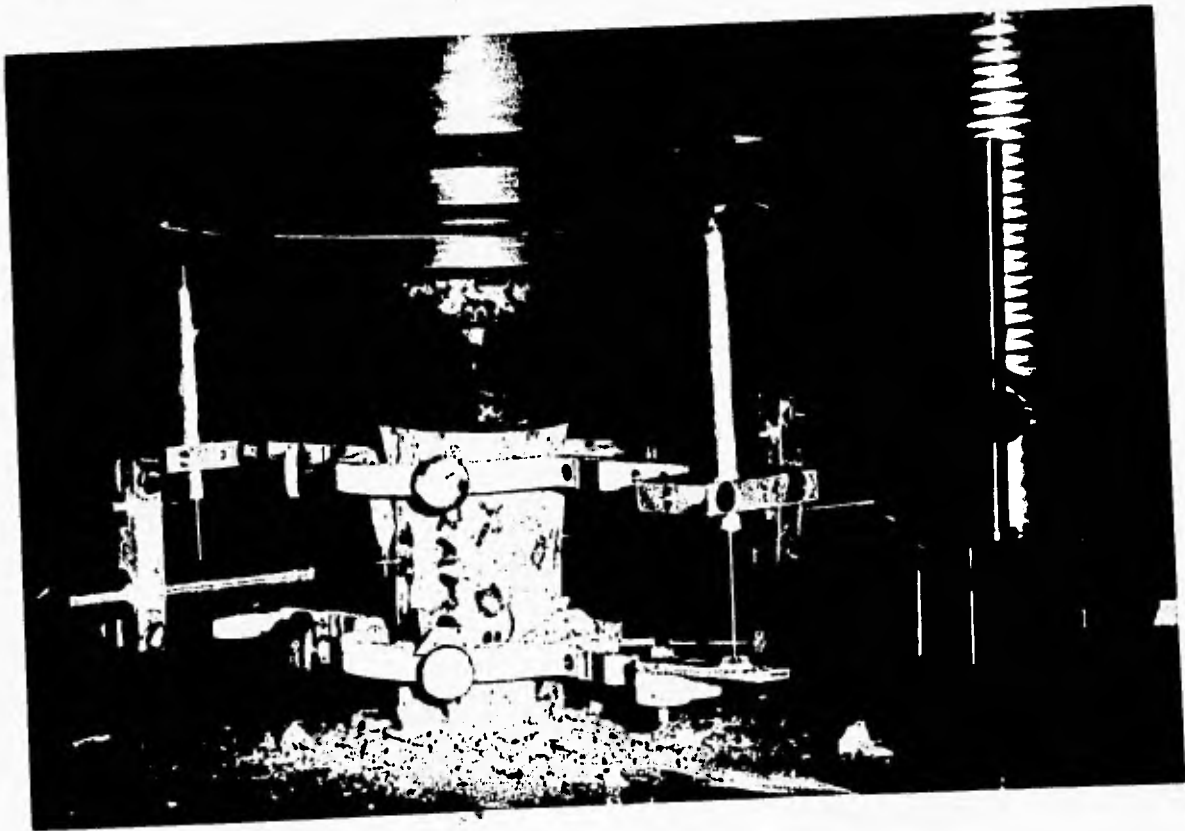
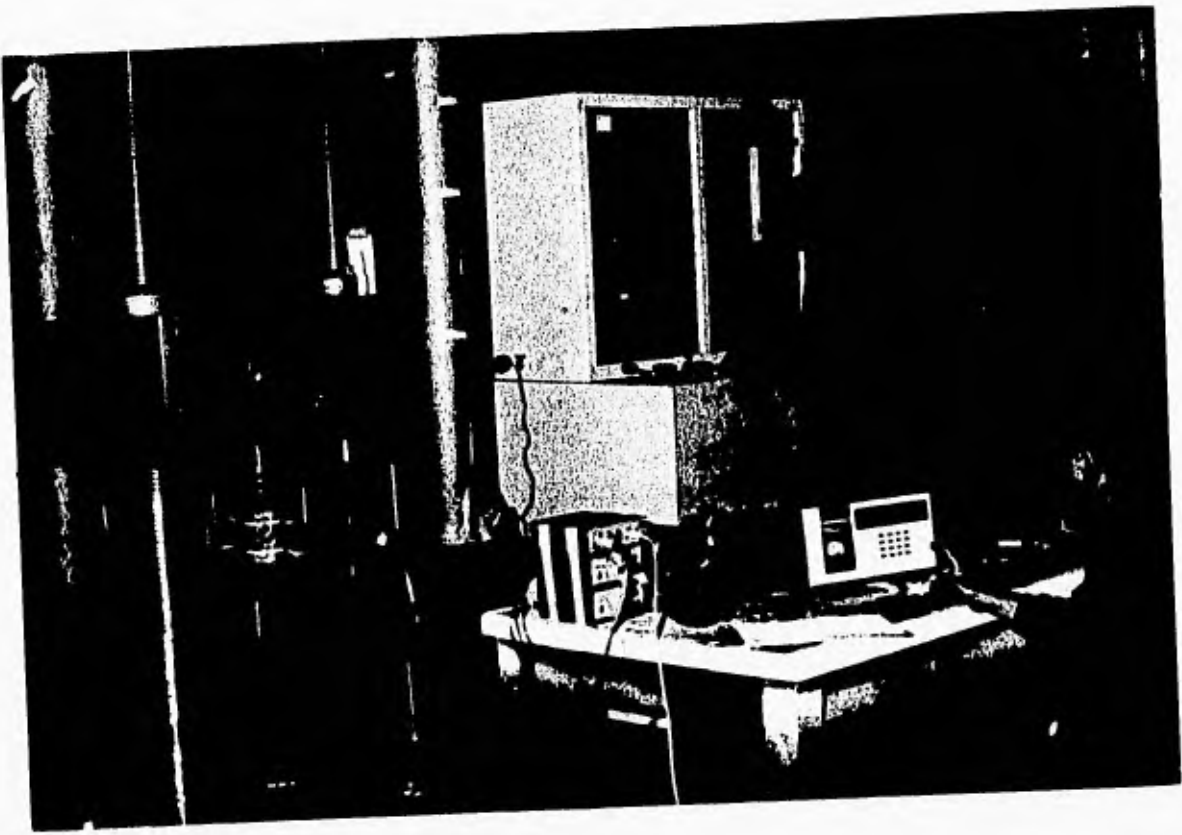


Fig 5 Prueba de compresión en un espécimen de cantera.

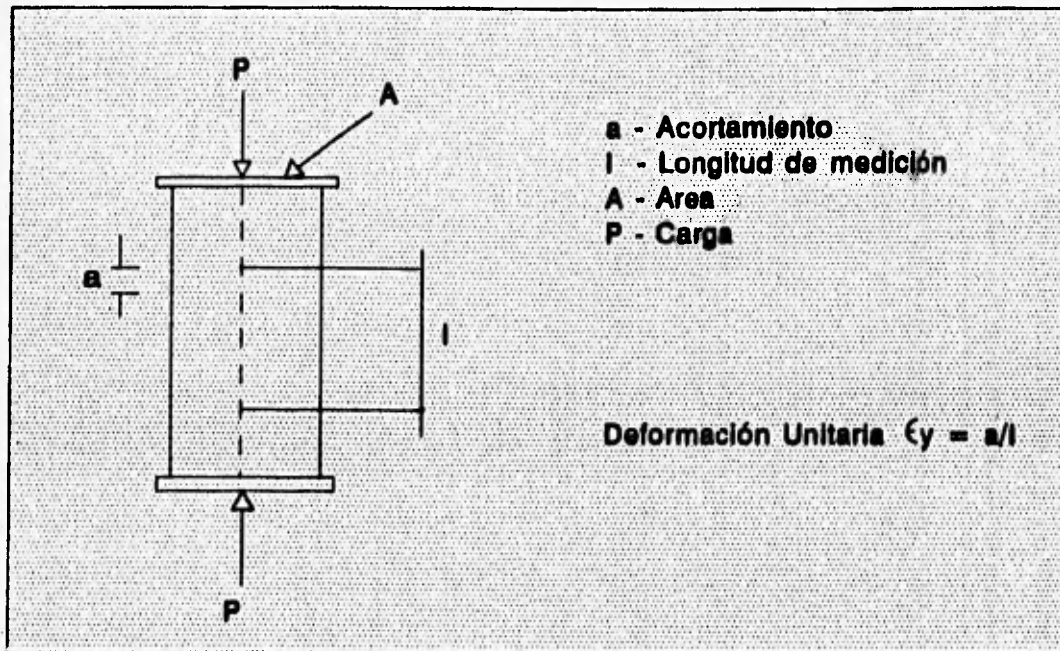


Fig 6 *Compresión axial de un espécimen. Deformación unitaria longitudinal.*

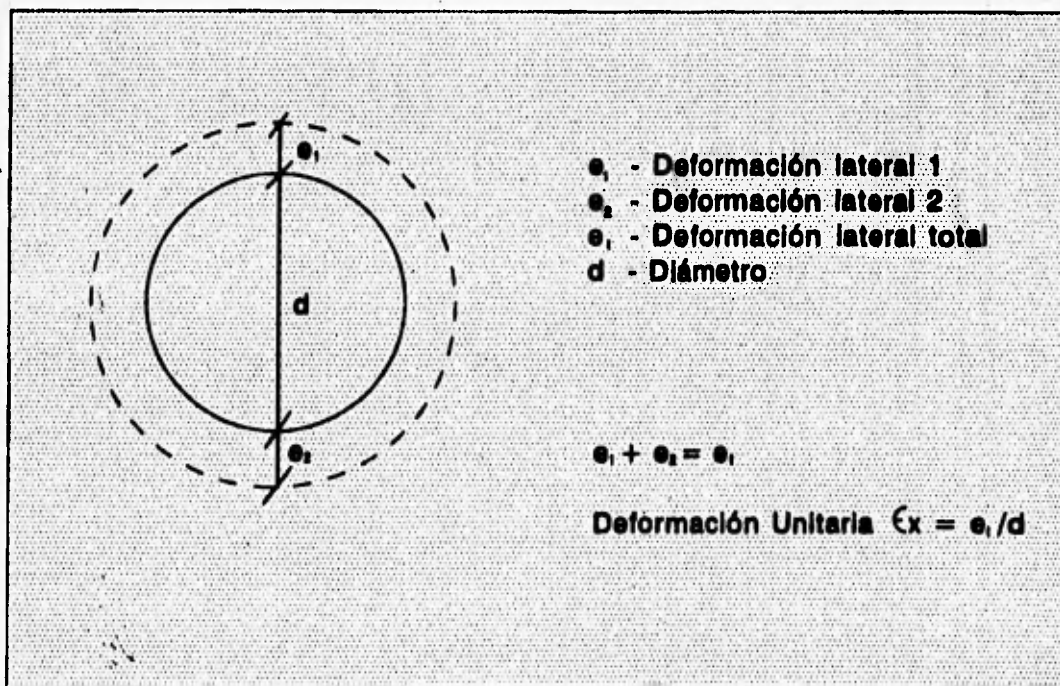


Fig 7 *Deformación unitaria transversal.*

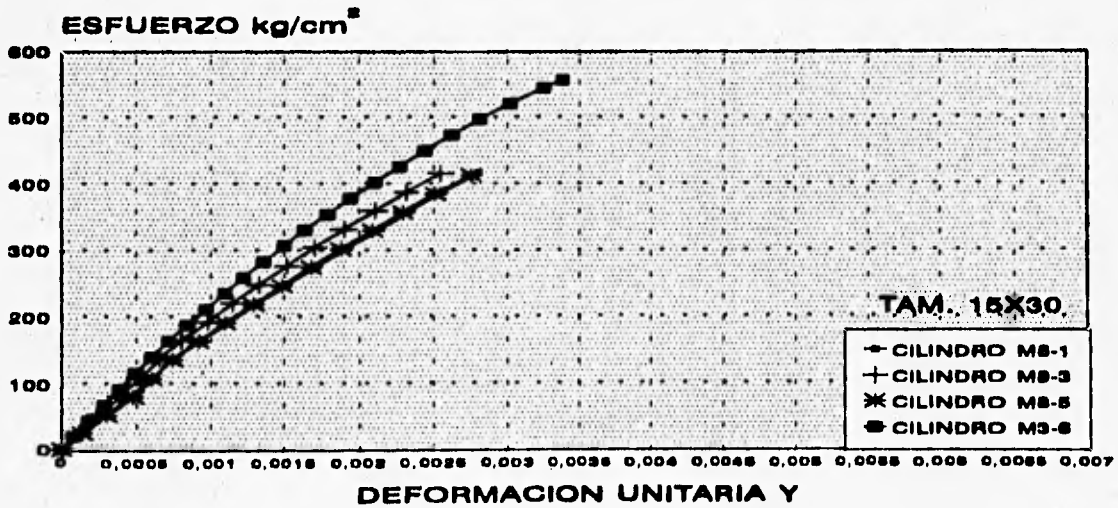
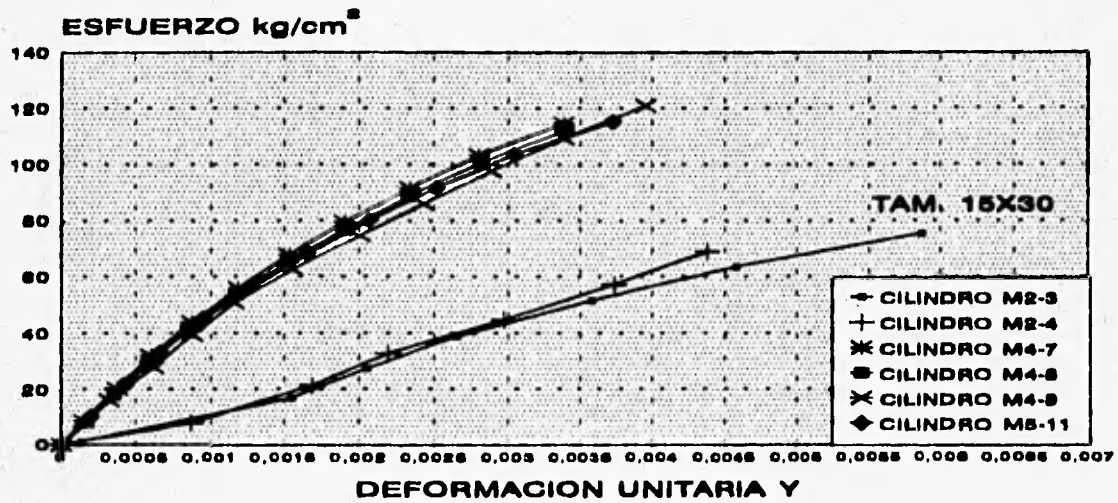
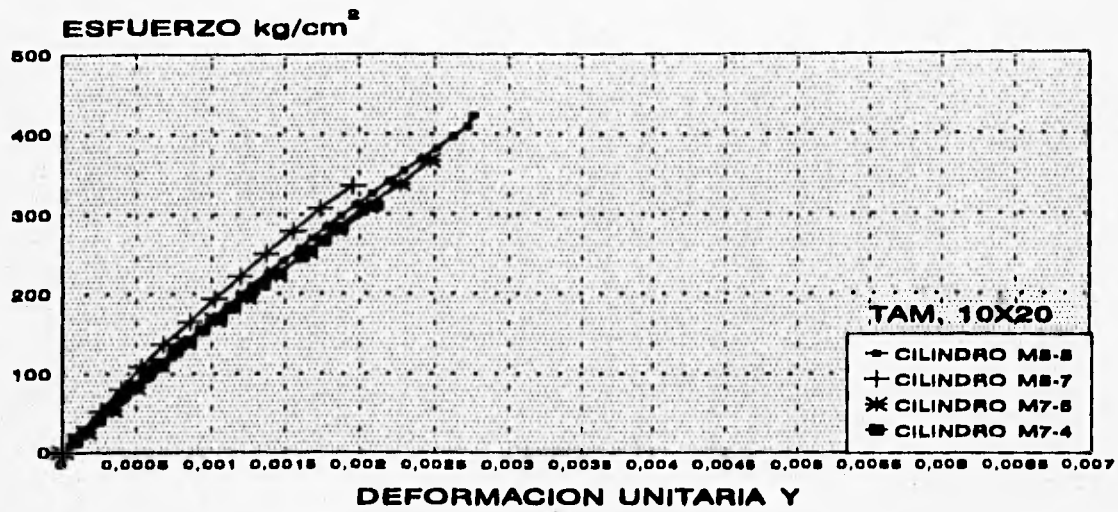


Fig 8 Curvas Esfuerzo-Deformación axial, correspondientes a los cilindros de las rocas dispersas.

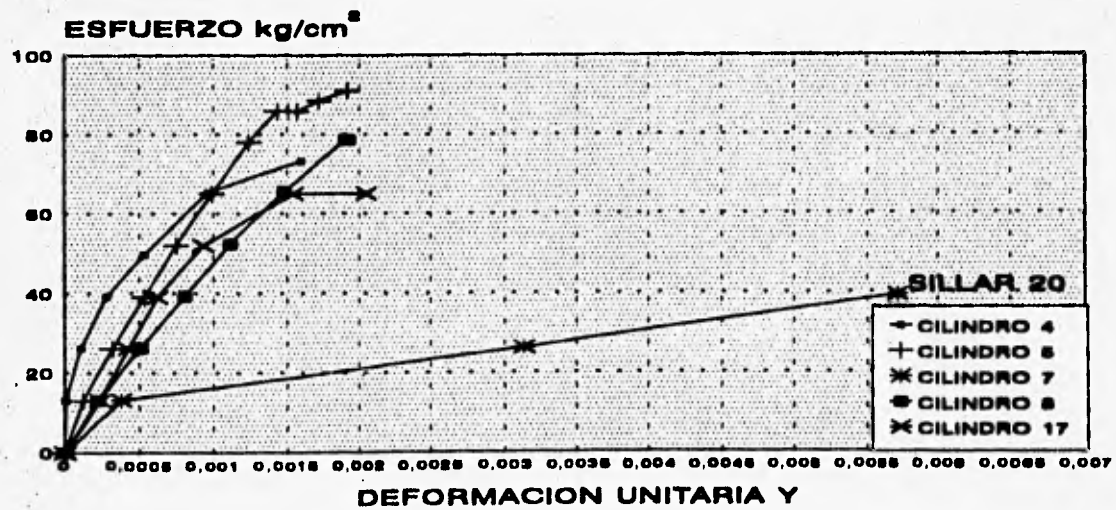
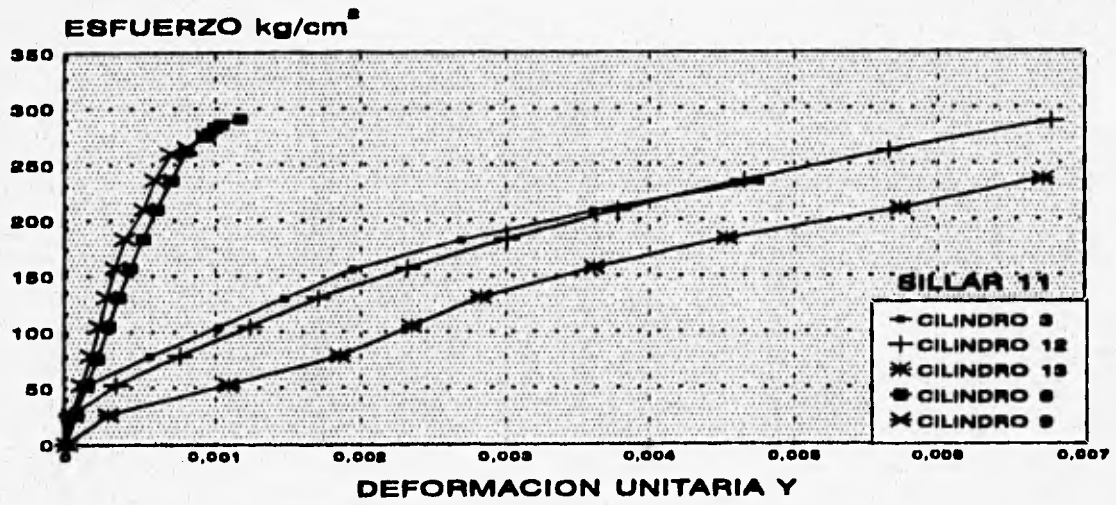
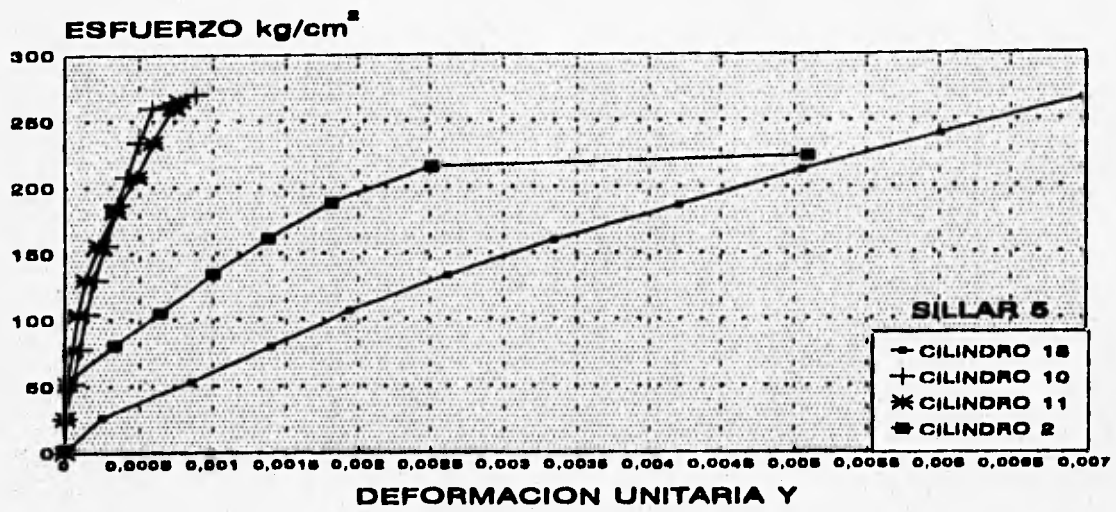


Fig 9 Curvas Esfuerzo-Deformación axial, correspondientes a los cilindros de la columna D-5.

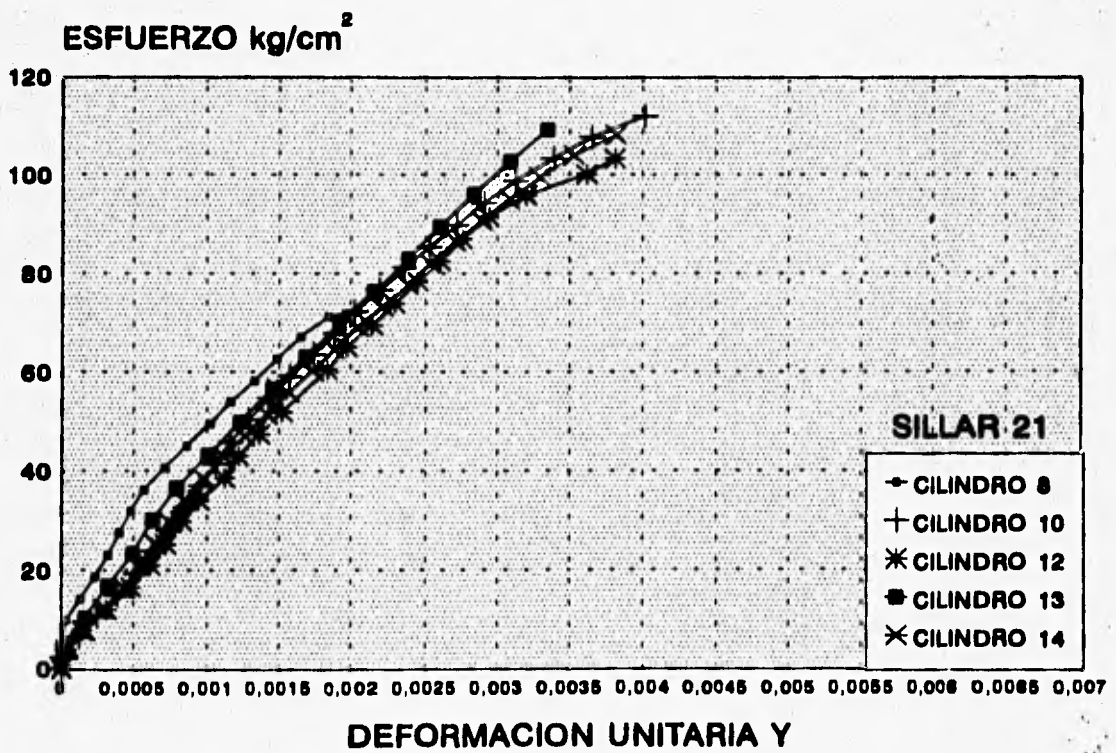
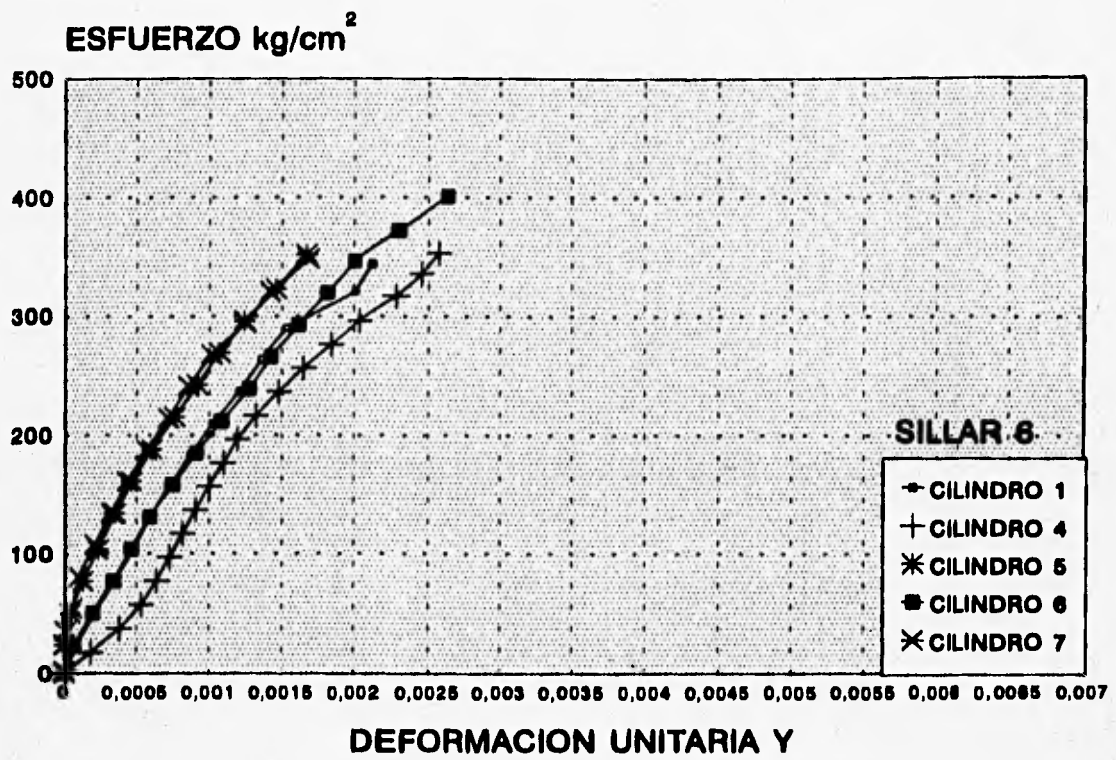


Fig 10 Curvas Esfuerzo-Deformación axial, correspondientes a los cilindros de la columna D-7.

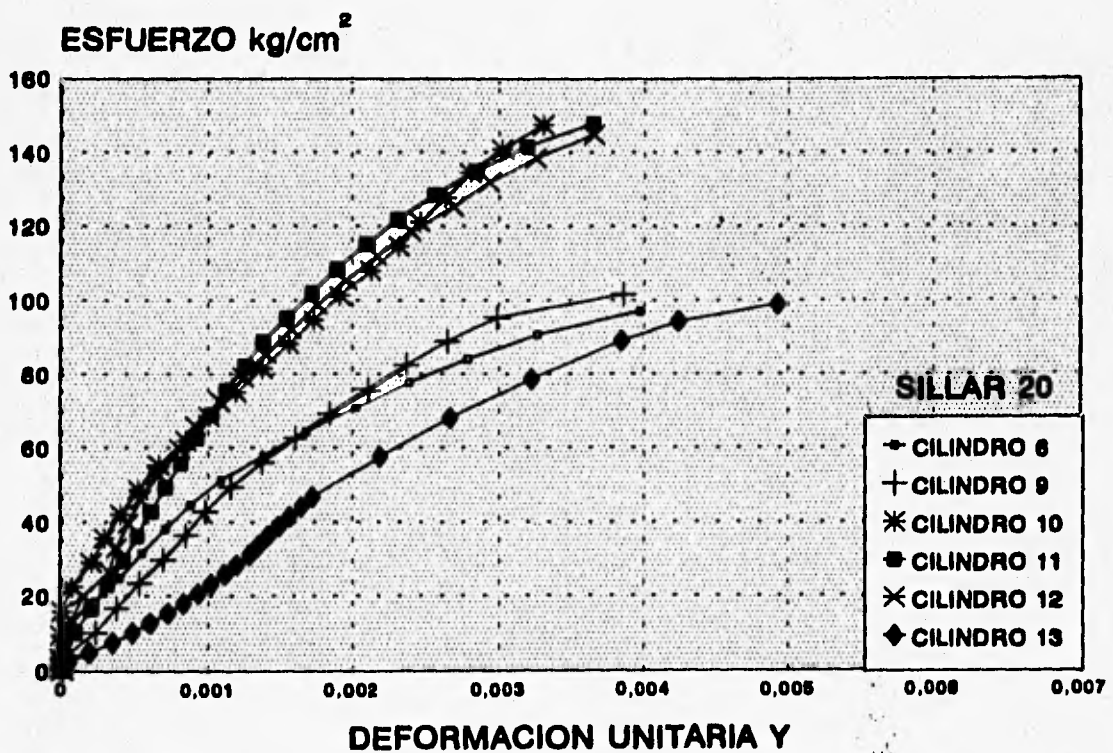
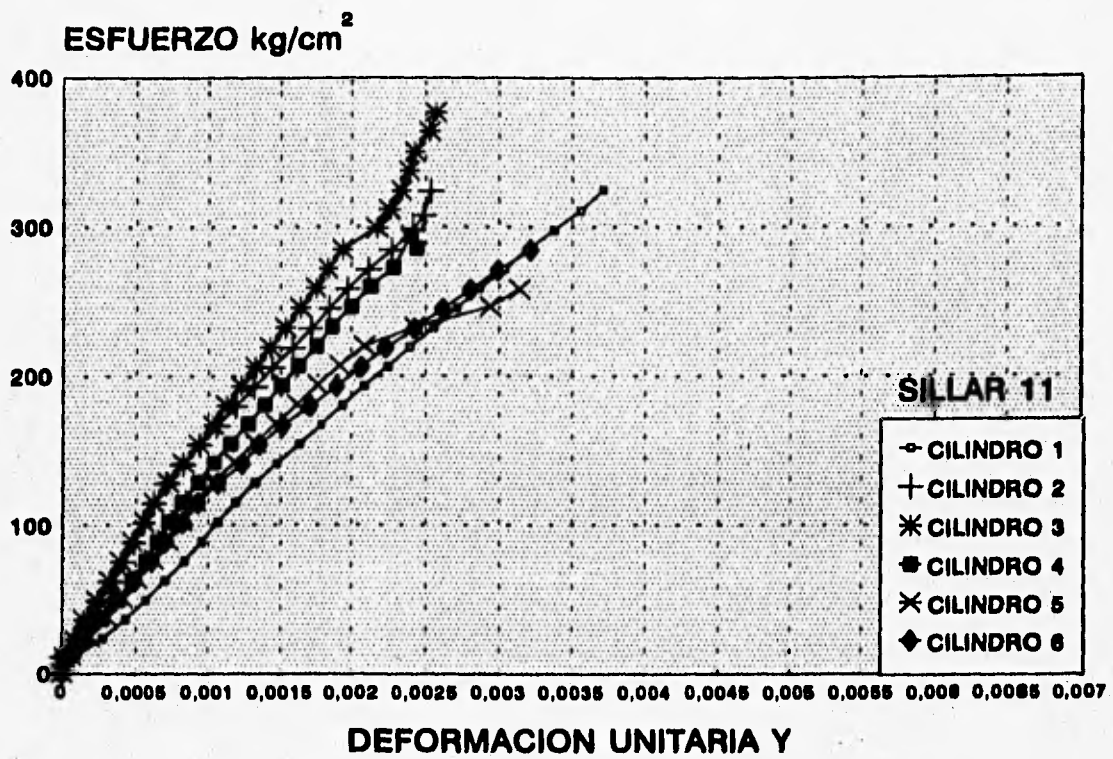


Fig 11 Curvas Esfuerzo-Deformación axial, correspondientes a los cilindros de la columna D-10.

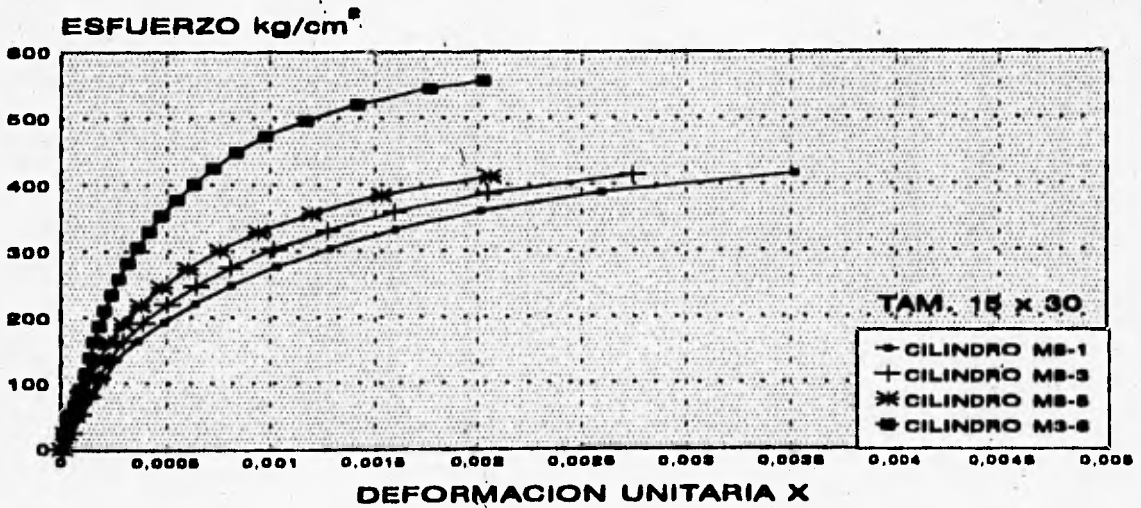
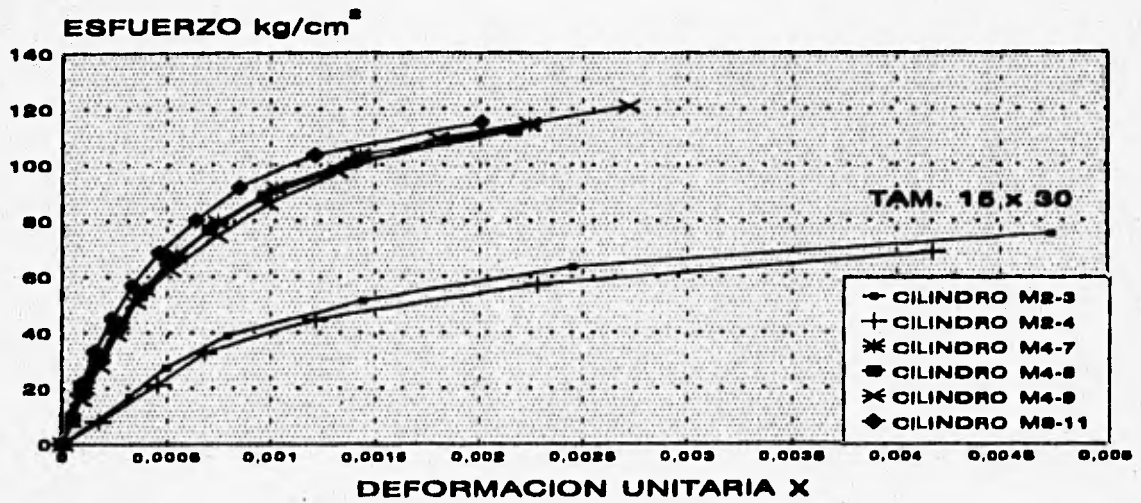
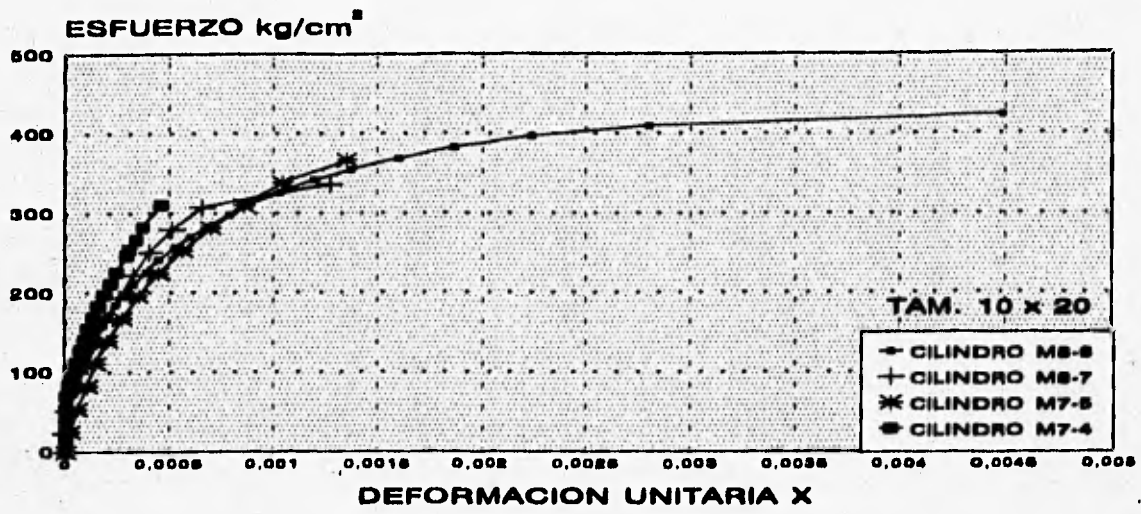


Fig 12 Curvas Esfuerzo-Deformación transversal, correspondientes a los cilindros de las rocas dispersas.

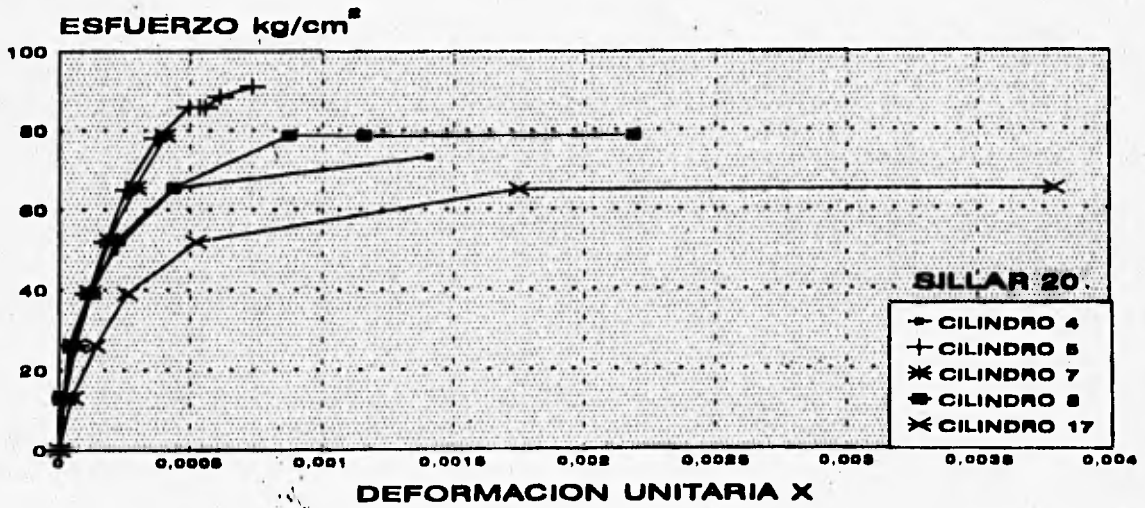
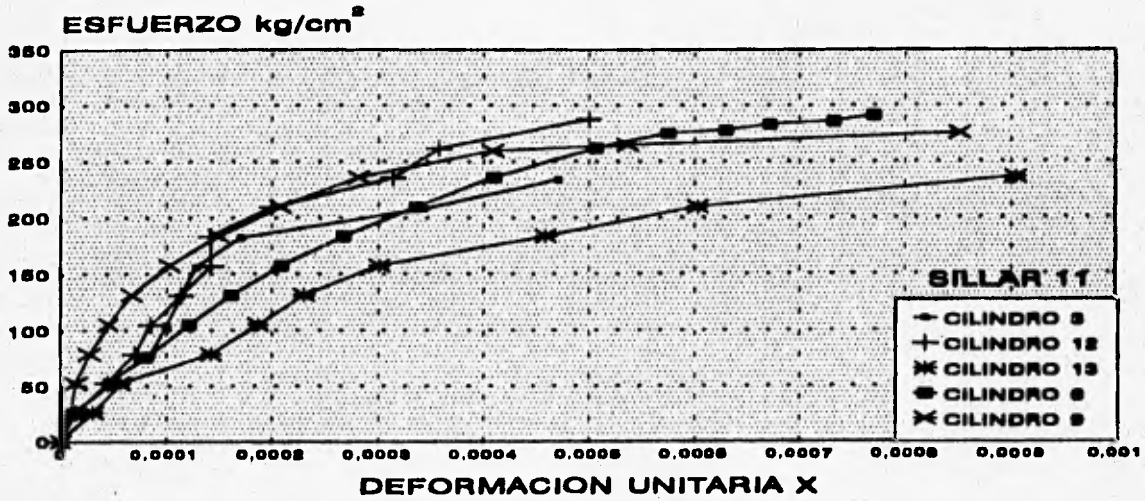
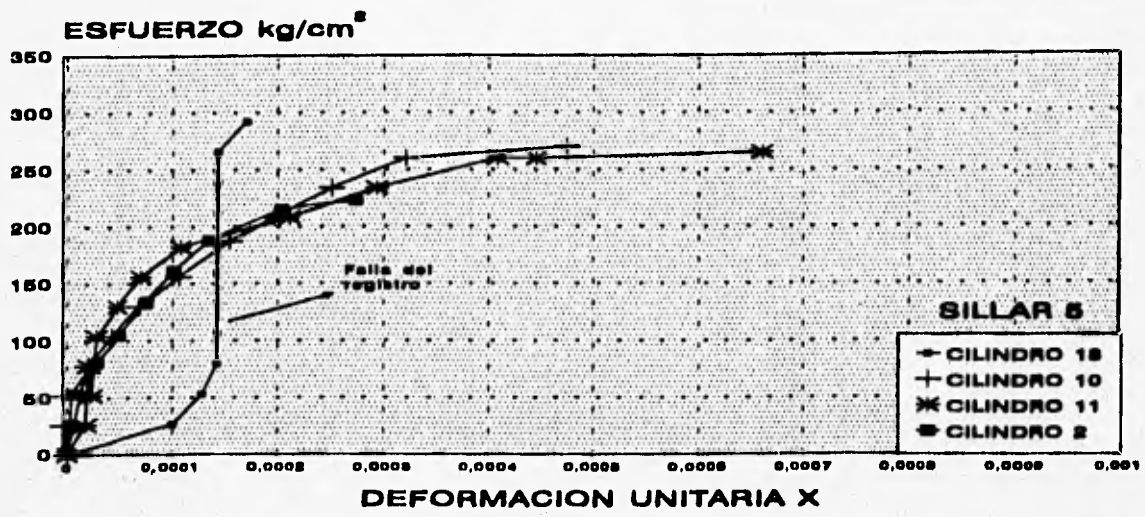


Fig 13 Curvas Esfuerzo-Deformación transversal, correspondientes a los cilindros de la columna D-5.

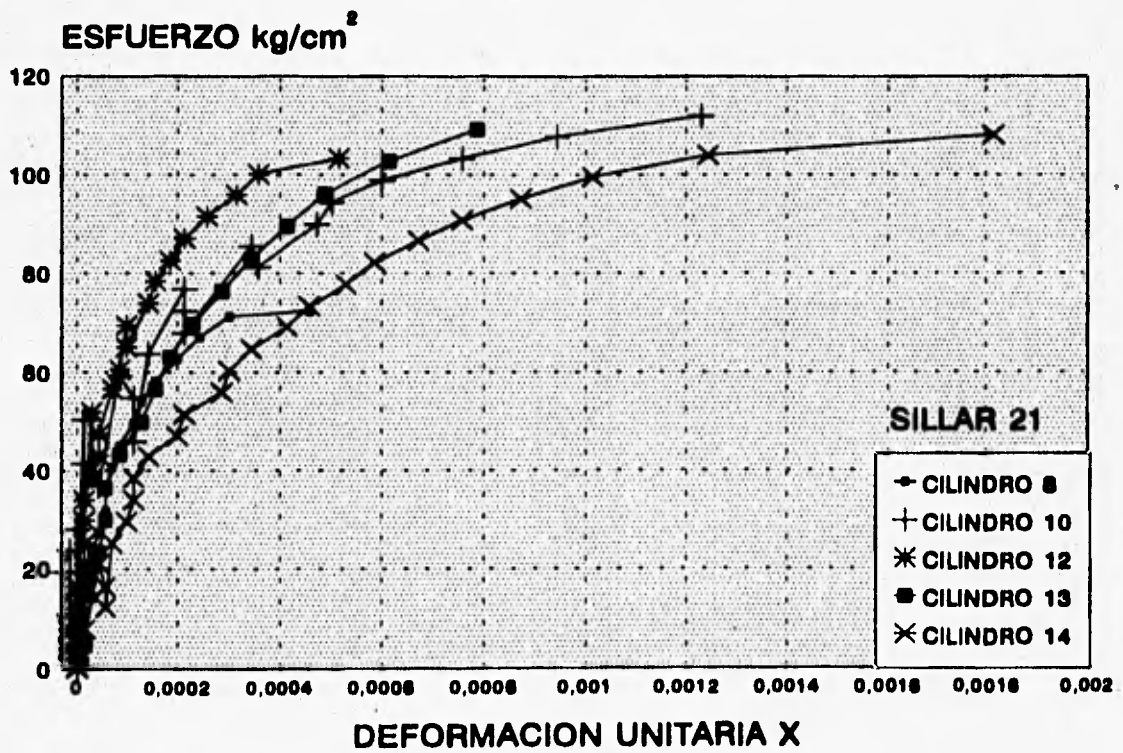
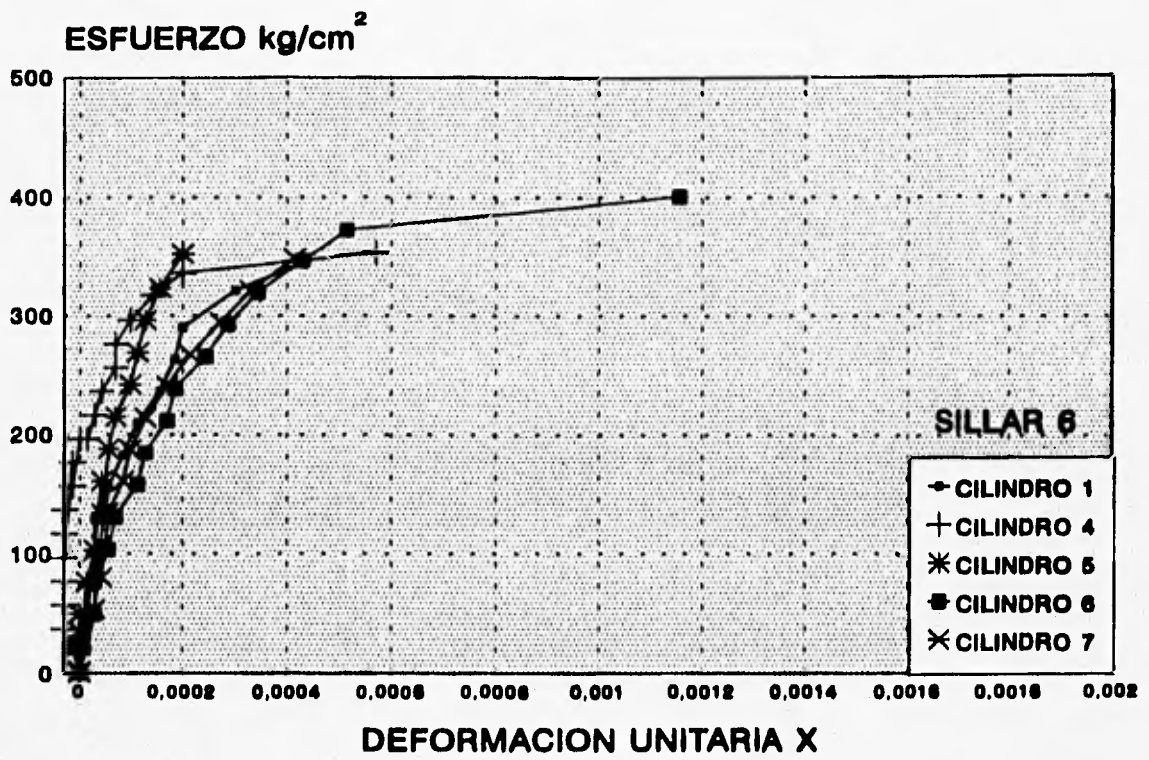


Fig 14 Curvas Esfuerzo-Deformación transversal, correspondientes a los cilindros de la columna D-7.

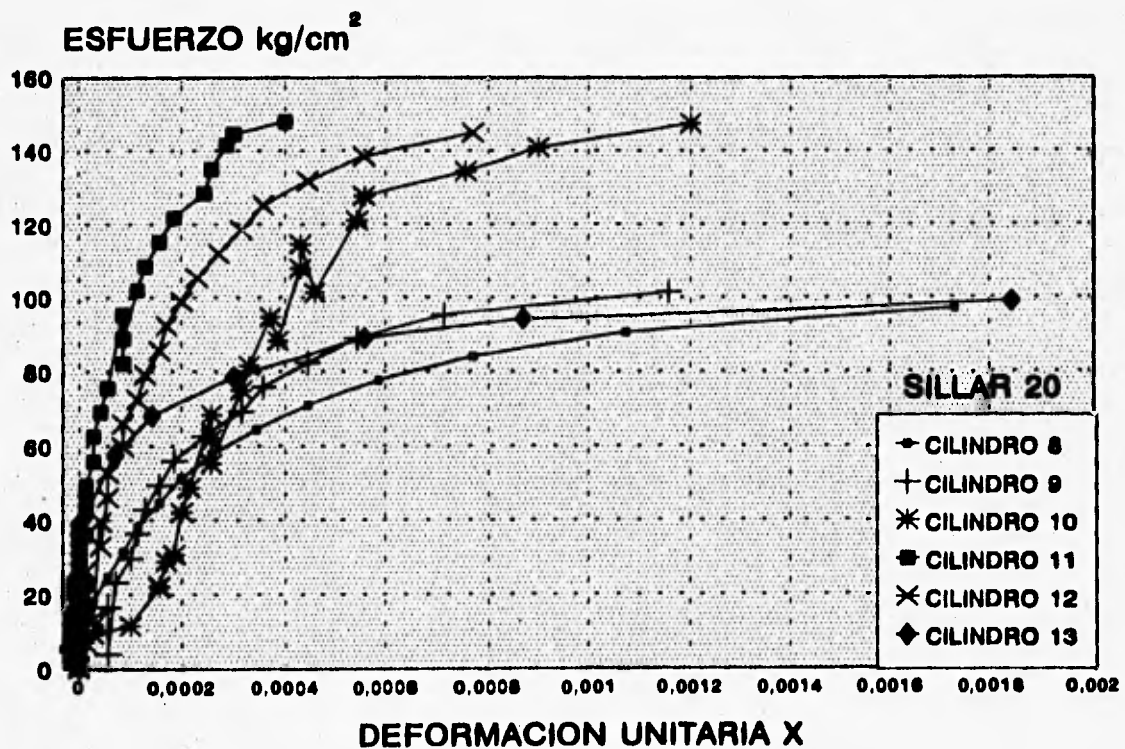
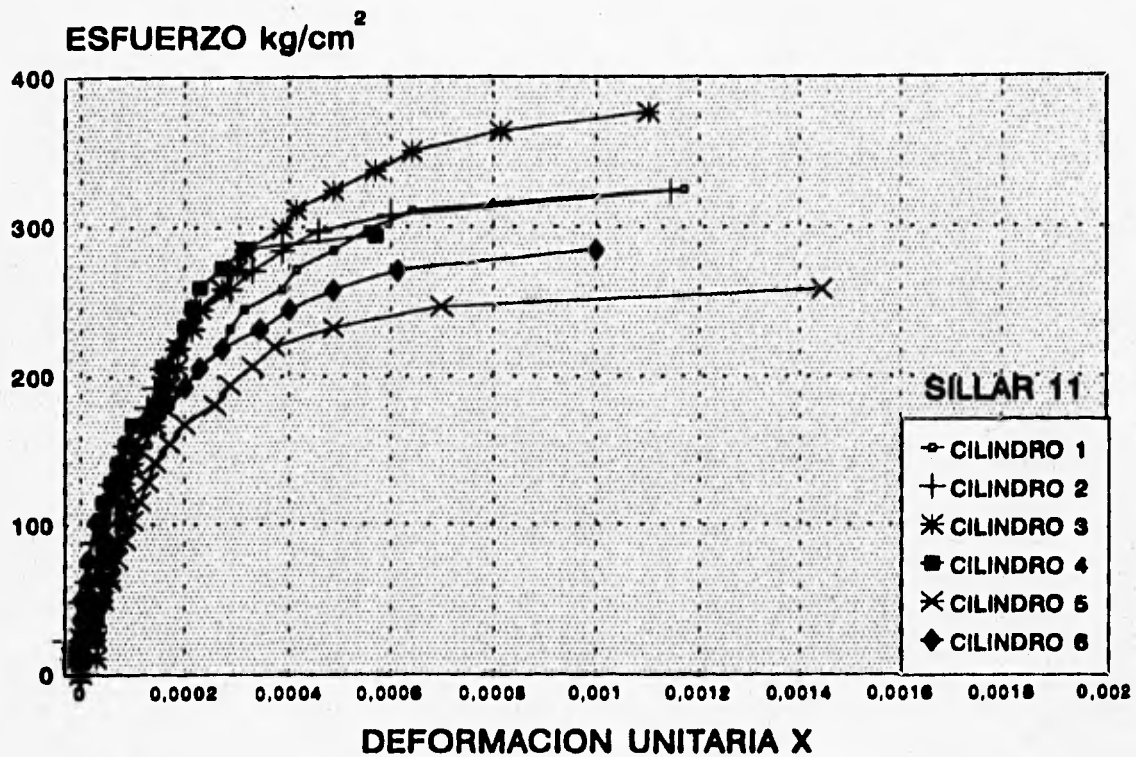


Fig 15 Curvas Esfuerzo-Deformación transversal, correspondientes a los cilindros de la columna D-10.

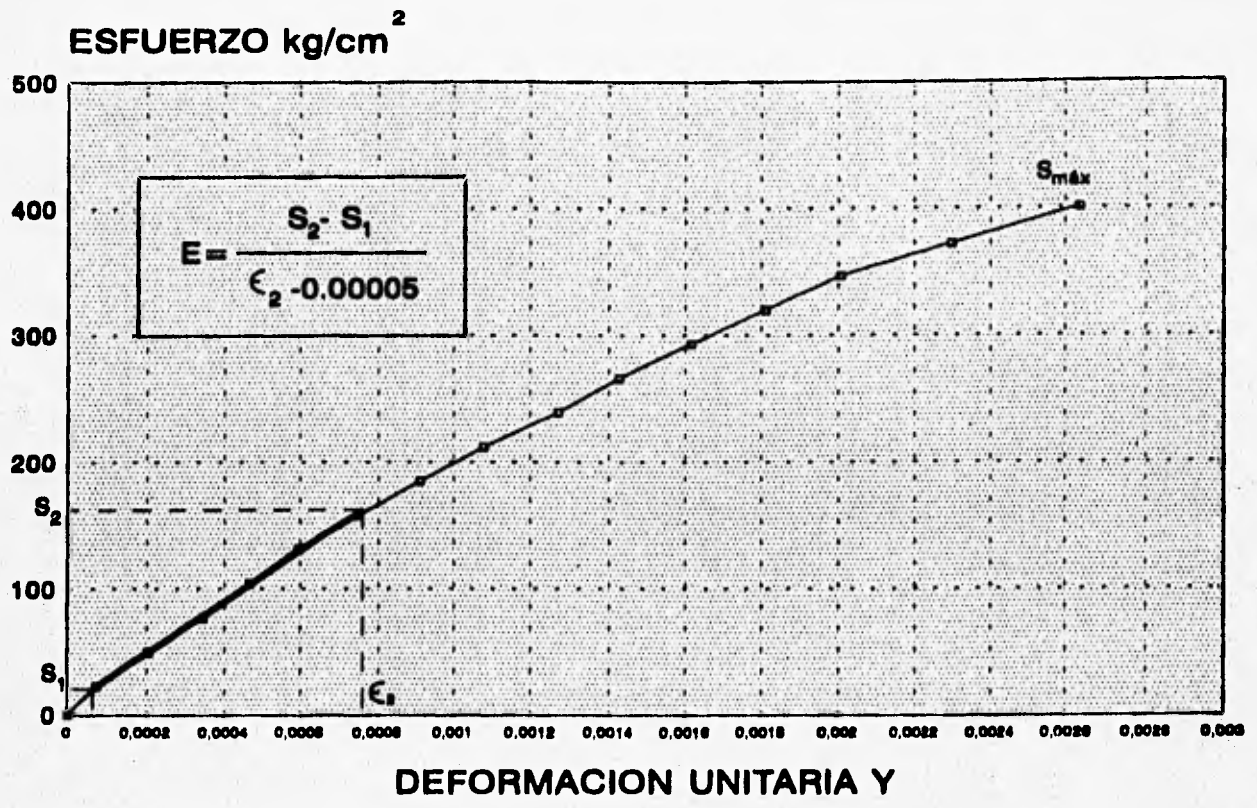


Fig 16 Módulo de elasticidad mediante el criterio del módulo secante.

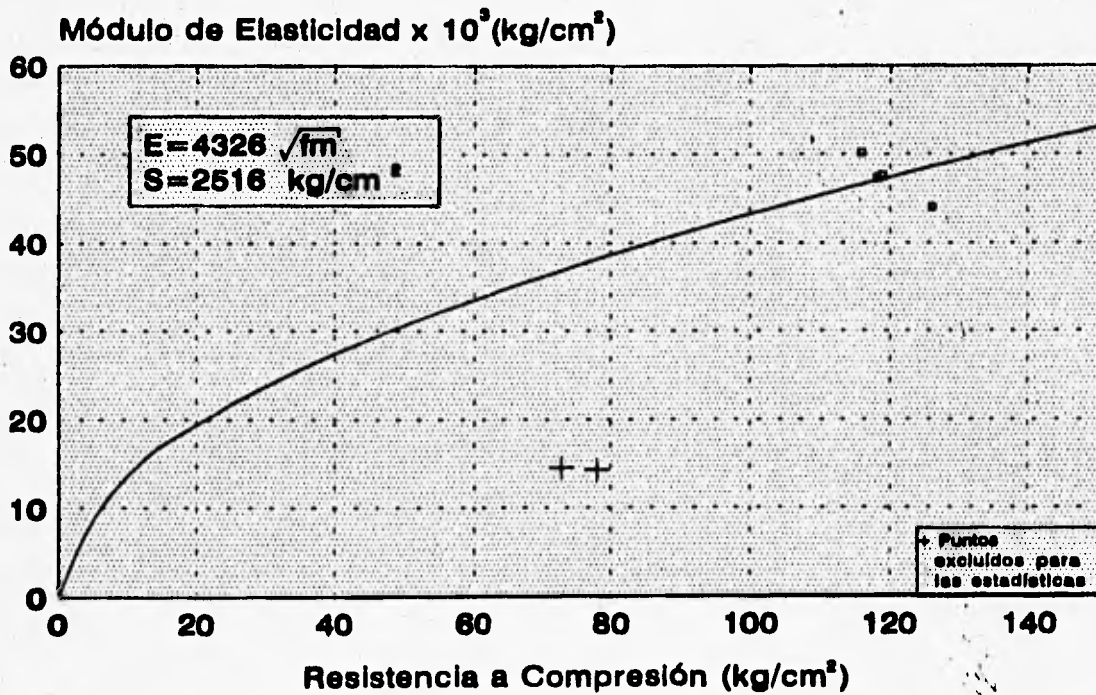
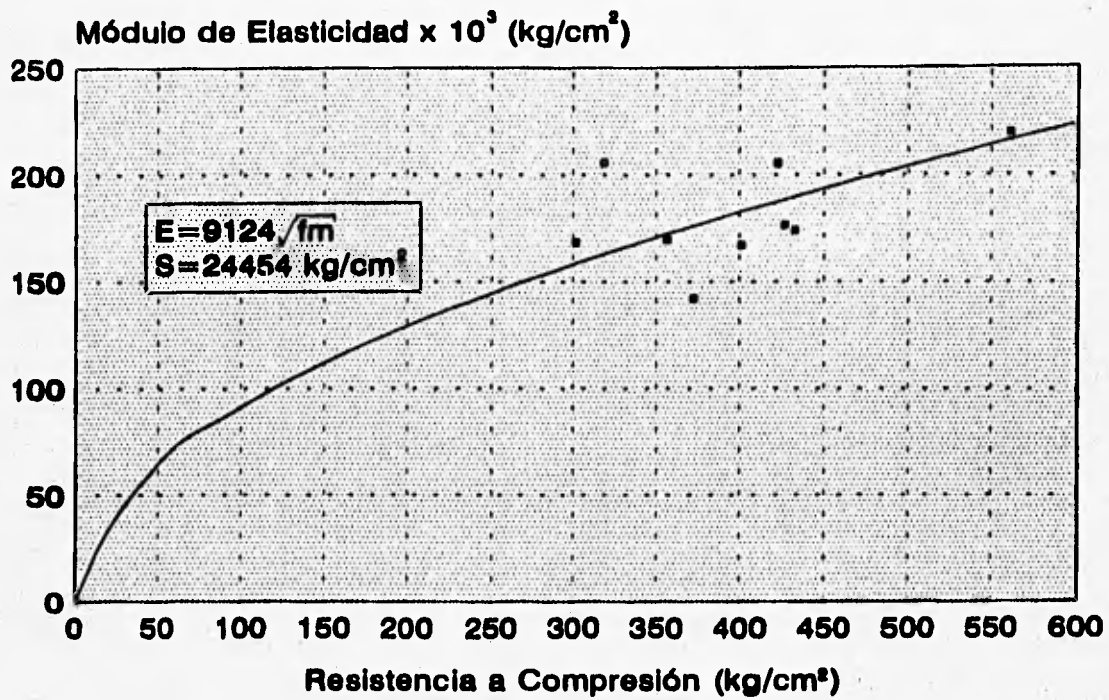


Fig 17 Relación módulo de elasticidad contra resistencia a compresión en cilindros de rocas dispersas.

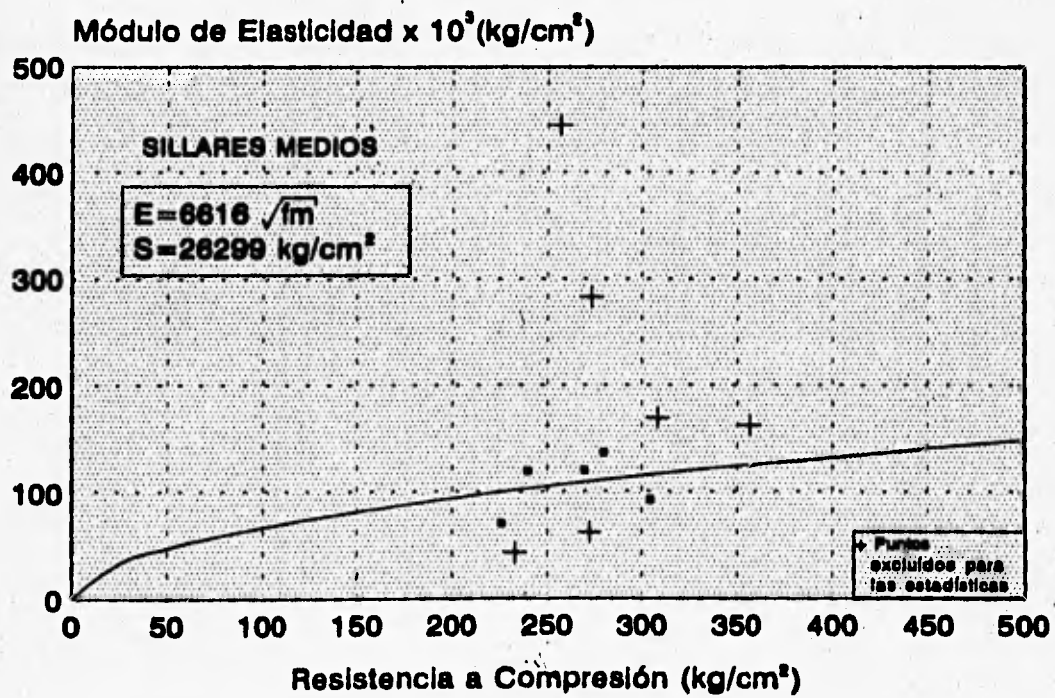
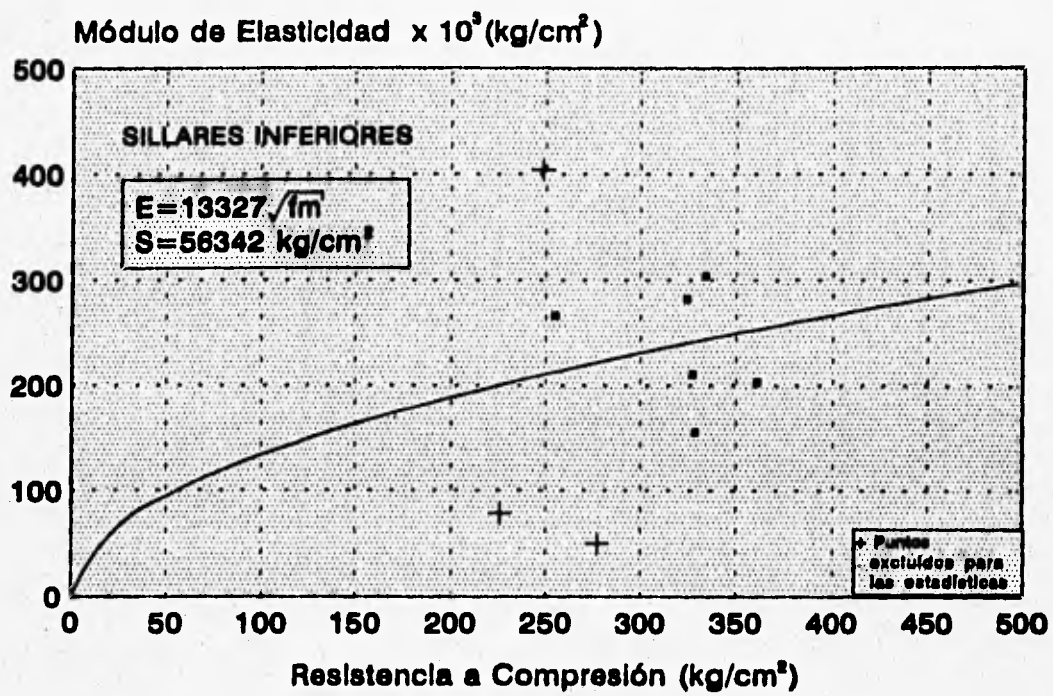


Fig 18 Relación módulo de elasticidad contra resistencia a compresión en cilindros provenientes de columnas.

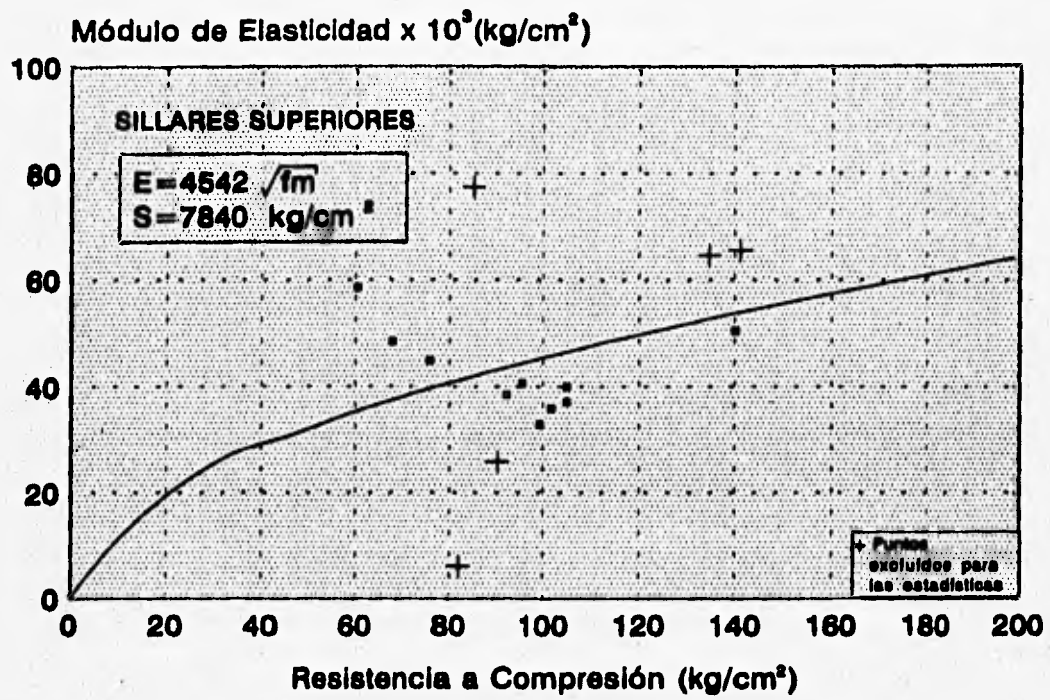


Fig 19 Relación módulo de elasticidad contra resistencia a compresión de cilindros provenientes de columnas.

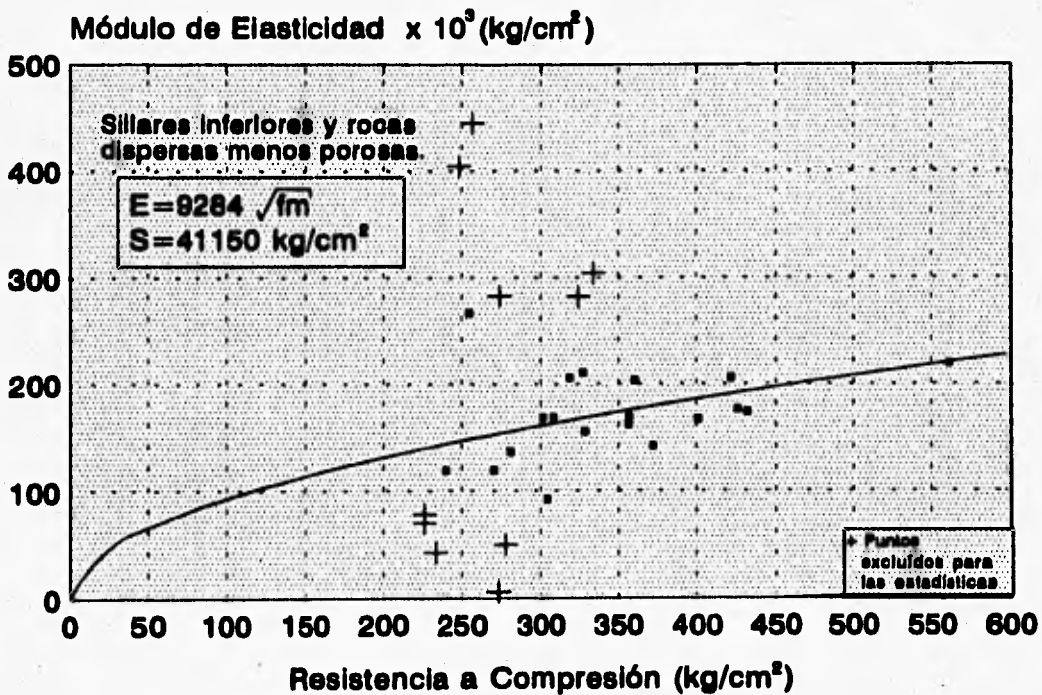
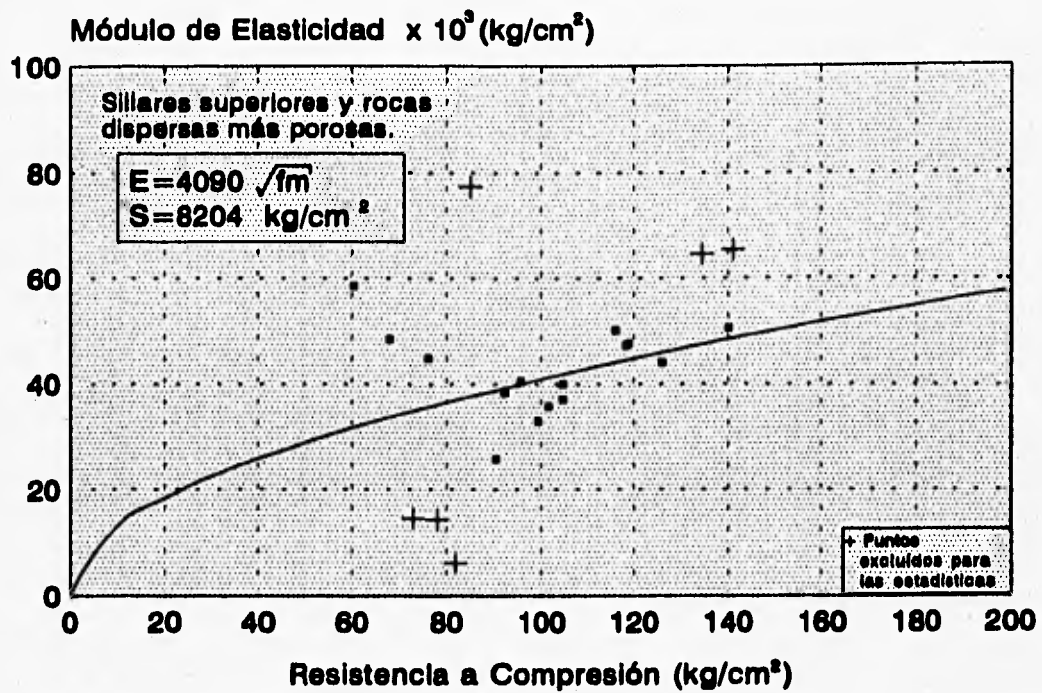


Fig 20 Relación módulo de elasticidad contra resistencia a compresión en los dos tipos de cantera encontrados.

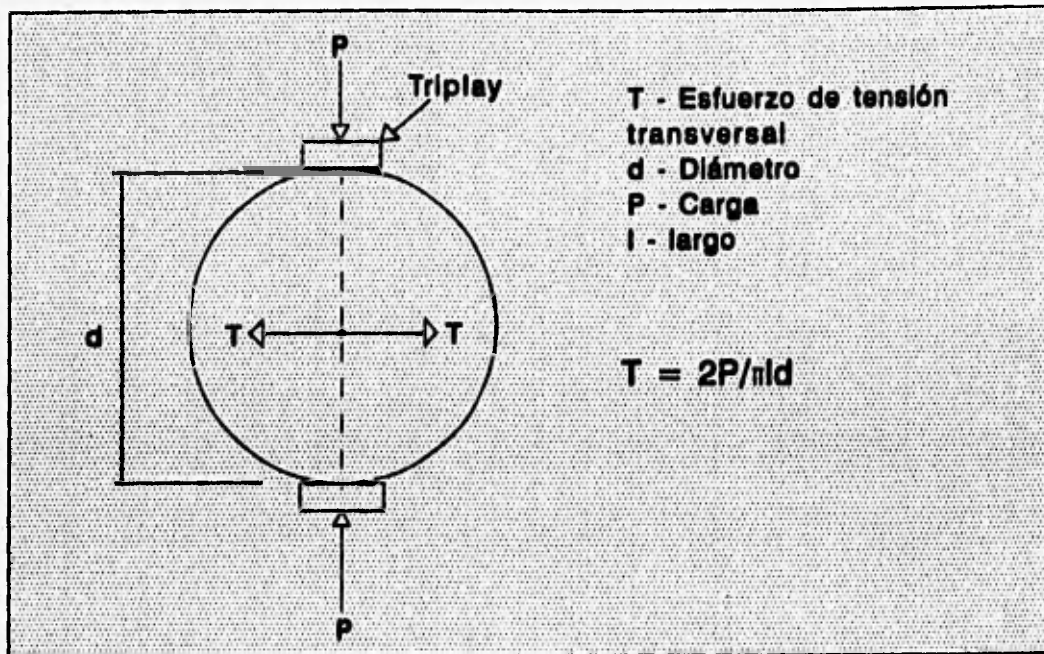


Fig 21 Cilindro a compresión lineal diametral (tensión indirecta).

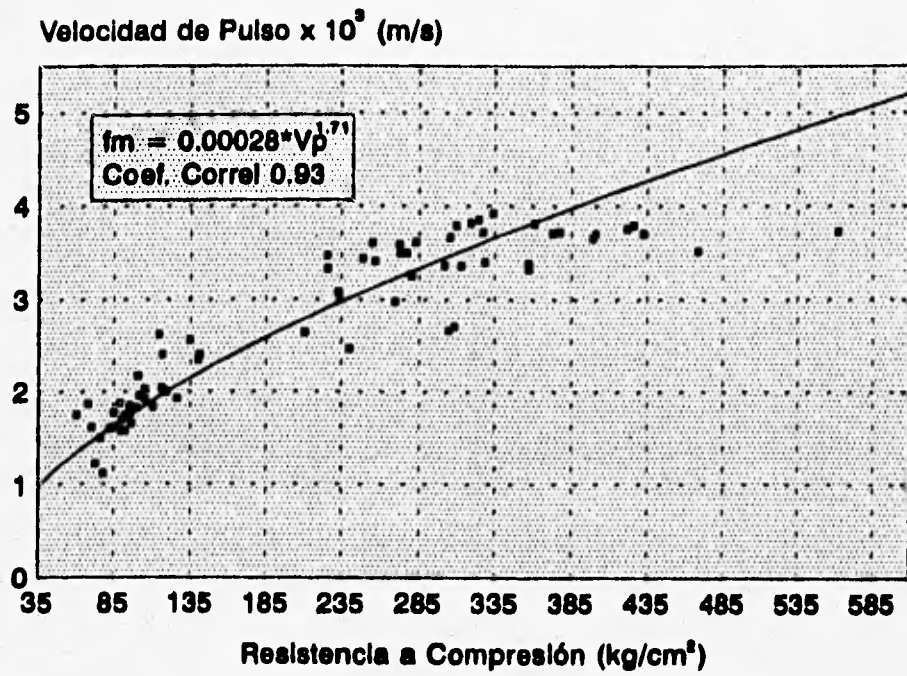


Fig 23 Relación resistencia a compresión contra velocidad de pulso.

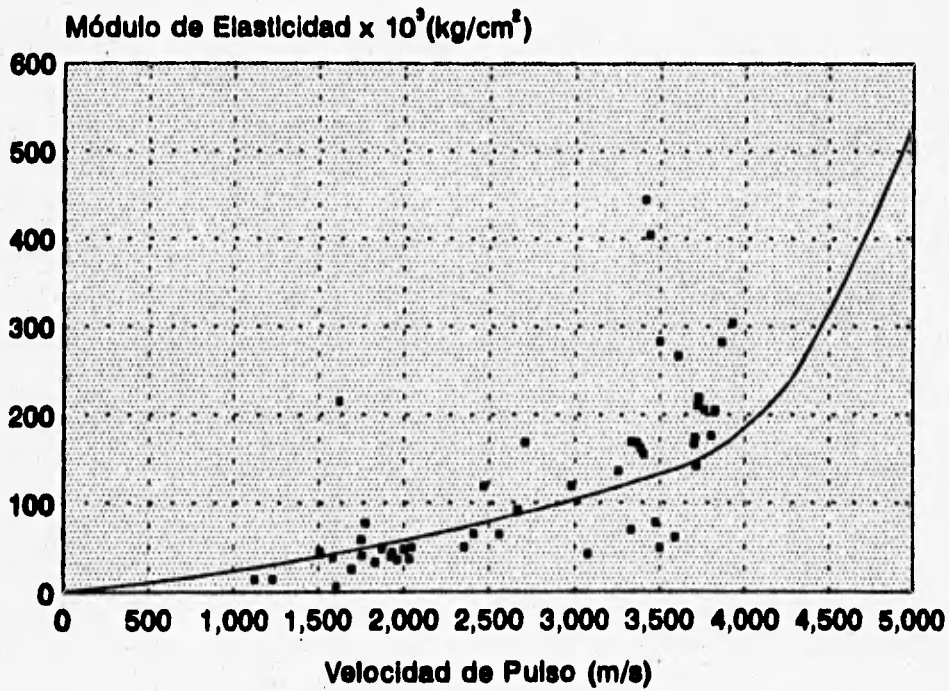


Fig 24 Relación módulo de elasticidad contra velocidad de pulso.

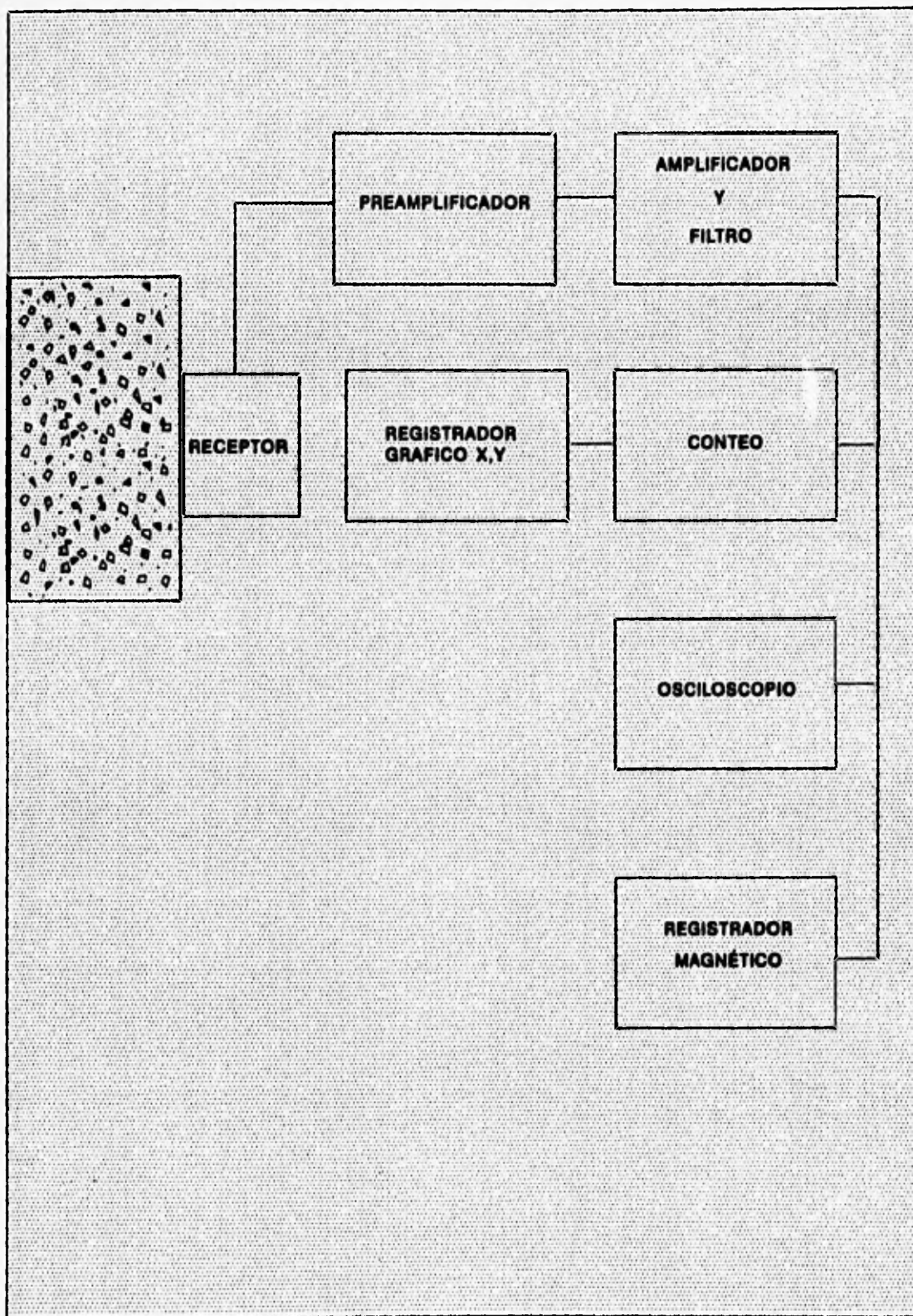


Fig 25 Esquema de la cadena de Emisión Acústica.

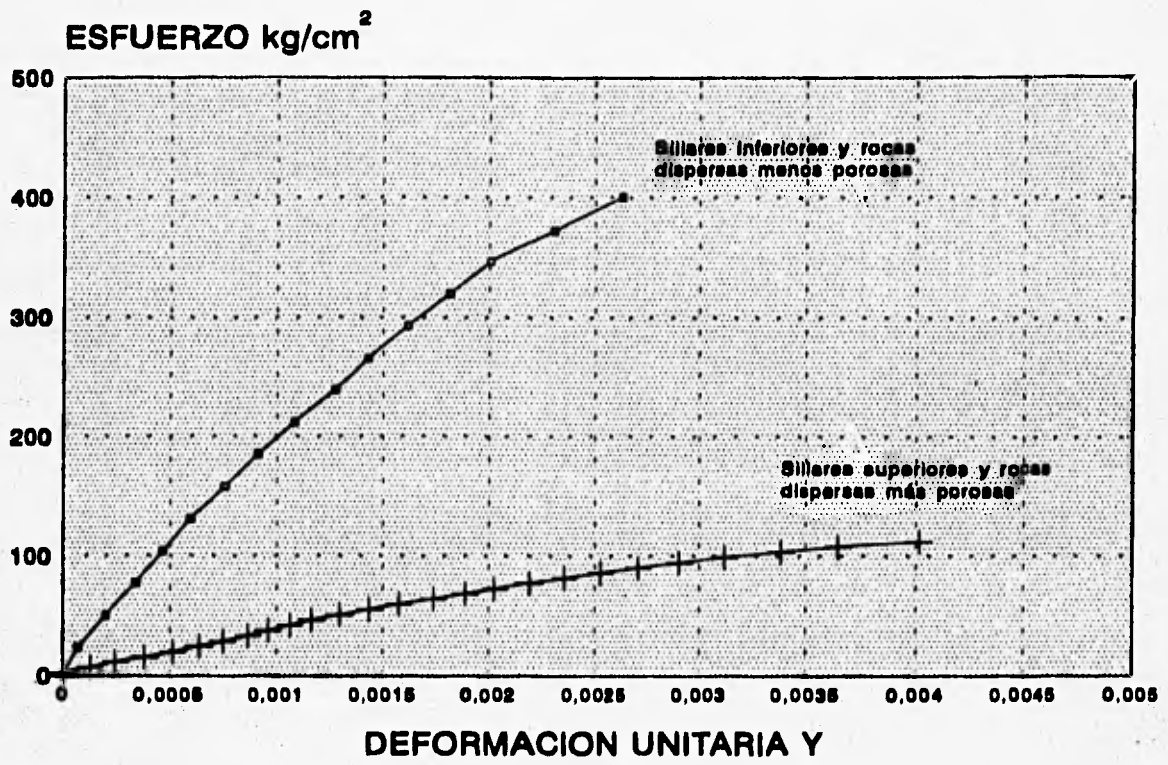


Fig 26 Curvas típicas esfuerzo-deformación.

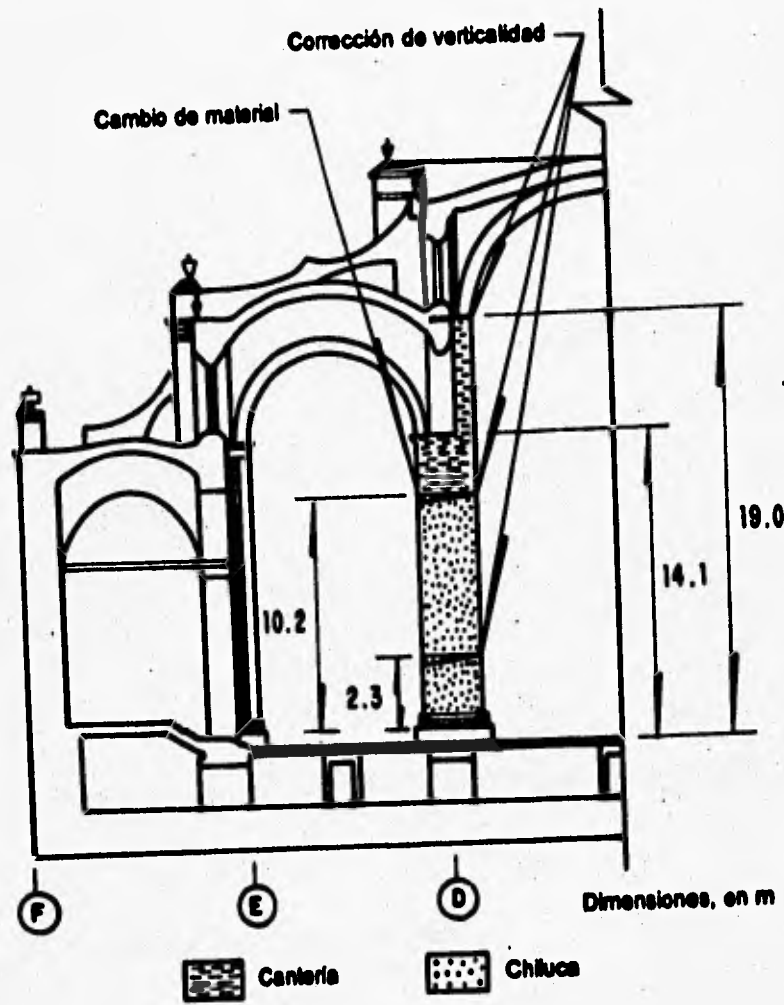


Fig 27 *Cambio de material en las columnas.*

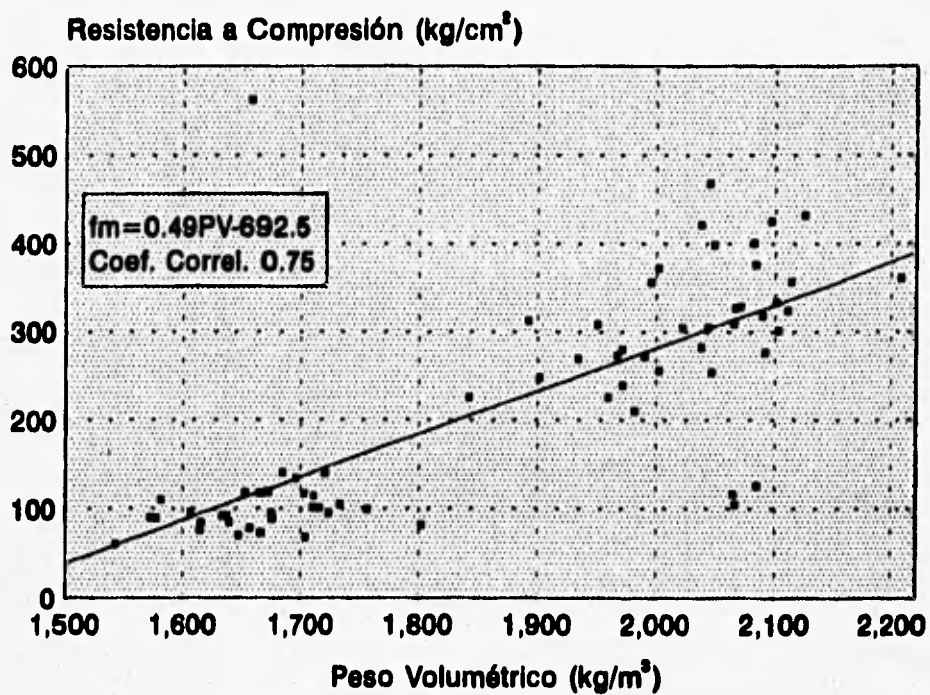


Fig 28 Relación resistencia a compresión contra peso volumétrico.

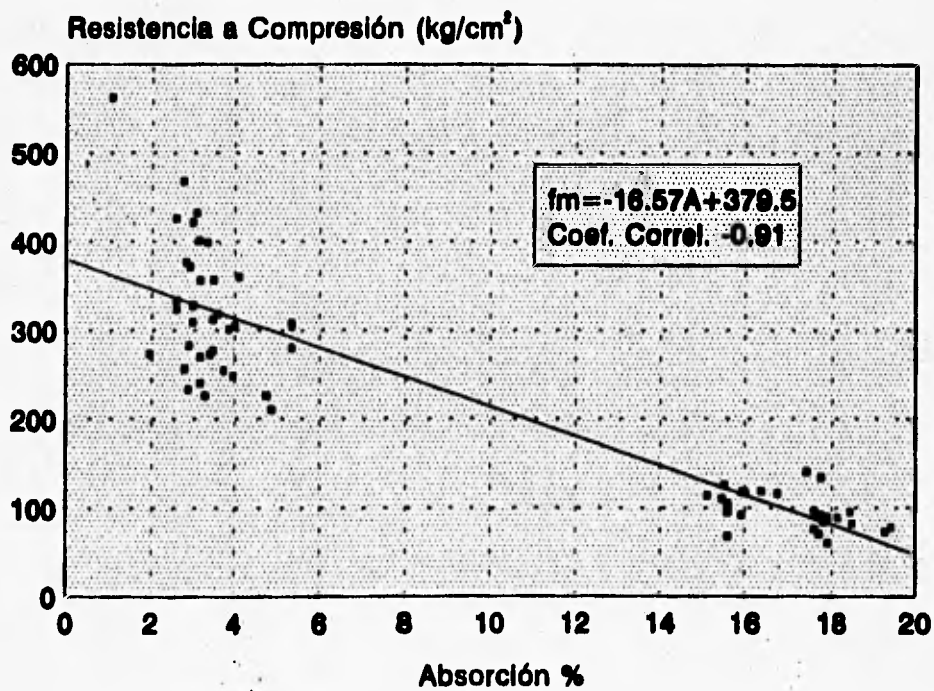


Fig 29 Relación resistencia a compresión contra absorción.

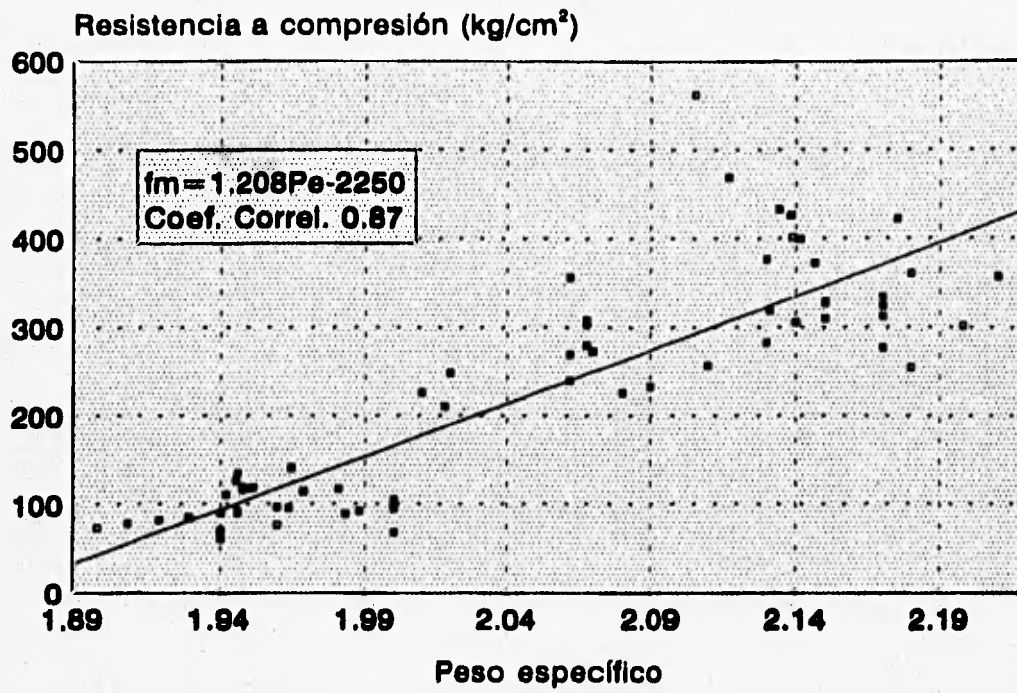


Fig 30 *Relación resistencia a compresión contra peso específico.*