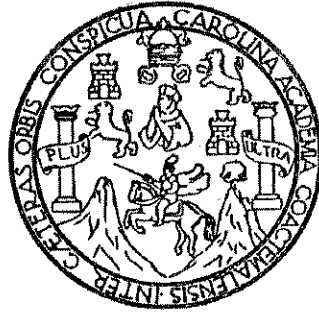


UNIVERSIDAD SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS AL ANÁLISIS EN TRES  
DIMENSIONES DEL ESTADO DE ESFUERZOS PARA UNA UNIDAD DE BLOCK

TESIS

Presentada a la Junta Directiva de la  
Facultad de Ingeniería

por:

LUIS BERNARDO BALCÁRCEL LÓPEZ

Al conferírsele el Título de

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 1997

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central

(4139)  
19

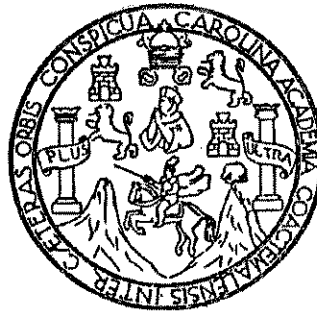
HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su Consideración mi trabajo de tesis titulado:

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS AL ANÁLISIS EN TRES DIMENSIONES DEL ESTADO DE ESFUERZOS PARA UNA UNIDAD DE BLOCK.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 15 de noviembre de 1995

*Luis Bernardo Balcárcel L.*  
Luis Bernardo Balcárcel López.



UNIVERSIDAD SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

Decano: Ing. Herbert René Miranda Barrios  
Vocal Primero: Ing. Miguel Ángel Sánchez Guerra  
Vocal Segundo: Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano  
Vocal Tercero: Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez  
Vocal Cuarto: Br. Víctor Rafael Lobos Aldana  
Vocal Quinto: Br. Wagner Gustavo López Cáceres  
Secretario: Ing. Gilda Marina Castellanos Baiza de Illescas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN  
GENERAL PRIVADO

Decano: Ing. Julio Ismael González Podszueck  
Examinador: Ing. Buenaventura Coronado Castillo  
Examinador: Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Examinador: Ing. Francisco Javier Quiñones de La Cruz  
Secretario: Ing. Francisco Javier González López


Guatemala, 24 de Junio de 1997.

Ingeniero  
Ricardo Ibarra Menéndez  
Jefe del Area de Ingeniera Estructural  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos

Ingeniero Ibarra:

Por medio de la presente, me permito informarle que he revisado el trabajo de tesis del estudiante LUIS BERNARDO BALCARCEL LOPEZ, titulado APLICACION DEL METODO DE ELEMENTOS FINITOS AL ANALISIS EN TRES DIMENSIONES DEL ESTADO DE ESFUERZOS PARA UNA UNIDAD DE BLOCK, previo a optar al título de Ingeniero Civil, habiéndole encontrado completamente satisfactorio.

Sin otro particular, me suscribo de usted atentamente.

ID Y ENSEÑAD A TODOS  
  
Ing. Milton Matus Izaguirre.  
ASESOR

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central



**FACULTAD DE INGENIERIA**

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Postgrado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 18  
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, julio 28 de 1997

Ingeniero  
Jack Douglas Ibarra,  
Director de la Escuela  
de Ingeniería Civil,  
Facultad de Ingeniería,  
U S A C.

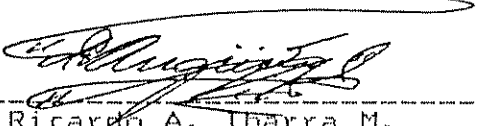
Señor Director

Por medio de la presente informo a usted, que he revisado el trabajo de tesis titulado APLICACION DEL METODO DE ELEMENTOS FINITOS AL ANALISIS EN TRES DIMENSIONES DEL ESTADO DE ESFUERZOS PARA UNA UNIDAD DE BLOCK, elaborado por el estudiante universitario Luis Bernardo Balcarcel López y asesorado por el Ing. Milton Matus Izaguirre.

Habiendo determinado que dicho trabajo cumple con lo establecido, y que será de mucha utilidad para estudiantes y profesionales de la ingeniería civil, el suscrito le da su aprobación.

Sin otro particular, me suscribo de usted,

Atentamente,

  
-----  
Ing. Ricardo A. Ibarra M.  
Coordinador Area de Estructuras



**FACULTAD DE INGENIERIA**

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Milton Matus Izaguirre y del Jefe del Departamento de Estructuras Ing. Ricardo Augusto Ibarra M., del trabajo de tesis del estudiante Luis Bernardo Balcárcel López, titulado APLICACION DEL METODO DE ELEMENTOS FINITOS AL ANALISIS EN TRES DIMENSIONES DEL ESTADO DE ESFUERZOS PARA UNA UNIDAD DE BLOCK, da por este medio su aprobación a dicha tesis.

  
Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano



Guatemala, octubre de 1,997.

JDIS/bbdeb.



**FACULTAD DE INGENIERIA**

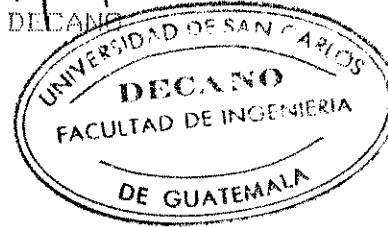
Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano, al trabajo de tesis **APLICACION DEL METODO DE ELEMENTOS FINITOS AL ANALISIS EN TRES DIMENSIONES DEL ESTADO DE ESFUERZOS PARA UNA UNIDAD DE BLOCK**, del estudiante Luis Fernando Balcárcel López, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:

Ing. Herbert René Miranda Barrios



Guatemala, octubre de 1, 997

/bbdeb.

ACTO QUE DEDICO A:

AD MAJOREM DEI GLORIAM

MIS PADRES:

ING. LUIS ALFREDO BALCARCEL G.  
YOLANDA LÓPEZ DE BALCARCEL.

MI HERMANA:

IRINA ELIZABETH BALCARCEL L.

MI ABUELITA:

CARMEN DE BALCARCEL

MIS TÍOS Y PRIMOS:

CON APRECIO

MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS



AGRADECIMIENTO:

De esta forma pretendo demostrar mi agradecimiento a las personas que me ayudaron en la realización de este trabajo, ya que sin su contribución y apoyo desinteresado no hubiese sido posible la realización del mismo:

Ing. Milton Matus Izaguirre.

Ing. Juan Miguel Rubio.

Ing. Raúl Aguilar.

Ing. Alvaro Dardon.

Sr. Juan Carlos Yupe.

A todos ellos dedico este pequeño reconocimiento.

## ÍNDICE

	Pag.
Índice	i
Lista de Ilustraciones y Gráficas	ii
Lista de cuadros	iii
Glosario	iv
Introducción	v
Capítulo 1	
1.- Principio del Método de Elementos Finitos	1
1.1.- Terminología	1
1.2.- Discretización de los Elementos	1
1.3.- Tipos de Elementos	2
1.4.- Ensamble de la Matriz de Rigidez de la Estructura	2
Capítulo 2	
2.- Desarrollo del Modelo	4
2.1.- Definición del Problema	4
2.2.- Modelo de la Estructura	6
2.3.- Entrada Básica de Datos	8
2.4.- Validación de los Datos de Entrada	8
Capítulo 3	
3.- Aplicación del Método de Elementos Finitos al Análisis en Tres Dimensiones del Estado de Esfuerzos para una Unidad de Block	10
3.1.- Descripción del Programa SAP90	10
3.2.- Estudio Experimental	11
3.2.1.- Ensayo para obtener el Módulo de Elasticidad	11
3.2.2.- Ensayo a compresión para establecer en forma cualitativa los estados de esfuerzos en la unidad de Block	14
3.2.3.- Ensayo a corte para establecer en forma cuali- tativa los estados de esfuerzos en la unidad de Block	24
3.3.- Estudio Analítico	32
3.3.1.- Generación del Modelo	32
3.3.1.1.- Definición del Problema	32
3.3.1.2.- Modelo de la Estructura	33
3.3.2.- Análisis por medio de el programa SAP90	38
3.3.2.1.- Entrada Básica de Datos	38
3.3.2.2.- Resultados Generados por el programa SAP90	41
3.4.- Discusión de Resultados	66
Conclusiones	vii
Recomendaciones	viii
Referencias	ix
Bibliografía	x

## Listado de Ilustraciones y Gráficas

	Pag.
Figura 1.1.- Numeración eficiente para generar el modelo	3
Figura 2.1.- Modelo de un talud a 90 grados, empleando el método de transición	7
Figura 3.1.- Forma de colocación de la pieza, y el medidor de deformaciones, para el ensayo de módulo de elasticidad	13
Figura 3.2.- Fotografía de cómo fue colocado el block a ensayar con carga de compresión	15
Figura 3.3.- Fotografía donde se muestran las grietas que aparecieron en el ensayo a compresión	16
Figura 3.4.- Figura que muestra las posiciones de las caras del block	17
Figura 3.5.- Grieta por carga de compresión en el primer block ensayado, cara B.	17
Figura 3.6.- Grieta por carga de compresión en el primer block ensayado, cara A	18
Figura 3.7.- Grieta por carga de compresión en el primer block ensayado, cara B	19
Figura 3.8.- Grieta por carga de compresión en el segundo block ensayado, cara A.	20
Figura 3.9.- Grieta por carga de compresión en el segundo block ensayado, cara B.	21
Figura 3.10.- Grieta por carga de compresión en el segundo block ensayado, cara A	22
Figura 3.11.- Grieta por carga de compresión en el segundo block ensayado, cara B	23
Figura 3.12.- Fotografía de como fue colocado el block a ensayar con carga de corte	25
Figura 3.13.- Grieta por carga de corte en el primer block ensayado, cara A.	26
Figura 3.14.- Grieta por carga de corte en el primer block ensayado, cara A	27
Figura 3.15.- Grieta por carga de corte en el primer block ensayado, cara B	28
Figura 3.16.- Grieta por carga de corte en el segundo block ensayado, cara B.	29
Figura 3.17.- Grieta por carga de corte en el segundo block ensayado, cara A	30
Figura 3.18.- Grieta por carga de corte en el segundo block ensayado, cara B	31
Figura 3.19.- Descripción de la geometría del block	34
Figura 3.20.- Diagramas de aplicación de cargas en los modelos	35
Figura 3.21.- Diagramas de aplicación de las restricciones en los modelos	35

Figura 3.22.- En la gráfica se muestra el modelo de la capa 1, con las medidas de los elementos y su numeración	36
Figura 3.23.- En la gráfica se muestra la numeración de los nodos superiores de la capa 1	37
Figura 3.24.- Modelo del block generado por el programa SAF90	57
Figura 3.25.- Deformación producida por la carga de compresión	57
Figura 3.26.- Gráfico de esfuerzos normales SXX, carga de compresión	58
Figura 3.27.- Gráfico de esfuerzos normales SYY, carga de compresión	58
Figura 3.28.- Gráfico de esfuerzos normales SZZ, carga de compresión	59
Figura 3.29.- Gráfico de esfuerzos de corte SXY, carga de compresión	59
Figura 3.30.- Gráfico de esfuerzos de corte SYZ, carga de compresión (vista interior del block)	60
Figura 3.31.- Gráfico de esfuerzos de corte SYZ, carga de compresión (vista exterior del block)	60
Figura 3.32.- Gráfico de esfuerzos principales, carga de compresión	61
Figura 3.33.- Gráfico de la suma de esfuerzos principales de compresión	61
Figura 3.34.- Gráfica que muestra donde fue aplicada la carga de corte	62
Figura 3.35.- Deformación producida por la carga de corte	62
Figura 3.36.- Gráfico de esfuerzos normales SXX, carga de corte	63
Figura 3.37.- Gráfico de esfuerzos normales SYY, carga de corte	63
Figura 3.38.- Gráfico de esfuerzos de corte SXY, carga de corte	64
Figura 3.39.- Gráfico de esfuerzos de corte SXZ, carga de corte	64
Figura 3.40.- Gráfico de esfuerzos normales SYZ, carga de corte	65
Figura 3.41.- Gráfico de la suma de esfuerzos principales de corte	65

#### LISTADO DE CUADROS

Cuadro 2.1.- Lista de chequeo para definir el problema	Pag. 5
Cuadro 2.2.- Guía para la división del modelo en elementos	7



## GLOSARIO

**Discretización de los Elementos:** Es el proceso de dividir la estructura en elementos pequeños, de tal manera que la geometría de la estructura sea adecuadamente simulada.

**Elementos:** Se llaman así a las subdivisiones que se emplean para representar un cuerpo o una estructura, i.e., son las partes simples en que se divide un compuesto o un todo.

**Malla:** Cada uno de los elementos que forman el cuerpo o estructura.

**Método de elementos finitos:** Es la representación de un medio continuo que puede ser modelado analíticamente por subdivisiones o regiones, en el cual el comportamiento es descrito para cada región por un juego de funciones asumidas que representan los esfuerzos o los desplazamientos en cada región.

**Modelo:** Representación de un cuerpo o estructura por medio de subdivisiones geométricas definidas, llamadas elementos.

**Nodos o puntos nodales:** Son los puntos que definen y conectan los elementos, en los cuales se aplican cargas concentradas y no representan puntos físicos de conexión dentro del medio continuo.

**Restricciones:** Son fuerzas externas desconocidas que consisten en las reacciones por medio de las cuales se oponen a un posible movimiento de uno o varios elementos.

## INTRODUCCIÓN

El método de elementos finitos es relativamente nuevo y encuentra sus raíces a mediados de los años cincuenta. Este método requiere el uso de computadoras que tengan una capacidad considerable de memoria y capacidad de disco. Por esta razón, el desarrollo y popularización del método ha sido a la par del desarrollo del equipo de computación.

El método de elementos finitos tiene una gran cantidad de aplicaciones en problemas de ingeniería en donde la geometría compleja de la pieza o estructura no permite una solución simple. La popularidad y versatilidad del método estriba en el uso de formas simples, llamadas elementos, que al ser ensambladas una a una forman un modelo de la geometría de la estructura, sin importar su complejidad, ya que ésta como se verá se puede semejar más a la forma real mientras más elementos se definan.

Es necesario que el ingeniero conozca el método de elementos finitos ya que es una poderosa herramienta que facilita y hace posible muchos cálculos, tanto para piezas de maquinaria, como de estructuras, suelos, etc. y que a su vez reduce el costo y el tiempo efectivo en los cálculos.

Entre las aplicaciones que se han dado para el método de elemento finito es el estudio del comportamiento de prismas de blocks vacíos de concreto, bajo compresión axial, realizados por los investigadores Ganesan y Ramamurthy [5], donde se comparan resultados de tres diferentes tipos de blocks, así como también, de tres tipos de arreglos para los prismas, esta investigación teórica se dio como una alternativa a los estudios prácticos o de laboratorio que son ampliamente conocidos y aplicados, y tuvo como objetivo conocer el comportamiento de los prismas bajo la influencia de la geometría del block, arreglos en su colocación, así como también en las propiedades y tipos de morteros que pueden emplearse. Otros estudios realizados con el método de elementos finitos se basaron en el daño de construcciones de mampostería causados por el terremoto de Kalamata, Grecia en 1986 [6], donde se compararon varias idealizaciones de las estructuras ya existentes y que fallaron durante el mismo. Estas idealizaciones consistieron en modelar las estructuras por medio de diversos sistemas, los cuales fueron elemento finito, elementos espaciales y muros de corte, de estos tres el modelo de elementos finitos fue el más exacto ya que señaló el máximo esfuerzo en la estructura en los lugares donde falló la construcción durante el terremoto.

Como se puede ver el método de elementos finitos se puede aplicar para prismas, paredes, construcciones que se están proyectando o estructuras existentes, de esta forma se puede también estudiar el comportamiento de un solo block y analizarlo de tal forma que se podría establecer una forma optima para el mismo.

sin necesidad de elaborar las unidades y ensayar solamente la unidad que hubiese dado mejores resultados por medio del análisis de elementos finitos.

En el presente estudio de tesis, como un primer paso para el estudiante de ingeniería, se pretende dar una visión amplia de la matemática básica del método de elemento finito, tomando en cuenta la matemática de cada elemento por separado, hasta el ensamble de el conjunto de elementos, refiriendo al estudiante a libros de texto especializados que tratan más profundamente estos temas.

También se dan ciertas reglas que pretenden ayudar a los principiantes en el uso del método de elemento finito por computadora, para que se les facilite la generación del modelo, la interpretación de los resultados y los errores más frecuentes que deben evitarse. Este estudio finaliza con la aplicación del método de elementos finitos al análisis en tres dimensiones del estado de esfuerzos para una unidad de block, la cual se compara con ensayos efectuados en el laboratorio, esta comparación se hace en una forma cualitativa, y con esto se pretende dar un primer paso para abrir campo a futuros estudios, por medio de los cuales se puedan analizar diversas geometrías y proporciones de materiales que influyen en el comportamiento del block, utilizando como herramienta la computadora y el método de elementos finitos.

# CAPÍTULO 1

## PRINCIPIOS DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

En este capítulo se describirán los conceptos básicos del método de elementos finitos, sin pretender dar un discurso en la teoría matemática del método que puede ser un tanto compleja.

En lugar de esto, este capítulo será una panorámica que pretende dar al estudiante un primer acercamiento con los conceptos más importantes del método y para un estudio más profundo se refiere al estudiante a los libros de texto especializados [1,2,3,5].

### 1.1.- Terminología:

Existen varias formas de definir los términos empleados en el método de elemento finito y todos son fáciles de entender. El que se utilizará en la presente tesis se tomo del libro de Richard Gallagher [5]:

"El concepto básico del método, es la representación de un medio continuo (la estructura total) que puede ser modelado analíticamente por subdivisiones o regiones (elementos finitos), en el cual el comportamiento es descrito para cada región por un juego de funciones asumidas que representan los esfuerzos o los desplazamientos en cada región. Dichas funciones frecuentemente son escogidas para asegurar la continuidad en todo el medio."

### 1.2.- Discretización de los Elementos:

Esto es el proceso de dividir la estructura en elementos pequeños que al solucionarlos individualmente y luego agruparlos en una matriz, pueden aproximar la solución verdadera a dicha estructura. Para esta discretización se debe decidir el número, tamaño, forma y configuración de cada elemento, de tal manera que la geometría de la estructura sea adecuadamente simulada.

Para una discretización adecuada se tienen que tomar varias consideraciones que se discutirán en el capítulo 2, sin embargo, se puede adelantar que este proceso depende del criterio del usuario del método y de la practica que éste posea, aunque lo más común es realizar varios ensayos de diferentes divisiones de la estructura con el objeto de establecer cuál es la más conveniente para el propósito que se requiere.



### 1.3.- Tipos de Elementos:

Una de las primeras decisiones que se toman al modelar una estructura es seleccionar la forma o configuración de los elementos básicos que se utilizaran para definir ésta. Los grupos básicos de elementos se pueden resumir en:

- Elementos Bidimensionales: Se utilizan cuando todas las fuerzas y desplazamientos actúan solo en un plano. Estos elementos tienen dos grados de libertad por nodo.
- Elementos tridimensionales: Estos tienen tres grados de libertad por nodo, poseen seis esfuerzos y deformaciones, y las formas más comunes incluyen el tetraedro, la cuña de seis nodos, el prisma rectangular, así como el hexaedro de ocho nodos.
- Elementos de Placa: Los elementos de placa, así como las cascaras tienen seis grados de libertad por nodo, la mayoría de elementos de placas tienen solamente un nodo en sus vértices, de modo que el espesor debe especificarse como constante o de variación lineal. Para estos elementos debe evitarse que tengan una curvatura excesiva ya que algunos programas poseen cierto rango de tolerancia y puede ocurrir un error fatal en el cálculo.

### 1.4.- Ensamble de la Matrix de Rigidez de la Estructura:

Este proceso consiste en formar la matriz de rigidez global para el cuerpo entero. El ensamble de ecuaciones se basa en que los desplazamientos deben ser los mismos para todos los elementos adyacentes a un nodo en consideración.

Las relaciones globales de equilibrio entre la matriz de rigidez total  $[K]$ , el vector de cargas total  $\{f\}$  y el vector de desplazamiento para todo el cuerpo  $\{d\}$  viene dada por

$$[K]\{d\} = \{f\}$$

Hay dos métodos comúnmente usados para ensamblar y solucionar la matriz de rigidez de los elementos: el método de banda y el método de ciclo frontal [1,2,3], estos métodos solo se nombran ya que la profundización de los mismos esta fuera del alcance de esta tesis.

Las propiedades de la matriz de rigidez que son significativos con respecto al algoritmo de la solución son:

- 1.- La matriz es simétrica.
- 2.- La matriz es positiva, no hay términos negativa y no hay términos ceros en la diagonal de la matriz.

Cabe decir que el ancho de banda para cualquier grado de libertad dado, cuando se resuelve la matriz de rigidez, es determinada por el número del grado de libertad máximo y mínimo al cual está conectado el elemento. Por consiguiente es importante construir un modelo donde la diferencia en la numeración entre nodos de cada elemento sea mínimo, con el objeto de optimizar cualquier método numérico que emplee el programa para solucionar el sistema de ecuaciones.

A continuación se presenta la mejor forma de numerar los elementos, independiente del método que se emplea, esto para optimizar el ancho de banda y la capacidad de la computadora.

1	5	9	13	17
2	6	10	14	18
3	7	11	15	19
4	8	12	16	20

Numeración Eficiente de Nudo:  
Para los nodos de cualquier elemento la diferencia entre cada uno debe minimizarse.

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20

Numeración menos eficiente de Nudo.

Nota: La numeración debe ser en el sentido corto.

Fig. 1.1.- Numeración eficiente para generar el modelo.

## CAPÍTULO 2

### DESARROLLO DEL MODELO

En este capítulo se darán en forma general algunas herramientas o reglas que permitirán al estudiante del método de Elementos Finitos optimizar su trabajo a través de una adecuada definición de la estructura, así como de una eficiente entrada de datos en la computadora. La mayor parte de este capítulo está referida al libro de Jeffrey Steel [4], en el cual el estudiante puede profundizar en los pasos a seguir en el arte de modelar el elemento finito y que al desarrollarlo en una forma eficiente se puede ahorrar tiempo en la generación del modelo y de esta forma invertirlo en el análisis e interpretación de los resultados obtenidos.

#### 2.1.- Definición del Problema:

El objetivo de definir el problema es lograr establecer un modelo óptimo, del cual se pueda generar una malla para el elemento finito, que sea fácil de trabajar y que logre describir en forma precisa el comportamiento y la geometría de la estructura o el componente de la máquina a estudiar.

Para definir adecuadamente el problema se requieren de diversos pasos, entre los cuales se pueden destacar los siguientes:

*Definición del Problema*, en donde el usuario del programa de elemento finito debe delimitar los objetivos del análisis; esto es, preguntarse ¿qué problema debe ser resuelto?, ¿es una falla en una estructura existente?, ¿es la máxima aceleración de un terreno durante un terremoto?, ¿dónde se producen los máximos esfuerzos en una máquina?, etc.; también se debe hacer la pregunta qué precisión se requiere o se espera, y los parámetros que afecten su funcionamiento.

Otro paso importante en la definición del problema es tener la *geometría exacta de los componentes o estructura* a ser analizada, esto permite decidir qué parámetros se deben tener en cuenta con respecto a la tolerancia de fabricación y en caso de estructuras existentes chequear las especificaciones de diseño contra las que posee la estructura en su forma construida y que pueden afectar el análisis.

También se deben *definir las fuerzas* que actúan en la estructura, si son puntuales o distribuidas, dinámicas o estáticas, si existen efectos térmicos o electromagnéticos. Dentro de esta definición y

en base al conocimiento de la estructura o componente a estudiar, se debe decidir qué fuerzas considerar o despreciar.

Un paso importante también es *conocer las restricciones* a los desplazamientos. Esto significa localizar aquellas áreas de la estructura en las cuales la deflexión es mínima y que estén alejadas de las áreas críticas, con el objeto de minimizar el tamaño del modelo a generar, por ejemplo tratar de usar la simetría de la estructura para que el objeto a modelar no sea excesivamente grande, lo cual requeriría de una gran cantidad de tiempo en el modelaje y también de una gran capacidad computacional al correr el programa.

Jeffrey Steele [4] sugiere una lista de chequeo que se puede usar para definir el problema que se va analizar.

---

Cuadro 2.1. Lista de chequeo para Definir el Problema.

---

1.- Objetivos

- 1.1.- ¿Cuál es el problema a resolver?
- 1.2.- ¿Cuál es el nivel de precisión esperado?
- 1.3.- ¿Cuáles son los parámetros que pueden afectar el comportamiento de la estructura?

2.- Descripción de la geometría

- 2.1.- ¿Hay diagramas o planos de la estructura disponibles?
- 2.2.- ¿La estructura real está de acuerdo a los diagramas o planos?
- 2.3.- ¿Cuáles son las especificaciones de tolerancia en la elaboración o construcción de la estructura?
- 2.4.- ¿Puede usarse la simetría para reducir el tamaño del modelo?
- 2.5.- ¿Cuánto de la estructura necesita ser incluido en el modelo de elemento finito?

3.- Fuerzas

- 3.1.- ¿Qué tipos de fuerzas actúan en la estructura: estáticas, dinámicas o térmicas?
- 3.2.- ¿Para fuerzas dinámicas, cuáles son las frecuencias y los ángulos de fase de la estructura, y el amortiguamiento en la estructura?
- 3.3.- ¿Cuál es la localización y magnitud de las fuerzas?

4.- Restricciones

- 4.1.- ¿Qué tipos de restricciones están presentes: rígidas, de rodillos, o de desplazamiento?
  - 4.2.- ¿En qué lugares se asumirán que las restricciones serán aplicadas?
  - 4.3.- ¿Para restricciones de desplazamiento, qué límite de deflexión tendrán?
-

## 2.2.- Modelo de la Estructura:

Antes de entrar en el modelado de la estructura con elemento finito se debe construir un diagrama de cuerpo libre de la estructura, en el cual se debe mostrar todas las fuerzas que actúan sobre el mismo y los desplazamientos actuantes, indicando su localización, magnitud y dirección como serán aplicados. Se debe tomar en cuenta que los desplazamientos y fuerzas solamente pueden aplicarse en los nodos, por esta razón es necesario tenerlas identificadas antes de generar el modelo.

Ya definido el problema y elaborado el diagrama de cuerpo libre, se puede establecer los siguientes pasos [4]:

- 1.- Dividir el diagrama de cuerpo libre en elementos.
- 2.- Aplicar las fuerzas a los nodos.
- 3.- Aplicar las restricciones a los nodos.

La división del diagrama en elementos es la parte más difícil ya que de ella depende la precisión en el análisis, el tiempo de generación y procesamiento en la computadora, la distorsión de los elementos, la definición de la geometría y la definición del gradiente de esfuerzos. Todos estos parámetros afectan la precisión del resultado, exceptuando el tiempo de procesamiento.

De la división del diagrama se desprende el concepto de densidad de elementos y se refiere al tamaño y distribución de los elementos en diferentes partes de la malla. Intuitivamente se sabe que un modelo determinado será más preciso si el número de elementos se aproxima a infinito, esto se debe a que la geometría de la estructura se aproxima más a la real porque se cuenta con más puntos para definirla. Es importante que exista una densidad más alta en regiones donde se anticipa que se van a dar los máximos esfuerzos, esto puede ser en ranuras, agujeros o filetes de la estructura.

Se debe tener en cuenta que se necesita un balance entre el número de elementos y el tiempo de procesamiento de datos en la computadora, debido a que algunas estructuras no requieren de una gran precisión en los resultados, en estos casos son pocos los elementos que se necesitan modelar y el tiempo de procesamiento puede ser relativamente pequeño; en cambio existen otros modelos que requieren un número mayor de elementos y por lo tanto el tiempo que consumen en el procesamiento de datos es considerable. De esto se definen cuatro clases de modelos que son: burdo, fino, de transición y muy fino. De los anteriores uno de los más usados para estructuras un tanto complejas es el modelo de transición, que consiste en aumentar el número de elementos en regiones críticas y disminuir en otras de menor interés (fig. 3.1), esta transición se hace por medio de capas de transición, y en estos casos es imprescindible evitar elementos distorsionados [4] que afecten el resultado final del análisis.

A continuación se presenta una guía para la división del modelo en elementos, dada por Jeffrey Steel [4]:

---

Cuadro 2.2.- Guía para la división del modelo en elementos.

---

Los tipos de elementos deben ser consistentes, elementos bidimensionales y tridimensionales no pueden ser mezclados en el mismo análisis.

Más elementos pequeños deberán ser usados en áreas donde se anticipen altas concentraciones de esfuerzos tales como filetes, ranuras y agujeros.

Mallas extremadamente finas deben ser usadas cuando las fuerzas son aplicadas cerca de áreas de esfuerzos altos. La aplicación de las fuerzas tiende a distorsionar la distribución de los esfuerzos cerca del punto de aplicación.

Los elementos cuadriláteros deberán ser tan cuadrados como sea posible.

La forma ideal de la malla a desarrollar es aquella en que se obtienen cambios en los esfuerzos tan uniformes como sea posible entre elementos adyacentes a través del modelo. En otras palabras, la densidad relativa de elementos deberá seguir la distribución de los esfuerzos.

Elementos adjuntos deberán tener nodos comunes y grados de libertad comunes.

---

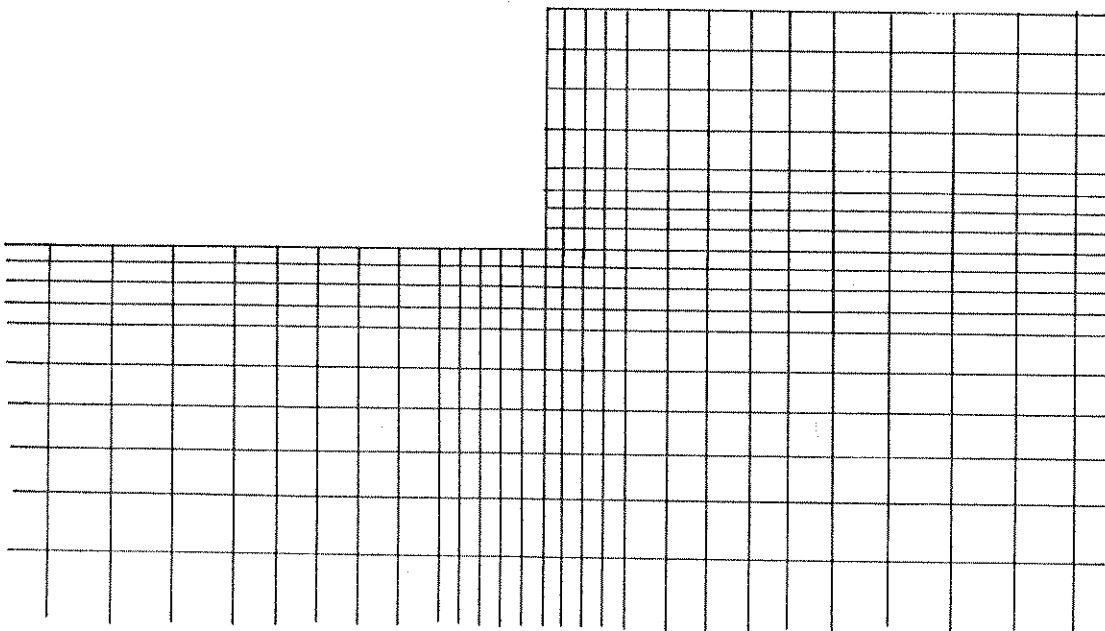


Fig.2.1.- Modelo de un talud a 90 grados, empleando el método de transición.

### 2.3.- Entrada Básica de Datos:

La entrada de datos para diversos programas de elemento finito pueden ser organizada de diferentes formas dependiendo de cuál sea el programa a usar; aunque por lo general todos los programas requieren de los siguientes datos:

- 1.- Definición de la geometría de la estructura por medio de nodos (o puntos nodales), que a su vez son definidos por coordenadas, y los elementos que son definidos por los nodos que lo confinan. Los nodos son ingresados asignándoles un número y sus coordenadas respectivas y los elementos son definidos al asignarles los nodos que lo forman.
- 2.- Especificar las propiedades de los materiales o el material que se le asigna a cada elemento, en que la mayoría de casos consiste en el módulo de Young y la relación de Poisson, ya que la rigidez de la estructura es calculada por medio de éstos.
- 3.- Especificar las restricciones de desplazamiento, esto sirve para mostrar donde se apoya la estructura y cómo se comportará al restringir los grados de libertad. También sirven para indicar si existe simetría. Las restricciones se pueden dar como articulaciones, rodillos o restricciones rígidas.
- 4.- Por último se tiene que especificar dónde se aplican las fuerzas, teniendo en cuenta que todas las fuerzas deben ser convertidas a fuerzas puntuales, que actúan en los puntos nodales.

### 2.4.- Validación de los Datos de Entrada:

La validación de datos no es otra cosa que verificar o chequear que los datos ingresados y que definen el modelo sean correctos, esto se debe hacer antes de correr el programa propiamente dicho y después de haberlo corrido, para establecer si se alcanzó el grado de precisión deseado. Esta validación se puede efectuar en dos pasos que son:

- 1.- Depuración de Datos: Este proceso se facilita si se posee algún programa de gráficas que permita plotear los puntos que forman la estructura, de esta forma el usuario puede hacer las correcciones inmediatamente cuando se necesario. Durante el proceso de depuración se deben chequear los cuatro datos que se describe en la sección anterior (geometría, fuerzas, propiedades de los materiales y las restricciones a los desplazamientos), esto se debe a que pueden ocurrir errores significativos y no percatarse de ellos, como mínimo debe asegurarse que no ocurra lo siguiente:

- Verificar que un mismo elemento esté duplicado, esto creara una doble rigidez en el modelo.

- Elementos perdidos que no se pueden ver al estar todos los elementos presentes en la gráfica.
- Coordenadas de nodo equivocadas, esto causa alteraciones en las dimensiones del elemento y en los resultados finales produce errores significativos.
- Si existen varios materiales es recomendable chequear la base de datos para asegurarse que la asignación a cada elemento fue correcta y además que las unidades sean consistentes.
- Las fuerzas aplicadas deben tener la magnitud apropiada, la localización y dirección correcta, la verificación se puede hacer mediante la impresión de la base de datos.
- Como último paso es recomendable chequear las restricciones de desplazamiento, esto para evitar nodos restringidos perdidos, o bordes sobre restringidos.

2.- Calibración de la precisión para modelos de elemento finito: Este concepto es estimar la precisión de los resultados obtenidos, esto se logra teniendo cierta experiencia y habilidad para entender el comportamiento de la estructura a estudiar y también generando datos de varios modelos que posean formas controladas y condiciones de bordes definidas.



## CAPÍTULO 3

### APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS AL ANÁLISIS EN TRES DIMENSIONES DEL ESTADO DE ESFUERZOS PARA UNA UNIDAD DE BLOCK

#### 3.1.- Descripción del Programa SAP90:

El desarrollo de un programa de computación efectivo para el análisis estructural requiere del conocimiento de tres disciplinas científicas: mecánica de materiales, análisis numérico y computación. El desarrollo de elementos estructurales precisos y eficientes requiere de experiencia en la mecánica estructural moderna. Un programa eficiente depende grandemente de las técnicas usadas tanto numéricamente como de programación. Un aspecto importante de un programa de computación se refiere a la facilidad para que éste pueda ser modificado, extendido y actualizado, de otra manera el programa será obsoleto en pocos años. Esto es en parte por los nuevos elementos estructurales que son desarrollados, al igual que mejores procedimientos numéricos están disponibles y equipo nuevo de computación es producido.

En las dos últimas décadas una serie de programas de computación conocidos como SAP, que operaban en computadoras grandes, establecieron una reputación en el área de la ingeniería estructural y mecánica estructural a nivel mundial. Este programa representa el trabajo de investigación conducido en la Universidad de California, Berkeley, por el profesor Edward L. Wilson en los últimos 25 años.

La primera versión del SAP fue publicada en 1970, un programa mejorado para análisis estático fue llamada SOLID SAP, o SAP II, y fue presentado en 1971. Luego de esto se empezó el trabajo en un nuevo programa para análisis estático o dinámico, éste fue presentado a finales de 1972, pero solamente a las agencias que patrocinaron su desarrollo. La versión SAP IV fue realizada al rededor de veinte años atrás y fue presentado como una obra de arte para su tiempo. Desde la realización del SAP IV, han habido mayores avances en los campos de análisis numérico, mecánica estructural y tecnología de computadoras. Estos avances condujeron a realizar el programa SAP80, el primer programa para análisis estructural en microcomputadoras y más recientemente el SAP90.

El SAP90 fue escrito por el autor original de la serie SAP y no es una adaptación ni modificación del SAPIV. La formulación de los elementos y las soluciones de las ecuaciones son todos nuevos. Este programa fue desarrollado y codificado en ANSI y Fortran-77. La máxima capacidad para resolver problemas es de 4000 nodos u 8000 ecuaciones. El programa tiene opciones de análisis estático y dinámico y pueden ser activados juntos en una misma corrida. La librería de elementos finitos consiste en cuatro elementos básicos

que son: elementos tridimensionales de viga, prismático, elementos tridimensionales sólidos, elementos tridimensionales de cascara y elementos bidimensionales asimétricos. Vigas en dos dimensiones, armaduras, membranas, elementos asimétricos y de esfuerzos planos están disponibles como sub-elementos de los cuatro anteriores. No existe ninguna restricción para combinar o mezclar diferentes tipos de elementos en un modelo particular. Para mayor información el lector debe referirse al manual del usuario de SAP90 [7], donde encontrará información acerca de cuáles pasos sigue el programa para calcular los resultados, del preproceso de introducción de datos, ya sea a través de un programa ya establecido llamado SAPIN o manualmente, por medio de una base de datos, tal como se hizo en esta tesis, y también del postproceso que es la presentación de datos a través de datos numéricos y de gráficas (Ver sección 3.3 de este trabajo).

### 3.2.- Estudio Experimental:

El estudio experimental se dividió en dos partes, la primera tiene como objetivo establecer una propiedad, de la cual no se poseen datos, esto es el módulo de elasticidad del block pómez, este módulo se tiene solamente para prismas de mampostería y las características individuales del block no han sido investigadas, ya que se supone que el comportamiento de éste difiere debido a que en los prismas el mortero debe también tomarse en cuenta.

La segunda parte es la obtención de los esfuerzos en una forma cualitativa, cuando se somete el block a cargas de compresión, y de corte; esta parte es la que permitirá comparar el comportamiento de la unidad de block en una forma aproximada con el modelo analizado en computadora con el método de elementos finitos. Los ensayos se llevaron a cabo en el CICON (centro de información de la construcción) con la colaboración del Ing. Juan Miguel Rubio.

A continuación se describe cómo se efectuaron los ensayos y los resultados obtenidos:

#### 3.2.1.- Ensayo para obtener el Módulo de Elasticidad:

Cuando se inicio el trabajo de esta tesis no se conocía el valor del módulo de elasticidad para un block, ya que éste es conocido solo para prismas de mampostería de block y ladrillo como se mencionó anteriormente. Debido a esto, fue necesario elaborar este ensayo ya que el módulo de elasticidad es una propiedad necesaria en el análisis por medio del elemento finito. En este ensayo se utilizó una pieza de block pómez, que se obtuvo al cortar un block completo, esto con la finalidad de que la pieza fuera

esbelta, y de esta forma obtener un comportamiento más ideal de la misma. La pieza tenía un área de 40 cm. Cuadrados en la cara donde se aplicó la carga, y el block es del mismo lote de fabricación que los otros utilizados en el resto de ensayos. Los cálculos del módulo de elasticidad se hicieron de acuerdo a la teoría de resistencia de materiales y las fórmulas empleadas pueden ser encontradas en cualquier texto de mecánica de materiales.

#### Materiales y Equipo:

- Una pieza de block pómez de 2.9 cm de espesor, por 13.2 cm de ancho, y por 18.3 cm de alto.
- Máquina de ensayos universal Balwin-Lima-Hamilton.
- Medidor de deformaciones LC-13, marca Soiltest inc..

#### Evaluación Previa de la Unidad:

- La pieza de block se lijó en su parte superior e inferior para que al aplicar la carga, ésta fuera lo más uniforme posible en dichas superficies.

#### Descripción del ensayo:

- Se colocó la pieza en la máquina como se observa en la figura 4.1.
- Se aplicó carga en forma gradual, y cada aumento de 50 kg. se anotó la deformación que marcaba el medidor.
- Se repitió la prueba dos veces con la misma pieza sin llegar a provocar la falla en la misma.

#### Resultados:

- Para obtener los resultados se calculó primero la deformación unitaria y el esfuerzo de compresión unitaria, tal y como se presenta en la referencia [8], luego se plotearon los puntos para establecer un rango de comportamiento elástico lineal de la pieza, y luego se procedió a calcular el módulo de elasticidad, de la forma ya conocida [8], no se presentan los datos de laboratorio ya que lo que es de interés son los resultados finales, que se dan a continuación:

Ensayo	Módulo de Elasticidad
1	46920 kg./cm <sup>2</sup>
2	44630 kg./cm <sup>2</sup>

- Para uso en esta tesis se tomará un valor promedio aproximado de  $45750 \text{ kg./cm}^2$ .

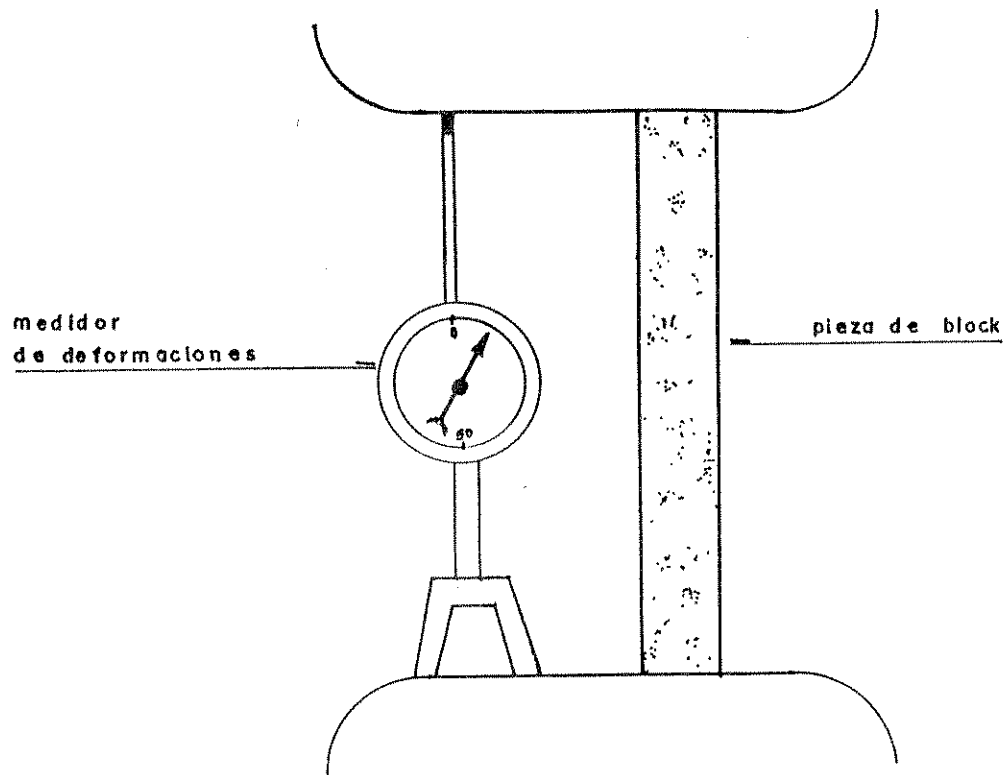


Fig. 3.1.- Forma de colocación de la pieza, y el medidor de deformaciones, para el ensayo de módulo de elasticidad.

### 3.2.2.- Ensayo a Compresión para establecer en forma cualitativa los estados de esfuerzos en la unidad de Block:

Para establecer los esfuerzos en forma cualitativa se ensayaron dos unidades de block por separado, aplicándoles cargas de compresión, con el objeto de observar dónde aparecen las grietas, las que indican dónde se ocasionaron los mayores esfuerzos.

#### Materiales y Equipo:

- 2 unidades de block pómez de 14 cm por 19 cm por 39 cm de una resistencia aproximada de 25 kg./cm<sup>2</sup>.
- Pintura color verde que sirvió para resaltar las grietas que se formen.
- Máquina universal de ensayos Baldwin-Lima-Hamilton.

#### Evaluación Previa de las Unidades:

- Las unidades a ensayar fueron del mismo tamaño y del mismo lote de fabricación. Se les aplicó una capa de pintura verde para resaltar las grietas y se lijaron las superficies superior o inferior del block para que al aplicar la carga, ésta fuera lo más uniforme posible.

#### Descripción del ensayo:

- Se colocó la primera unidad en la máquina de ensayo fig. 3.2.
- Se aplicó carga en forma gradual.
- Alcanzada la carga de falla se anotó el valor de la misma y se continuó aplicando carga hasta que se definieron las grietas, las cuales se dibujaron sobre un acetato, para luego pasarlas a una gráfica final.
- Este procedimiento se repitió en igual forma para la segunda unidad.

#### Resultados:

- En las figuras 3.2 a la 3.11 se muestra como fue colocado el block y la forma como ocurrieron las fallas en las diferentes caras del block. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Ensayo	Área Bruta block	Carga de falla	Esfuerzo Máximo a compresión
1	500 cm <sup>2</sup>	13000.0 kg.	26.0 kg./cm <sup>2</sup>
2	500 cm <sup>2</sup>	11600.0 kg.	23.2 kg./cm <sup>2</sup>

- Se pudo observar, que siendo el block un material frágil casi todas las fallas ocurrieron simultáneamente y después que el block alcanzó la carga de falla.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE GUATEMALA  
BIBLIOTECA DE LA FACULTAD DE INGENIERIA

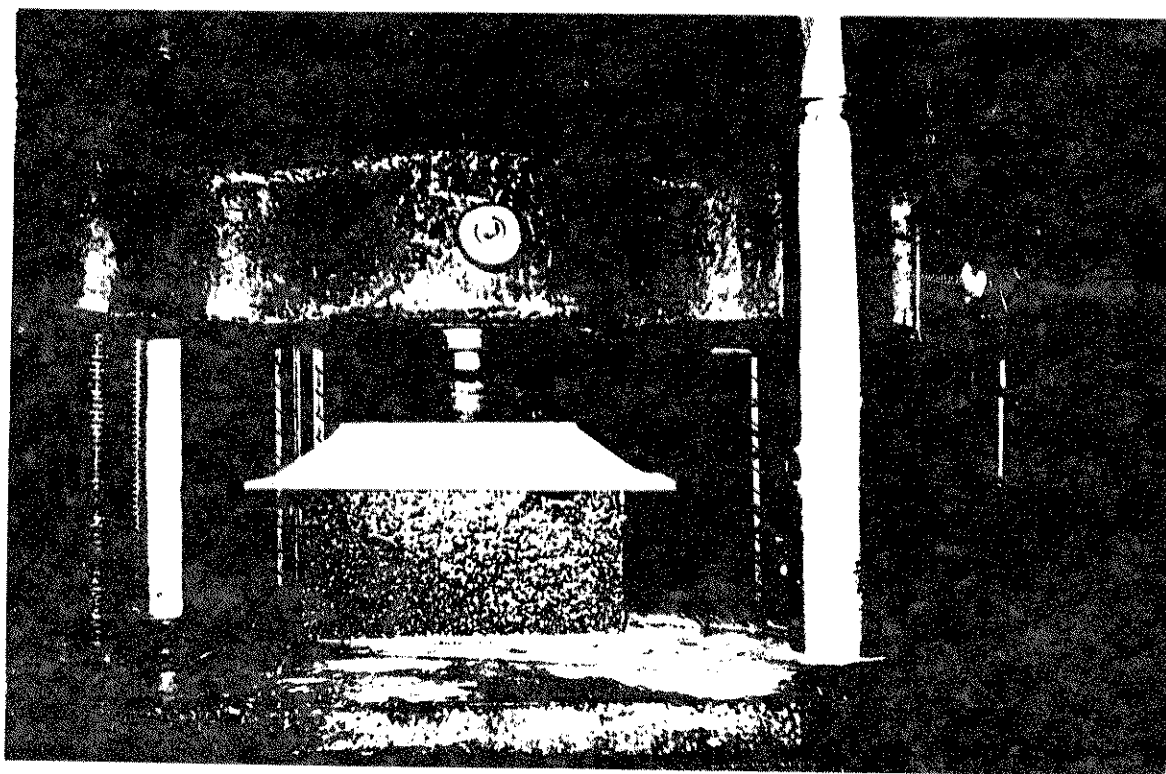


Fig. 3.2.- En la fotografía se observa como fue colocado el block a ensayar en compresión.

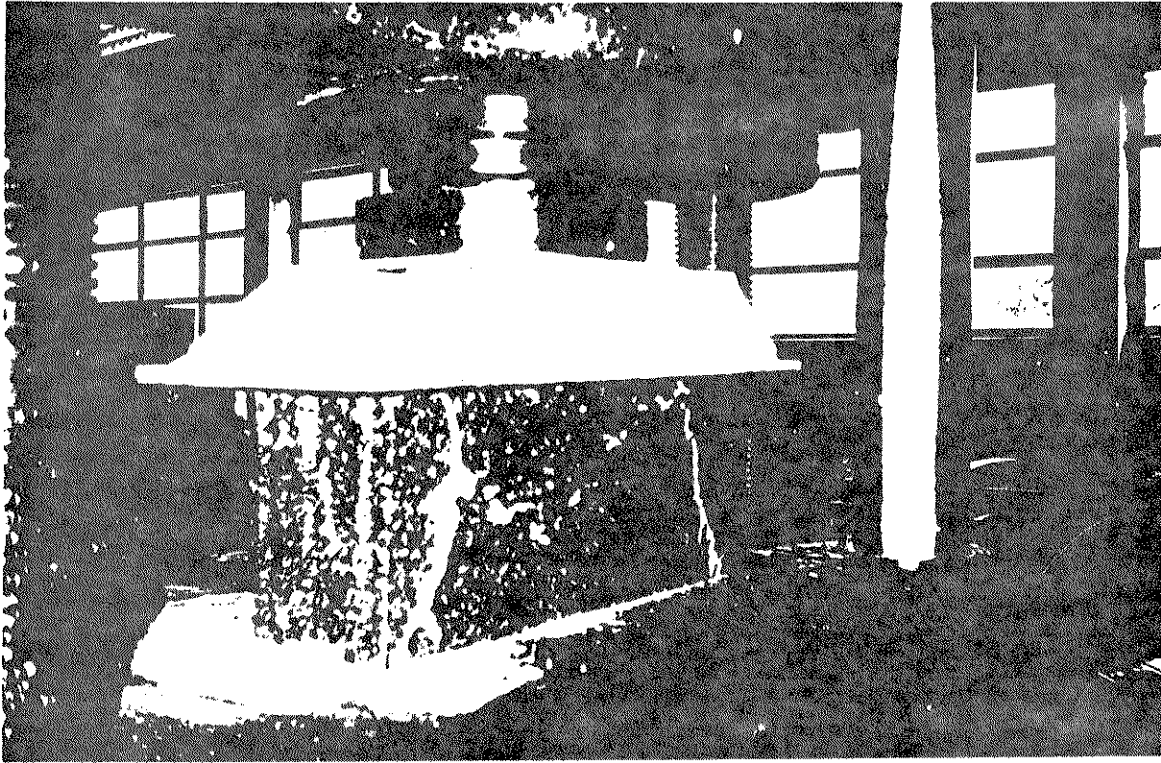


Fig.3.3.- En la fotografía se observan las grietas que aparecieron momentos después que el block alcanzara la carga máxima de falla a compresión.

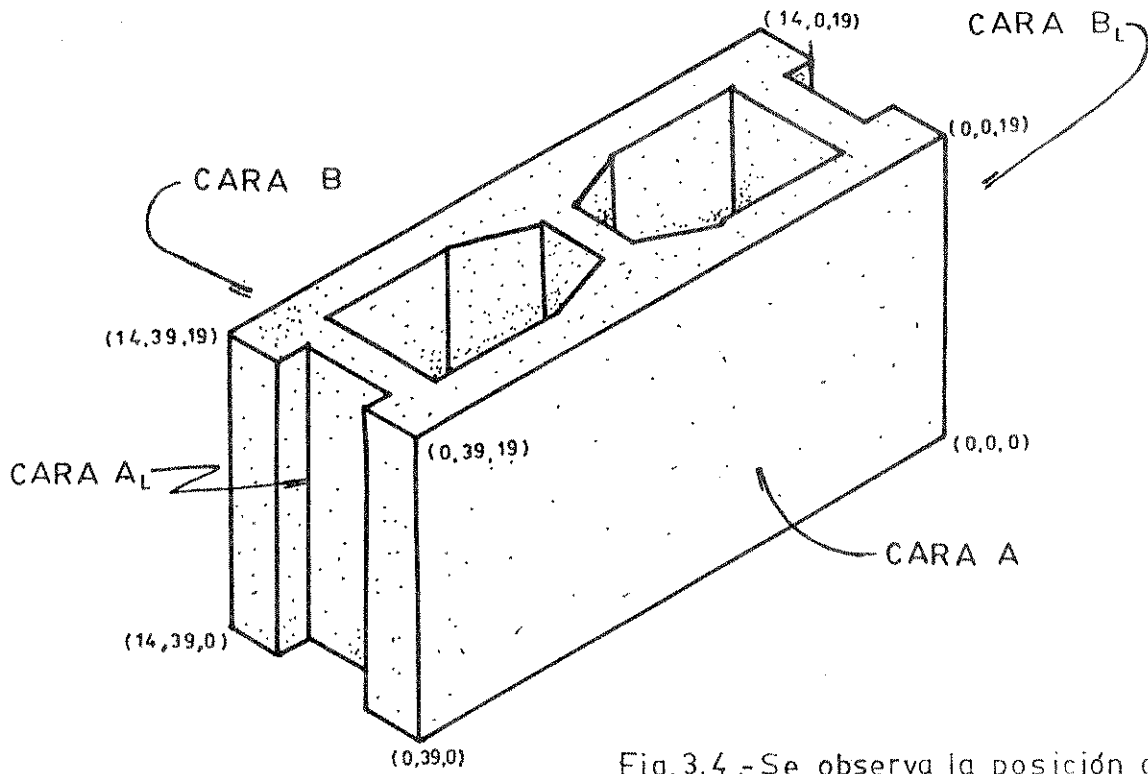
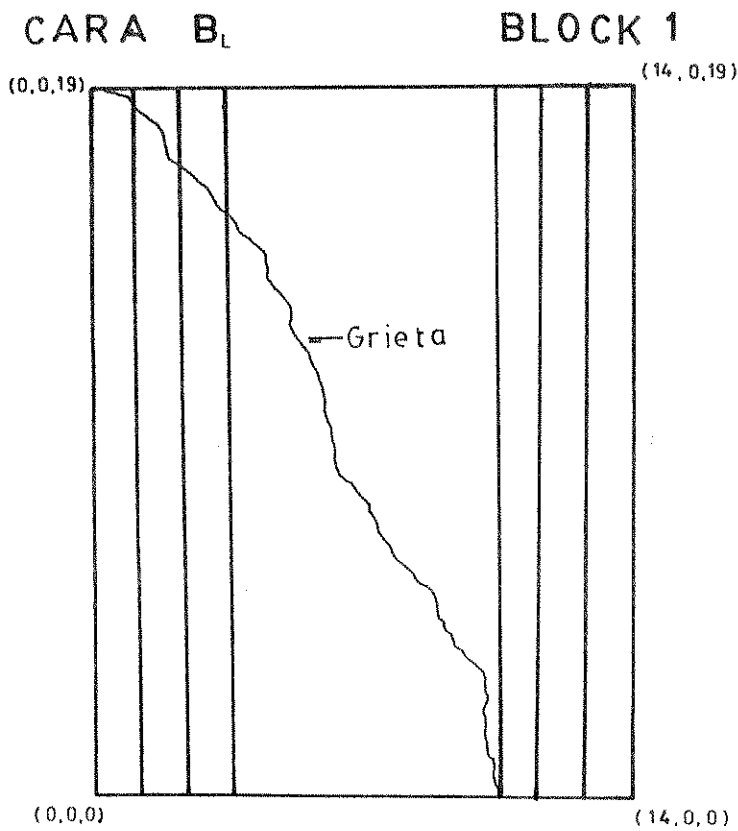


Fig.3.4.- Se observa la posición de las caras



nota: en la cara A<sub>L</sub>  
no se produjo  
ninguna grieta.

Fig.3.5.- Grieta por carga de compresión en el primer block ensayado



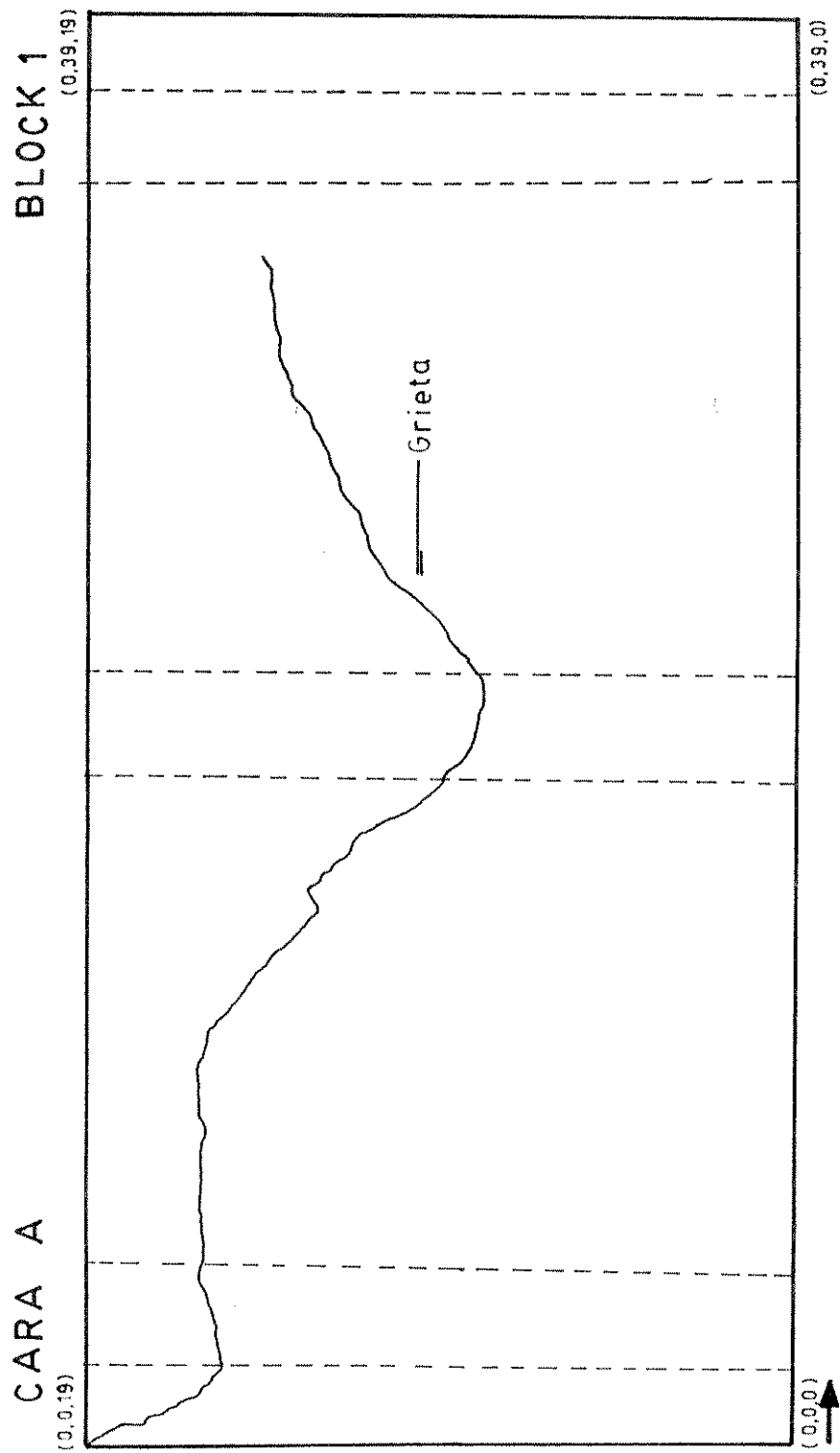


Fig. 3.6 - Grieta ocurrida por la carga de compresión en el primer block ensayado.

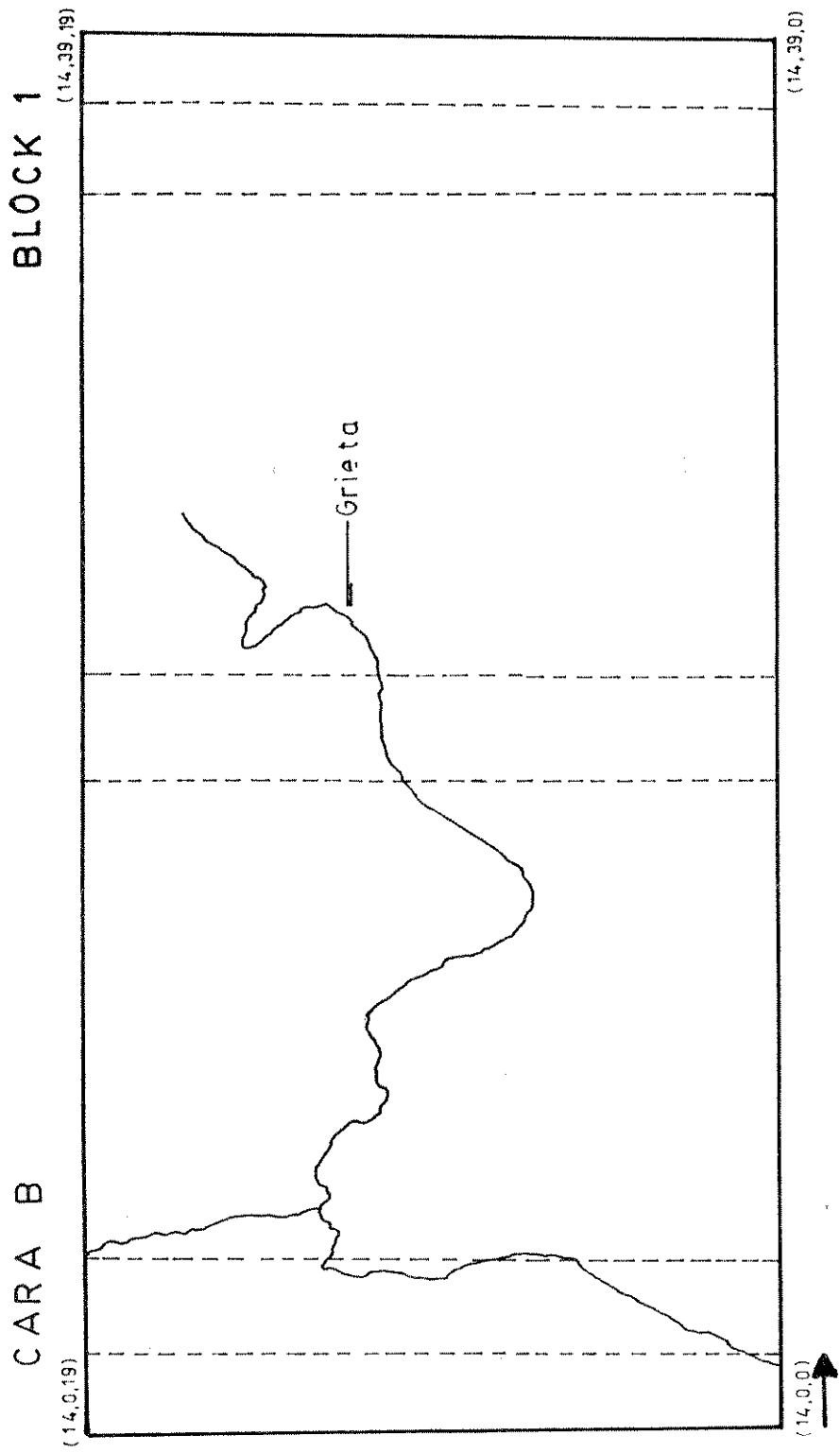


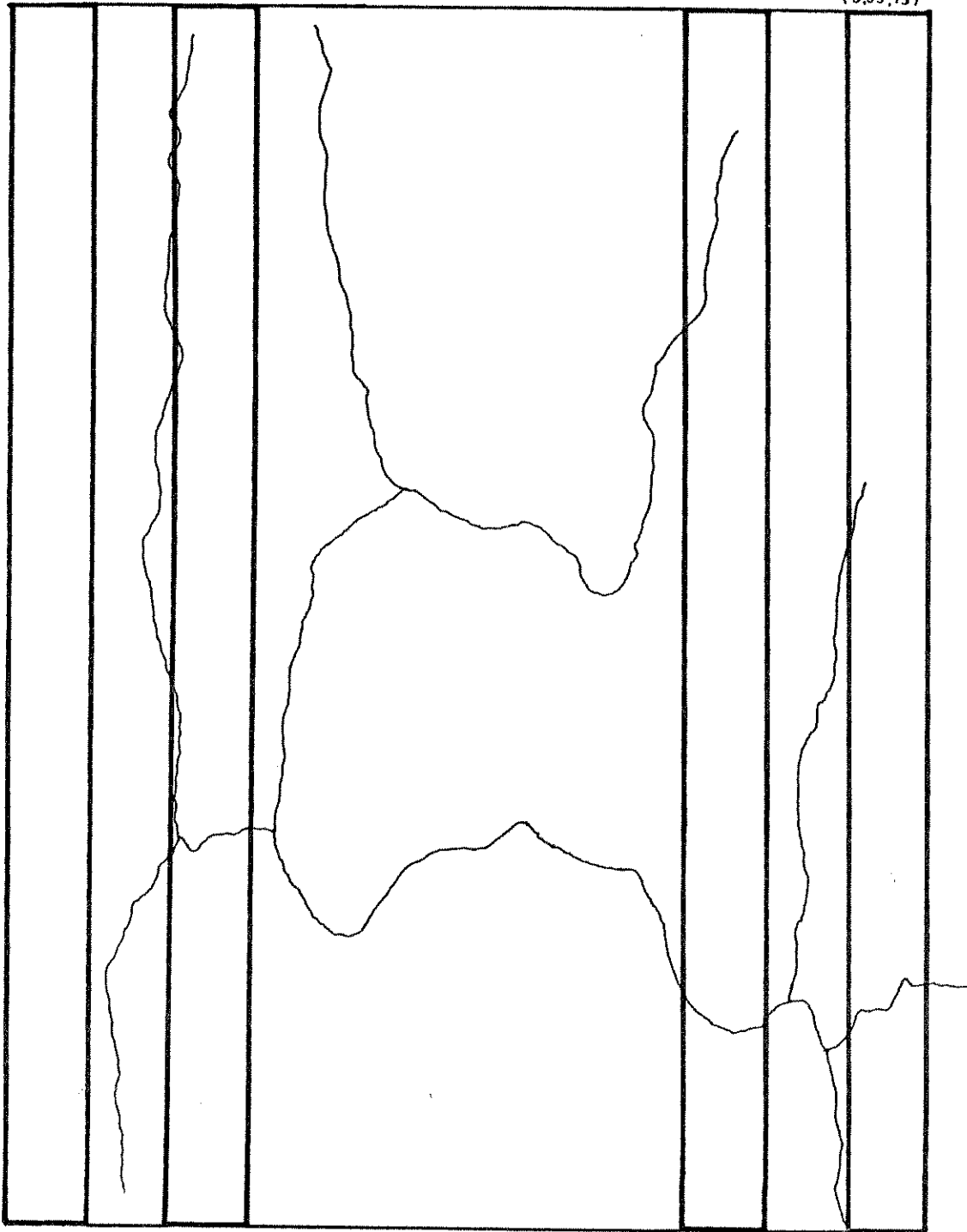
Fig. 3.7 .- Grieta ocurrida por la carga de compresión en el primer block ensayado.

CARA A<sub>L</sub>

BLOCK 2

(14,39,19)

(0,39,19)



(14,39,0)

(0,39,0)

Fig. 3.8 - Grieta ocurrida por la carga de compresion en el segundo block ensayado.

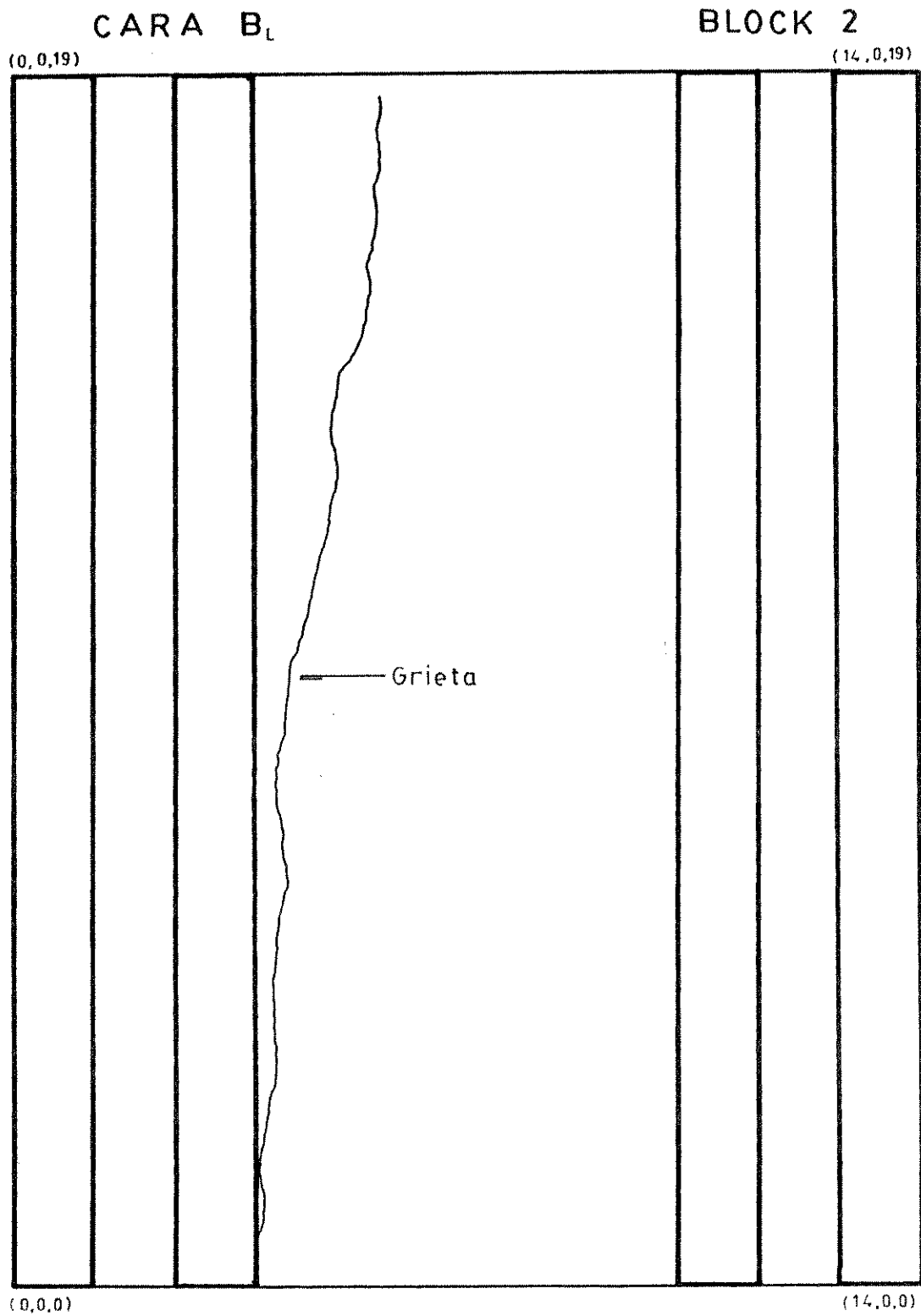


Fig. 3.9 - Grieta ocurrida por la carga de compresión en el segundo block ensayado.

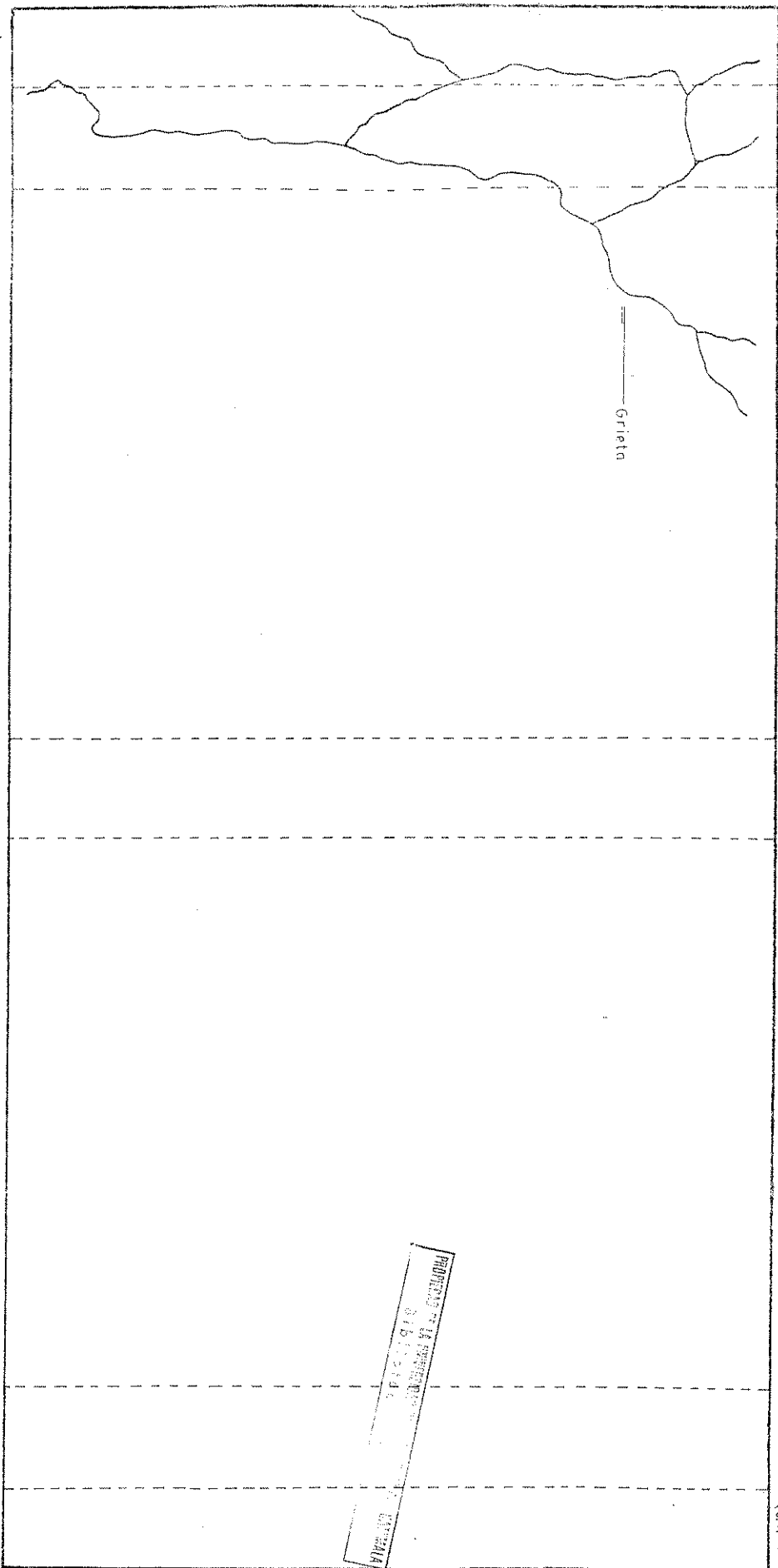


Fig. 3.10 - Grieta ocurrida por la carga de compresión en el segundo block ensayado.

CARA B

BLOCK 2

(14, 29, 19)

(14, 0, 19)

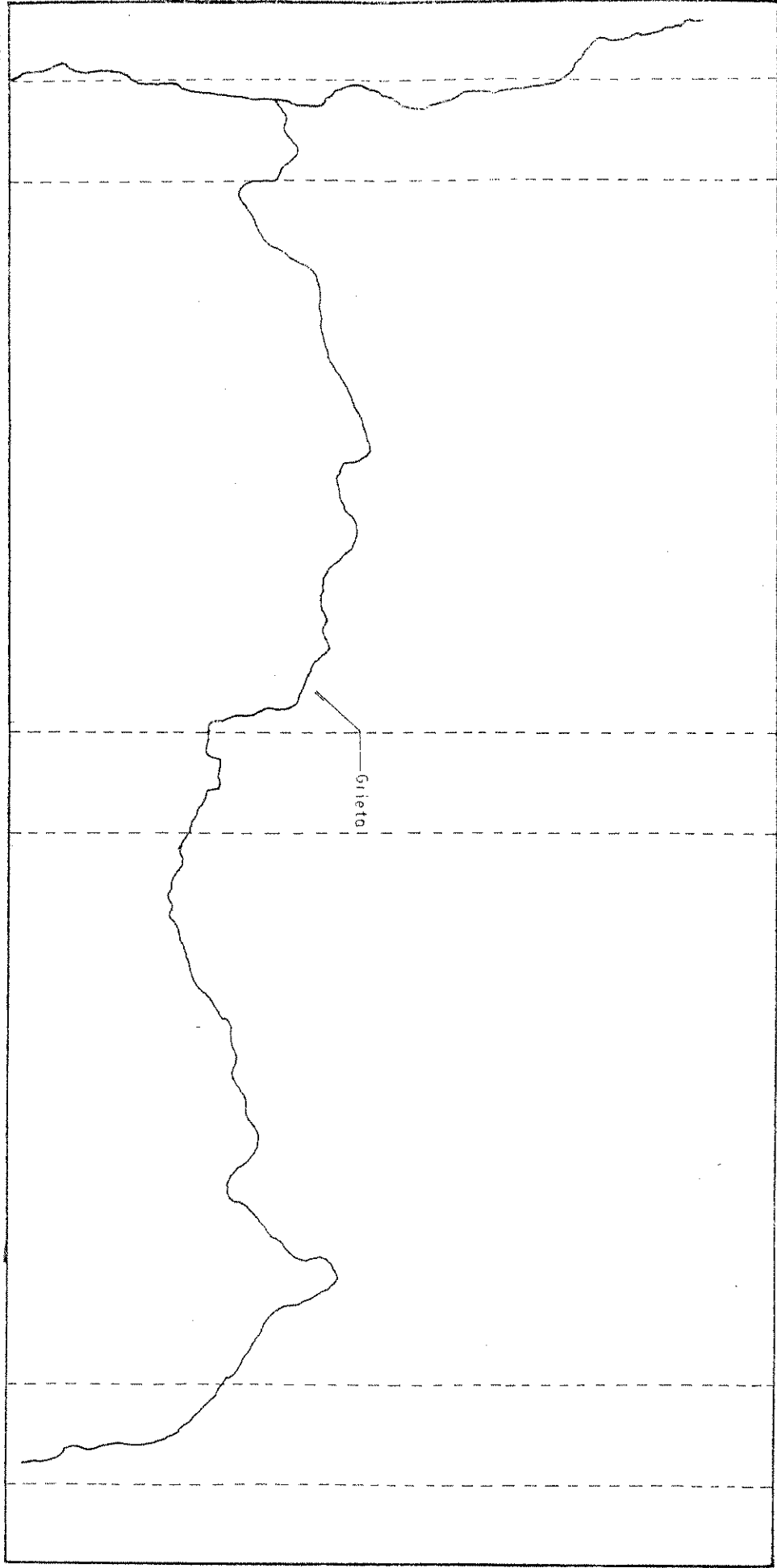


Fig. 3. II - Grieta ocurrida por la carga de compresión en el segundo block ensayado.

### 3.2.3.- Ensayo a corte para establecer en forma cualitativa los estados de esfuerzos en la unidad de Block:

Igual que el caso anterior se ensayaron dos unidades por separado y se observó dónde ocurrieron las grietas. Esto indica en una forma cualitativa donde ocurrieron los mayores esfuerzos por la carga de corte que se aplicó.

#### Materiales y Equipo:

- 2 unidades de block pómez de 14 cm por 19 cm por 39 cm con una resistencia aproximada de 25 kg/cm<sup>2</sup>.
- Pintura color verde que sirvió para resaltar las grietas.
- Máquina universal de ensayos Baldwin-Lima-Hamilton.

#### Evaluación previa de unidades:

- Las unidades a ensayar fueron de los mismos tamaños y del mismo lote de fabricación. Se le aplicó una capa de pintura verde y se lijaron las puntas del block donde se aplicaron las cargas, con el objeto que al aplicar la carga las esquinas no presentaran un descascaramiento temprano, lo cual provocaría que aparecieran fisuras no deseables por el tipo de ensayo.

#### Descripción del Ensayo:

- Se colocó la primera unidad en la máquina de ensayo figura 3.12.
- Se aplicó carga en forma gradual.
- Alcanzada la carga de falla se anotó el valor de la misma y se continuó aplicando carga hasta que se definieron las grietas, las cuales se dibujaron sobre un acetato para luego pasarlas a una gráfica final.

#### Resultados:

- En las figuras 3.12 a 3.18 se observa como se colocó el block y las fallas que ocurrieron en las diferentes caras. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Ensayo	Cargas de Falla
1	1375 kg.
2	1650 kg.

- De igual forma que en el ensayo anterior, las grietas aparecieron simultáneamente y después de la carga de falla.

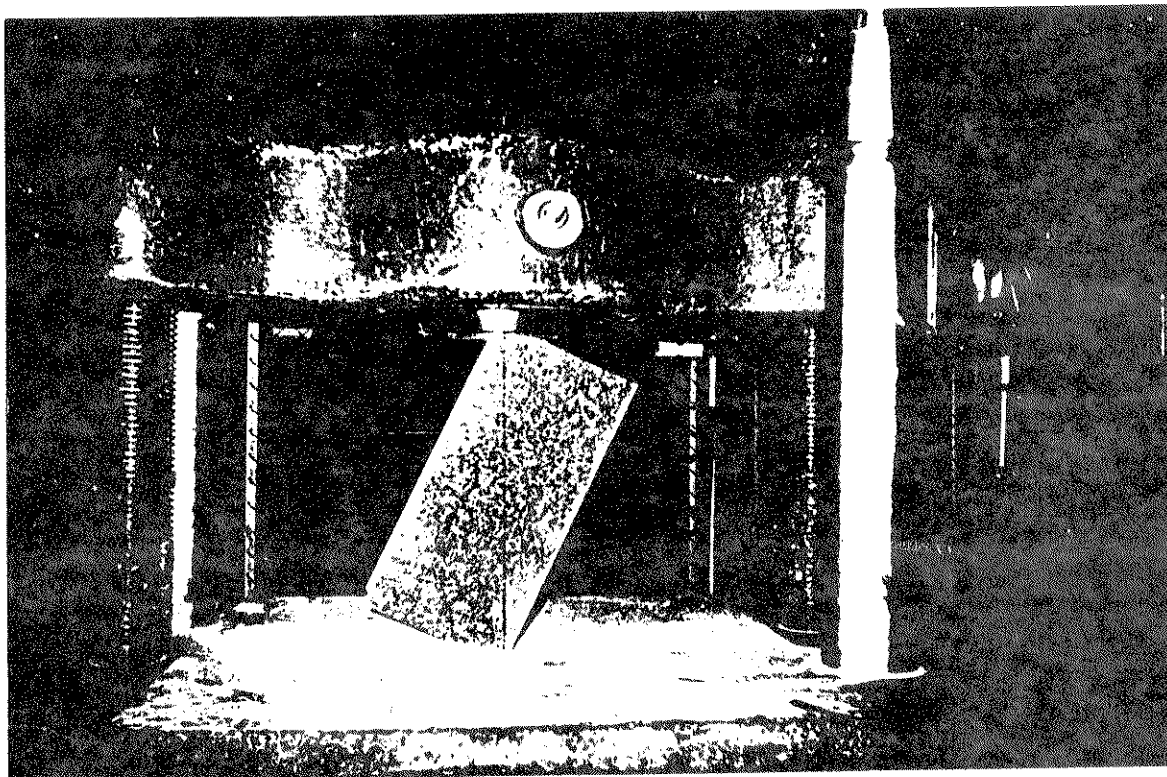


Fig. 3.12.- En la fotografía se observa como se colocó el block a ensayar en la prueba de corte.



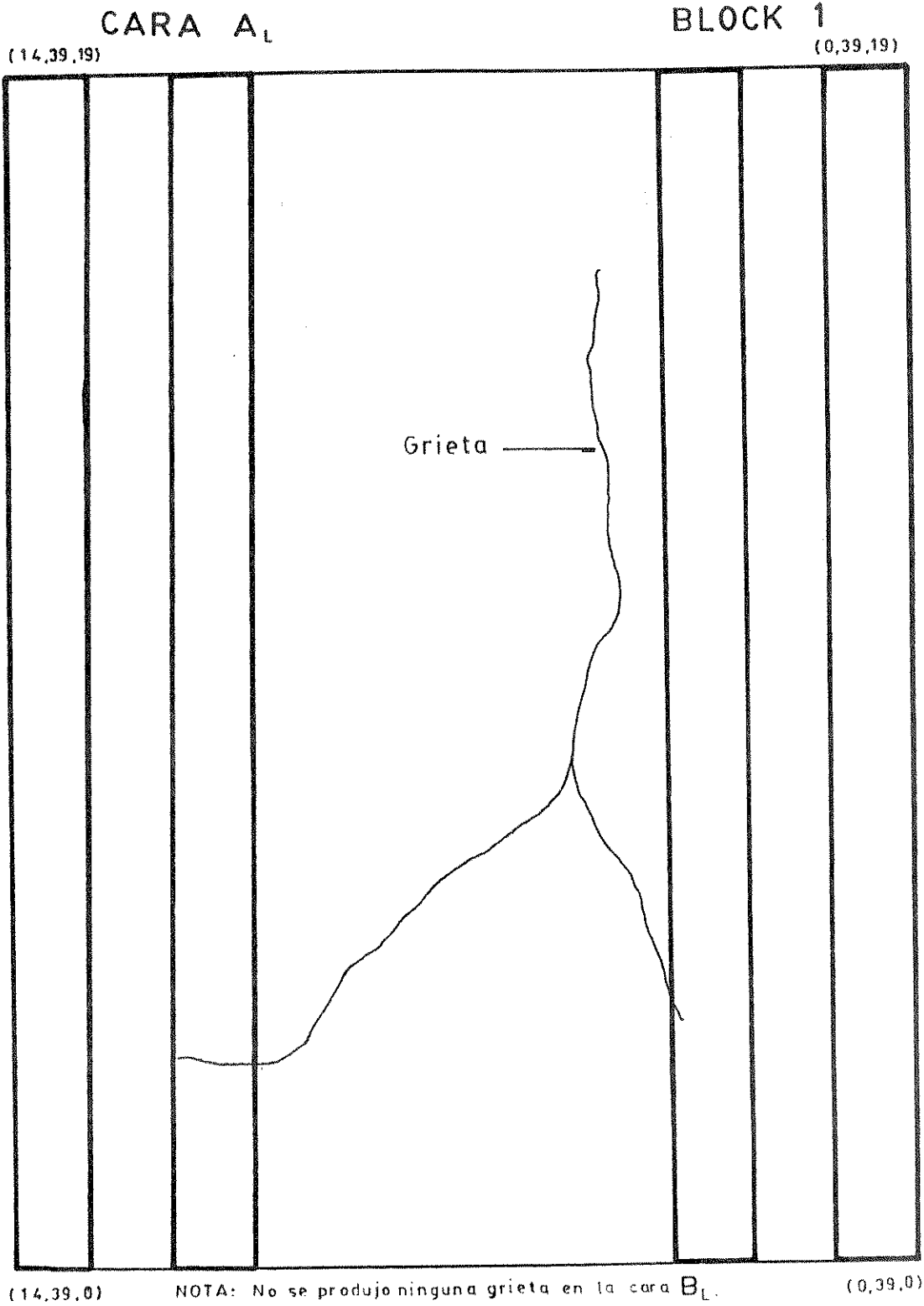
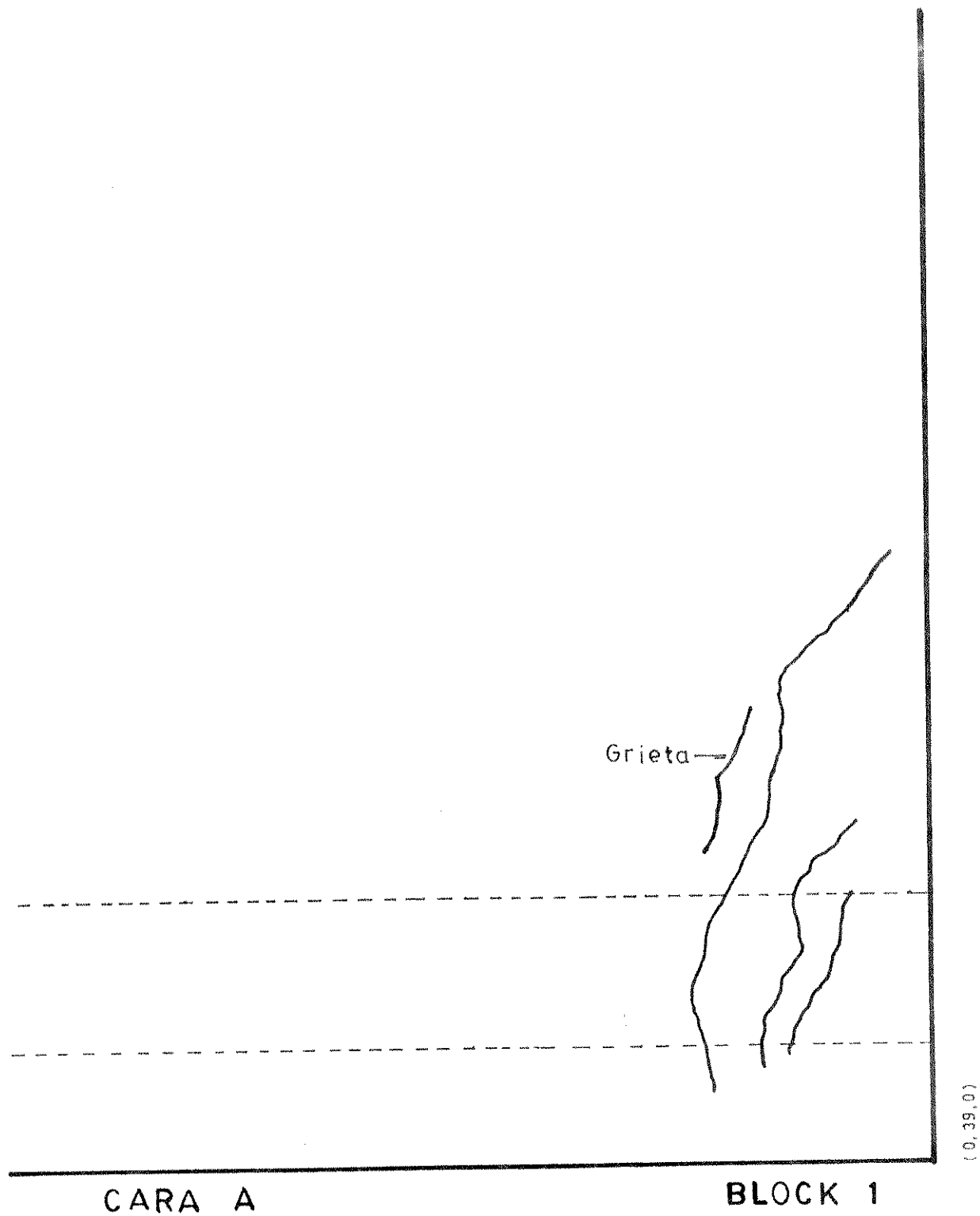
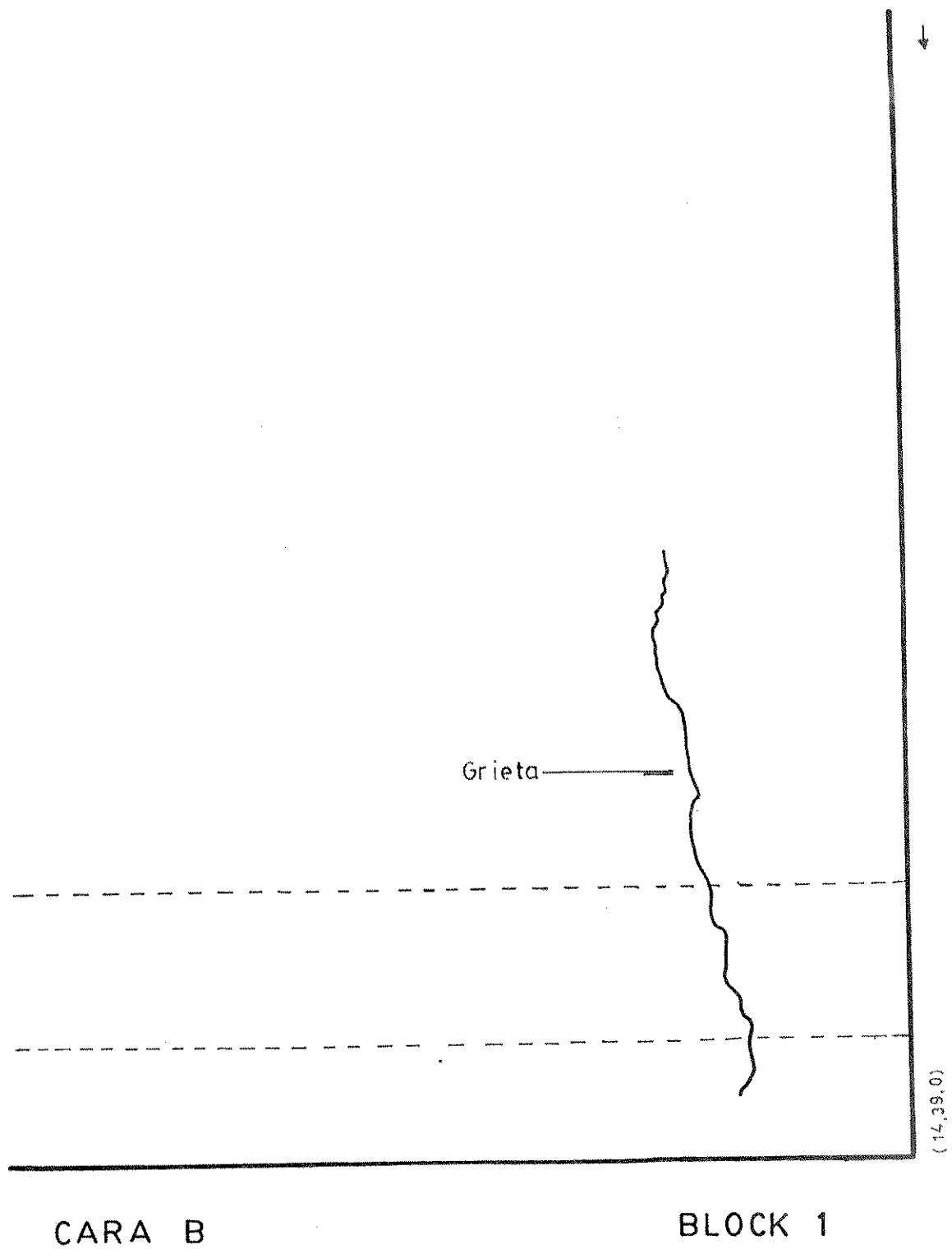


Fig. 3.13.- Grieta ocurrida por la carga de corte en el primer block ensayado.



nota: se observa la esquina donde ocurrio la grieta.

Fig.314.- Grieta ocurrida por la carga de corte en el primer block ensayado.



nota: se observa la esquina donde ocurrió la grieta.

Fig.315.-Grieta ocurrida por la carga de corte en el primer block ensayado.

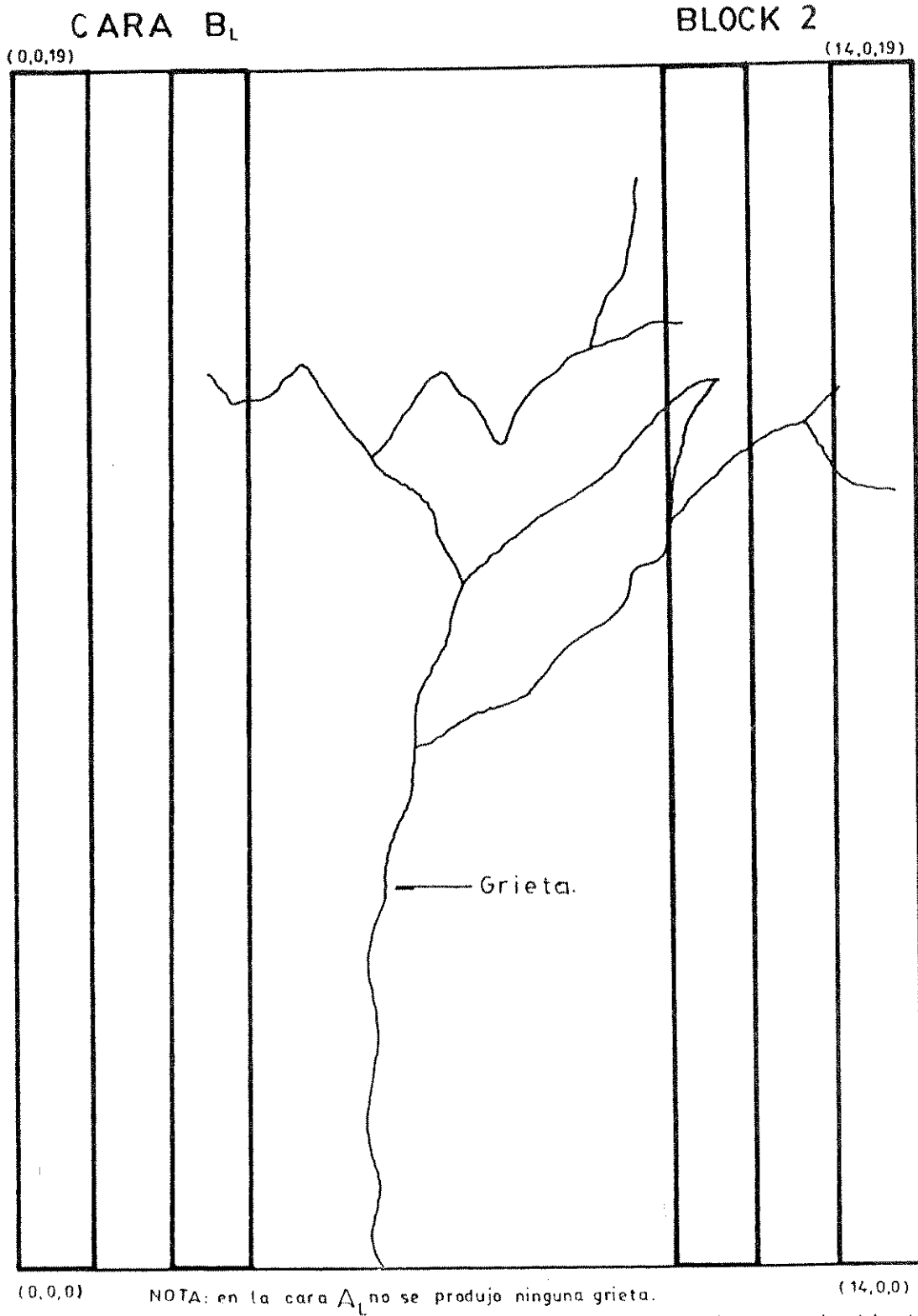


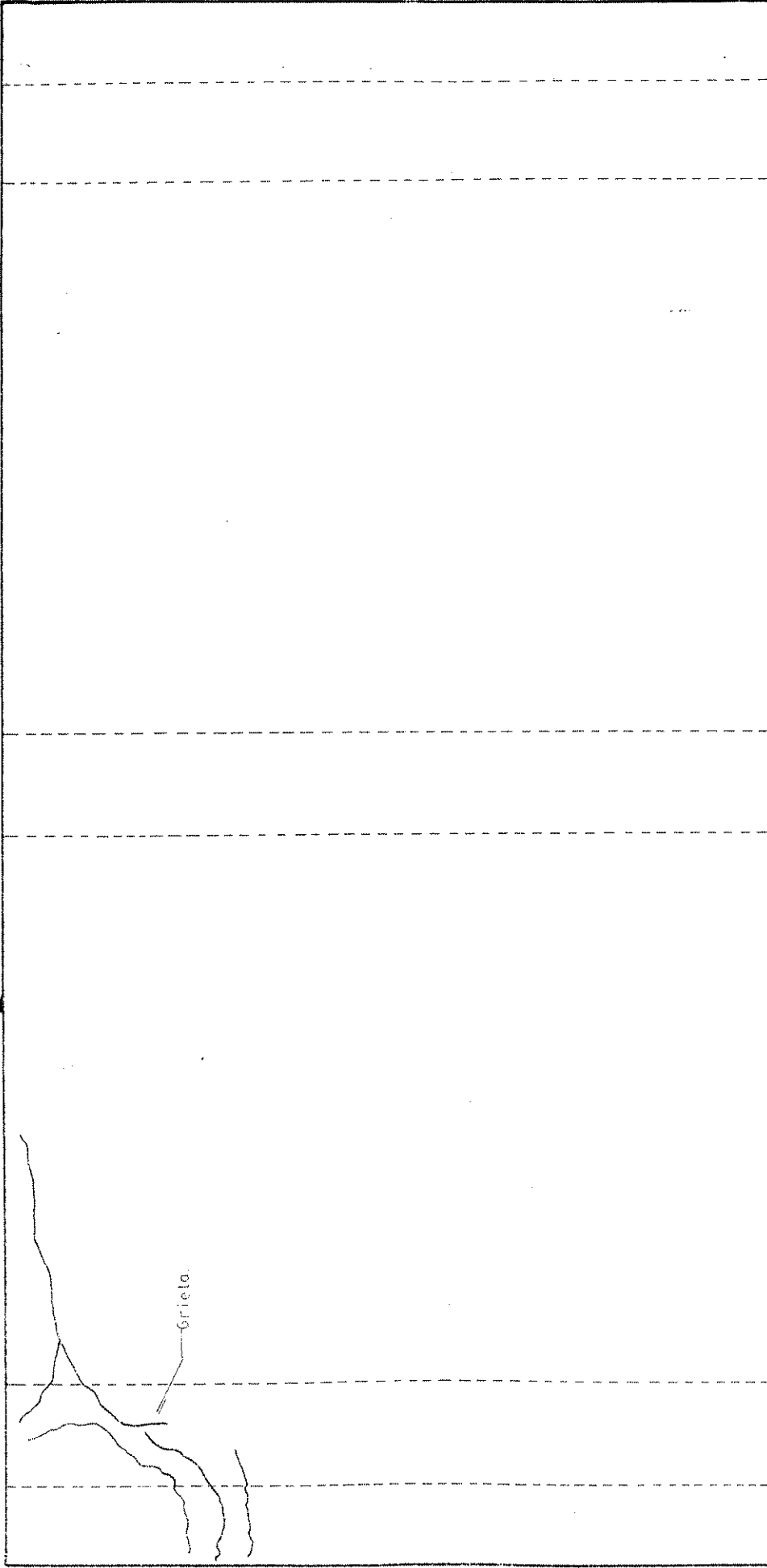
Fig. 3 16.-Grieta ocurrida por la carga a corte en el segundo block ensayado.

CARA A

BLOCK 2

(0,0,0)

(0,39,19)



(0,0,0)

(0,39,0)

Fig. 3.17- Grieta ocurrida por la carga de corte en el segundo block ensayado.

PROYECTO DE INVESTIGACION EN MATERIA DE CONSTRUCCION  
INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS  
LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

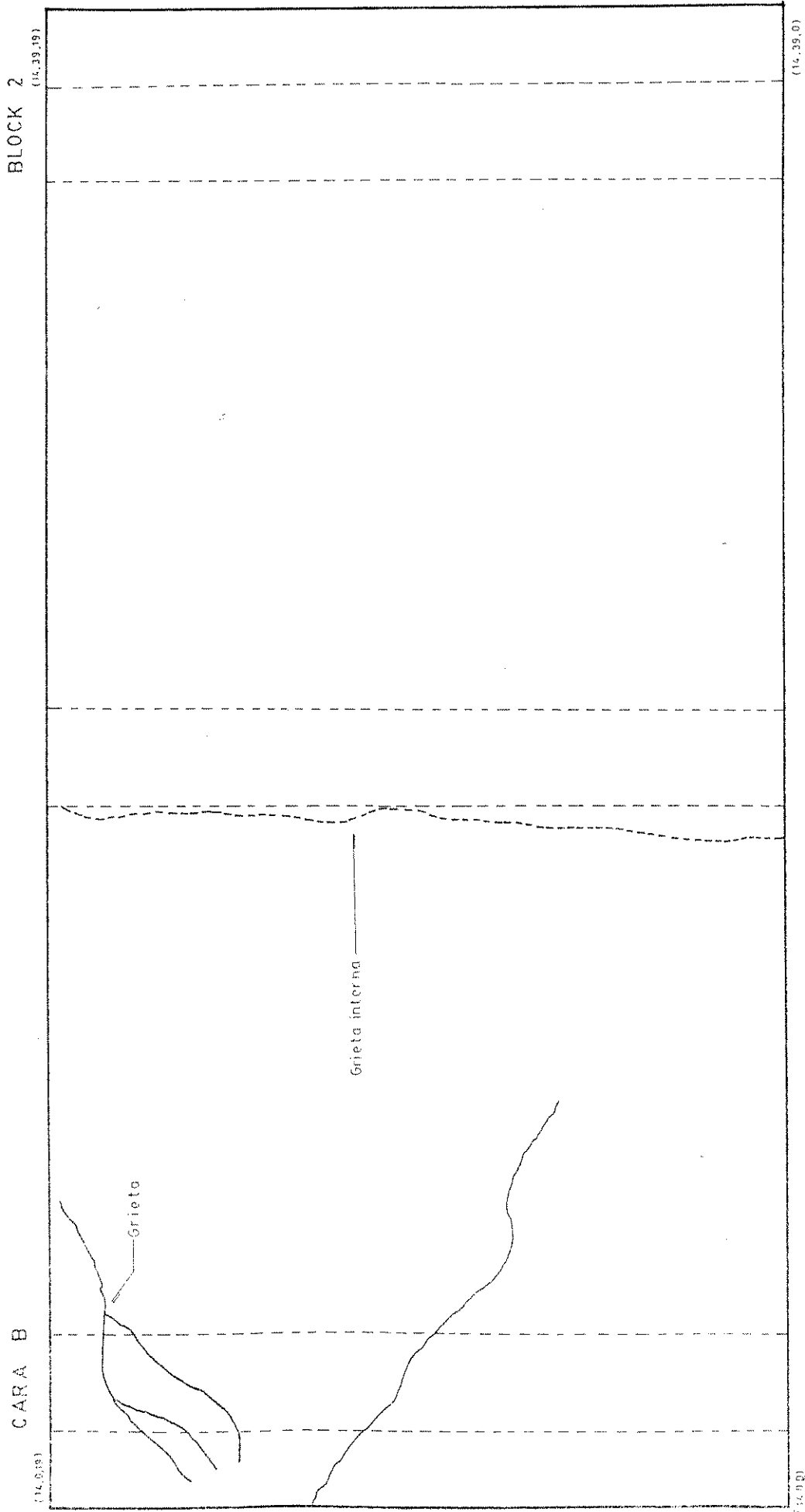


Fig. 3.18.- Grieta ocurrida por la carga de corte en el segundo block ensayado.

### 3.3.- Estudio Analítico:

Esta es la parte principal del estudio de tesis ya que se pretende dar una guía de cómo emplear el método de elementos finitos en una forma general y aplicarlo a un caso específico, esto incluye el uso de un programa determinado, como lo es el SAP90; para esto el usuario se puede guiar por los pasos que se describen en el capítulo 2 y que se pueden generalizar para cualquier problema que se pretenda resolver por medio de este método. El estudio analítico se divide en dos partes, la primera se refiere a los pasos que se utilizaron para la generación del modelo, así como la entrada básica de datos (base de datos), que fue utilizada para poder correr el programa SAP90. Mientras en la segunda parte se presentan algunos resultados que fueron generados por el SAP90.

#### 3.3.1.- Generación del Modelo:

Cuando se genera el modelo de la estructura o cuerpo a ser analizado, el ingeniero debe ejercer su propio criterio, dependiendo de su experiencia en el uso del método y del conocimiento que posea del funcionamiento o comportamiento de la estructura que se analiza, en esta sección se dan lineamientos generales a las personas que se inician en el uso del método de elementos finitos.

##### 3.3.1.1.- Definición del Problema:

- *Objetivos:* Mostrar una aplicación del método de elemento finito, siguiendo los pasos que son necesarios para desarrollar el modelo de la estructura y lograr comparar los resultados obtenidos por el programa SAP90 con ensayos de laboratorio. Esta comparación se hará en una forma cualitativa debido a que no se poseen datos con cantidades exactas. La estructura a estudiar es un block pómez de 14 cm por 19 cm por 39 cm. La aplicación que se hará del método de elementos finitos, es estudiar el comportamiento del block cuando se le aplica carga de compresión y carga de corte, se generalizará el estudio para los dos casos y donde se requiera se especificará el caso. Los parámetros que pueden afectar el comportamiento del block son la relación de Poisson que será tomada de [6]; el módulo de elasticidad, cuyo valor se averiguó en esta tesis, también se debe tener en cuenta que el block es un material frágil y que las fallas van a aparecer en una forma súbita; el material no es homogéneo y por tanto pueden aparecer concentraciones de esfuerzos en lugares donde el material tenga impurezas o donde existan espacios vacíos dentro del mismo, lo que ocasiona que hallan probables desviaciones de las grietas de falla. Otro parámetro que es importante tener en cuenta es que en un elemento bajo y ancho es

difícil medir el estado de esfuerzos, aunque lo anterior no impide que la grietas y fisuras aparezcan en los lugares donde posiblemente existen los mayores esfuerzos.

- *Descripción de la geometría:* Las dimensiones del block se tomaron directamente de las unidades que se ensayaron y luego se tomó un promedio de las mismas, en la figura 3.19 se observan las dimensiones del mismo. Como se puede observar el block es doblemente simétrico, lo que permite modelar solamente una cuarta parte del mismo como se estableciera un poco adelante.

- *Fuerzas aplicadas:* Las fuerzas que se aplican son estáticas y son uniformemente distribuidas, en la superficie superior del block para el caso de compresión y en la esquina superior para el caso de corte (fig. 3.20). La magnitud de la fuerza utilizada para los análisis son: para el caso de compresión  $10 \text{ kg/cm}^2$  y para el caso de corte de  $200 \text{ kg/cm}$ , en ambos casos la magnitud de la fuerza es menor que la carga última de falla, la razón de esto es que se podrá tener una mejor idea de qué ocurre antes de alcanzar dicha carga. La fuerza se distribuyó por medio de áreas tributaria a cada nodo. No se tomó en cuenta ningún efecto térmico, ni de presión.

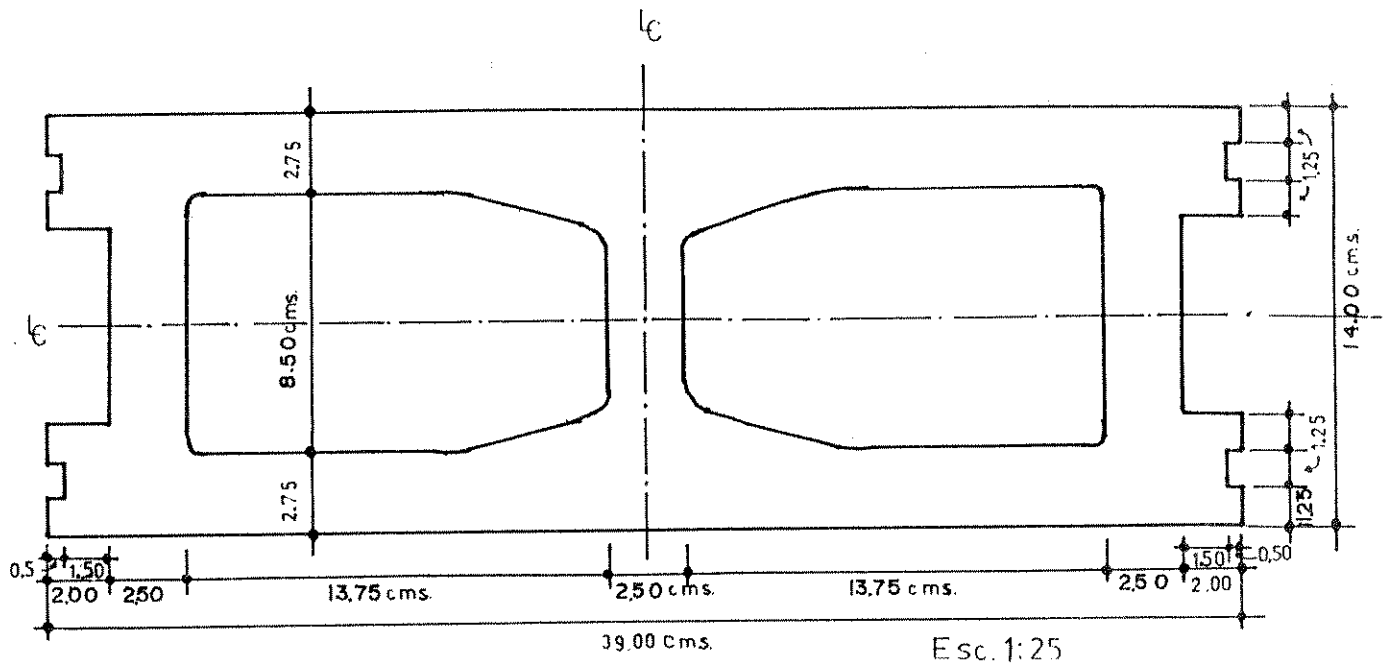
- *Restricciones a los desplazamientos:* Como se ve en la figura 3.19 el block posee doble simetría, lo cual es una ventaja cuando se realiza el modelado del block, ya que solamente se tiene que incluir una cuarta parte del mismo, asumiendo en los bordes de simetría restricciones tipo rodillo para que el block se pueda mover en X o en Y y no permitir que gire; en la superficie de apoyo las restricciones son rígidas, ya que aquí el block no debe desplazarse, ni girar en ninguna dirección (figura 3.21).

#### 3.3.1.2.- Modelo de la Estructura:

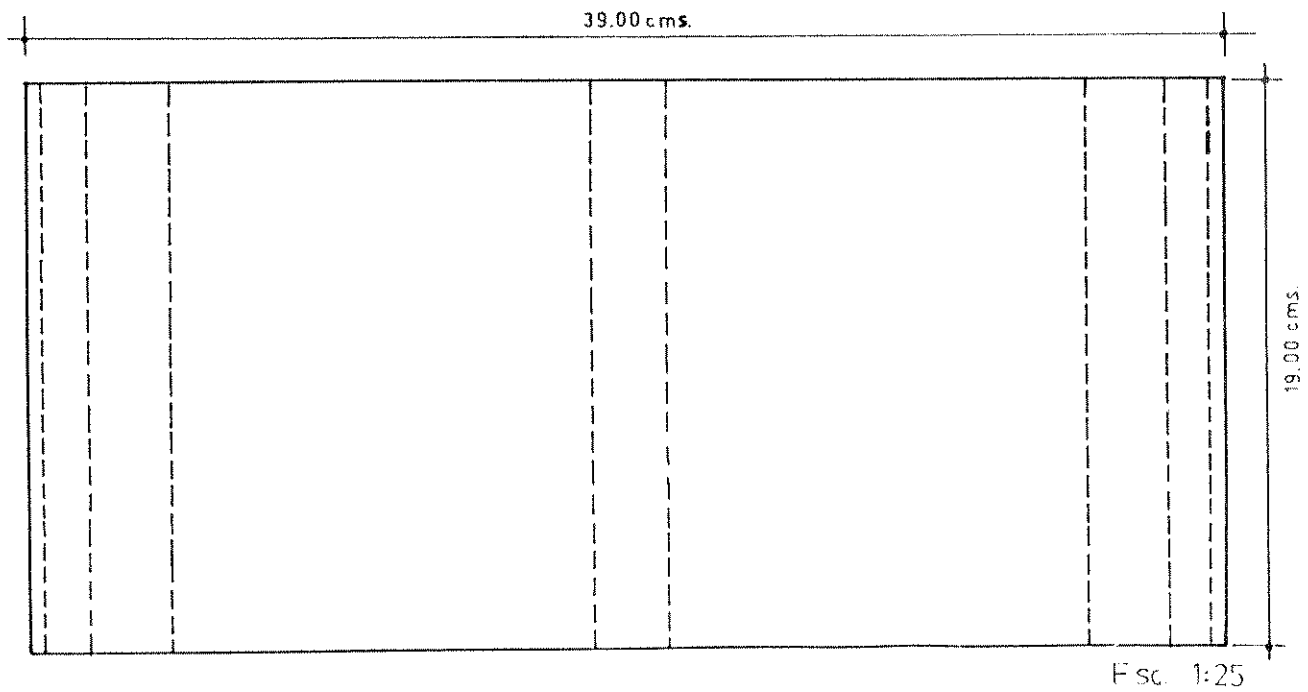
Como se dijo antes esta es la parte más difícil, ya que de ella depende la precisión, de los cálculos y el tiempo que se emplea en el análisis, esto último cada día es menos importante ya que los equipos de computación son más veloces, lo que permite realizar modelos más finos, aunque no se debe olvidar que el tiempo para generar el modelo también es importante. Para la división del modelo se empleó una malla de transición en la cual se dió más énfasis a las probables áreas de concentración de esfuerzos, esto es en las esquinas, tal y como se puede ver en la figura 3.22, este modelo se obtuvo luego de varias pruebas y fue escogido ya que posee un número intermedio de elementos por capa comparado con otras pruebas, el modelo se dividió en 18 capas en su altura (ver figura 3.24 generada por el SAP90), lo cual da un centímetro de alto para cada capa, dejando el centímetro restante de la altura como apoyo



del block sobre el piso. En la figura 3.22 se puede observar la numeración de los elementos de la primera capa, que son en total 104 y el numero total en toda la estructura es de 1872 elementos. En la figura 3.23 se muestra la numeración para los nodos de la primera capa y que son para toda la estructura 2632 nodos. Como se observa en las figuras son pocos los elementos distorsionados y los elementos triangulares son pocos, lo que hace que el modelo empleado sea bastante eficiente.

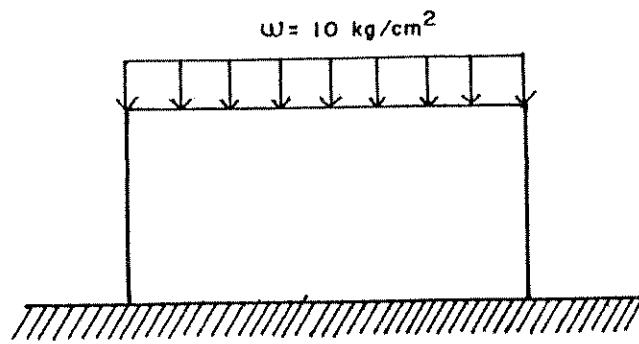


a) Planta de la unidad de block



b) Elevación de la unidad de block

Fig. 3.19.-Descripción de la geometría de la unidad.



a) Aplicación de la carga distribuida para provocar compresión del block.

Nota: la distribución de carga a cada nodo es por área tributaria.

b) Aplicación de la carga distribuida para provocar corte en el block.

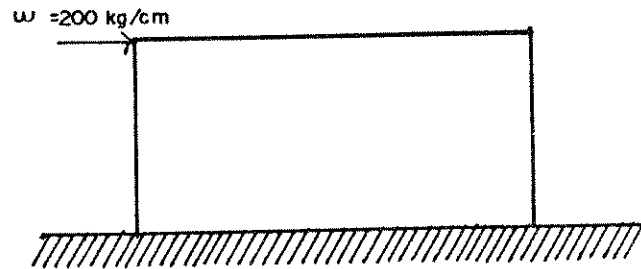
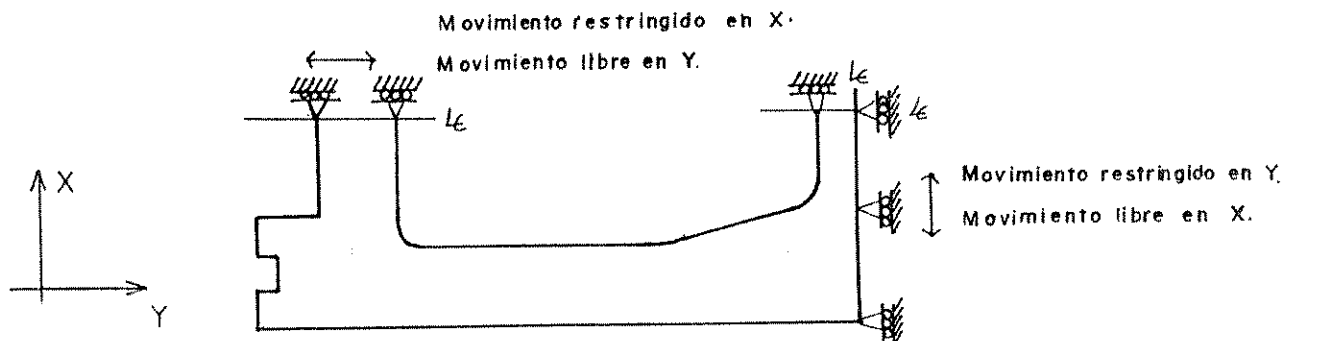
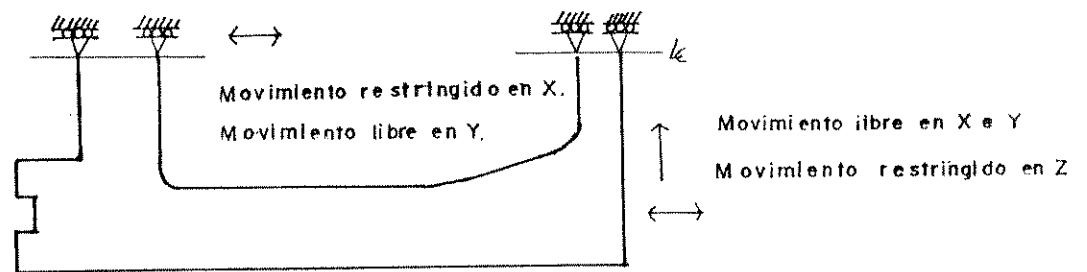


Fig. 3.20.- En los diagramas se observa como se aplicaron las cargas en los modelos.

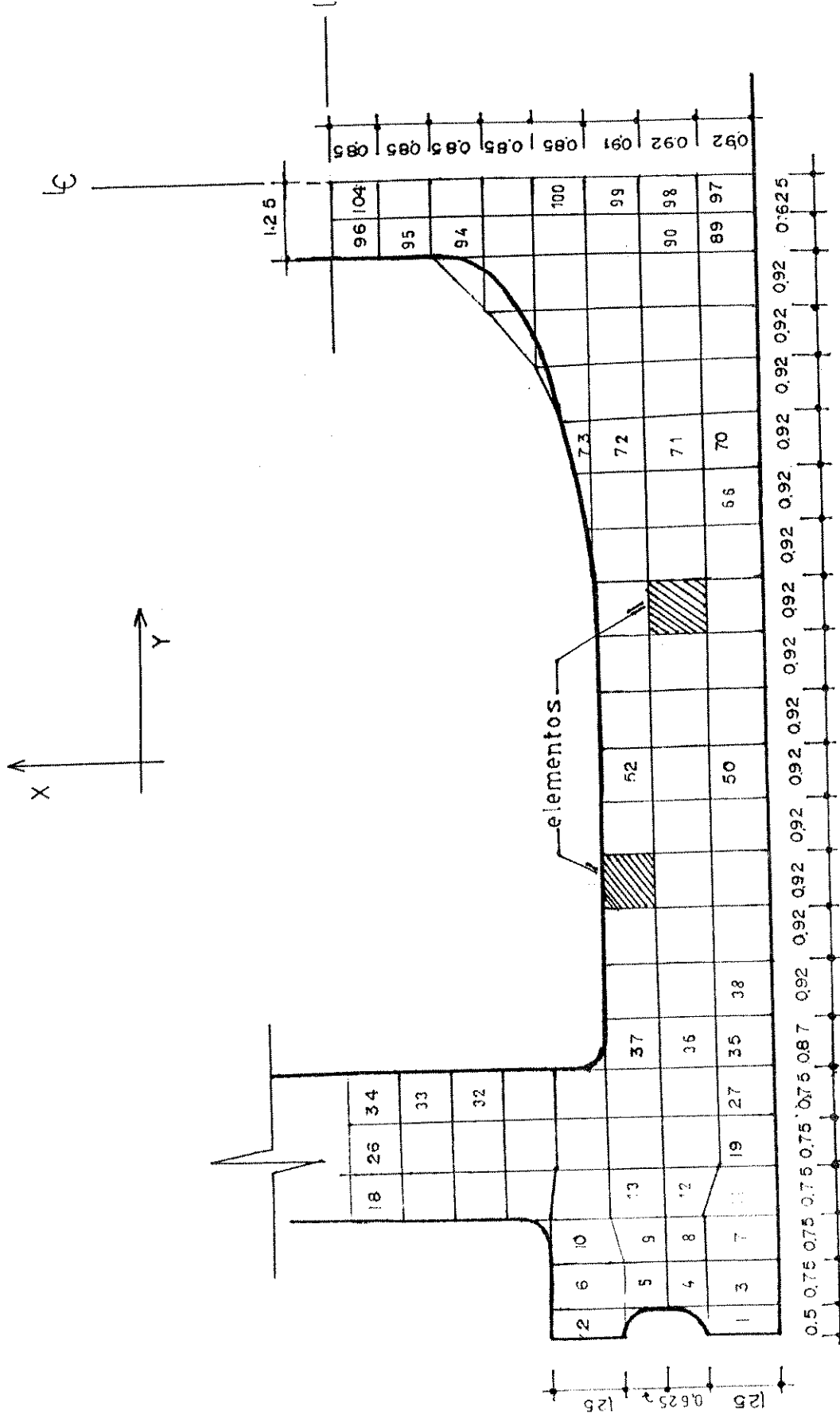


a) Restricciones utilizadas para el modelo a compresión



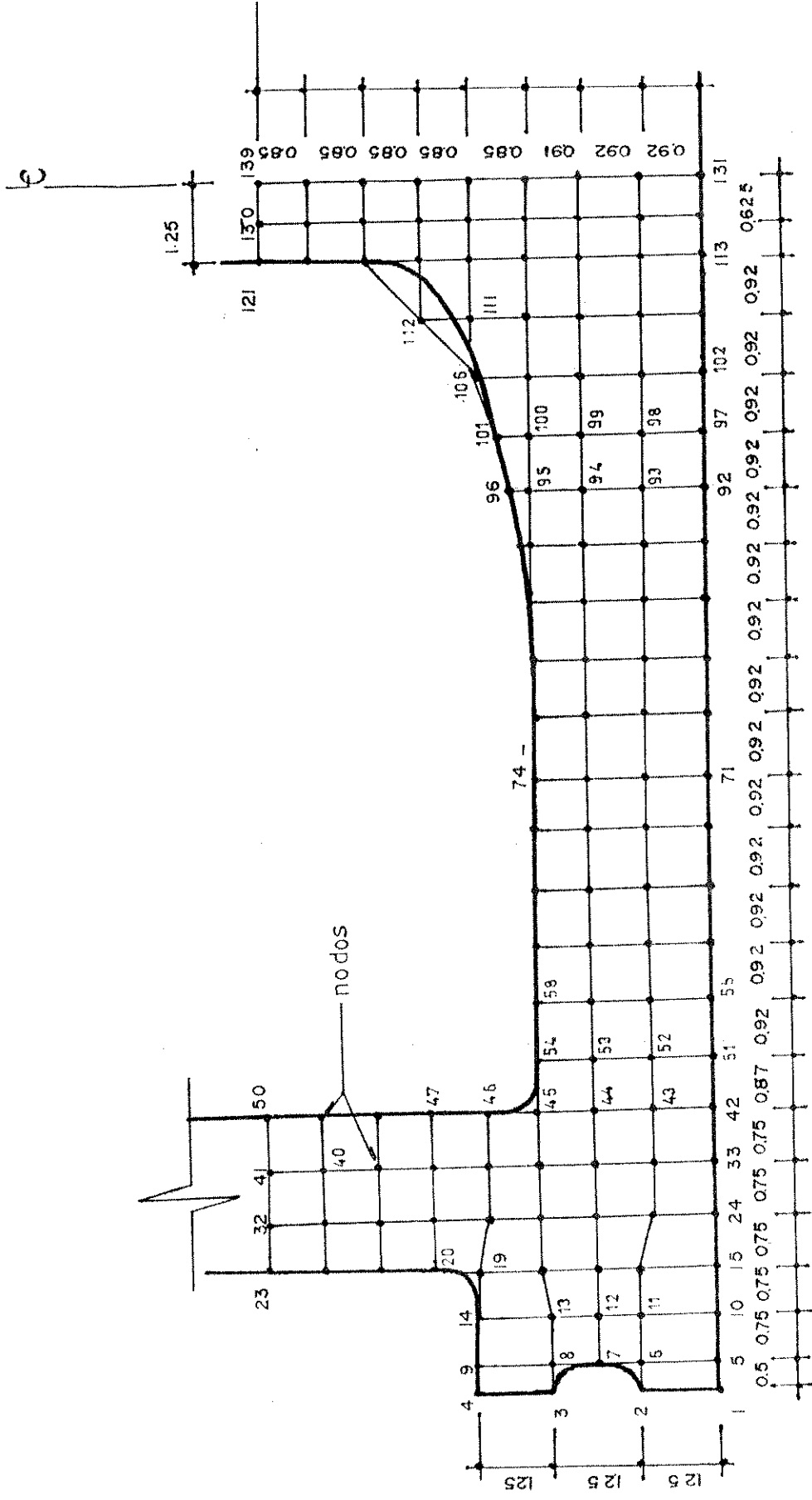
b) Restricciones utilizadas para el modelo a corte

Fig. 3.21.- En los diagramas se observa como se colocaron las restricciones.



nota: las medidas son en centímetros.

Fig.3.22-En la gráfica se muestra la capa 1 con las Medidas de los elementos y su numeración respectiva.



NOTA: Las dimensiones son en centímetros.

Fig. 3.23.- En la gráfica se muestra la numeración de los nodos superiores de la capa 1.

### 3.3.2.- Análisis por medio de programa SAP90:

Como se dijo anteriormente este inciso consta de dos partes, la primera es la entrada básica de datos que utiliza el SAP90, y luego los resultados finales que se presentaran en dos formas, en la primera se presentan algunos de los datos numéricos que genero el SAP90 y en la segunda se pueden observar las gráficas que genero el SAP90.

#### 3.3.2.1.- Entrada Básica de Datos:

La entrada de datos para el SAP90, es la forma en que deben estructurarse los datos que utiliza el programa, para generar los resultados finales, estos datos son los mínimos para que el programa pueda generar el modelos, en el cual deben incluirse los nodos y sus coordenadas, qué nodos forman determinados elementos, condiciones de borde a través de restricciones y las fuerzas a que se somete la estructura, el lector debe referirse al manual del usuario del SAP90 [7] para mayor información. El programa SAP90 posee dos formas para poder generar esta base de datos, la primera es por medio de programa que es parte del paquete que lleva el nombre de SAPIN, por medio del cual se forma la estructura en una forma interactiva, ya que el usuario va formando el modelo por medio de una gráfica. La forma que se generó el modelo en el caso de esta tesis fue ingresar los datos necesarios por medio de una hoja electrónica, para luego archivarlo en formato (ASCII), que es el formato en que trabaja el SAP90. A continuación se presenta una parte del archivo del caso de compresión que fue elaborado y que está de acuerdo con la forma de presentación que requiere el programa SAP90, el caso de corte es similar y por eso no se presenta:

#### ANÁLISIS DE ESFUERZOS DE UN BLOCK PÓMEZ SOMETIDO A CARGA DE COMPRESIÓN SYSTEM

L=1

##### JOINTS

1	X=	0.00	Y=	0.00	Z=	18.0	
2503	X=	0.00	Y=	0.00	Z=	1.0	G=1,2503,139
2	X=	1.25	Y=	0.00	Z=	18.0	
2504	X=	1.25	Y=	0.00	Z=	1.0	G=2,2504,139
3	X=	2.50	Y=	0.00	Z=	18.0	
2505	X=	2.50	Y=	0.00	Z=	1.0	G=3,2505,139
4	X=	3.75	Y=	0.00	Z=	18.0	
2506	X=	3.75	Y=	0.00	Z=	1.0	G=4,2506,139
5	X=	0.00	Y=	-0.50	Z=	18.0	
2507	X=	0.00	Y=	-0.50	Z=	1.0	G=5,2507,139

6 X= 1.25 Y=-0.50 Z= 18.0  
 2508 X= 1.25 Y=-0.50 Z= 1.0 G=6,2508,139  
 7 X= 1.88 Y=-0.50 Z= 18.0  
 2509 X= 1.88 Y=-0.50 Z= 1.0 G=7,2509,139  
 8 X= 2.50 Y=-0.50 Z= 18.0  
 2510 X= 2.50 Y=-0.50 Z= 1.0 G=8,2510,139  
  
 136 X= 4.45 Y=-19.50 Z= 18.0  
 2638 X= 4.45 Y=-19.50 Z= 1.0 G=136,2638,139  
 137 X= 5.30 Y=-19.50 Z= 18.0  
 2639 X= 5.30 Y=-19.50 Z= 1.0 G=137,2639,139  
 138 X= 6.15 Y=-19.50 Z= 18.0  
 2640 X= 6.15 Y=-19.50 Z= 1.0 G=138,2640,139  
 139 X= 7.00 Y=-19.50 Z= 18.0  
 2641 X= 7.00 Y=-19.50 Z= 1.0 G=139,2641,139

RESTRAINTS

1 2502 1 R=0,0,0,1,1,1  
 23 2386 139 R=1,0,0,1,1,1  
 32 2395 139 R=1,0,0,1,1,1  
 41 2404 139 R=1,0,0,1,1,1  
 50 2413 139 R=1,0,0,1,1,1  
 121 2484 139 R=1,0,0,1,1,1  
 130 2493 139 R=1,0,0,1,1,1  
 131 2494 139 R=0,1,0,1,1,1  
 132 2495 139 R=0,1,0,1,1,1  
 133 2496 139 R=0,1,0,1,1,1  
 134 2497 139 R=0,1,0,1,1,1  
 135 2498 139 R=0,1,0,1,1,1  
 136 2499 139 R=0,1,0,1,1,1  
 137 2500 139 R=0,1,0,1,1,1  
 138 2501 139 R=0,1,0,1,1,1  
 139 2502 139 R=1,1,0,1,1,1  
 2503 2641 1 R=1,1,1,1,1,1

SOLID

NM=1 MAXN=1  
 1 NUMT=1  
 T=0 E=45750 U=0.25  
 1 JQ=140,144,1,5,141,145,2,6 M=1 I=0  
 2 JQ=142,147,3,8,143,148,4,9 M=1 I=0  
 3 JQ=144,149,5,10,145,150,6,11 M=1 I=0  
 4 JQ=145,150,6,11,146,151,7,12 M=1 I=0  
 5 JQ=146,151,7,12,147,152,8,13 M=1 I=0  
 6 JQ=147,152,8,13,148,153,9,14 M=1 I=0  
 7 JQ=149,154,10,15,150,155,11,16 M=1 I=0  
 8 JQ=150,155,11,16,151,156,12,17 M=1 I=0

9 JQ=151,156,12,17,152,157,13,18 M=1 I=1  
10 JQ=152,157,13,18,153,158,14,19 M=1 Y=1  
11 JQ=154,163,15,24,155,164,16,25 M=1 I=1  
12 JQ=155,164,16,25,156,165,17,26 M=1 I=1  
13 JQ=156,165,17,26,157,166,18,27 M=1 Y=0  
14 JQ=157,166,18,27,158,167,19,28 M=1 I=1  
15 JQ=158,167,19,28,159,168,20,29 M=1 I=1

1862 JQ=2620,2629,2481,2490,2621,2630,2482,2491 M=1 I=0  
1863 JQ=2621,2630,2482,2491,2622,2631,2483,2492 M=1 I=0  
1864 JQ=2622,2631,2483,2492,2623,2632,2484,2493 M=1 I=0  
1865 JQ=2624,2633,2485,2494,2625,2634,2486,2495 M=1 I=0  
1866 JQ=2625,2634,2486,2495,2626,2635,2487,2496 M=1 I=0  
1867 JQ=2626,2635,2487,2496,2627,2636,2488,2497 M=1 I=0  
1868 JQ=2627,2636,2488,2497,2628,2637,2489,2498 M=1 I=0  
1869 JQ=2628,2637,2489,2498,2629,2638,2490,2499 M=1 I=0  
1870 JQ=2629,2638,2490,2499,2630,2639,2491,2500 M=1 I=0  
1871 JQ=2630,2639,2491,2500,2631,2640,2492,2501 M=1 I=0  
1872 JQ=2631,2640,2492,2501,2632,2641,2493,2502 M=1 I=0

#### LOADS

1 L=1 F=0,0,-15.63  
2 L=1 F=0,0,-15.63  
3 L=1 F=0,0,-15.63  
4 L=1 F=0,0,-15.63  
5 L=1 F=0,0,-39.06  
6 L=1 F=0,0,-50.78  
7 L=1 F=0,0,-23.44  
8 L=1 F=0,0,-50.78  
9 L=1 F=0,0,-39.06  
10 L=1 F=0,0,-46.88  
11 L=1 F=0,0,-70.31  
12 L=1 F=0,0,-49.55  
13 L=1 F=0,0,-70.31  
14 L=1 F=0,0,-44.20  
15 L=1 F=0,0,-46.03  
16 L=1 F=0,0,-73.84  
17 L=1 F=0,0,-61.15  
18 L=1 F=0,0,-73.00  
  
135 L=1 F=0,0,-26.56  
136 L=1 F=0,0,-26.56  
137 L=1 F=0,0,-26.56  
138 L=1 F=0,0,-26.56  
139 L=1 F=0,0,-13.28



### 3.3.2.2.- Resultado Generados por el programa SAP90:

Este inciso se divide en dos parte, la parte A presenta resultados numéricos y la parte B se presentan gráficos diversos generados por el SAP90, en la siguiente sección se analizan los resultados en una forma general (discusión de resultados).

PARTE A: Los resultados numéricos que se presentan a continuación son solo una parte de todos los generados por el SAP90 debido a que la los mismos son demasiado extensos y por esta razón sería imposible presentarlos en una forma impresa, además que se cansaría al lector con semejante cantidad de números, de esta forma es mejor analizar los gráficos que se presentan en esta misma sección y que obviamente facilitan la interpretación de los mismos. Cada archivo lleva un nombre e indica que resultados se presentan por ejemplo el "compres.sap" son los datos generados automáticamente por el programa y que sirven para modelar por completo el block (fig.3.24).

## SAP 90

### STRUCTURAL ANALYSIS PROGRAMS

VERSION 5.41

Copyright (C) 1978-1994  
EDWARD L. WILSON

All rights reserved

CSI / SAP90 - - FINITE ELEMENT ANALYSIS OF STRUCTURES  
PROGRAM:SAP90/FILE:compres.SAP

ANALISIS DE ESFUERZOS DE UN BLOCK POMEZ SOMETIDO A CARGA DE COMPRESION

#### SYSTEM DATA

EXECUTION CODE	- - - - -	0
NUMBER OF LOAD CONDITIONS	- - - - -	1
STEADY STATE LOAD FREQUENCY	- - - - -	.0000E+00
NUMBER OF EIGENVALUES	- - - - -	0

EIGEN CONVERGENCE TOLERANCE - - - - - .1000E-03

EIGEN CUTOFF TIME PERIOD - - - - - .0000E+00

GENERATED JOINT COORDINATES

JOINT	X	Y	Z
1	.000	.000	18.000
2	1.250	.000	18.000
3	2.500	.000	18.000
4	3.750	.000	18.000
5	.000	-.500	18.000
6	1.250	-.500	18.000
7	1.880	-.500	18.000
8	2.500	-.500	18.000
9	3.750	-.500	18.000
10	.000	-1.250	18.000
11	1.250	-1.250	18.000
12	1.880	-1.250	18.000
13	2.500	-1.250	18.000
14	3.750	-1.250	18.000
15	.000	-2.000	18.000
16	1.250	-2.000	18.000
17	1.880	-2.000	18.000
18	2.790	-2.000	18.000
19	3.750	-2.000	18.000
20	4.450	-2.000	18.000
21	5.300	-2.000	18.000
22	6.150	-2.000	18.000
23	7.000	-2.000	18.000
24	.000	-2.830	18.000
25	.920	-2.830	18.000
26	1.840	-2.830	18.000
27	2.750	-2.830	18.000
28	3.600	-2.830	18.000
29	4.450	-2.830	18.000
30	5.300	-2.830	18.000
2626	1.840	-18.880	1.000
2627	2.750	-18.880	1.000
2628	3.600	-18.880	1.000
2629	4.450	-18.880	1.000
2630	5.300	-18.880	1.000
2631	6.150	-18.880	1.000
2632	7.000	-18.880	1.000

2633	.000	-19.500	1.000
2634	.920	-19.500	1.000
2635	1.840	-19.500	1.000
2636	2.750	-19.500	1.000
2637	3.600	-19.500	1.000
2638	4.450	-19.500	1.000
2639	5.300	-19.500	1.000
2640	6.150	-19.500	1.000
2641	7.000	-19.500	1.000

R E S T R A I N T		D A T A						
JOINT	RX	RY	RZ	RXX	RYY	RZZ		
1	0	0	0	1	1	1	1	
2	0	0	0	1	1	1	1	
3	0	0	0	1	1	1	1	
4	0	0	0	1	1	1	1	
5	0	0	0	1	1	1	1	
6	0	0	0	1	1	1	1	
7	0	0	0	1	1	1	1	
8	0	0	0	1	1	1	1	
9	0	0	0	1	1	1	1	
10	0	0	0	1	1	1	1	
11	0	0	0	1	1	1	1	
12	0	0	0	1	1	1	1	
13	0	0	0	1	1	1	1	
14	0	0	0	1	1	1	1	
15	0	0	0	1	1	1	1	
2620	1	1	1	1	1	1	1	
2621	1	1	1	1	1	1	1	
2622	1	1	1	1	1	1	1	
2623	1	1	1	1	1	1	1	
2624	1	1	1	1	1	1	1	
2625	1	1	1	1	1	1	1	
2626	1	1	1	1	1	1	1	
2627	1	1	1	1	1	1	1	
2628	1	1	1	1	1	1	1	
2629	1	1	1	1	1	1	1	
2630	1	1	1	1	1	1	1	
2631	1	1	1	1	1	1	1	
2632	1	1	1	1	1	1	1	
2633	1	1	1	1	1	1	1	
2634	1	1	1	1	1	1	1	
2635	1	1	1	1	1	1	1	
2636	1	1	1	1	1	1	1	
2637	1	1	1	1	1	1	1	
2638	1	1	1	1	1	1	1	

2639	1	1	1	1	1	1
2640	1	1	1	1	1	1
2641	1	1	1	1	1	1

S O L I D C O N T R O L D A T A

NUMBER OF ELEMENT MATERIAL TYPES 1  
 MAXIMUM NUMBER OF TEMPERATURES 1

LOAD COND	GRAVITATIONAL MULTIPLIERS			TEMPERATURE MULTIPLIERS	PRESSURE MULTIPLIERS
	X	Y	Z		
1	.000	.000	.000	.000	.000

M A T E R I A L P R O P E R T Y D A T A

MAT ID	NUMBER TEMPS	WEIGHT PER UNIT VOL	MASS PER UNIT VOL	MAT PROP ANGLE 1	MAT PROP ANGLE 2	MAT PROP ANGLE 3
1	1	.0000E+00	.0000E+00	.000	.000	.000

T E M P E R A T U R E D E P E N D E N T D A T A

MATERIAL PROPERTIES

MAT ID		TEMP	MODULUS OF ELASTICITY			SHEAR MODULI		
ID	ID	R-DIR	S-DIR	T-DIR	G1	G2	G3	
1	1	.00	.458E+05	.458E+05	.458E+05	.18E+05	.18E+05	.18E+05

T E M P E R A T U R E D E P E N D E N T D A T A

THERMAL EXPANSION COEFFICIENTS

MAT ID		TEMP	COEFFICIENTS OF THERMAL EXPANSION					
ID	ID	A1	A2	A3	A4	A5	A6	
1	1	.00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	

S O L I D E L E M E N T D A T A

ELT REF	JOINT 1	JOINT 2	JOINT 3	JOINT 4	JOINT 5	JOINT 6	JOINT 7	JOINT 8	MAT ID	INCMPS	TEMP
1	140	144	1	5	141	145	2	6	1	0	.00
2	142	147	3	8	143	148	4	9	1	0	.00
3	144	149	5	10	145	150	6	11	1	0	.00
4	145	150	6	11	146	151	7	12	1	0	.00

5	146	151	7	12	147	152	8	13	1	0	.00
6	147	152	8	13	148	153	9	14	1	0	.00
7	149	154	10	15	150	155	11	16	1	0	.00
8	150	155	11	16	151	156	12	17	1	0	.00
9	151	156	12	17	152	157	13	18	1	1	.00
10	152	157	13	18	153	158	14	19	1	1	.00
11	154	163	15	24	155	164	16	25	1	1	.00
12	155	164	16	25	156	165	17	26	1	1	.00
13	156	165	17	26	157	166	18	27	1	0	.00
14	157	166	18	27	158	167	19	28	1	1	.00
15	158	167	19	28	159	168	20	29	1	1	.00
16	159	168	20	29	160	169	21	30	1	0	.00
17	160	169	21	30	161	170	22	31	1	0	.00
18	161	170	22	31	162	171	23	32	1	0	.00
19	163	172	24	33	164	173	25	34	1	0	.00
20	164	173	25	34	165	174	26	35	1	0	.00

1850	2608	2613	2469	2474	2608	2614	2469	2475	1	1	.00
1851	2609	2615	2470	2476	2610	2616	2471	2477	1	0	.00
1852	2610	2616	2471	2477	2611	2617	2472	2478	1	0	.00
1853	2611	2617	2472	2478	2612	2618	2473	2479	1	0	.00
1854	2612	2618	2473	2479	2613	2619	2474	2480	1	0	.00
1855	2613	2619	2474	2480	2614	2620	2475	2481	1	0	.00
1856	2614	2620	2475	2481	2614	2621	2475	2482	1	1	.00
1857	2615	2624	2476	2485	2616	2625	2477	2486	1	0	.00
1858	2616	2625	2477	2486	2617	2626	2478	2487	1	0	.00
1859	2617	2626	2478	2487	2618	2627	2479	2488	1	0	.00
1860	2618	2627	2479	2488	2619	2628	2480	2489	1	0	.00
1861	2619	2628	2480	2489	2620	2629	2481	2490	1	0	.00
1862	2620	2629	2481	2490	2621	2630	2482	2491	1	0	.00
1863	2621	2630	2482	2491	2622	2631	2483	2492	1	0	.00
1864	2622	2631	2483	2492	2623	2632	2484	2493	1	0	.00
1865	2624	2633	2485	2494	2625	2634	2486	2495	1	0	.00
1866	2625	2634	2486	2495	2626	2635	2487	2496	1	0	.00
1867	2626	2635	2487	2496	2627	2636	2488	2497	1	0	.00
1868	2627	2636	2488	2497	2628	2637	2489	2498	1	0	.00
1869	2628	2637	2489	2498	2629	2638	2490	2499	1	0	.00
1870	2629	2638	2490	2499	2630	2639	2491	2500	1	0	.00
1871	2630	2639	2491	2500	2631	2640	2492	2501	1	0	.00
1872	2631	2640	2492	2501	2632	2641	2493	2502	1	0	.00

T O T A L    W E I G H T S                    A N D    M A S S E S

PROP	WEIGHT	MASS
1	.0000	.0000
TOTAL	.0000	.0000

J O I N T L O A D S

JOINT	LOAD	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
1	1	.000E+00		.000E+00	-.156E+02	.000E+00	.000E+00
2	1	.000E+00		.000E+00	-.156E+02	.000E+00	.000E+00
3	1	.000E+00		.000E+00	-.156E+02	.000E+00	.000E+00
4	1	.000E+00		.000E+00	-.156E+02	.000E+00	.000E+00
5	1	.000E+00		.000E+00	-.391E+02	.000E+00	.000E+00
6	1	.000E+00		.000E+00	-.508E+02	.000E+00	.000E+00
7	1	.000E+00		.000E+00	-.234E+02	.000E+00	.000E+00
8	1	.000E+00		.000E+00	-.508E+02	.000E+00	.000E+00
9	1	.000E+00		.000E+00	-.391E+02	.000E+00	.000E+00
10	1	.000E+00		.000E+00	-.469E+02	.000E+00	.000E+00
11	1	.000E+00		.000E+00	-.703E+02	.000E+00	.000E+00
12	1	.000E+00		.000E+00	-.496E+02	.000E+00	.000E+00
13	1	.000E+00		.000E+00	-.703E+02	.000E+00	.000E+00
14	1	.000E+00		.000E+00	-.442E+02	.000E+00	.000E+00
15	1	.000E+00		.000E+00	-.460E+02	.000E+00	.000E+00
16	1	.000E+00		.000E+00	-.738E+02	.000E+00	.000E+00
17	1	.000E+00		.000E+00	-.612E+02	.000E+00	.000E+00
18	1	.000E+00		.000E+00	-.730E+02	.000E+00	.000E+00
19	1	.000E+00		.000E+00	-.558E+02	.000E+00	.000E+00
20	1	.000E+00		.000E+00	-.338E+02	.000E+00	.000E+00
130	1	.000E+00	.000E+00	-.266E+02	.000E+00	.000E+00	.000E+00
131	1	.000E+00	.000E+00	-.144E+02	.000E+00	.000E+00	.000E+00
132	1	.000E+00	.000E+00	-.288E+02	.000E+00	.000E+00	.000E+00
133	1	.000E+00	.000E+00	-.286E+02	.000E+00	.000E+00	.000E+00
134	1	.000E+00	.000E+00	-.275E+02	.000E+00	.000E+00	.000E+00
135	1	.000E+00	.000E+00	-.266E+02	.000E+00	.000E+00	.000E+00
136	1	.000E+00	.000E+00	-.266E+02	.000E+00	.000E+00	.000E+00
137	1	.000E+00	.000E+00	-.266E+02	.000E+00	.000E+00	.000E+00
138	1	.000E+00	.000E+00	-.266E+02	.000E+00	.000E+00	.000E+00
139	1	.000E+00	.000E+00	-.133E+02	.000E+00	.000E+00	.000E+00

O U T P U T F I L E S C R E A T E D B Y P R O G R A M

INPUT DATA ECHO	compres.SAP
SOLUTION ERRORS AND WARNINGS	compres.ERR
EQUATION NUMBERING	compres.EQN
DISPLACEMENTS AND REACTIONS	compres.SOL
ELEMENT FORCES	compres.FEF
SOLID ELEMENT STRESSES	compres.F8F

# SAP90

## STRUCTURAL ANALYSIS PROGRAMS

VERSION 5.41

Copyright (C) 1978-1994  
EDWARD L. WILSON

All rights reserved

PROGRAM: SAP90/FILE:compres.SOL

ANÁLISIS DE ESFUERZOS DE UN BLOCK FÓMEZ SOMETIDO A CARGA DE COMPRESIÓN

### JOINT DISPLACEMENTS

LOAD CONDITION 1 - DISPLACEMENTS "U" AND ROTATIONS "R"

JOINT	U(X)	U(Y)	U(Z)
1	-.003688	.011963	-.037820
2	-.003007	.011992	-.037910
3	-.002315	.011969	-.037930
4	-.001629	.011980	-.037999
5	-.003679	.011692	-.037452
6	-.002990	.011718	-.037537
7	-.002644	.011708	-.037562
8	-.002307	.011698	-.037590
9	-.001628	.011705	-.037649
10	-.003655	.011292	-.036905
11	-.002972	.011310	-.036985
12	-.002631	.011305	-.037067
13	-.002291	.011292	-.037082
14	-.001618	.011282	-.037083
15	-.003631	.010899	-.036291
16	-.002945	.010915	-.036453
17	-.002598	.010908	-.036501
18	-.002100	.010880	-.036546
19	-.001589	.010851	-.036677
20	-.001250	.010810	-.036687
21	-.000846	.010783	-.036662
22	-.000430	.010792	-.036678
23	.000000	.010801	-.036682
24	-.003644	.010484	-.035814
25	-.003104	.010507	-.035788
26	-.002564	.010492	-.035844
27	-.002063	.010412	-.036007

28	-.001652	.010349	-.036076
29	-.001260	.010296	-.036100
30	-.000861	.010304	-.036137
2629	.000000	.000000	.000000
2630	.000000	.000000	.000000
2631	.000000	.000000	.000000
2632	.000000	.000000	.000000
2633	.000000	.000000	.000000
2634	.000000	.000000	.000000
2635	.000000	.000000	.000000
2636	.000000	.000000	.000000
2637	.000000	.000000	.000000
2638	.000000	.000000	.000000
2639	.000000	.000000	.000000
2640	.000000	.000000	.000000
2641	.000000	.000000	.000000

REACTIONS AND APPLIED FORCES

LOAD CONDITION 1 - FORCES "F" AND MOMENTS "M"

JOINT	F(X)	F(Y)	F(Z)
1	.0000	.0000	-15.6300
2	.0000	.0000	-15.6300
3	.0000	.0000	-15.6300
4	.0000	.0000	-15.6300
5	.0000	.0000	-39.0600
6	.0000	.0000	-50.7800
7	.0000	.0000	-23.4400
8	.0000	.0000	-50.7800
9	.0000	.0000	-39.0600
10	.0000	.0000	-46.8800
11	.0000	.0000	-70.3100
12	.0000	.0000	-49.5500
13	.0000	.0000	-70.3100
14	.0000	.0000	-44.2000
15	.0000	.0000	-46.0300
16	.0000	.0000	-73.8400
17	.0000	.0000	-61.1500
18	.0000	.0000	-73.0000
19	.0000	.0000	-55.8000
20	.0000	.0000	-33.8400
21	.0000	.0000	-35.4000
22	.0000	.0000	-35.4000
23	-.3374	.0000	-17.7000
24	.0000	.0000	-41.7500



25	.0000	.0000	-77.0000
26	.0000	.0000	-73.1500
27	.0000	.0000	-74.5000
28	.0000	.0000	-70.4400
29	.0000	.0000	-69.2400
30	.0000	.0000	-70.8100
31	.0000	.0000	-70.8100
32	-.7020	.0000	-35.4000
33	.0000	.0000	-38.3200
34	.0000	.0000	-76.6400
35	.0000	.0000	-76.2200
36	.0000	.0000	-73.3000
37	.0000	.0000	-70.8100
38	.0000	.0000	-70.8100
39	.0000	.0000	-70.8100
40	.0000	.0000	-70.8100
2601	2.2952	-4.2079	59.3622
2602	-1.2302	-4.4967	47.3428
2603	-8.2417	-3.7980	22.6844
2604	13.8358	-1.5256	44.4967
2605	8.1006	-3.0195	66.5356
2606	3.7724	-3.6913	59.8844
2607	-.1584	-4.6471	54.2076
2608	-8.4231	-7.8812	39.1537
2609	14.1392	-1.1599	44.8369
2610	8.8112	-2.2942	66.7374
2611	5.0655	-2.8206	60.3626
2612	1.0335	-3.9448	56.0398
2613	-.9793	-4.5272	48.9054
2614	-8.3982	-10.0182	37.7415
2615	12.0857	-.6603	37.9683
2616	7.8266	-1.3044	56.3326
2617	4.9737	-1.6253	51.1038
2618	2.0320	-2.2810	47.5691
2619	-.0459	-3.3522	45.1177
2620	-.5213	-3.3827	40.8384
2621	-4.0982	-8.6203	32.2951
2622	-.1061	-7.9894	22.8872
2623	-3.4858	-4.0529	11.4752
2624	9.8223	-.2456	30.7017
2625	6.4870	-.4861	45.4755
2626	4.3223	-.6035	41.3046
2627	2.1403	-.8512	38.6103
2628	.7871	-1.2295	36.5146
2629	-.0690	-1.7660	36.3876
2630	-.2146	-2.0036	36.8402
2631	-.4040	-2.3367	37.1721

2632	-6.7091	-1.3064	18.5999
2633	4.8815	5.9399	15.2391
2634	3.2417	10.5241	22.5611
2635	2.1822	9.6611	20.5003
2636	1.1349	8.8023	19.1746
2637	.4781	7.9757	18.1762
2638	.1142	7.4584	18.0100
2639	-.1084	6.9168	17.9299
2640	-.1030	6.4108	17.8727
2641	-3.3656	3.1019	8.9161

TOTAL .5517E-11 -.1288E-10 -.7042E-10

C S I / S A P 9 0 - - FINITE ELEMENT ANALYSIS OF STRUCTURES PAGE  
1

PROGRAM:SAP90/FILE:compres.FEF

ANÁLISIS DE ESFUERZOS DE UN BLOCK PÓMEZ SOMETIDO A CARGA DE COMPRESIÓN

SOLID ELEMENT JOINT FORCES

ELEMENT ID		1 -----					
LOAD							
COND	JOINT	F(X)	F(Y)	F(Z)	M(X)	M(Y)	M(Z)
1							
	140	-.033	-.015	15.642	.000	.000	.000
	144	-.016	.006	15.596	.000	.000	.000
	1	.000	.000	-15.630	.000	.000	.000
	5	.018	.032	-15.658	.000	.000	.000
	141	-.025	.005	15.637	.000	.000	.000
	145	.008	-.006	15.639	.000	.000	.000
	2	.000	.000	-15.630	.000	.000	.000
	6	.048	-.022	-15.595	.000	.000	.000

ELEMENT ID		2 -----					
LOAD							
COND	JOINT	F(X)	F(Y)	F(Z)	M(X)	M(Y)	M(Z)
1							
	142	-.040	-.029	15.703	.000	.000	.000
	147	.001	-.003	15.607	.000	.000	.000
	3	.000	.000	-15.630	.000	.000	.000
	8	.053	.064	-15.739	.000	.000	.000
	143	-.040	.001	15.670	.000	.000	.000
	148	.002	-.029	15.671	.000	.000	.000
	4	.000	.000	-15.630	.000	.000	.000
	9	.025	-.004	-15.653	.000	.000	.000

ELEMENT ID		3 -----					
LOAD							
COND	JOINT	F(X)	F(Y)	F(Z)	M(X)	M(Y)	M(Z)
	1						
	144	-.057	-.108	23.477	.000	.000	.000
	149	-.022	.027	23.363	.000	.000	.000
	5	-.018	-.032	-23.402	.000	.000	.000
	10	.067	.171	-23.534	.000	.000	.000
	145	-.029	-.085	23.477	.000	.000	.000
	150	-.018	.008	23.387	.000	.000	.000
	6	.007	-.048	-23.355	.000	.000	.000
	11	.070	.066	-23.414	.000	.000	.000

ELEMENT ID		4 -----					
LOAD							
COND	JOINT	F(X)	F(Y)	F(Z)	M(X)	M(Y)	M(Z)
	1						
	145	-.109	.002	11.807	.000	.000	.000
	150	.025	.029	11.799	.000	.000	.000
	6	-.055	.070	-11.830	.000	.000	.000
	11	.069	.120	-11.832	.000	.000	.000
	146	-.009	-.094	11.904	.000	.000	.000
	151	.056	-.061	11.837	.000	.000	.000
	7	-.013	-.080	-11.726	.000	.000	.000
	12	.036	.013	-11.959	.000	.000	.000

ELEMENT ID		5 -----					
LOAD							
COND	JOINT	F(X)	F(Y)	F(Z)	M(X)	M(Y)	M(Z)
	1						
	146	-.145	-.005	11.629	.000	.000	.000
	151	-.011	.061	11.593	.000	.000	.000
	7	.013	.080	-11.714	.000	.000	.000
	12	.180	.214	-11.908	.000	.000	.000
	147	-.116	-.155	11.853	.000	.000	.000
	152	.008	-.080	11.766	.000	.000	.000
	8	-.041	-.119	-11.543	.000	.000	.000
	13	.112	.004	-11.675	.000	.000	.000

ELEMENT ID		298 -----					
LOAD							
COND	JOINT	F(X)	F(Y)	F(Z)	M(X)	M(Y)	M(Z)
	1						
	531	.368	-.065	14.033	.000	.000	.000
	540	.281	-1.560	11.887	.000	.000	.000
	392	.266	1.429	-11.508	.000	.000	.000
	401	.010	-.017	-14.000	.000	.000	.000
	532	-.069	-.042	13.855	.000	.000	.000

541	-.179	-1.398	11.744	.000	.000	.000
393	-.254	1.476	-11.784	.000	.000	.000
402	-.424	.177	-14.226	.000	.000	.000

ELEMENT ID 299 -----

LOAD

COND	JOINT	F(X)	F(Y)	F(Z)	M(X)	M(Y)	M(Z)
1							
	532	.589	-0.168	14.264	.000	.000	.000
	541	.654	-1.126	12.373	.000	.000	.000
	393	-.077	1.160	-11.531	.000	.000	.000
	402	.039	.266	-13.744	.000	.000	.000
	533	.012	-0.260	13.651	.000	.000	.000
	542	.057	-1.041	11.920	.000	.000	.000
	394	-.713	.941	-12.495	.000	.000	.000
	403	-.562	.228	-14.439	.000	.000	.000

ELEMENT ID 513 -----

LOAD

COND	JOINT	F(X)	F(Y)	F(Z)	M(X)	M(Y)	M(Z)
1							
	817	.109	.618	11.974	.000	.000	.000
	826	.124	-.983	11.430	.000	.000	.000
	678	-.131	1.209	-11.198	.000	.000	.000
	687	-.116	-.827	-11.792	.000	.000	.000
	818	.082	.548	11.887	.000	.000	.000
	827	.091	-.915	11.364	.000	.000	.000
	679	-.085	1.101	-11.549	.000	.000	.000
	688	-.073	-.752	-12.118	.000	.000	.000

ELEMENT ID 514 -----

LOAD

COND	JOINT	F(X)	F(Y)	F(Z)	M(X)	M(Y)	M(Z)
1							
	818	.267	.432	12.497	.000	.000	.000
	827	.293	-.749	12.014	.000	.000	.000
	679	-.279	.936	-11.454	.000	.000	.000
	688	-.254	-.588	-11.982	.000	.000	.000
	819	.233	.362	12.075	.000	.000	.000
	828	.254	-.699	11.607	.000	.000	.000
	680	-.267	.839	-12.124	.000	.000	.000
	689	-.246	-.534	-12.633	.000	.000	.000

ELEMENT ID 515 -----

LOAD

COND	JOINT	F(X)	F(Y)	F(Z)	M(X)	M(Y)	M(Z)
1							
	819	.391	.272	12.841	.000	.000	.000

828	.418	-.550	12.410	.000	.000	.000
680	-.387	.703	-11.588	.000	.000	.000
689	-.360	-.390	-12.060	.000	.000	.000
820	.356	.213	12.155	.000	.000	.000
829	.379	-.516	11.738	.000	.000	.000
681	-.410	.622	-12.523	.000	.000	.000
690	-.387	-.354	-12.973	.000	.000	.000

ELEMENT ID 1070 -----

LOAD

COND	JOINT	F(X)	F(Y)	F(Z)	M(X)	M(Y)	M(Z)
1							
	1565	.096	-.247	17.230	.000	.000	.000
	1574	1.121	1.300	17.473	.000	.000	.000
	1426	-.102	-.456	-17.305	.000	.000	.000
	1435	.827	.925	-17.062	.000	.000	.000
	1566	-.744	-.692	17.091	.000	.000	.000
	1575	-.170	.017	17.328	.000	.000	.000
	1427	-.809	-.767	-17.446	.000	.000	.000
	1436	-.218	-.082	-17.308	.000	.000	.000

ELEMENT ID 1071 -----

LOAD

COND	JOINT	F(X)	F(Y)	F(Z)	M(X)	M(Y)	M(Z)
1							
	1566	.325	.149	17.399	.000	.000	.000
	1575	.279	-.008	17.325	.000	.000	.000
	1427	.065	.124	-17.201	.000	.000	.000
	1436	.135	-.015	-17.252	.000	.000	.000
	1567	-.281	-.063	17.267	.000	.000	.000
	1576	-.079	-.091	17.306	.000	.000	.000
	1428	-.364	-.030	-17.450	.000	.000	.000
	1437	-.080	-.065	-17.395	.000	.000	.000

ELEMENT ID 1500 -----

LOAD

COND	JOINT	F(X)	F(Y)	F(Z)	M(X)	M(Y)	M(Z)
1							
	2144	-.000	-4.529	19.244	.000	.000	.000
	2148	.253	3.023	17.290	.000	.000	.000
	2005	-.393	-2.609	-16.922	.000	.000	.000
	2009	-.137	4.670	-18.630	.000	.000	.000
	2145	.204	-4.721	18.764	.000	.000	.000
	2149	.500	2.648	16.773	.000	.000	.000
	2006	-.368	-2.796	-17.413	.000	.000	.000
	2010	-.059	4.312	-19.106	.000	.000	.000

ELEMENT ID 1870		-----					
LOAD							
COND	JOINT	F(X)	F(Y)	F(Z)	M(X)	M(Y)	M(Z)
	1						
	2629	3.292	-4.104	9.703	.000	.000	.000
	2638	3.144	3.580	9.083	.000	.000	.000
	2490	3.108	-2.867	-9.059	.000	.000	.000
	2499	2.724	3.054	-9.655	.000	.000	.000
	2630	-3.123	-3.953	9.716	.000	.000	.000
	2639	-3.248	3.613	8.993	.000	.000	.000
	2491	-2.815	-2.433	-9.043	.000	.000	.000
	2500	-3.081	3.110	-9.737	.000	.000	.000

ELEMENT ID 1871		-----					
LOAD							
COND	JOINT	F(X)	F(Y)	F(Z)	M(X)	M(Y)	M(Z)
	1						
	2630	3.251	-3.928	9.740	.000	.000	.000
	2639	3.140	3.303	8.937	.000	.000	.000
	2491	3.159	-2.326	-9.033	.000	.000	.000
	2500	2.920	2.677	-9.829	.000	.000	.000
	2631	-3.221	-3.801	9.877	.000	.000	.000
	2640	-3.336	3.319	8.985	.000	.000	.000
	2492	-2.815	-1.942	-8.898	.000	.000	.000
	2501	-3.099	2.698	-9.780	.000	.000	.000

ELEMENT ID 1872		-----					
LOAD							
COND	JOINT	F(X)	F(Y)	F(Z)	M(X)	M(Y)	M(Z)
	1						
	2631	3.320	-3.791	9.867	.000	.000	.000
	2640	3.233	3.092	8.888	.000	.000	.000
	2492	3.266	-1.871	-8.965	.000	.000	.000
	2501	3.042	2.387	-9.914	.000	.000	.000
	2632	-3.300	-3.704	9.952	.000	.000	.000
	2641	-3.366	3.102	8.916	.000	.000	.000
	2493	-3.035	-1.616	-8.872	.000	.000	.000
	2502	-3.160	2.400	-9.871	.000	.000	.000

CSI/SAP90 -- FINITE ELEMENT ANALYSIS OF  
STRUCTURES PAGE 1

PROGRAM:SAP90/FILE:compres.F8F

ANÁLISIS DE ESFUERZOS DE UN BLOCK PÓMEZ SOMETIDO A CARGA DE COMPRESIÓN

S T R E S S E S A T C E N T E R O F E L E M E N T

ELEMENT ID 1 -----						
LOAD	SXX	SYX	SZZ	SXY	SXZ	SYZ
1	.6512E-01	-.8913E-02	-.1000E+03	-.4929E-01	.1065E+00	.1581E-01
ELEMENT ID 2 -----						
LOAD	SXX	SYX	SZZ	SXY	SXZ	SYZ
1	-.2063E-01	-.2415E-01	-.1002E+03	-.6746E-01	.1242E+00	.9580E-01
ELEMENT ID 3 -----						
LOAD	SXX	SYX	SZZ	SXY	SXZ	SYZ
1	.4220E-01	-.2311E+00	-.9995E+02	-.8229E-01	.1340E+00	.1674E+00
ELEMENT ID 4 -----						
LOAD	SXX	SYX	SZZ	SXY	SXZ	SYZ
1	.9908E-01	-.1701E+00	-.1002E+03	-.3127E+00	.7945E-01	.2604E+00
ELEMENT ID 5 -----						
LOAD	SXX	SYX	SZZ	SXY	SXZ	SYZ
1	-.5194E-01	-.3393E+00	-.1007E+03	-.4942E+00	.5664E+00	.3831E+00

C S I / S A P 9 0 - - FINITE ELEMENT  
ANALYSIS OF STRUCTURES PAGE 145

PROGRAM:SAP90/FILE:compres.F8F

ANÁLISIS DE ESFUERZOS DE UN BLOCK PÓMEZ SOMETIDO A CARGA DE COMPRESIÓN

A V E R A G E J O I N T S T R E S S E S

LOAD CONDITION 1

JOINT	SXX	SYX	SZZ	SXY	SXZ	SYZ
1	-.9075E-01	-.1172E+00	-.1002E+03	-.6587E-01	.9752E-01	.1528E+00
2	-.9075E-01	.1027E+00	-.1001E+03	-.6587E-01	.9752E-01	-.1212E+00
3	-.3482E-01	-.2622E+00	-.1003E+03	-.2646E-01	.5649E-01	.2997E+00
4	-.3482E-01	.5445E-01	-.1000E+03	-.2646E-01	.5649E-01	-.1081E+00
5	.1690E+00	-.3135E+00	-.1001E+03	-.1320E+00	.1156E+00	.2159E+00
6	.1615E+00	-.1098E+00	-.9959E+02	-.2879E+00	.2508E+00	-.3168E-02
7	-.1075E+00	-.5685E+00	-.1001E+03	-.6441E+00	.5667E+00	.4650E+00
8	-.2484E+00	-.3442E+00	-.1006E+03	-.3523E+00	.3320E+00	.3007E+00
9	-.1919E+00	.4085E+00	-.9976E+02	-.1844E+00	.1919E+00	-.3260E+00
10	-.1261E+00	-.6343E+00	-.9975E+02	-.2813E+00	.1523E+00	-.2852E-01

# P R I N C I P A L   J O I N T   S T R E S S E S

LOAD CONDITION      1

JOINT	S11	S22	S33	V1X	V1Y	V1Z	V2X	V2Y	V2Z	V3X	V3Y	V3Z
1	-.10E+03	-.94E-01	-.99E-03	.00	.00	-1.00	.12	-.99	-.00	-.02	1.00	.00
2	-.10E+02	.12E+00	-.11E+00	.00	-.00	-1.00	.29	-.96	.00	-.96	-.29	.00
3	-.10E+03	-.26E+00	-.32E-01	.00	.00	-1.00	.11	.99	.00	.99	-.11	.00
4	-.10E+03	.62E-01	-.42E-01	.00	-.00	-1.00	.27	-.96	.00	.96	.27	.00
5	-.10E+03	.20E+00	-.35E+00	.00	.00	-1.00	.97	-.26	.00	.24	.97	.00
6	-.10E+03	.34E+00	-.29E+00	-.00	.00	1.00	.85	-.53	.00	.54	.84	.00
7	-.10E+03	-.10E+01	.95E+00	-.01	-.00	1.00	-.57	-.82	-.01	.82	-.58	.00
8	-.10E+03	-.65E+00	.59E-01	.00	.00	-1.00	.66	.75	.00	.75	-.66	.00
9	-.10E+03	.46E+00	-.24E+00	-.00	.00	1.00	.27	-.96	.00	.96	.27	.00
10	-.10E+03	-.76E+00	-.94E-03	.00	.00	-1.00	-.41	-.91	.00	.91	-.41	.00
11	-.10E+03	-.98E+00	.78E-01	-.00	.00	-1.00	.63	.78	.00	.78	-.63	-.00
12	-.10E+03	-.16E+01	.22E+00	.00	-.00	1.00	.64	.77	.00	.77	-.64	.00
13	-.10E+03	-.11E+01	.63E+00	-.01	.00	1.00	-.63	-.78	-.00	.74	-.67	.00
14	-.98E+02	.16E+01	-.28E+00	-.01	-.00	1.00	.45	-.89	.00	-.89	-.45	-.01
15	-.98E+02	-.13E+01	.57E+00	.00	-.01	1.00	-.06	1.00	.01	1.00	.06	-.00

PARTE B: A continuación se presentan las gráficas que se obtienen por medio del SAP90, este programa usa una subrutina que gráfica los resultados que se presentaron anteriormente, esta subrutina lleva como nombre SAPLOT y desde ella se puede graficar el block desde diferentes perspectivas, de esta forma uno puede observar la deformación y los esfuerzos que se dan en las diferentes partes de la estructura, en este caso el block.

Aquí solo se presentan las gráficas y en la sección de discusión de resultados se analizan en una forma general.

INSTITUCIÓN DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLOS  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS  
 Y OPERACIONES



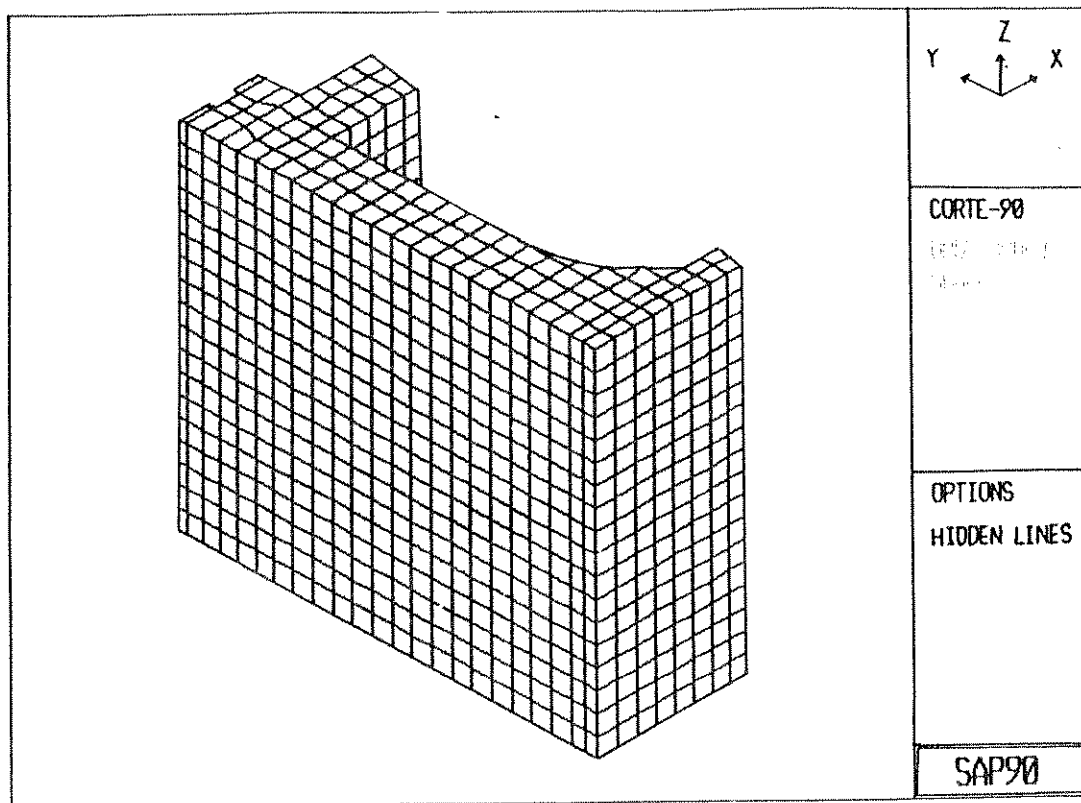


Fig.3.24.- Modelo del block generado por el programa SAP90.

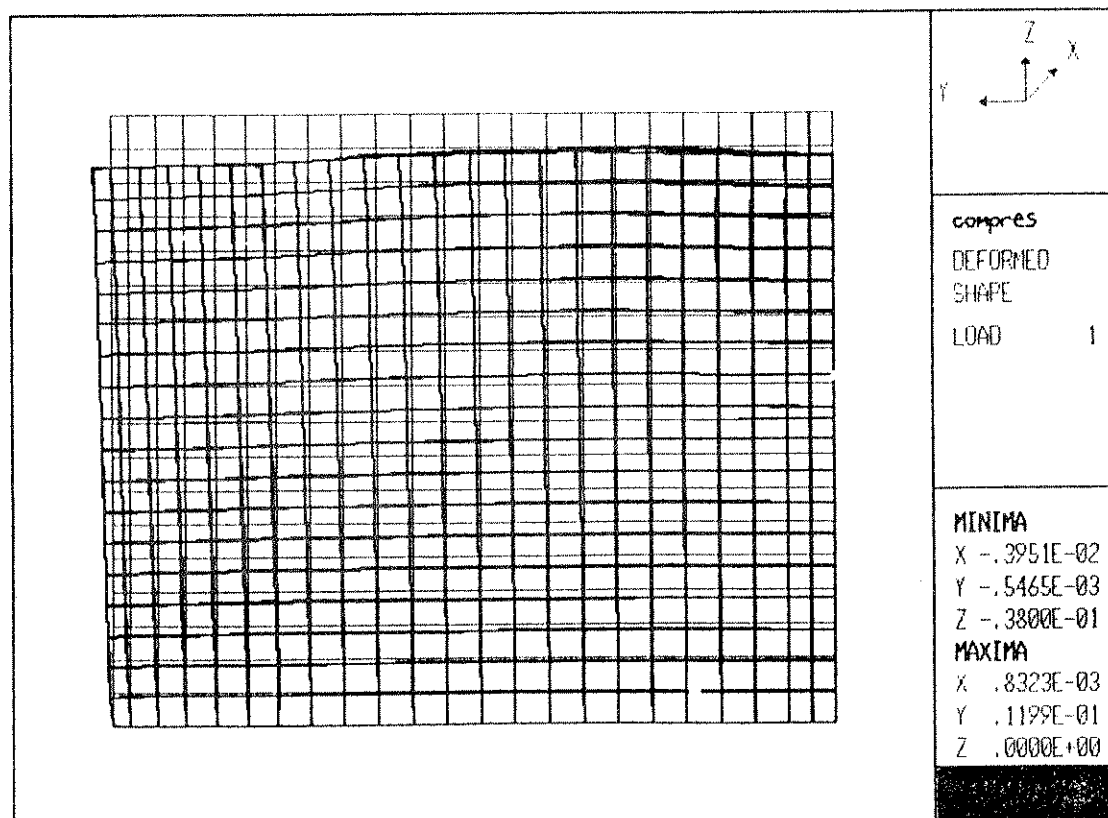


Fig.3.25.- Deformación producida por la carga de compresión.

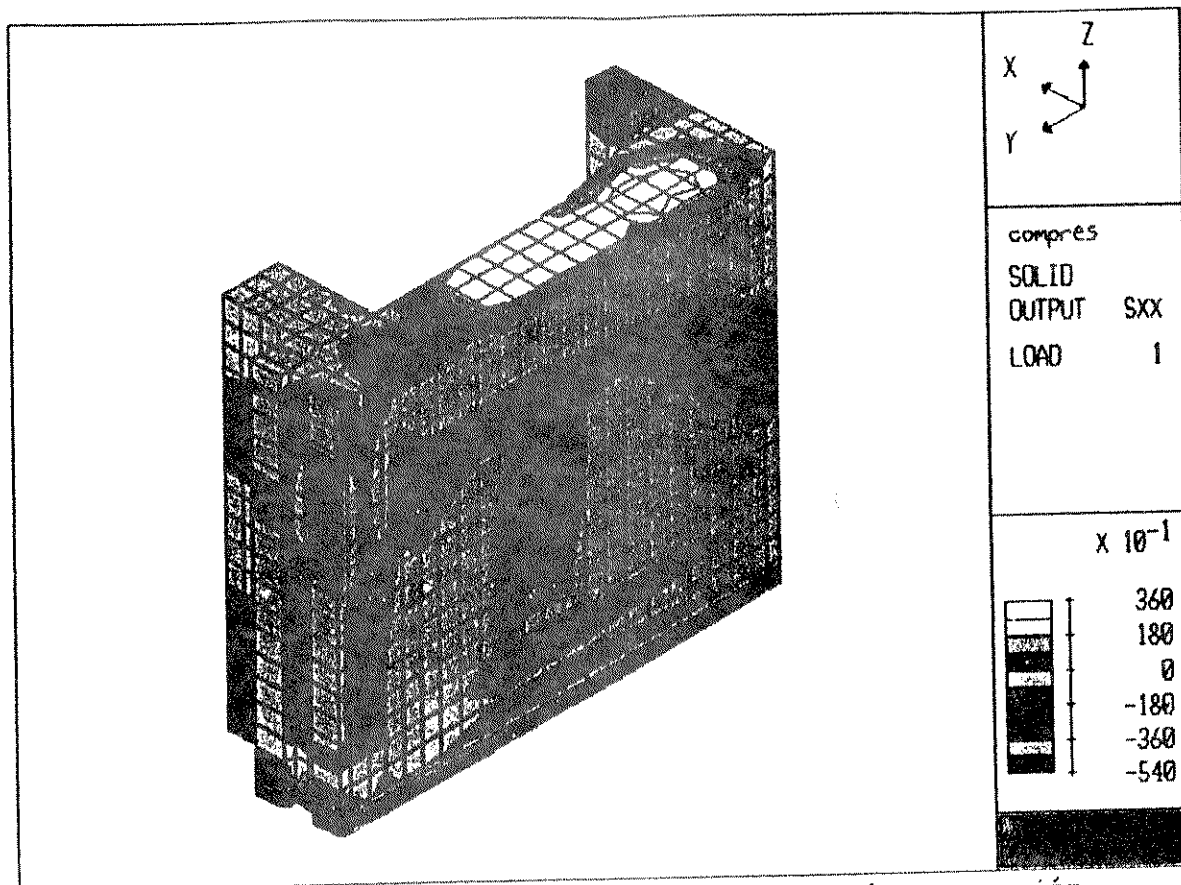


Fig.3.26.- Gráfica de esfuerzos normales SXX, carga de compresión.

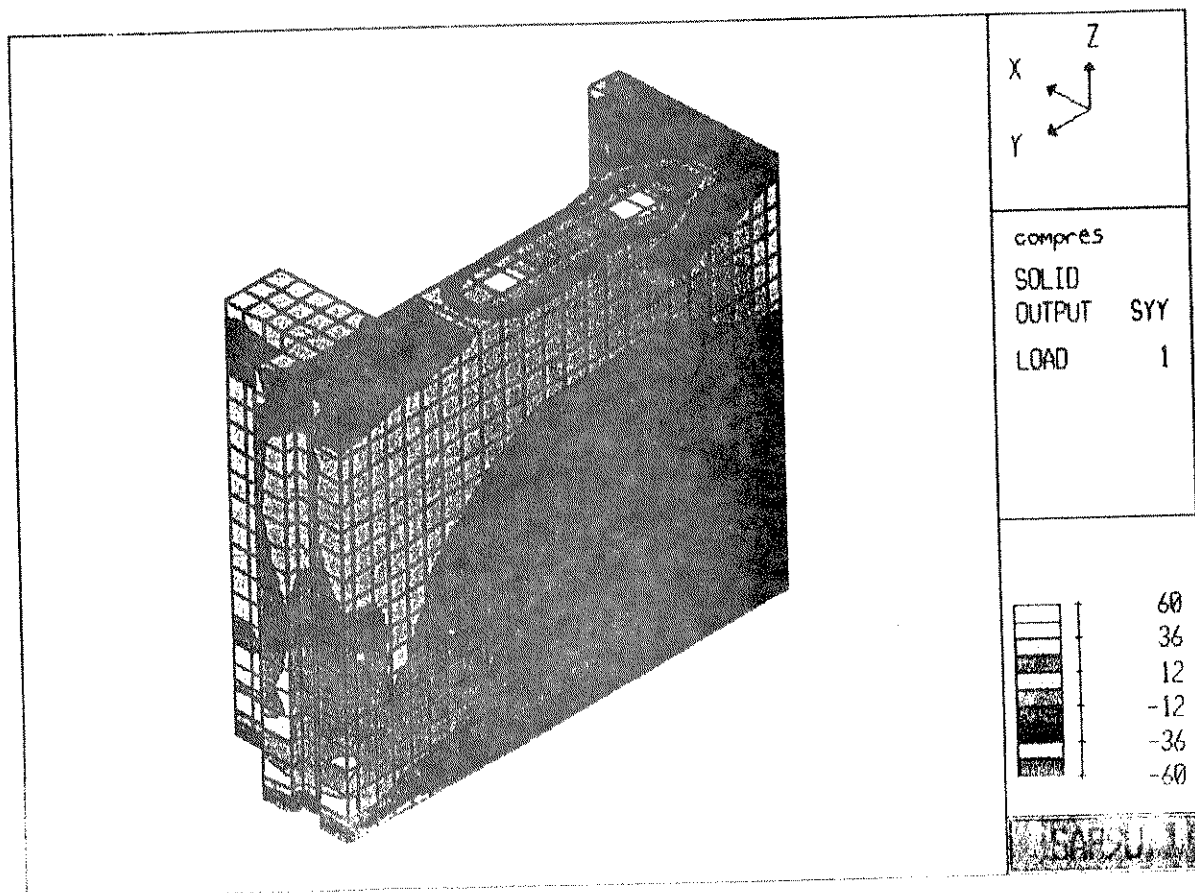


Fig.3.27.- Gráfica de esfuerzos normales SYX, carga de compresión.

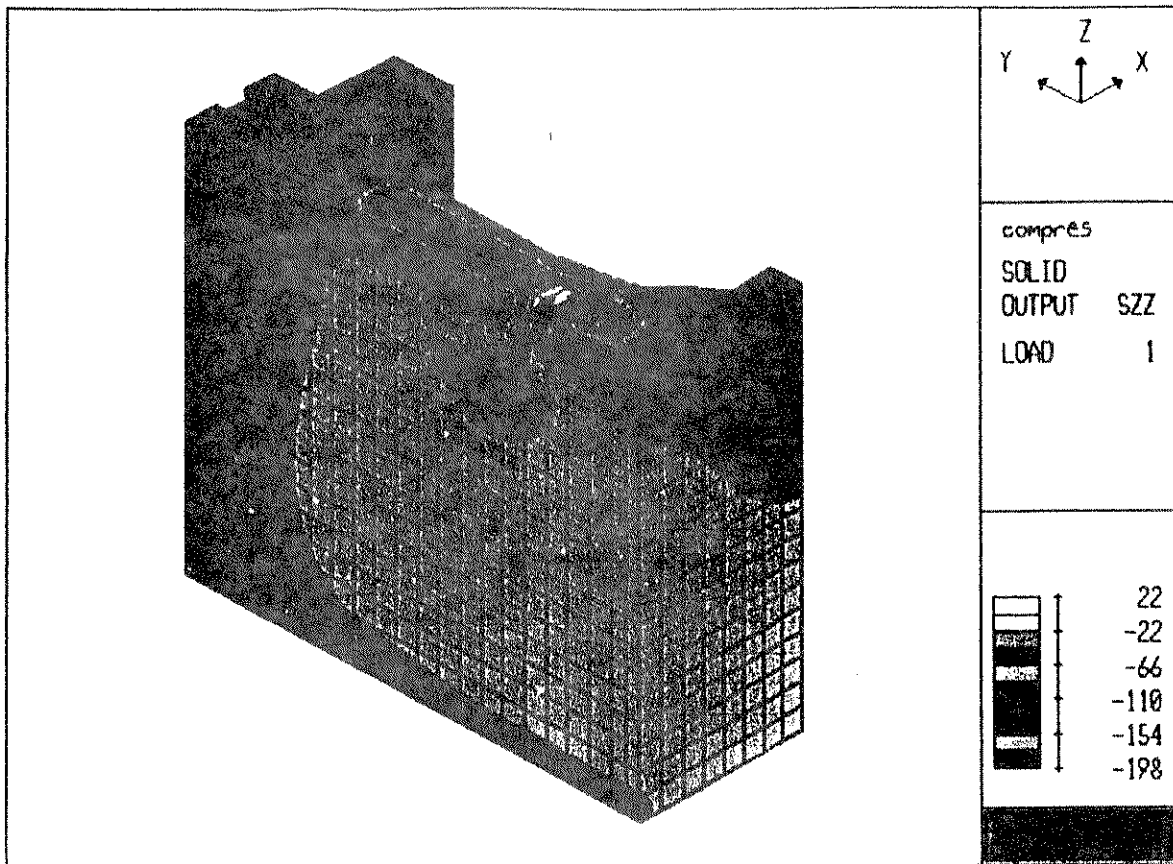


Fig.3.28.- Gráfica de esfuerzos normales SZZ, carga de compresión.

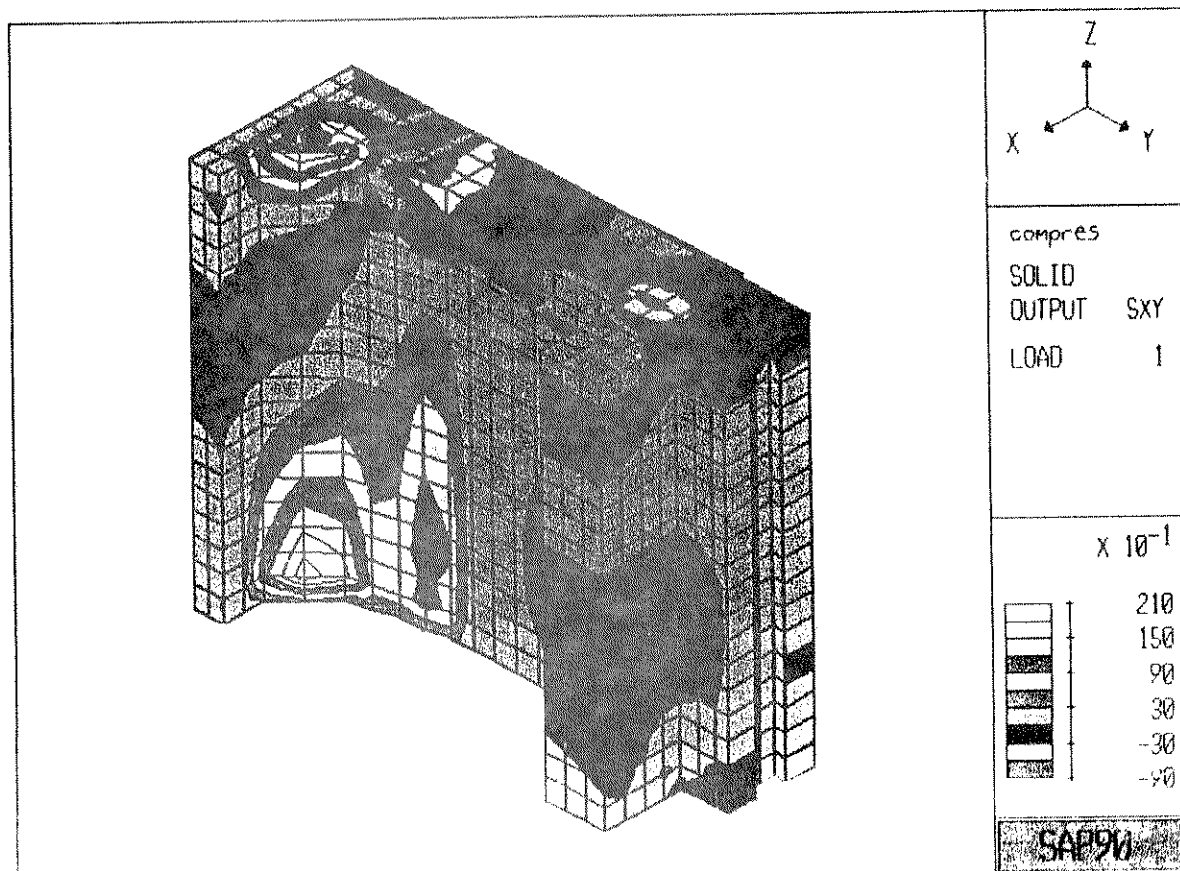


Fig.3.29.- Gráfica de esfuerzos de corte SXY, carga de compresión.

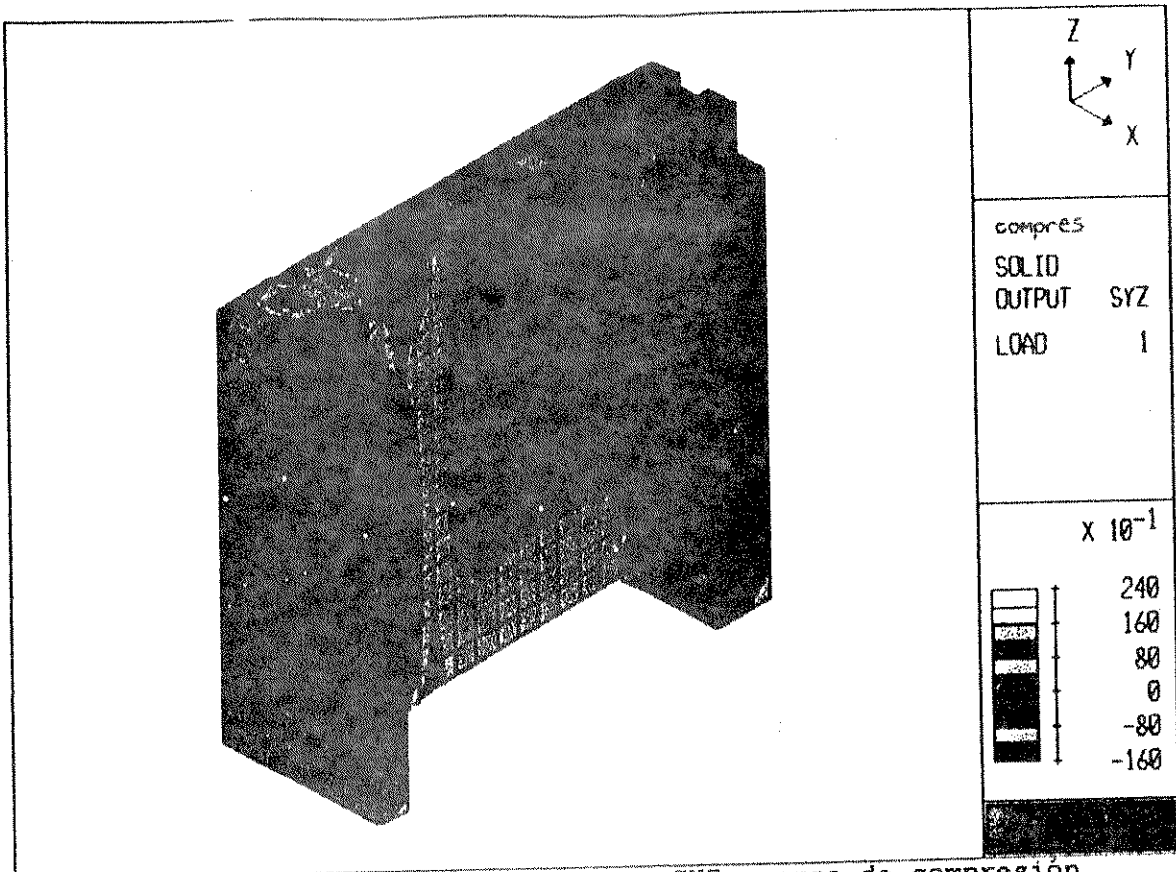


Fig.3.30.- Gráfica esfuerzos de corte SYZ, carga de compresión, vista interior del block.

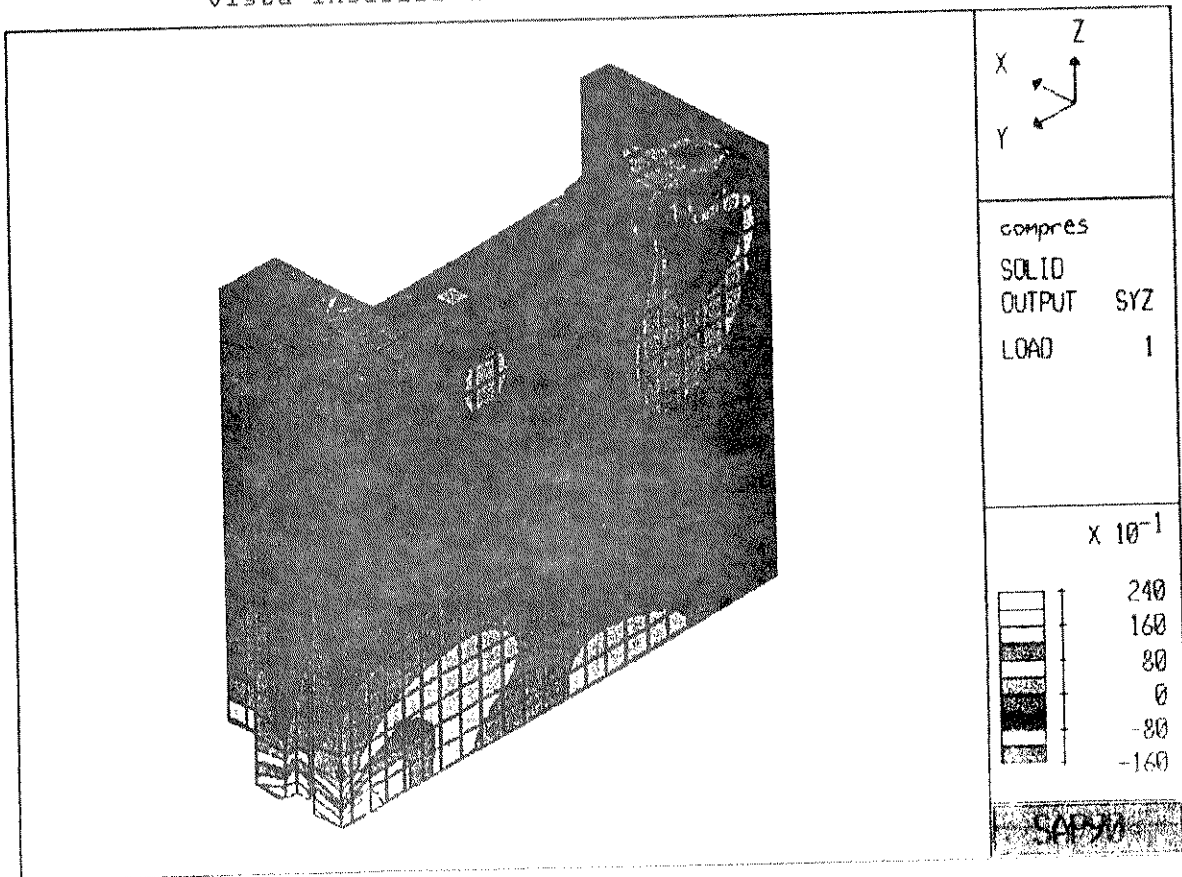


Fig.3.31.- Gráfica de esfuerzos de corte SYZ, carga a compresión, vista exterior del block.

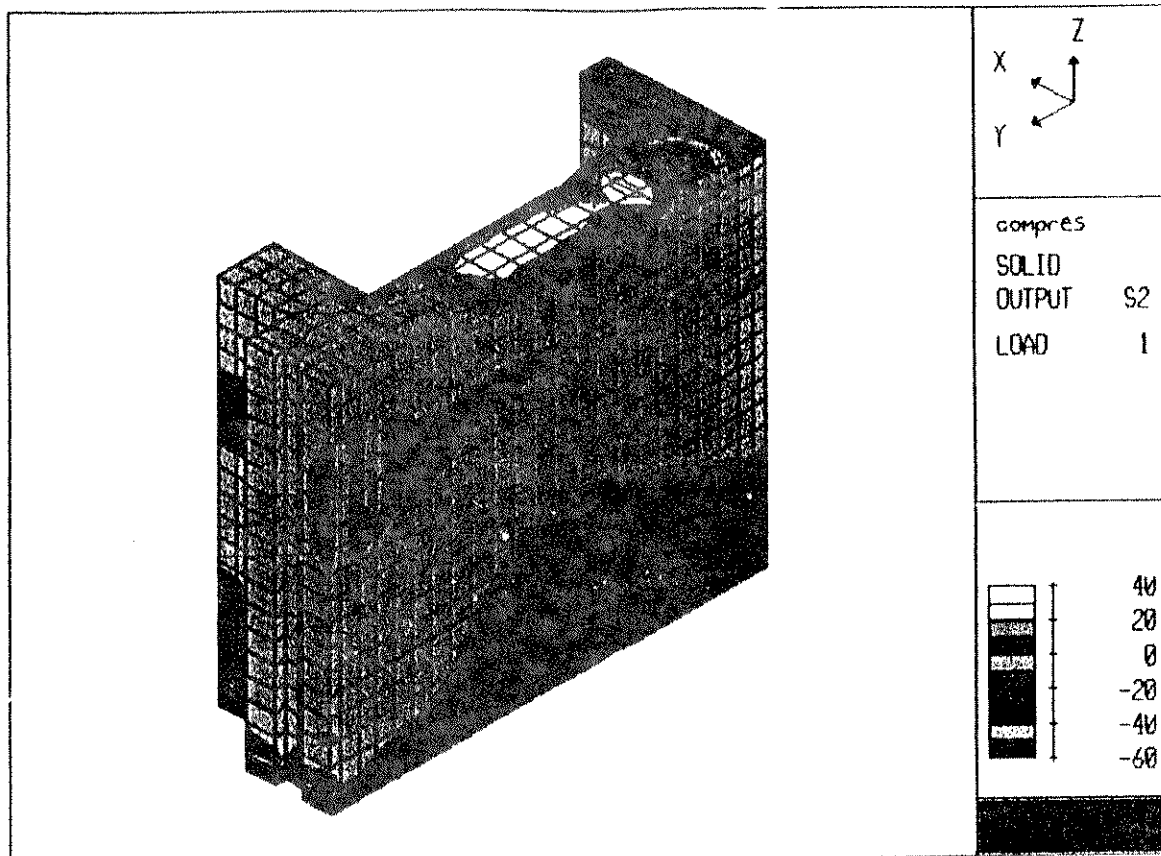


Fig.3.32.- Gráfica de esfuerzos principales S2, carga de compresión.

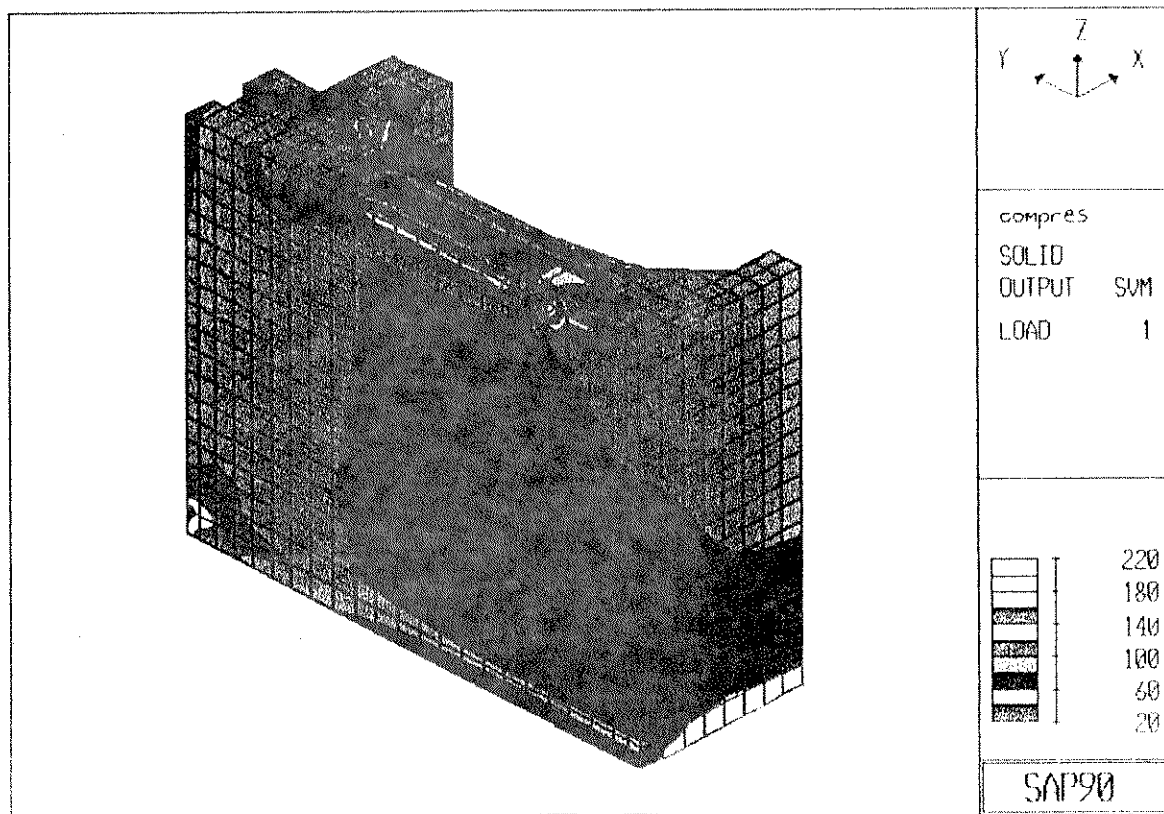


Fig.3.33.- Gráfica de la suma de esfuerzos principales de compresión.

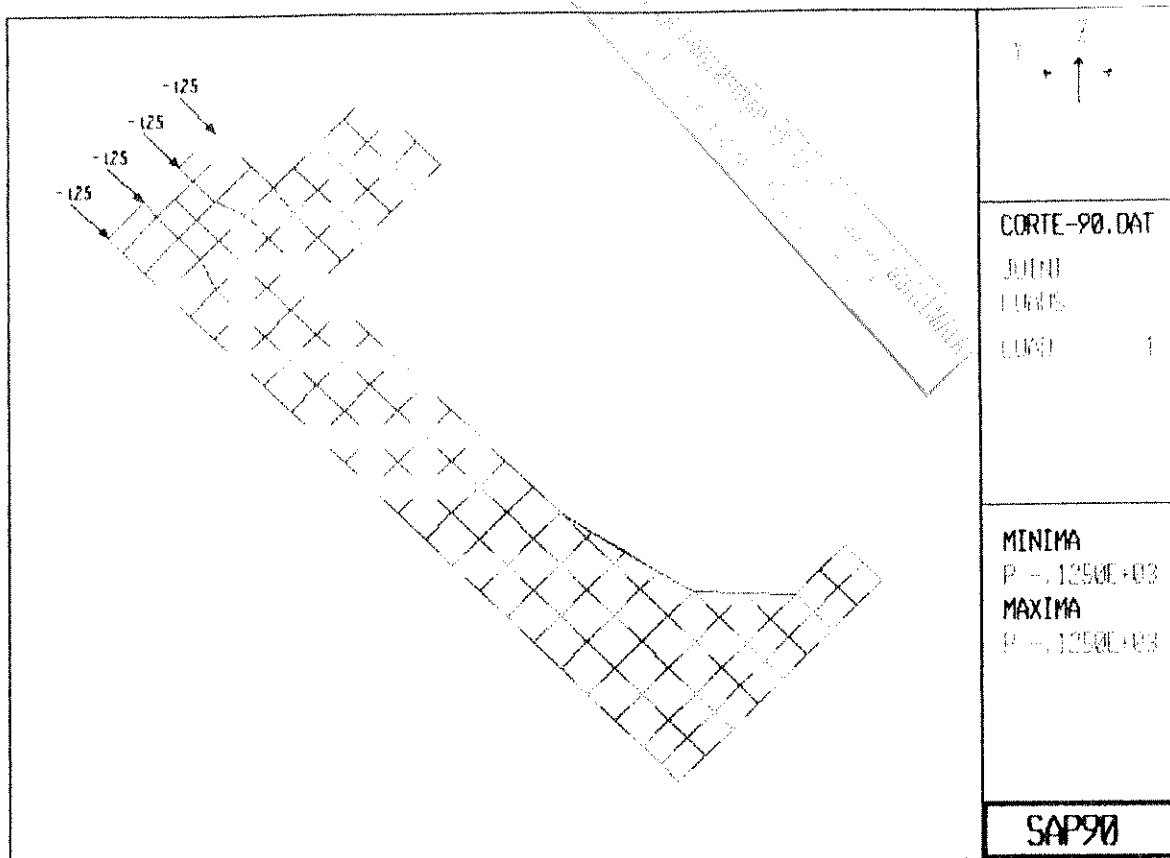


Fig.3.34.- La gráfica muestra los nodos donde fue aplicada la carga de corte.

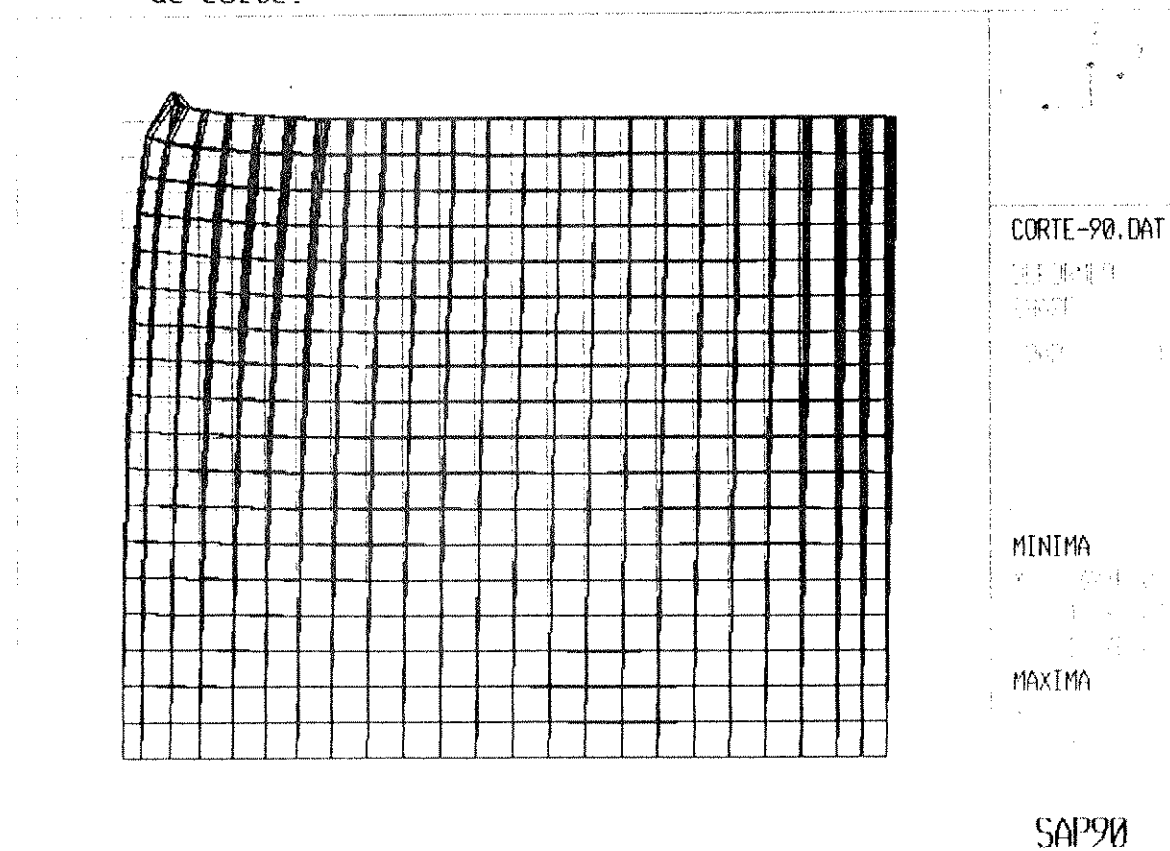
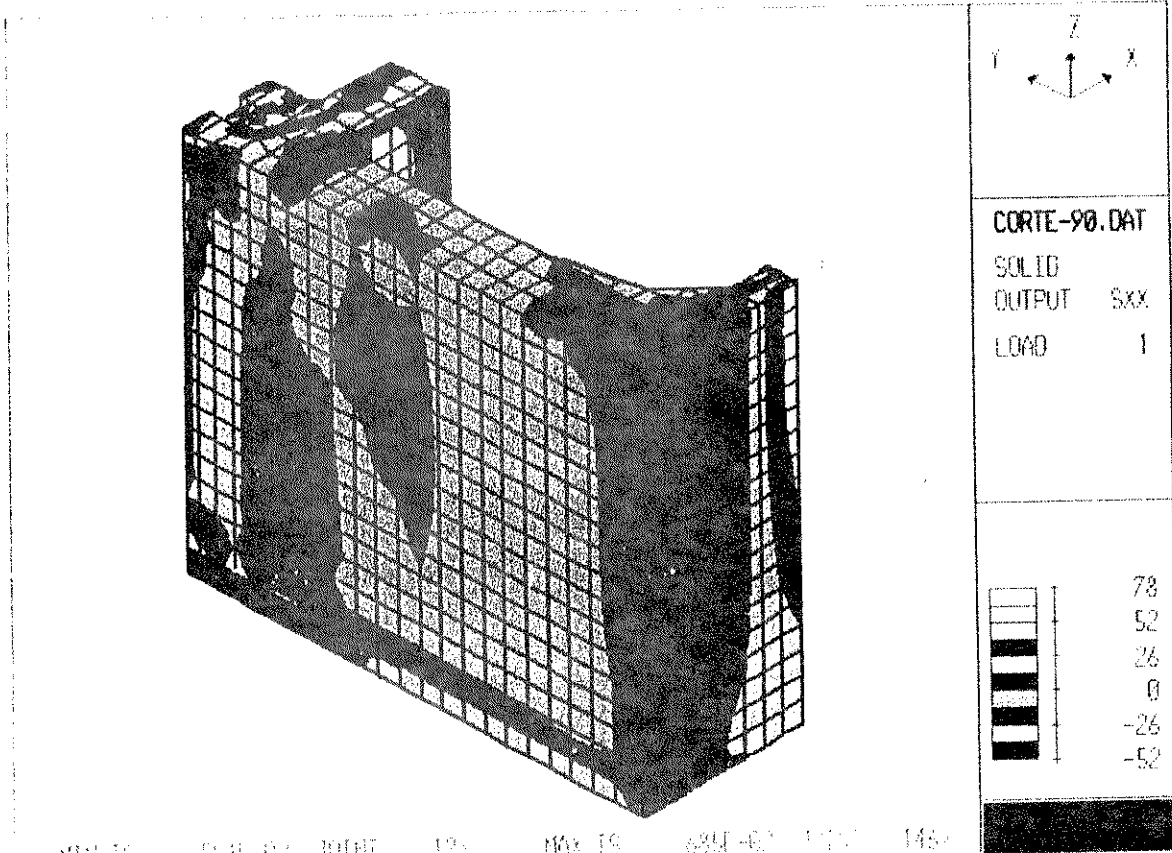


Fig.3.35.- Deformación producida por la carga de corte.



MINI - CORTE-90.DAT 125 NOV 19 08:00 117 146

Fig.3.36.- Gráficas de esfuerzos normales SXX, por carga de corte.

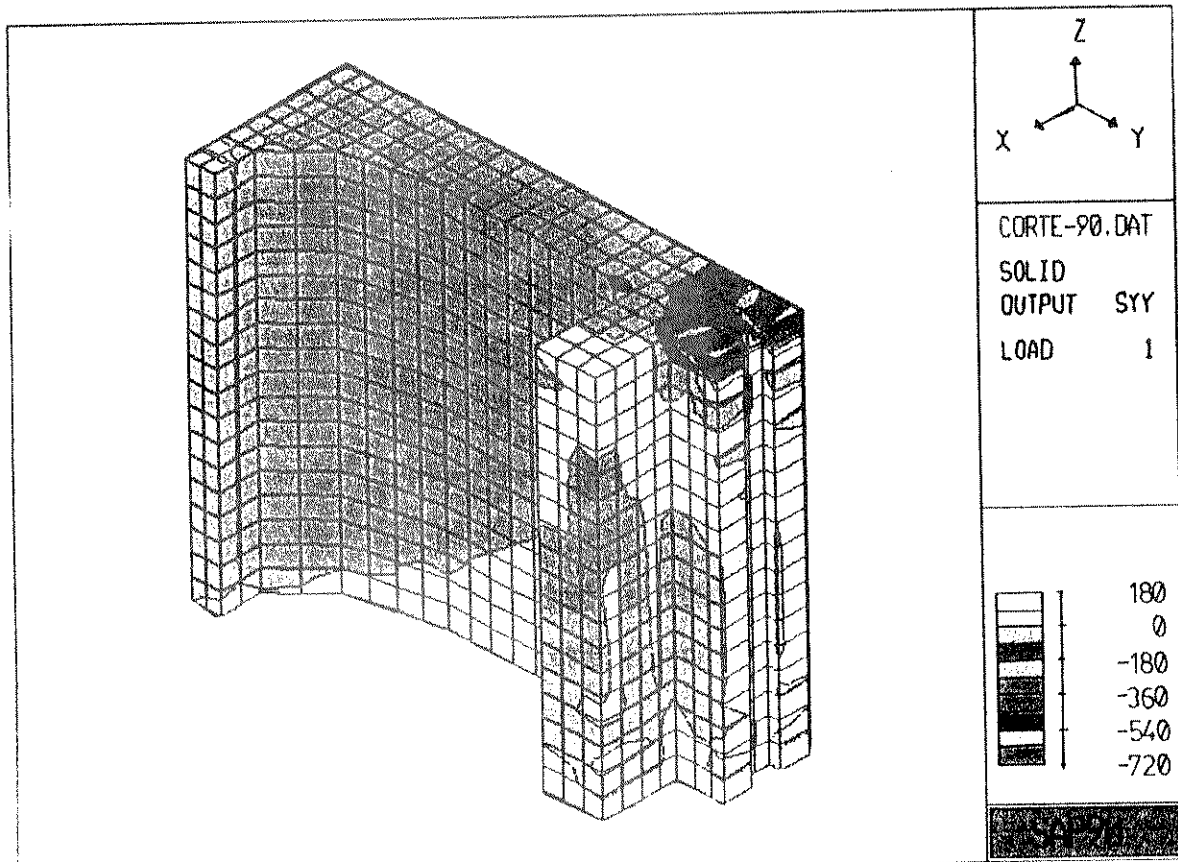


Fig.3.37.- Gráficas de esfuerzos normales SYX, por carga de corte.

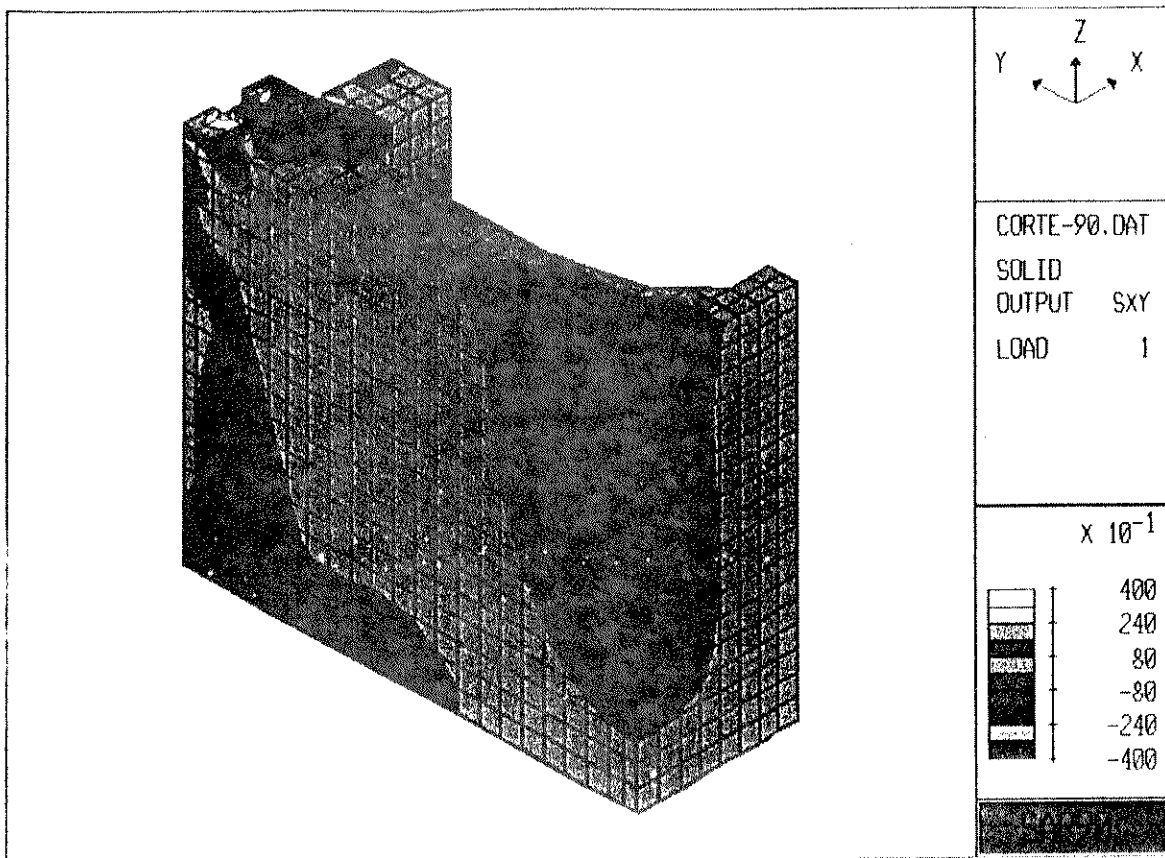


Fig.3.38.- Gráfica de esfuerzos de corte SXY, por carga de corte.

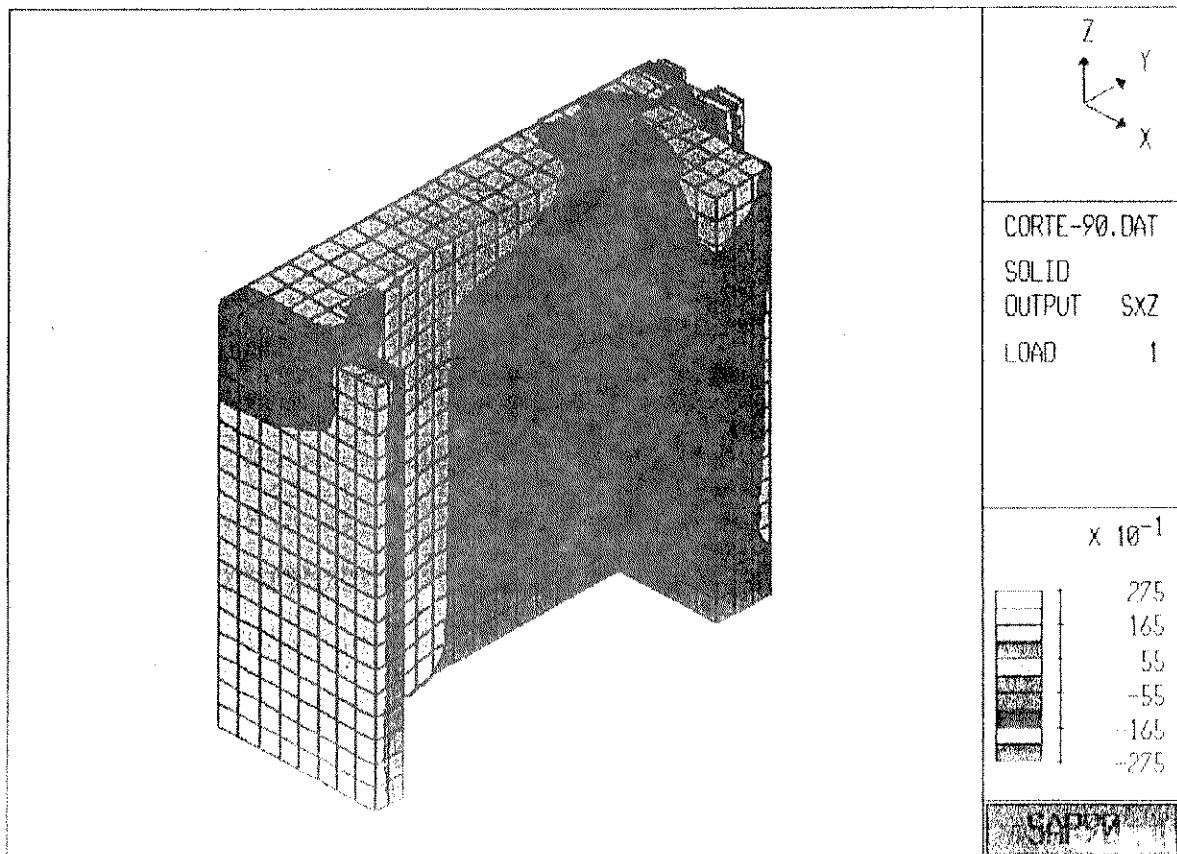


Fig.3.39.- Gráfica de esfuerzos de corte SXZ, por carga de corte.



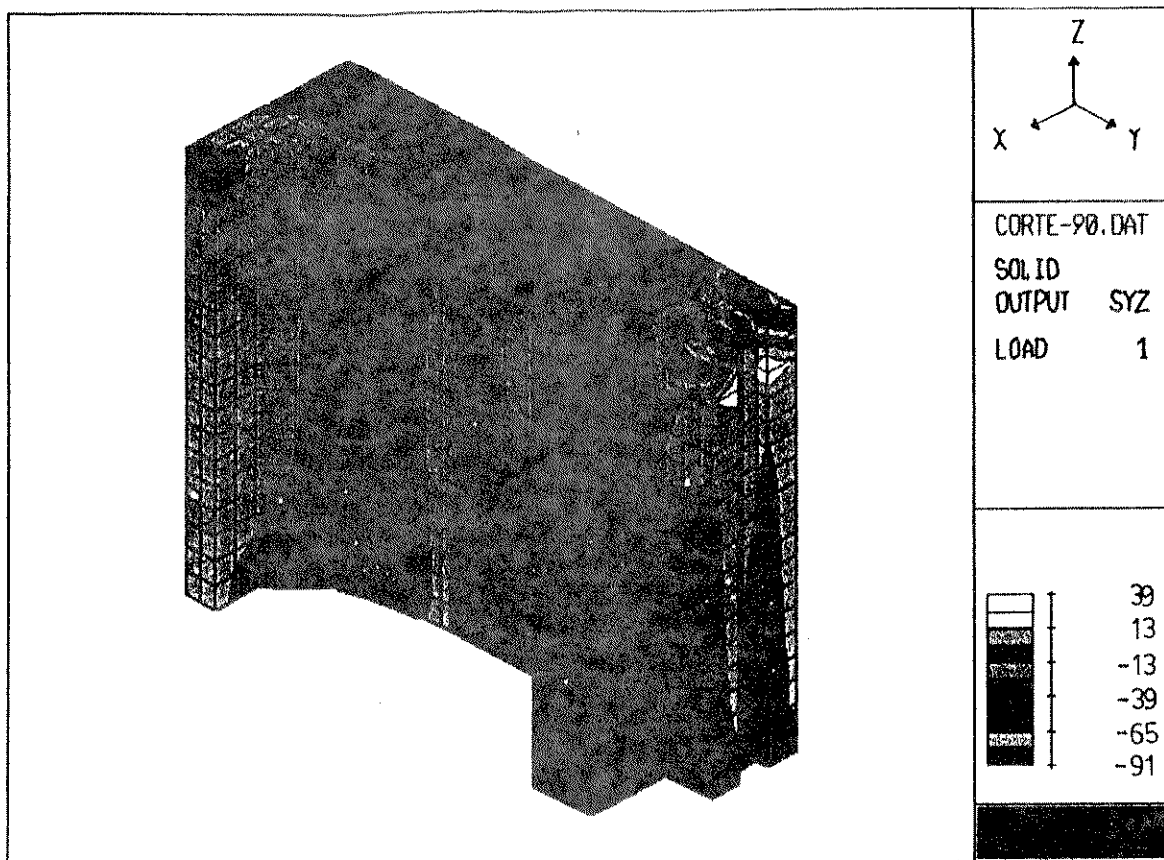


Fig.3.40.- Gráfica de esfuerzos de corte SYZ, por carga de corte.

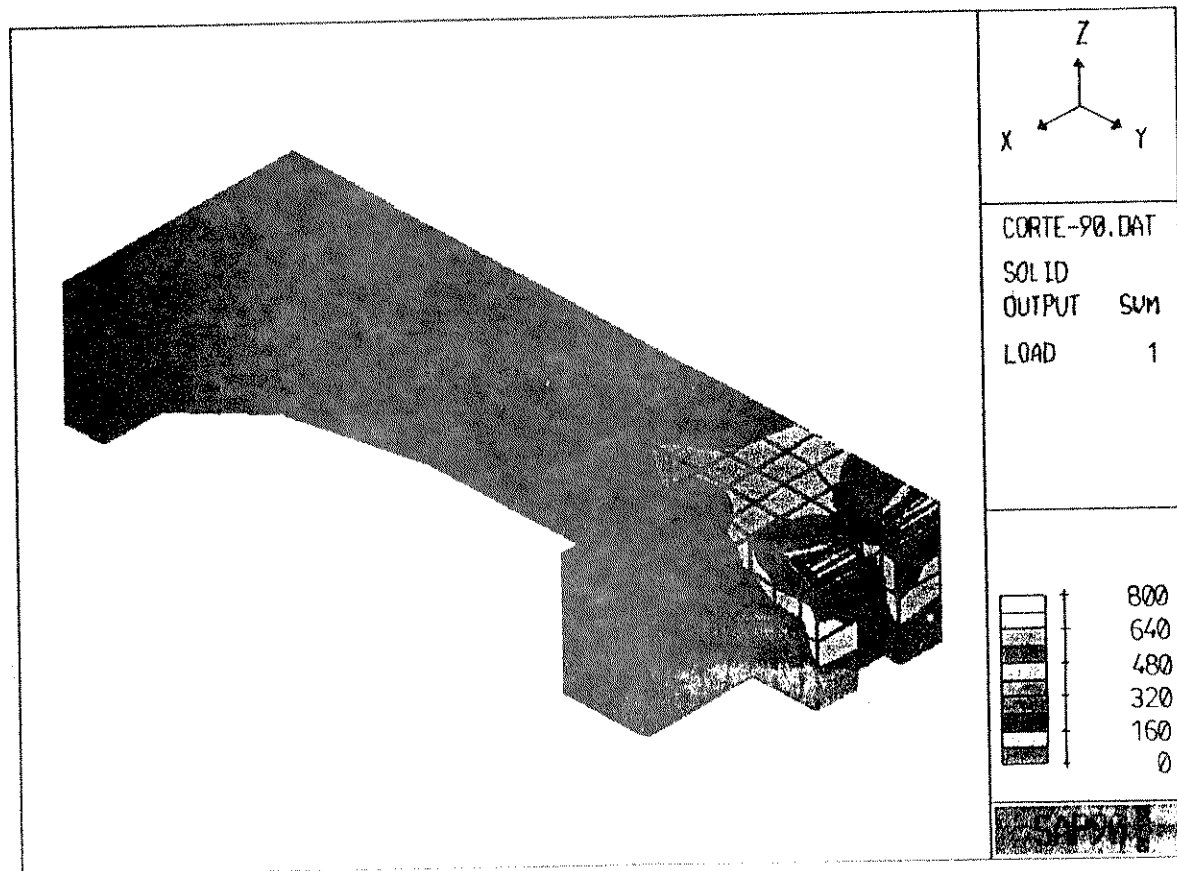


Fig.3.41.- Gráfica de la suma de esfuerzos principales de corte.

### 3.4.- Discusión de Resultados:

En esta sección se analizarán en una forma general los resultados obtenidos tanto en la parte experimental como en la parte analítica, como se mencionó anteriormente los estados de esfuerzos en el block solo se obtuvieron en forma cualitativa, de esta forma se supuso que en la parte donde aparecieran las grietas por la carga aplicada se darían los mayores esfuerzos, esta suposición se hizo por falta de un equipo más adecuado para realizar el ensayo y de esta forma medir los esfuerzos con más precisión.

Dentro de la parte analítica se limitó el estudio a aplicar solo una condición de carga, tanto para el ensayo a compresión como para el de tensión, esta carga se escogió de tal manera que no sobrepasara el rango elástico del block.

1.- Como se sabe el block pómez es un componente de una estructura mayor, y éste está formado por materiales tales como la piedra pómez, arena, cemento y agua, estos materiales por su naturaleza y al formar el block lo constituyen en una estructura frágil. Esto provoca que la ruptura del mismo se va a dar después de la carga de falla en una forma súbita, tal y como se corroboró en los ensayos, por esta razón las grietas que se esperaban se obtuvieron solo cuando el block había fallado totalmente.

En el caso donde se aplicó la carga de compresión se observa similitud en la cara B del block 2 (fig.3.11) y la cara A y B (figs. 3.6 y 3.7) del block 1, lo que supone un comportamiento similar en el momento que ocurre la falla. En la cara A del block 2 (fig.3.10) no ocurre lo mismo, probablemente porque hubo concentración de la carga en esta región o existían granos de la piedra pómez más grandes y que desviaron los esfuerzos a otra región del block. En las caras laterales para los dos blocks ensayados no ocurre un comportamiento uniforme (véase Figs. 3.5, 3.8 y 3.9) lo cual no permite generalizar la forma de falla del block en estas regiones.

En el caso de corte se observa en las caras A y B de ambos ensayos (figs. 3.14, 3.15, 3.17 y 3.18) ocurren fallas a 45 grados en dirección perpendicular a la carga aplicada. En las caras laterales A. y B. de los blocks 1 y 2 respectivamente (figs. 3.15 y 3.16) las grietas que ocurren son similares aunque una tuvo una zona de incidencia más grande. Otra característica fue que en las caras lejos de donde se aplicó la carga no aparecieron grietas, probablemente debido a que en esta región los esfuerzos fueron menores debido a la distribución de los mismos a través del block.

2.- En el ensayo que se hizo en el programa SAP90 se analizaron los dos casos de carga (compresión y corte), los análisis se efectuaron solo para una condición de carga como se mencionó anteriormente, lo ideal hubiera sido estudiar varios casos variando la magnitud de la fuerza, esto no se logró realizar por falta de recursos y espacios para la presentación de resultados, ya que como se observa en la sección anterior los datos generados por el programa son bastante extensos, además el presente trabajo de tesis es solo un paso inicial

en un estudio que se puede profundizar, aunque los resultados preliminares dan ciertas conclusiones interesantes y que se dan a conocer en los siguientes incisos.

3.- En la gráfica 3.25 se observa la deformación producida por la carga de compresión, como se ve la esquina superior izquierda tiende a deformarse más y en el centro se produce una curvatura tenue, en otra vista que no se muestra el block tiende a desplazarse una fracción hacia afuera. En las partes inferiores la deformación por aplastamiento, efecto de Poisson, se hace evidente y en las gráficas de esfuerzos normales y esfuerzos principales se aprecia el aumento de esfuerzos en esta parte del block (figs. 3.26, 3.27, 3.28, 3.32). La deformación que produce la loma, ocasiona un incremento en los esfuerzos de tensión los que teóricamente producirían pequeñas grietas en la parte superior, cosa que no ocurrió en los ensayos de laboratorio.

En las gráficas de esfuerzos normales  $S_{YY}$  (fig.3.17) y de esfuerzos principales  $S_2$  (Fig.3.32) se ve un cambio de esfuerzos de tensión por esfuerzos de compresión y un aumento del valor de los mismos conforme se alejan de esta región, hay que notar que la distribución de estos esfuerzos forma una curva que se asemeja a la falla ocurrida en los blocks ensayados.

Otro comportamiento que se observa en las diferentes gráficas es que ocurre un aumento de esfuerzos en la esquina inferior donde el block posee dos ranuras que sirven para unir los blocks, esto debe ocurrir por que el aplastamiento en esta región es mayor debido a que en la esquina superior la deformación es mayor.

En los gráficos de esfuerzos de corte (figs. 3.29 y 3.30) se aprecia que en ciertas esquinas existe un aumento en los esfuerzos, esto podría suponer que si el block falla en estas partes los esfuerzos de corte serían los que contribuirían mayormente a que esto ocurra.

4.- En el análisis con carga de corte se observa por lo general que las concentraciones de esfuerzos fueron mayormente en la esquina superior, donde fue aplicada la carga, la distribución de estos esfuerzos a través de las diferentes gráficas, poseen cierta similitud entre las grietas que se produjeron en el laboratorio.

Otro comportamiento que se aprecia es que los esfuerzos, independientemente de que tipo son, se distribuyen dentro de todo el block y los esfuerzos mayores se concentran en un área no mayor del 5 o 10 por ciento del block, y esto se observa mejor en la gráfica que corresponde a la suma de los esfuerzos (fig.3.41).

5.- Una confirmación que dan los ensayos por computadora es que donde se supondrían grandes concentraciones de esfuerzos, esto es en la esquinas o bordes interiores, no existen dichos esfuerzos, esto se debe por el tipo de geometría del block, ya que como se observa en la parte interna es redondeado y en las esquinas el área aumenta como se puede observar (fig.3.46), lo que ocasiona que el block tenga un comportamiento más eficiente.

## CONCLUSIONES

A) Todo ingeniero o estudiante de ingeniería que desee dedicarse a la ingeniería estructural debe tener conocimiento de el método de elementos finitos y sus posibles aplicaciones, así como también debe poseer conocimientos de manejo de computadoras.

B) El método de elementos finitos debido a su compleja matemática, es posible aplicarlo solamente con programas de computación, ya que sin éstos el proceso de resolución de algún modelo tomaría excesivo tiempo.

C) Para el manejo del método de elementos finitos por medio de cualquier programa de computación los pasos básicos a seguir siempre son los mismos: Definición del problema, modelar la estructura, la entrada básica de datos y la validación de los datos de entrada.

D) El programa SAP90, que fue el utilizado en el análisis posee una gran capacidad de cálculo, y dependiendo de la velocidad de la computadora, el modelo a ser analizado puede ser resuelto rápidamente. Donde es limitada la capacidad de este programa es en la impresión de las gráficas, esto es porque necesita una capacidad de memoria excesiva, no solo de la computadora sino de la impresora, lo que impidió poder graficar directamente del SAPLOT y hubo que exportar las gráficas a otro paquete (COREL40), lo que complicó la obtención de éstas.

E) El SAP90 le indica al usuario los pasos que está efectuando en determinado momento, y también indica posibles errores cometidos al introducir los datos, de acuerdo a la estructura que pide el SAP90 o errores al definir la estabilidad de la estructura. No indica aquellos errores de conexión de nodos para formar los elementos, elementos perdidos y otros similares.

F) Los ensayos realizados en el laboratorio fueron efectuados por primera vez en esta forma y los resultados obtenidos no se pueden generalizar a otros tipos de block, con geometrías diferentes, capacidad de resistencia distinta o composición de materiales, debiéndose efectuar más ensayos para corroborar los aquí presentados.

G) Los resultados obtenidos por medio del programa SAP90 son satisfactorios, ya que describen el comportamiento de la estructura en una forma ideal, y se aprecia que el comportamiento de la estructura es un tanto compleja.

H) Los resultados del SAP90 se podrían mejorar en futuros estudios, tomando en cuenta varios parametros que deberian ser sujetos de un estudio mas profundo, entre otros se podria citar el módulo de elasticidad de la unidad de block, así como la relación de Poisson, estos tienden a variar debido a que el block es un material fragil y muy porozo, al poder establecer un valor de desviación de estas variaciones, el dato obtenido puede ser introducido en el modelo a ser analizado por el programa en la computadora y de esta forma los resultados obtenidos por el mismo serán más apegados al comportamiento real observado en los ensayos de laboratorio.

I) Los resultados para el estudio del block aplicándole carga de compresión no fueron similares, tal y como se esperaba, probablemente porque la fuerza empleada en el ensayo por computadora estaban dentro del rango elástico y las grietas obtenidas en el laboratorio fueron después de la carga de falla.

J) En el caso en que al block se le aplicó carga de corte los resultados fueron similares, esto porque la concentración de esfuerzos es en la esquina superior donde se aplicó la carga.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

## RECOMENDACIONES

A) Se debe seguir ampliando el estudio que se presentó en esta tesis, aplicando diferentes cargas y de esta forma obtener un comportamiento general del block. Estos resultados se pueden comparar con otros estudios realizados a diferentes blocks y que posean características geométricas y/o composiciones de materiales diferentes, y de esta forma poder establecer cuál de ellos posee un comportamiento más eficiente para absorber y distribuir la carga, ya que actualmente ni los fabricantes, ni los consumidores saben la razón del porque se usa determinada geometría o proporción de materiales.

B) Es importante que en la facultad de ingeniería se implemente un curso sobre el método de elementos finitos, con énfasis en su aplicación por medio de programas de computación, aunque esto se debería realizar en todos los cursos en que se imparten conocimientos de análisis estructural y de diseño de estructuras, esto con el objeto que todos los estudiantes interesados en profundizar sus conocimientos en el área de estructuras puedan facilitar sus estudios.

## REFERENCIAS

- 1.- Zienkiewcs, O.C.. "The finite element method in engineering science". 2nd. De.. London, England: McGraw-Hill. 1971. 521 pag..
- 2.- Paiz Recinos, Murphy O.. "Método de elementos finitos para el análisis de muros". (Tesis de graduación de Ingeniero Civil: Facultad de Ingeniería, Universidad San Carlos de Guatemala), Guatemala, 1993, 123 pag..
- 3.- Samayoa Dardon, Rodolfo. "Método de elementos finitos para el análisis estructural". (Tesis de graduación de Ingeniero Civil: Facultad de Ingeniería, Universidad San Carlos de Guatemala), Guatemala, 1980, 152 pag..
- 4.- Steele, Jeffrey M.. "Applied finite element modeling". Rochester, New York, Estados Unidos: Marcel Dekker. 1989. 361 pag..
- 5.- Gallagher, Richard H.. "Finite element analysis, fundamentals". Englewood Cliffs, New Jersey, Estados Unidos: Prentice Hall. 1975. 420 pag..
- 6.- Arya Santosh K., et.al.. "Finite element method for interfase ploblem". Journal of structural engineering. American Society of Civil Engineers: Febrero 1982, Vol.108 No.ST2. 337 pag..
- 7.- Wilson, E.L. and Habibullah, A. "SAP90- A series of computer programs for the static and dynamic finite element analysis of structures, User's manual". Computers & Structures, Inc., Berkeley California, 1988.
- 8.- Martínez Ordoñez, Julio Hector. "Modulo de elasticidad en mampostería". (Tesis de graduación de Ingeniero Civil: Facultad de Ingeniería, Universidad San Carlos de Guatemala), Guatemala, 1995. 39 pag..

## BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Nitsch Pineda, Juan Estuardo. "Guía de laboratorio para las practicas de diseño estructural en mampostería". (Tesis: Facultad de Ingeniería, USAC), Guatemala, 1985. 86 pag..
- 2.- T. Ganesan y K. Ramamurthy. "Behavior of concrete hollow-block masonry prisms under axial compression". Journal of Structural Engineering. American Society of Civil Engineers: Julio 1992, Vol. 118 No.7. pag. 1751-1769.
- 3.- Karantoni, Fillitza V.. "Computed versus observed seismic response and damage of masonry building". Journal of Structural Engineering. American Society of Civil Engineers: Julio 1992, Vol. 118 No.7. pag. 1804-1821.
- 4.- Bathe, Klaus-Jurgen. Et.al.. "SAP IV: A structural analysis program for static and dynamic response of linear systems". S.l.i.. s.p.i.. Junio 1973. 170 pag..