

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil



DISEÑO Y COMPORTAMIENTO DE MUROS DE CORTE DE  
CONCRETO REFORZADO CON ABERTURAS

José Humberto Rosal Paz

Guatemala  
2007



DISEÑO Y COMPORTAMIENTO DE MUROS DE CORTE DE  
CONCRETO REFORZADO CON ABERTURAS

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil



DISEÑO Y COMPORTAMIENTO DE MUROS DE CORTE DE  
CONCRETO REFORZADO CON ABERTURAS

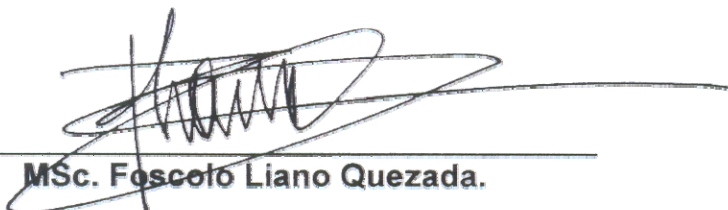
Trabajo de investigación presentado por José Humberto Rosal Paz  
para optar al grado académico de Maestría en Ingeniería Estructural


Guatemala  
2007

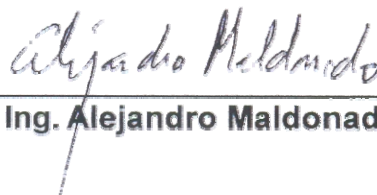
Vo.Bo.:

(f)   
Asesor: MSc. Foscolo Liano Quezada.

Tribunal:

(f)   
MSc. Foscolo Liano Quezada.

(f)   
MSc. Elsa Cabrera.

(f)   
Ing. Alejandro Maldonado.

Guatemala, 14 de mayo de 2,007.



## PREFACIO

Se pretende que esta investigación pueda utilizarse como guía para evaluar las condiciones más desfavorables producidas al proveer de aberturas a muros de cortante, y con ello aumentar la eficiencia de este tipo de muros.

Para apreciar y entender de mejor forma el comportamiento de muros con aberturas, en este trabajo se utilizan mayoritariamente gráficas para expresar los resultados y distorsiones en la distribución de esfuerzos en el plano del muro, en vez de tablas en las que sería difícil realizar un análisis comparativo entre los diferentes tamaños y ubicaciones de las aberturas.

Como se observará más adelante, se ha utilizado un muro con una relación altura/largo de 1.50 y aberturas que representan una reducción del área del muro entre 1.85% hasta 14.81%. Por los cambios de ubicación y cantidad de aberturas dentro del muro, los resultados obtenidos en cuanto a magnitud de esfuerzos, aplican únicamente a los casos específicos de este trabajo, sin embargo es posible analizar los porcentajes de incrementos o decrementos en los esfuerzos y su redistribución. En muros y aberturas en los que guarden las mismas proporciones, se obtendrán resultados similares.



## ÍNDICE GENERAL

	PÁGINA
PREFACIO	V
LISTA DE TABLAS	IX
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
RESUMEN	XIV
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
III. TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL CON MUROS DE CORTANTE	3
A. Sistema estructural con muros de corte de concreto.	3
B. Sistema Dual con muros de corte de concreto y marcos especiales resistentes a momento.	3
1. Interacción estructural entre marcos y muros de concreto reforzado.	4
C. Clasificación de muros de corte.	6
1. Muros de corte sin aberturas.	6
2. Muros de corte con aberturas.	6
3. Muros acoplados.	6

IV.	REQUERIMIENTOS GENERALES PARA MUROS DE CORTE	8
	A. Geometría.	8
	B. Refuerzos mínimos.	8
	C. Confinamiento.	9
	D. Elementos de borde.	13
	E. Vigas de acople.	13
	F. Solicitaciones de diseño.	15
	G. Diseño a flexo-compresión.	16
	H. Diseño a corte.	17
	I. Deflexiones.	17
V.	MODELOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO PARA MUROS.	20
	A. Análisis como columna ancha.	20
	B. Análisis por modelo puntal-tensor. (Strut and Tie).	20
	C. Análisis con elementos finitos.	21
VI.	EJEMPLOS.	23
	A. Caso No. 1. Muro de corte con una abertura simétrica de 0.40m x 0.40m.	25
	B. Caso No. 2. Muro de corte con una abertura simétrica de 0.80 m. x 0.80m.	31
	C. Caso No. 3. Muro de corte con dos aberturas simétricas de 0.40m. x 0.40m.	36
	D. Caso No. 4. Muro de corte con dos aberturas simétricas de 0.80 m. x 0.80m.	41
	E. Caso No. 5. Muro de corte con tres aberturas simétricas de 0.40m. x 0.40m.	47
	F. Caso No. 6. Muro de corte con una abertura asimétrica de 0.40m. x 0.40m.	52

G. Caso No. 7. Muro de corte con una abertura asimétrica de 0.80m x 0.80m.	57
H. Caso No. 8. Muro de corte con dos aberturas asimétricas de 0.40m. x 0.40m.	63
I. Caso No. 9. Muro de corte con dos aberturas asimétricas de 0.80m. x 0.80m.	68
J. Caso No. 10. Muro de corte con seis aberturas simétricas de 0.40m. x 0.40m.	73
K. Caso No. 11. Muro de corte sin aberturas.	79
L. Deformaciones y rigidez.	84
M. Análisis comparativo de resultados.	85
VII. CONCLUSIONES	93
VIII. RECOMENDACIONES	94
IX. BIBLIOGRAFÍA	95



## LISTA DE TABLAS

TABLA No.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
1	Coeficientes para confinamiento de muros estructurales.	13
2	Deformaciones, rigideces, y rigideces relativas.	84

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA No.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
1	Deformación lateral, marcos, muros, marcos y muros combinados.	5
2	Geometría esquemática vigas de acople.	7
3	Distribución de esfuerzos en muros bajo flexo-compresión.	10
4	Apoyo lateral por influencia de muros perpendiculares.	11
5	Geometría y modelo puntal-tensor caso No.1.	25
6	Fuerzas y reacciones obtenidas con modelo puntal-tensor caso No.1.	26
7	Esfuerzos en sentido Eje “X” caso No.1. Análisis por elemento finito.	27
8	Esfuerzos en sentido Eje “Y” caso No.1. Análisis por elemento finito.	28
9	Esfuerzos cortantes caso No.1. Análisis por elemento finito.	29
10	Geometría y modelo puntal-tensor caso No.2.	31
11	Fuerzas y reacciones obtenidas con modelo puntal-tensor caso No.2.	32
12	Esfuerzos en sentido Eje “X” caso No.2. Análisis por elemento finito.	33
13	Esfuerzos en sentido Eje “Y” caso No.2. Análisis por elemento finito.	34
14	Esfuerzos cortantes caso No.2. Análisis elemento finito.	35

15	Geometría y modelo puntal-tensor caso No.3.	36
16	Fuerzas y reacciones obtenidas con modelo puntal-tensor caso No.3.	37
17	Esfuerzos en sentido Eje “X” caso No.3. Análisis por elemento finito.	38
18	Esfuerzos en sentido Eje “Y” caso No.3. Análisis por elemento finito.	39
19	Esfuerzos cortantes caso No.3. Análisis por elemento finito.	40
20	Geometría y modelo puntal-tensor caso No.4.	41
21	Fuerzas y reacciones obtenidas con modelo puntal-tensor caso No.4.	42
22	Esfuerzos en sentido Eje “X” caso No.4. Análisis por elemento finito.	43
23	Esfuerzos en sentido Eje “Y” caso No.4. Análisis por elemento finito.	44
24	Esfuerzos cortantes caso No.4. Análisis por elemento finito.	45
25	Geometría y modelo puntal-tensor caso No.5.	47
26	Fuerzas y reacciones obtenidas con modelo puntal-tensor caso No.5.	48
27	Esfuerzos en sentido Eje “X” caso No.5. Análisis por elemento finito.	49
28	Esfuerzos en sentido Eje “Y” caso No.5. Análisis por elemento finito.	50
29	Esfuerzos cortantes caso No.5. Análisis por elemento finito.	51
30	Geometría y modelo puntal-tensor caso No.6.	52
31	Fuerzas y reacciones obtenidas con modelo puntal-tensor caso No.6.	53

32	Esfuerzos en sentido Eje “X” caso No.6. Análisis por elemento finito.	54
33	Esfuerzos en sentido Eje “Y” caso No.6. Análisis por elemento finito.	55
34	Esfuerzos cortantes caso No.6. Análisis por elemento finito.	56
35	Geometría y modelo puntal-tensor caso No.7.	57
36	Fuerzas y reacciones obtenidas con modelo puntal-tensor caso No.7.	58
37	Esfuerzos en sentido Eje “X” caso No.7. Análisis por elemento finito.	59
38	Esfuerzos en sentido Eje “Y” caso No.7. Análisis por elemento finito.	60
39	Esfuerzos cortantes caso No.7. Análisis por elemento finito.	61
40	Geometría y modelo puntal-tensor caso No.8.	63
41	Fuerzas y reacciones obtenidas con modelo puntal-tensor caso No.8.	64
42	Esfuerzos en sentido Eje “X” caso No.8. Análisis por elemento finito.	65
43	Esfuerzos en sentido Eje “Y” caso No.8. Análisis por elemento finito.	66
44	Esfuerzos cortantes caso No.8. Análisis por elemento finito.	67
45	Geometría y modelo puntal-tensor caso No.9.	68
46	Fuerzas y reacciones obtenidas con modelo puntal-tensor caso No.9.	69
47	Esfuerzos en sentido Eje “X” caso No.9. Análisis por elemento finito.	70
48	Esfuerzos en sentido Eje “Y” caso No.9. Análisis por elemento finito.	71

49	Esfuerzos cortantes caso No.9. Análisis por elemento finito.	72
50	Geometría y modelo puntal-tensor caso No.10.	73
51	Fuerzas y reacciones obtenidas con modelo puntal-tensor caso No.10.	74
52	Esfuerzos en sentido Eje “X” caso No.10. Análisis por elemento finito.	75
53	Esfuerzos en sentido Eje “Y” caso No.10. Análisis por elemento finito.	76
54	Esfuerzos cortantes caso No.10. Análisis por elemento finito.	77
55	Geometría y modelo puntal-tensor caso No.11.	79
56	Fuerzas y reacciones obtenidas con modelo puntal-tensor caso No.11.	80
57	Esfuerzos en sentido Eje “X” caso No.11. Análisis por elemento finito.	81
58	Esfuerzos en sentido Eje “Y” caso No.11. Análisis por elemento finito.	82
59	Esfuerzos cortantes caso No.11. Análisis por elemento finito.	83
60	Relaciones entre área y rigidez de muros.	85
61	Secciones de referencia para comparación de esfuerzos.	86
62	Esfuerzos horizontales máximos en esquinas de aberturas.	87
63	Esfuerzos verticales máximos en esquinas de aberturas.	87
64	Esfuerzos cortantes máximos en esquinas de aberturas.	88
65	Esfuerzos horizontales máximos en la base.	89
66	Esfuerzos verticales máximos en la base y sección A-A’.	89
67	Esfuerzos cortantes máximos en la base y sección A-A’.	90
68	Esfuerzos verticales máximos en sección B-B’.	91
69	Sectores de esfuerzos máximos en muros con aberturas.	92

## LISTA DE SÍMBOLOS.

ACI	American Concrete Institute.
AGIES	Asociación guatemalteca de ingeniería estructural y sísmica.
As	Área de acero de refuerzo
c	Profundidad del bloque de compresión.
Ec	Modulo de elasticidad del concreto.
f'c	Esfuerzo permisible en el concreto.
Fy.	Límite de fluencia del acero de refuerzo.
H – Hm - Hw	Altura de muro de corte.
Ie	Momento de inercia efectivo.
Ig	Momento de inercia del área gruesa.
L - Lm - Lw	Largo de muro de corte.
Mdis.	Momento de diseño.
Mu.	Momento ultimo.
My	Capacidad a momento flexionante del muro.
PCA	Portland cement asociation.
Pdis.	Fuerza axial de diseño.
Pu.	Fuerza axial última.
t	Espesor de muro de corte.
Vdis	Cortante de diseño.
Vu.	Cortante último.
Vy	Capacidad a corte de muro.
X*	Profundidad critica del bloque de compresión.
$\Delta f$	Deflexión por flexión.
$\Delta v$	Deflexión por cortante.

## RESUMEN

En el trabajo que se presenta a continuación, se realiza una evaluación del comportamiento de muros que poseen aberturas y se encuentran bajo carga lateral. En el capítulo III contiene una clasificación de los sistemas estructurales en las que son utilizados muros como elementos sismo-resistentes.

A continuación en el capítulo IV se describen los requisitos mínimos que deben cumplirse en muros de corte de acuerdo a los códigos de diseño, tales como geometría, refuerzos, confinamiento y resistencia. Posteriormente en el capítulo V, se describen los métodos de análisis y diseño a usarse en muros.

En el capítulo VI se inicia el análisis de un muro sin aberturas y diez muros en los cuales se van modificando el tamaño y la ubicación de las aberturas dentro del plano del muro. Se procede a realizar una comparación entre los resultados obtenidos respecto a la variación de rigidez, distribución de esfuerzos horizontales, verticales y cortantes, esfuerzos máximos en las esquinas de las aberturas y en la base del muro.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones de acuerdo a los resultados obtenidos.

## I. INTRODUCCIÓN

Es práctica usual utilizar muros de cortante de concreto reforzado para resistir como parte fundamental, los esfuerzos producidos en una estructura bajo la aplicación de cargas laterales causadas por sismo o viento.

La utilización de muros de corte, presenta la ventaja de proveer a la estructura de un mejor comportamiento, disminuyendo en gran medida las deflexiones laterales, sin embargo arquitectónicamente podrían ser un obstáculo para la circulación horizontal o para ventilación e iluminación de los ambientes, es por ello que generalmente los muros van ubicados en los ductos de circulación vertical, tales como gradas o elevadores. Será posible ubicar los muros en ductos de gradas y elevadores, siempre y cuando no presenten asimetrías en la estructura que causen torsión.

Los muros de corte pueden volverse más versátiles si se les provee de aberturas que permitan la circulación horizontal, iluminación y ventilación, siendo *el diseño y comportamiento de muros de corte de concreto reforzado con aberturas*, el tema de este trabajo, en el cual se utilizarán tres métodos de análisis para comparar las variaciones de esfuerzos producidas por la presencia de aberturas de diversos tamaños y en varias ubicaciones dentro del muro.

## II. OBJETIVOS

### A. General

1. Investigar los efectos producidos por la existencia de aberturas en muros de cortante, evaluando las variaciones en resistencia y distribución de esfuerzos, dependiendo de la ubicación y geometría de la abertura.

### B. Específicos

1. Investigar los sistemas estructurales en los que se utiliza muros de cortante de concreto reforzado.
2. Investigar los requisitos que deben cumplir los muros de cortante para resistir las demandas a las que serán sometidos.
3. Describir los modelos de análisis para muros de corte, realizando un análisis comparativo entre cada uno de ellos.
4. Analizar un muro de corte variando la ubicación y dimensiones de las aberturas.
5. Comparar las variaciones de esfuerzos provocadas por la existencia de varios tipos de aberturas en un muro de corte.

### III. TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL CON MUROS DE CORTANTE

#### A. Sistema estructural con muros de corte

Los sistemas estructurales que utilizan muros para resistir todas o casi todas las cargas verticales y muros de corte o marcos embreizados para resistir las cargas laterales, son llamados Sistema de Cajón. Estos muros estructurales pueden ser de mampostería reforzada, concreto reforzado, mampostería sin refuerzo, mampostería parcialmente reforzada, y de madera.

En el medio guatemalteco, es práctica usual utilizar este sistema estructura con muros de mampostería reforzada para edificaciones de uno, dos, tres y hasta cuatro niveles, y durante los últimos años se ha comenzado a utilizar sistemas de cajón con muros de concreto reforzado para edificaciones de 6 a 8 niveles, la mayoría con orientación de vivienda unifamiliar y multifamiliar.

La ventaja que tiene la utilización de un sistema de cajón, es su alta capacidad para resistir cargas laterales debido a la presencia mayoritaria de muros estructurales, lo que a su vez disminuye los efectos producidos por la existencia de aberturas en los muros utilizadas para permitir la circulación horizontal e iluminación en los ambientes.

#### B. Sistema Dual

En un Sistema Dual, las cargas gravitacionales son resistidas por marcos espaciales, mientras que las cargas laterales son resistidas por muros de corte o marcos embreizados y marcos resistentes a momento. Los marcos resistentes a momento deben diseñarse para resistir de forma independiente cuando menos el 25% del corte basal de diseño.

Los marcos resistentes a momento en conjunto con los muros de corte o marcos embreizados, deben resistir totalmente el corte basal de diseño, en proporción a sus rigideces relativas considerando la interacción entre marcos y muros en todos los niveles de la estructura.

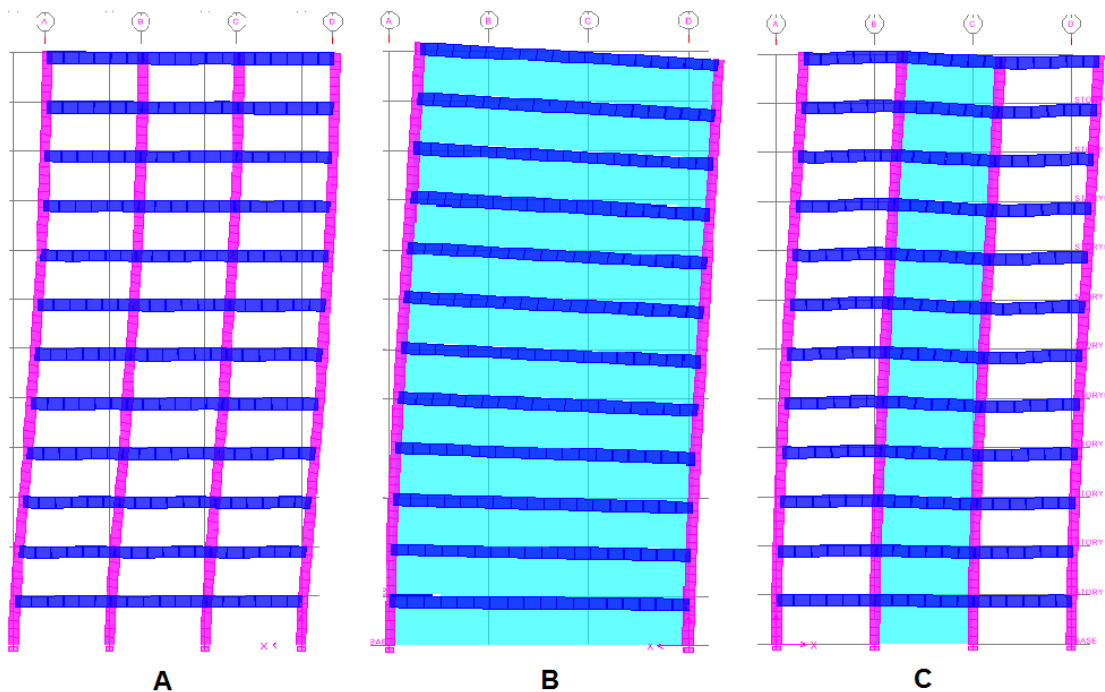
Son los muros de corte los que resistirán casi toda la carga lateral a la que será sometida la estructura, debido a su mayor rigidez respecto a los marcos que existiesen. El proveer muros de corte de este tipo, representa un obstáculo arquitectónico tanto para la circulación horizontal como para iluminación o ventilación, es por ello que normalmente van ubicados en fosos de ascensores o gradas, pero en determinadas condiciones no será posible ubicarlos allí, ya que pueden provocar asimetrías estructurales. La solución a tal problema es proveerle de aberturas a los muros de cortante.

1. Interacción estructural entre marcos y muros de concreto reforzado. Existen diferencias entre el comportamiento de marcos y muros de concreto reforzado, una de estas es la forma en que se deforman, mientras que los marcos se flexionan principalmente en modo cortante, un muro de corte se deforma en modo flexionante simulando un voladizo vertical.

Las losas de los diferentes pisos, normalmente se consideran como totalmente rígidas dentro de su plano, de tal forma que no habrá movimiento relativo entre los marcos y muros, lo que significa que la deformación lateral en un mismo nivel será la misma tanto para los muros como para los marcos. En la gráfica No.1 se muestra la forma de un marco deformado, un muro deformado, y la deformación de un marco y muro cuando trabajan combinados, bajo carga lateral y para el primer modo de vibración.

En realidad las losas no son del todo rígidas, debido a la flexibilidad de la losa y si no poseen suficiente apoyo lateral entre las unidades más rígidas que ella como marcos o muros, la magnitud de la carga lateral que deben transferir resultaría afectada.

FIGURA No.1  
 DEFORMACIÓN LATERAL, MARCOS, MUROS, MARCOS Y MURO COMBINADOS



- A. Deformación de un marco rígido en modo cortante.  
 B. Deformación de un muro de corte en modo flexionante.  
 C. Deformación de un marco y muro combinados.

Una estructura puede poseer una alta resistencia a las fuerzas cortantes y aún así ser torsionalmente débil, si los elementos que resisten las fuerzas cortantes, en este caso los muros de corte, están ubicados en posiciones desfavorablemente asimétricas. Mientras más cerca del perímetro de la estructura se coloquen los muros de corte, mayor capacidad a resistir los esfuerzos torsionantes tendrá la estructura, esta resistencia a la torsión es proporcionada por los muros al momento de flexionarse.

El comportamiento no sólo de muros y marcos combinados, sino también de cualquier estructura, puede resultar afectado por los asentamientos o rotación de las cimentaciones ya que no es posible lograr un empotramiento perfecto en el suelo. En marcos altos y esbeltos las deflexiones axiales en columnas será importante, incrementando los momentos y fuerzas cortantes en los pisos superiores del marco.

Adicionalmente, la distribución real de carga gravitacional en la estructura, y el efecto  $P\Delta$ , incrementan los momentos que deben resistir las columnas de los marcos.

Normalmente es despreciada la resistencia al corte que proporcionan los muros en su sentido débil. Los cortantes perpendiculares al muro son resistidos casi siempre por marcos, ya que es usual que los muros de cortante sean paralelos al lado esbelto de la estructura, o en todo caso también por muros ubicados en la otra dirección.

### C. Clasificación de muros de cortante

De acuerdo a su geometría, los muros de corte pueden clasificarse como Muros de corte sin aberturas, Muros de corte con aberturas, y Muros de corte acoplados.

1. Muros de corte sin aberturas. Consisten en muros sólidos ya sea de concreto reforzado o mampostería, en los cuales no existen aberturas o discontinuidades que le afecten en su plano.

2. Muros de corte con aberturas. A diferencia de los muros sin aberturas, en estos muros si existen aberturas que interrumpen la superficie del muro. Estas aberturas pueden prestar servicio arquitectónico, o para ser usadas por otros sistemas de funcionamiento de la estructura.

3. Muros acoplados. Puede decirse que son una subdivisión de los muros con aberturas, pero aquí las aberturas son de mayor tamaño y los muros están unidos por dinteles o vigas de acople. Se consideran como una viga de acople o dintel, aquellos elementos cuya relación entre luz/peralte  $L/H$  es menor que 4. La luz "L" de las vigas de acople equivale a la separación entre los muros acoplados.

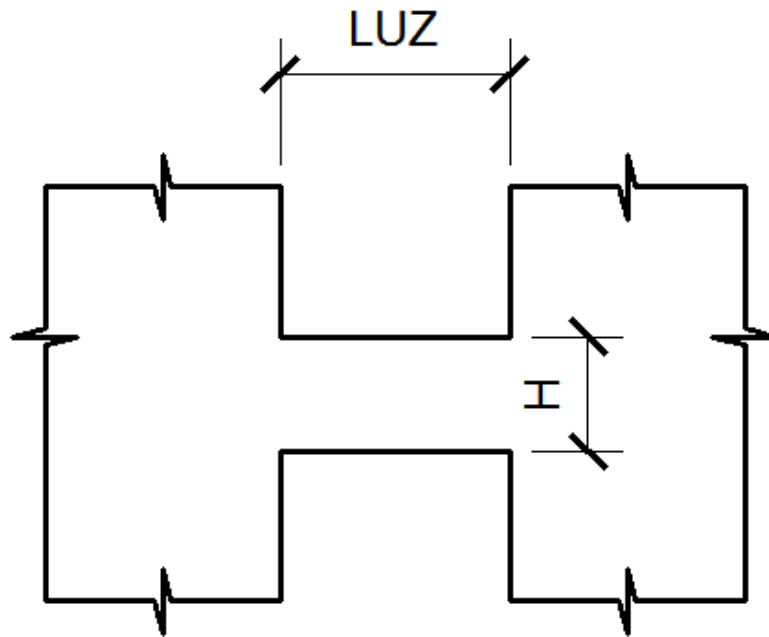
Las vigas de acople pueden proveer rigidez y disipar la energía producida por cargas laterales cíclicas, siendo controladas por el cortante de estas cargas. Las vigas de acople son efectivas para la disipación de energía sísmica, siempre y cuando los muros

que interconectan sean más resistentes que ellas. Es necesario tener en consideración que las vigas que acoplan muros a columnas, pueden causar articulaciones plásticas en las columnas, comprometiendo la estabilidad de la estructura.

Para resistir la demanda de cortante en las vigas de acople, es normal proveerles un refuerzo en cruceta que se intersecta al centro de la viga. Ensayos han mostrado que este refuerzo es efectivo únicamente si las barras son colocadas con una inclinación fuerte, es por ello que el uso de este refuerzo esta limitado a vigas con una relación  $L/H < 4$ , aunque vigas con relaciones entre 4 y 2.5 pueden resultar difíciles de ductilizar.

Los requerimientos para el diseño de muros de corte, son descritos en el capítulo a continuación.

FIGURA No.2  
GEOMETRÍA ESQUEMÁTICA VIGAS DE ACOPLE.



Se considera como viga de acople si  $Luz/H < 4$ .

#### IV. REQUERIMIENTOS GENERALES PARA MUROS DE CORTE

##### A. Geometría

De acuerdo a las normas recomendadas de AGIES, los muros de estructuras de concreto reforzado para sistemas de cajón tendrán al menos 10 cm de espesor. Otros muros de concreto reforzado tendrán al menos 15 cm de espesor.

Dependiendo de la altura, los muros tendrán un espesor mínimo de  $H/25$ , pero si la carga de diseño no excede del 10% de la capacidad a la carga axial del muro, es decir si  $P_{dis} \Phi \leq 0.10 * (\Phi * f'_c * t * L)$ , el espesor mínimo puede ser  $H/30$ .

Como prevención al pandeo local, el espesor de cualquier muro no podrá ser menor a  $H/10$  en la región en que la deformación unitaria en compresión exceda 0.001. Esto no aplica si la región tiene una longitud menor a dos veces el espesor del muro, o si es menor a  $0.2 L_m$ . Tampoco aplica si la región tiene menos de tres espesores hasta la intersección con otro muro transversal que tenga una longitud de al menos  $H/5$ .

##### B. Refuerzo mínimo

La cuantía de acero en dirección tanto vertical como horizontal para el alma del muro no debe ser menor a 0.0025 en cada una de ellas, no obstante podrán ser menores a 0.0025, pero mayores a 0.0014 siempre y cuando  $V_{dis} < 0.25 \sqrt{f'_c} * (t * L)$ .

Las cuantías de acero no serán mayores a 0.04, ya sea vertical como horizontal, ni localmente o bien en algún sector del muro.

Cuando el espesor del muro sea menor a 25 cm y además el corte de diseño,  $V_{dis} < 0.55 \sqrt{f'_c} * (t * L)$ , el refuerzo podrá colocarse en una sola cama al centro del muro, caso contrario deberá colocarse en dos camas y el espaciamiento entre varillas no será mayor a 40 cm., ni mayor a 3 veces el espesor del muro. El diámetro de las varillas no excederán la décima parte del espesor del muro. En zonas de confinamiento, el

espaciamiento entre varillas verticales no será mayor a 20 cm., y el espaciamiento horizontal no mayor a 15 cm.

Es preferible colocar el acero de refuerzo en dos camas por dos razones, una de ellas es que en condiciones ordinarias de construcción será difícil mantener en su lugar una sola cama de refuerzo al centro del muro; y la otra razón es que al colocar dos camas, el concreto queda confinado disminuyendo el riesgo de fragmentación por agrietamiento durante un evento sísmico. El refuerzo vertical siempre deberá en la cara de adentro del refuerzo horizontal.

De acuerdo a los momentos flectores, el refuerzo vertical del muro podrá irse recortando, prolongando las varillas una altura “L” igual al largo del muro o bien a un sexto de la altura del mismo, la que resulte mayor.

Los traslapes verticales deberán ser escalonados, empalmado no más de la mitad del refuerzo en cualquier sección ya sea de la cortina o de los elementos de borde. La distancia de empalmes verticales de la pantalla podrán hacerse a una distancia de por lo menos la longitud de desarrollo del acero de refuerzo, mientras que el refuerzo de los bordes deberán hacerse en diferente nivel, siempre sin exceder la mitad del área de refuerzo.

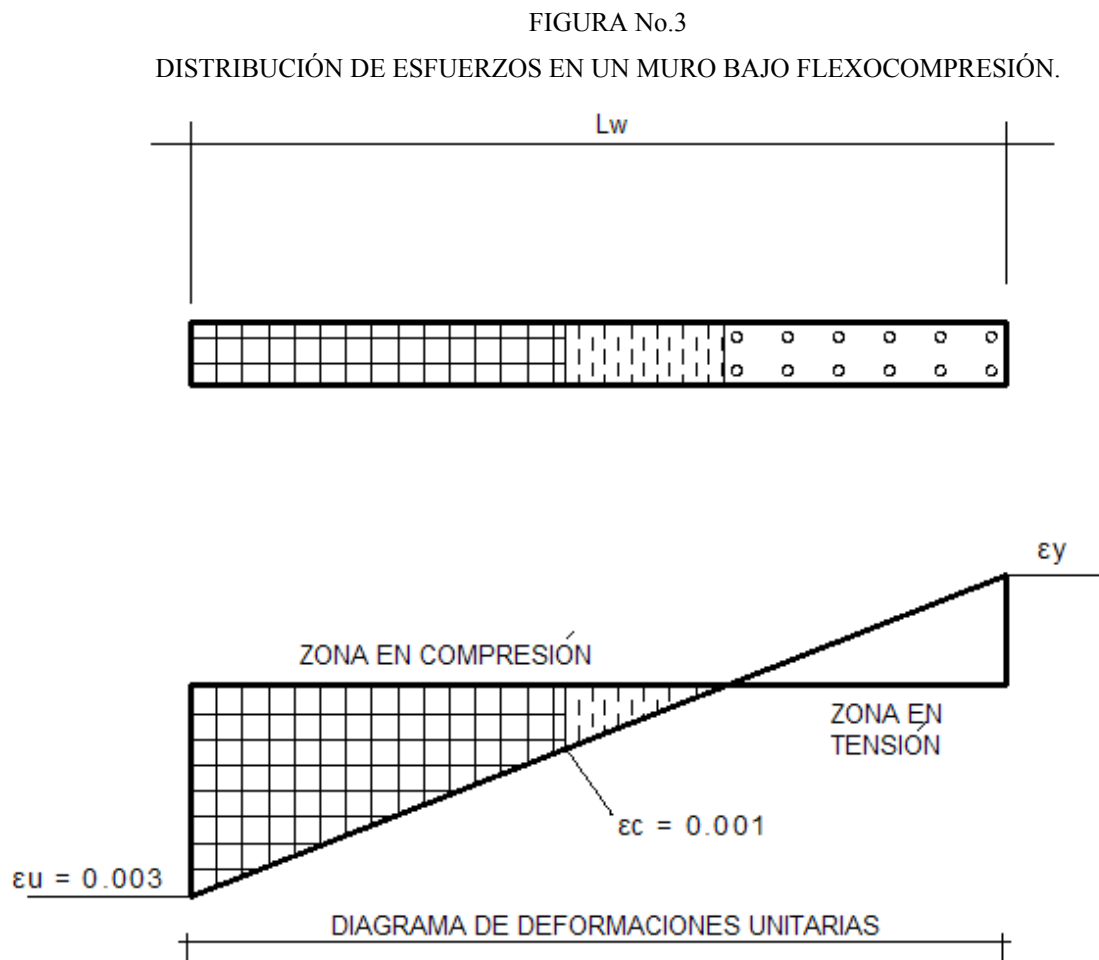
Los traslapes horizontales no están permitidos a menos que el extremo de las varillas traslapadas se doble y se ancle con un gancho hacia la cama opuesta de refuerzo.

### C. Confinamiento

Es probable que cuando un muro esbelto esté sometido a esfuerzos de compresión grandes, la estabilidad del mismo se vea comprometida por una falla prematura producida por pandeo y no una falla por resistencia del muro, es por ello que en

ausencia de estudios de compacidad de muros, en el inciso A de este capítulo se menciona como límite mínimo un espesor de muro de  $1/10$  su altura.

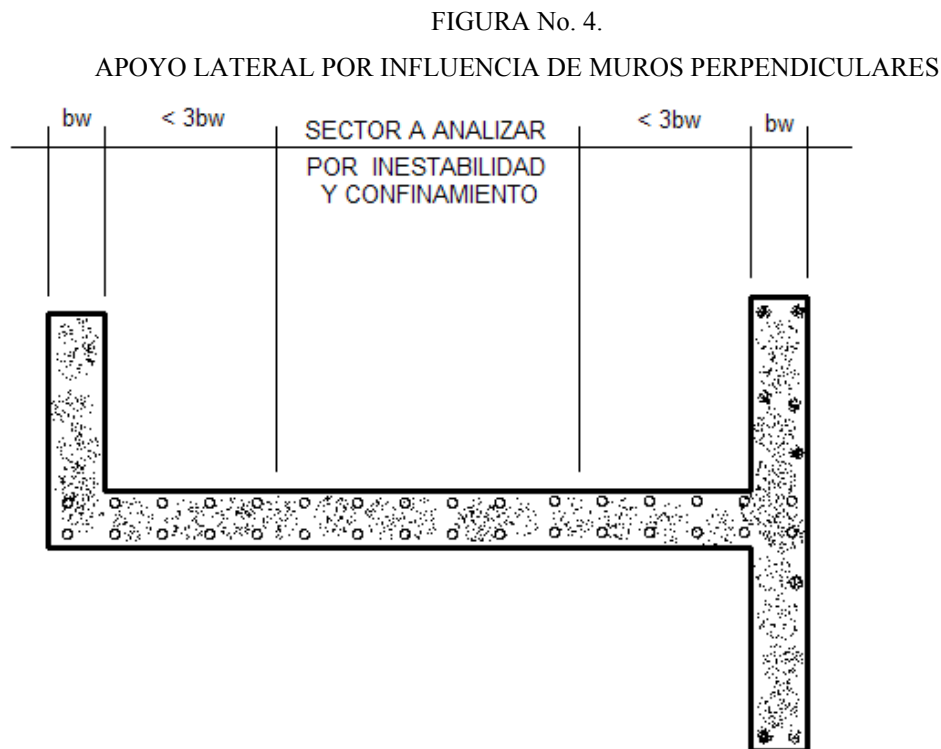
El riesgo de una falla prematura por pandeo es mayor en los muros ubicados en el primer nivel o por encima de la cimentación en edificios multiniveles, ya que son los que presentan mayores demandas axiales por compresión, y por lo tanto tienen un bloque en compresión “c” grande, tal y como se indica en la figura No. 3.



Cuando se obtiene un bloque en compresión con una profundidad “c” menor a 4 veces el espesor del muro ó  $0.3 \cdot L_w$ , la que resulte menor, no es necesario cumplir el requisito de  $b_w > 1/10 H_w$ , ni cumplir con los requisitos de confinamiento especial,

debido a que las áreas adyacentes al bloque de compresión le estabilizan, esto ocurre generalmente con muros que soportan cargas verticales ligeras.

A efecto que el concreto alcance su resistencia última previo a que ocurra una falla prematura por pandeo, es necesario proveer un confinamiento para el refuerzo vertical del muro en los sectores que tienen una deformación unitaria en el bloque de compresión mayor que 0.001 para las combinación de carga más desfavorable. Este requerimiento no aplica si la zona del bloque de compresión analizado esta dentro del área de influencia de soporte lateral que produce un muro perpendicular, que es igual a tres veces su espesor (ver figura No. 4). El refuerzo especial de confinamiento debe proveerse hasta una altura igual a  $L_m$ , ó  $1/6 H_m$ , la que resulte mayor.



De acuerdo a las normas recomendadas de AGIES-96, la cantidad de acero de refuerzo transversal para el confinamiento, depende del nivel de protección sísmica.

Para niveles de protección A y B, el espaciamiento entre estribos no será mayor a 20 cm. ni 8 diámetros de la menor varilla longitudinal, siendo los estribos de confinamiento no menores que No.3, usando eslabones de confinamiento intermedios en varillas verticales alternas. El espaciamiento entre varillas verticales no será mayor a 20 cm.

Para niveles de protección de C en adelante, el refuerzo depende de la profundidad del bloque de compresión “c” arriba descrito. Si  $c < X^*$ , el refuerzo transversal deberá cumplir con los siguientes requisitos de espaciamiento máximo:

- 6 diámetros de la menor varilla longitudinal confinada.
- 24 diámetros de la varilla confinante.
- $\frac{1}{4}$  del espesor del muro.
- 15 cm.

La cantidad de refuerzo dependerá únicamente de los esfuerzos de corte.

Si  $c \geq X^*$ , el refuerzo transversal deberá cumplir con los requisitos de espaciamiento máximo arriba indicados, y la cantidad a colocar será la mayor de  $A_{sh}/s_h = h'' \beta_1 (f'c/f_y)$ ;  $A_{sh}/s_h = h'' \beta_2 (A_g/A_c - 1) (f'c/f_y)$ ; en donde  $A_{sh}$  es la suma de las todas las áreas de las patas de estribos y eslabones de confinamiento perpendiculares al plano  $h'' * s_h$ , y los valores de  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son tomados de la tabla No. 1.  $X^* = 0.15 * L_m (M_y/M_{dis})$ ;  $h''$  se obtiene de la dimensión del núcleo de concreto medida perpendicularmente a las patas del refuerzo de confinamiento en el bloque de compresión hasta una deformación unitaria 0.001, restandole el recubrimiento al refuerzo horizontal.  $A_g$ , es el área gruesa del núcleo de concreto a confinar igual a  $h'' * \text{espesor muro}$ .  $A_c$  es el área neta del núcleo de concreto calculada hasta la cara exterior del refuerzo perimetral del muro.  $M_y$  es la capacidad de momento flector realmente suministrada obtenida del diagrama de interacción del muro utilizando las mismas suposiciones que para columnas, con la diferencia que se usará  $\Phi = 1.0$

TABLA No.1  
COEFICIENTES PARA CONFINAMIENTO DE MUROS ESTRUCTURALES.

$c / Lm$	$\beta_1$	$\beta_2$
0.10	0.07	0.18
0.20	0.08	0.205
0.30	0.09	0.23
0.40	0.105	0.26
0.50	0.115	0.285
0.60	0.125	0.31
0.70	0.135	0.34

#### D. Elementos de borde

Todo muro de corte debe poseer elementos de borde que cumplan con los requisitos indicados en el inciso C. de esta capítulo, y con una geometría que cumpla con los requisitos establecidos para columnas y muros.

Cuando un muro de cortante esta sometido a un momento de volteo grande, una practica usual es incrementar el ancho de los bordes del muro, respecto del alma del muro. Las dimensiones de esta sección sobre anchada dependerá de la profundidad del bloque a compresión y su respectivo diagrama de deformación unitaria cuando exceda 0.001 de acuerdo a la figura No. 3., así como por la cantidad de refuerzo requerido en el sector que se encuentre a tensión.

#### E. Vigas de acople

Los requisitos que establecen las normas de AGIES 96 para el diseño de vigas de acople son los siguientes:

Dependiendo de la geometría de las vigas que acoplan muros de cortante, así es el diseño de las mismas. Si la relación  $L/h > 4$ , las vigas de acople se diseñan como elementos comunes a flexión cumpliendo las provisiones sísmicas de acuerdo al sistema estructural utilizado. Si la relación  $L/h < 4$  se diseñan como se detalla en los párrafos siguientes.

Inicialmente las vigas de acople también llamadas dinteles, deberán diseñarse a flexión y cortante como si fuesen vigas ordinarias. Con los resultados de este diseño se revisará si el acero a flexión  $A_s$  obtenido del momento de diseño  $M_{dis}$ , juntamente con el corte de diseño  $V_{dis}$  cumplen simultáneamente las dos expresiones siguientes:

$$V_{dis}/bd \leq 0.3 (L/h) \sqrt{f'_c}$$

$$A_s/bd \leq 0.3 (L/h) (\sqrt{f'_c} / f_y)$$

Si ambas ecuaciones son cumplidas, se continuará con el proceso de reforzar en forma convencional con barras longitudinales y estribos, con la excepción que la misma cantidad de acero  $A_s$  se instalará en ambas caras superior e inferior de la viga de acople, en forma continua sin utilizar bastones. Adicionalmente se colocarán varillas longitudinales de refuerzo lateral del mismo calibre y con el mismo espaciamiento que los estribos. Los estribos serán calculados dependiendo del tipo de marco utilizado ya sea ordinario o especial y se colocarán con los mismos espaciamientos en ambos extremos.

En caso de no cumplirse las ecuaciones anteriores, se deberá instalar un refuerzo en cruceta consistente en dos grupos de barras de refuerzo que se intersectan en el centro y en el núcleo de la viga de acople. Cada grupo de barras tendrá al menos 4 varillas con sus respectivos estribos de confinamiento.

La capacidad de cortante de una viga de acople con refuerzo de cruceta está definida por la expresión:  $V_y = 2 \Phi f_y (\sin \alpha) A_{sx} \geq V_{dis}$ , en donde  $A_{sx}$  es el área de refuerzo de cada diagonal de cruceta;  $\alpha$  es el ángulo que forman las diagonales con la horizontal

y el factor de reducción de capacidad  $\Phi=0.70$ . La relación  $A_{sx}/A_c$  no será mayor a 0.065, en donde  $A_c$  es el área del núcleo confinado por los estribos.

El refuerzo para flexión obtenido por el análisis no deberá ser menor a  $A_s = 14 b h/f_y$ , y  $\rho_h = \rho_v = 0.0025$  para estribos y barras longitudinales. Para los estribos de cada diagonal deberá cumplirse con  $A_{sh}/s_h \geq 0.009 h'' (f'_c/f_y h)$ , el espaciamiento  $s_h$  será menor a 10 cm,  $b/4$ , ni 6 diámetros de la menor varilla de la diagonal. Deberá configurarse los estribos de las crucetas de tal forma que en la intersección entre ellas quede confinada.

Las varillas del refuerzo en cruceta se anclarán dentro de los muros acoplados al menos 1.5 veces la longitud de desarrollo de la barra de mayor diámetro.

#### F. Solicitaciones de diseño

De acuerdo a AGIES-96, para el diseño de muros de cortante se utilizarán  $M_{dis}$ ,  $P_{dis}$ ,  $V_{dis}$ , cuyos valores son ajustados de  $M_u$ ,  $P_u$ ,  $V_u$ , siendo estos últimos obtenidos del análisis estructural lineal-elástico con las siguientes combinaciones de carga:

- 1.4 M + 1.7 V      Carga gravitacional.
- 1.2 M + V  $\pm$  S      Combinación sísmica.
- 1.0 M  $\pm$  S          Combinación sísmica.

El momento básico de diseño  $M_{dis}$ , es calculado de acuerdo a la relación entre altura y longitud del muro estructural. Si  $H_m/L_m \geq 3$ ,  $M_{dis} = M_u$ .

Si  $H_m/L_m < 3$ ,  $M_{dis} = K_{r1} * M_u$ .

En donde  $K_{r1} = 2.5 - 0.5 H_m/L_m$ .       $1.0 \leq K_{r1} \leq 2.0$

La envolvente de momentos puede desplazarse hacia arriba una altura  $L_{om}$ , en donde  $L_{om}$  es igual a  $L_m$  ó  $1/6 H_m$ . Es por ello que el refuerzo vertical y la zona de

confinamiento descritas en los incisos B y C de este capítulo, se extienden una longitud  $L_{om}$ , para considerar este efecto.

El cortante nominal de diseño  $V_{dis}$  es calculado como:

$$V_{dis} = K_r V_u \quad \text{en donde } K_r = M_y / M_u \leq 4.$$

$M_y$  es la capacidad de momento flexionante realmente suministrado, obtenida del diagrama de interacción, pero con  $\Phi=1.00$ .

La carga axial de diseño  $P_{dis}$ , se obtiene con las combinaciones de carga arriba indicadas, pero remplazando las cargas sísmicas axiales que resultan del análisis por la sumatoria de 1.25 veces las capacidades de corte  $V_y / \Phi$  de las vigas de acople y vigas en general de los pisos arriba de la sección de muro en consideración.

#### G. Diseño a flexocompresión

La capacidad de los muros es afectada por la interacción de las cargas axiales con los momentos a los que están sometidos. Para determinar la resistencia a flexocompresión en muros, se usan los procedimientos utilizados para columnas.

En muros de cortante con espesor constante, la capacidad axial máxima  $P_y$  no excederá de:  $P_{y \max} = \Phi 0.55 f'_c A_g (1 - (h_m / 32t_m)^2)$ , en la que  $h_m$  es la distancia vertical entre restricciones. Para muros que tienen bordes ensanchados, y estos bordes cumplen con las dimensiones mínimas para columnas o muros, la capacidad axial del muro puede calcularse como:  $P_{y \max} = \Phi 0.55 f'_c A_g$ , en la que  $A_g$  es el área gruesa de la sección de concreto del muro.

Cuando el muro en análisis sea intersectado por otro muro perpendicular, deberá tomarse en cuenta el ancho efectivo del extremo en compresión y tensión actuando como partes del muro en análisis. El ancho efectivo de ala a compresión será  $B_{c_{ala}} = 0.5 H_m \leq L_{m \text{ perpendicular}}$ , y el ancho efectivo del ala a tensión será  $B_{t_{ala}} = H_m \leq L_{m \text{ perpendicular}}$ .

Deberá tomarse en cuenta todo el refuerzo que este dentro de las alas para el calculo de la resistencia del muro en análisis, así como el refuerzo del alma y los elementos de borde.

En el caso de existencia de aberturas en el muro, debe evaluarse la influencia de las aberturas en la resistencia a flexión y corte del muro así como la distribución de cargas alrededor de las mismas. Como se verá en el capítulo siguiente, los métodos de análisis puntal-tensor y elemento finito pueden utilizarse para este caso.

#### H. Diseño a corte

La capacidad a corte  $V_y$  de un muro estructural puede calcularse como:

$$V_y = \Phi A_{cv} (\alpha_c \sqrt{f'_c} + \rho_h f_y) \leq V_y \text{ max, en donde}$$

$$V_y \text{ max} = \Phi A_{cv} (2.1 \sqrt{f'_c})$$

$$A_{cv} = 0.8 L_m * t_m$$

$$\alpha_c = 0.80 \text{ si } H_m/L_m < 1.5$$

$$\alpha_c = 0.53 \text{ si } H_m/L_m \geq 2.0$$

#### I. Deflexiones

La rigidez y deformación de un elemento estructural, están intrínsecamente ligadas, al ser una inversamente proporcional de la otra. Un elemento es más rígido si su capacidad de deformación es pequeña, y lógicamente si su capacidad de deformación va en aumento, su rigidez disminuye.

El módulo de elasticidad del material del elemento, su configuración geométrica y las restricciones en sus apoyos, son las variables que influyen en el cálculo de las deflexiones de los elementos estructurales.

La deflexión dominante en muros de corte es la producida por flexión, que puede calcularse con la siguiente expresión para muros considerados en voladizo:

$$\Delta f = (P h w^3) / (3 E_c I_g)$$

Para considerar el efecto producido por la sección agrietada del concreto, es común sustituir el momento de inercia grueso  $I_g$ , por el momento de inercia efectivo  $I_e = (M_{cr} / M_a)^3 I_g + (1 - (M_{cr} / M_a)^3) I_{cr}$  en donde el momento en que el concreto empieza a figurarse o “cracking moment” es  $M_{cr} = f_r I_g / Y_t$ .

Se ha encontrado que  $I_g \geq I_e \geq I_{cr}$ , cuando  $1 > (M_{cr}/M_a) > 0$ . Para vigas y columnas de proporciones normales,  $0.5 < I_e / I_g < 0.7$

La deformación por corte para un muro en voladizo está definida por  $\Delta v = (f P h w) / (G A_w)$ . El área efectiva a corte de un muro, es el área únicamente del alma del muro sin tomar en cuenta el sobreancho que pudieran tener los elementos de borde o la intersección con otros muros perpendiculares.

De ensayos realizados, se ha determinado que en elementos con grietas diagonales debido a fuerzas cortantes, se producen deflexiones mayores que las estimadas por la ecuación arriba indicada, cuando esto ocurre es el refuerzo del alma el que contribuye a la rigidez del muro. Se ha determinado que en secciones agrietadas diagonalmente, la resistencia al corte es del 10 al 30% que las secciones sin agrietar.

La deformación a corte en un muro es difícil de determinar, debido a que las fuerzas cortantes van en aumento del tope hacia la base del muro, y es en la base del muro en donde ocurren las mayores demandas por momento flexionante, y en consecuencia un agrietamiento inicial por flexión que influye en la resistencia a corte del muro. Tomando esto en consideración, estudios realizados sugieren tomar como  $G = 0.4 E_c$ ,  $f = 1.2$  y únicamente el 30% del área efectiva a corte del alma del muro, por lo que  $\Delta v = (10 P h w) / (E_c A_w)$ .

Otra deformación a considerar es la deformación por anclaje del muro. El modelo analítico para muros los considera empotrados en su base, lo que bajo cargas laterales produce grandes esfuerzos de tensión en las barras de refuerzo. La tensión en las barras es transmitida a la cimentación del muro, y es la elongación de las barras la que genera un efecto de extracción de las mismas. Esta deformación es del orden del 20% la deformación por flexión.

Las cimentaciones no proporcionan un empotramiento perfecto a la estructura que sostienen por dos razones fundamentales: el suelo no resiste esfuerzos de tensión, y al existir un momento de volteo en la cimentación que produce diferentes presiones en el suelo y al ser este último un medio compresible pueden existir rotaciones en la base del muro.

En el caso de muros con aberturas se deberá de subdividir el muro para el cálculo de las rigideces individuales, para posteriormente combinarlas en paralelo o en serie, dependiendo de la configuración de las aberturas.

## V. MODELOS DE ANÁLISIS Y DISEÑOS PARA MUROS

### A. Análisis como columna ancha

Con este método el muro es analizado como si fuera una columna, que debe resistir todas las demandas por cargas gravitacionales y momentos flexionantes, bajo un diagrama de interacción de flexo-compresión.

El momento flexionante es integrado a partir de la carga lateral que debe soportar el muro en estudio.

Para la elaboración del diagrama de interacción, debe tomarse en cuenta todo el refuerzo del alma y elementos de borde del muro, así como las alas o patines en los extremos del muro o el ancho tributario efectivo de las intersecciones con otros muros si existieran.

Existen dos limitantes para la utilización de este método, la primera que el muro debe ser sólido sin ninguna abertura; y la segunda que la teoría de análisis de flexión establece que una sección plana antes de la aplicación de las cargas permanece plana al someterla a carga, lo que significa que las deformaciones unitarias en la sección por encima y por debajo del eje neutro son proporcionales a la distancia desde este eje, por lo que la distribución de esfuerzos de flexión depende de la deformación unitaria en ese punto. Esta premisa no se cumple cuando el elemento tiene dimensiones grandes como el caso de muros y vigas de gran peralte.

### B. Análisis por modelo puntal-tensor. (Strut and Tie)

Los modelos puntal-tensor constituyen una representación simplificada del flujo interno de fuerzas de un elemento que no puede analizarse con los métodos convencionales de flexión, corte y compresión, o cualquier combinación de ellos. El

ACI permite la utilización de cualquier método que satisfaga el equilibrio y los requisitos de resistencia como alternativa para el análisis de estructuras con geometría irregular, tales como mensulas, muros con aberturas, vigas de gran peralte, dinteles, nudos y otros.

Los aspectos básicos del modelo puntal-tensor son los puntales a compresión, tensores, las uniones o nudos y la zona nodal.

Típicamente los puntales a compresión son elementos de concreto prismáticos o en forma de botella. Los tensores son varillas de acero de refuerzo corrugado o refuerzo de preesfuerzo más una porción de concreto concéntrico a la varilla, que se asume no resiste ninguna porción de la tensión, pero sí reduce la elongación del tensor, en particular bajo cargas de servicio.

Los nudos son las intersecciones de los ejes de los puntales y los tensores. Para mantener el equilibrio, al menos tres fuerzas deben actuar en cada nodo del modelo.

La zona nodal es el volumen de concreto que transferirá las fuerzas de puntales y tensores hacia el nodo.

### C. Análisis con elementos finitos.

Un análisis con elementos finitos consiste en subdividir la estructura en elementos pequeños o elementos finitos. Estos elementos son numerados juntamente con sus nodos que se interconectan unos con otros, calculándose la rigidez de cada nodo dependiendo de los grados de libertad que se requiera utilizar. Posteriormente se ensambla la matriz de rigidez para toda la estructura con todos los elementos utilizados. Una vez realizado el ensamble de la matriz de rigidez, es posible calcular las fuerzas en cada nodo de cada elemento finito producidas por la aplicación de alguna fuerza en cualquier punto de la estructura.

Con el análisis por elementos finitos es posible conocer cómo interactúan y distribuyen las fuerzas internas en toda la extensión de la estructura bajo estudio. Un análisis de este tipo es aplicable a cualquier estructura, sin importar su geometría o irregularidades. La desventaja de un análisis con elementos finitos es que su elaboración a mano resulta tediosa, por lo que se requieren técnicas matriciales y/o un software para su resolución.

## VI EJEMPLOS

A continuación se analizarán varios muros de corte, variando el tamaño y el número de las aberturas que existen en ellos, se utilizarán cualquiera de los tres métodos de análisis descritos en el capítulo anterior, con lo que se compararán entre sí los resultados obtenidos en cuanto a distribución de esfuerzos, deformaciones y degradación de la rigidez en el muro.

El muro a analizar tendrá una relación  $H/L = 1.50$ , con una altura  $H = 3.6$  m. y un largo  $L = 2.40$  m. Se ha considerado una fuerza lateral de 1000 kg en la parte superior del muro, que se mantendrá constante para todos los casos, para poder comparar los efectos provocados por la variación de las aberturas. No se tomará en cuenta el peso propio del muro ni otra carga gravitacional, ya que éstas producen un efecto favorable contra el volteo producido por carga lateral en los muros.

En los análisis se asumió que la carga lateral actúa en la parte superior del muro, y la parte inferior del mismo esta apoyada en toda su extensión. Además de ello, el módulo de elasticidad del concreto  $E_c = 253,200$  kg/cm<sup>2</sup>, Relación de poisson = 0.2, espesor del muro = 25 cm. El muro no tendrá elementos de borde con sobrecancho, es decir que también tendrán 25 cm de espesor.

Se trabajará con dos tamaños de aberturas, la abertura pequeña tendrá 0.40m. x 0.40 m., y la abertura grande tendrá 0.80 m x 0.80m.

En el cálculo de las fuerzas para los modelos puntal tensor para el cálculo de la armadura equivalente fue utilizado el programa “ETABS Nonlinear Versión 8.4.5”, mientras que para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en los análisis con elementos finitos se utilizo el programa de Análisis Estructural por elementos finitos desarrollado por el Ing. Milton Matus. Las gráficas de esfuerzos fueron elaboradas por medio del programa “Surfer (Surface Mapping System) Versión 6.01”

Debido a la iteración de valores para el cálculo de las curvas que se realiza en el programa “Surfer V 6.01”, es probable que algunas curvas atraviesen las aberturas de los modelos analíticos cuando en realidad no debería suceder, pero esto no representa ninguna variación en los resultados, ya que sólo es una representación gráfica de la distribución de esfuerzos dentro del muro en estudio.

La convención de signos es la siguiente: positivo indica tensión, y negativo indica compresión. En la caso de las reacciones está indicado el sentido en el que actúa la fuerza.

Se asumió como eje “X” el eje paralelo a la base del muro, y el eje “Y” paralelo al eje vertical del muro.

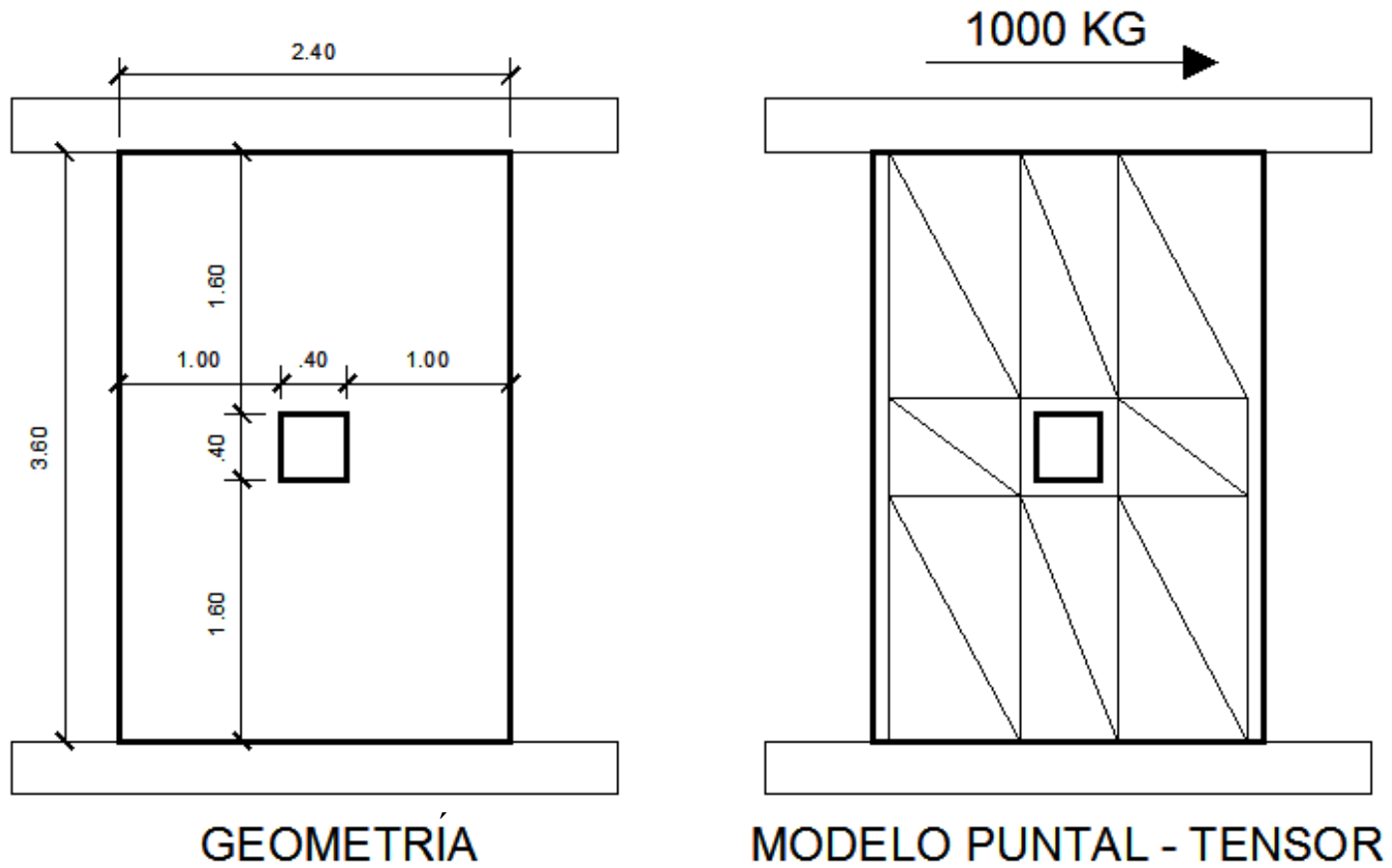
Es necesario recalcar que los resultados que se obtienen con el método puntal-tensor son fuerzas, mientras que los obtenidos con un análisis de elemento finito con esfuerzos, por lo que el diseñador deberá tomar las consideraciones del caso dependiendo del tipo de análisis que utilice.

#### A. CASO No. 1: Muro con una abertura simétrica pequeña

Se utilizará una abertura cuadrada de 0.40 m x 0.40 m. al centro del muro, lo que significa una reducción del 1.85% del área total del muro.

En la figura No. 5 se presentan la geometría y el modelo matemático utilizado para el análisis de puntal tensor; en la figura No. 6 los resultados con el método puntal-tensor; en la figura No. 7 la distribución de esfuerzos en el sentido “X”; en la figura No. 8 la distribución de esfuerzos axiales o en sentido “Y”; y en la figura No. 9 la distribución de esfuerzos cortantes.

FIGURA No.5.  
GEOMETRÍA Y MODELO PUNTAL TENSOR, CASO No. 1.  
UNA ABERTURA SIMÉTRICA 0.40 M. X 0.40 M.



FUERZAS Y REACCIONES OBTENIDAS CON MODELO PUNTAL TENSOR  
BAJO CARGA LATERAL.  
CASO No.1. UNA ABERTURA SIMÉTRICA 0.40 M. X 0.40 M.

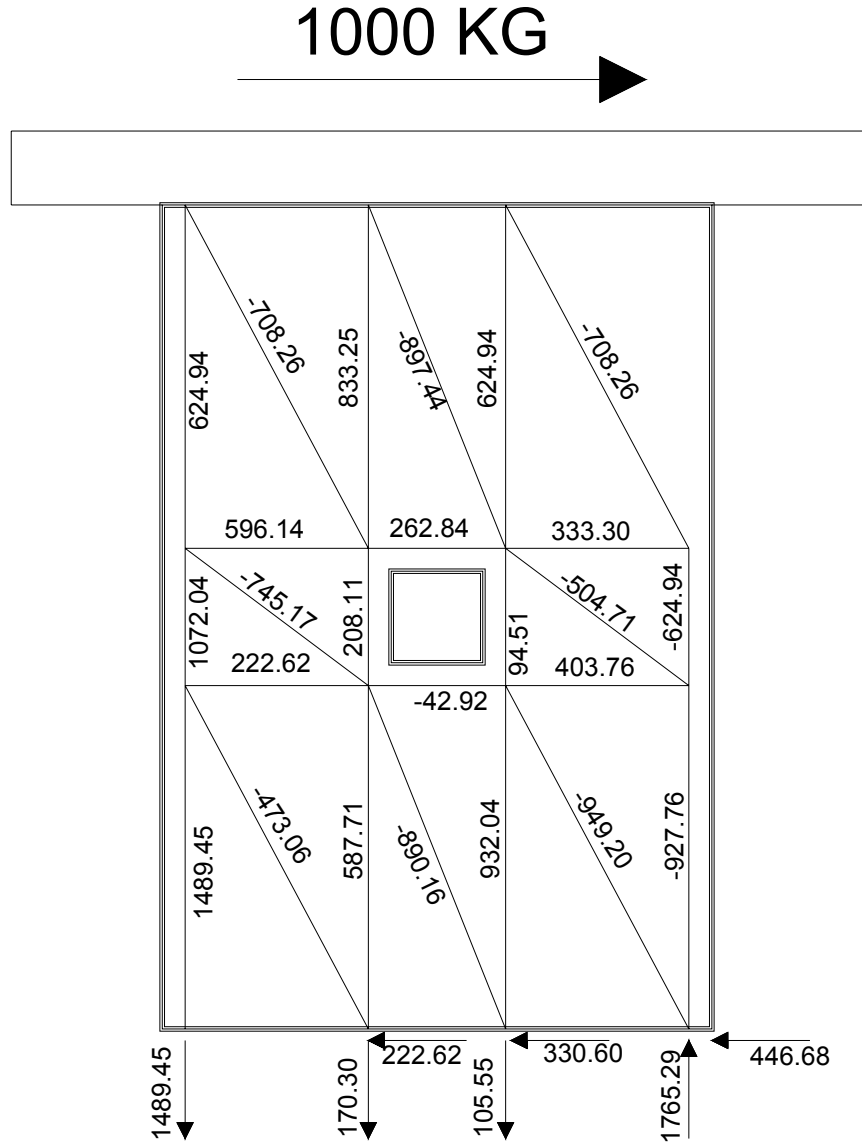


FIGURA No.7.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE X, CASO No.1. ( $\text{kg/cm}^2 \times 10^{-1}$ )  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

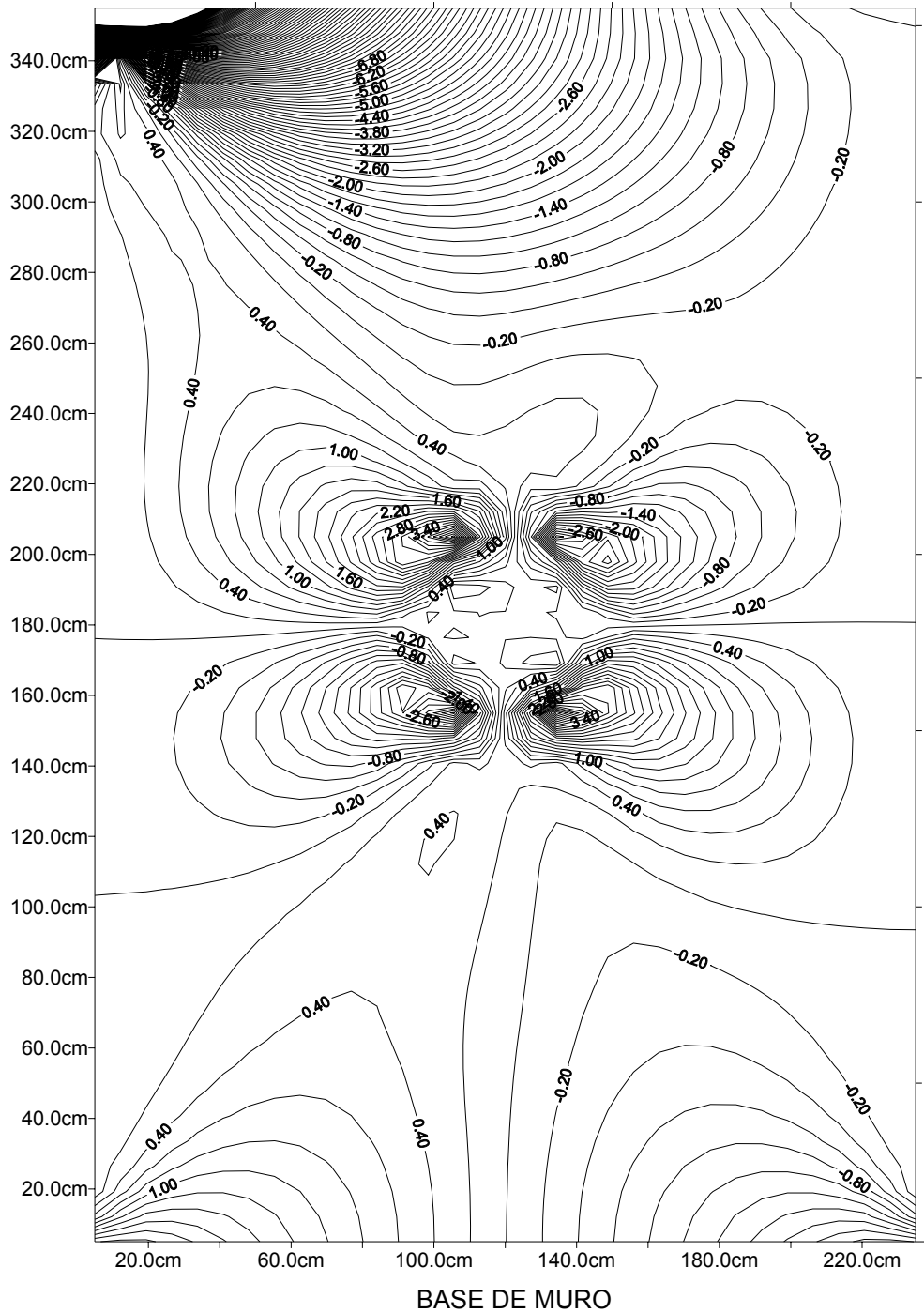


FIGURA No.8.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE Y, CASO No.1 ( $\text{kg/cm}^2 \times 10^{-1}$ )  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

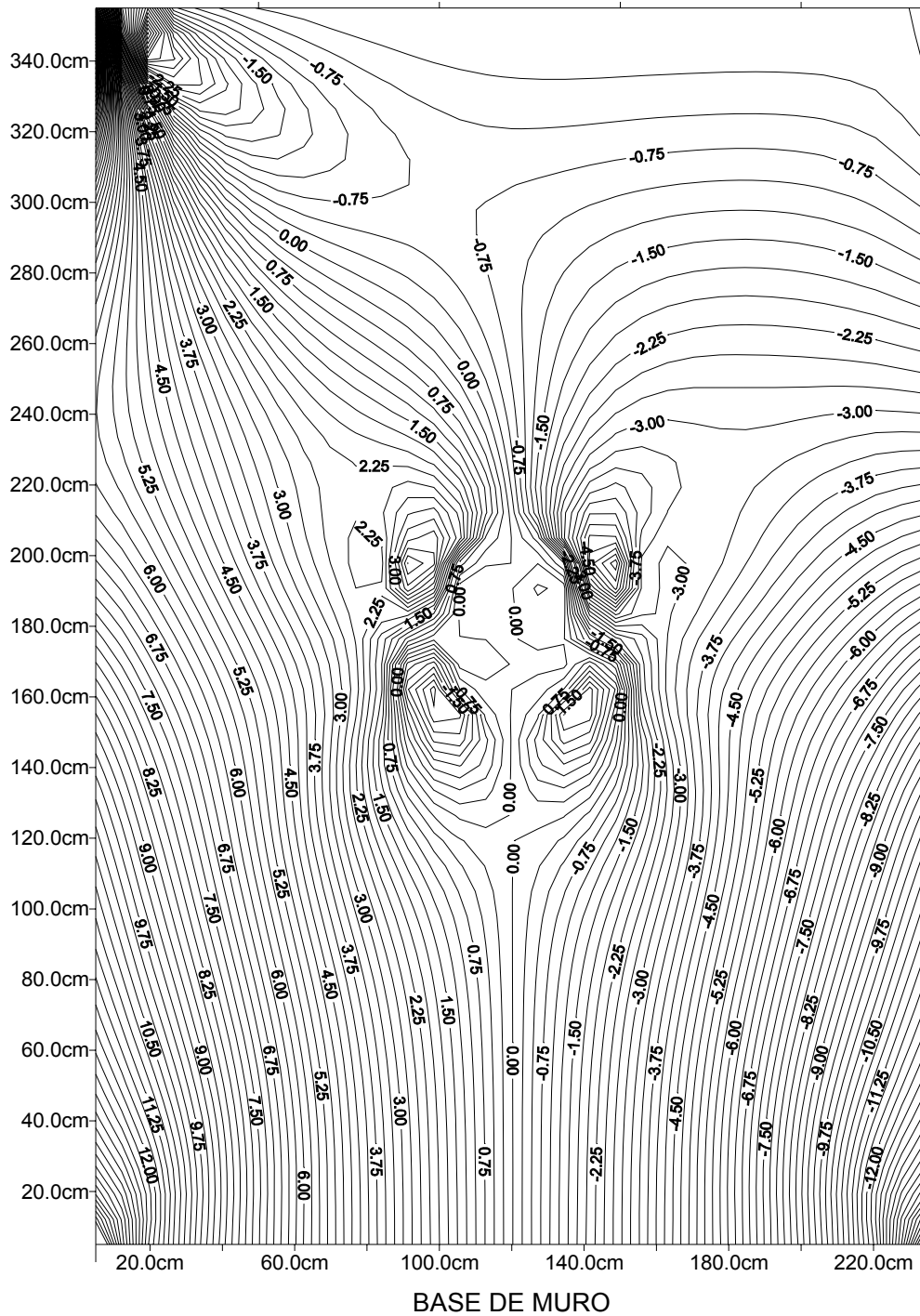
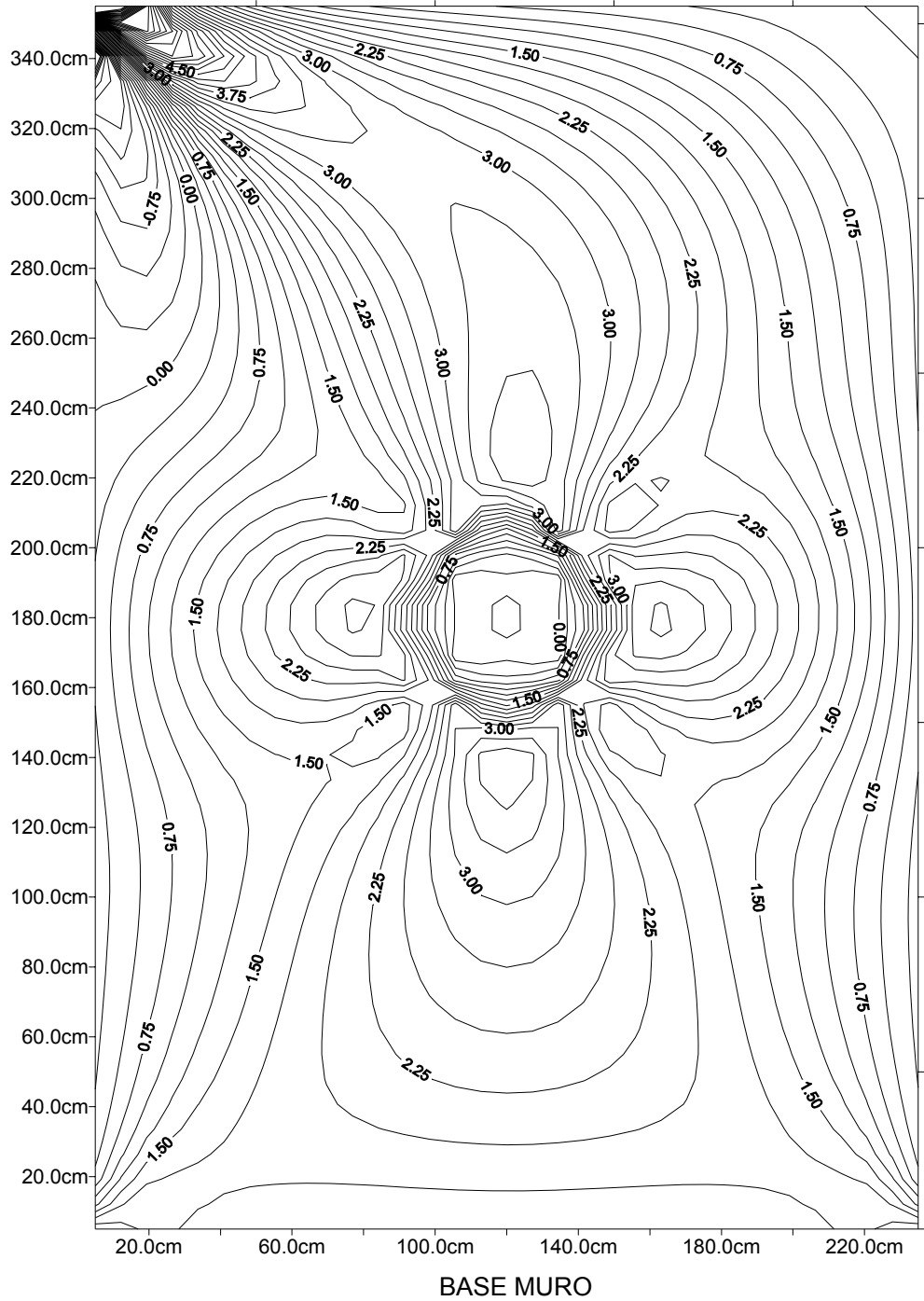


FIGURA No.9.  
ESFUERZOS DE CORTE , CASO No.1 ( $\text{kg/cm}^2 \times 10^{-1}$ )  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.



#### B. CASO No. 2: Muro con una abertura simétrica grande

Al igual que el caso No.1 se utilizará una abertura simétrica en el muro, pero esta abertura será de 0.80 m. x 0.80 m, que representa una reducción del 7.41% en el área del muro.

La geometría y el modelo puntal tensor se muestran en la figura No. 10; las fuerzas del modelo puntal-tensor en la figura No. 11; la distribución de esfuerzos en sentido “X” en la figura No. 12; la distribución de esfuerzos en sentido “Y” en la figura No. 13; y la distribución de esfuerzos cortantes en la figura No. 14.

#### C. CASO No. 3: Muro con dos aberturas simétricas pequeñas

En este caso se modelará el muro con dos aberturas de 0.40 m. x 0.40 m. ubicadas simétricamente. El área del muro es reducida en un 3.70 %.

En la figura No. 15 se incluye la geometría y el modelo puntal-tensor; la figura No. 16 las fuerzas obtenidas del modelo puntal tensor; la figura No. 17 la distribución de esfuerzos paralelos al eje “X”; la figura No. 18 la distribución de esfuerzos paralelos al eje “Y”; y la figura No. 19 los esfuerzos de corte.

#### D. CASO No. 4: Muro con dos aberturas simétricas grandes

Aquí se utilizarán dos aberturas de 0.80 m. x 0.80 m. ubicadas simétricamente y que representan una reducción del 14.81% del área del muro.

En la figura No. 20 está la geometría y el modelo puntal-tensor de este caso; en la figura No. 21 las fuerzas y reacciones del modelo puntal-tensor; en la figura No. 22 la distribución de esfuerzos paralelos al eje “X”; la figura No. 23 indica la distribución de esfuerzos paralelos al eje “Y”; la figura No. 24 muestra la distribución de esfuerzos de corte.

FIGURA No.10.  
GEOMETRÍA Y MODELO PUNTAL TENSOR, CASO No 2.  
UNA ABERTURA SIMÉTRICA 0.80 M. X 0.80 M.

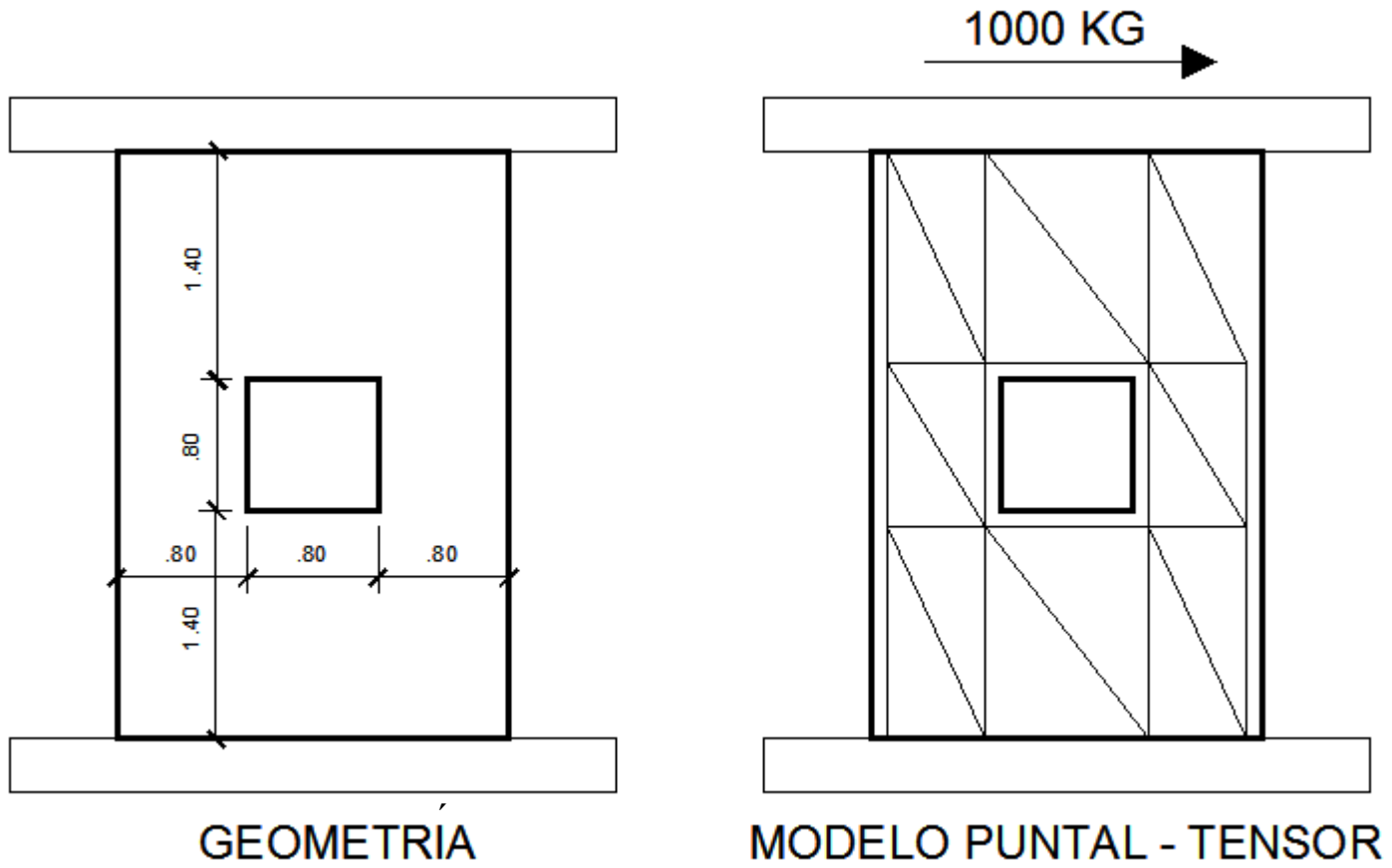


FIGURA No.11.  
 FUERZAS Y REACCIONES OBTENIDAS CON MODELO PUNTAL TENSOR  
 BAJO CARGA LATERAL  
 CASO No. 2 UNA ABERTURA SIMÉTRICA 0.80 M. X 0.80 M.

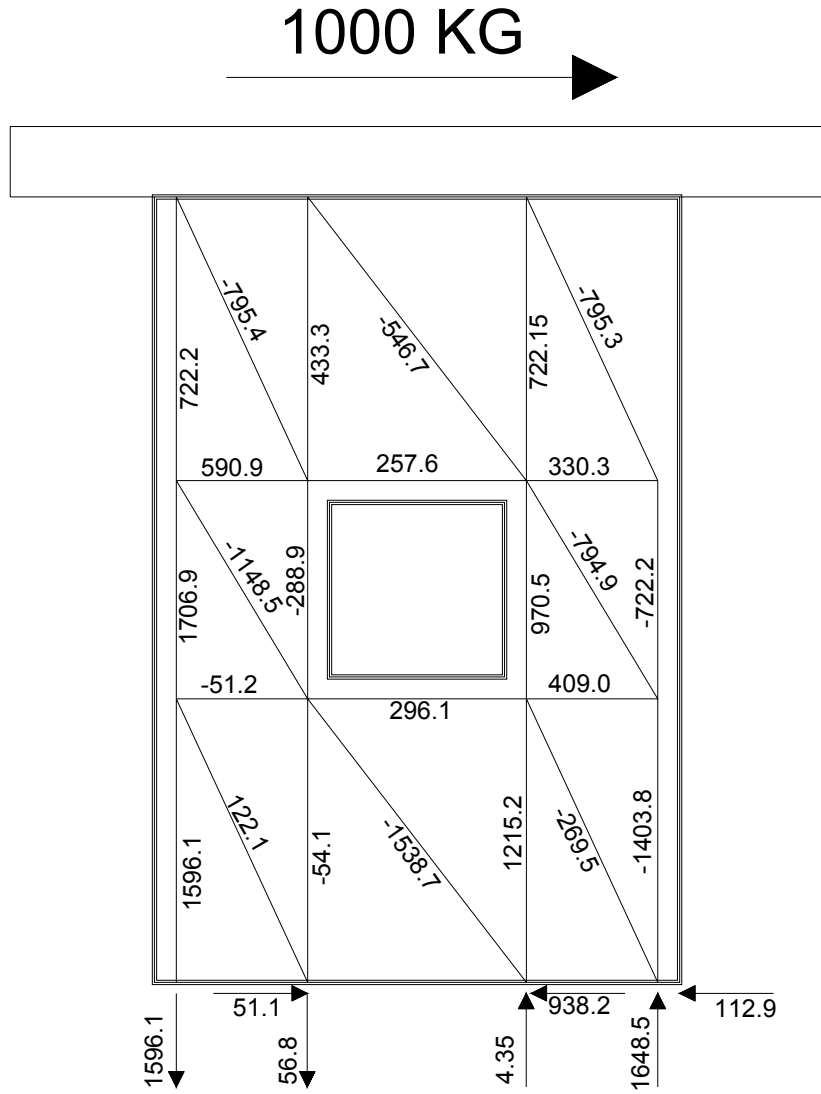


FIGURA No.12.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE X, CASO No.2. ( $\text{kg/cm}^2 \times 10^{-1}$ )  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

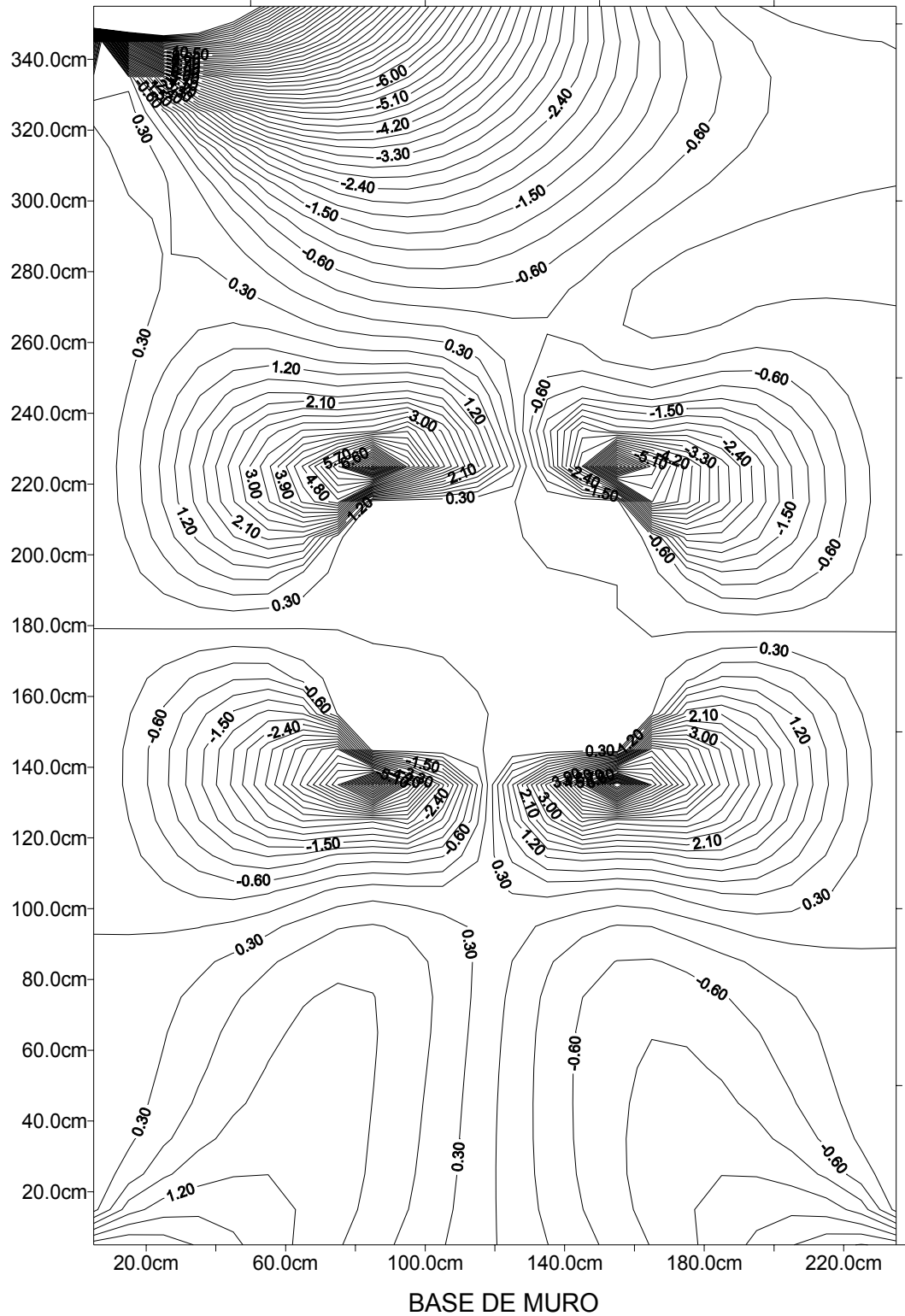


FIGURA No.13.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE Y, CASO No.2. (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

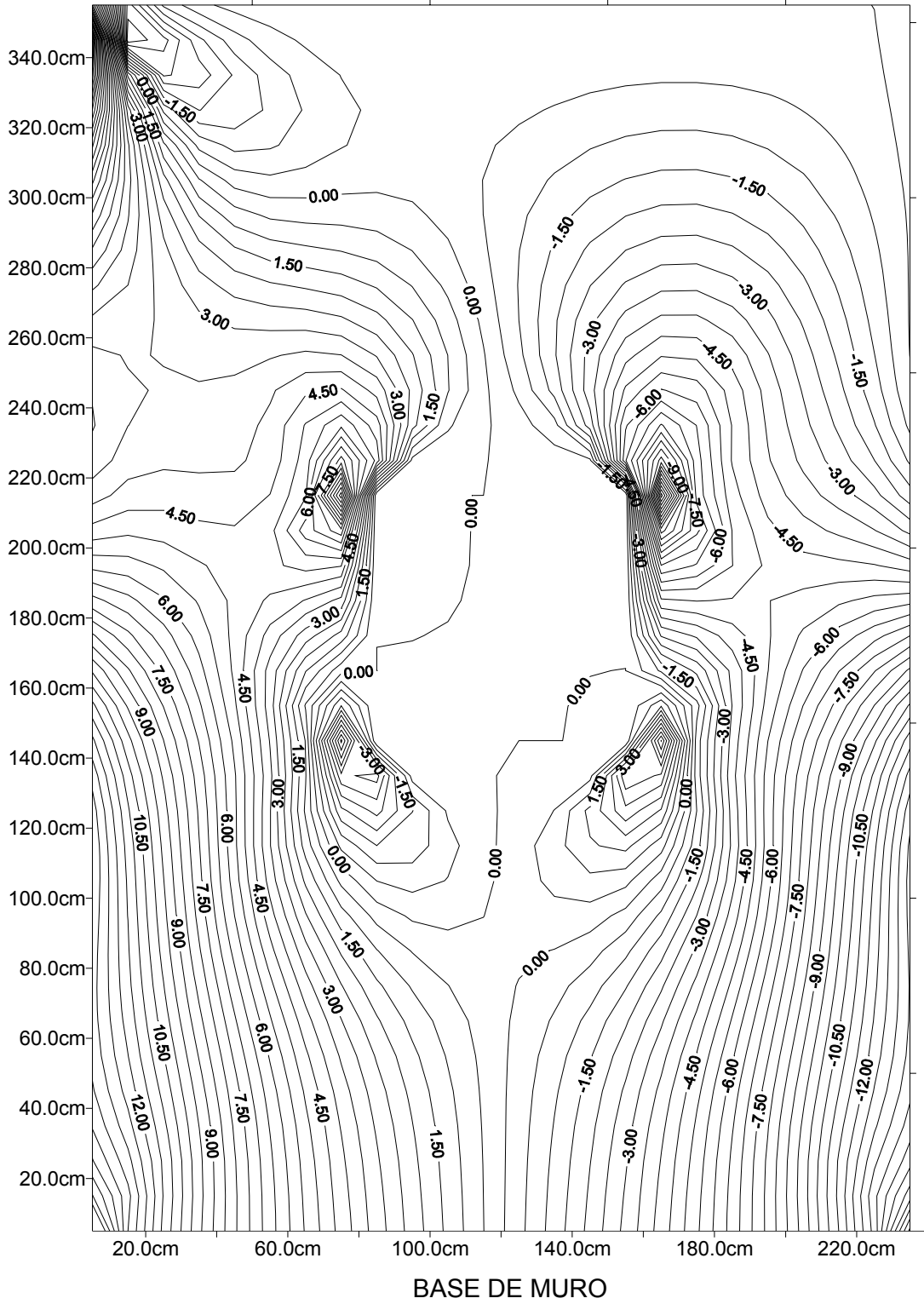


FIGURA No.14  
ESFUERZOS DE CORTE , CASO No.2 ( $\text{kg/cm}^2 \times 10^{-1}$ )  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

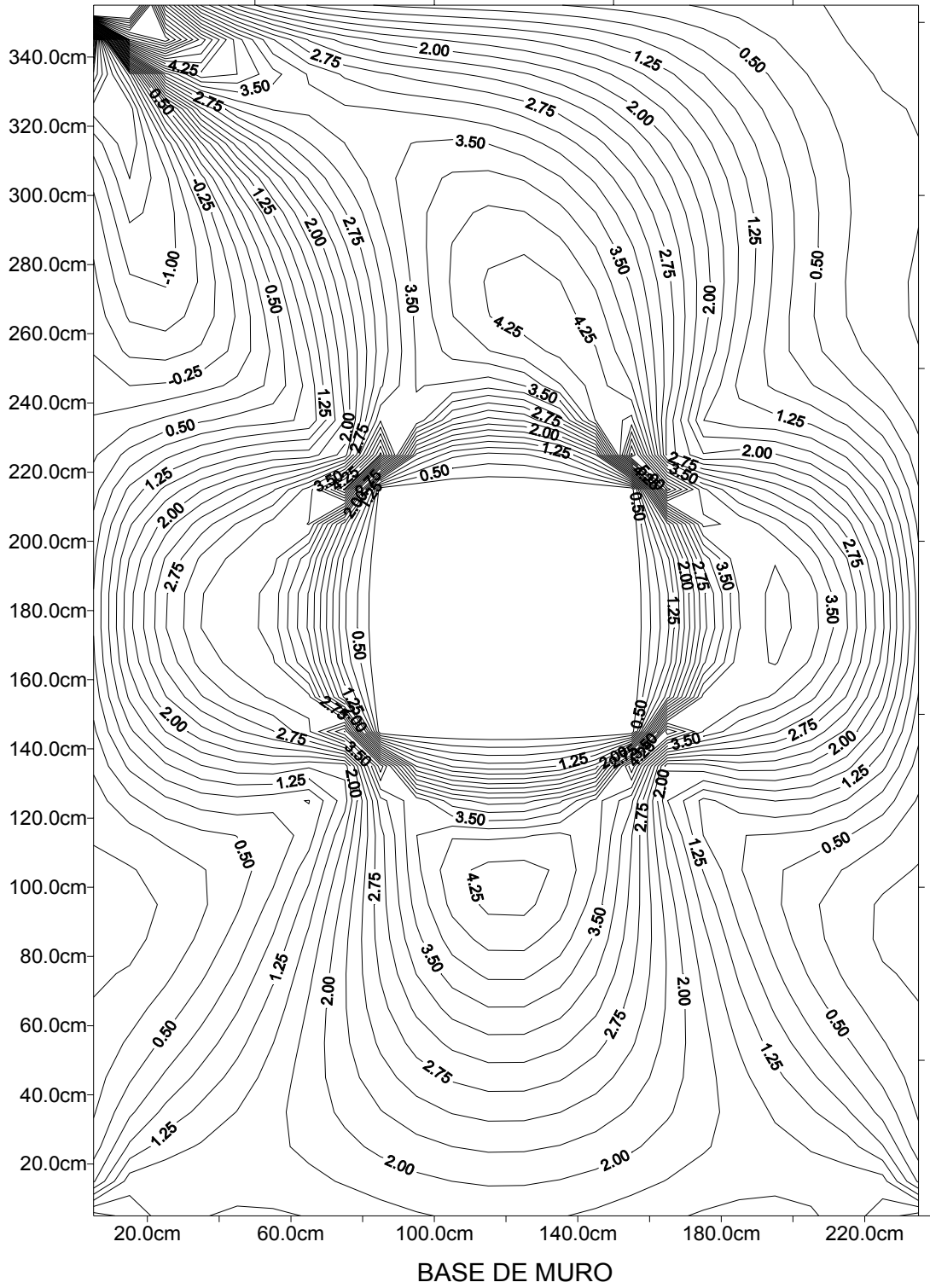


FIGURA No.15.  
GEOMETRÍA Y MODELO PUNTAL TENSOR, CASO No 3.  
DOS ABERTURAS SIMÉTRICAS 0.40 M. X 0.40 M.

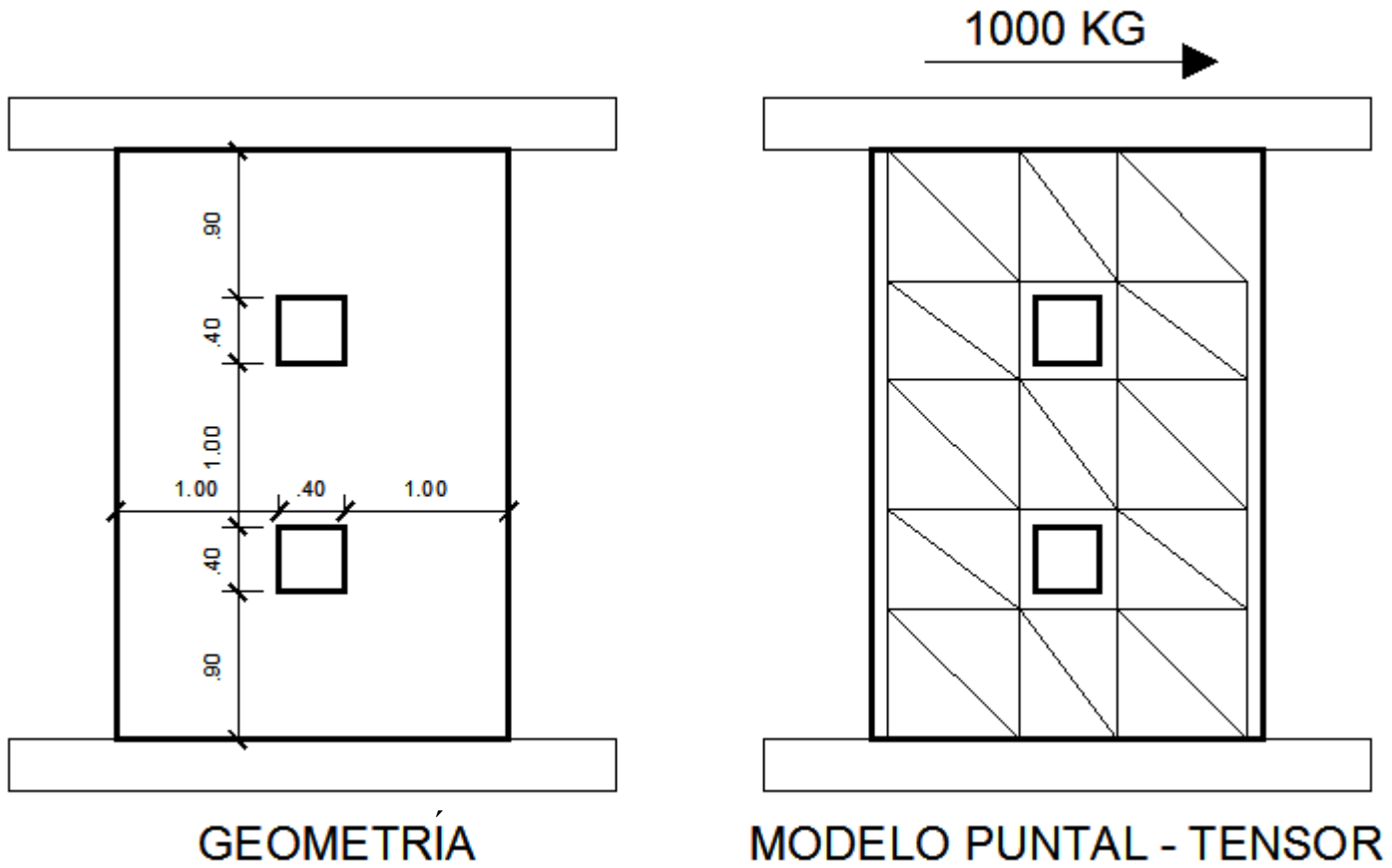


FIGURA No.16.  
 FUERZAS Y REACCIONES OBTENIDAS CON MODELO PUNTAL TENSOR  
 BAJO CARGA LATERAL  
 CASO No. 3 DOS ABERTURAS SIMÉTRICAS 0.40 M. X 0.40 M.

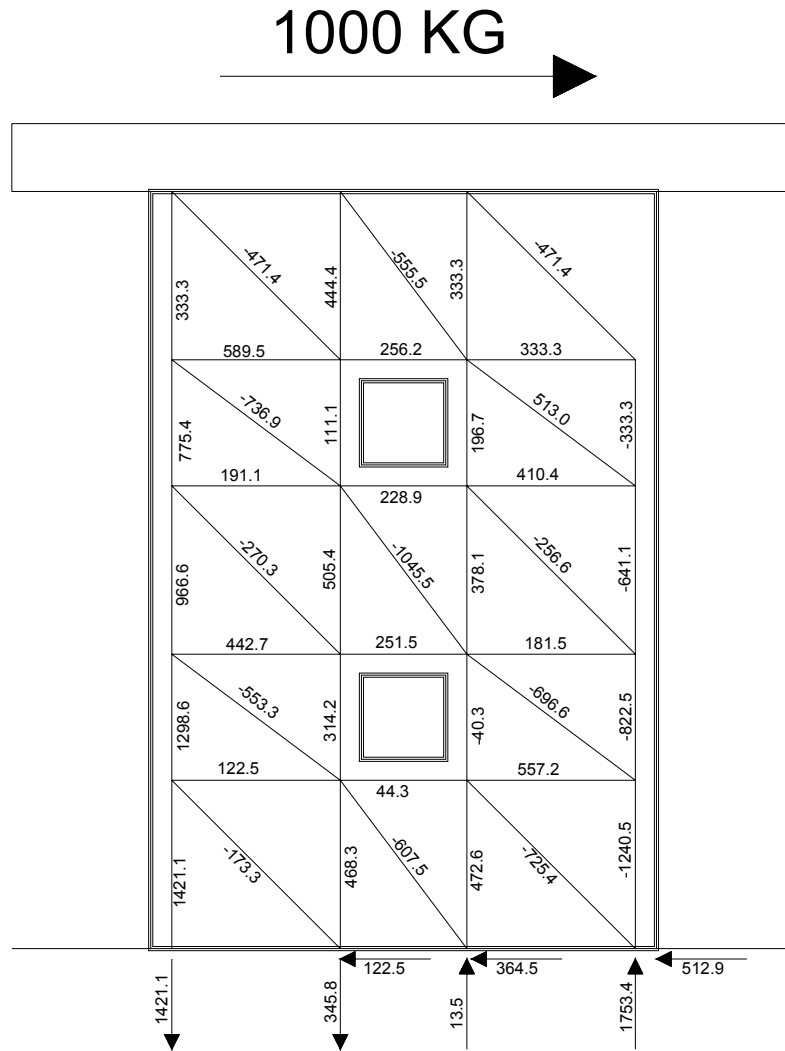


FIGURA No.17.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE X, CASO No.3. (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

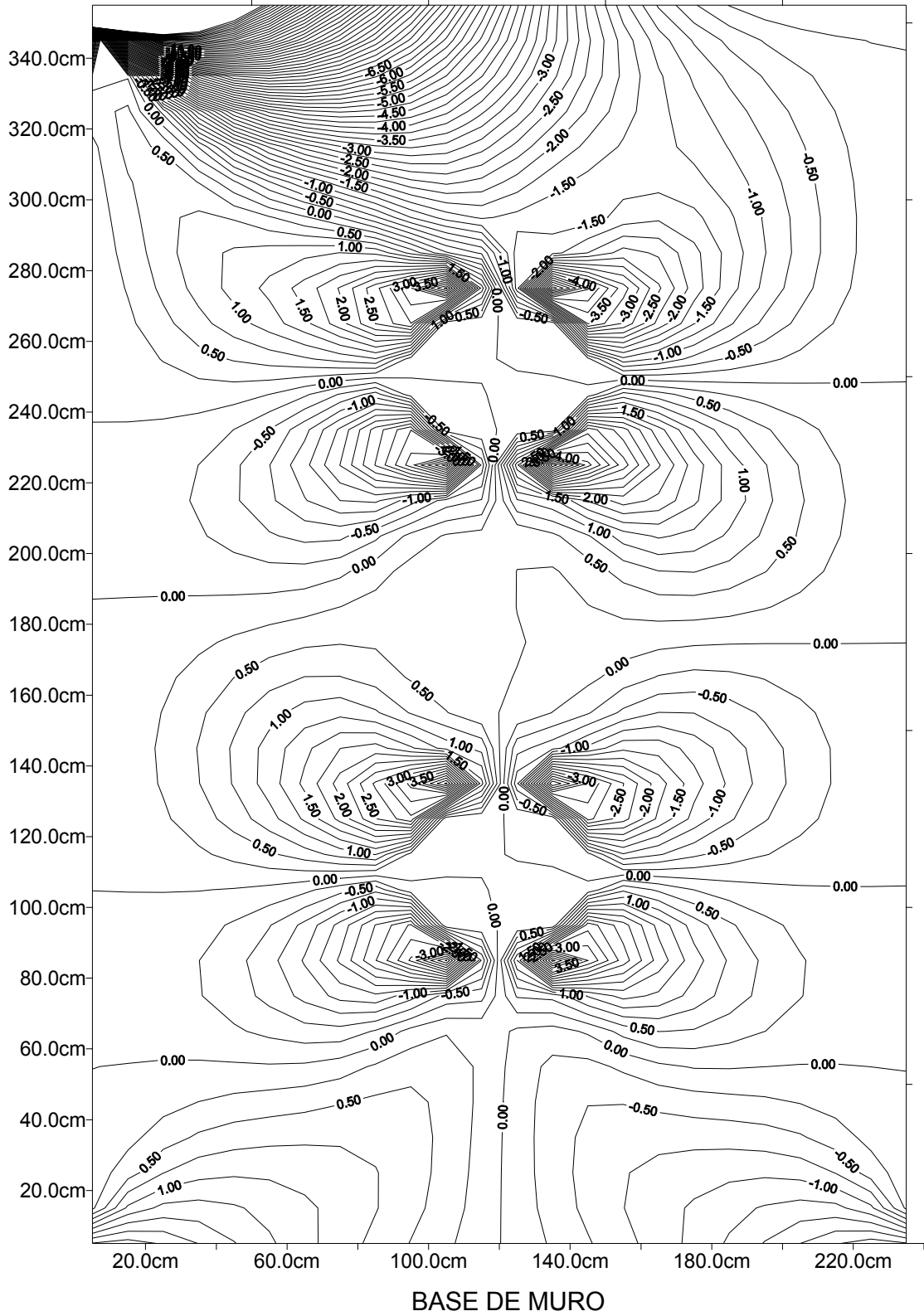


FIGURA No.18.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE Y, CASO No.3. (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

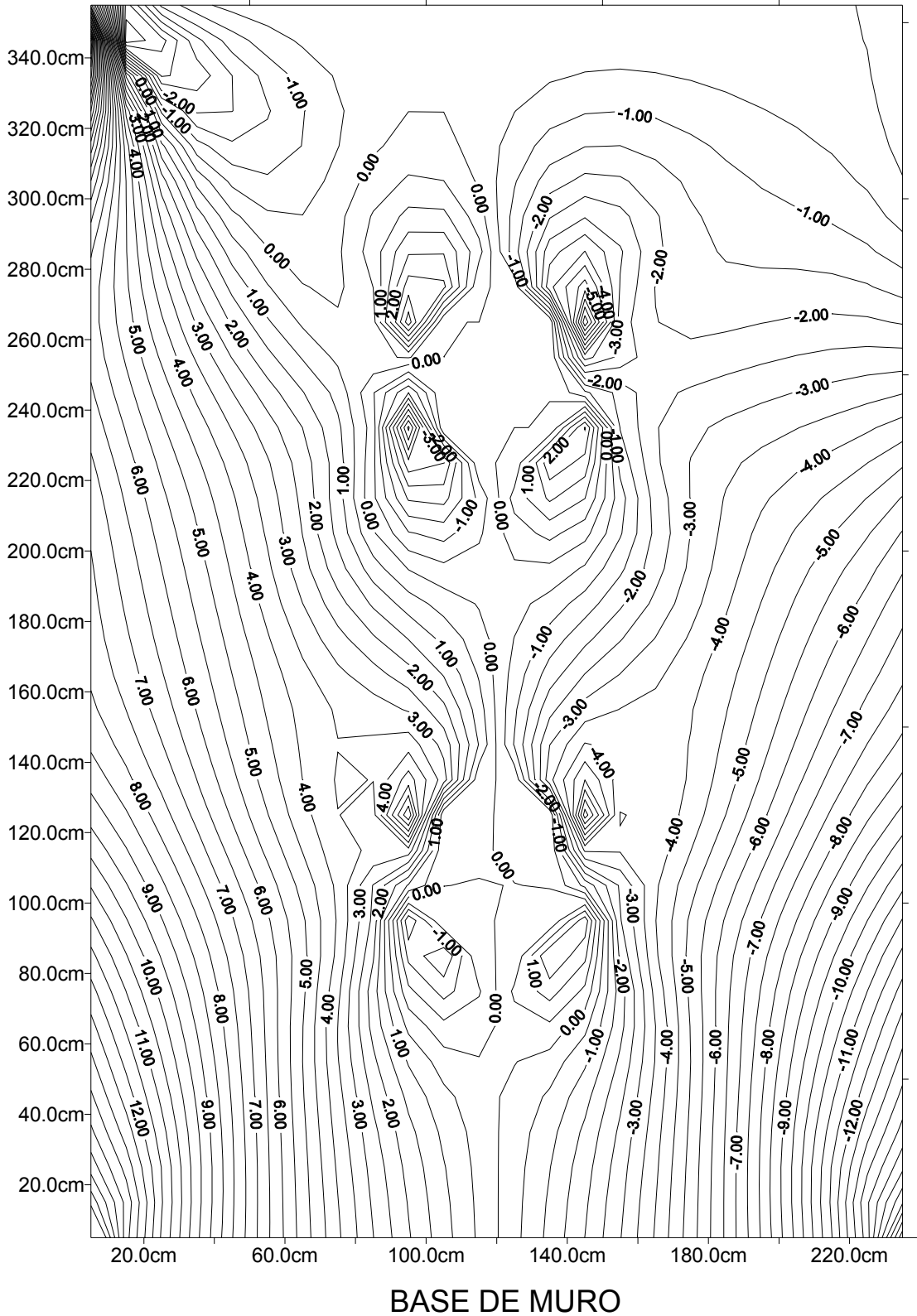


FIGURA No.19.  
ESFUERZOS DE CORTE , CASO No.3 (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

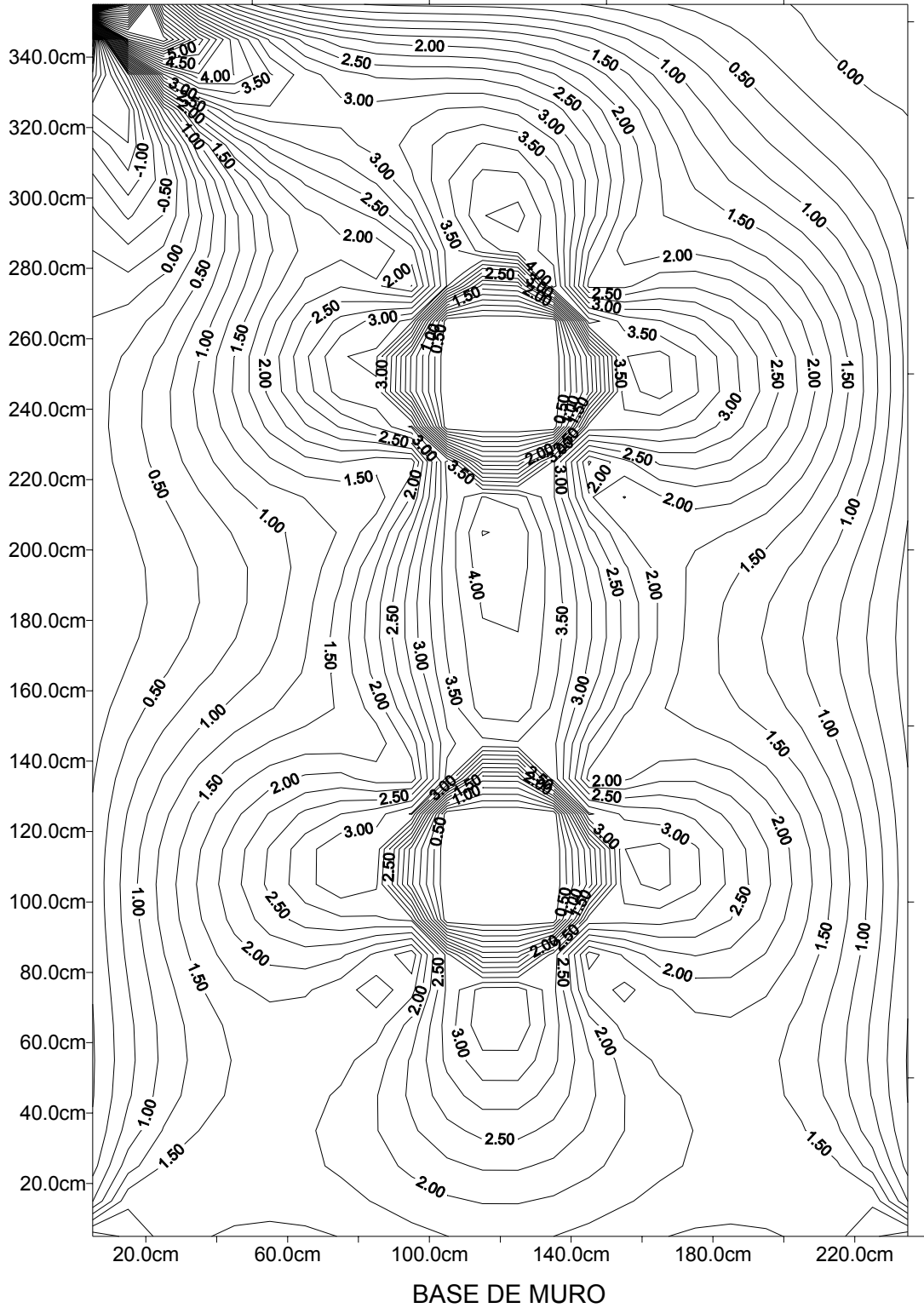


FIGURA No.20.  
GEOMETRÍA Y MODELO PUNTAL TENSOR, EJEMPLO 4.  
DOS ABERTURAS SIMÉTRICAS 0.80 M. X 0.80 M.

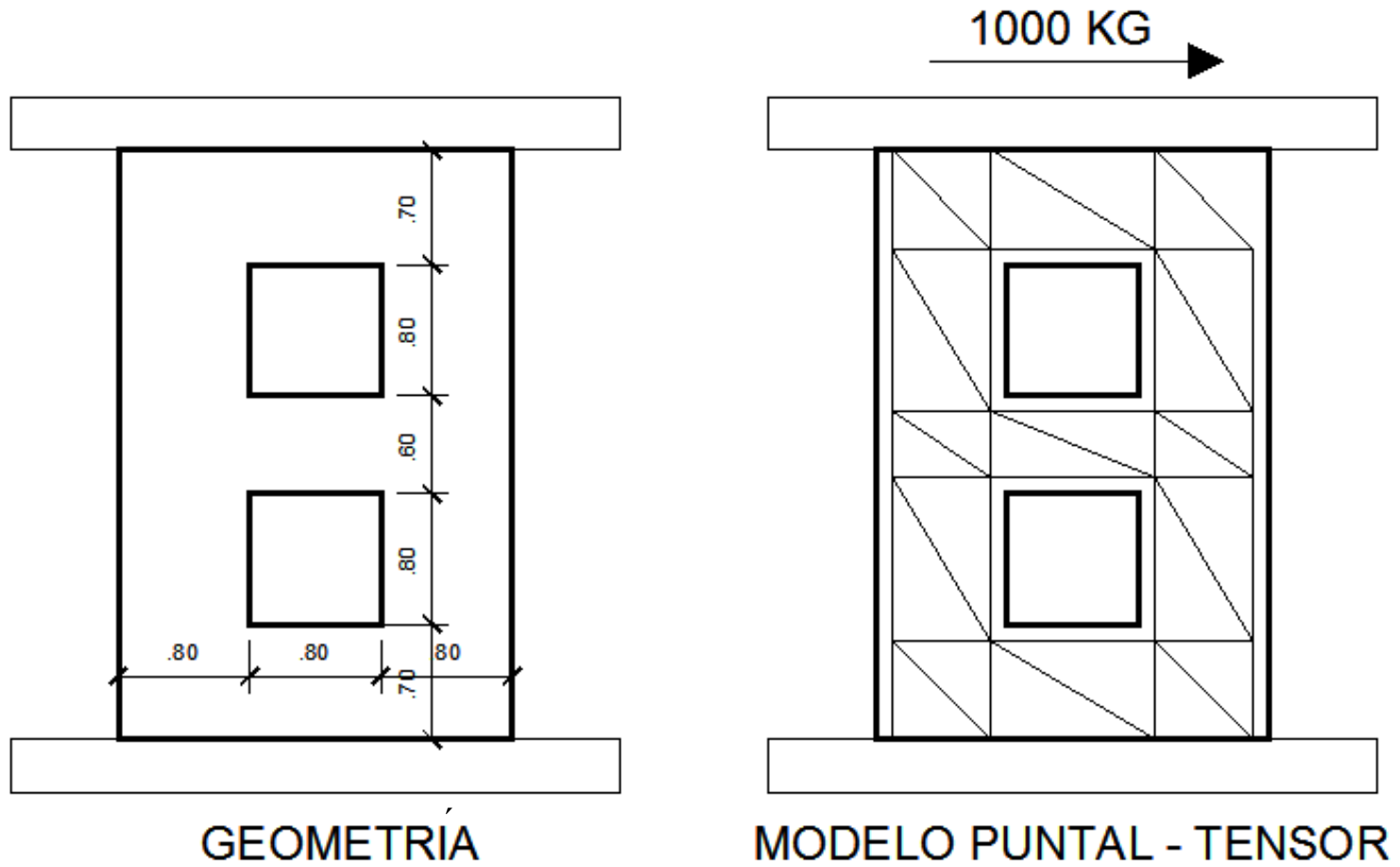


FIGURA No.21.  
 FUERZAS Y REACCIONES OBTENIDAS CON MODELO PUNTAL TENSOR  
 BAJO CARGA LATERAL  
 CASO No. 4 DOS ABERTURAS SIMÉTRICAS 0.80 M. X 0.80 M.

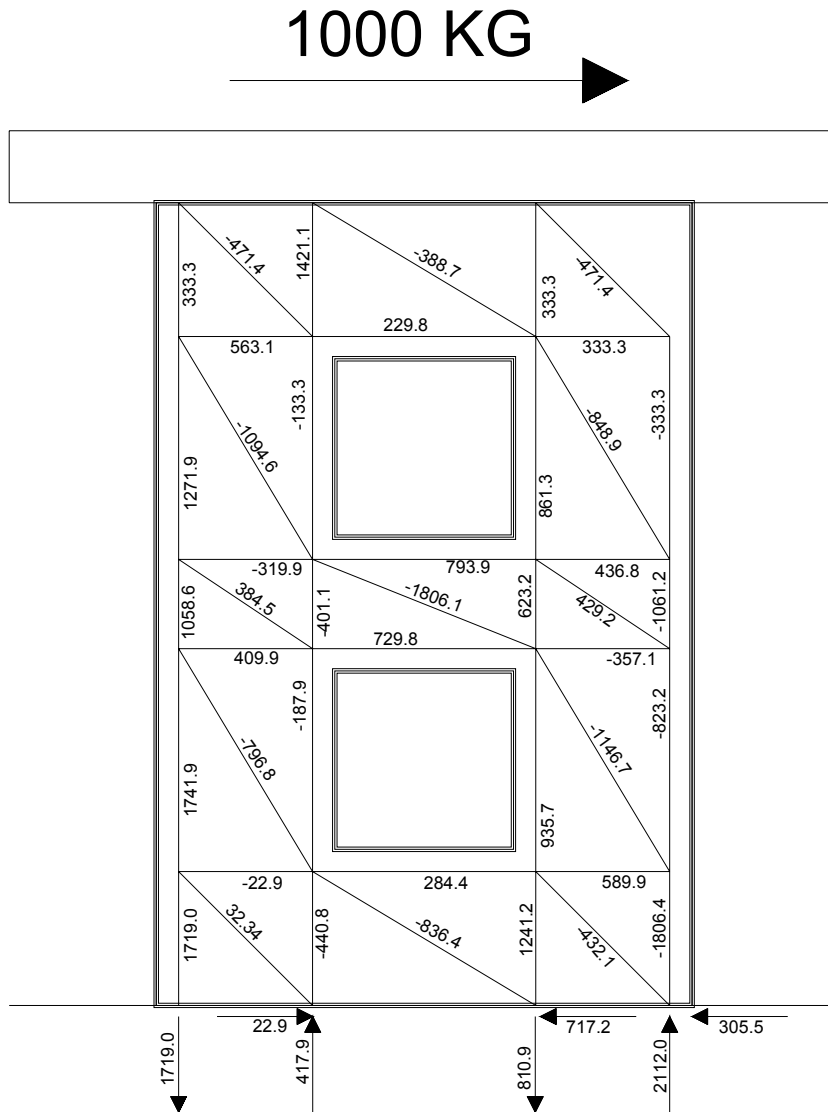


FIGURA No.22.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE X, CASO No.4. (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

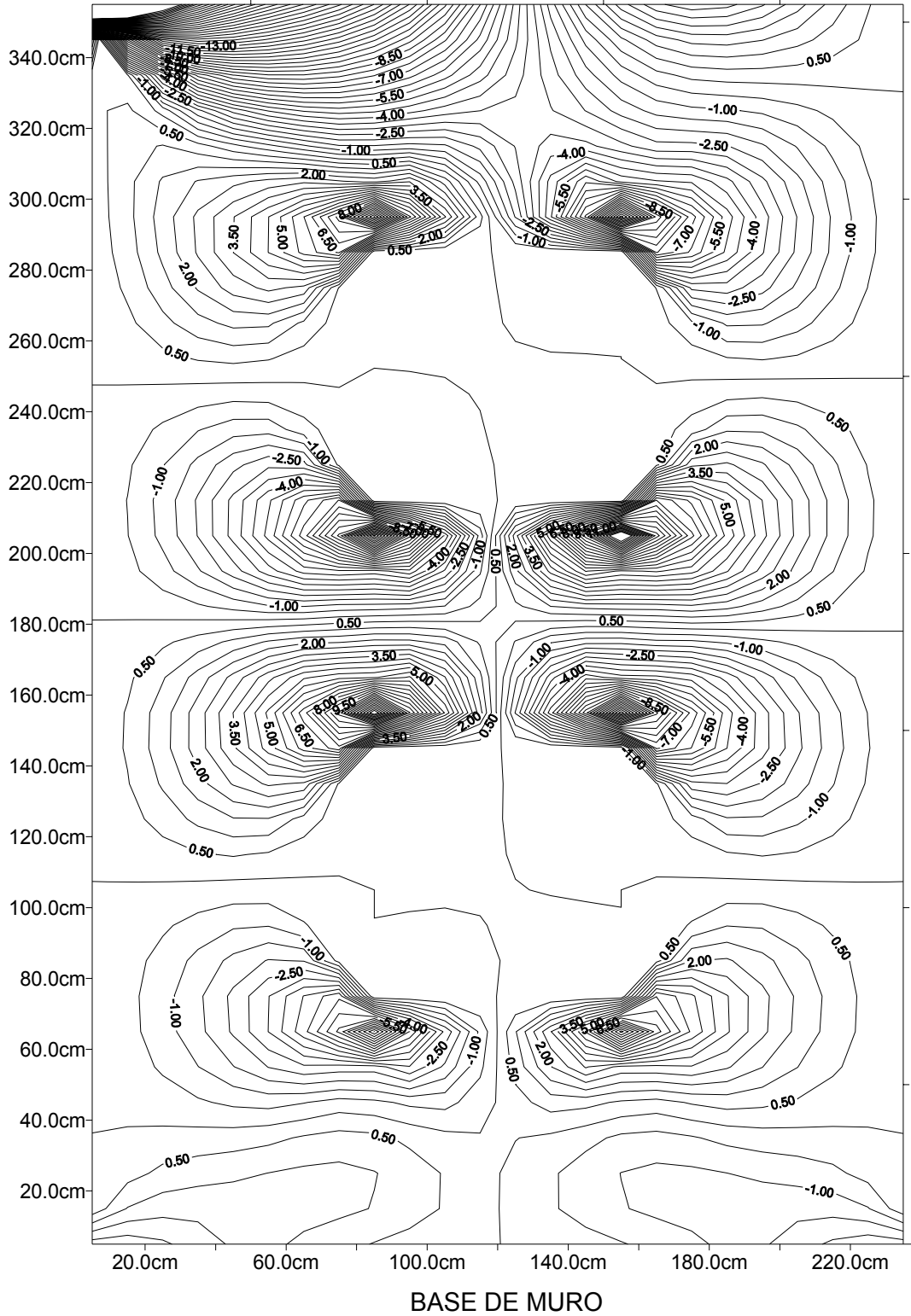


FIGURA No.23.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE Y, CASO No.4. (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

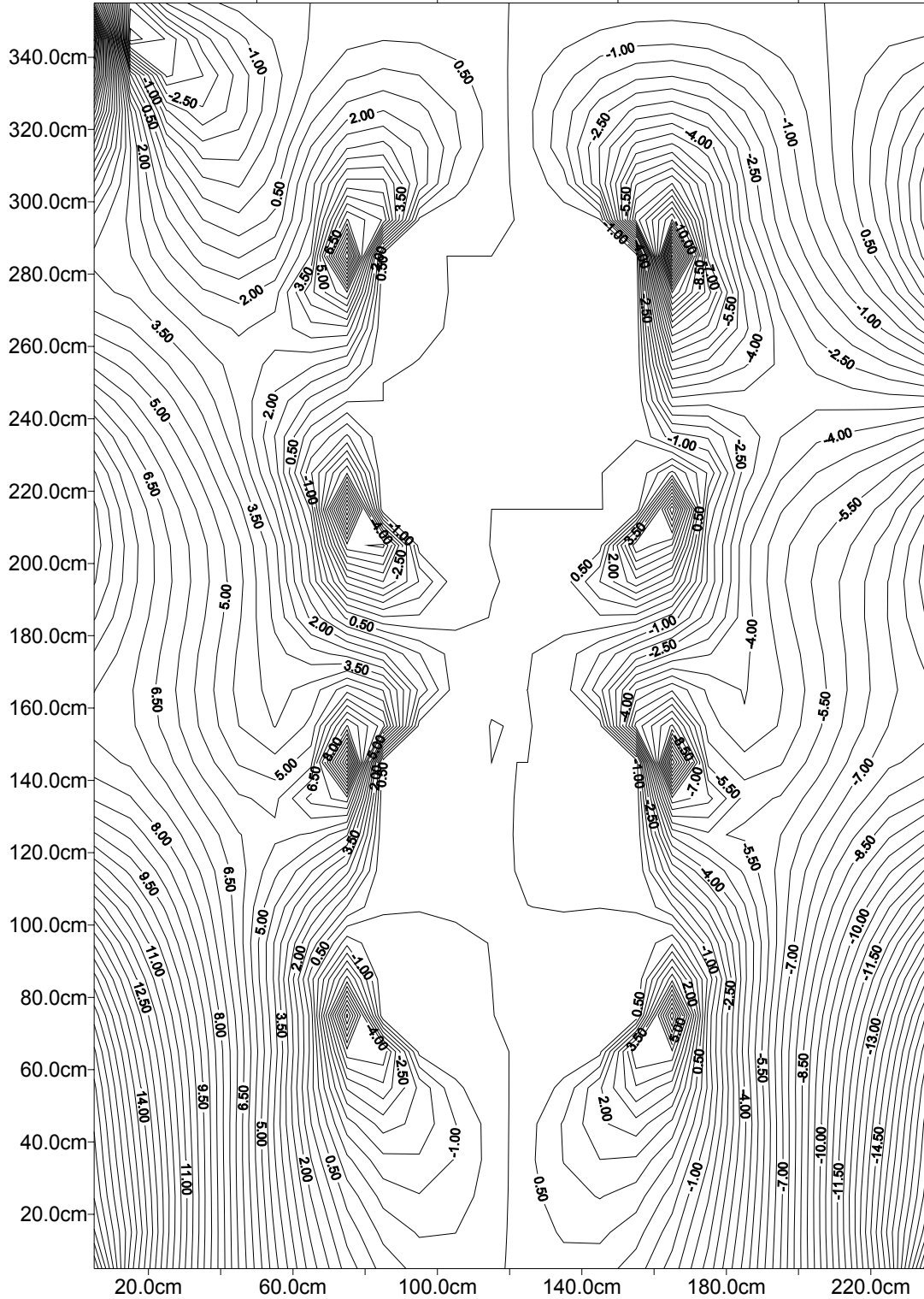
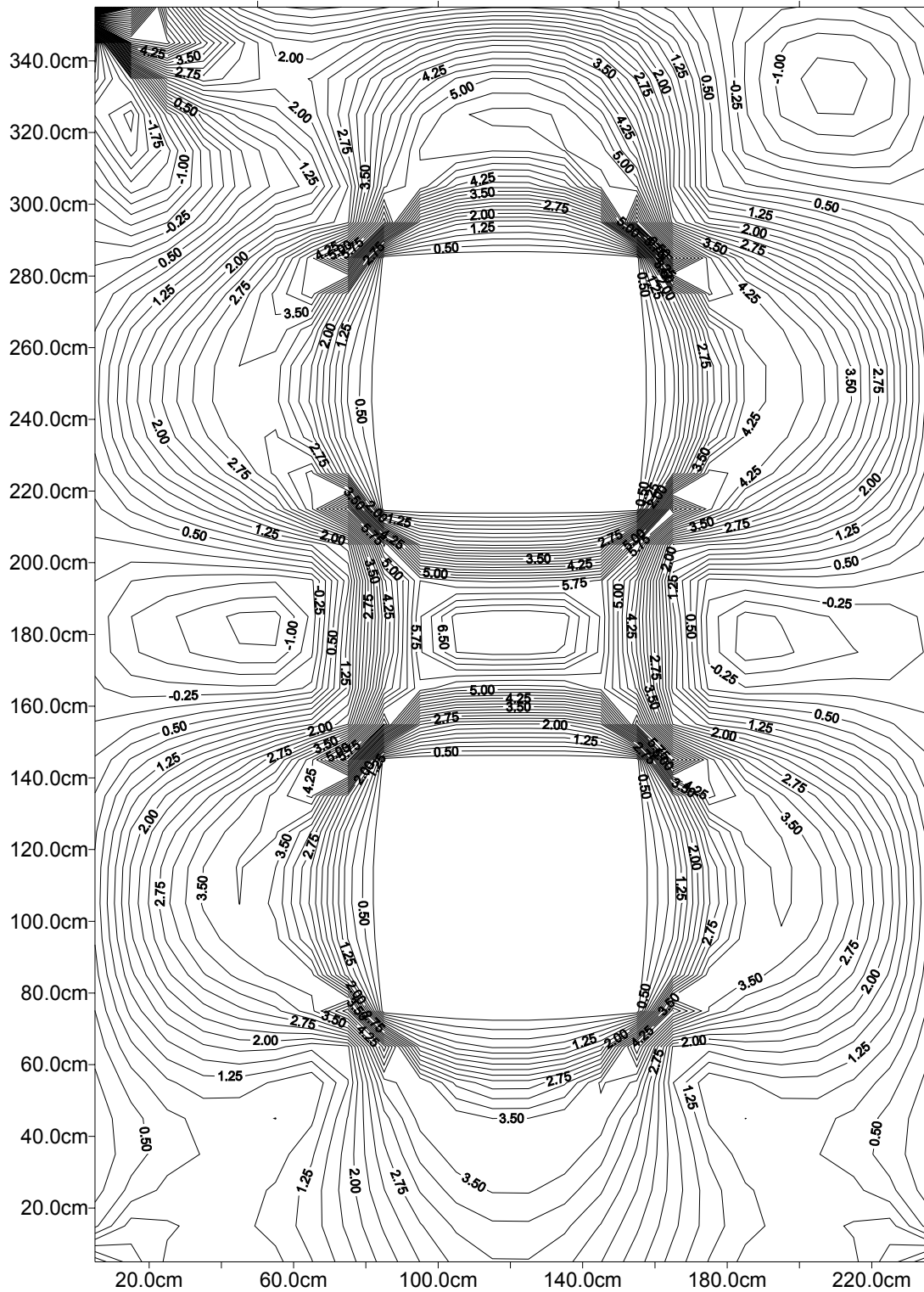


FIGURA No.24.  
ESFUERZOS DE CORTE, CASO No.4 ( $\text{kg/cm}^2 \times 10^{-1}$ )  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.



#### E. CASO No. 5: Muro con tres aberturas simétricas pequeñas

El muro será analizado con tres aberturas de 0.40 m. x 0.40 m. ubicadas al centro. Esto es un 5.56% en reducción del área total del muro.

La geometría y modelo puntal-tensor están indicados en la figura No. 25 y los resultados de las fuerzas de este modelo en la figura No. 26; la distribución de esfuerzos en el eje “X” se grafican en la figura No. 27; la distribución de esfuerzos en el eje “Y” en la figura No. 28; los esfuerzos cortantes se indican en la figura No. 29.

#### F. CASO No. 6: Muro con una abertura asimétrica pequeña

En el muro será incluida una abertura de 0.40 m. x 0.40 m ubicada asimétricamente, y que al igual que en el caso No. 1 el área total del muro es reducida en 1.85%.

La geometría y modelo puntal tensor se muestran en la figura No. 30; las fuerzas del modelo puntal-tensor en la figura No. 31; la distribución de esfuerzos en sentido “X” en la figura No. 32; la distribución de esfuerzos en sentido “Y” en la figura No. 33; y la distribución de esfuerzos cortantes en la figura No. 34.

#### G. CASO No. 7: Muro con una abertura asimétrica grande

En este caso se modelará el muro con una abertura de 0.80 m. x 0.80 m. ubicadas asimétricamente. El área del muro es reducida en un 7.41 % igual que en el caso No.2.

En la figura No. 35 se incluye la geometría y el modelo puntal-tensor; la figura No. 36 las fuerzas obtenidas del modelo puntal tensor; la figura No. 37 la distribución de esfuerzos paralelos al eje “X”; la figura No. 38 la distribución de esfuerzos paralelos al eje “Y”; y la figura No. 39 los esfuerzos de corte.

FIGURA No.25.  
GEOMETRÍA Y MODELO PUNTAL TENSOR, CASO No 5.  
TRES ABERTURAS SIMÉTRICAS 0.40 M. X 0.40 M.

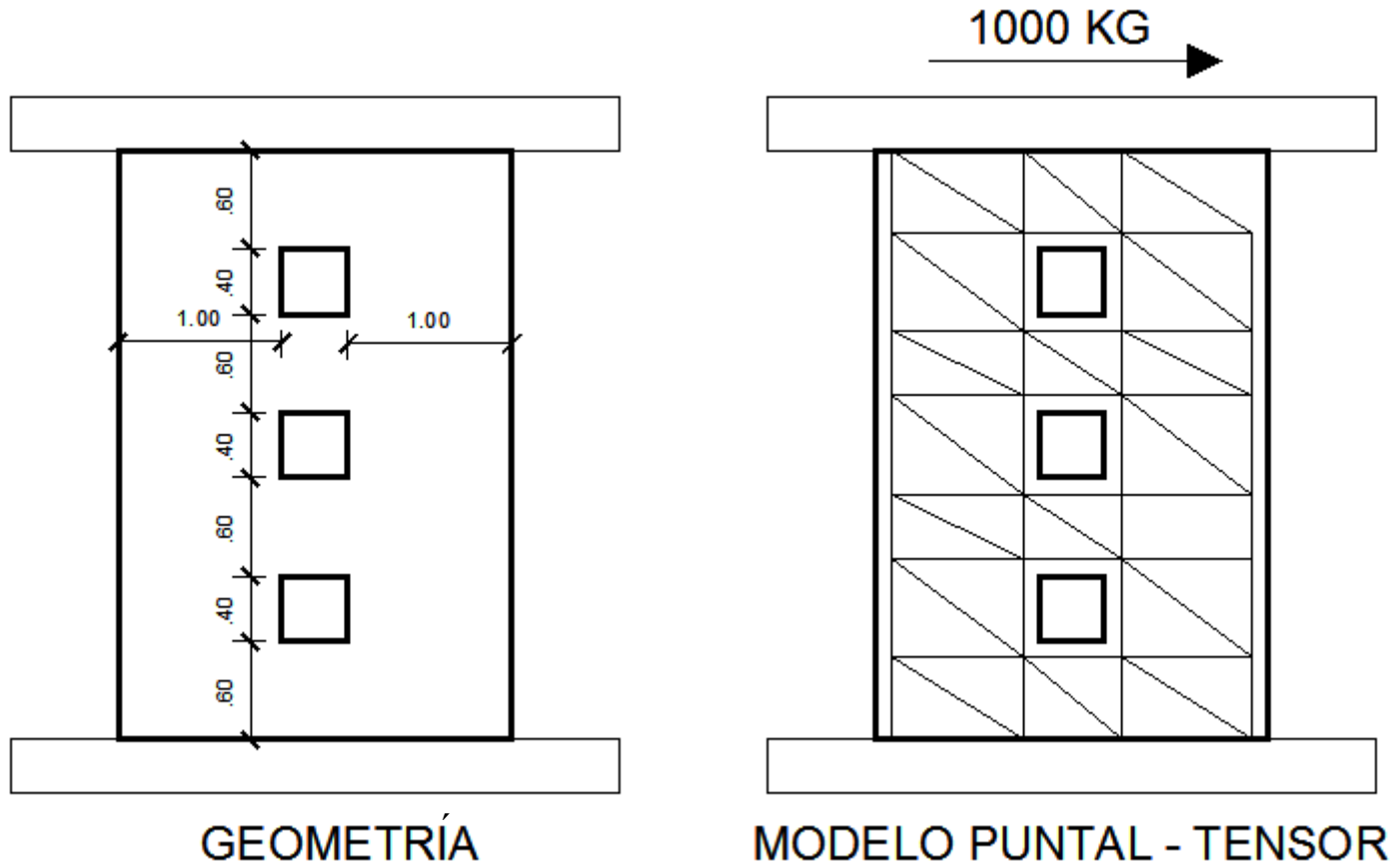


FIGURA No.26.  
 FUERZAS Y REACCIONES OBTENIDAS CON MODELO PUNTAL TENSOR  
 BAJO CARGA LATERAL  
 CASO No. 5 TRES ABERTURAS SIMÉTRICAS 0.40 M. X 0.40 M.

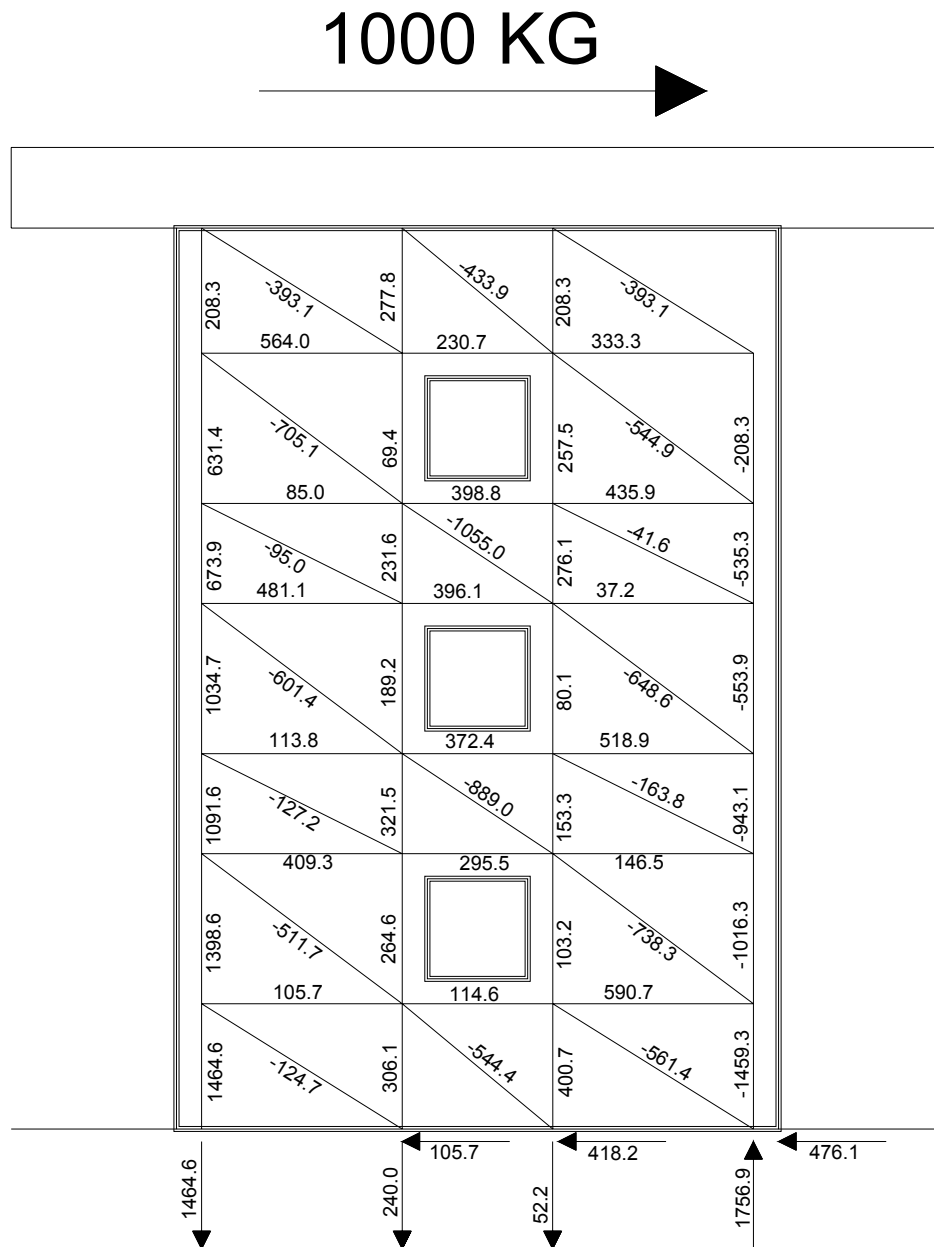


FIGURA No.27.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE X, CASO No.5. (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

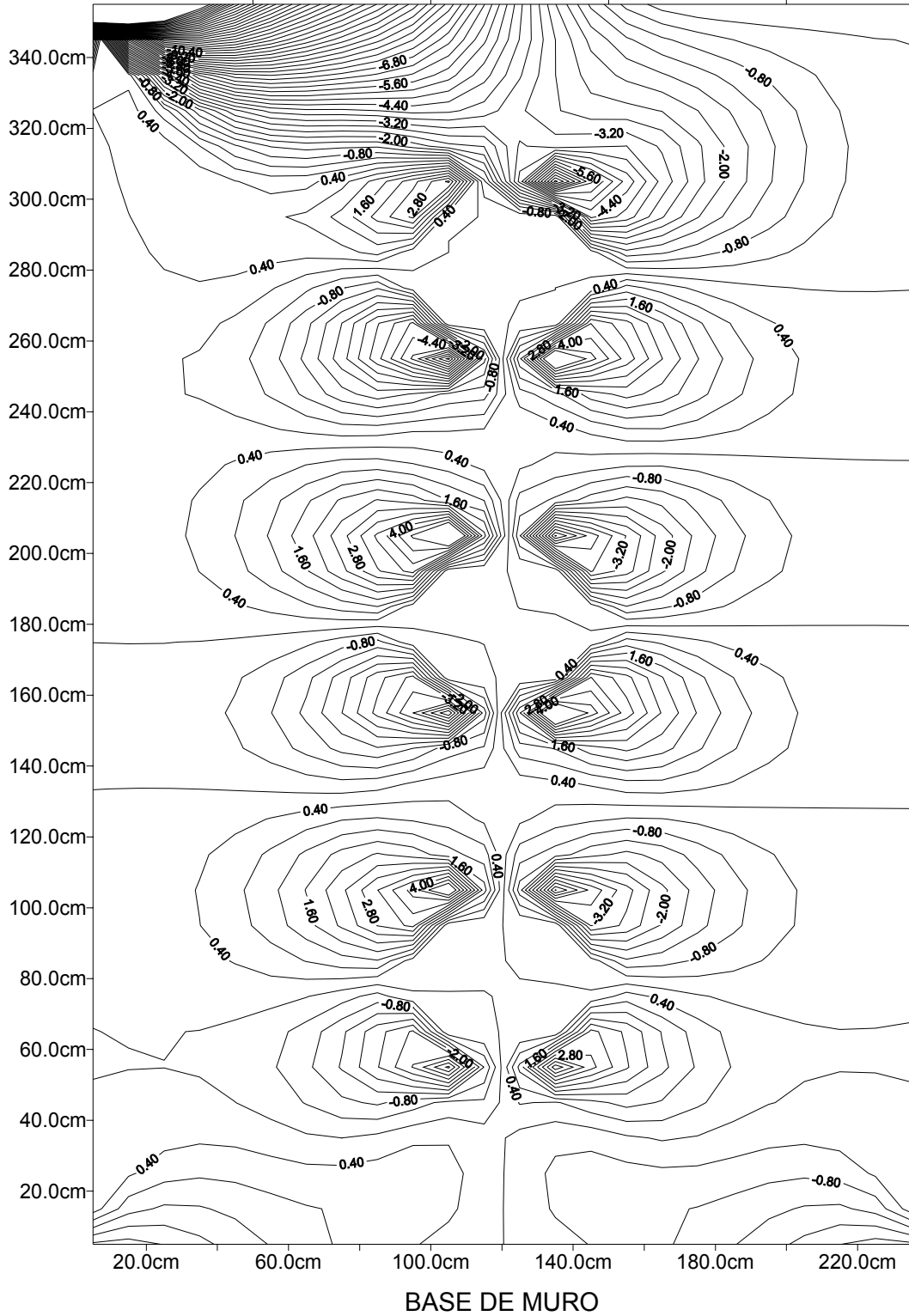


FIGURA No.28.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE Y, CASO No.5. (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

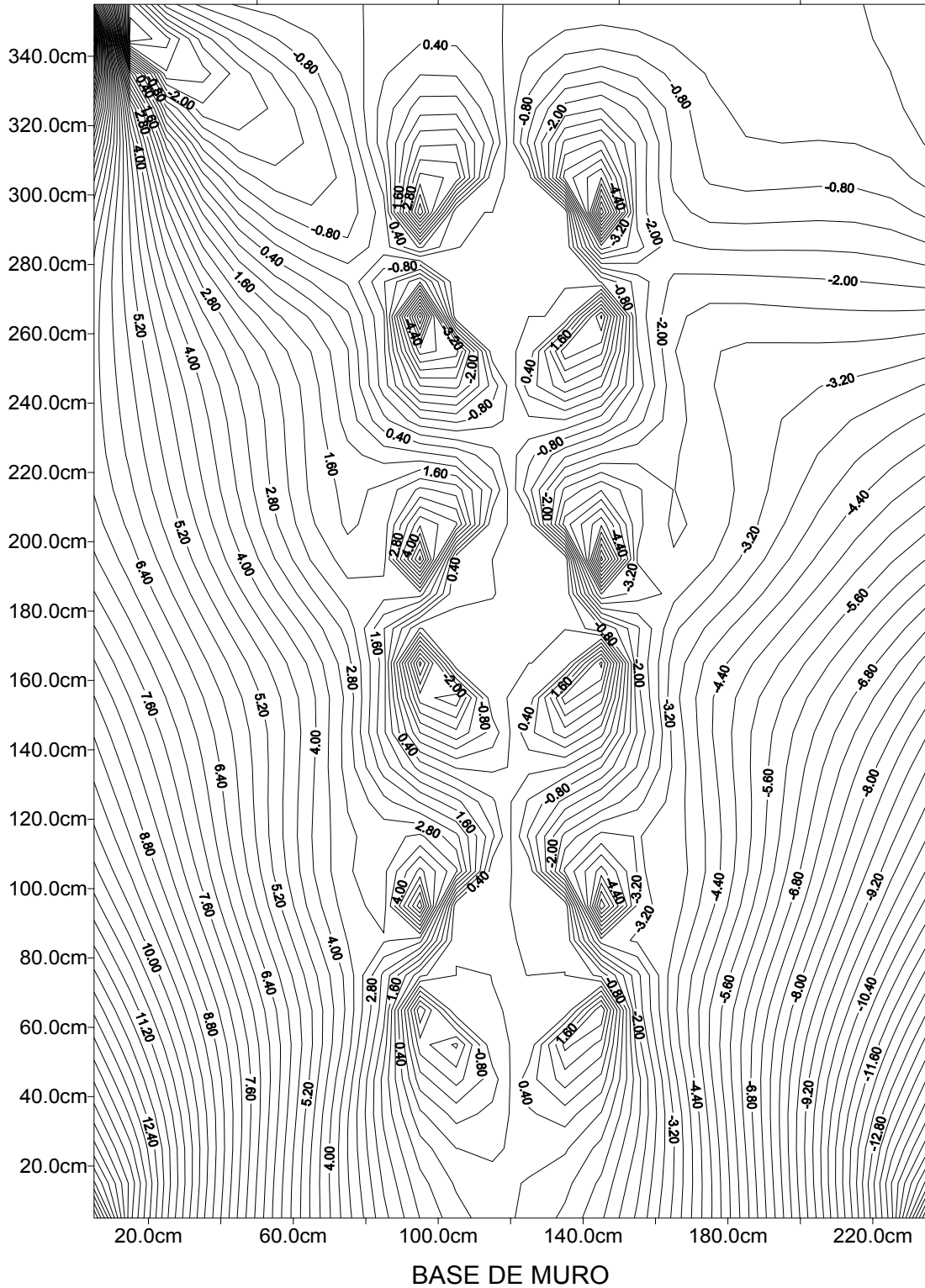


FIGURA No.29.  
ESFUERZOS DE CORTE , CASO No.5 ( $\text{kg/cm}^2 \times 10^{-1}$ )  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

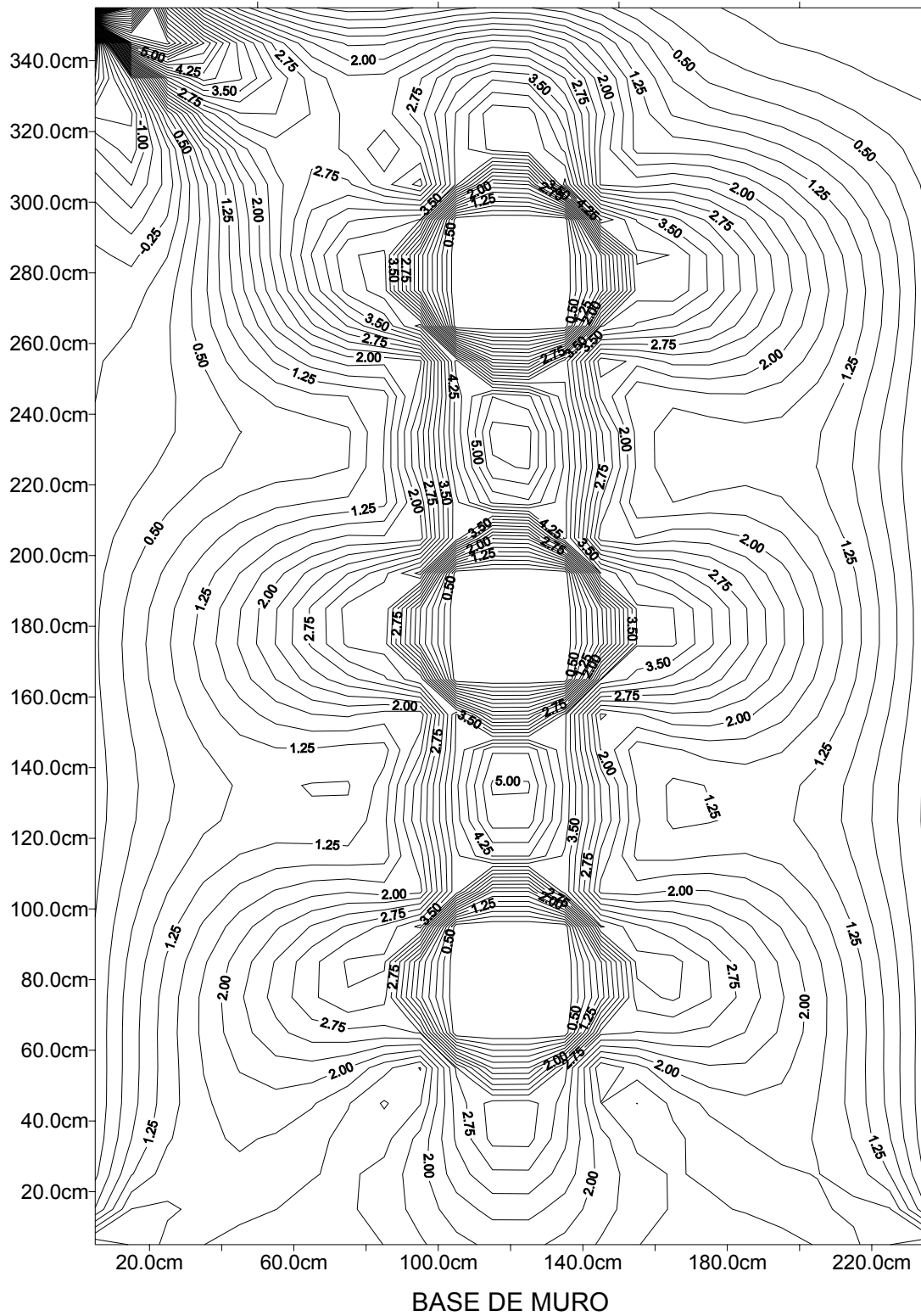


FIGURA No.30.  
GEOMETRÍA Y MODELO PUNTAL TENSOR, CASO No. 6.  
UNA ABERTURA ASIMÉTRICA 0.40 M. X 0.40 M.

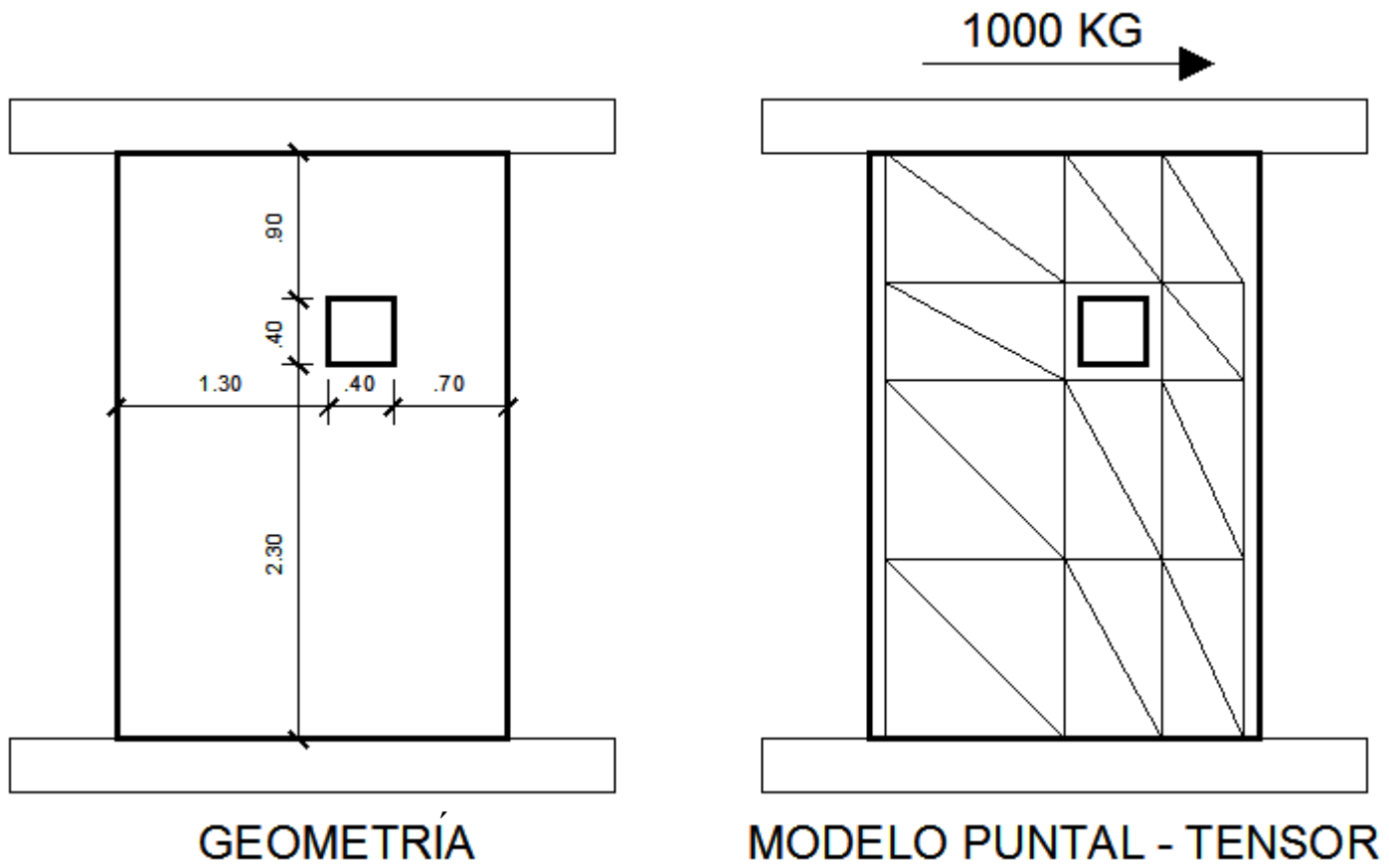


FIGURA No.31.  
 FUERZAS Y REACCIONES OBTENIDAS CON MODELO PUNTAL TENSOR  
 BAJO CARGA LATERAL  
 CASO No. 6 UNA ABERTURA ASIMÉTRICA 0.40 M. X 0.40 M.

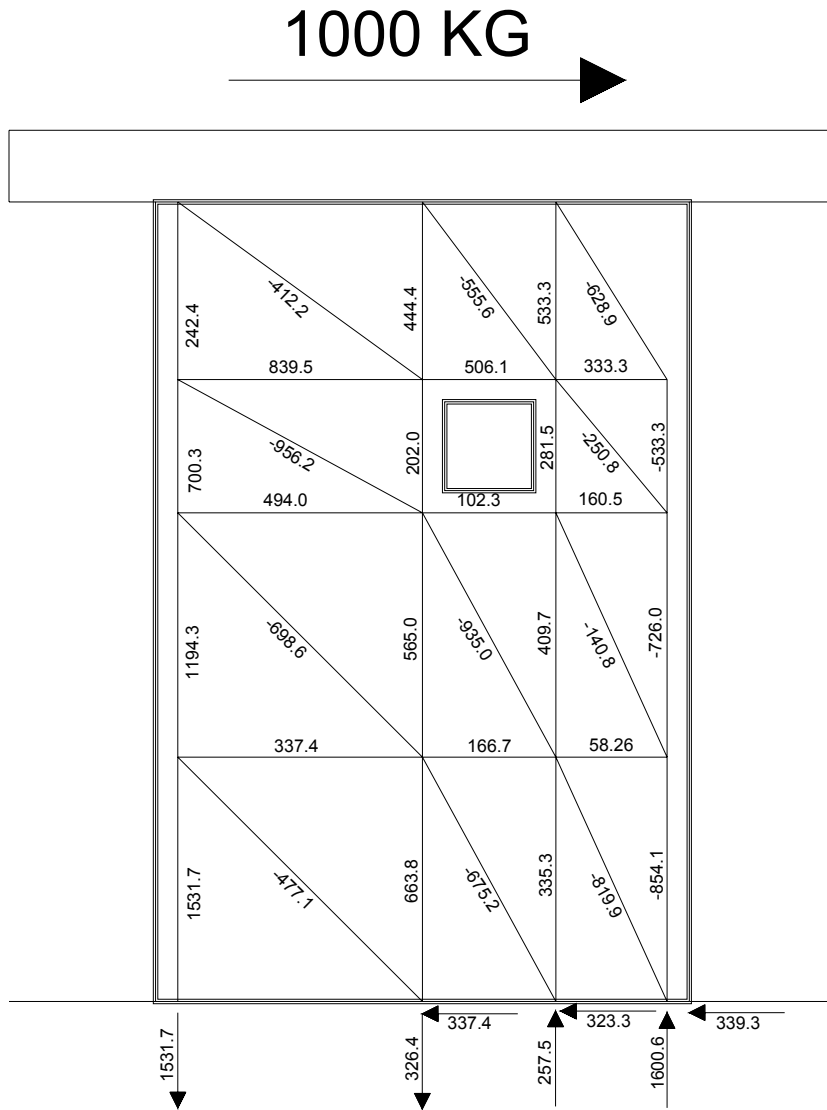


FIGURA No.32.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE X, CASO No.6. (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

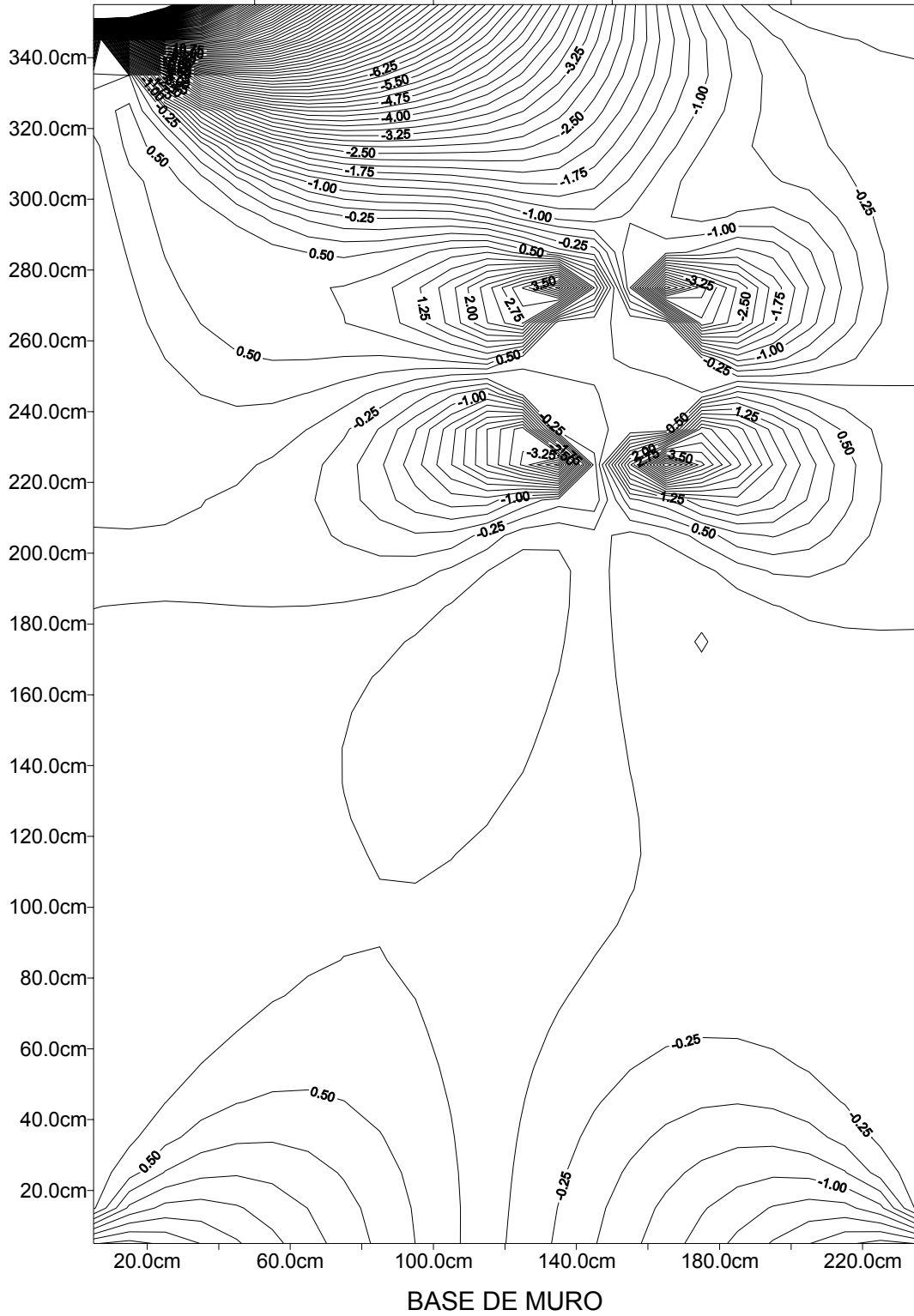


FIGURA No.33.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE Y, CASO No.6. (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

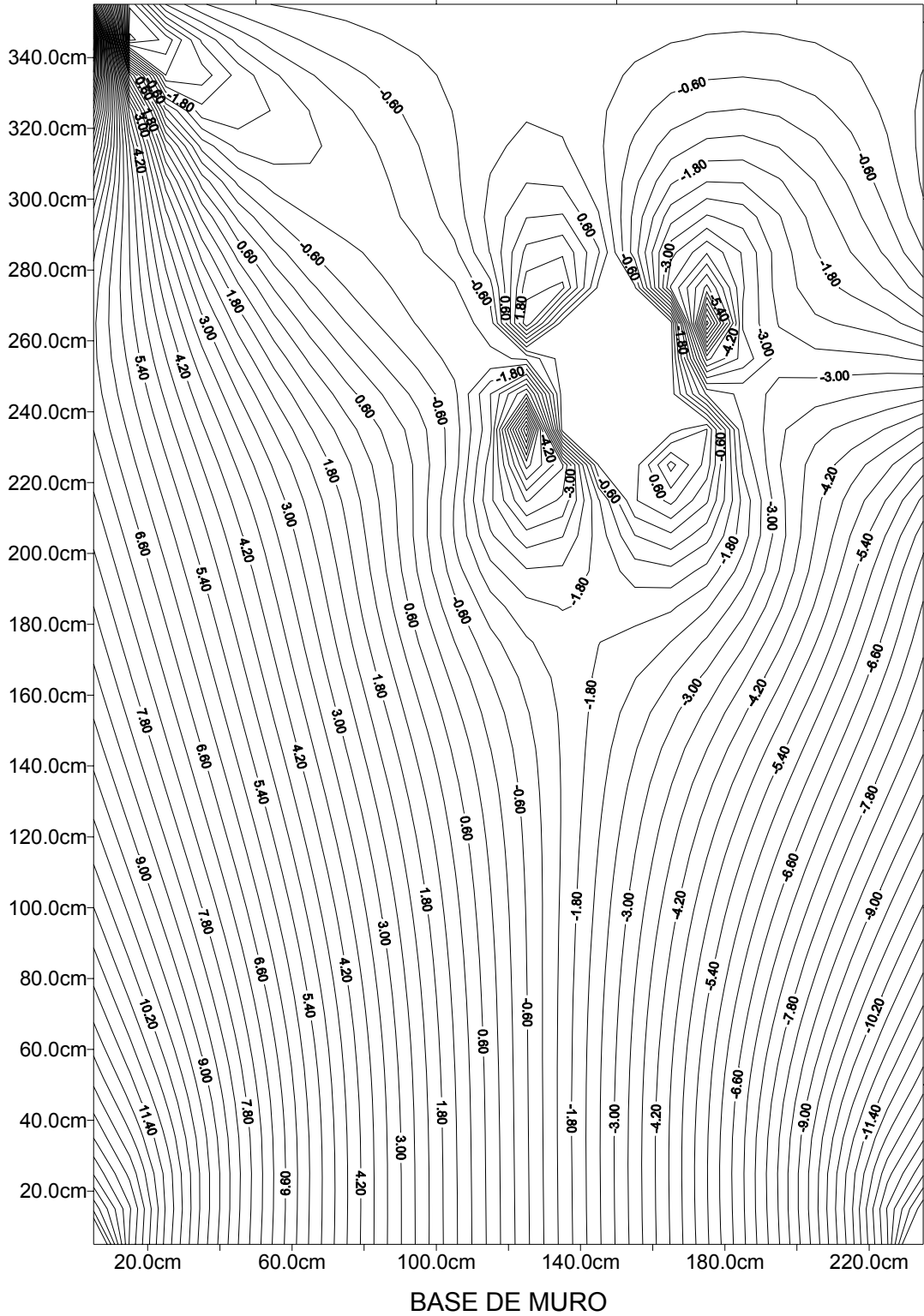


FIGURA No.34.  
ESFUERZOS DE CORTE , CASO No.6 (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

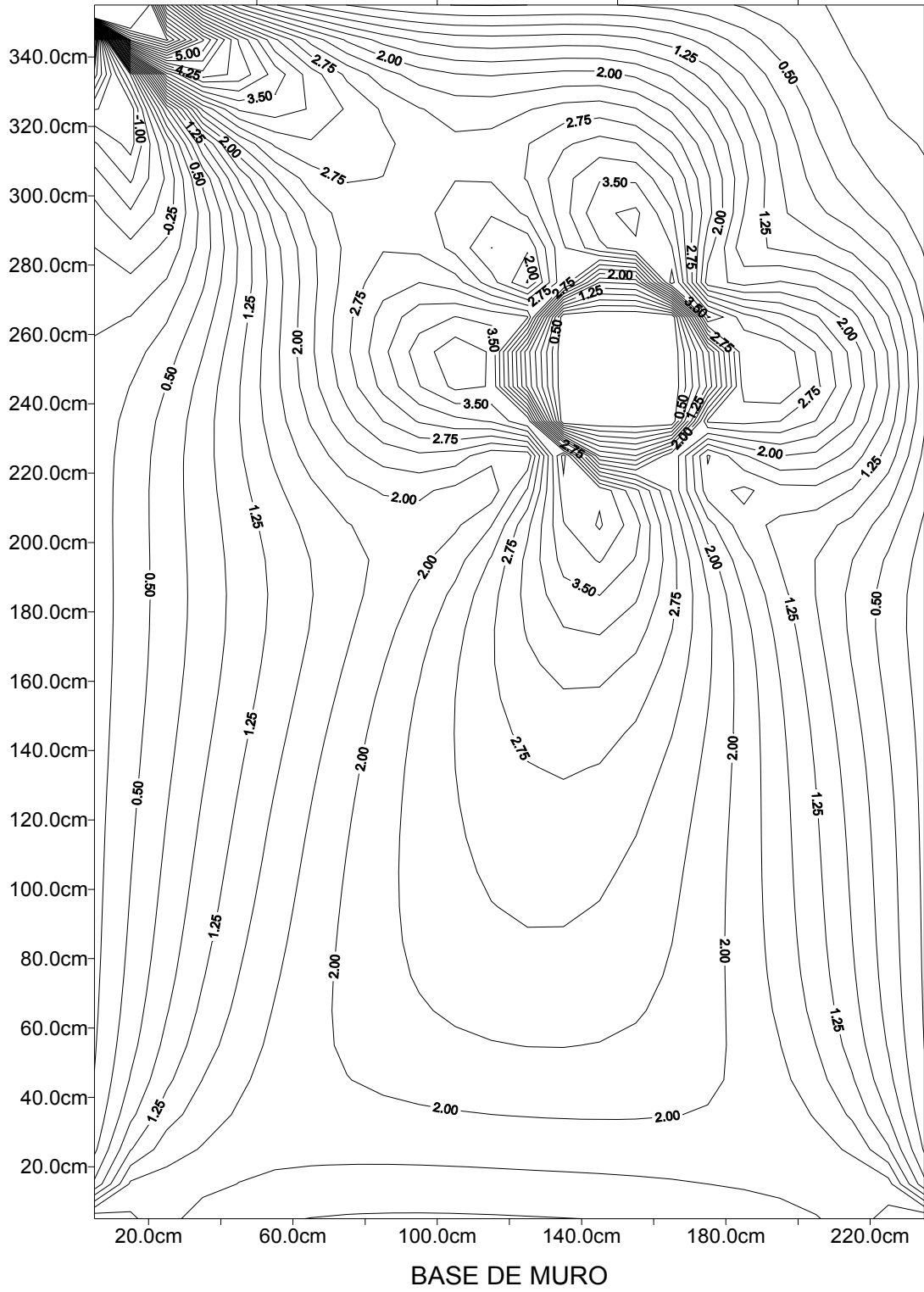


FIGURA No.35.  
GEOMETRÍA Y MODELO PUNTAL TENSOR, CASO No. 7.  
UNA ABERTURA ASIMÉTRICA 0.80 M. X 0.80 M.

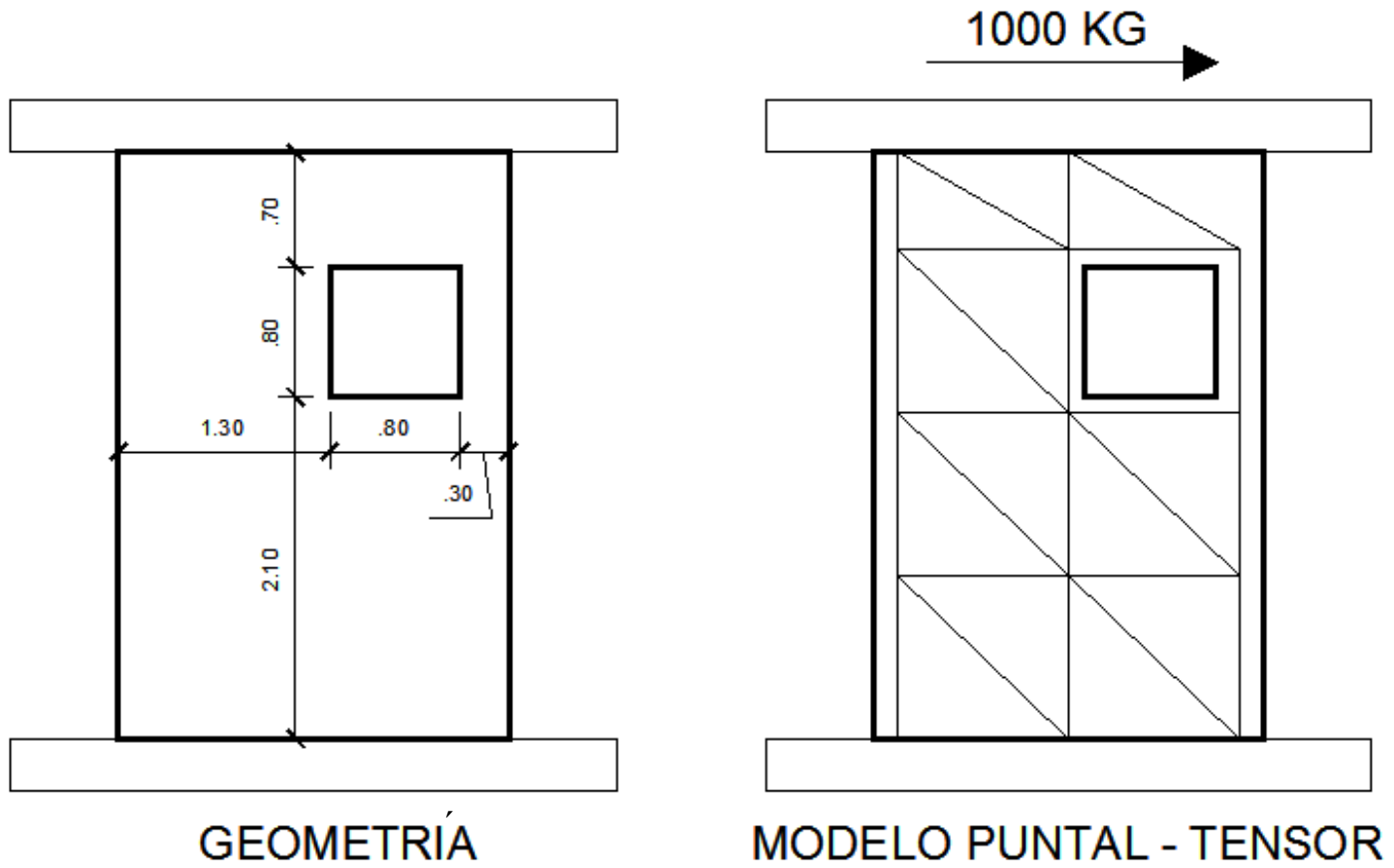


FIGURA No.36.  
 FUERZAS Y REACCIONES OBTENIDAS CON MODELO PUNTAL TENSOR  
 BAJO CARGA LATERAL  
 CASO No. 7 UNA ABERTURA ASIMÉTRICA 0.80 M. X 0.80 M.

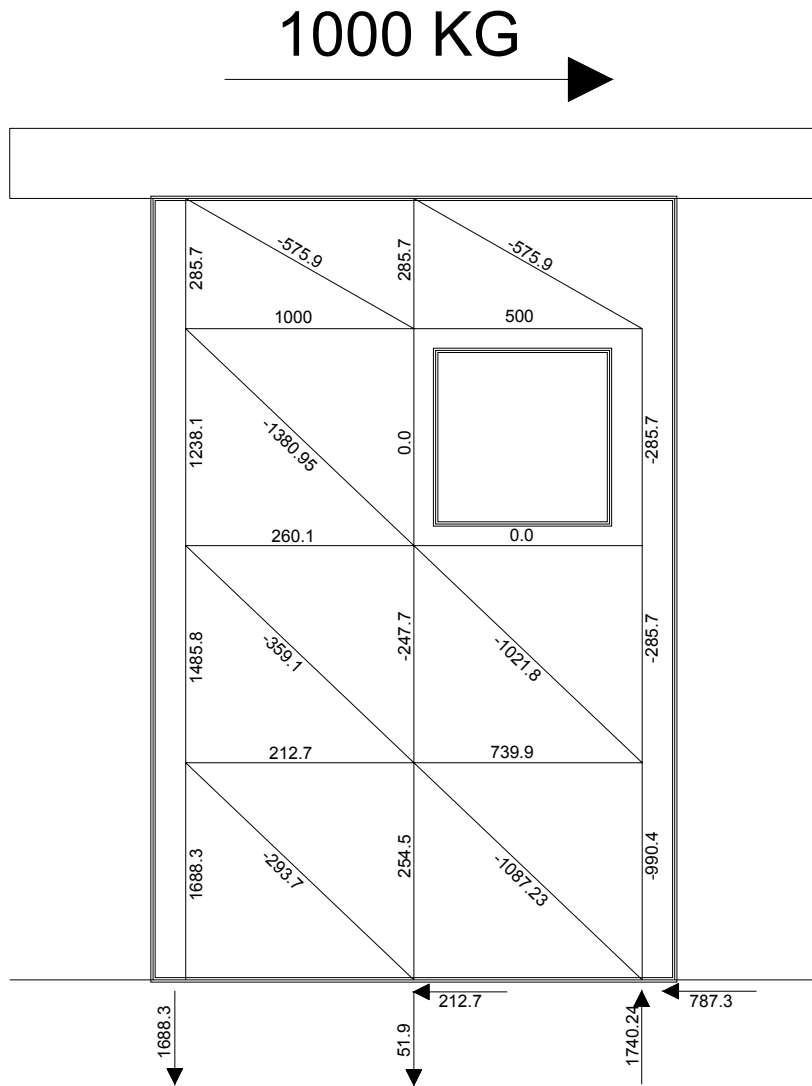


FIGURA No.37.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE X, CASO No.7. ( $\text{kg/cm}^2 \times 10^{-1}$ )  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

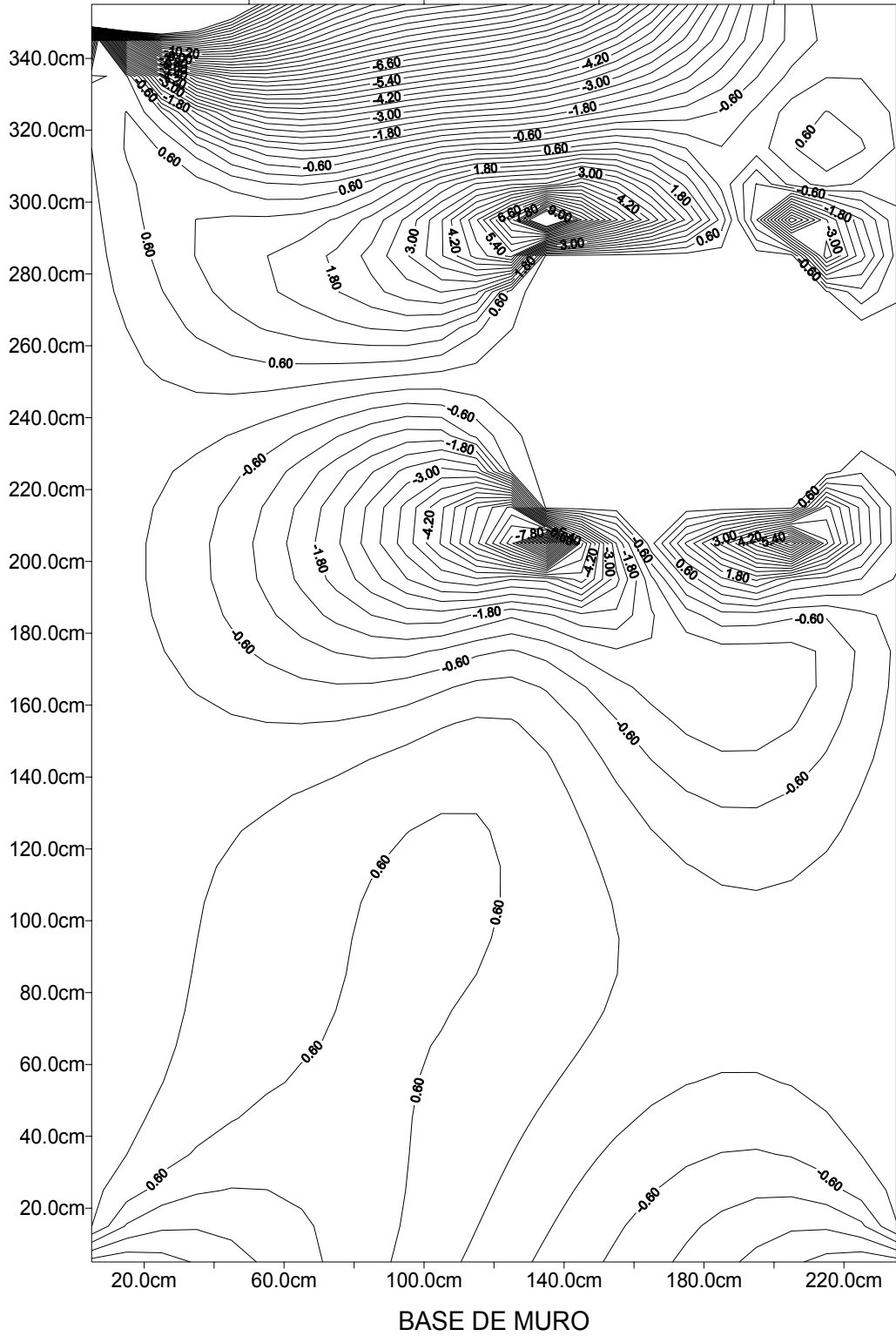


FIGURA No.38.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE Y, CASO No.7. (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

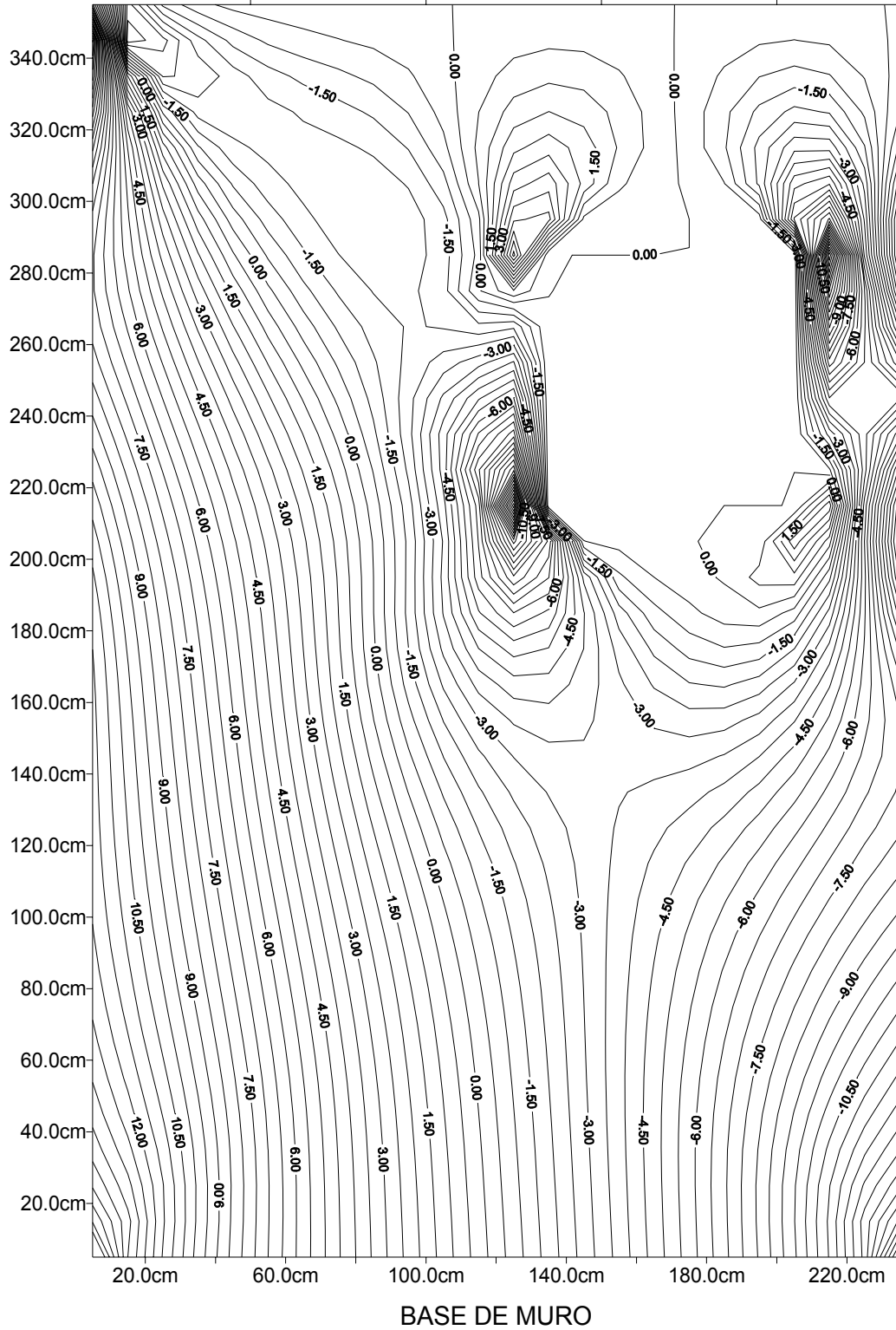
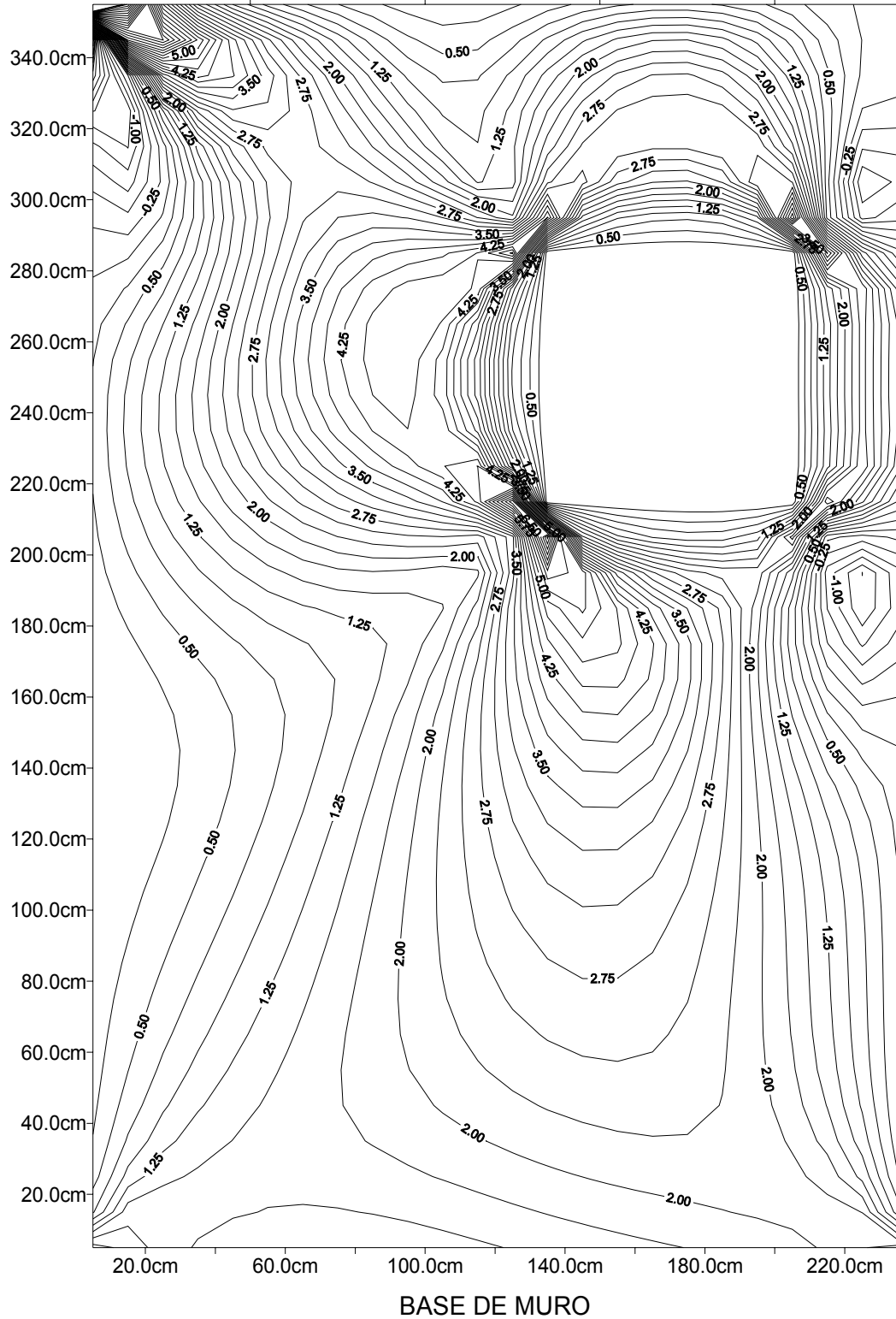


FIGURA No.39.  
ESFUERZOS DE CORTE , CASO No.7 (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.



#### H. CASO No. 8: Muro con dos aberturas asimétricas pequeñas

En el caso No. 8 se utilizarán dos aberturas de 0.40 m. x 0.40 m. ubicadas asimétricamente y que representan una reducción del 3.70% del área del muro.

En la figura No. 40 esta la geometría y el modelo puntal-tensor de este caso; en la figura No. 41 las fuerzas y reacciones del modelo puntal-tensor; en la figura No. 42 la distribución de esfuerzos paralelos al eje “X”; la figura No. 43 indica la distribución de esfuerzos paralelos al eje “Y”; la figura No. 44 muestra la distribución de esfuerzos de corte.

#### I. CASO No. 9: Muro con dos aberturas asimétricas grandes

El muro será analizado con dos aberturas de 0.80 m. x 0.80 m. ubicadas asimétricamente. Esto es al igual que el caso No. 4 un 14.81% en reducción del área total del muro.

La geometría y modelo puntal-tensor están indicados en la figura No. 45 y los resultados de las fuerzas de este modelo en la figura No. 46; la distribución de esfuerzos en el eje “X” se grafican en la figura No. 47; la distribución de esfuerzos en el eje “Y” en la figura No. 48; los esfuerzos cortantes se indican en la figura No. 49.

#### J. CASO No. 10: Muro con seis aberturas simétricas pequeñas

En este muro serán incluidas seis aberturas de 0.40 m. x 0.40 m ubicada simétricamente, siendo el área total del muro reducida en un 9.52%.

La geometría y modelo puntal tensor se muestran en la figura No. 50; las fuerzas del modelo puntal-tensor en la figura No. 51; la distribución de esfuerzos en sentido “X” en la figura No. 52; la distribución de esfuerzos en sentido “Y” en la figura No. 53; y la distribución de esfuerzos cortantes en la figura No. 54.

FIGURA No.40.  
GEOMETRÍA Y MODELO PUNTAL TENSOR, CASO No 8.  
DOS ABERTURAS ASIMÉTRICAS 0.40 M. X 0.40 M.

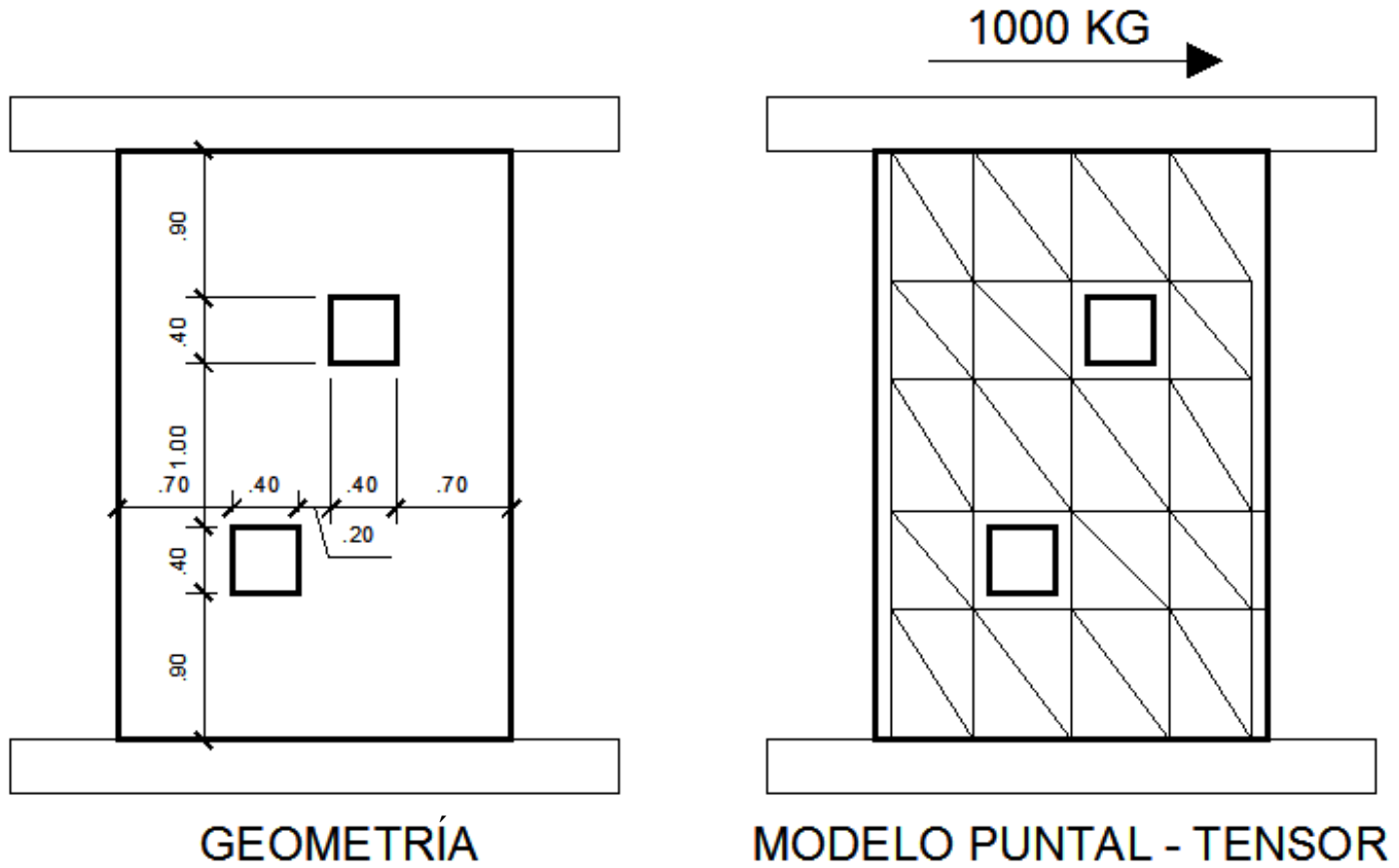


FIGURA No.41.  
 FUERZAS Y REACCIONES OBTENIDAS CON MODELO PUNTAL TENSOR  
 BAJO CARGA LATERAL  
 CASO No. 8 DOS ABERTURAS ASIMÉTRICAS 0.40 M. X 0.40 M.

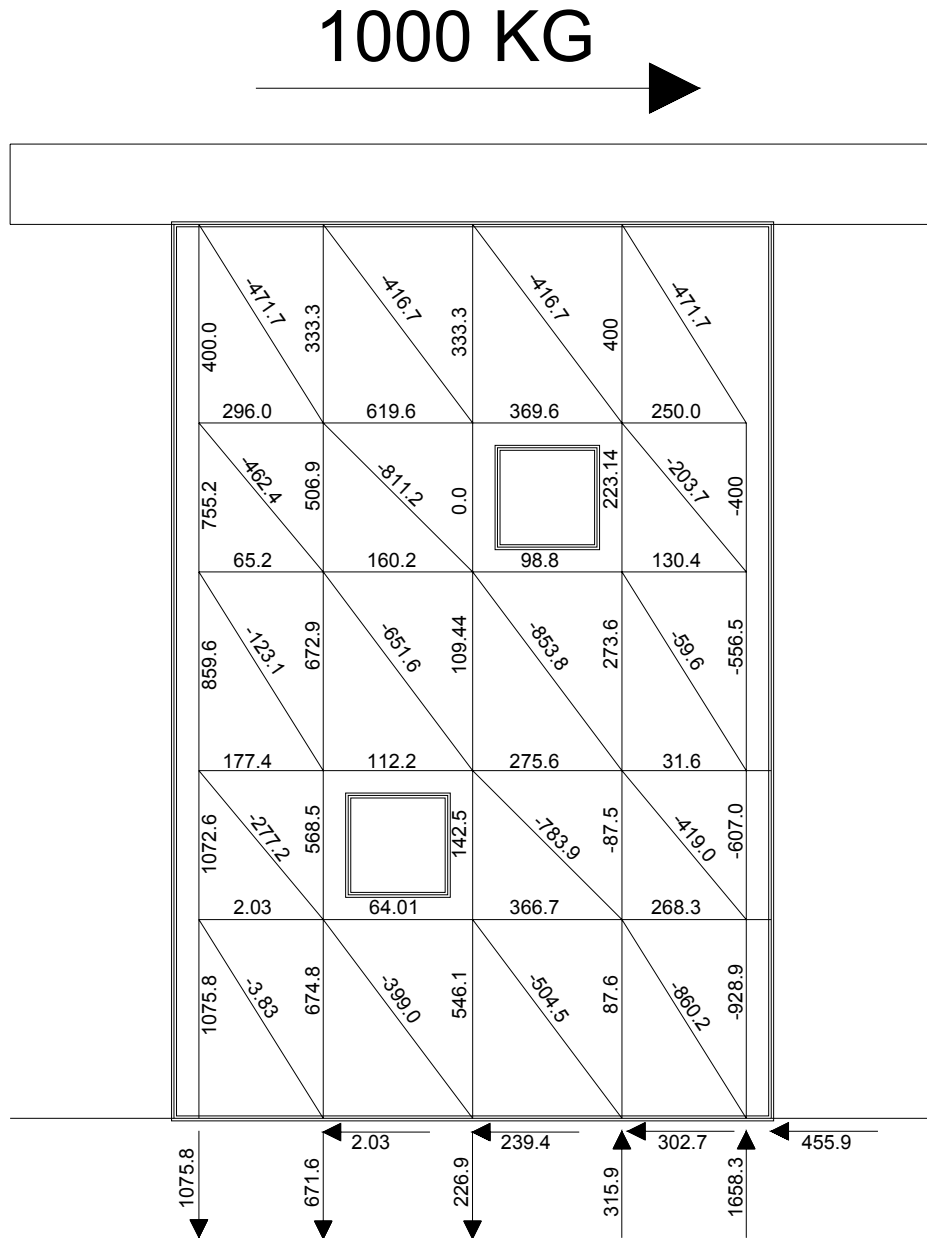


FIGURA No.42.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE X, CASO No.8. (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

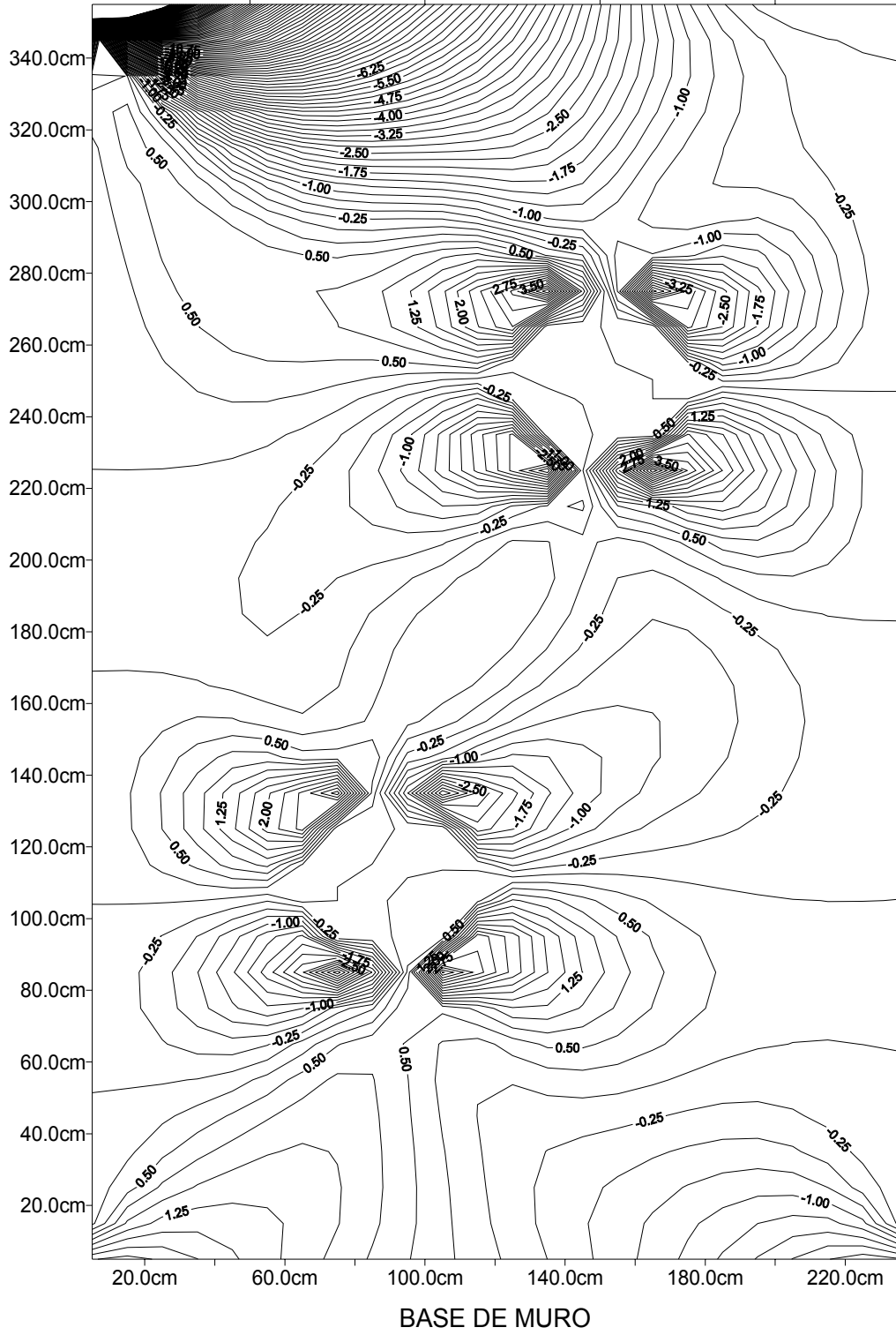


FIGURA No.43.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE Y, CASO No.8. (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

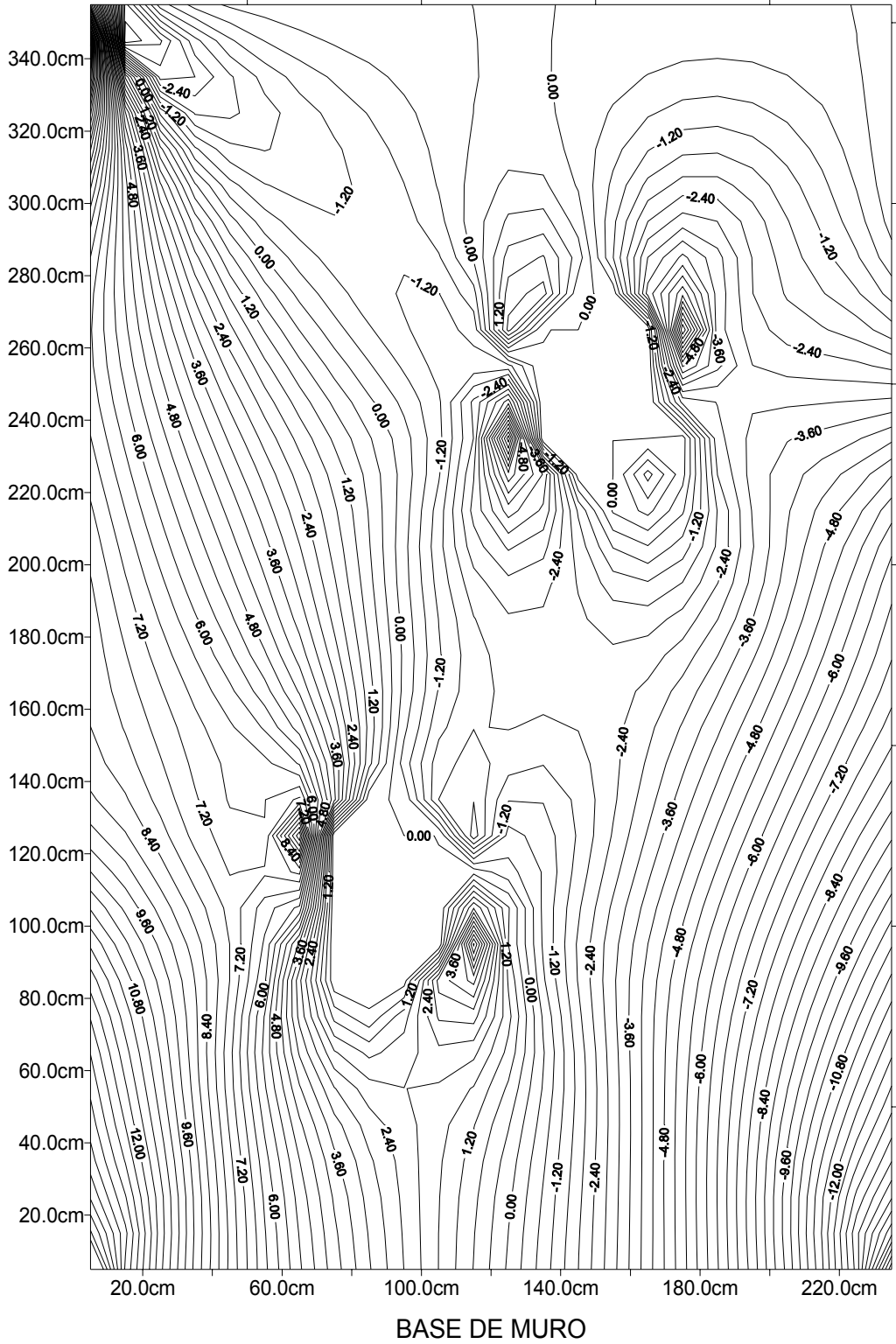


FIGURA No.44.  
ESFUERZOS DE CORTE , CASO No.8 (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO

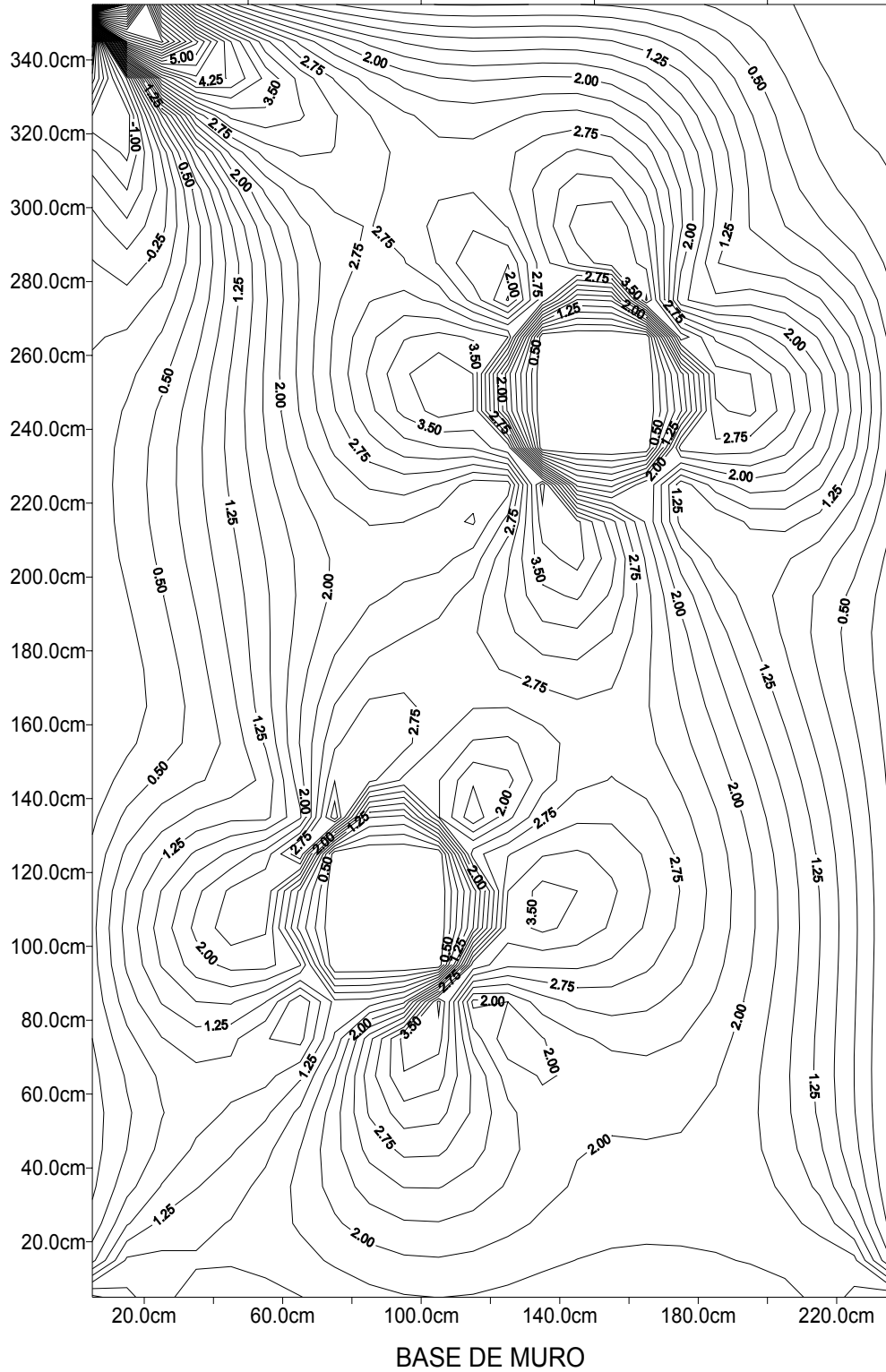


FIGURA No.45.  
GEOMETRÍA Y MODELO PUNTAL TENSOR, CASO No. 9.  
DOS ABERTURAS ASIMÉTRICAS 0.80 M. X 0.80 M.

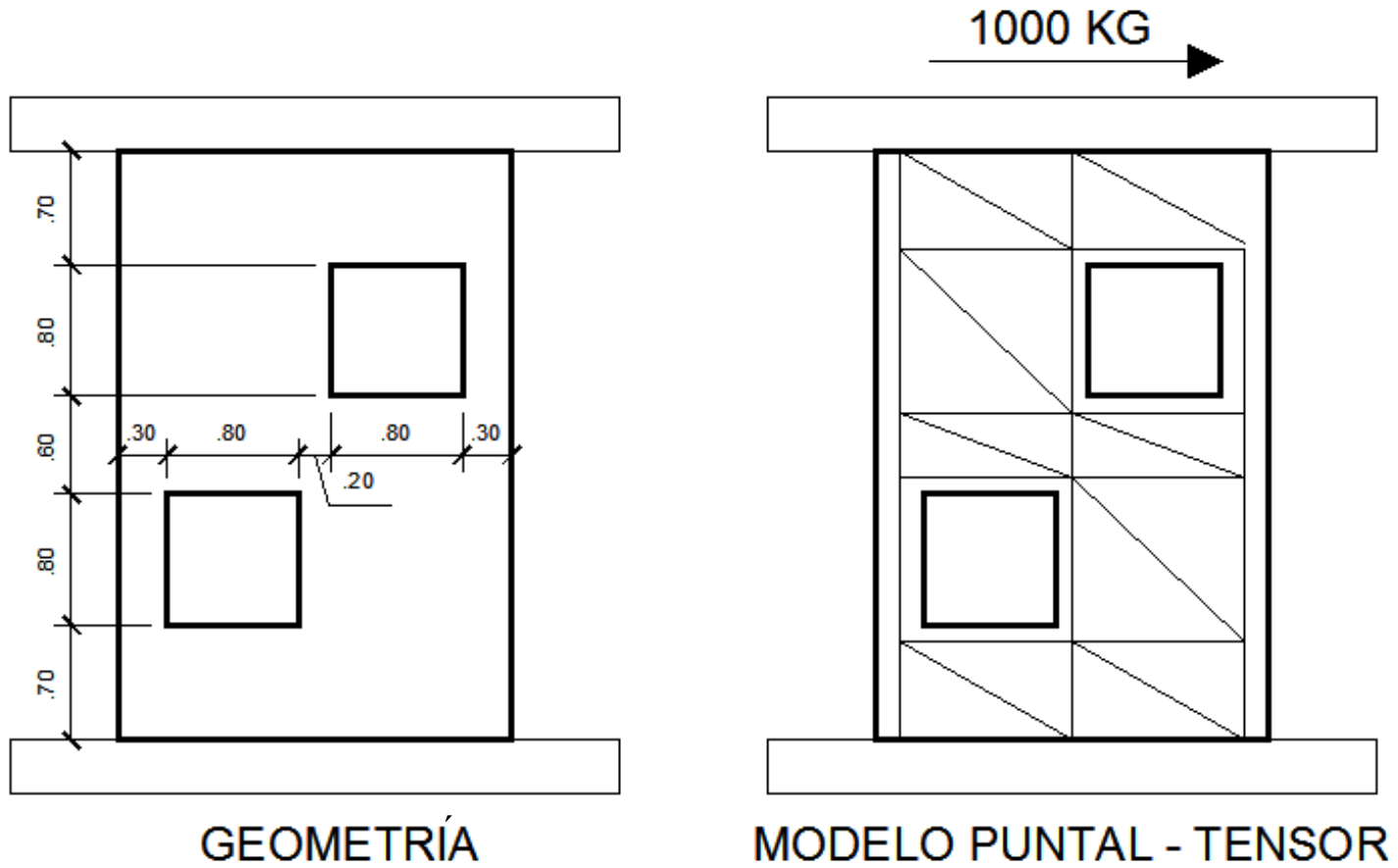


FIGURA No.46.  
FUERZAS Y REACCIONES OBTENIDAS CON MODELO PUNTAL TENSOR  
BAJO CARGA LATERAL  
CASO No. 9 DOS ABERTURAS ASIMÉTRICAS 0.80 M. X 0.80 M.

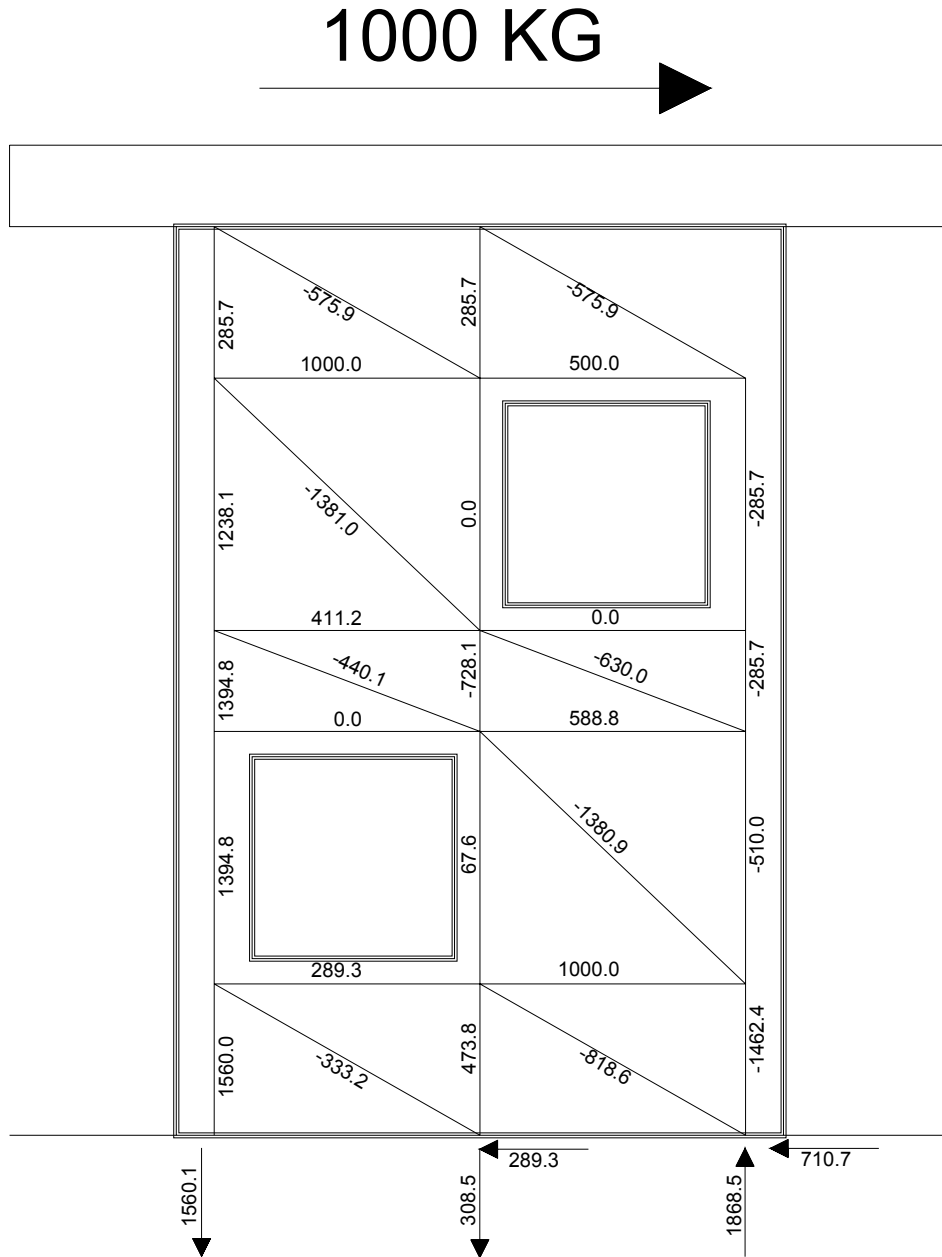




FIGURA No.48.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE Y, CASO No.9. (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

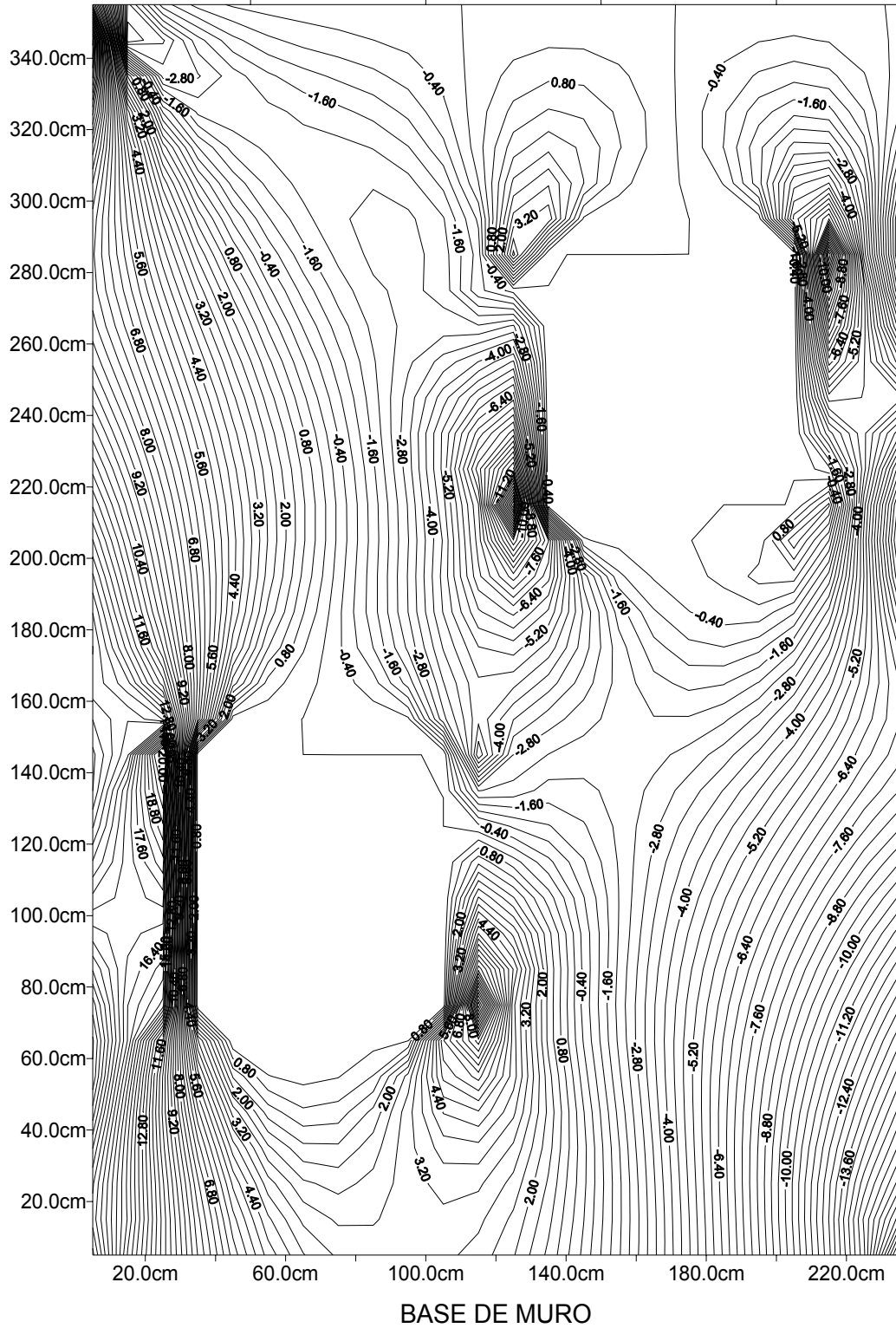


FIGURA No.49  
ESFUERZOS DE CORTE, CASO No.9 ( $\text{kg/cm}^2 \times 10^{-1}$ )  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO

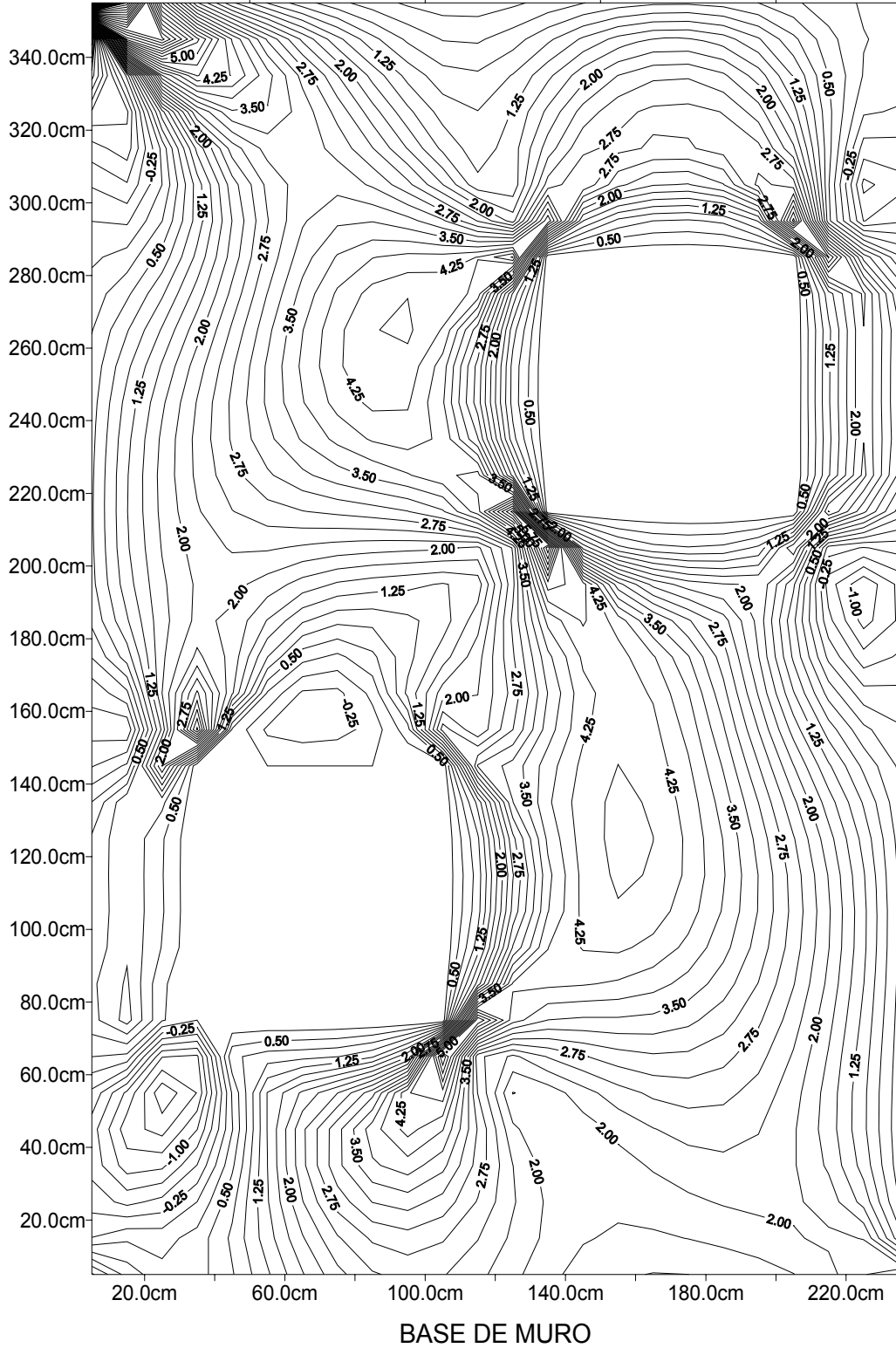


FIGURA No.50.  
GEOMETRÍA Y MODELO PUNTAL TENSOR, CASO No. 10.  
SEIS ABERTURAS SIMÉTRICAS 0.40 M. X 0.40 M.

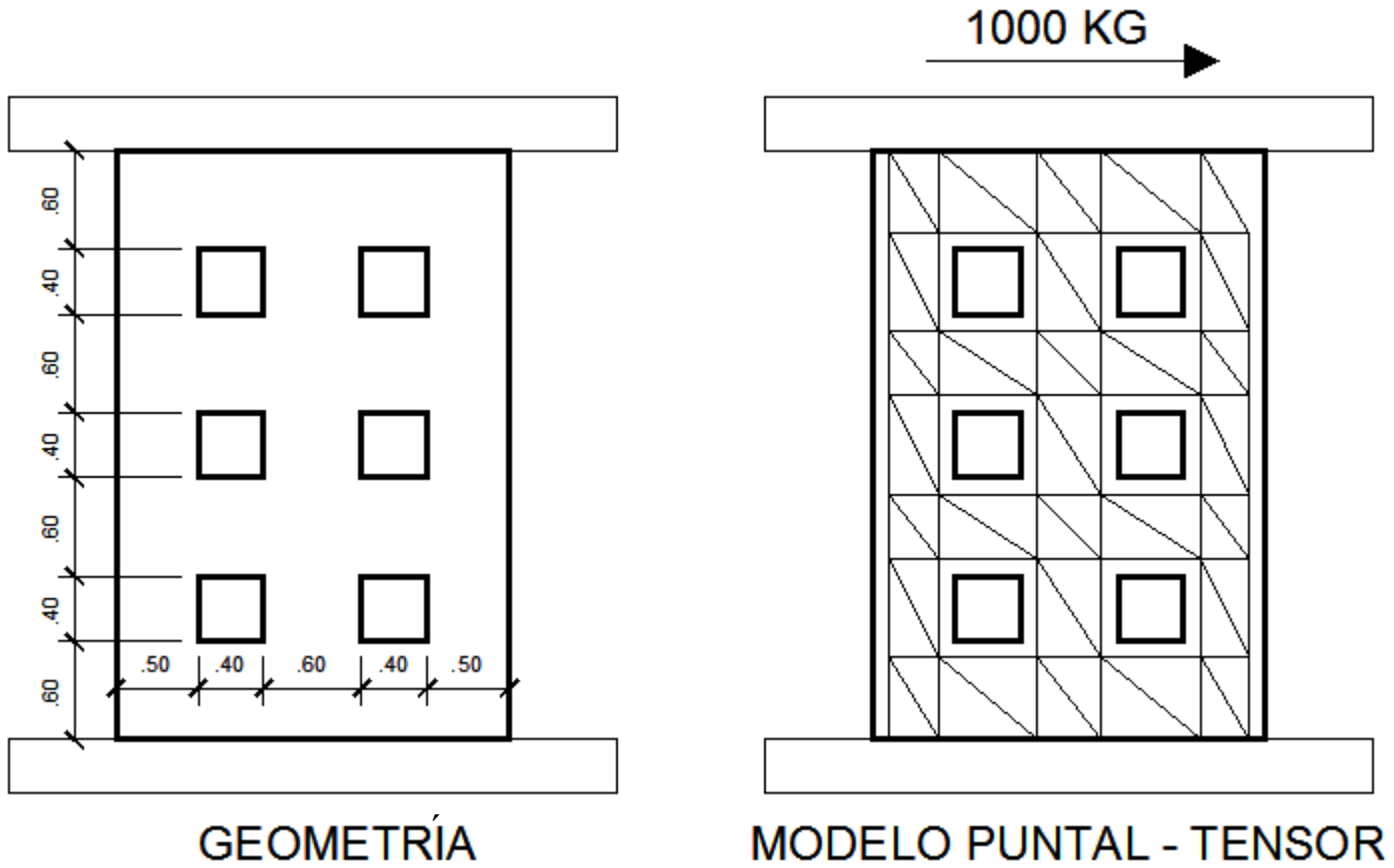


FIGURA No.51.  
 FUERZAS Y REACCIONES OBTENIDAS CON MODELO PUNTAL TENSOR  
 BAJO CARGA LATERAL  
 CASO No. 10 SEIS ABERTURAS SIMÉTRICAS 0.40 M. X 0.40 M.

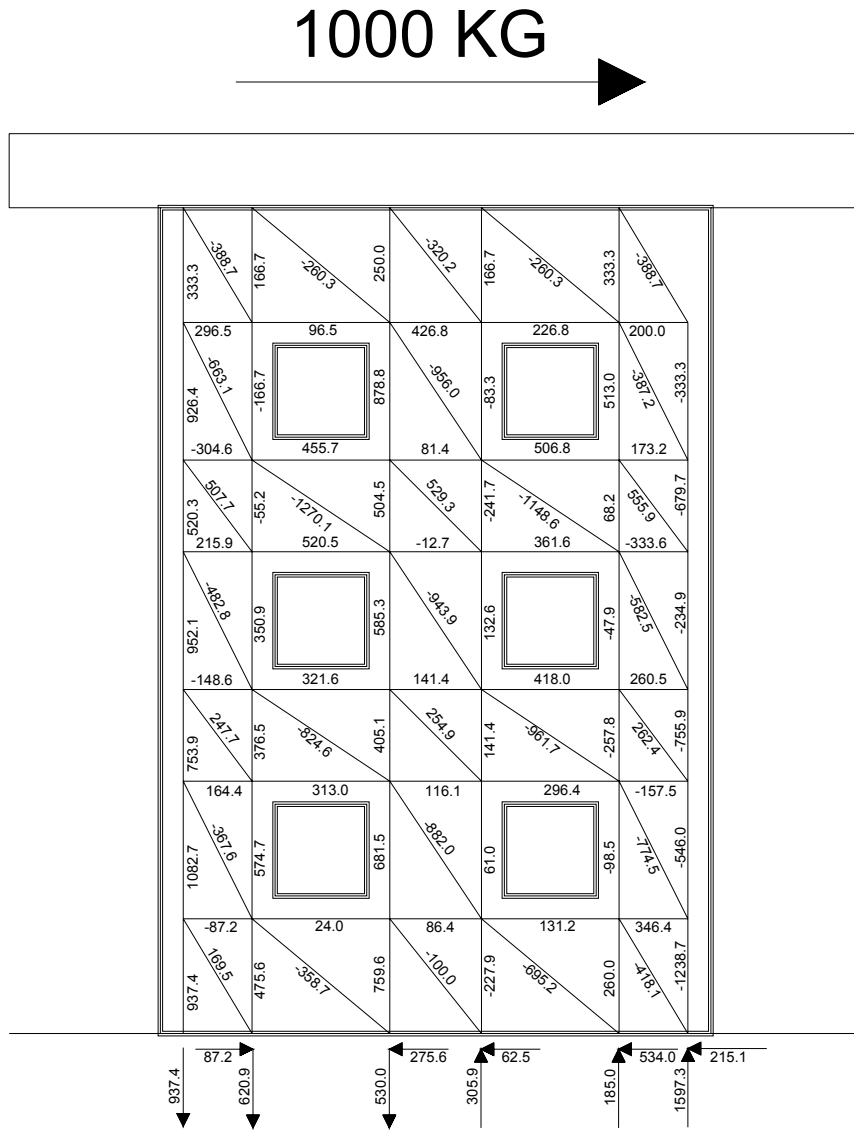


FIGURA No.52.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE X, CASO No.10. (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

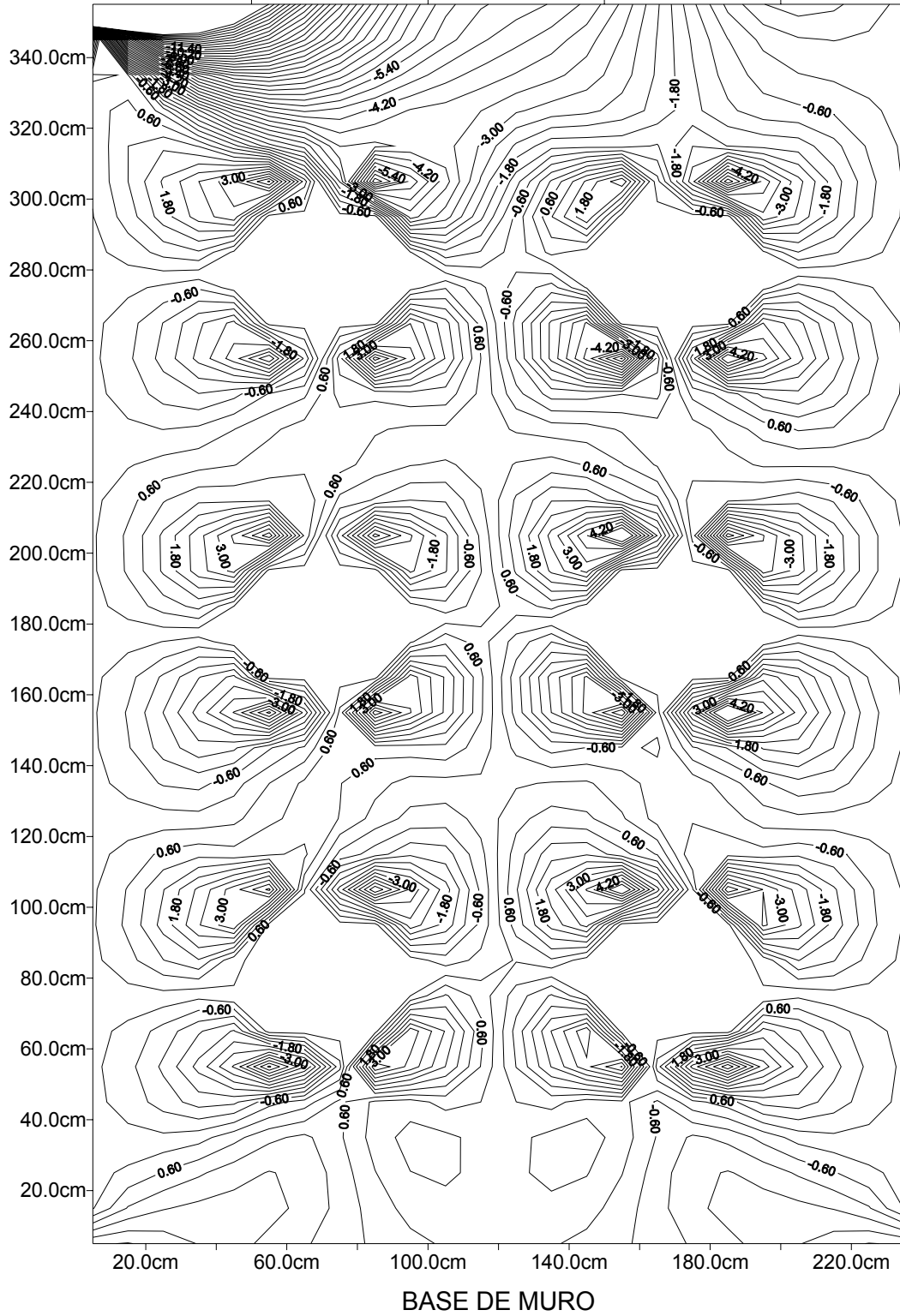


FIGURA No.53.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE Y, CASO No.10. (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

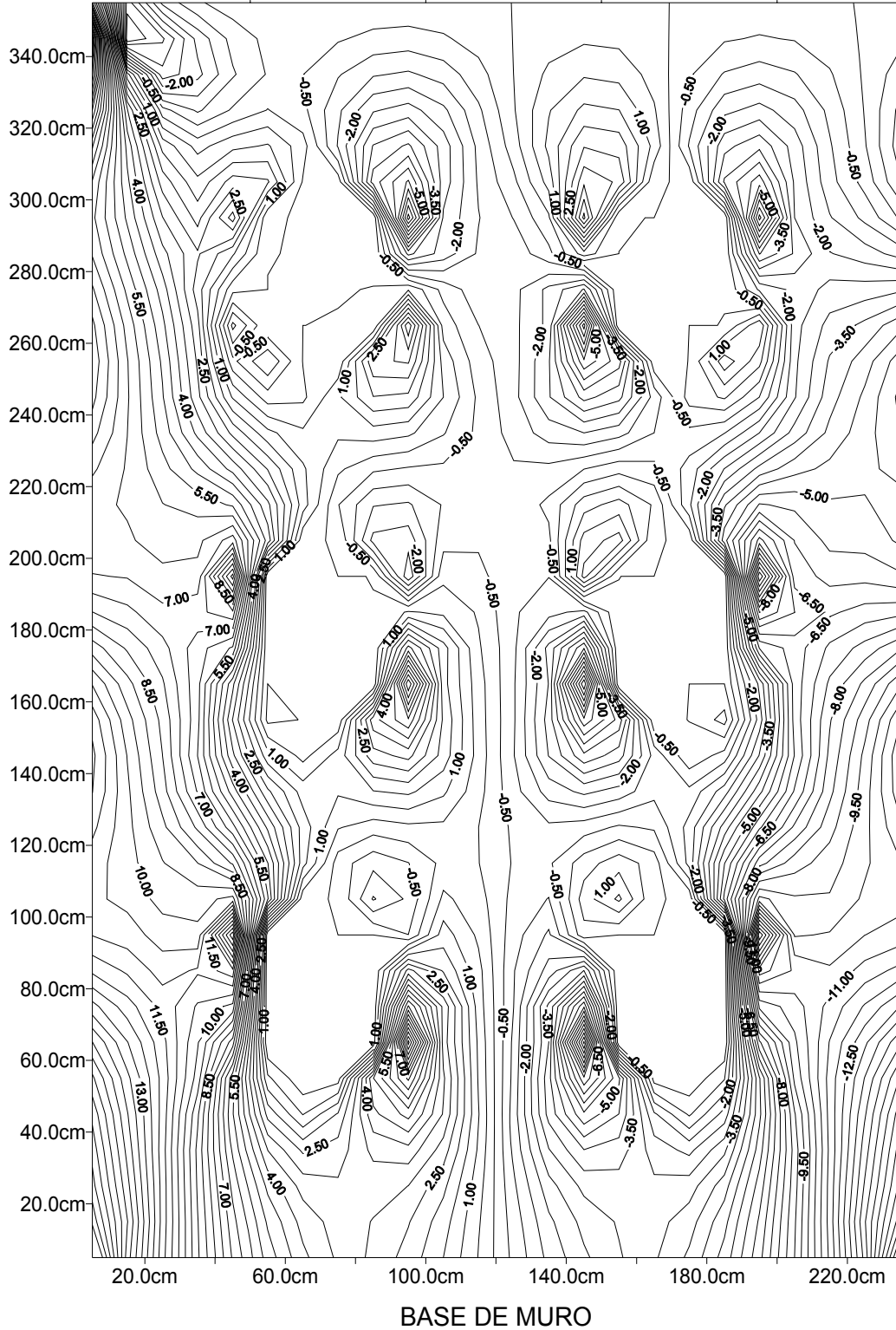
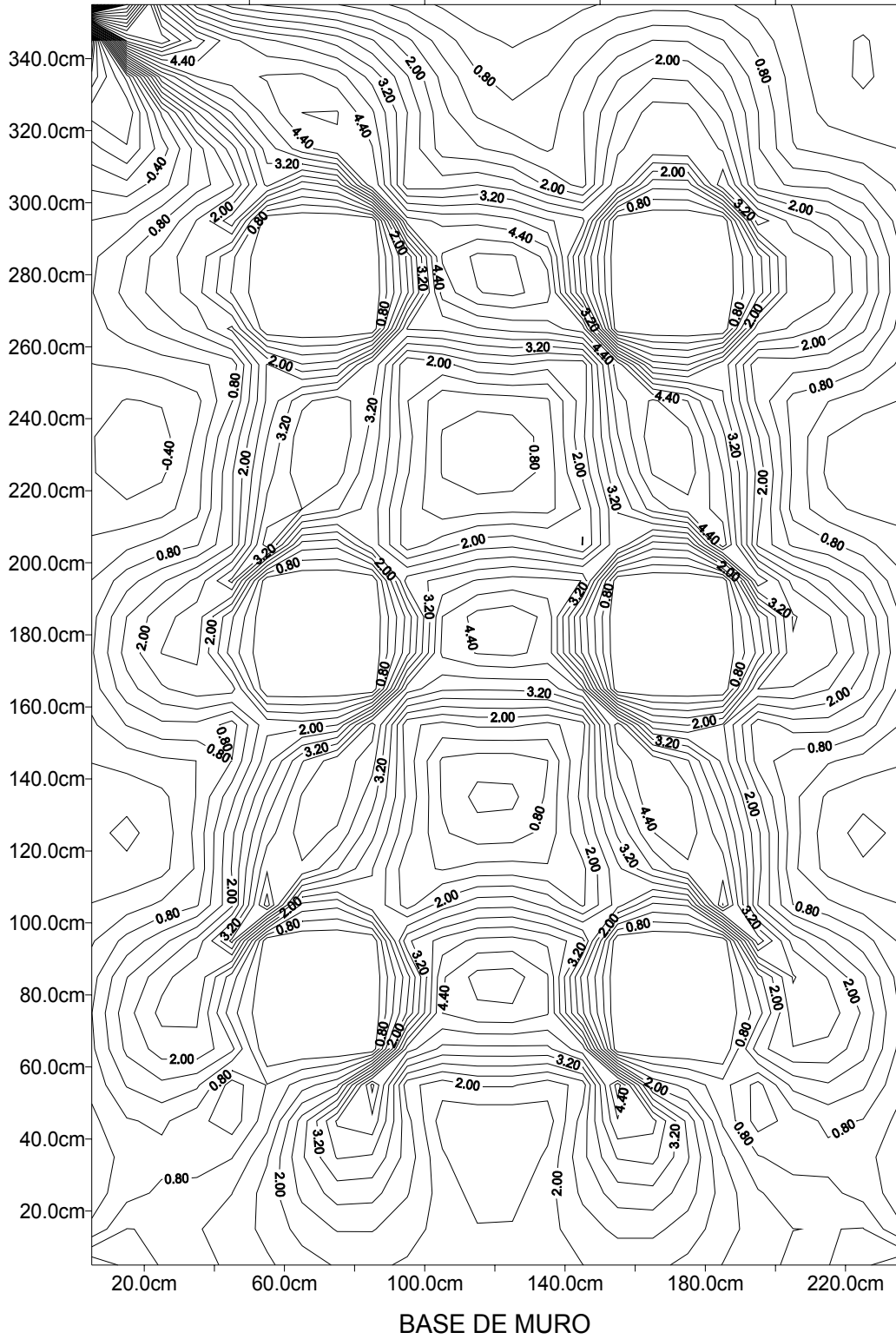


FIGURA No.54.  
ESFUERZOS DE CORTE , CASO No.10 ( $\text{kg/cm}^2 \times 10^{-1}$ )  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO



#### K. CASO No. 11: Muro sin aberturas

Finalmente se analizará un muro que no contenga aberturas. Este caso servirá de parámetro para evaluar el comportamiento de los demás muros que sí poseen aberturas.

En la figura No. 55 se incluye la geometría y el modelo puntal-tensor; la figura No. 56 las fuerzas obtenidas del modelo puntal tensor; la figura No. 57 la distribución de esfuerzos paralelos al eje "X"; la figura No. 58 la distribución de esfuerzos paralelos al eje "Y"; y la figura No. 59 los esfuerzos de corte.

FIGURA No.55.  
GEOMETRÍA Y MODELO PUNTAL TENSOR, CASO No. 11.  
MURO SIN ABERTURAS.

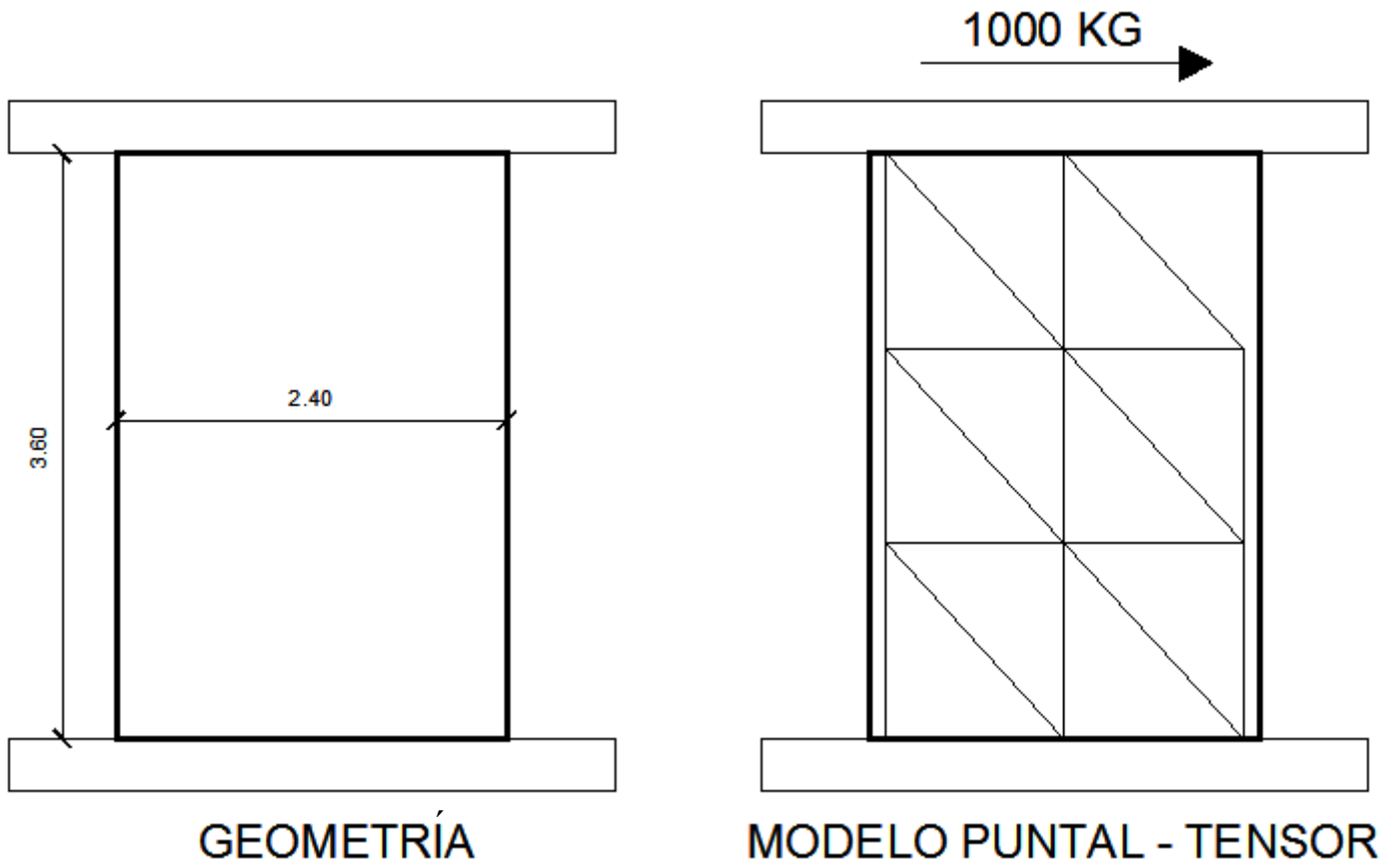


FIGURA No.56.  
FUERZAS Y REACCIONES OBTENIDAS CON MODELO PUNTAL TENSOR  
BAJO CARGA LATERAL  
CASO No. 11 MURO SIN ABERTURAS.

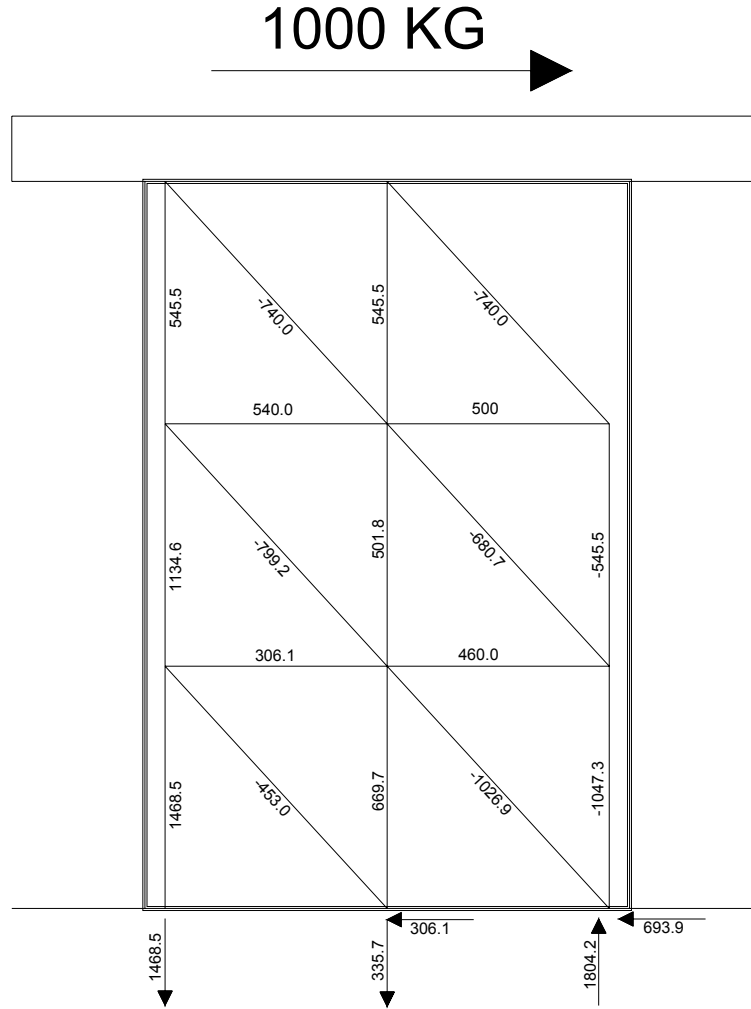


FIGURA No.57.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE X, CASO No.11. (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

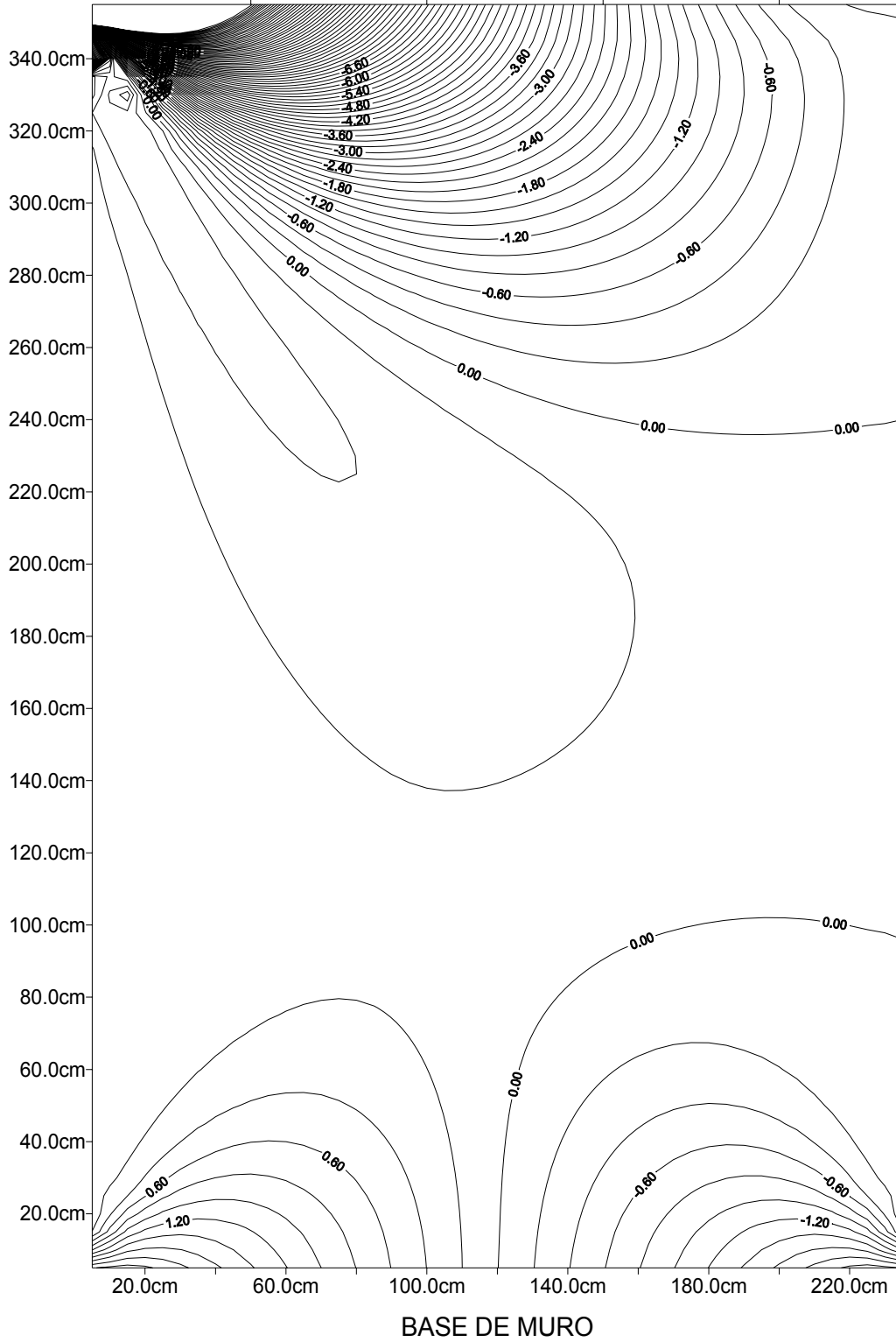


FIGURA No.58.  
ESFUERZOS EN SENTIDO EJE Y, CASO No.11. (kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>)  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.

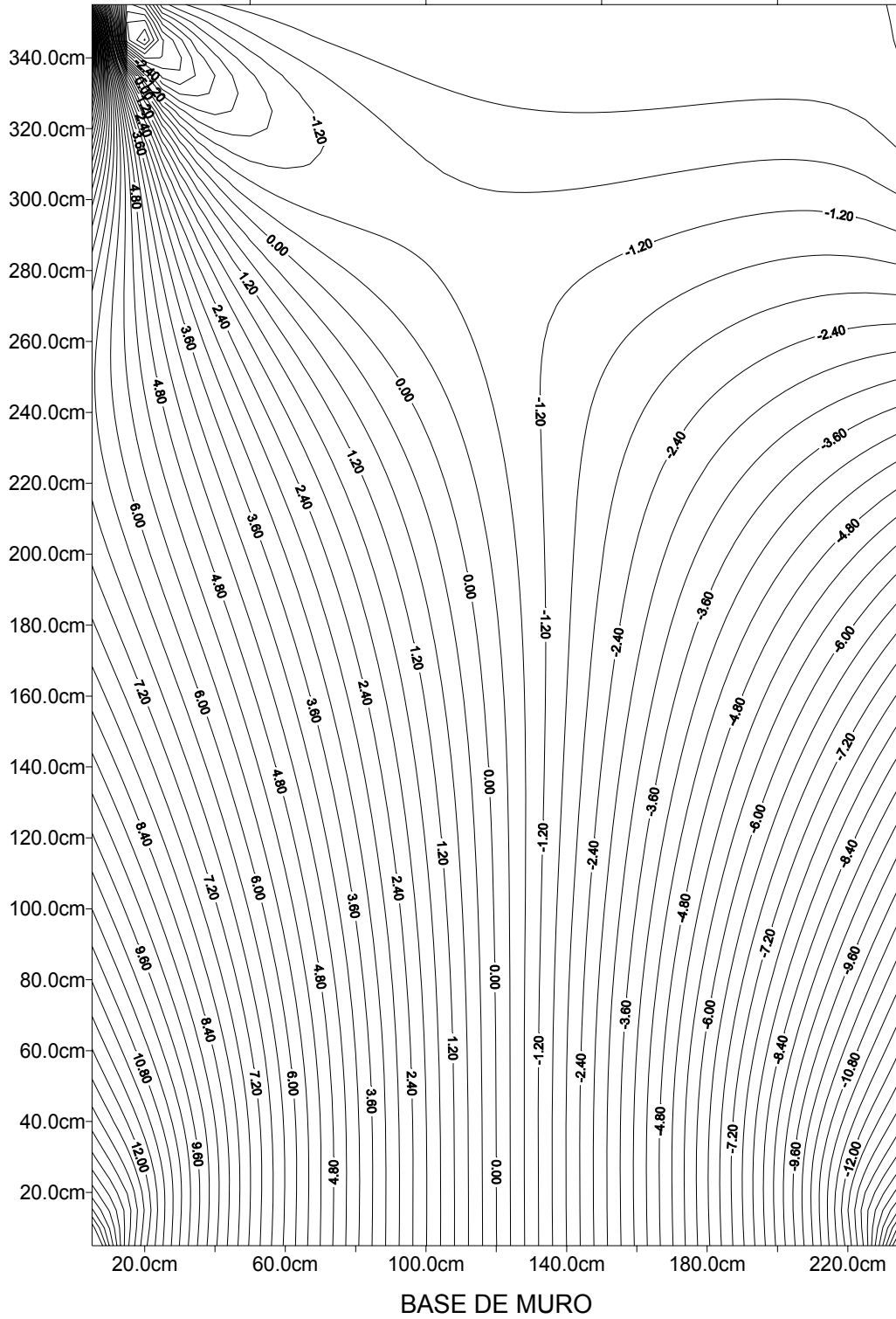
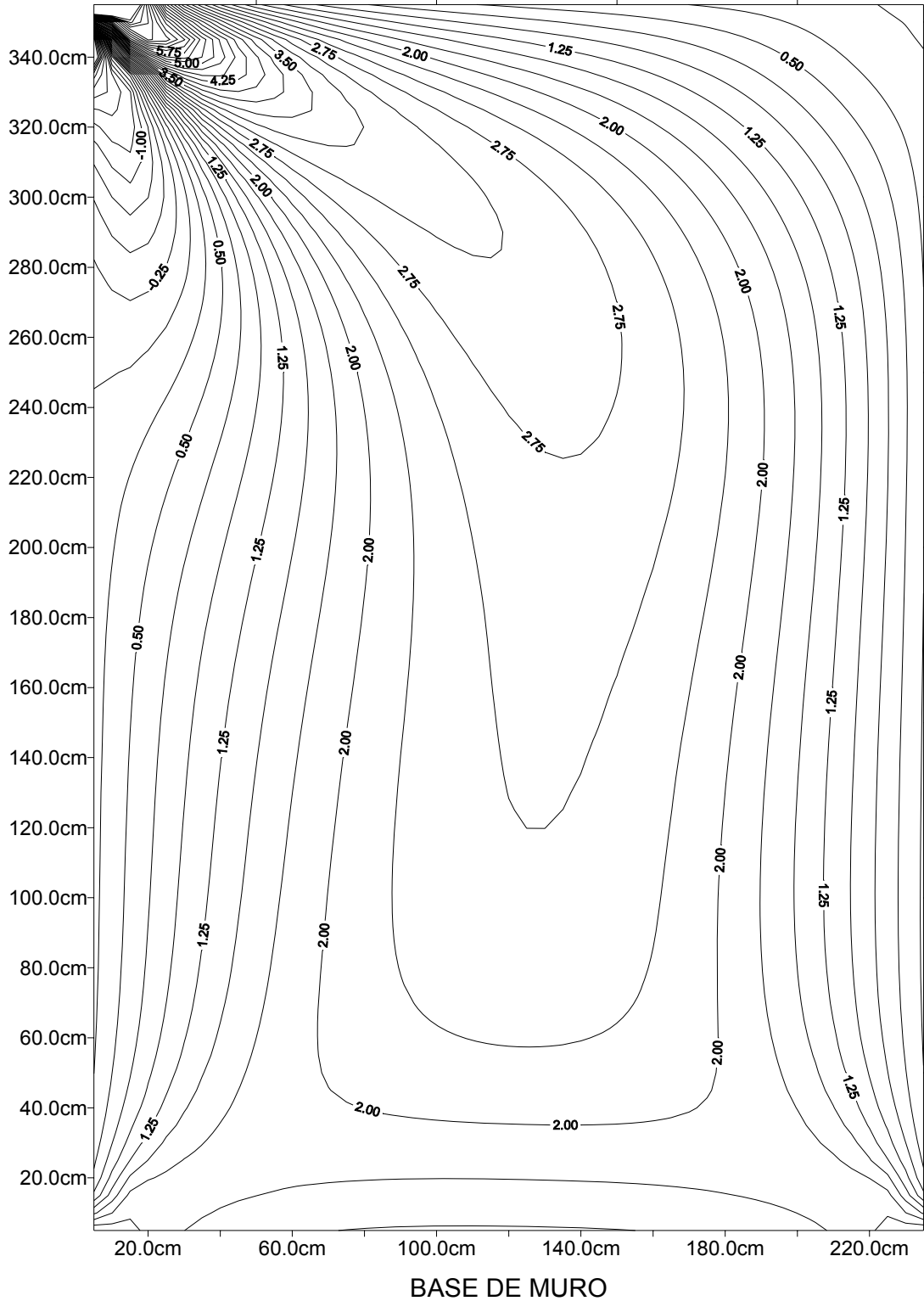


FIGURA No.59  
ESFUERZOS DE CORTE , CASO No.11 ( $\text{kg/cm}^2 \times 10^{-1}$ )  
ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO



## L. Deformaciones y rigidez

Con el análisis de cada caso por elementos finitos también fueron calculadas las deformaciones en el muro para la carga de 1000 kg. Debido a que la Rigidez esta definida como la fuerza requerida para provocar una deformación unitaria en determinado nudo de un elemento, es posible determinar la rigidez del muro utilizando las deformaciones obtenidas en el nudo donde se aplica la carga en mención.

A cada caso le fue calculada su rigidez relativa respecto de la rigidez del caso No. 11 que corresponde al muro sin aberturas, esto se hizo para evaluar la degradación de la rigidez del muro dependiendo del tamaño y ubicación de las aberturas.

Las deformaciones de cada caso juntamente con el cálculo de su respectiva rigidez y rigidez relativa se indican en la tabla No. 2. La tabla se ha ordenado de forma descendente con los valores de la rigideces.

TABLA No. 2  
DEFORMACIONES, RIGIDECES Y RIGIDECES RELATIVAS

TIPO DE ABERTURA	CASO No.	% DE REDUCCIÓN DE ÁREA.	DEFORMACIÓN EN X (CM) CON FUERZA DE 1000 KG.	RIGIDEZ (kg/cm)	RIGIDEZ RELATIVA %
Sin aberturas.	No.11	0.00	0.00386	259067.36	100.00
Una pequeña simétrica	No.1	1.85	0.00397	251889.17	97.23
Una pequeña asimétrica.	No.6	1.85	0.00401	249376.56	96.26
Dos pequeñas simétricas.	No.3	3.70	0.00412	242718.45	93.69
Dos pequeñas asimétricas.	No.8	3.70	0.00412	242718.45	93.69
Tres pequeñas simétricas.	No.5	5.56	0.00431	232018.56	89.56
Una grande simétrica.	No.2	7.41	0.00452	221238.94	85.40
Una grande asimétrica.	No.7	7.41	0.00469	213219.62	82.30
Seis pequeñas simétricas.	No.10	9.52	0.00480	208333.33	80.42
Dos grandes asimétricas.	No.9	14.81	0.00539	185528.76	71.61
Dos grandes simétricas.	No.4	14.81	0.00567	176366.84	68.08

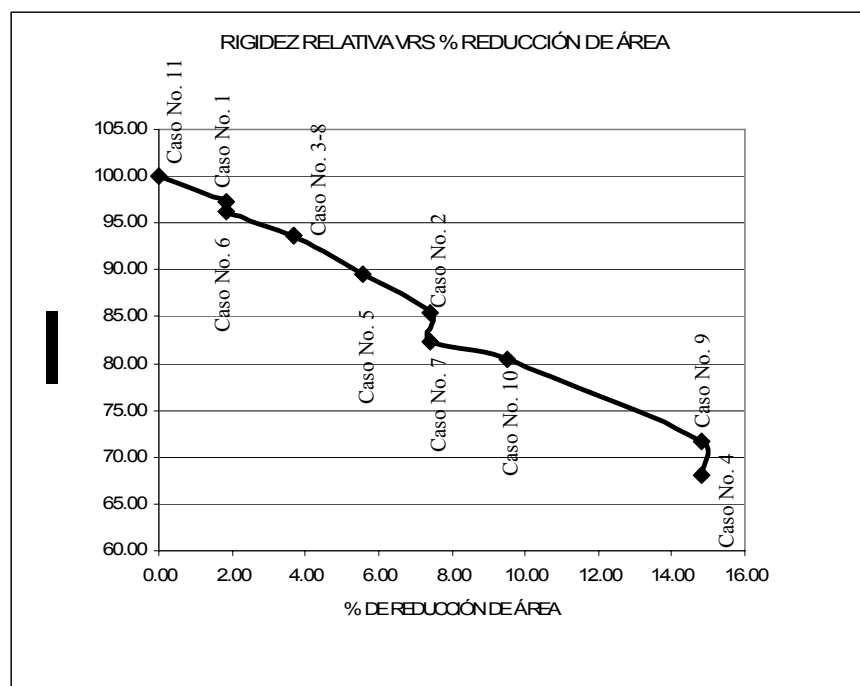
## M. Análisis comparativo de resultados

Para fines prácticos de análisis de muros de cortante es posible utilizar el método puntal-tensor, pero no se pueden comparar entre si los resultados obtenidos para cada uno de los casos en estudio debido a que para cada caso, la geometría del modelo puntal-tensor cambia, consecuentemente la magnitud de las fuerzas de cada elemento también cambia dependiendo de que tan fina sea la retícula o armadura del modelo puntal-tensor.

Las comparaciones del comportamiento de los casos en estudio se realizará con los resultados del método por elementos finitos.

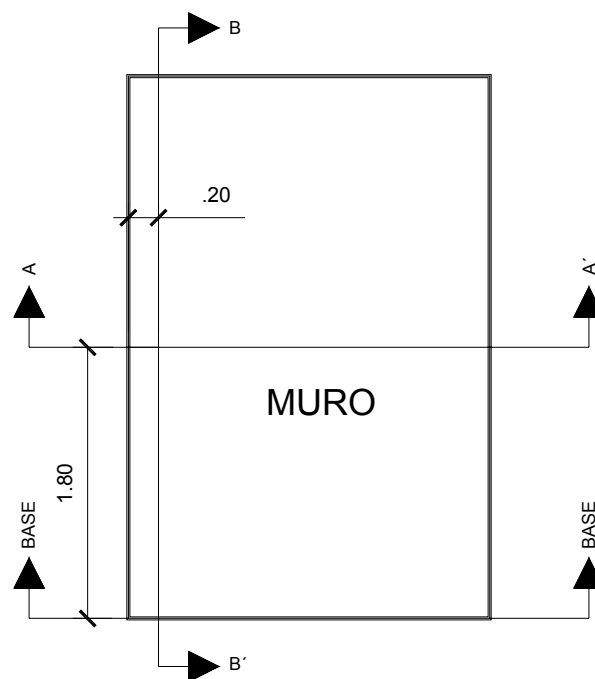
Para determinar como varía la rigidez relativa de los muros respecto del porcentaje de reducción en el área del mismo, se grafican sus valores obteniendo la figura No. 60, en donde se puede observar que la relación entre ambas tiende a ser lineal. Las zonas irregulares de la gráfica corresponden a los casos con aberturas asimétricas, ya que el porcentaje de reducción de área es el mismo, pero su rigidez no.

GRAFICA No. 60.  
RELACIÓN ENTRE ÁREA Y RIGIDEZ DE MUROS.



La comparación de esfuerzos en el sentido del eje “X” (horizontales), en el sentido del eje “Y” (verticales) y los esfuerzos cortantes, se realizará tomando los valores máximos de cada uno de ellos en los puntos de las esquinas de las aberturas, y en secciones de referencia, siendo estas secciones la base del muro, la sección A-A’, sección B-B’ como se indica en la figura No. 61.

FIGURA No. 61.  
SECCIONES DE REFERENCIA PARA COMPARACIÓN DE ESFUERZOS.



Los esfuerzos horizontales, verticales y cortantes en las esquinas de las aberturas tienden a crecer conforme la rigidez del muro se degrada, sin embargo, la magnitud de estos esfuerzos es influenciada por la ubicación de la abertura dentro del muro. Las esquinas que presentaron esfuerzos mayores fueron aquellas en la que el área del muro es estrangulada con un extremo del muro como en el caso No.7 en la esquina superior derecha de la abertura, o bien como en el caso No. 4 donde el área es estrangulada entre las dos aberturas “forzando” a los esfuerzos a distribuirse en ese sector.

FIGURA No. 62.

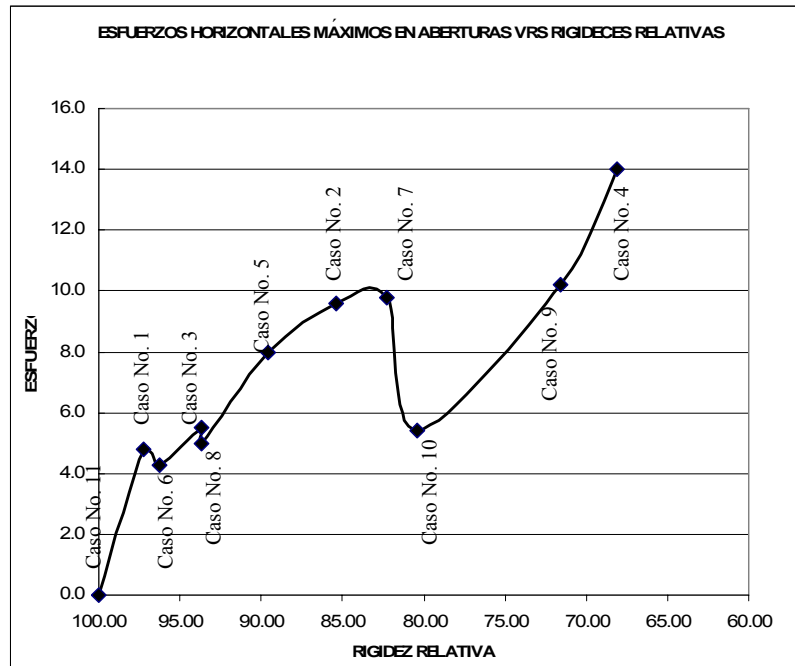
ESFUERZOS HORIZONTALES (KG/CM<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>) MÁXIMOS EN ESQUINAS DE ABERTURAS.

FIGURA No. 63.

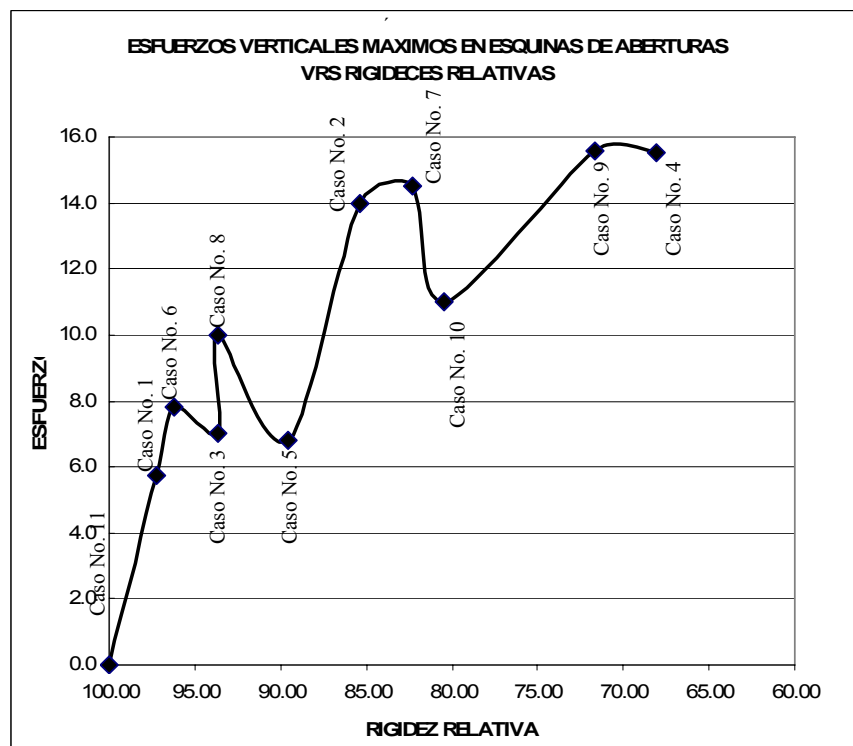
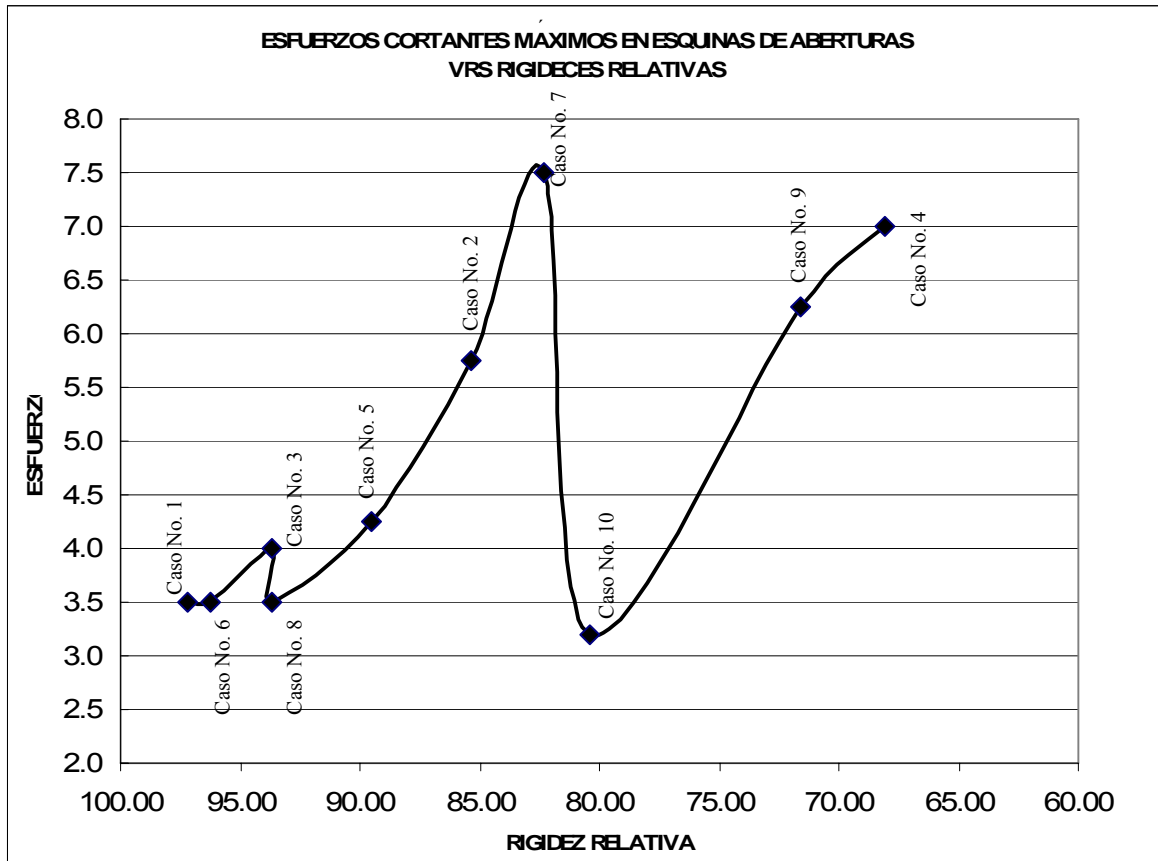
ESFUERZOS VERTICALES (KG/CM<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>) MÁXIMOS EN ESQUINAS DE ABERTURAS.

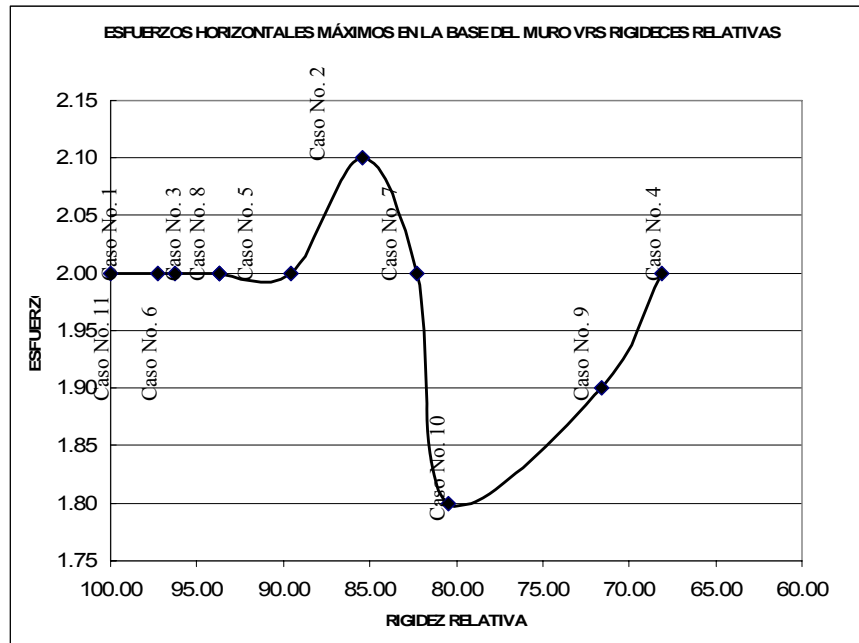
FIGURA No. 64.  
 ESFUERZOS CORTANTES (KG/CM<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>) MÁXIMOS EN ESQUINAS DE ABERTURAS.



En la base los esfuerzos horizontales tienden mantenerse el mismo rango con pequeñas variaciones, sin importar la degradación de la rigidez del muro. Como se puede notar en la figura No. 65, estos esfuerzos oscilan entre 1.8 y 2.1 kg/cm<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>.

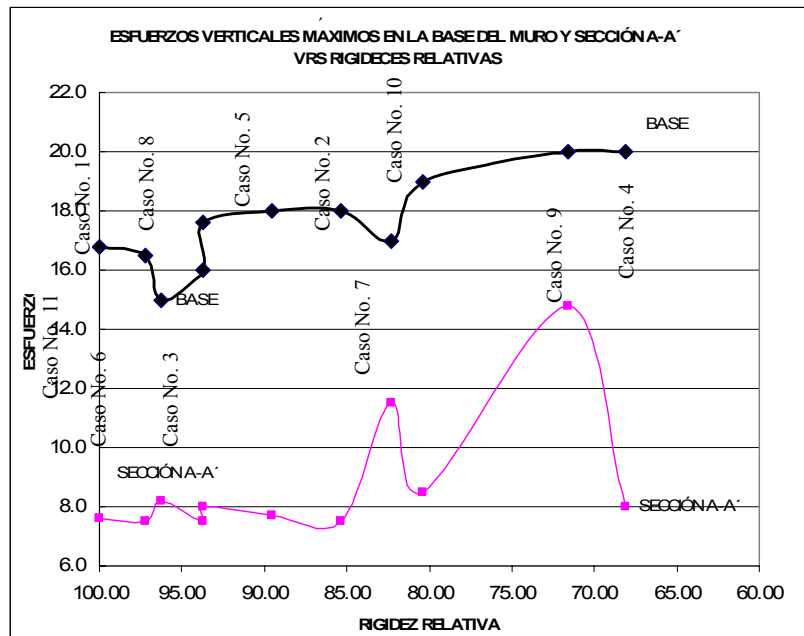
Las zonas que presentan mayores esfuerzos horizontales son aquellas que están localizadas inmediatamente arriba y debajo de las aberturas, es decir dintel y sillar respectivamente.

FIGURA No. 65.  
 ESFUERZOS HORIZONTALES (KG/CM<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>) MÁXIMOS EN LA BASE.



Los esfuerzos horizontales y verticales tienden a crecer hacia la base del muro, siendo los esfuerzos horizontales en la sección A-A' muy cercanos a cero. En la figura No. 66 se plotean los esfuerzos verticales tanto en la base como en la sección A-A' del muro.

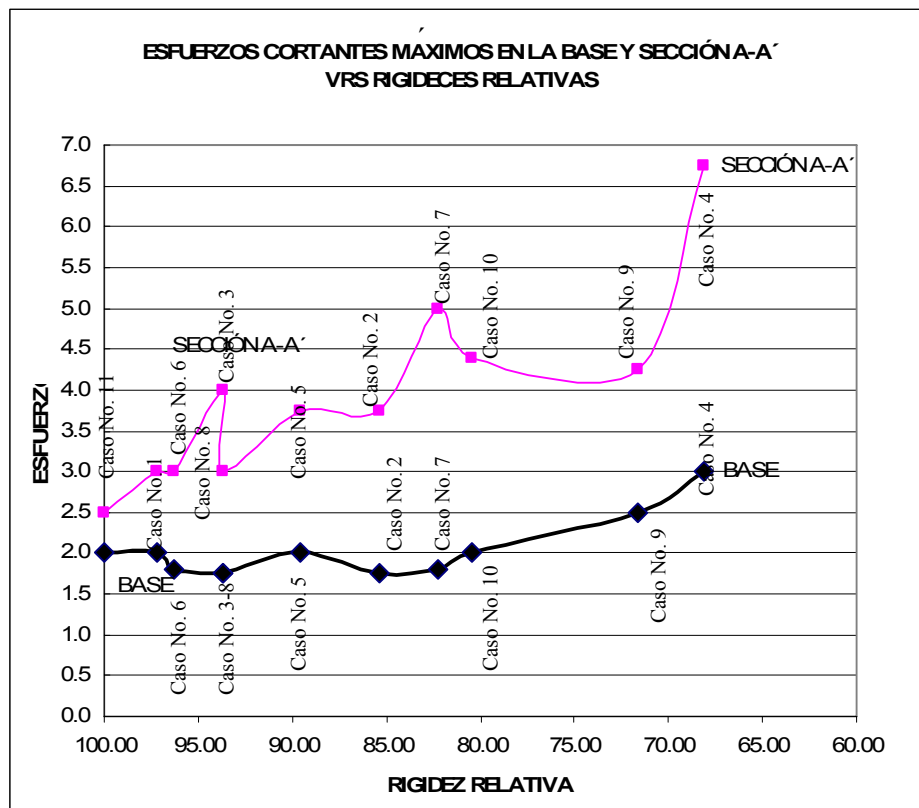
FIGURA No. 66.  
 ESFUERZOS VERTICALES (KG/CM<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>) MÁXIMOS EN LA BASE Y SECCIÓN A-A'.



Los esfuerzos cortantes tienden a decrecer hacia la base del muro como está graficado en la figura No. 67. En la evaluación de resultados de los diferentes casos, se observó que los sectores con esfuerzos cortantes mayores, son aquellos que se encuentran adyacentes a las aberturas, tanto como arriba-abajo e izquierda-derecha.

FIGURA No. 67.

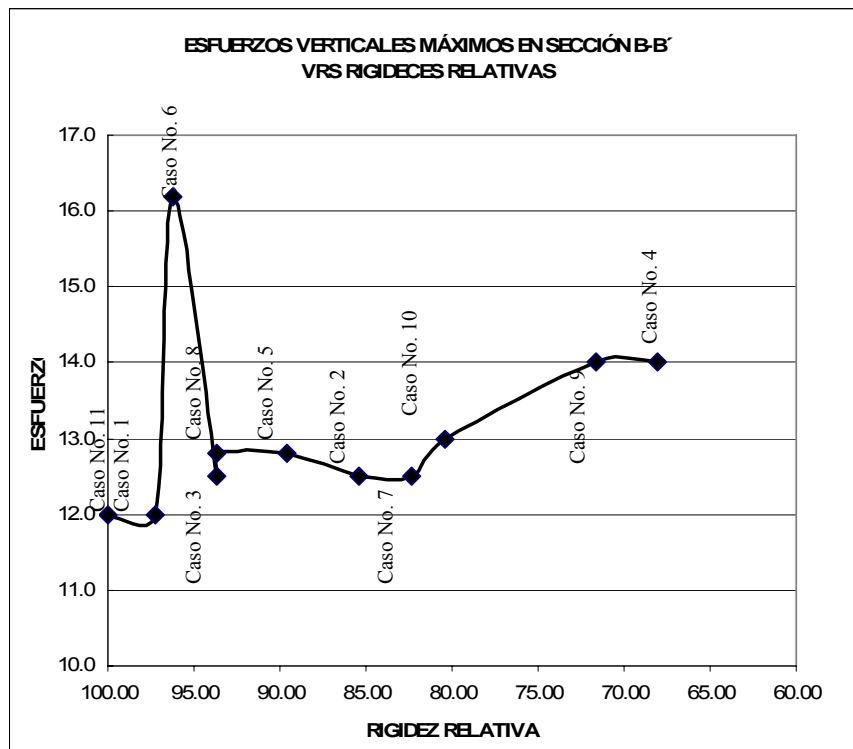
ESFUERZOS CORTANTES (KG/CM<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>) MÁXIMOS EN LA BASE Y SECCIÓN A-A'.



La simetría de distribución de los esfuerzos verticales, se ve influenciada por la existencia de aberturas. Si las aberturas son simétricas también la distribución de esfuerzos verticales lo será. Cuando existen aberturas asimétricas, el valor neutro del esfuerzo vertical se mueve al lado contrario de la ubicación de la abertura, lo que ocasiona que en los extremos de la base del muro las magnitudes de estos esfuerzos no sea igual.

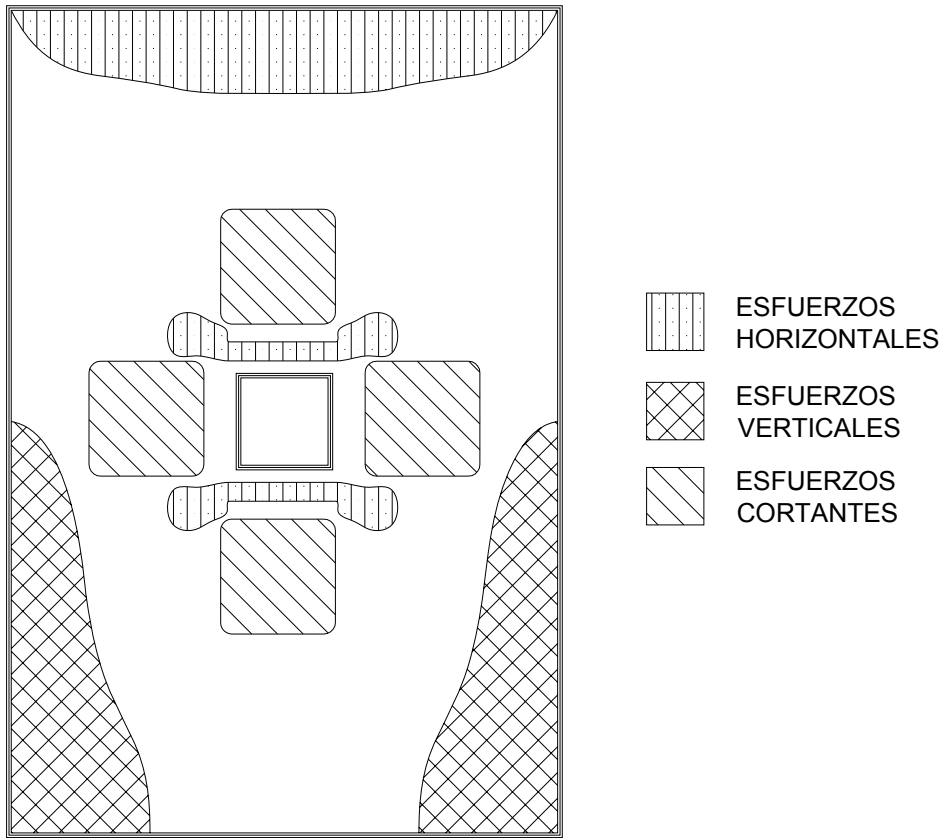
En la figura No. 68, se muestran los esfuerzos verticales máximos en el plano B-B', respecto de la rigidez relativa de cada caso.

FIGURA No. 68.  
ESFUERZOS VERTICALES (KG/CM<sup>2</sup> x 10<sup>-1</sup>) MÁXIMOS EN SECCIÓN B-B'.



Como se pudo observar, el comportamiento de los muros de corte depende de la geometría y ubicación de las aberturas, pero de forma generalizada se puede establecer que las áreas en donde ocurren los esfuerzos horizontales, verticales y de corte máximos, son aquellas que se indican en la figura No. 69.

FIGURA No. 69.  
SECTORES DE ESFUERZOS MÁXIMOS EN MUROS CON ABERTURAS  
BAJO CARGA LATERAL



## VII. CONCLUSIONES

Si no se posee una herramienta para realizar un análisis por elementos finitos, el análisis de puntal-tensor proporciona una solución poderosa para resolver problemas de elementos con geometría irregular que los métodos convencionales no pueden resolver.

El método puntal-tensor proporciona resultados conservadores al concentrar las fuerzas resistentes en elementos de una armadura equivalente, obviando la contribución en resistencia del área del muro entre dichos elementos. Si la retícula de la armadura del método puntal-tensor es muy fina, los resultados que proporcione se aproximarán mucho más a los de un análisis por elementos finitos.

Considerando los casos en estudio de este trabajo, el tamaño de las aberturas es el factor que produce mayor degradación de la rigidez en los muros, seguida por la asimetría en la ubicación de la abertura. A menor área del muro menor rigidez. Muros con igual área reducida, el que tenga una configuración asimétrica será el que generalmente tenga menor rigidez.

La existencia de aberturas en muros de cortante genera zonas de distorsión en la distribución de esfuerzos en el plano del muro, provocando una concentración mayor en las esquinas de la abertura. Si la abertura está ubicada cerca de un borde del muro, también genera distribuciones no uniformes de los esfuerzos en ese borde.

En los casos analizados, se encontró que los esfuerzos máximos en muros con aberturas siempre ocurren en sectores específicos. Los máximos esfuerzos horizontales aparecen en la parte superior del muro, arriba y debajo de la abertura. Los esfuerzos verticales máximos ocurren en los bordes laterales del muro y cerca de la base. Los esfuerzos cortantes máximos en las áreas a los costados, arriba y debajo de la abertura.

## VIII. RECOMENDACIONES

Si la existencia de aberturas en un muro de corte es imprescindible, es preferible que éstas sean simétricas para que el muro tenga un mejor desempeño, aunque no hay impedimento en que sean asimétricas siempre que se tomen en cuenta las consideraciones de distorsión de esfuerzos y rigidez ya mencionada, pero habrá que evitar que su ubicación sea muy cercana a los límites laterales del muro para no comprometer la existencia e integridad estructural de los elementos de borde.

Se deberá poner especial atención al diseño del refuerzo en las esquinas de las aberturas por ser una zona conflictiva en la concentración de esfuerzos en los muros bajo carga lateral.

Es necesario que para cada proyecto específico en el que interactúen marcos y muros de cortante con aberturas, se realice una evaluación del tamaño y ubicación de estas aberturas y el cálculo de las rigideces de muros y marcos, ya que al degradar la rigidez del muro, se incrementarán las demandas cortantes sobre los marcos.

De acuerdo a los resultados obtenidos, muros con aberturas pequeñas que representen una reducción del área no mayor al 1.50%, podrían analizarse como un muro sin aberturas ya que la rigidez disminuye en menos de un 3%, reforzando convenientemente los bordes de la aberturas en mención.

## IX. BIBLIOGRAFÍA

American Concrete Institute. 2002. *Building Code Requirements for Structural Concrete (318-02) and commentary (318R-02)*.

International Conference of Building Officials. 1997. *Uniform Building Code* Fifth Edition. United States. Volume 2. 492 pages.

Portland Cement Association. 2002. *Notes on ACI 318-02 Building Requirements for Structural Concrete*. Eighth edition. United States.

Portland Cement Association. 1977. *Interacción Estructural en Marcos y Muros de Cortante*. Primera edición español. 51 paginas.

Taylor, Christopher. Cote, Paul. Wallace, John. 1998. *Design of Slender Reinforced Concrete Walls with Openings*. ACI Structural Journal. 14 pages.

Yanez, F. V. Park, R. and Paulay, T. 1991. *Seismic Behavior of Reinforced Concrete Structural Walls With Regular and Irregular Openings*. Pacific Conference on Earthquake Engineering, New Zealand.

Wallace, John. Thomsen, John. 1993. *Seismic Design of Reinforced Concrete Structural Walls*. Department of Civil Engineering Clarkson University, Postdam New York. 88 pages.