RESPUESTA SÍSMICA DE PÓRTICOS CON HORMIGONES DE ALTO DESEMPEÑO

Ing. Hugo A. CUNEO SIMIAN

Profesor Titular U.N.C. - U.T.N.

Ing. Mario Alberto NIETO

J.T.P. - Jefe de Proyectos G.I.I.I. - U.T.N.

RESUMEN

Los hormigones de alto desempeño [HAD], como se conoce, tienen ventajas en comparación con los hormigones usados habitualmente en las estructuras resistentes entre las cuales pueden destacarse: condiciones de trabajabilidad muy convenientes, buenas posibilidades de bombeo, facilidad de compactación y segregación baja.

Se hace referencia a Ensayos realizados en el Departamento de Estructuras de la Universidad Nacional de Córdoba sobre hormigones de alta resistencia, dirigidos por uno de los autores de este Trabajo y a las importantes experiencias efectuadas por investigadores argentinos y extranjeros, para justificar la elección de los parámetros mecánicos y elásticos correspondientes a los HAD usados en los pórticos que aquí se estudian.

La modelación de estos elementos aporticados se ha basado libremente en la tipología de la estructura de hormigón armado de unas torres de departamentos construidas en la ciudad de Córdoba.

Luego de definidas las dimensiones de las secciones , usando exclusivamente en la etapa del predimensionamiento el método estático ya que la altura de los pórticos supera el limite reglamentario, se efectuaron los análisis sucesivos por superposición modal para determinar la respuesta sísmica de estas estructuras diseñadas con los cuatro HAD elegidos para este estudio.

Se transcriben y discuten parte de los numerosos valores obtenidos como resultados de los análisis estructurales respectivos, los cuales generan las conclusiones que sintéticamente se incluyen en el Trabajo.

PALABRAS CLAVES: Respuesta Sísmica - Hormigones de Alto Desempeño - Modos de vibración - Superposición Modal.

HORMIGONES DE ALTO DESEMPEÑO

De acuerdo con los antecedentes obtenidos de una importante cantidad de obras realizadas en distintos países (Refs. 10, II),se resumen a continuación algunas de las especificaciones técnicas a tener en cuenta para la producción de los HAD.

Los agregados mas adecuados son los triturados de origen: basáltico, granítico, calizo y silícico con TM no superior a los 20 mm., preferentemente de 8 a 12 mm. El AF se seleccionará con MF en el orden de 3.

Es recomendable, por otra parte, el uso de superfluidificantes en la mayor dosis posible. Es también aconsejable la incorporación en la mezcla de súperpuzolanas: microsílice, ceniza volante-y escoria de altos hornos granulada.

El cemento elegido deberá asegurar la resistencia deseada con granulometría entre 3 y 30 µm y un porcentaje alto de silicato bicálcico.

MÓDULOS DE ELASTICIDAD DE LOS HAD

En general el módulo de elasticidad de los HAD aumenta con el crecimiento de su resistencia, no obstante lo dicho su variación es notoriamente menor en relación a la respectiva resistencia a compresión (1,2,3).

Para incluirlos en los análisis de los pórticos elegidos para ser solicitados dinámicamente durante el desarrollo de este Traba)o, se seleccionaron los valores de los módulos E para los HAD de acuerdo con : valores experimentales de las investigaciones realizadas en el Departamento de Estructuras de UNC ya mencionadas (2,3), estudios y ensayos de investigadores argentinos y extranjeros y criterios propuestos en Reglamentos y Códigos (1). En la Fig. 1 se transcriben los principales resultados de las experiencias efectuadas en el Departamento de Estructuras de la UNC y en la Fig. 2 se resumen los: análisis, estudios, ensayos y criterios reglamentarios según los autores que allí se indican. Durante el presente estudio no se incluyen los parámetros propiamente dinámicos generados en los HAD por las solicitaciones sísmicas actuantes (15).

CARACTERÍSTICAS DE LOS PÓRTICOS

Para desarrollar el análisis estructural que de la respuesta sísmica en los pórticos diseñados con HAD, se los ha modelado usando libremente como referencia a la tipología estructural de unas torres de departamentos de veinte pisos construidas recientemente en la ciudad de Córdoba (14).- De esta manera ha sido elegido el pórtico a estudiar con (4) cuatro vanos iguales y con (60) metros de altura, el cual en la primera etapa fue predimensionado seccionalmente con H-21 por el método estático (con las salvedades ya hechas) aplicando los espectros del INPRES-CIRSOC 103 correspondientes según Fig. 3 y los espectros "El Centro" según Fig. 4.

Luego de realizados los sucesivos reajustes de las dimensiones para los otros tres HAD elegidos: H-41 , H-61 y H-81, se definieron las características definitivas a usar durante el análisis estructural propuesto que ha continuación se muestran en el Cuadro l.

CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DE LOS PÓRTICOS ESTUDIADOS

Hormigones: H-21 , H-41 , H-61 y H-81

Zona Sísmica: 1

Suelo: Tipo III

Destino: Grupo B

Ductilidad Global: 3,5

Altura Total: 60 m

Secciones Nº	Horm. H21 B[cm] H[cm]	Horm. H41 B[cm] H[cm]	Horm. H61 B[cm] H[cm]	Horm. H81 B[cm] H[cm]
1	20x40	20x30	20x30	20x25
2	20x50	20x40	20x35	20x30
3	65x65	50x50	45x45	40x40
Módulo Eb [MPa]	30 000	37 000	41 500	44 000
Densidad [kN/m³]	24	24	25	26
Peso Total del Pórtico [kN]	3500	2400	2090	1750

En la Fig. 5 se relacionan los valores experimentales de la densidad con la resistencia de algunos de los HAD usados en los pórticos. En la Fig. 6 se nuestra la numeración elegida para los nudos de los pórticos. En la Fig. 7 se identifican los tipos de secciones de las vigas y columnas de estas estructuras de HAD, en función de las dimensiones y materiales respectivas. En la Fig. 8 se grafican comparativamente los esfuerzos de corte en los distintos niveles de piso de cada uno de los cuatro pórticos que se analizan. Los valores representados son los calculados por el MEE.

RESPUESTA SÍSMICA DE LOS PÓRTICOS

Como es conocido (12) el método de descomposición modal [INPRES- CIRSOC 103 " I " - Cap. 14.2] aplicado a estructuras elásticas permite la obtención de n formas de desplazamiento independientes: las formas modales propias de vibración. Estas son consideradas como coordenadas a las cuales se refieren los desplazamientos de respuesta de la estructura.

Si el sistema de ecuaciones dinámicas para un pórtico con n grados de libertad es:

$$M\ddot{D} + Ca\ \dot{D} + Cr\ D = -M\ Ja(t)$$

el sistema libre no amortiguado oscilará según el siguiente sistema de ecuaciones:

$$M\ddot{D} + Cr\ D = 0$$

que tiene n frecuencias propias y n vectores propios que son la solución del sistema de ecuaciones algebraicas homogéneo:

$$\left(-\omega^2 M + Cr\right)\varphi = 0$$

Por otra parte los vectores propios (formas modales) son ortogonales con relación a las matrices de masa y de rigidez.- Si $y_{i(t)}$ es un escalar (a determinar) en función del tiempo, se puede escribir :

$$D = \sum_i^n \varphi_i \; y_{i(t)}$$

El sistema de ecuaciones dinámicas, inicialmente anotado, para pórticos de n grados de libertad puede plantearse, como es usual, en función de ω_i que es la frecuencia propia asociada a la forma modal φ_i

Es conveniente recordar que al utilizar el método de descomposición modal, como una consecuencia del modelo discretizado del pórtico y de las simplificaciones del cálculo, se generan mayores errores en las frecuencias a medida que crece el orden de estas de manera que las correspondientes a los primeros modos de vibración son las más exactas.

Además los modos inferiores contienen menor energía elástica de deformación, por cuyo motivo contribuirán en una proporción mayor a la respuesta de los pórticos, mientras que los modos mas elevados aportarán especialmente errores y perturbaciones. Según lo antedicho la última ecuación se puede reemplazar por:

$$D = \sum_i^k \varphi_i \; y_{i(t)}$$

en donde $k \ll n$ o por lo menos $k < n$, obteniéndose así un número de ecuaciones para resolver notoriamente menor que n.

De acuerdo con estos sintéticos antecedentes (9, 13) se modelaron los cuatro pórticos con las dimensiones seccionales obtenidas por el MEE (8) con los HAD ya indicados, en los cuales se aplicaron las acciones sísmicas [según: INPRES-CIRSOC 103 y Espectros "El Centro"] por el método de superposición modal [MSM], seleccionando los resultados solo de los primeros cinco modos.

En la Tabla l se transcriben los resultados logrados para cada pórtico y por cada modo, es decir: autovalores, frecuencias naturales, periodos y nudo con el máximo desplazamiento relativo. En la Tabla 2 se detallan las solicitaciones sísmicas máximas [s/ I-C103, MSM]. En la Fig. 9 se representan comparativamente los valores de los periodos de vibración para cada uno de los primeros cinco modos, correspondientes a cada pórtico. Ya que en las etapas de predimensionamiento también se determinaron las frecuencias de vibración para los cuatro pórticos de HAD en estudio, pero sin cambiar las dimensiones de vigas y columnas al pasar de uno a otro de los pórticos, en la Fig. 10 se reproducen comparativamente las citadas frecuencias así obtenidas, en estos casos para los primeros diez modos.

Aplicando el MSM para obtener el efecto total en la dirección del análisis, se calculó en valor de las aceleraciones correspondientes a cada uno de los niveles de piso del "Pórtico H-61"; en la Fig. 11 se grafican comparativamente estos resultados luego de la acción de los espectros del l-C 103 y del terremoto "El

Centro"; en ambos casos se identifican las curvas para: el primer modo y para la superposición de los cinco primeros modos.

Las configuraciones deformadas del "Pórtico H-81" correspondientes a los primeros cinco modos de vibración se presentan en la Fig. 12.

SOLICITACIONES FINALES EN LOS PÓRTICOS

Con el objetivo de mostrar algunos de los numerosos resultados generados durante el análisis de la respuesta sísmicas de los pórticos en estudio, se incluyen los diagramas de: M_f, para la combinación de estado de carga [I-C 103] 1,3 E_w+E_s, (MSM), M, para la envolvente de ambas y de Desplazamiento en la dirección del análisis para la combinación anotada.

En las: Fig. 13 , Fig. 14 y Fig. 15 se reproducen los diagramas arriba descriptos para los Pórticos: H-41 , H-61 y H-81 respectivamente.

NUDOS VIGA-COLUMNA DE LOS PÓRTICOS

Al diseñar los nudos viga-columna en los pórticos de referencia de acuerdo con el I-C 103 es conveniente tener en cuenta que: ".....en los nudos con ductilidad limitada se estima que los requerimientos de confinamiento (cuantía de la armadura transversal) pueden reducirse en relación con los correspondientes a ductilidad completa....." (7).

Además se recomienda (2,4, 16) una calibración prolija de las ecuaciones propuestas por el I-C 103 para obtener las armaduras transversales de confinamiento cuando se proyecten y construyan estructuras de hormigón armado con los HAD. En la Fig. 16 se muestran las variaciones de la relación Ash/Se (βs=420 MPa) con las dimensiones seccionales de los elementos estructurales y con el crecimiento de la resistencia de los HAD seleccionados para este Trabajo.

CONCLUSIONES

Una consecuencia fundamentada en las informaciones obtenidas de los resultados de ensayos de laboratorio y de numerosas construcciones en diferentes países, es la de destacar que el uso de los HAD involucra, en muchos casos, ventajas técnico-económicas por el aporte a las estructuras de elevados niveles de resistencia y por el logro de durabilidades notoriamente mejoradas.

Por otra parte, la aplicación de los HAD en las estructuras resistentes a la acción de sismos puede ser determinante en la obtención de economías importantes en los costos finales; estando las mismas vinculadas directamente a la implementación simultánea de mejoras en la tecnología usada en la: realización de encofrados, diseño y colocación de armaduras, vertido y terminación de los hormigones. Es decir en el control de calidad integral.

En cuanto a la respuesta propiamente dicha a la solicitación sísmica de los pórticos aquí estudiados se destaca que el incremento de los periodos, para los cinco primeros modos elegidos, con el aumento de la calidad de los HAD en ningún caso implicó variación del valor de Sa.

Como es lógico con la mejora de la resistencia de los HAD disminuye la masa de los pórticos y por lo tanto los valores de las solicitaciones por sismo : N, Q, M también son menores.

Por último, el detallamiento de las armaduras en general y del nudo viga-columna en particular, siempre debe ser motivo de especial atención durante el diseño y construcción de estructuras de Hº Aº resistentes a los sismos; pero con mucho mayor razón debe cuidarse este aspecto cuando se elijan para dichas construcciones los HAD.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1	GAGLIARDI,G.G; WAINSTEIN,M.y Colaboradores 1987	Module de elasticidad y coeficiente de Poisson en hormigones. VII Jornadas Argentinas del Hormigón Pretensado .- La Plata , 1987.
2	CUNEO SIMIAN,H; DURÁN,M.G. 1991	Estructuras dúctiles de hormigón de alta resistencia XI Jornadas Argentinas de Ingeniera Estructural Buenos Aires, 1991.
3	DURÁN,M.G; CUNEO SIMIAN, H. 1992	Hormigones de alta resistencia- Experiencia regional- Córdoba, Argentina.-Revista "Hormigón y Acero" I.C.C.E.T., N°183. Madrid, 1992.
4	GERBAUDO,C; CUNEO SIMIAN,H. 1992	Diseño del nudo viga-columna en estructuras sismorresistentes. XII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural.- Buenos Aires, 1992.
5	BERTERO,V; BERTERO,R.	Diseño sismorresistente de estructuras de gran altura en suelo blando.- XII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural.- Buenos Aires, 1992.
6	PINTO,P.E.1992	EC8: Eurocode para el proyecto de estructuras resistentes a los sismos. IABSE, 1992.
7	GIULIANO,A.P. 1992	Nudos viga-columna: una revisión critica.- Publicación Técnica nº 17, INPRES.- San Juan, 1992.
8	NIETO.M.	Sistema computacional para la aplicación del INPRES-CIRSOC en la enseñanza universitaria. Congreso Córdoba ' 93 .- Córdoba, 1993.
9	RUBINSTEIN,M; MÖLLER,0; DE CAPUA,D; IBANEZ,E. 1993	Análisis comparativo de diferentes estructuras sismo- resistentes típicas.- Congreso Córdoba ' 93. Córdoba, 1993.
10	KONING,G; BERGNER,H; RAINER,G. SIMSCH,G.	Uso del hormigón de alta resistencia en Europa. FIP Notes 1993/4. Londres, 1993
11	Dl PAGE, G. 1993	Hormigón de alto desempeño – Estado del arte : 1993.- Memoria primer post-congreso del hormigón elaborado, Tomo l. Argentina,1993.
12	CANET,MJ; BARBAT A.H. *1993*	Estructuras sometidas a acciones sísmicas. CIMNI. Barcelona, 1993

sísmicas.-CIMNI. Barcelona, 1993.

13 MORK,KJ. 1994 — Análisis de la respuesta de estructuras de hormigón armado bajo excitación sísmica.- Revista "Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural" , Vol.23 – 1994

14 GRAMATICA,S.R. 1994 — Torres de la Plaza, ciudad de Córdoba. Revista "Tribuna de la Ingeniería", Nº73.- Córdoba, 1994.

15 FARRAR,C.R. BAKER,W.E. DOVE,R.G. 1994 — Análisis de parámetros dinámicos en modelos de hormigón.- A.C.I. Structural Journal, Enero /Febrero 1994.

16 CUSSON,D.; PAULTRE,P. 1994 — Columnas de hormigón de alta resistencia confinado con estribos rectangulares. Journal A.S.C.E., Marzo 1994.

RESPUESTA DINÁMICA DE LOS PORTICOS

PORTICO H21				
MODO Nº	**AUTOVALOR**	**FRECUENCIA NATURAL**	**PERIODO**	**NUDO/Dmax**
1	79,71	1,4209	0,70377	103
2	774,8	4,4304	0,22571	103
3	2484,44	7,9329	0,12606	103
4	5652,12	11,9654	0,08357	103
5	10907,74	16,6701	0,05999	103
PORTICO H41				
1	72,86	1,3585	0,70609	103
2	695,16	4,1963	0,23831	103
3	2164,27	7,4042	0,13506	103
4	4783,80	11,0080	0,09084	103
5	9052,59	15,1428	0,06604	103
PORTICO H61				
1	73,16	1,3613	0,73459	103
2	692,41	4,1879	0,23878	103
3	2128,43	7,3426	0,13619	103
4	4632,50	10,8325	0,09231	103
5	8636,72	14,7909	0,06761	103
PORTICO H81				
1	56,98	1,2014	0,83239	103
2	538,73	3,6941	0,27070	103
3	1650,82	6,4665	0,15464	103
4	3600,38	9,5498	0,10471	103
5	6730,39	13,0569	0,07659	103

SOLICITACIONES SÍSMICAS MÁXIMAS [INPRES CIRSOC 103 – MSM]

PORTICO H21				
N max	**Q max**	**M max**	**D max**	**Unidades**
-126,14	16,66	59,01	0,018	KN - m
PORTICO H41				
-84,21	10,65	33,33	0,019	KN - m
PORTICO H61				
-76,11	9,35	26,55	0,019	KN - m
PORTICO H81				
-64,53	7,85	22,58	0,025	KN - m

Tablas 1 y 2

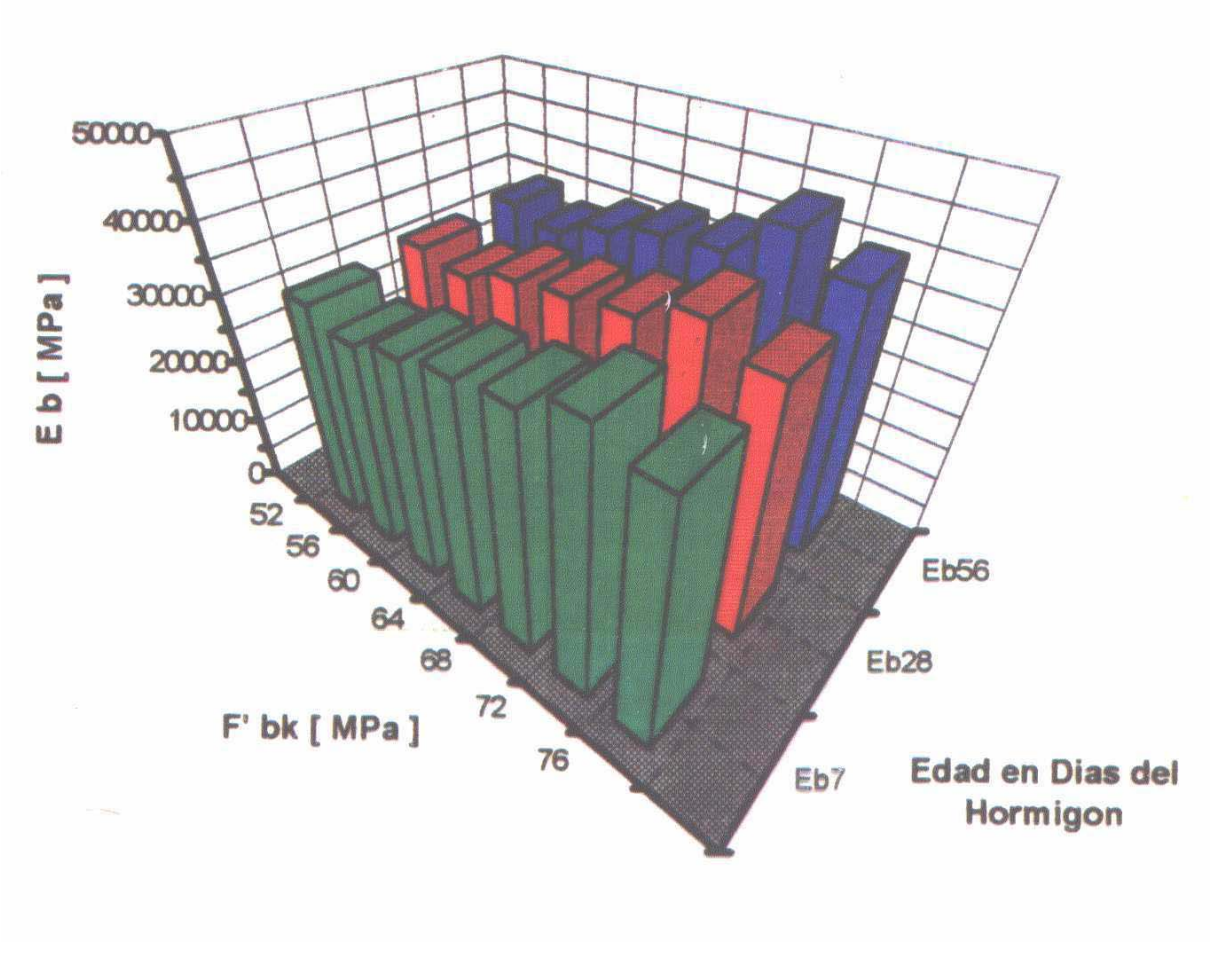

Figura 1

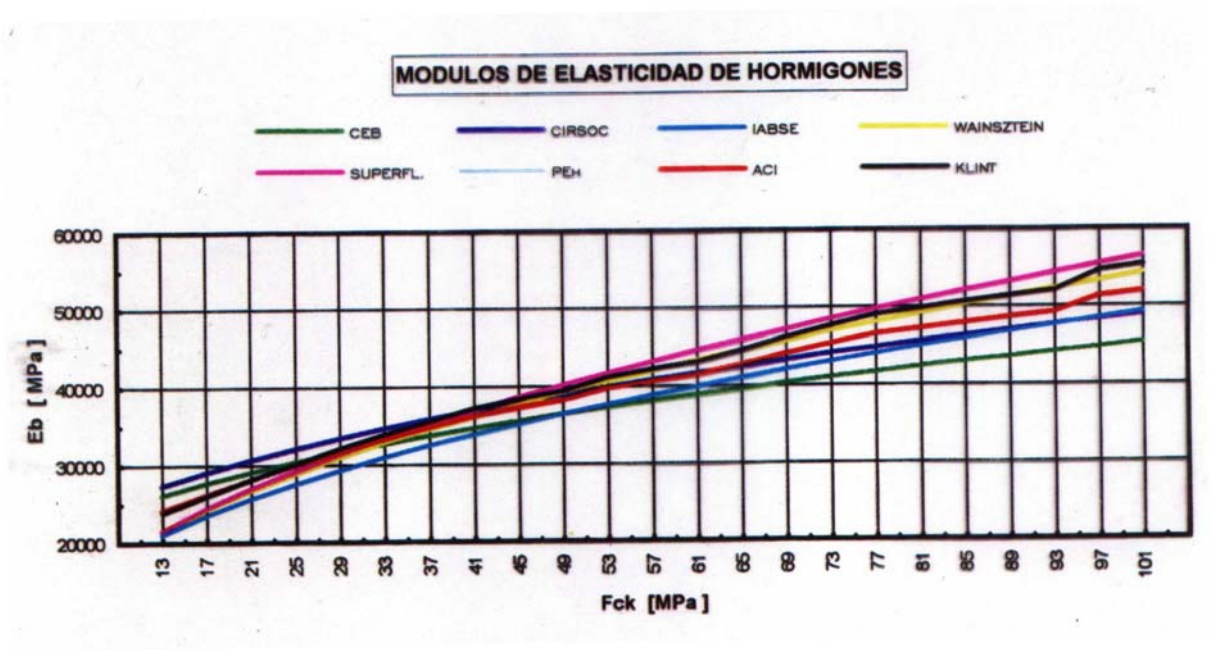

Figura 2

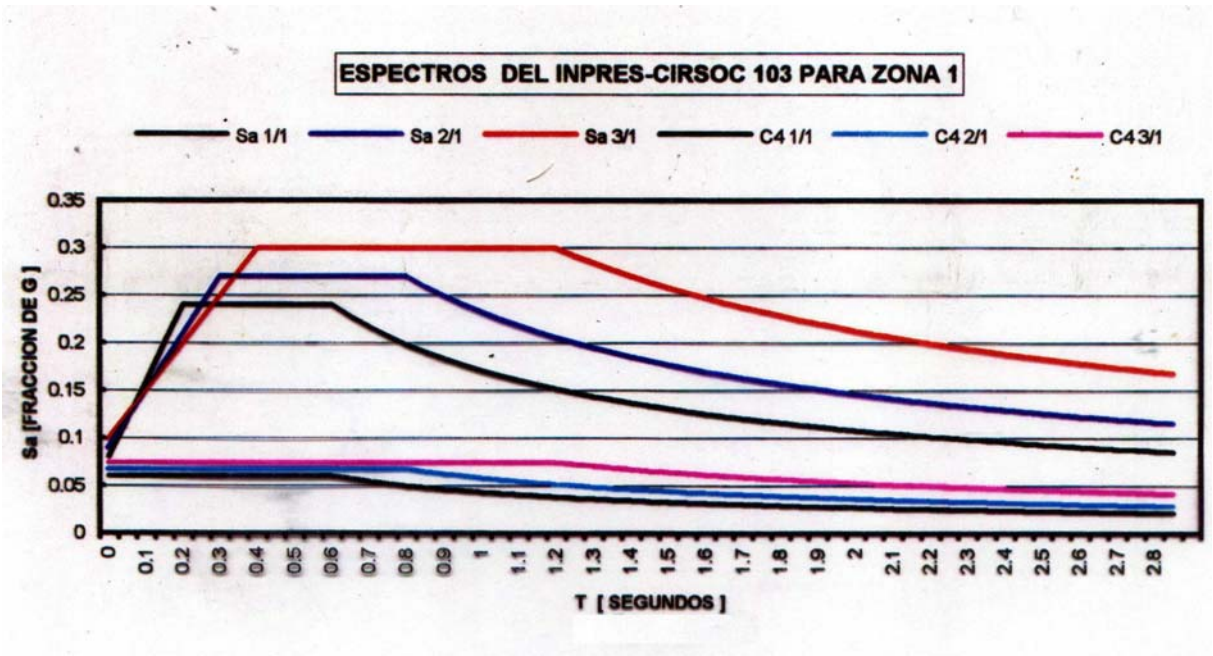

Figura 3

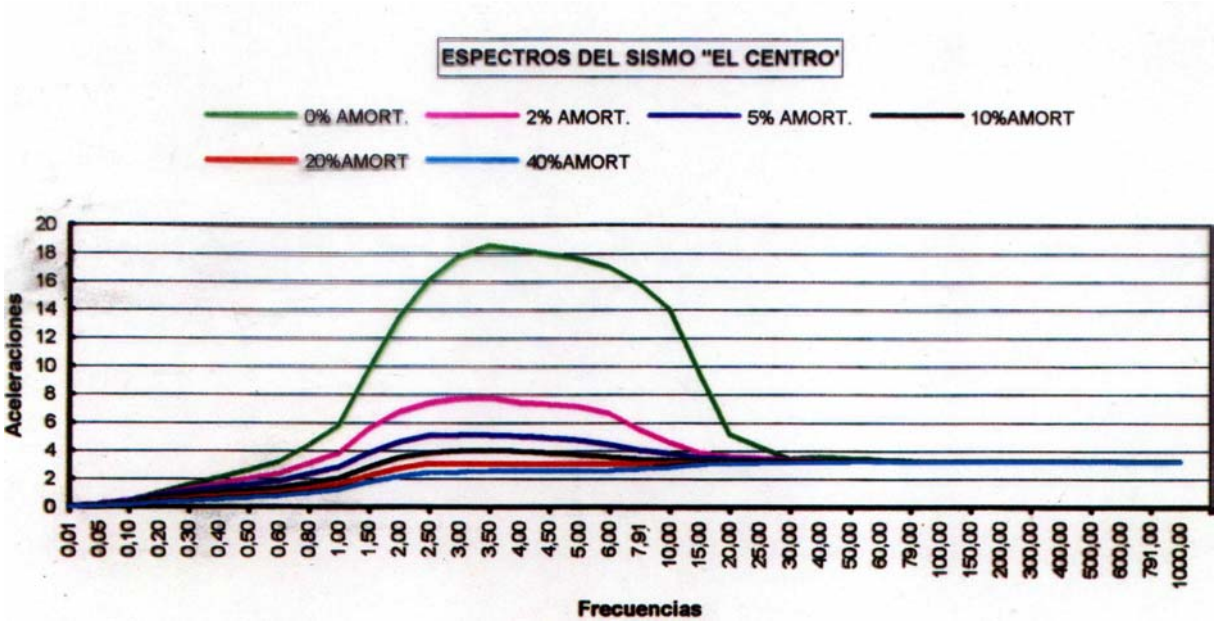

Figura 4

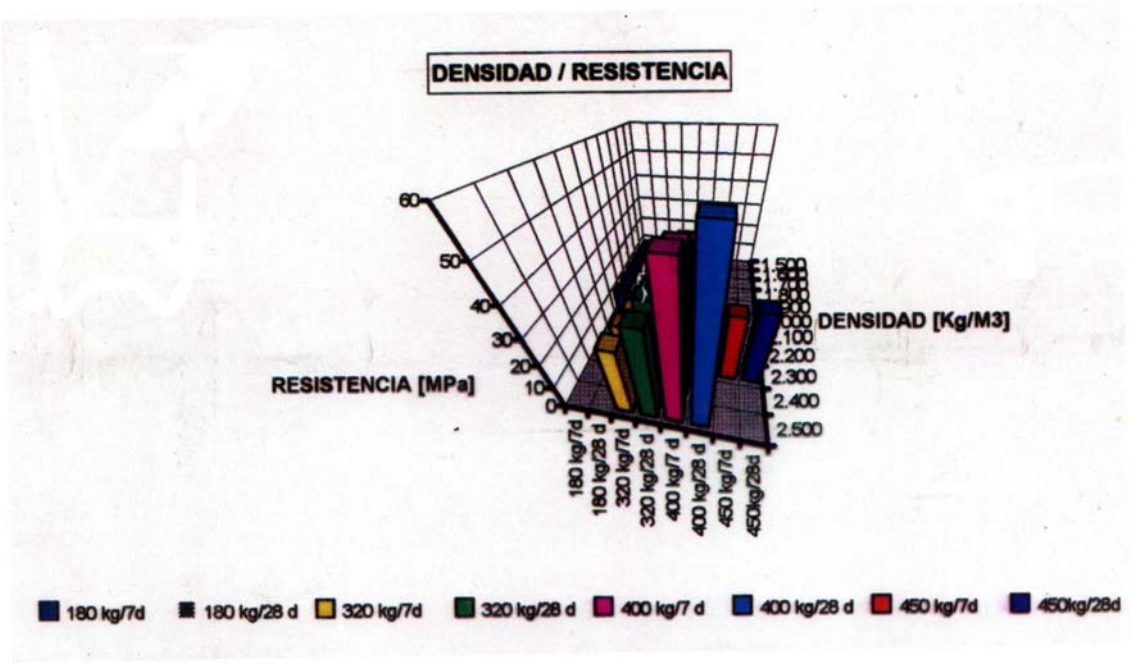

Figura 5

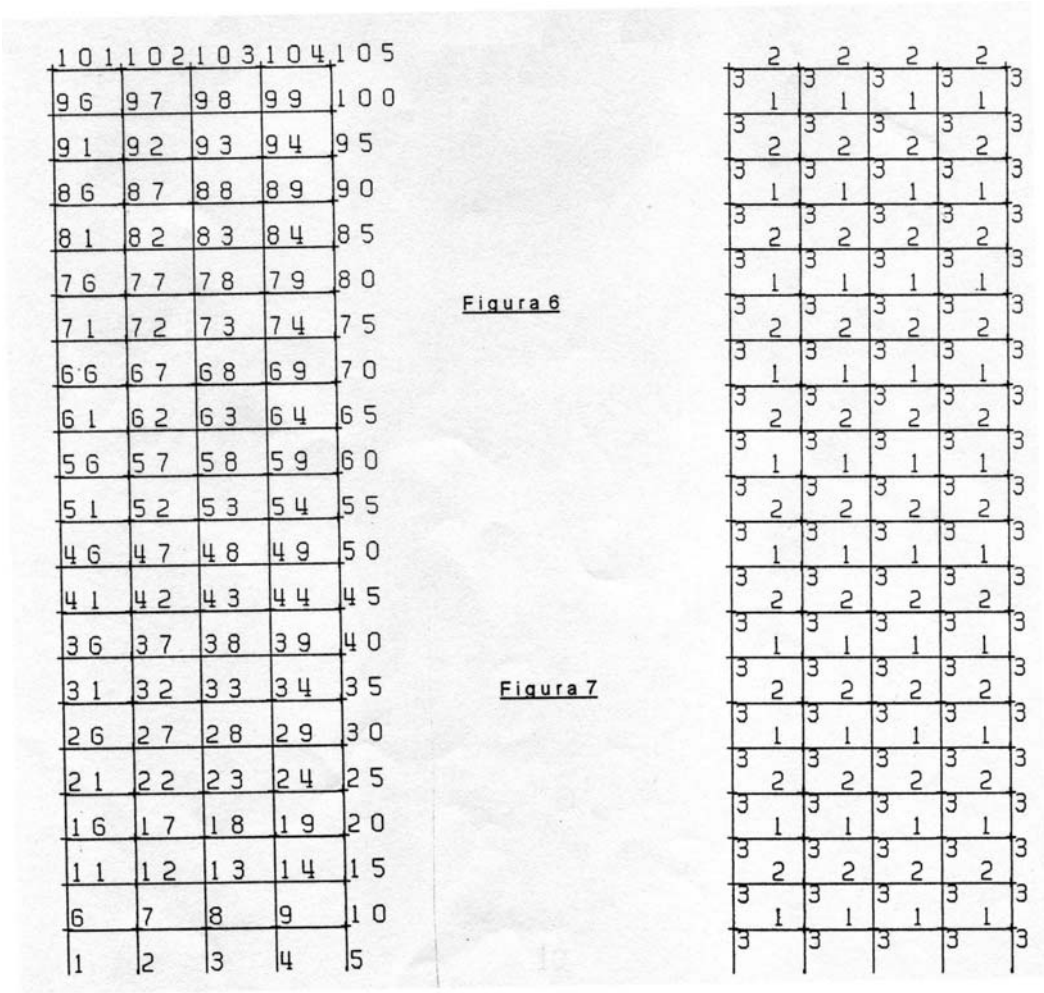

Figura 6 y 7

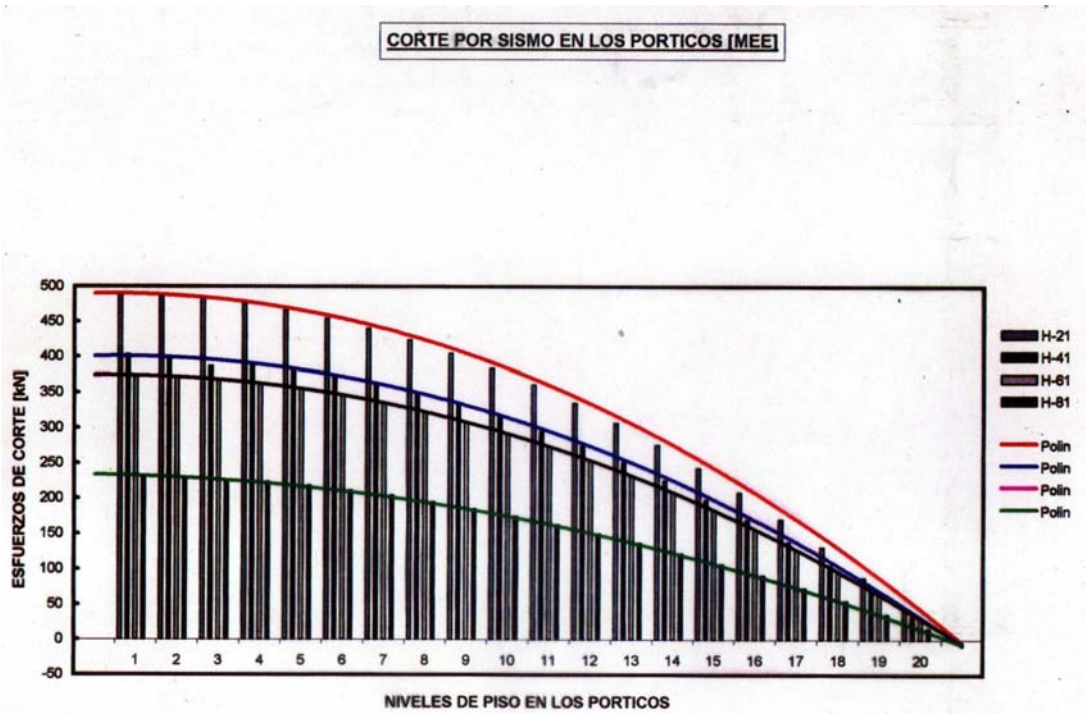

Figura 8

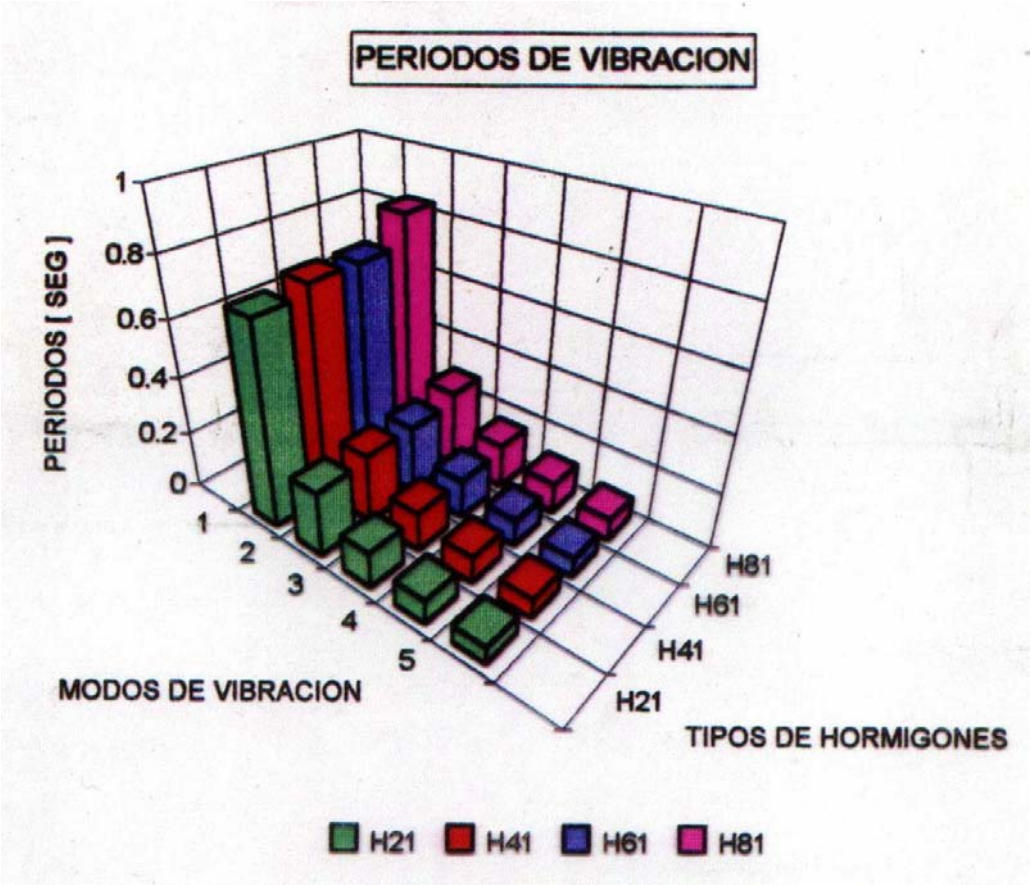

Figura 9

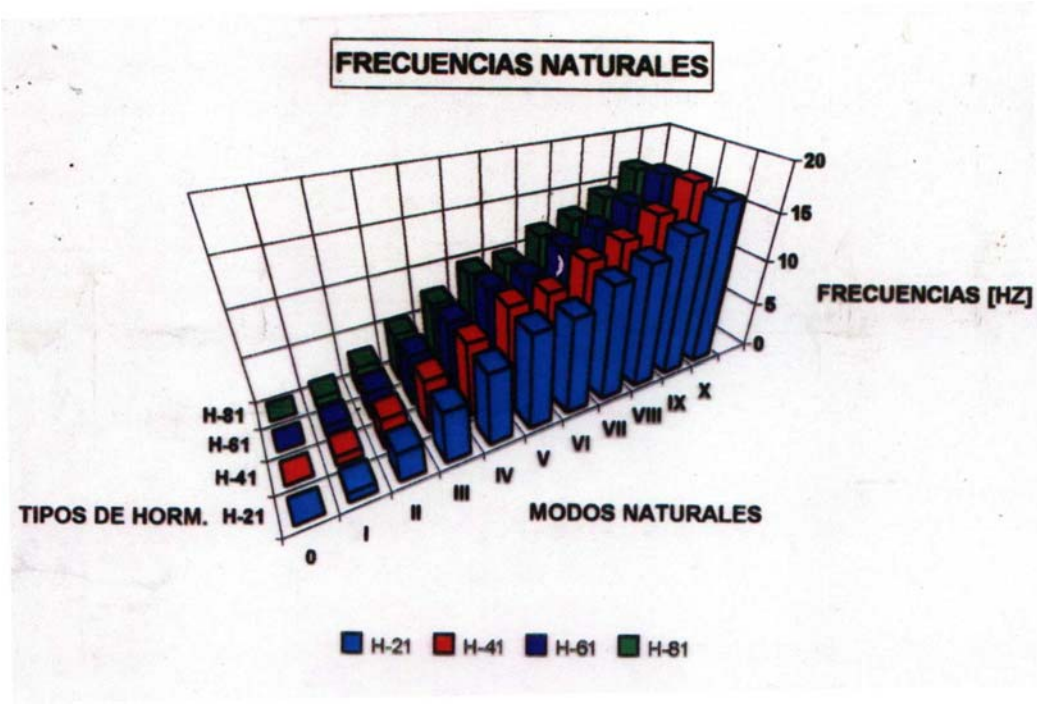

Figura 10

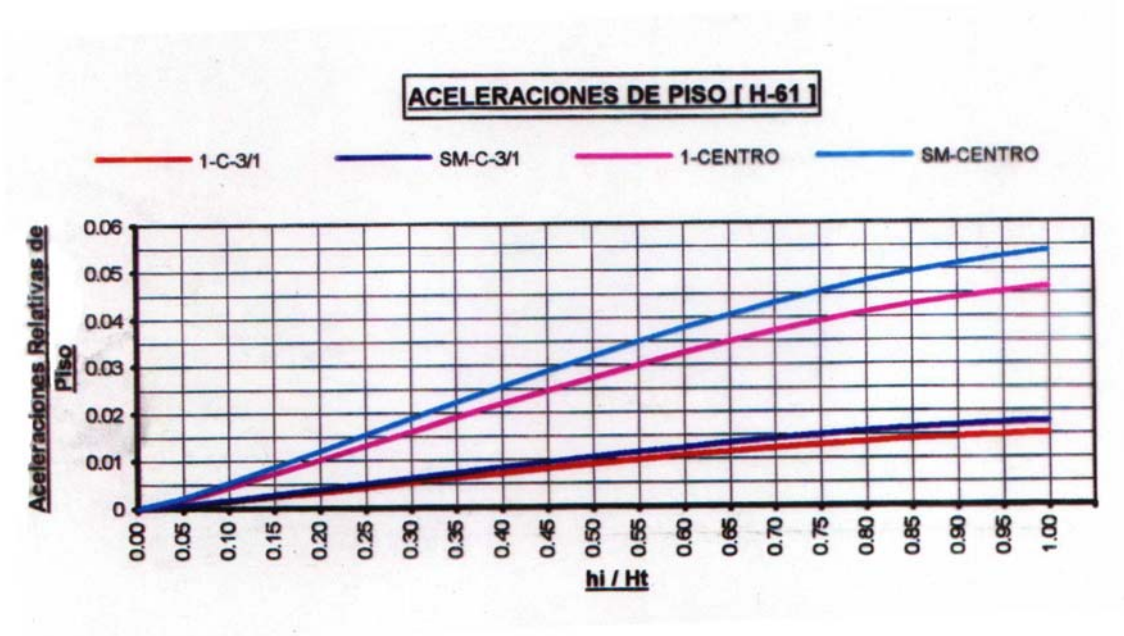

Figura 11

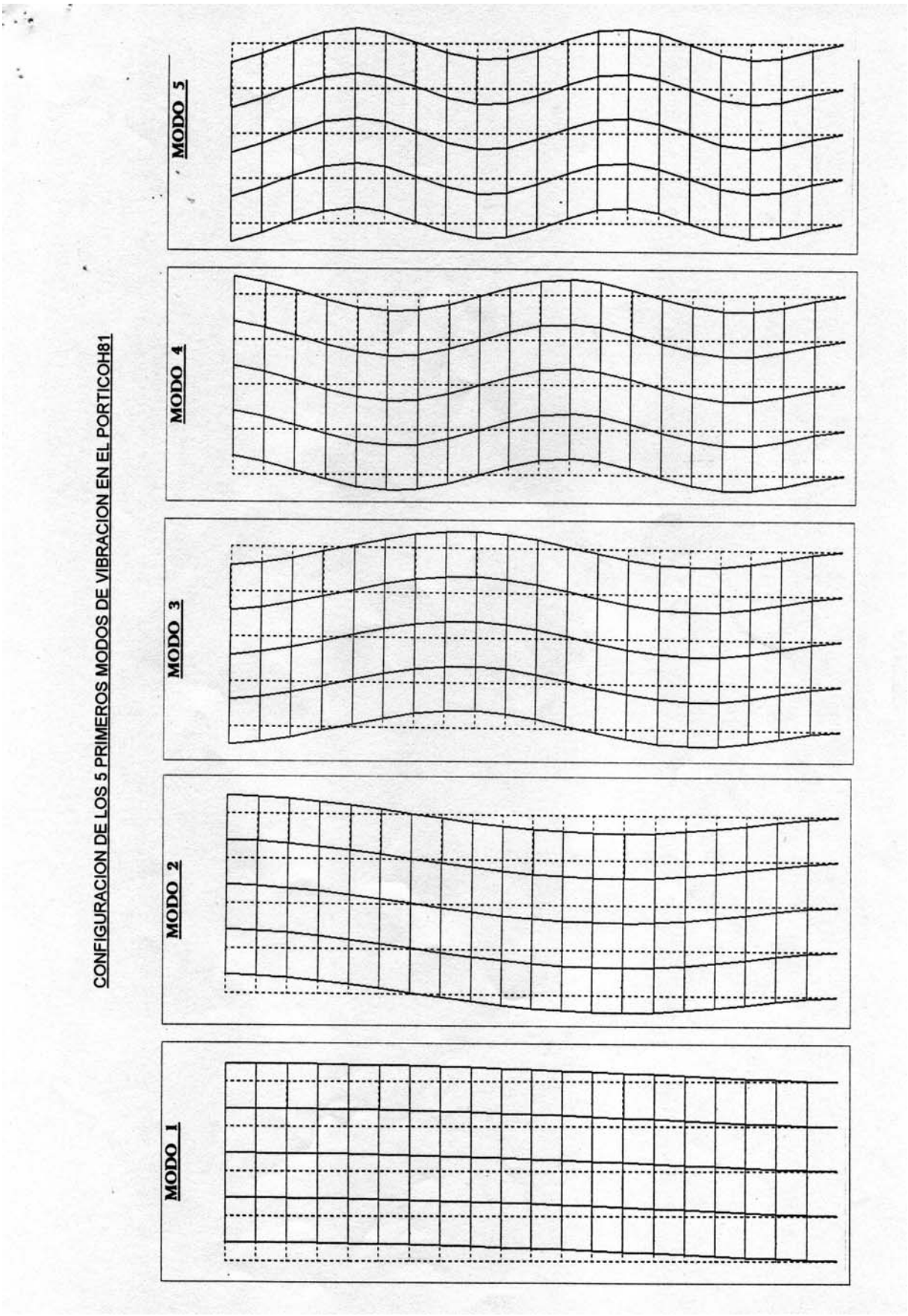
CONFIGURACION DE LOS 5 PRIMEROS MODOS DE VIBRACION EN EL PORTICOH81
MODO 1
MODO 2
MODO 3
MODO 4
MODO 5

Figura 12

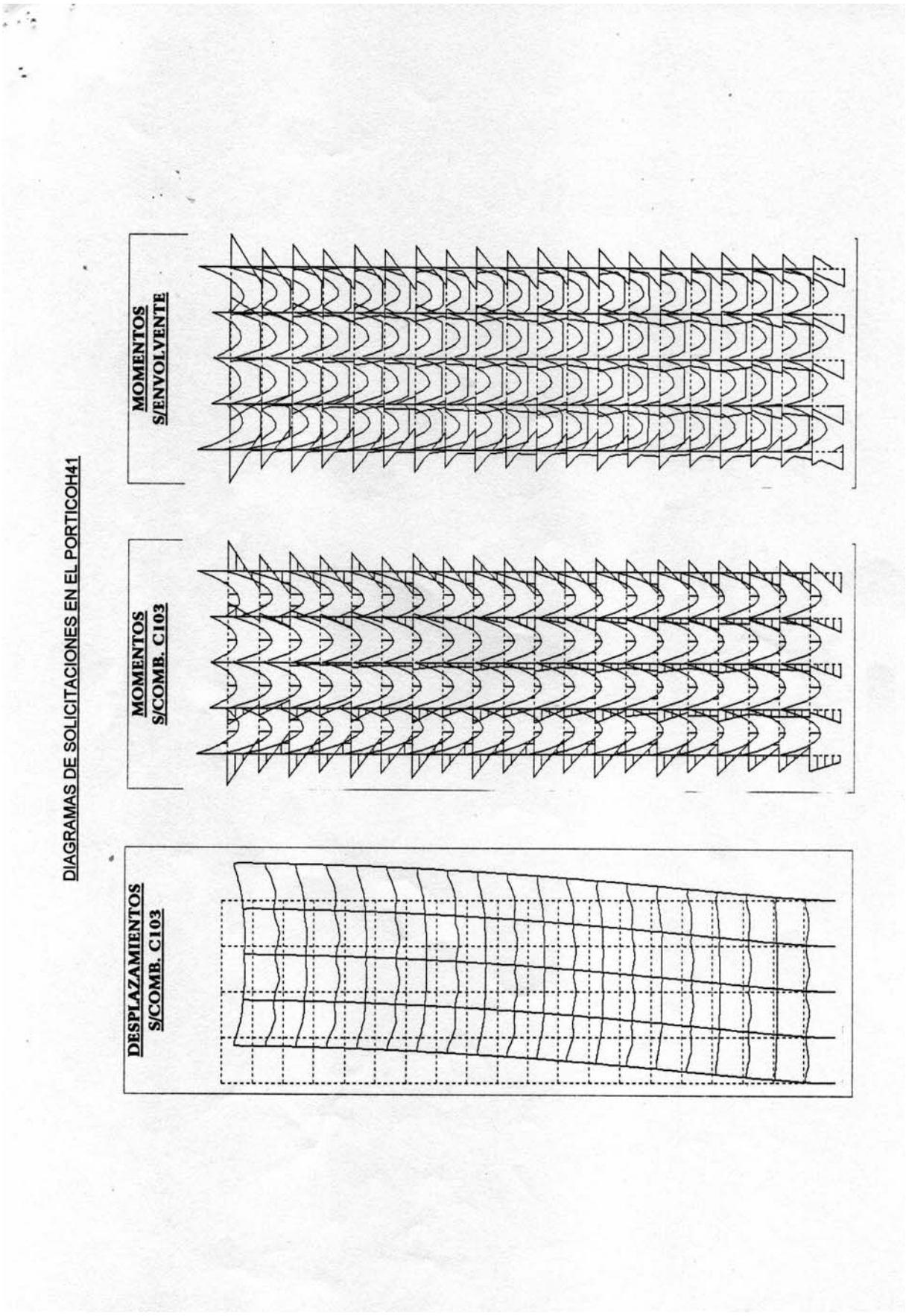
DIAGRAMAS DE SOLICITACIONES EN EL PORTICOH41
DESPLAZAMIENTOS S/COMB. C103
MOMENTOS S/COMB. C103
MOMENTOS S/ENVOLVENTE

Figura 13

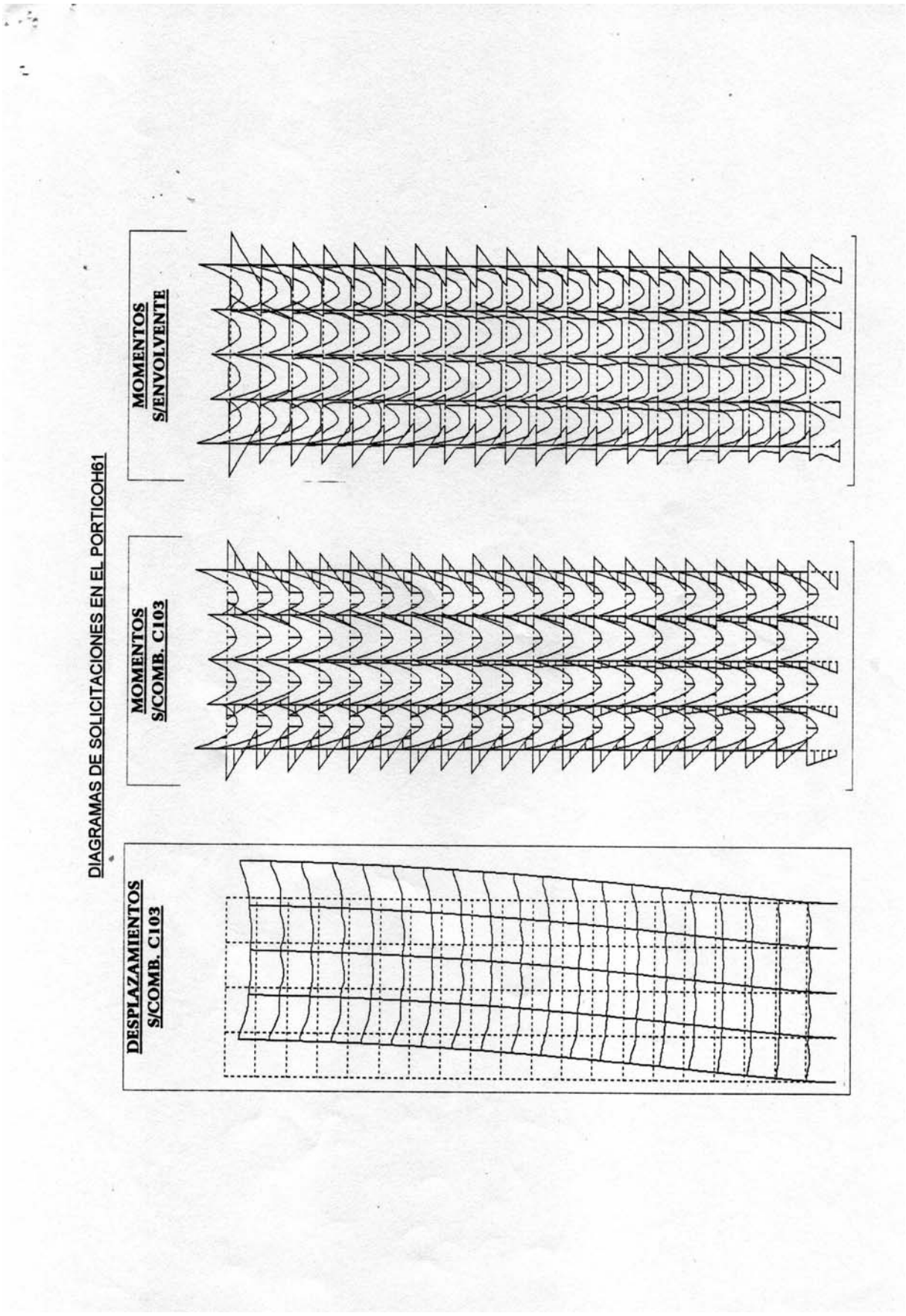
DIAGRAMAS DE SOLICITACIONES EN EL PORTICOH61
DESPLAZAMIENTOS S/COMB. C103
MOMENTOS S/COMB. C103
MOMENTOS S/ENVOLVENTE

Figura 14

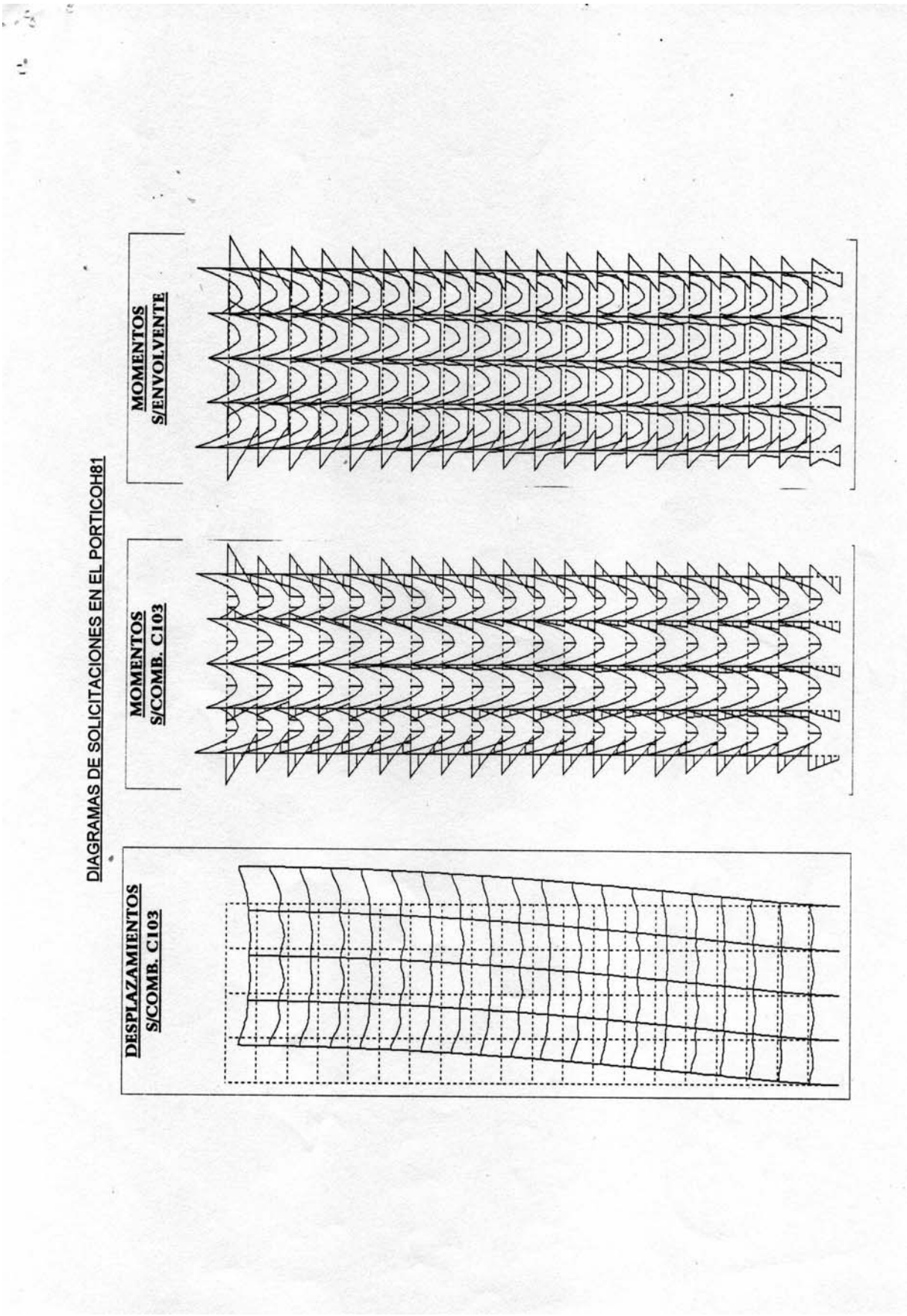
DIAGRAMAS DE SOLICITACIONES EN EL PORTICOH81
DESPLAZAMIENTOS
S/COMB. C103
MOMENTOS
S/COMB. C103
MOMENTOS
S/ENVOLVENTE

Figura 15