

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**

**CONTRIBUCION AL DESARROLLO  
DE SISTEMAS DE CONTROL DE  
ESTRUCTURAS DE EDIFICACION  
MEDIANTE CABLES ACTIVOS**

Autor: Francisco López Almansa  
Director: José Julián Rodellar Benedé

Barcelona, Enero de 1988

**CONTROL DIGITAL PREDICTIVO DE EDIFICIOS  
MEDIANTE CABLES ACTIVOS**

En el presente capítulo se muestran experiencias numéricas de simulación de procesos de control mediante cables activos de los edificios A, B y C (descritos en el apéndice A) en presencia de excitaciones sísmicas y del viento.

En el apartado 8.1 se describen las características de los edificios A, B y C y se presentan los rasgos generales de sus comportamientos dinámicos, los cuales son representativos de los comportamientos más frecuentes en edificios de similar altura.

En el apartado 8.2 se describen las características de los sistemas de control por cables activos instalados en los edificios A, B y C.

En el apartado 8.3 se describe el algoritmo de control predictivo considerado en el lazo cerrado de control, el cual responde a las características generales descritas en el capítulo 4.

En el apartado 8.4 se detalla el proceso de simulación numérica considerado, el cual responde al esquema general descrito en el capítulo 6.

En el apartado 8.5 se definen los valores de seis índices  $\Gamma_1, \dots, \Gamma_6$ , que resumen las características de los resultados de los ensayos numéricos.

En el apartado 8.6 se muestran los resultados de distintas experiencias numéricas consistentes en someter los edificios a excitaciones dinámicas transmitidas por el

terreno. Dichas excitaciones son de dos tipos: acelerogramas sísmicos y acelerogramas sinusoidales de amplitud constante  $0.1g$ . Para las excitaciones sinusoidales, los valores de los 6 índices definidos en el apartado 8.5 en función de la frecuencia de la excitación sinusoidal constituyen espectros de respuesta sísmica de la estructura controlada. En el apartado 8.7 se muestran resultados análogos para excitación del viento.

En el apartado 8.8 se muestra un ejemplo de dimensionamiento de un sistema de control para un edificio sometido a la acción del terremoto de EL CENTRO. Se obtienen los valores de las tensiones máximas en las barras en la respuesta sin control y en la respuesta con control para poner de manifiesto la utilidad de la acción de control para reducir los valores de dichas tensiones. También se determinan los valores de los esfuerzos en los elementos que constituyen el sistema de control para mostrar su realizabilidad.

En el apartado 8.9 se analiza el comportamiento del sistema de control descrito en el apartado 8.8 cuando se exige a los mecanismos actuadores unas prestaciones para las que no han sido dimensionados y éstos responden únicamente en la medida de sus posibilidades.

En el apartado 8.10 se formulan las principales conclusiones que pueden extraerse del presente capítulo.

## INDICE

8.1 Edificios A, B y C. ....	8.5
8.2 Sistema de control. ....	8.6
8.2.1 Descripción general del sistema de control.	
8.2.2 Justificación del diseño.	
8.3 Implementación del control predictivo. ....	8.13
8.4 Simulación en ordenador digital. ....	8.15
8.5 Valores característicos de los ensayos. ....	8.16
8.6 Ensayos numéricos con excitación sísmica. ....	8.18
8.6.1 Respuesta a un acelerograma sísmico.	
8.6.2 Espectros de respuesta.	
8.7 Ensayos numéricos con excitación del viento. ....	8.55
8.7.1 Acción dinámica del viento.	
8.7.2 Espectros de respuesta.	
8.8 Ejemplo de dimensionamiento de un sistema de control. ....	8.85
8.9 Comportamiento del sistema de control en condiciones de saturación de los actuadores. ....	8.88

8.10 Conclusiones. .... 8.90

Referencias. .... 8.91

## 8.1 EDIFICIOS A, B y C.

Los edificios A, B y C tienen 81 m. de altura distribuidos en 23 plantas y difieren únicamente por las características de su estructura resistente: pórticos metálicos de nudos rígidos en los edificios A y B y un núcleo central de hormigón en el edificio C. En el Apéndice A se describen exhaustivamente las características de los edificios A, B y C.

Los edificios A, B y C han sido elegidos en el presente capítulo para verificar la utilidad del sistema de control mediante cables activos para reducir la respuesta de edificios de altura media sometidos a excitaciones sísmicas y del viento. Los comportamientos dinámicos de los citados edificios son representativos de los comportamientos más frecuentes en edificios de dimensiones similares y sus características pueden resumirse, de acuerdo con los datos contenidos en la tabla A.4 y de acuerdo con los espectros representados en la figura 8.2, en los siguientes puntos:

- *Edificio A.* En las oscilaciones horizontales provocadas por excitaciones sísmicas o del viento se observa una importante presencia de los modos propios de orden superior al primero lo cual significa que son posibles deformadas con un aspecto "sinuoso". Los desplazamientos horizontales son producidos especialmente por el esfuerzo cortante horizontal que actúa sobre el edificio.
- *Edificio B.* El comportamiento dinámico es cualitativamente similar al del edificio A aunque en sentido cuantitativo corresponde al de un edificio más rígido.
- *Edificio C.* En las deformaciones dinámicas horizontales interviene de forma casi exclusiva el primer modo propio de vibración, siendo la influencia de los restantes modos muy limitada de forma que no es probable la aparición de deformadas sinuosas. Los desplazamientos horizontales son producidos especialmente por el momento flector que actúa sobre el edificio.

## 8.2 SISTEMA DE CONTROL.

En el presente apartado se describen los sistemas de control activo de los edificios A, B y C considerados en las experiencias numéricas presentadas en este capítulo. Dichos sistemas responden al esquema general mostrado en la figura 1.11 estando constituidos por: sensores, convertidor A/D, ordenador digital, convertidor D/A y un número variable de mecanismos actuadores por cables activos.

En el subapartado 8.2.1 se describen las características de los mecanismos actuadores que ejercen las fuerzas de control sobre la estructura y en el subapartado 8.2.2 se justifica su diseño y dimensionamiento.

### 8.2.1 Descripción general del sistema de control.

Las fuerzas horizontales de control son ejercidas sobre la estructura de los edificios A, B y C mediante mecanismos actuadores de los tipos descritos en las figuras 5.1a y 5.1b. Dichos mecanismos actuadores por cables activos se disponen en los edificios según esquemas que responden a la tipología estructural descrita en la figura 5.4 configurando los distintos sistemas de control considerados en el presente capítulo.

Para cada uno de los edificios A, B y C se consideran en total 9 sistemas de control que difieren entre sí únicamente por el número de fuerzas de control que son capaces de ejercer sobre la estructura: 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11 y 23 fuerzas, respectivamente. En el sistema para 1 fuerza de control se considera un mecanismo actuador similar al descrito en la figura 5.1b mientras que en los casos restantes se consideran únicamente mecanismos del mismo tipo que los representados en la figura 5.1a.

En la figura 8.1a se presenta un esquema de la instalación de control correspondiente a 1 fuerza de control en el que se indican las plantas a que se fijan los cables y las poleas sobre las que éstos deslizan.

En la figura 8.1a se muestra que la fuerza horizontal de control actúa en la planta superior.

En las figuras 8.1b y 8.1c se muestran esquemas de colocación de los cables activos para generar más de una fuerza de control.

Todos los cables están constituidos por acero de límite elástico superior a  $17000 \text{ Kg/cm}^2$ . En las tablas 8.1a y 8.1b se describen las secciones de los cables para los 9 sistemas de control considerados.

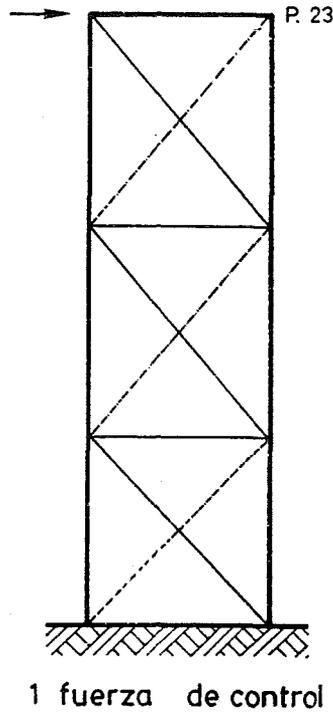
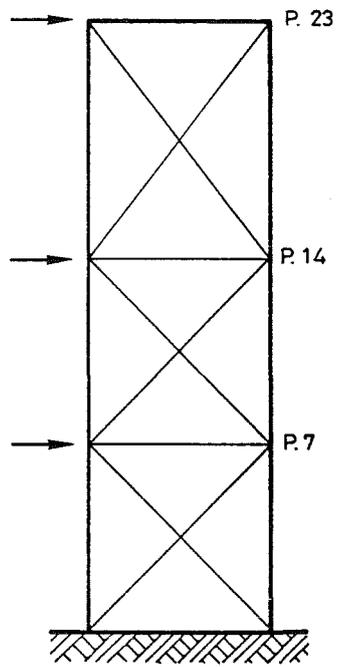


Figura 8.1a Sistema de control por cables activos.

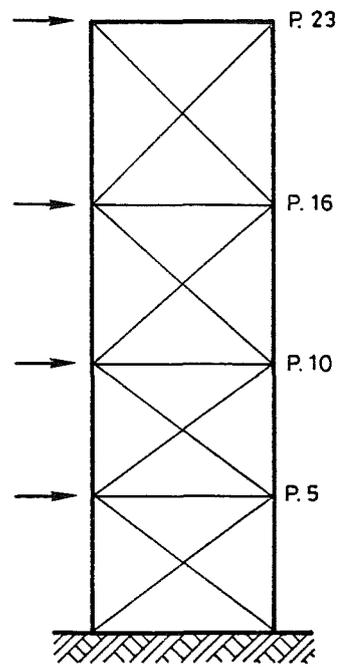
### 8.2.2 Justificación del diseño.

Las disposiciones de los cables en los edificios A, B y C descritas en las figuras 8.1 se han adoptado teniendo en cuenta las consideraciones expuestas en el capítulo 5 y buscando la consecución del siguiente objetivo: minimización de las fuerzas verticales  $f_v$  y optimización de las fuerzas horizontales  $f_h$  ejercidas por los cables sobre la estructura. Para lograr este objetivo se disponen cables activos con la máxima inclinación posible resultando los esquemas representados en las figuras 8.1.

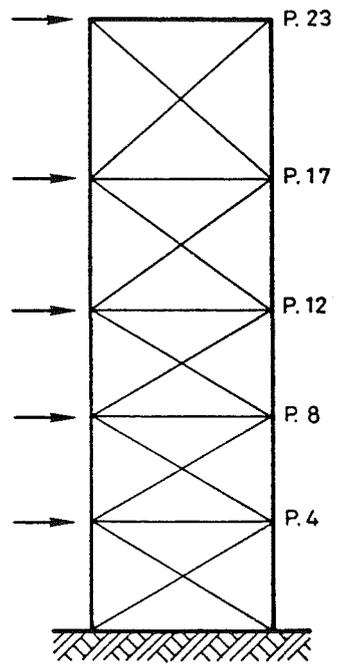
Las secciones de los distintos tramos descritas en las tablas 8.1a y 8.1b se han elegido partiendo de la siguiente premisa: para cada sistema de control los cables fijados a las plantas inferiores soportan unos esfuerzos mayores que los cables fijados a las plantas superiores. Dicha premisa general puede ser verificada mediante el análisis



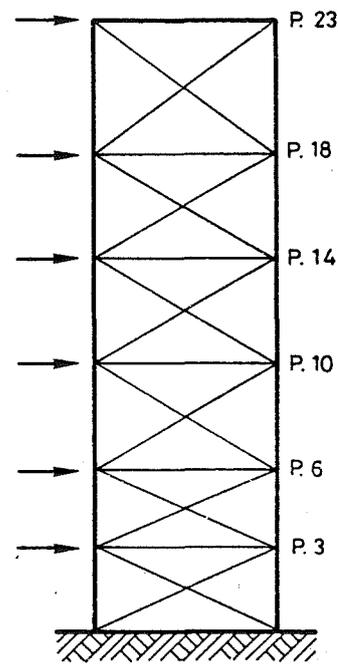
3 fuerzas de control



4 fuerzas de control

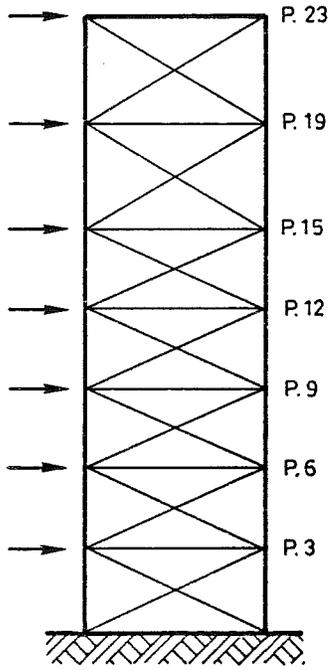


5 fuerzas de control

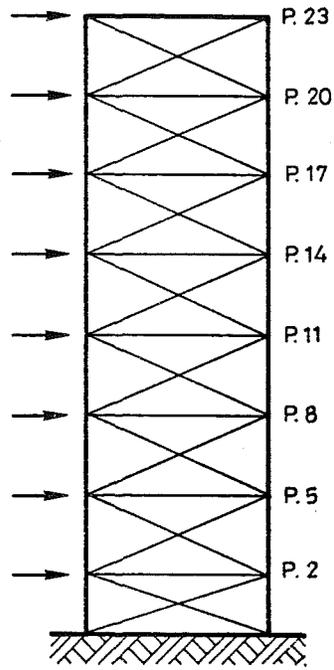


6 fuerzas de control

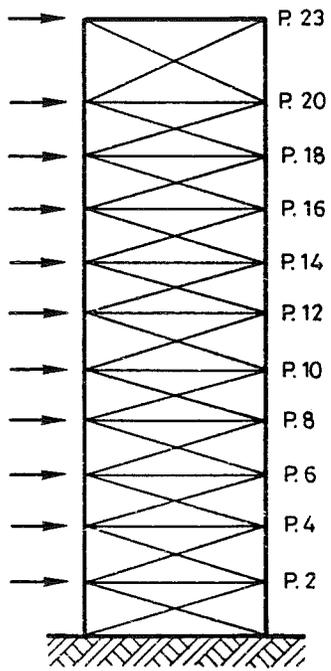
Figura 8.1b Sistemas de control por cables activos.



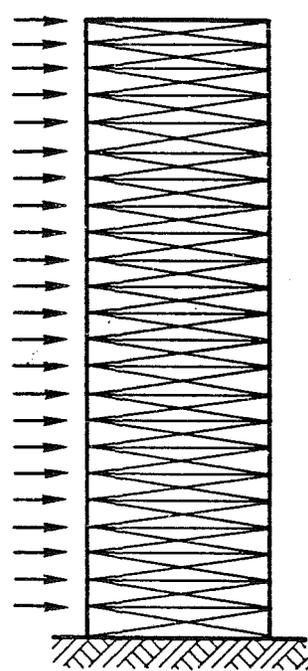
7 fuerzas de control



8 fuerzas de control



11 fuerzas de control



23 fuerzas de control

Figura 8.1c Sistemas de control por cables activos.

TABLA 8.1a		
SECCIONES DE LOS CABLES ACTIVOS		
Nº de fuerzas de control	Plantas	Sección (cm <sup>2</sup> )
1	0 - 23	100
3	0 - 7	100
3	7 - 14	60
3	14 - 23	40
4	0 - 5	80
4	5 - 10	60
4	10 - 16	40
4	16 - 23	20
5	0 - 4	100
5	4 - 8	80
5	8 - 12	60
5	12 - 17	40
5	17 - 23	20
6	0 - 6	100
6	6 - 10	80
6	10 - 14	60
6	14 - 18	40
6	18 - 23	20

de los resultados de experiencias numéricas y puede también ser justificada desde un punto de vista teórico observando las igualdades que muestran la expresión de las fuerzas horizontales  $f_h$  ejercidas por los cables en función de las fuerzas de control  $u_0$  que se desea ejercer sobre la estructura de los edificios. Dichas relaciones se obtienen inmediatamente a partir de (5.8) conservándose los significados de las magnitudes allí representadas:

$$\begin{aligned}
 f_{h_{n_a}} &= u_{0_{n_a}} \\
 f_{h_{n_a-1}} &= u_{0_{n_a}} + u_{0_{n_a-1}} \\
 &\dots\dots \\
 f_{h_1} &= u_{0_{n_a}} + \dots + u_{0_1}
 \end{aligned}
 \tag{8.1}$$

TABLA 8.1b		
SECCIONES DE LOS CABLES ACTIVOS		
Nº de fuerzas de control	Plantas	Sección (cm <sup>2</sup> )
7	0 - 6	100
7	6 - 12	80
7	12 - 15	60
7	15 - 19	40
7	19 - 23	20
8	0 - 5	100
8	5 - 11	80
8	11 - 17	60
8	17 - 20	40
8	20 - 23	20
11	0 - 6	100
11	6 - 10	80
11	10 - 14	60
11	14 - 18	40
11	18 - 23	20
23	0 - 5	100
23	5 - 10	80
23	10 - 15	60
23	15 - 20	40
23	20 - 23	20

Las igualdades (8.1) muestran que, si se desea ejercer sobre los edificios un sistema uniforme de fuerzas de control  $u_0$ , los cables inferiores precisan soportar un esfuerzo notablemente más elevado que los cables anclados a plantas situadas a mayor altura. Además, la diferencia crece con el número de actuadores  $n_a$ , es decir con el número de fuerzas horizontales que se desea ejercer sobre la estructura.

### 8.3 IMPLEMENTACION DEL CONTROL PREDICTIVO.

En el presente apartado se describen las características del algoritmo de control predictivo considerado en los ensayos numéricos descritos en los apartados 8.6 y 8.7.

Tal como es habitual en el contexto del control de estructuras, en todos los casos la consigna es igual a la salida nula de equilibrio.

El vector de estado  $\mathbf{x}$  introducido en (3.2) es un vector columna  $46 \times 1$  cuyas componentes son los 23 desplazamientos  $\mathbf{d}$  y las 23 velocidades  $\dot{\mathbf{d}}$  horizontales de las 23 plantas de los edificios A, B y C:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{d} \\ \dot{\mathbf{d}} \end{pmatrix} \quad (8.2)$$

El período de muestreo  $T$  se considera en todos los ensayos numéricos y experimentales descritos en el presente capítulo igual a 0.05 segundos:

$$T = 0.05 \text{ s} \quad (8.3)$$

El valor anterior se elige, en relación con el valor dado en (7.6) para el modelo experimental de la SUNY, por la mayor lentitud de las frecuencias naturales de vibración de los modos superiores de los edificios A, B y C dadas en la tabla A.4 en comparación con la frecuencia natural del modelo experimental dada en (7.4f). A consecuencia del elevado valor considerado en (8.3) para el período de muestreo  $T$  se suponen nulos los valores de los retardos del sistema  $n_r$  y del modelo predictivo  $\hat{n}_r$ :

$$n_r = 0 \quad \hat{n}_r = 0 \quad (8.4)$$

El vector de salida  $\mathbf{y}$  introducido en (4.3) se toma igual al vector de estado  $\mathbf{x}$

eligiendo una matriz de salida  $H$  igual a la identidad:

$$H = I \quad y = x \quad (8.5)$$

El modelo predictivo definido en (4.4) se genera a partir de unas matrices  $\hat{A}$ ,  $\hat{B}$  y  $\hat{H}$  iguales a las consideradas en (4.1) y (4.2) para el sistema:

$$\hat{A} = A \quad \hat{B} = B \quad \hat{H} = H \quad (8.6)$$

La matriz de peso  $Q$  que interviene en (4.11) en la expresión de la función de coste  $J$  es

$$Q = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (8.7)$$

Los valores de la matriz  $Q$  mostrados en (8.7) corresponden a una función de coste  $J$  que minimiza los desplazamientos  $d$  del sistema sin limitar los valores de las velocidades  $\dot{d}$  puesto que la submatriz inferior derecha de  $Q$  es nula.

La trayectoria de referencia se elige nula considerando una matriz de referencia  $A_r$  también nula:

$$A_r = 0 \quad y_r(k+j|k) = 0 \quad j = 1, \dots, \lambda \quad (8.8)$$

Las restantes magnitudes que definen el algoritmo de control predictivo toman valores distintos en cada experiencia de control. Dichas magnitudes son: la longitud del horizonte de predicción  $\lambda$  y la matriz  $n_a \times n_a$   $R$  que pondera la influencia de las fuerzas de control en la función de coste  $J$ .

La longitud  $\lambda$  del horizonte de predicción toma distintos valores en el rango 0 – 5.

La matriz  $\mathbf{R}$  se considera en todas las experiencias numéricas igual al producto de un coeficiente escalar  $r_0$  por la matriz identidad  $\mathbf{I}$  de dimensiones  $n_a \times n_a$ :

$$\mathbf{R} = r_0 \mathbf{I} \quad (8.9)$$

La adopción de matrices  $\mathbf{R}$  dadas por (8.9) supone limitar con la misma intensidad la cuantía de todas las fuerzas de control. El coeficiente escalar  $r_0$  adopta distintos valores en cada ensayo de forma que se produzca una significativa limitación del valor de la fuerzas de control.

#### 8.4 SIMULACION EN ORDENADOR DIGITAL.

La simulación se desarrolla según el esquema mostrado en el capítulo 6 considerando el vector de estado  $\mathbf{x}$  definido en (8.2) y el valor del período de muestreo  $T$  dado en (8.3).

$\mathbf{C}_s$  es una matriz diagonal  $46 \times 46$  que contiene los factores de calibración de los sensores y  $\mathbf{C}_a$  es una matriz  $n_a \times n_a$  que representa los factores de calibración de los actuadores. De acuerdo con (8.4), el valor del tiempo de respuesta  $\tau_r$  es nulo:

$$\tau_r = 0 \quad (8.10)$$

Las características de la implementación del algoritmo SSP (descrito en el capítulo 3) para generar un cálculo preciso y estable se establecen en cada experiencia numérica de acuerdo con las características del edificio y de la excitación.

## 8.5 VALORES CARACTERISTICOS DE LOS ENSAYOS.

Las características de los resultados de cada ensayo numérico se resumen en los valores de seis índices denominados, respectivamente,  $\Gamma_1, \dots, \Gamma_6$  los cuales constituyen una generalización para sistemas con varios grados de libertad de los cuatro índices  $d_{0MAX}$ ,  $u_{0MAX}$ ,  $z_{0MAX}$  y  $\dot{z}_{0MAX}$  definidos para el modelo experimental considerado en el capítulo 7.

Los valores de los índices  $\Gamma_1, \dots, \Gamma_6$  se obtienen, en cada experiencia numérica, a partir del modelo de simulación descrito en el capítulo 6 y representan las características de la respuesta dinámica de la estructura y del rendimiento exigido al sistema de cables activos.

En los puntos que se presentan a continuación se definen los seis índices  $\Gamma_1, \dots, \Gamma_6$ , se indica la forma de obtener sus valores a partir del modelo numérico definido en el capítulo 6 y se muestra una interpretación de su significado físico.

- *Indice  $\Gamma_1$ . Valor medio cuadrático de los desplazamientos horizontales relativos máximos entre pisos adyacentes.* El valor de  $\Gamma_1$  se obtiene para cada ensayo numérico a partir de la respuesta de la estructura en los instantes discretos de muestreo contenida en el vector de estado  $\mathbf{x}$  (cuyo valor es proporcionado por la igualdad (6.10)) utilizando las expresiones (6.5) y (6.4) para hallar el valor de  $\mathbf{x}_0$ . Un valor elevado de  $\Gamma_1$  corresponde a unos valores también elevados de las tensiones en las barras de la estructura de los edificios A, B y C. El valor de  $\Gamma_1$  se expresa en metros.
- *Indice  $\Gamma_2$ . Valor medio cuadrático de las fuerzas de control máximas en cada planta.* El valor de  $\Gamma_2$  puede obtenerse calculando el valor del vector  $\mathbf{u}_0$  a partir de  $\mathbf{x}$  en las igualdades (6.6), (6.7) y (6.8).  $\Gamma_2$  es aproximadamente proporcional a la cantidad de energía invertida en el proceso de control. El valor de  $\Gamma_2$  se expresa en Newtons.
- *Indice  $\Gamma_3$ . Valor medio cuadrático de las máximas diferencias de tensión entre los dos cables que forman cada mecanismo actuador.* En las figuras 5.3 que

representan un mecanismo actuador  $i$  dicha diferencia de tensión corresponde a  $f_{der_i} - f_{izq_i}$  y su valor puede ser hallado a partir de  $u_0$  utilizando las expresiones (5.7) y (5.1a) o (5.4a). La relación (5.9) muestra que la cuantía de  $\Gamma_3$  es proporcional a la diferencia de presión que deben ser capaces de mantener las servoválvulas que gobiernan el movimiento de los cables activos. El valor de  $\Gamma_3$  se expresa en Newtons.

- *Indice  $\Gamma_4$ . Valor medio cuadrático de las máximas fuerzas verticales de compresión introducidas por los cables activos en los pilares de la estructura.*  $\Gamma_4$  puede hallarse a partir de las fuerzas verticales  $f_{v_i}$  expresadas en (5.1b) o (5.4b) en función de la diferencia de tensiones  $f_{der_i} - f_{izq_i}$  cuyo valor debe conocerse en cada instante para hallar  $\Gamma_3$ . La cuantía de  $\Gamma_4$  mide los esfuerzos parásitos introducidos en la estructura por la acción dinámica de los cables activos. El valor de  $\Gamma_4$  se expresa en Newtons.
- *Indice  $\Gamma_5$ . Valor medio cuadrático de los máximos desplazamientos lineales de los émbolos de los cilindros hidráulicos respecto de su posición inicial.* En las figuras 5.3a y 5.3b el desplazamiento del émbolo es  $z_i$  y su valor puede ser hallado en la expresión (5.3).  $\Gamma_5$  indica el recorrido libre de que deben disponer los émbolos. El valor de  $\Gamma_5$  se expresa en metros.
- *Indice  $\Gamma_6$ . Valor medio cuadrático de las máximas velocidades de traslación de los émbolos de los cilindros hidráulicos.* La velocidad lineal de los émbolos se determina por derivación numérica a partir de su desplazamiento.  $\Gamma_6$  es un índice importante en el dimensionamiento de los mecanismos actuadores por cables activos. El valor de  $\Gamma_6$  se expresa en metros por segundo.

$\Gamma_3$ ,  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  corresponden, respectivamente, a los mismos conceptos que los tres valores  $f_{h_{MAX}}$ ,  $z_{MAX}$ ,  $\dot{z}_{MAX}$  indicados en el apartado 4 del capítulo 5 como limitativos del rendimiento de los cables activos.

En cada ensayo numérico consistente en simular la actuación de una excitación dinámica sobre uno de los edificios A, B o C se obtienen los valores de  $\Gamma_1, \dots, \Gamma_6$  y en ellos se resumen los resultados del ensayo.

## 8.6 ENSAYOS NUMERICOS CON EXCITACION SISMICA.

Se describen en el presente apartado distintas experiencias numéricas de simulación de procesos de excitación sísmica de los edificios A, B y C cuando sobre éstos actúan fuerzas de control generadas por sistemas de cables activos como los descritos en el subapartado 2.1 del presente capítulo. En el subapartado 8.6.1 se muestran las respuestas numéricas de los edificios A, B y C a un acelerograma sísmico de excitación. En el subapartado 8.6.2 se muestran experiencias numéricas en que la excitación está constituida por acelerogramas sinusoidales de distintas frecuencias y a partir de dichas excitaciones se obtienen espectros de respuesta.

TABLA 8.2							
RESPUESTA DINAMICA CON 1 FUERZA DE CONTROL							
Acelerograma: EL CENTRO/4 Edificio C $n_r = \hat{n}_r = 0$							
$\lambda$	$r_0$	$\Gamma_1(m)$	$\Gamma_2(N)$	$\Gamma_3(N)$	$\Gamma_4(N)$	$\Gamma_5(m)$	$\Gamma_6(m/s)$
1	0	0.00379	560667.	925194.	3529534.	0.01033	0.10877
2	0	0.00401	515016.	849862.	3242151.	0.00995	0.08724
3	0	0.00421	484110.	798862.	3047589.	0.00959	0.06728
4	0	0.00440	465657.	768411.	2931424.	0.00980	0.07515
5	0	0.00476	408883.	674725.	2574016.	0.00963	0.07962
1	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00187	294154.	485402.	1851768.	0.00288	0.01910
2	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00312	400231.	660447.	2519550.	0.00692	0.06022
3	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00374	452837.	747255.	2850714.	0.00871	0.06161
4	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00406	442622.	730400.	2786413.	0.00933	0.06871
5	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00453	398541.	657659.	2508912.	0.00934	0.07624

### 8.6.1 Respuesta a un acelerograma sísmico.

En el presente subapartado se considera el acelerograma sísmico de excitación obtenido dividiendo por 4 las aceleraciones del terremoto de EL CENTRO (California 1940). En la figura 7.7 se muestra una representación gráfica de dicho acelerograma.

Se han efectuado distintas experiencias numéricas consistentes en someter los edificios A, B y C a la acción de dicho acelerograma en presencia de los sistemas de control descritos en el apartado 8.2. Se consideran distintos valores de  $\lambda$  y  $r_0$  en la formulación del algoritmo de control predictivo tal como se indica en el apartado 8.3.

En las tablas 8.2 a 8.10 se muestran los resultados de las experiencias sobre el edificio C para los 9 sistemas de control descritos en las figuras 8.1. En cada tabla se muestran los valores de los índices  $\Gamma_1, \dots, \Gamma_6$  en diez experiencias que difieren entre sí por los valores de  $\lambda$  y  $r_0$ .

El análisis de los resultados de las tablas 8.2–8.10 confirma, en líneas generales, las afirmaciones contenidas en el apartado 4 del capítulo 7 sobre la influencia de  $\lambda$  y  $r_0$  en las características del control y permite elaborar una nueva conclusión: con un mayor número de fuerzas de control puede obtenerse, en general, una reducción más

**TABLA 8.3**

**RESPUESTA DINAMICA CON 3 FUERZAS DE CONTROL**

Acelerograma: EL CENTRO/4 Edificio C  $n_r = \hat{n}_r = 0$

$\lambda$	$r_0$	$\Gamma_1(m)$	$\Gamma_2(N)$	$\Gamma_3(N)$	$\Gamma_4(N)$	$\Gamma_5(m)$	$\Gamma_6(m/s)$
1	0	0.00057	1219936.	3182006.	3182006.	0.04926	1.50536
2	0	0.00039	1002164.	2864349.	2846439.	0.04355	0.76862
3	0	0.00057	892543.	2306027.	2306027.	0.03676	0.59903
4	0			respuesta inestable			
5	0			respuesta inestable			
1	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00194	597497.	1843793.	7042437.	0.03071	0.18851
2	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00114	905690.	2779418.	9928987.	0.04362	0.44122
3	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00088	772908.	2351086.	8350186.	0.03673	0.49405
4	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00095	666498.	2042579.	7251925.	0.03194	0.40294
5	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00103	557208.	1718064.	6112177.	0.02714	0.31175

**TABLA 8.4**

**RESPUESTA DINAMICA CON 4 FUERZAS DE CONTROL**

Acelerograma: EL CENTRO/4 Edificio C  $n_r = \hat{n}_r = 0$

$\lambda$	$r_0$	$\Gamma_1(m)$	$\Gamma_2(N)$	$\Gamma_3(N)$	$\Gamma_4(N)$	$\Gamma_5(m)$	$\Gamma_6(m/s)$
1	0	0.00034	1176144.	3900470.	11925008.	0.07039	1.94378
2	0	0.00040	875311.	2914749.	9134822.	0.05410	0.95595
3	0			respuesta inestable			
4	0			respuesta inestable			
5	0			respuesta inestable			
1	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00190	636930.	2254377.	8053991.	0.05031	0.33826
2	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00094	826663.	2894928.	9482807.	0.05700	0.68005
3	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00076	686389.	2371348.	7743267.	0.04644	0.65000
4	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00096	594269.	2084951.	6806905.	0.04106	0.51777
5	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00099	497000.	1754253.	5739808.	0.03492	0.39790

importante de la respuesta con un coste de energía razonable y unas sollicitaciones sobre los elementos que constituyen el sistema de control que pueden ser resistidos por éstos.

Las respuestas inestables contenidas en las tablas 8.2–8.10 corresponden a casos en los que la matriz  $\bar{A}$  tiene radio espectral mayor que la unidad. Dichas inestabilidades no se deben a errores de estimación de las características del sistema sino a la importante

**TABLA 8.5**

**RESPUESTA DINAMICA CON 5 FUERZAS DE CONTROL**

Acelerograma: EL CENTRO/4 Edificio C  $n_r = \hat{n}_r = 0$

$\lambda$	$r_0$	$\Gamma_1(m)$	$\Gamma_2(N)$	$\Gamma_3(N)$	$\Gamma_4(N)$	$\Gamma_5(m)$	$\Gamma_6(m/s)$
1	0	0.00026	1131019.	4189736.	11998823.	0.06232	1.75707
2	0			respuesta inestable			
3	0			respuesta inestable			
4	0			respuesta inestable			
5	0			respuesta inestable			
1	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00200	686620.	2699514.	8609932.	0.04729	0.31794
2	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00081	737982.	2952039.	8912181.	0.04704	0.63247
3	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00071	622220.	2449343.	7368667.	0.03896	0.56044
4	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00102	539904.	2174686.	6548420.	0.03476	0.44105
5	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00097	450920.	1831130.	5526575.	0.02967	0.33772

**TABLA 8.6**

**RESPUESTA DINAMICA CON 6 FUERZAS DE CONTROL**

Acelerograma: EL CENTRO/4 Edificio C  $n_r = \hat{n}_r = 0$

$\lambda$	$r_0$	$\Gamma_1(m)$	$\Gamma_2(N)$	$\Gamma_3(N)$	$\Gamma_4(N)$	$\Gamma_5(m)$	$\Gamma_6(m/s)$
1	0	0.00026	2173317.	4511348.	11754908.	0.05662	1.59847
2	0			respuesta inestable			
3	0			respuesta inestable			
4	0			respuesta inestable			
5	0			respuesta inestable			
1	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00185	645495.	2720737.	8366696.	0.04193	0.31082
2	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00071	673807.	3039384.	8384930.	0.04048	0.59496
3	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00067	576444.	2572068.	7112562.	0.03431	0.50552
4	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00110	501854.	2283287.	6380563.	0.03072	0.39398
5	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00094	418533.	1924518.	5388330.	0.02626	0.30115

longitud del intervalo de predicción cuando  $\lambda$  adopta valores elevados.

Ensayos numéricos similares realizados sobre los edificios A y B permiten extraer conclusiones análogas a las formuladas a partir del edificio C con la única particularidad de que se precisa un mayor número de fuerzas de control para alcanzar una reducción de la respuesta de similar cuantía a la obtenida en el edificio C.

TABLA 8.7							
RESPUESTA DINAMICA CON 7 FUERZAS DE CONTROL							
Acelerograma: EL CENTRO/4 Edificio C $n_r = \hat{n}_r = 0$							
$\lambda$	$r_0$	$\Gamma_1(m)$	$\Gamma_2(N)$	$\Gamma_3(N)$	$\Gamma_4(N)$	$\Gamma_5(m)$	$\Gamma_6(m/s)$
1	0	0.00014	939658.	4605145.	11589905.	0.05368	1.51071
2	0			respuesta inestable			
3	0			respuesta inestable			
4	0			respuesta inestable			
5	0			respuesta inestable			
1	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00182	645349.	2942348.	8605985.	0.04038	0.32914
2	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00063	606416.	3123471.	8198877.	0.03772	0.58718
3	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00065	527084.	2672840.	6999180.	0.03252	0.48774
4	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00127	463225.	2369130.	6302165.	0.02911	0.37798
5	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00093	383656.	1997788.	5326594.	0.02492	0.28857

TABLA 8.8							
RESPUESTA DINAMICA CON 8 FUERZAS DE CONTROL							
Acelerograma: EL CENTRO/4 Edificio C $n_r = \hat{n}_r = 0$							
$\lambda$	$r_0$	$\Gamma_1(m)$	$\Gamma_2(N)$	$\Gamma_3(N)$	$\Gamma_4(N)$	$\Gamma_5(m)$	$\Gamma_6(m/s)$
1	0	0.00009	906662.	4782097.	11469412.	0.05433	1.53622
2	0			respuesta inestable			
3	0			respuesta inestable			
4	0			respuesta inestable			
5	0			respuesta inestable			
1	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00161	644805.	3456401.	9181267.	0.04263	0.35576
2	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00059	558527.	3182852.	7983695.	0.03701	0.60347
3	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00063	492798.	2767015.	6934296.	0.03241	0.49656
4	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00145	441520.	2450615.	6244713.	0.02894	0.38783
5	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00092	358252.	2068468.	5280353.	0.02465	0.29001

### 8.6.2 Espectros de respuesta.

En el presente subapartado se muestran los resultados de distintas experiencias numéricas consistentes en someter a los edificios A, B y C a acelerogramas sinusoidales de amplitud  $0.1 g$  transmitidos por el terreno de cimentación en presencia de los sistemas de control por cables activos descritos en las figuras 8.1. Los gráficos de los índices

TABLA 8.9							
RESPUESTA DINAMICA CON 11 FUERZAS DE CONTROL							
Acelerograma: EL CENTRO/4 Edificio C $n_r = \hat{n}_r = 0$							
$\lambda$	$r_0$	$\Gamma_1(m)$	$\Gamma_2(N)$	$\Gamma_3(N)$	$\Gamma_4(N)$	$\Gamma_5(m)$	$\Gamma_6(m/s)$
1	0	0.00008	875500.	5403916.	11091666.	0.06733	1.89786
2	0			respuesta inestable			
3	0			respuesta inestable			
4	0			respuesta inestable			
5	0			respuesta inestable			
1	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00158	671459.	4680953.	10213471.	0.06347	0.55787
2	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00045	458701.	3466034.	7422785.	0.04424	0.76176
3	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00059	419149.	3136828.	6714380.	0.04025	0.62447
4	$0.50 \cdot 10^{-16}$			respuesta inestable			
5	$0.50 \cdot 10^{-16}$			respuesta inestable			

TABLA 8.10							
RESPUESTA DINAMICA CON 23 FUERZAS DE CONTROL							
Acelerograma: EL CENTRO/4 Edificio C $n_r = \hat{n}_r = 0$							
$\lambda$	$r_0$	$\Gamma_1(m)$	$\Gamma_2(N)$	$\Gamma_3(N)$	$\Gamma_4(N)$	$\Gamma_5(m)$	$\Gamma_6(m/s)$
1	0	0.00008	39733557.	39356553.	11220657.	0.78118	30.72574
2	0			respuesta inestable			
3	0			respuesta inestable			
4	0			respuesta inestable			
5	0			respuesta inestable			
1	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00070	483873.	7039173	10469524.	0.08483	1.27020
2	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00035	317458.	4549787.	6604077.	0.05358	0.97724
3	$0.50 \cdot 10^{-16}$	0.00055	291994.	4309104.	6453040.	0.05145	0.82010
4	$0.50 \cdot 10^{-16}$			respuesta inestable			
5	$0.50 \cdot 10^{-16}$			respuesta inestable			

$\Gamma_1, \dots, \Gamma_6$  en función de la frecuencia de la excitación constituyen espectros de la respuesta controlada de los edificios A, B y C.

En la figura 8.2 se muestran los espectros de respuesta de los edificios A, B y C en ausencia de control. En coordenadas horizontales se representa la frecuencia en radianes por segundo del acelerograma de excitación y en coordenadas verticales se representan

los valores de  $\Gamma_1$ . Los índices  $\Gamma_2, \dots, \Gamma_6$  son nulos por no existir acción de control.

La figura 8.2 confirma las características del comportamiento dinámico de los edificios A, B y C descritas en el apartado 1 del presente capítulo. En dicha figura se muestra que, en los edificios A y B, los picos correspondientes a los modos propios de orden superior al primero son más acusados y corresponden a frecuencias menos distanciadas de la frecuencia correspondiente al modo propio fundamental que en el edificio C. Ambas afirmaciones son coherentes con los datos contenidos en la tabla A.4 y muestran que en el comportamiento dinámico de los edificios A y B la influencia de los modos propios superiores es más importante que en el edificio C.

En las figuras 8.3a a 8.11c se muestran espectros de la respuesta controlada de los edificios A, B y C para los sistemas de control descritos en las figuras 8.1 (los cuales se distinguen fundamentalmente por el número de fuerzas de control que ejercen sobre la estructura). El algoritmo de control predictivo se define de acuerdo con las especificaciones contenidas en el apartado 8.3 para los siguientes valores de  $\lambda$  y  $r_0$ :

$$\lambda = 1 \quad r_0 = 0 \quad (8.11)$$

que corresponden a una acción de control intensa.

El análisis de las gráficas contenidas en las figuras 8.3a a 8.11c permite formular las siguientes conclusiones generales:

- La acción de control introduce en el comportamiento dinámico de las estructuras, de acuerdo con las consideraciones contenidas en el apartado 3 del capítulo 4, una rigidización y un sobreamortiguamiento que producen una disminución de la respuesta y un incremento de las frecuencias naturales de vibración de los modos propios. En las figuras 8.3a a 8.11c ambos efectos se ponen de manifiesto, respectivamente, en la disminución de la altura de los picos de  $\Gamma_1$  y en su desplazamiento hacia la derecha. Puede observarse en dichas figuras que dichos fenómenos son más acusados cuando el número de fuerzas de control aumenta, lo

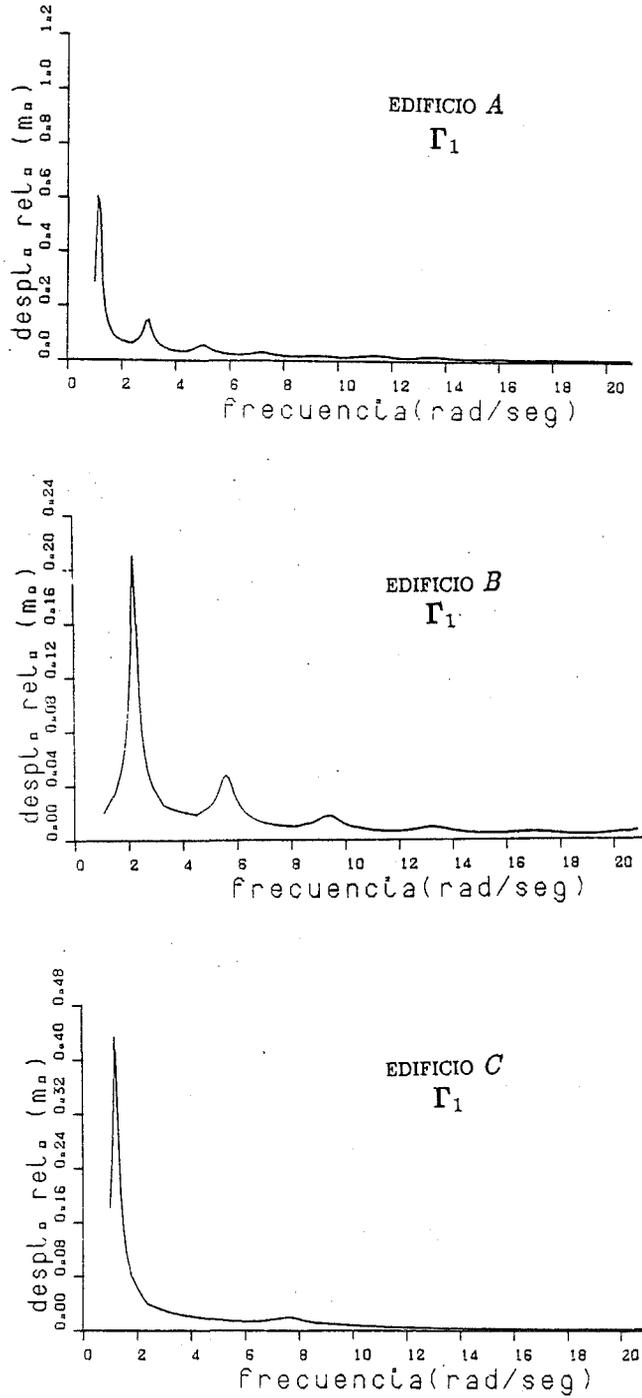


Figura 8.2 Valores de  $\Gamma_1$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal en ausencia de control.

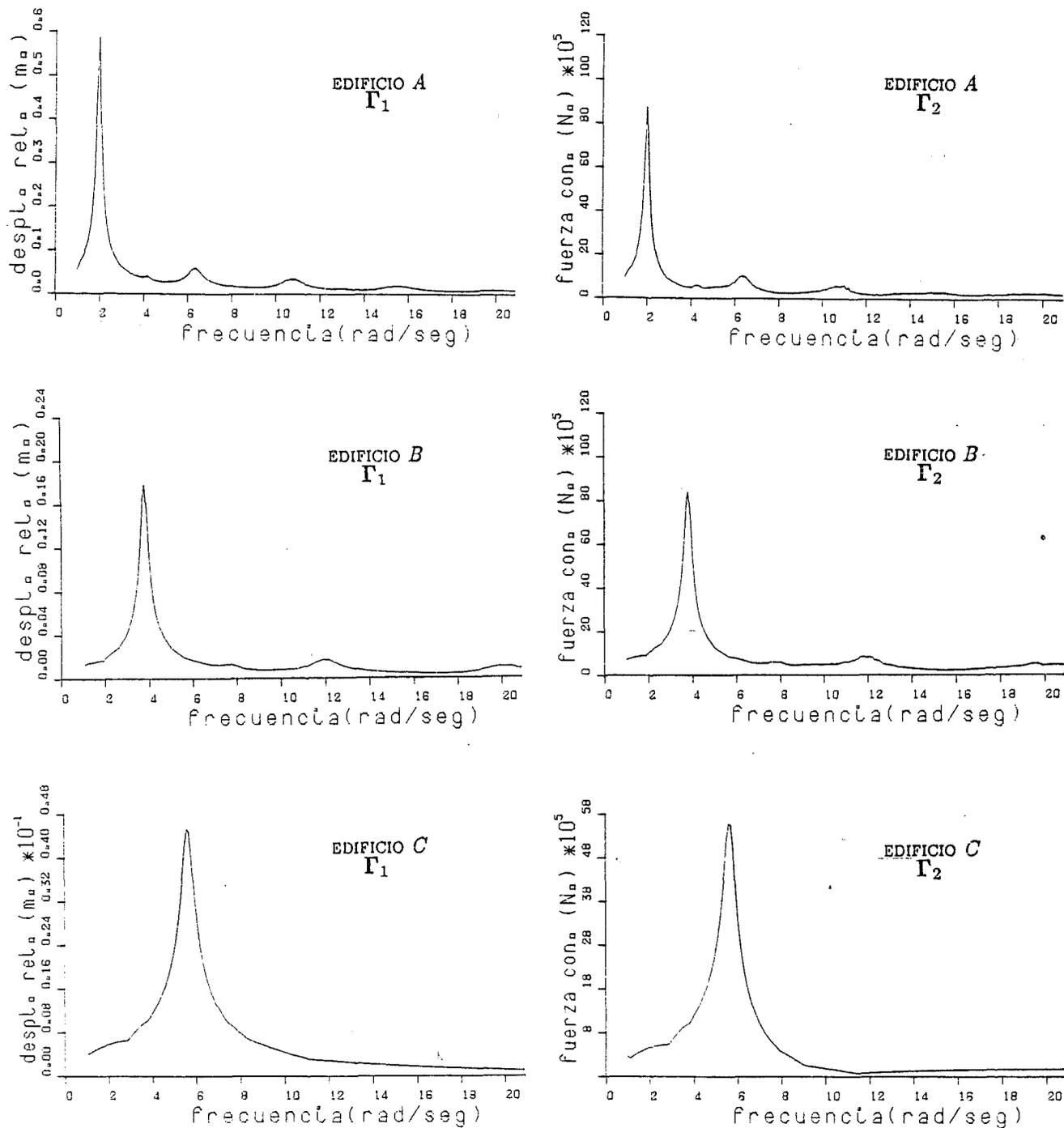


Figura 8.3a Valores de  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 1 fuerza de control.

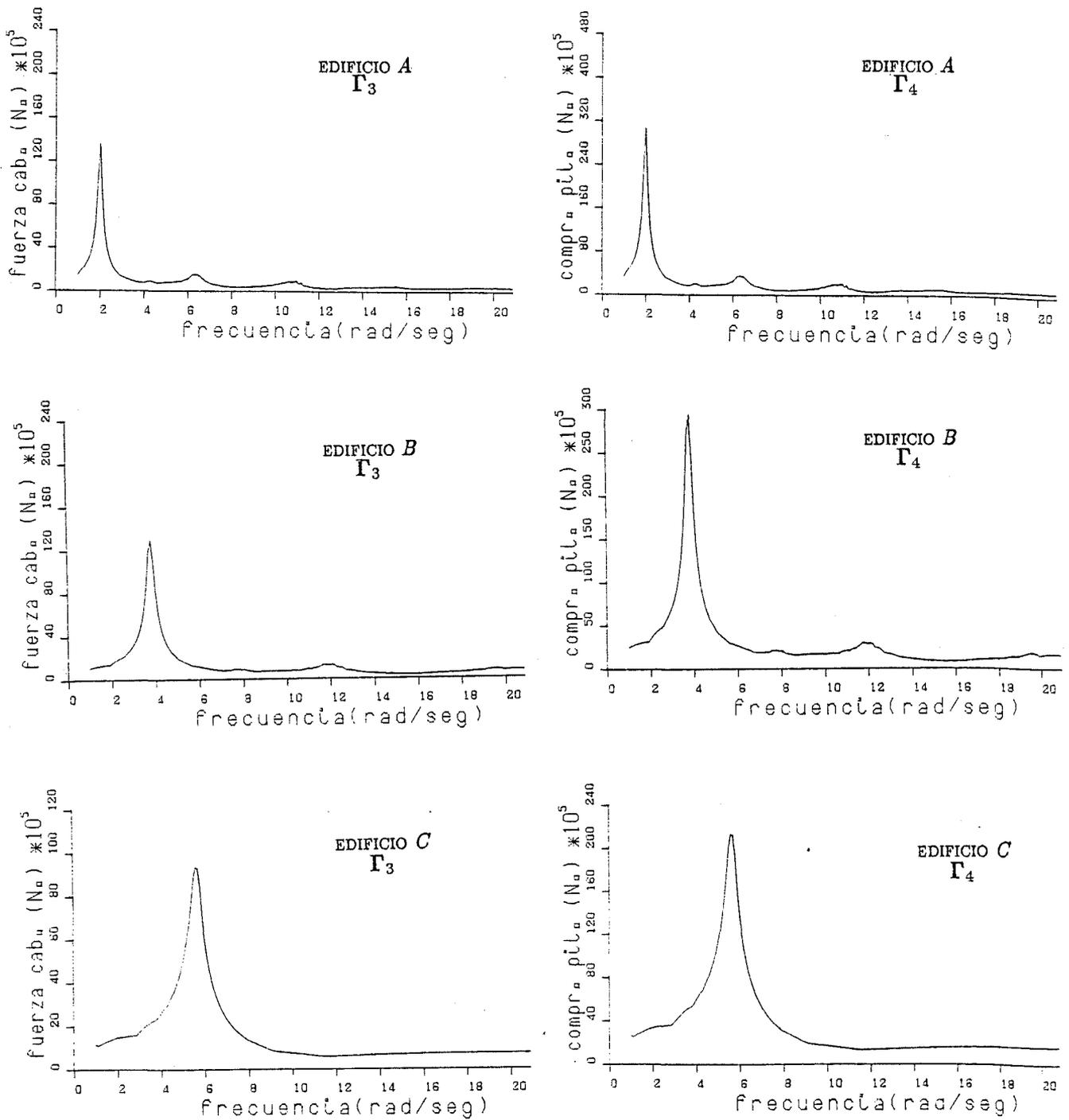


Figura 8.3b Valores de  $\Gamma_3$  y  $\Gamma_4$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 1 fuerza de control.

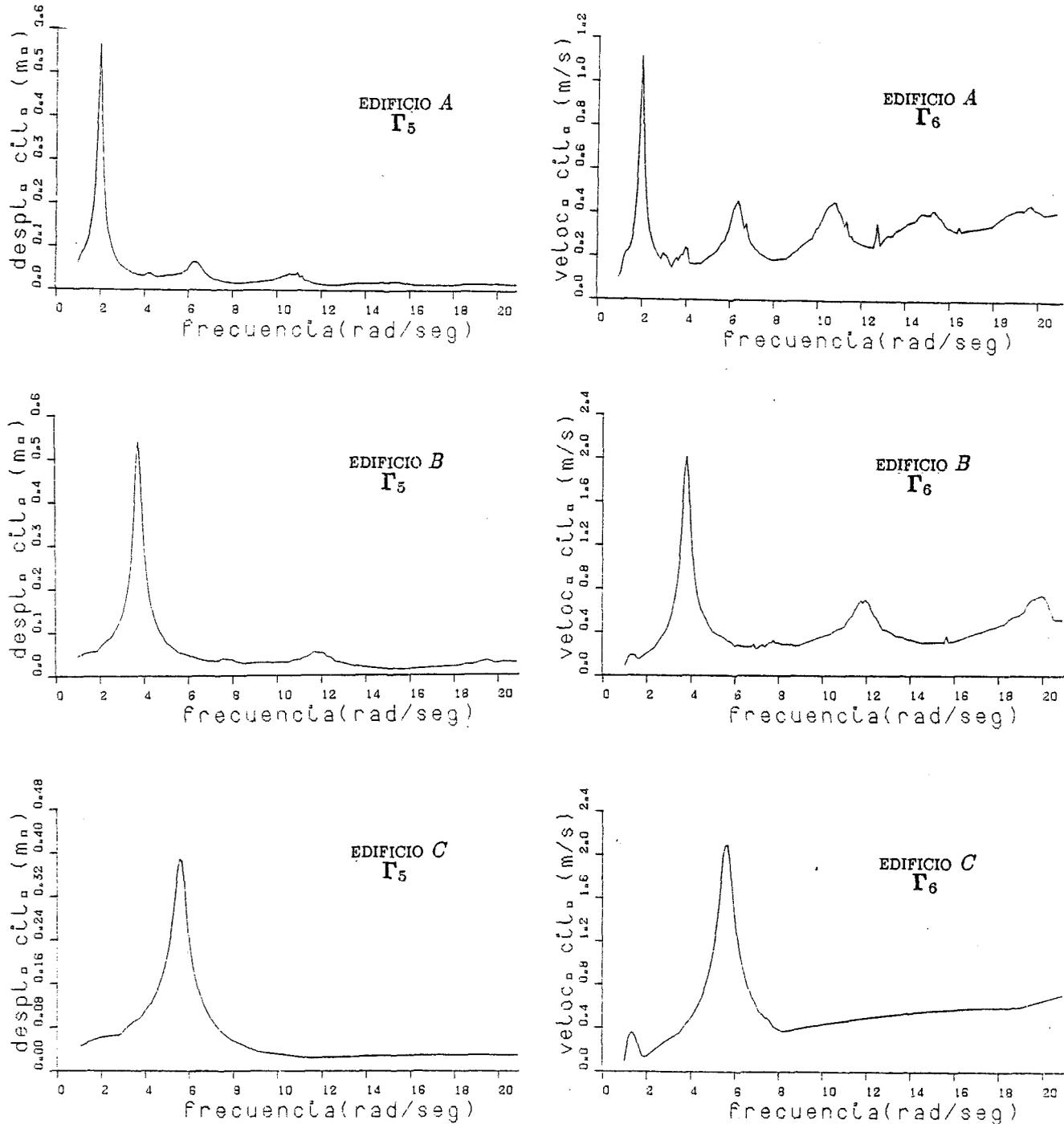


Figura 8.3c Valores de  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 1 fuerza de control.

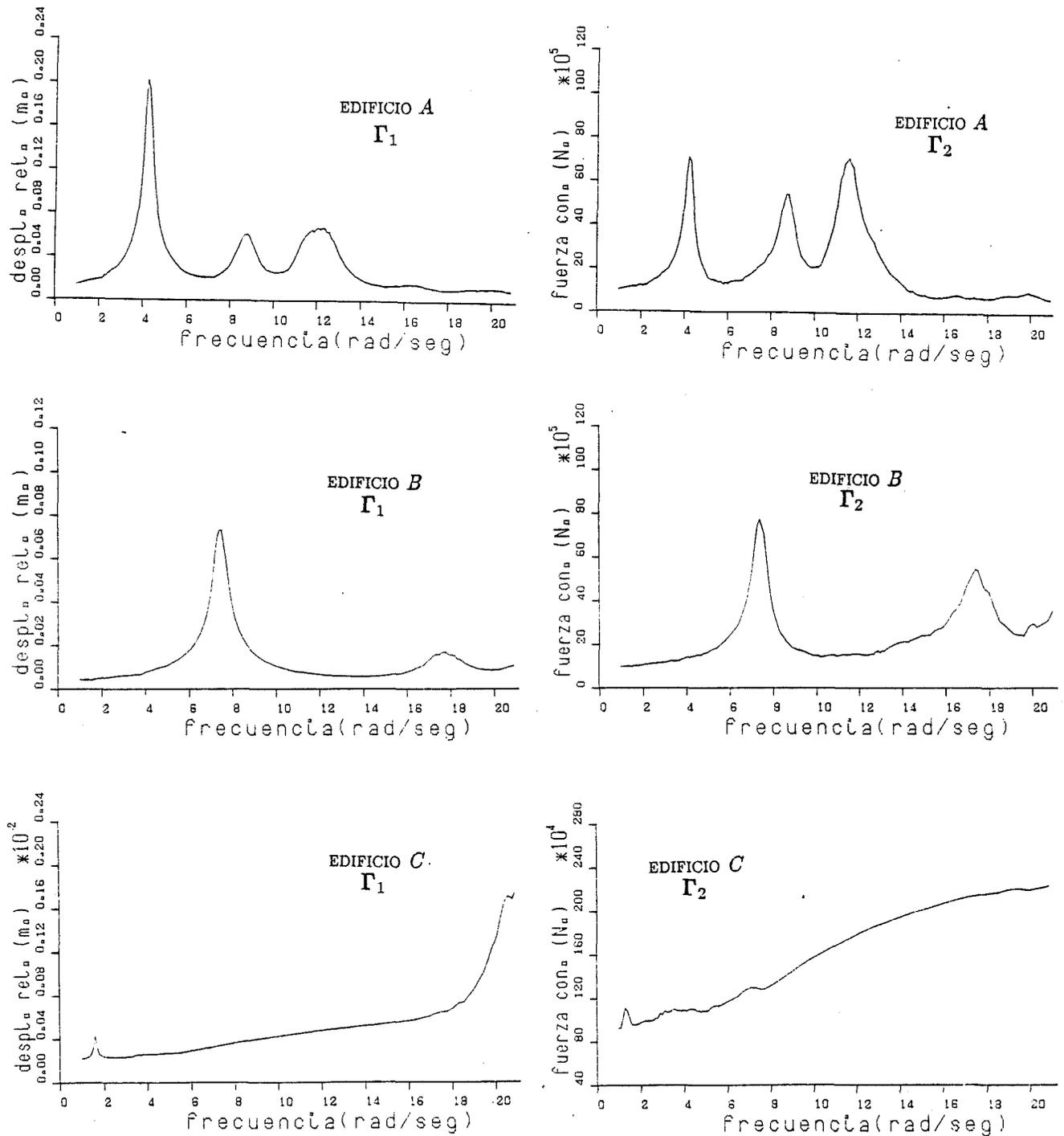


Figura 8.4a Valores de  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 3 fuerzas de control.

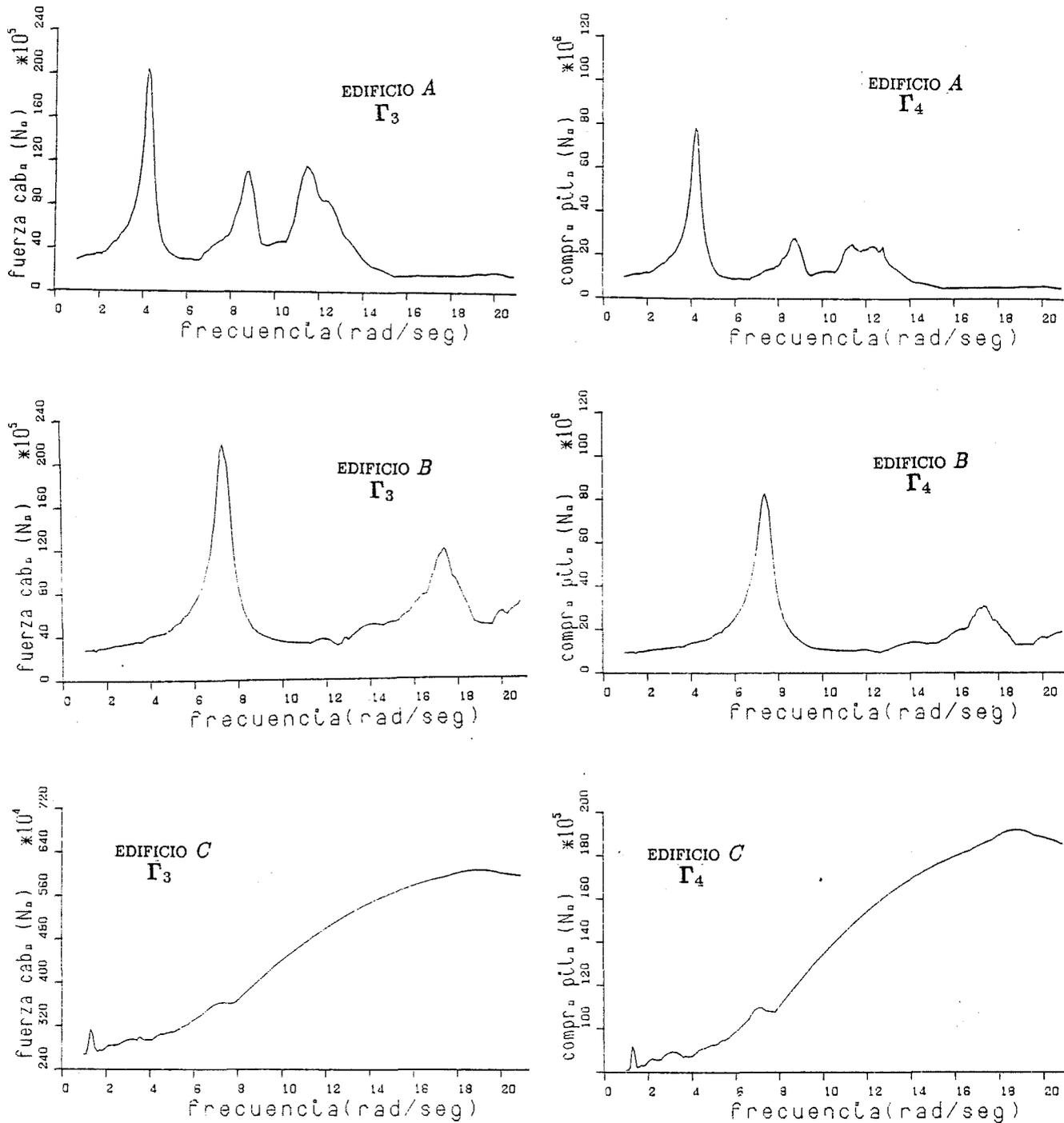


Figura 8.4b Valores de  $\Gamma_3$  y  $\Gamma_4$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 3 fuerzas de control.

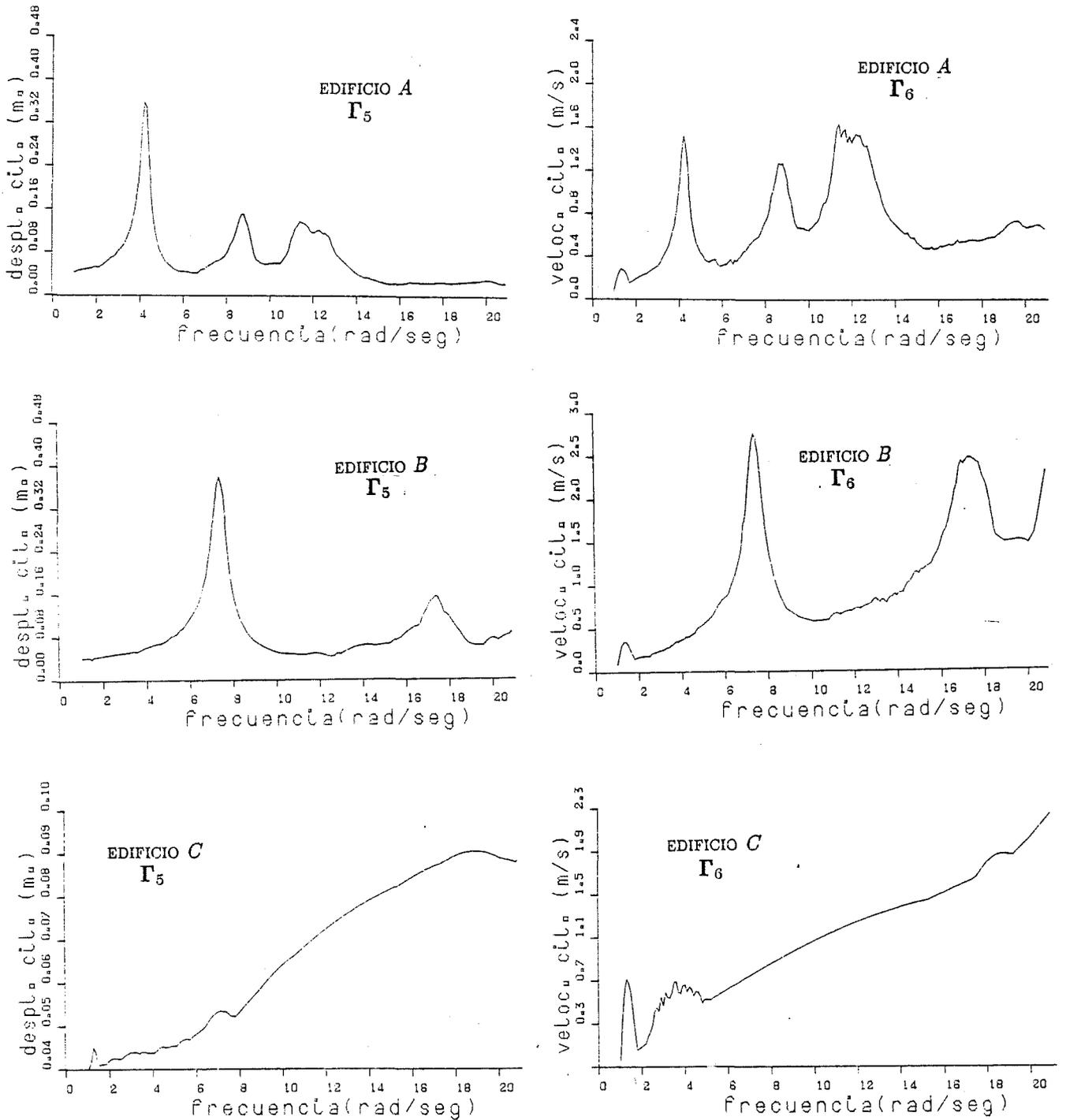


Figura 8.4c Valores de  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 3 fuerzas de control.

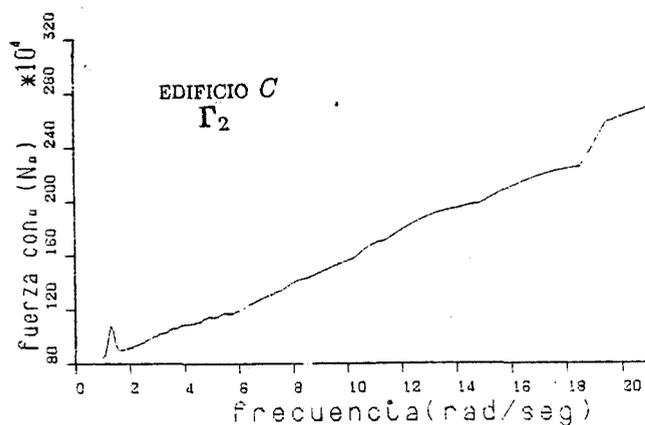
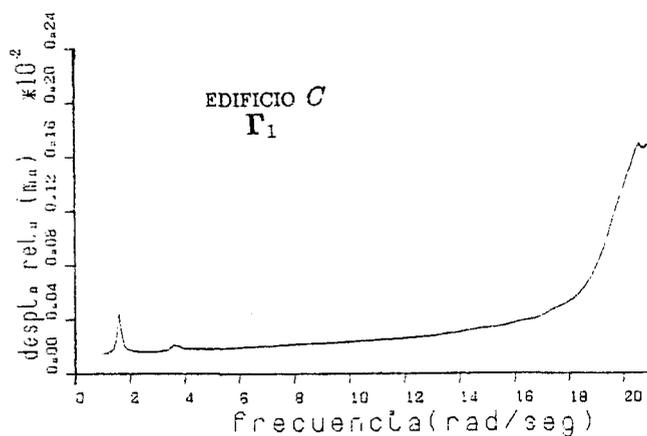
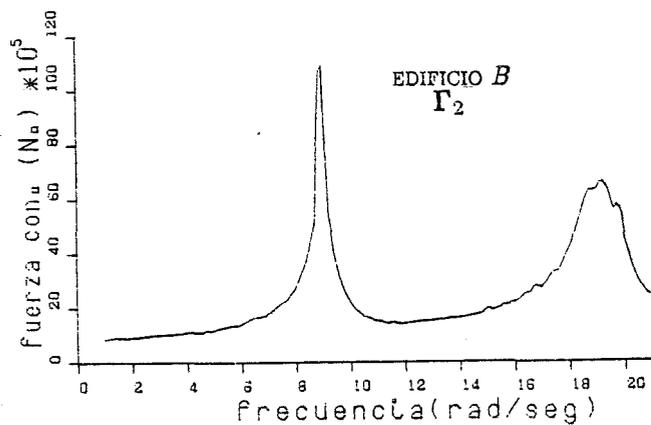
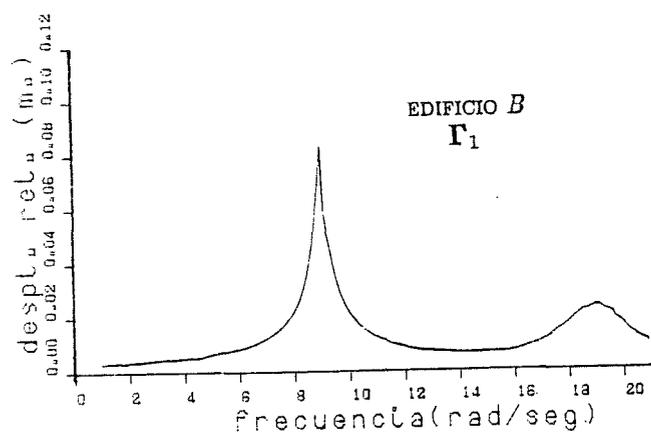
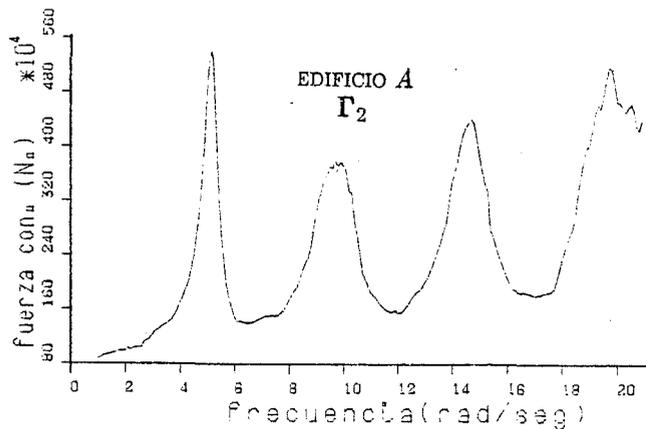
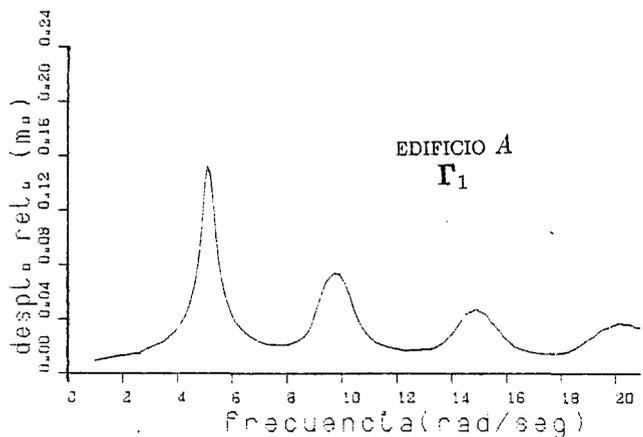


Figura 8.5a Valores de  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 4 fuerzas de control.

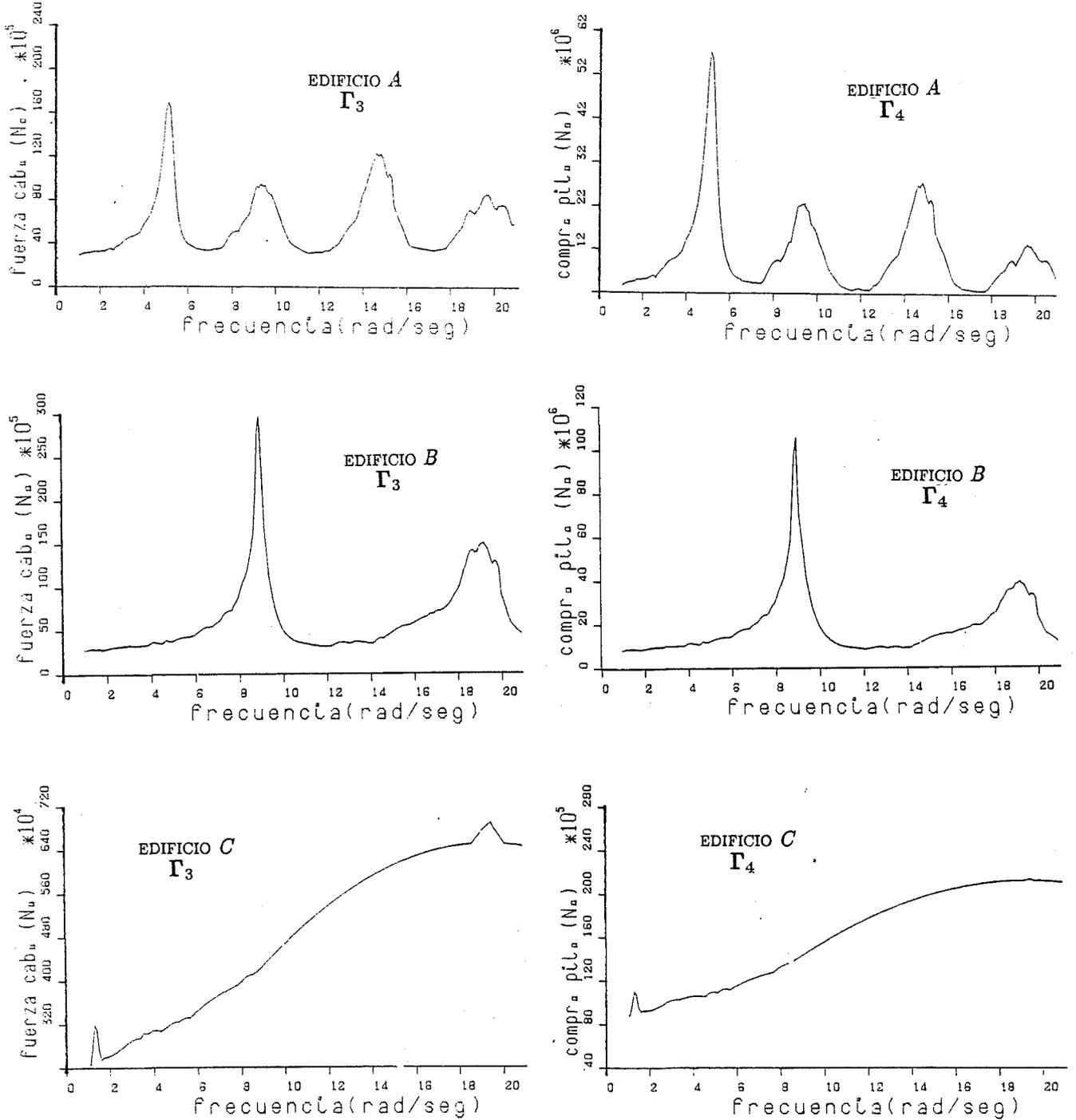


Figura 8.5b Valores de  $\Gamma_3$  y  $\Gamma_4$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 4 fuerzas de control.

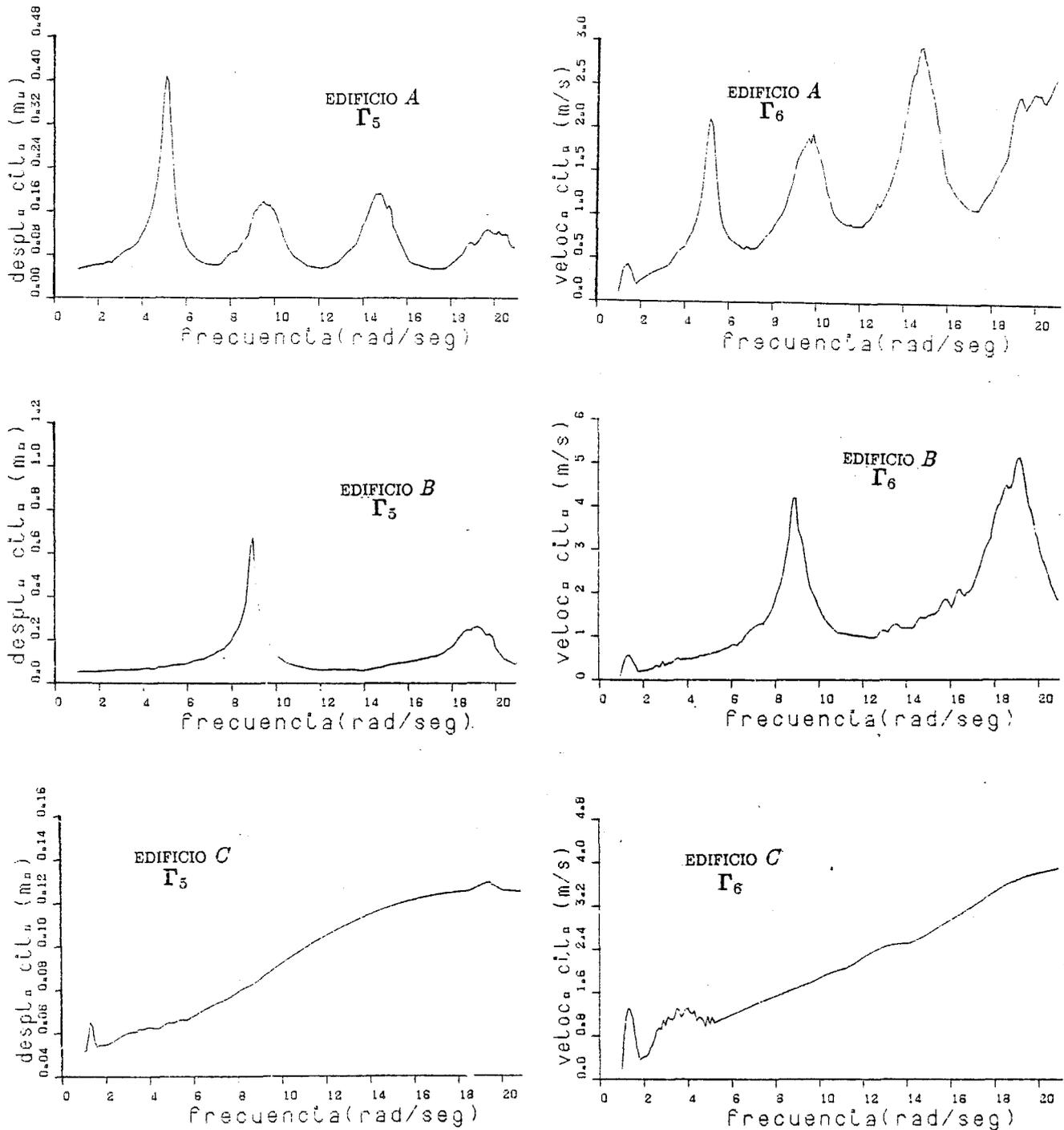


Figura 8.5c Valores de  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 4 fuerzas de control.

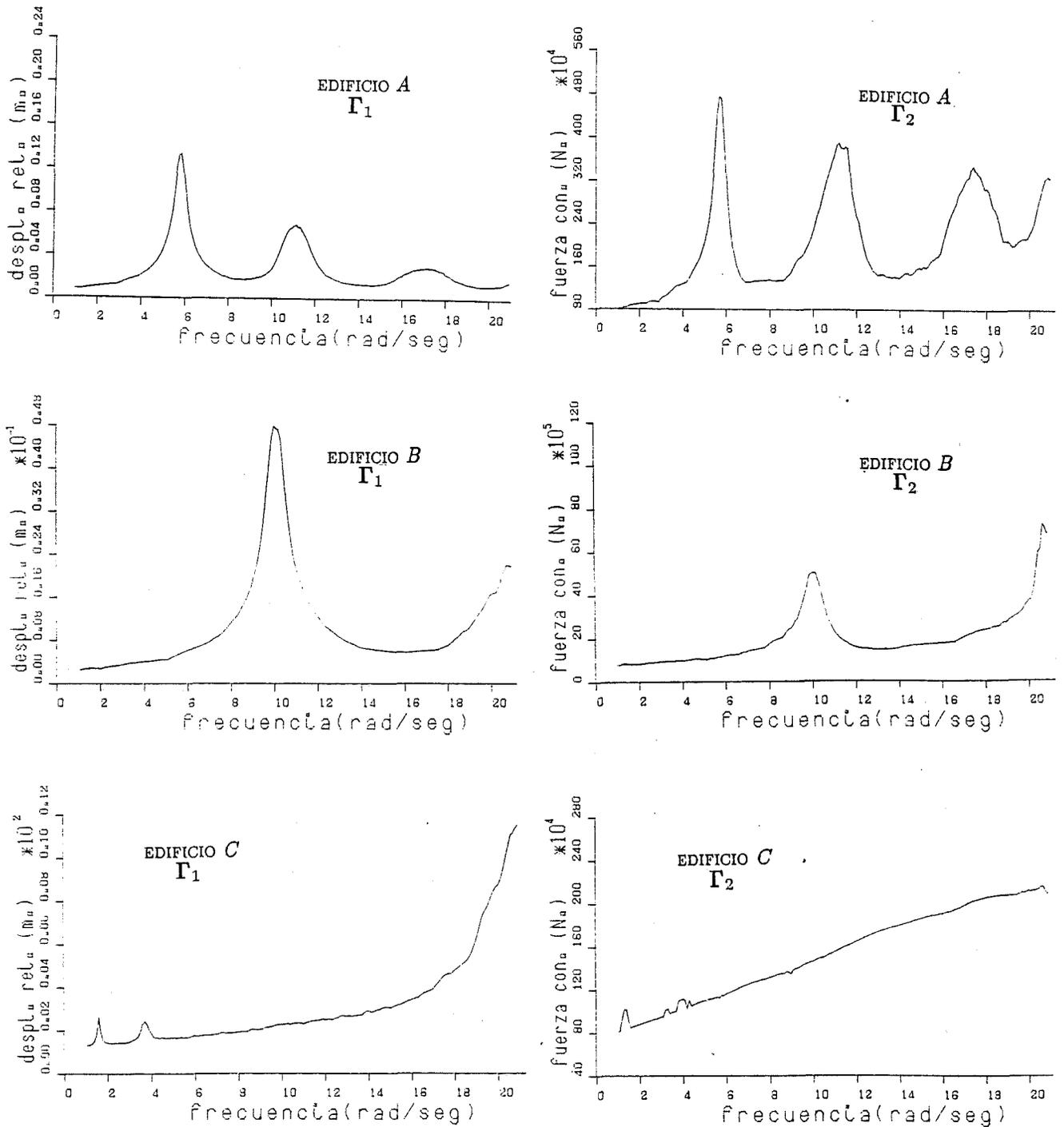


Figura 8.8a Valores de  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 5 fuerzas de control.

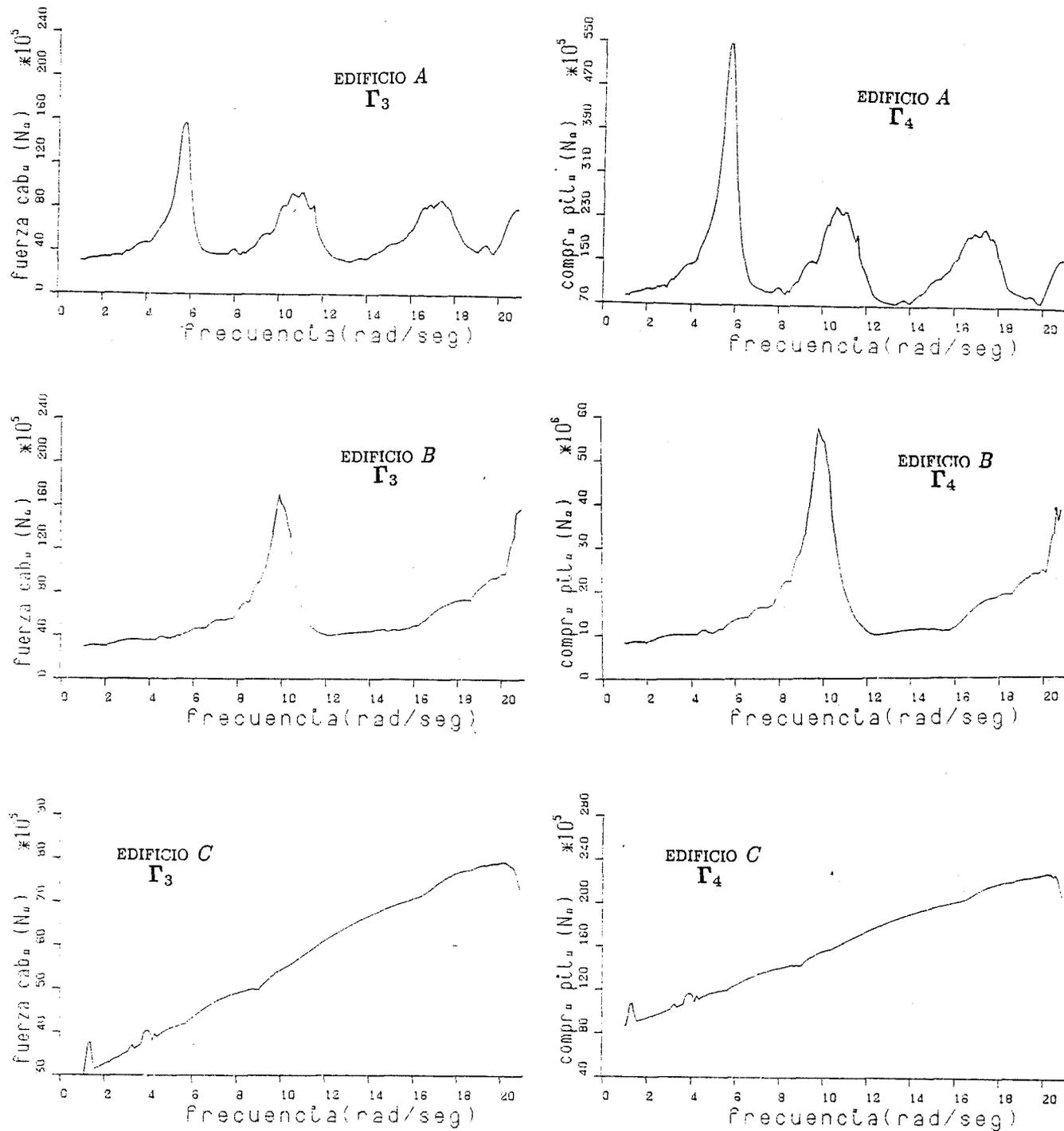


Figura 8.6b Valores de  $\Gamma_3$  y  $\Gamma_4$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 5 fuerzas de control.

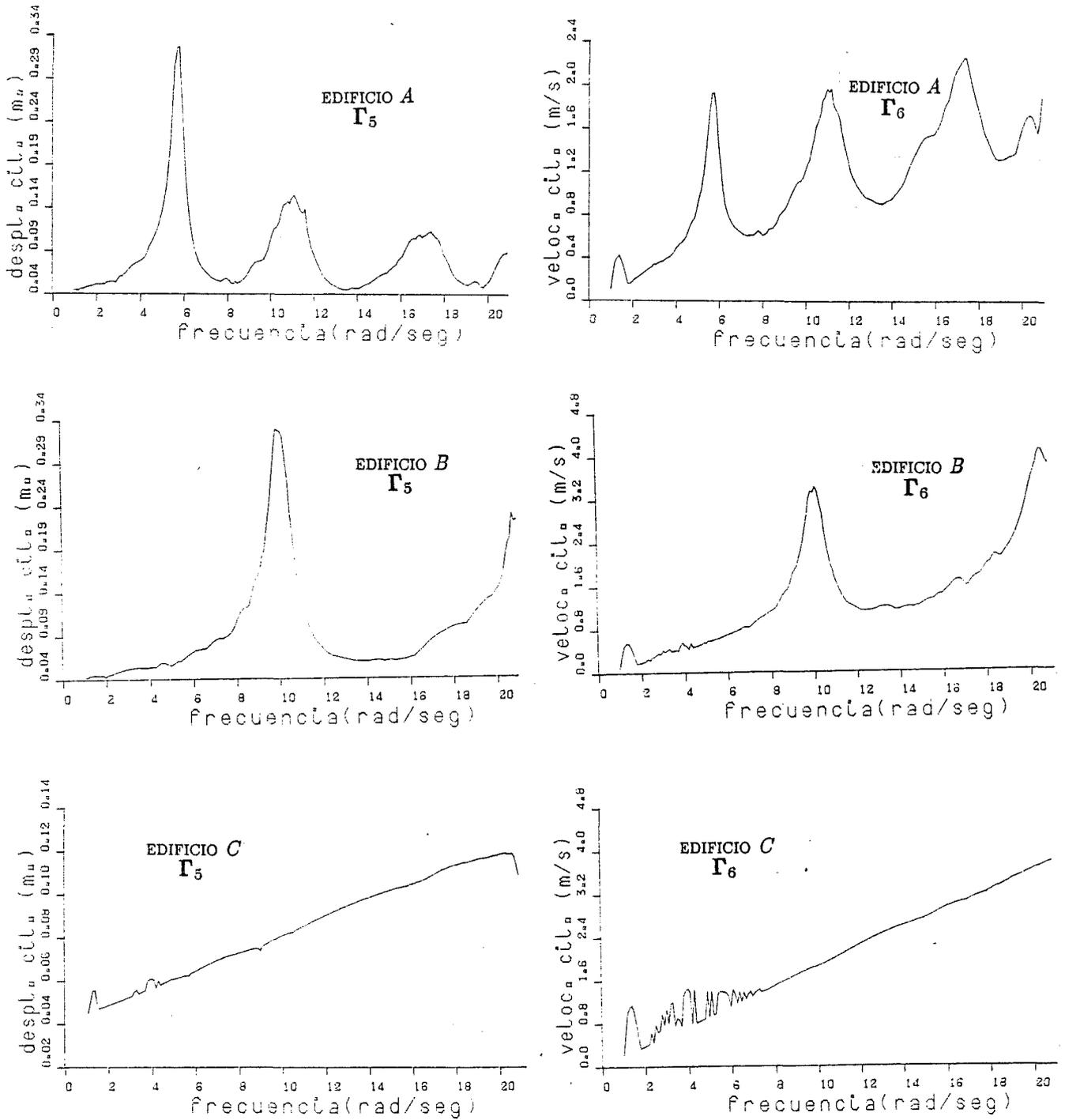


Figura 8.6c Valores de  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 5 fuerzas de control.

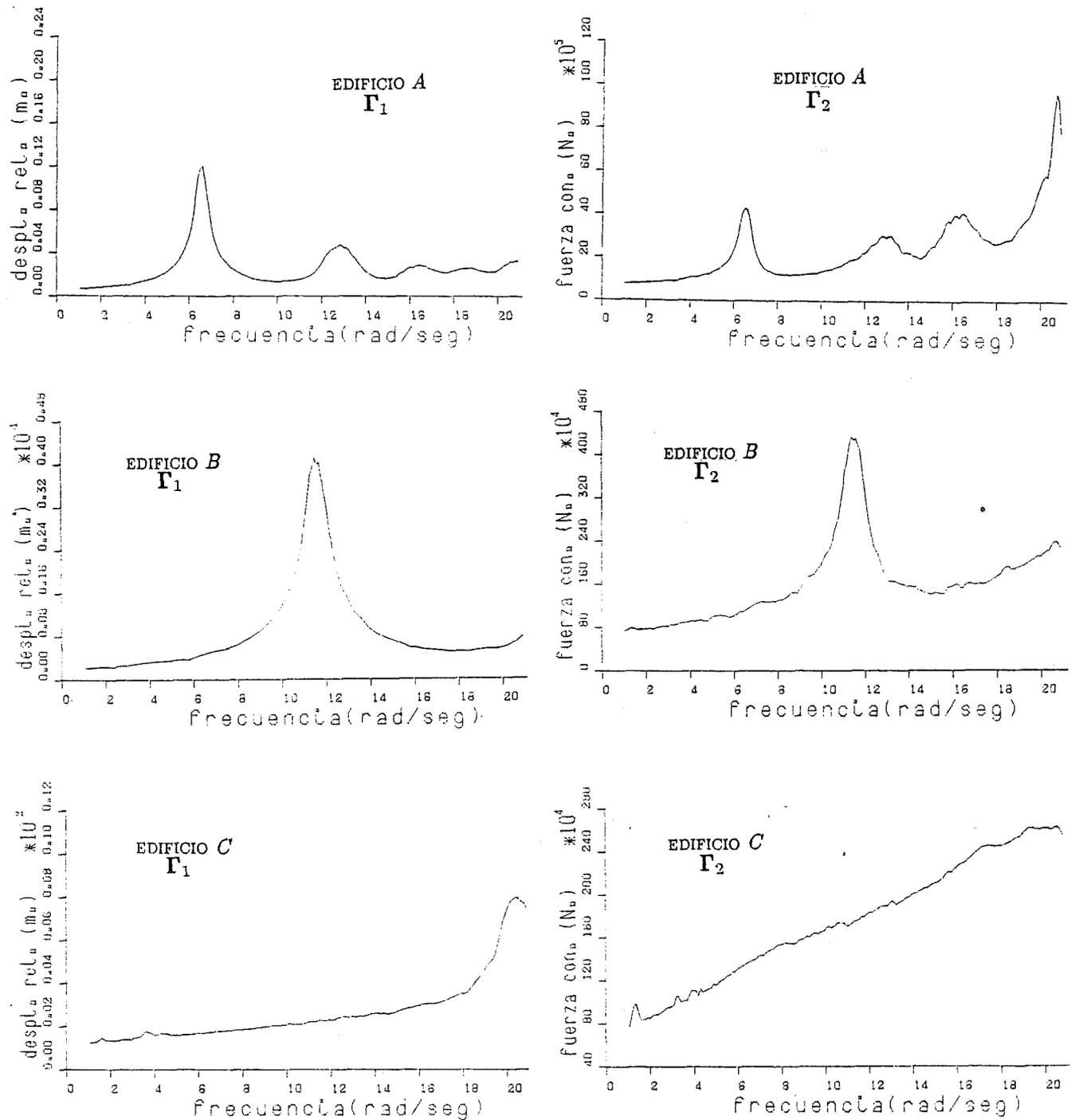


Figura 8.7a Valores de  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 6 fuerzas de control.

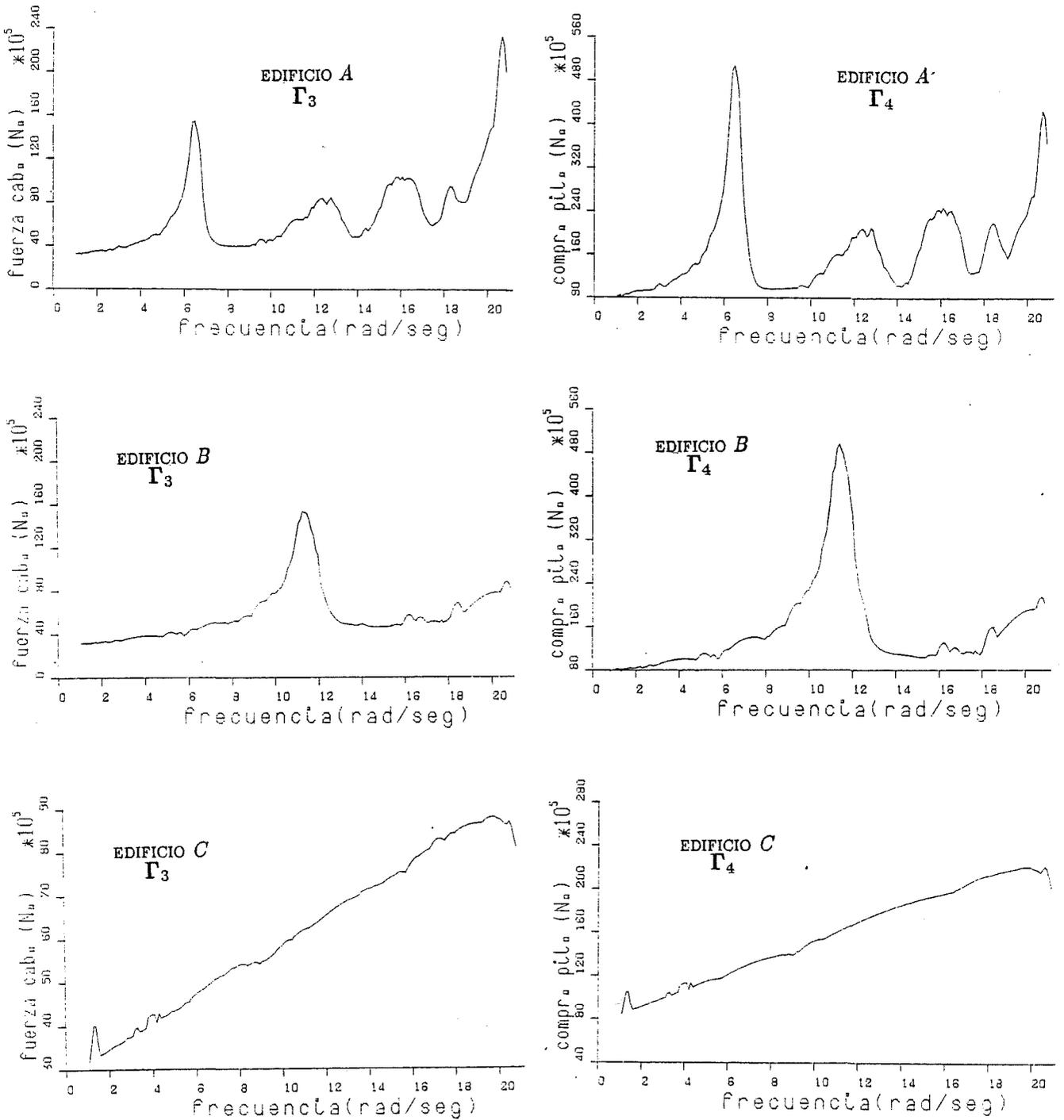


Figura 8.7b Valores de  $\Gamma_3$  y  $\Gamma_4$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 6 fuerzas de control.

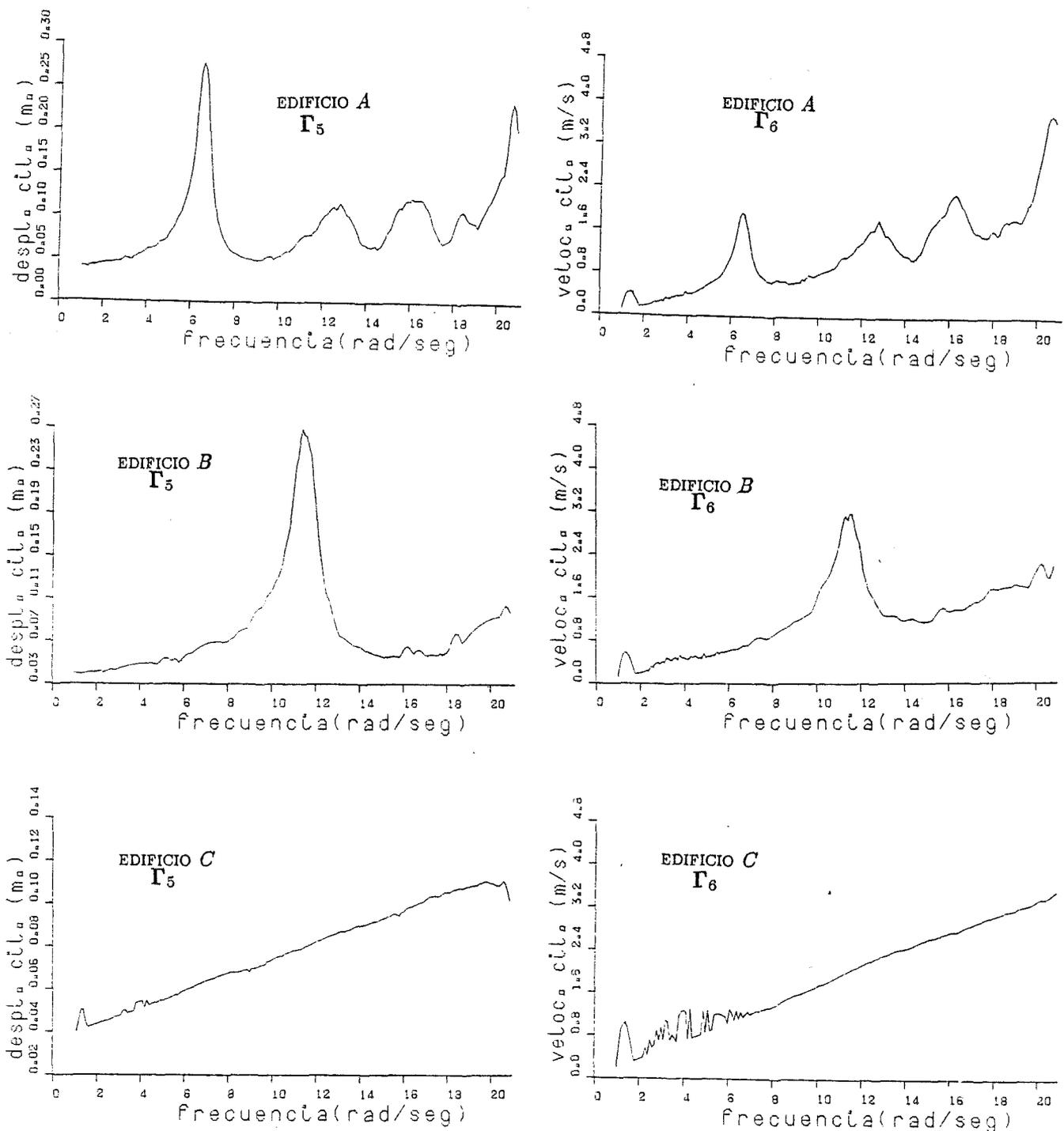


Figura 8.7c Valores de  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 6 fuerzas de control.

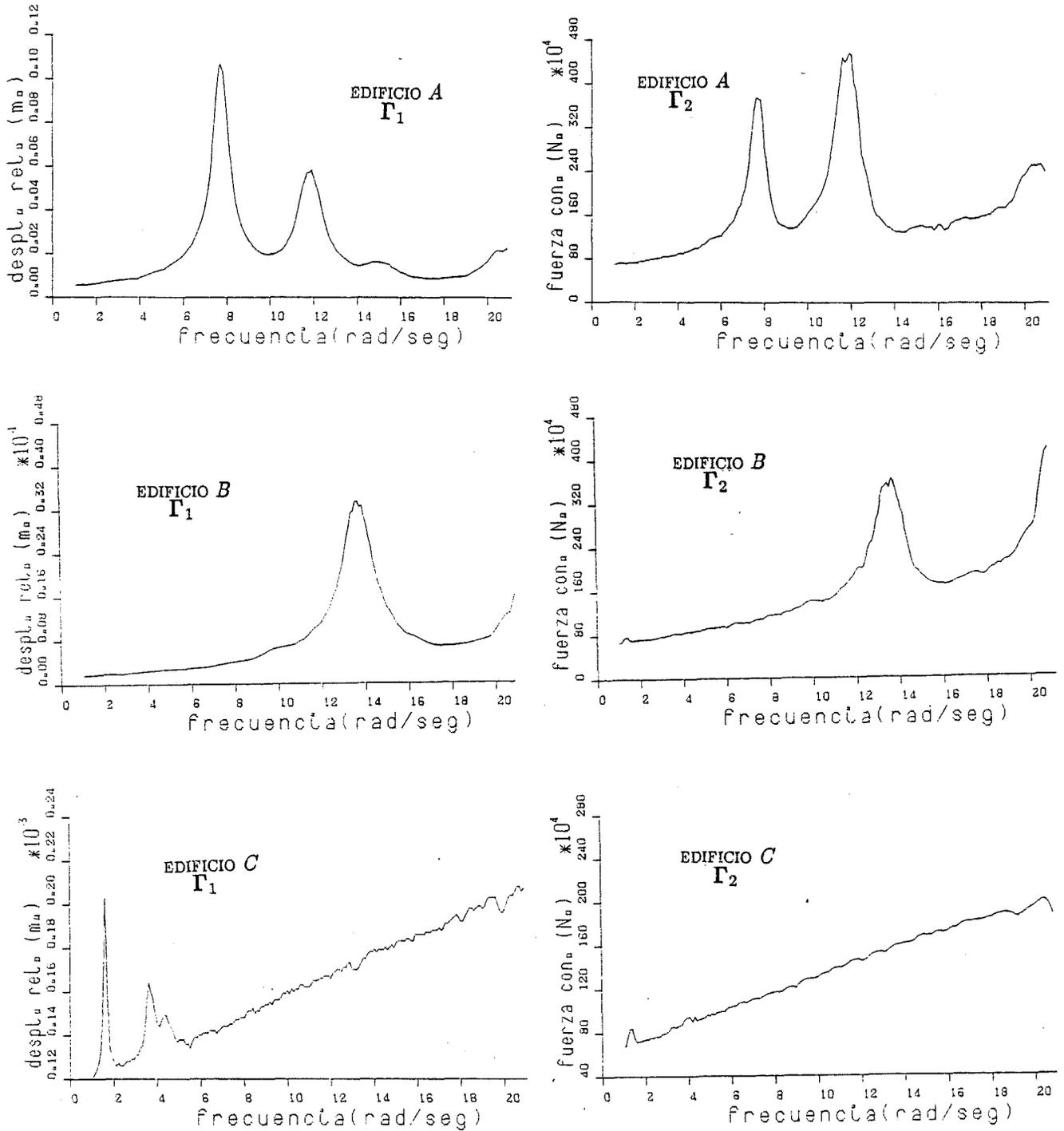


Figura 8.8a Valores de  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 7 fuerzas de control.

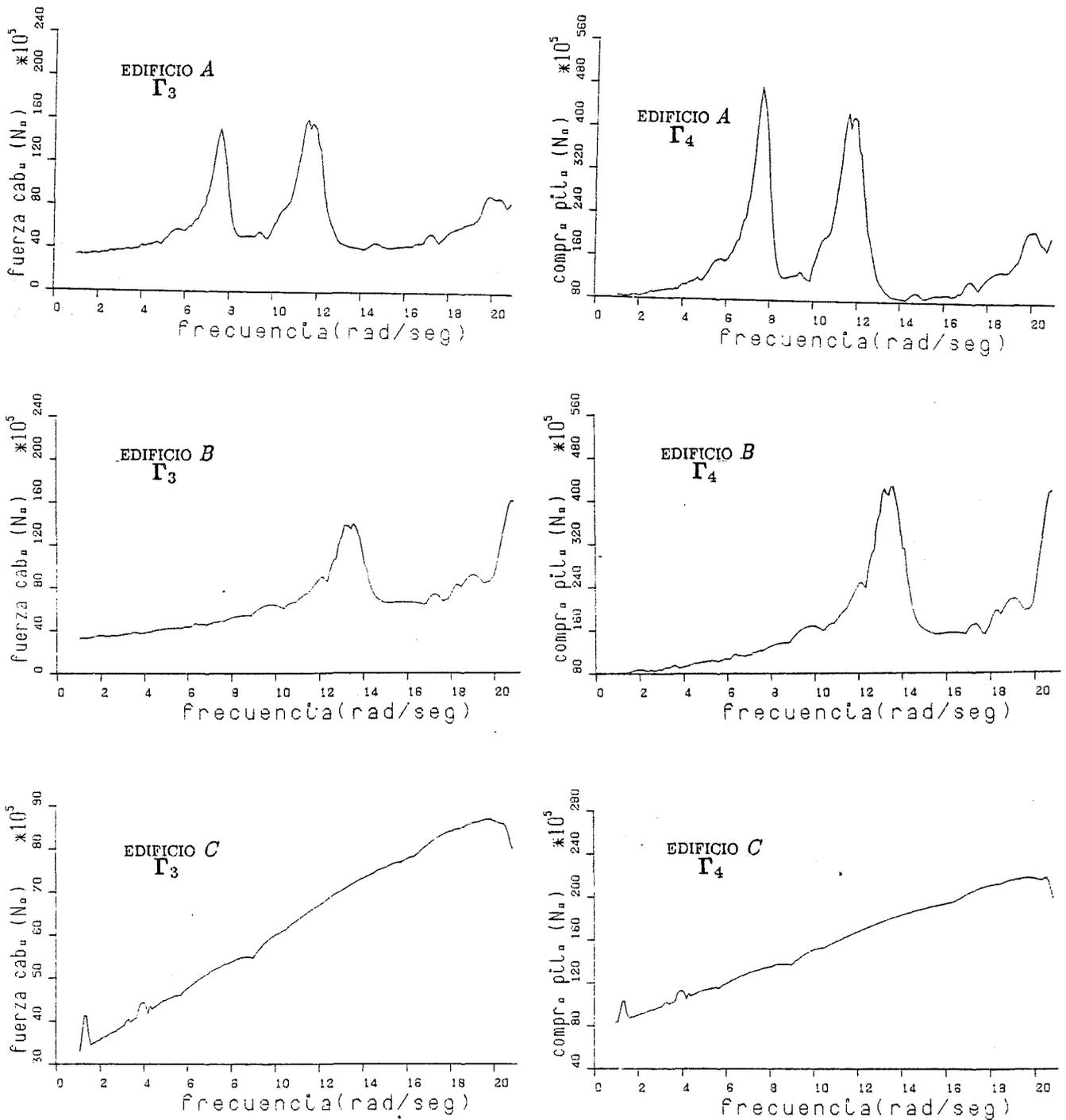


Figura 8.8b Valores de  $\Gamma_3$  y  $\Gamma_4$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 7 fuerzas de control.

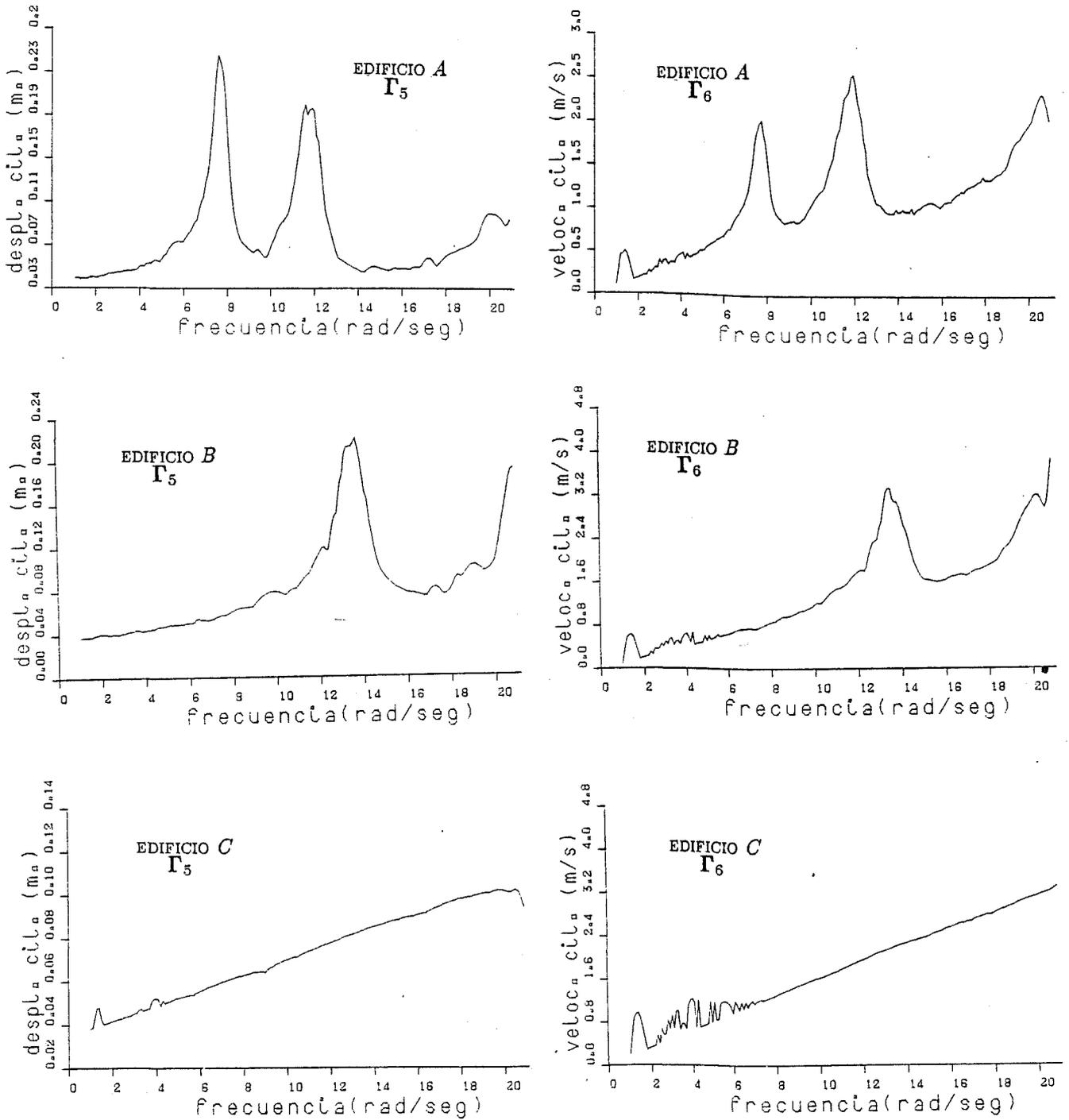


Figura 8.8c Valores de  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 7 fuerzas de control.

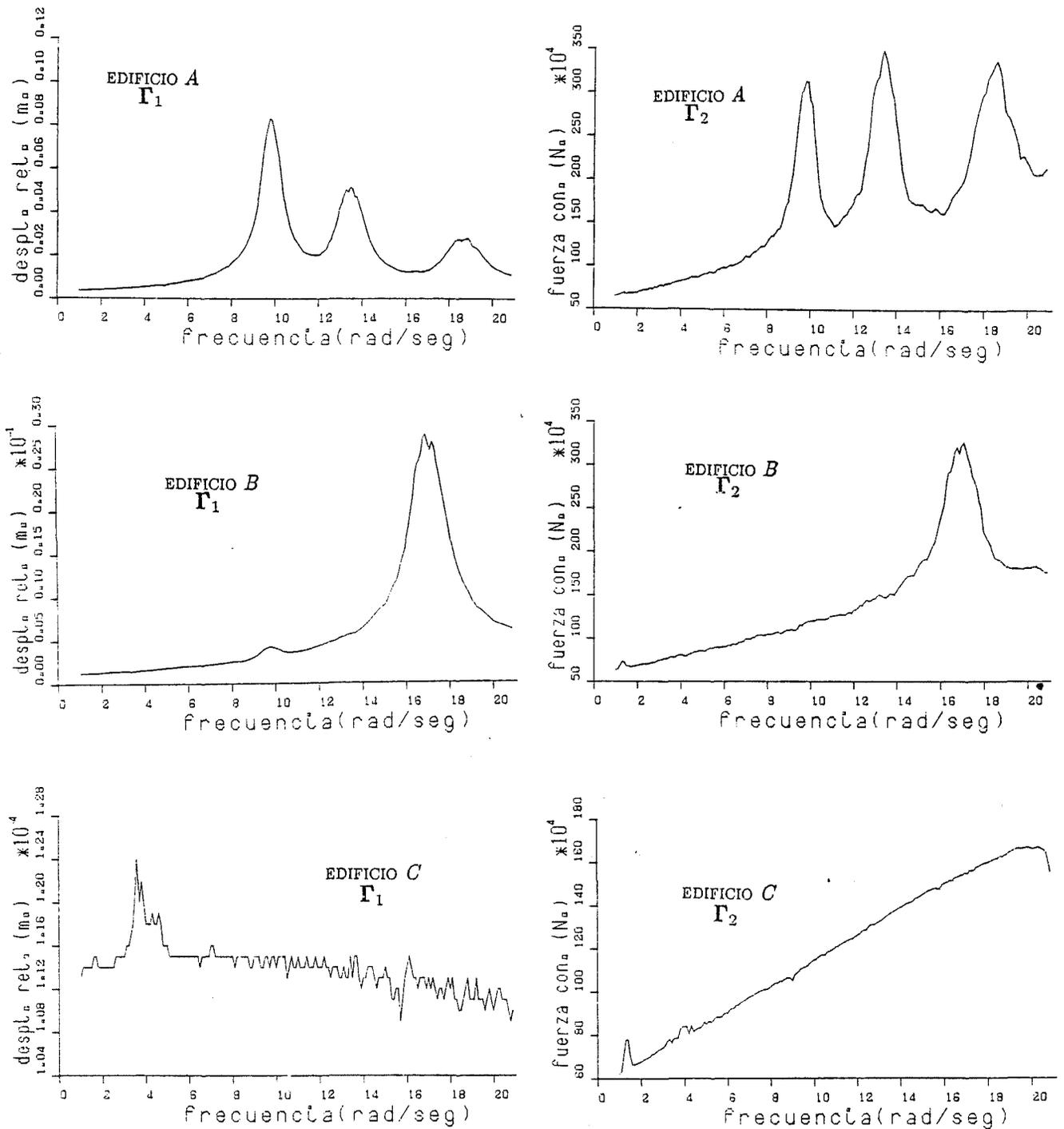


Figura 8.9a Valores de  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 8 fuerzas de control.

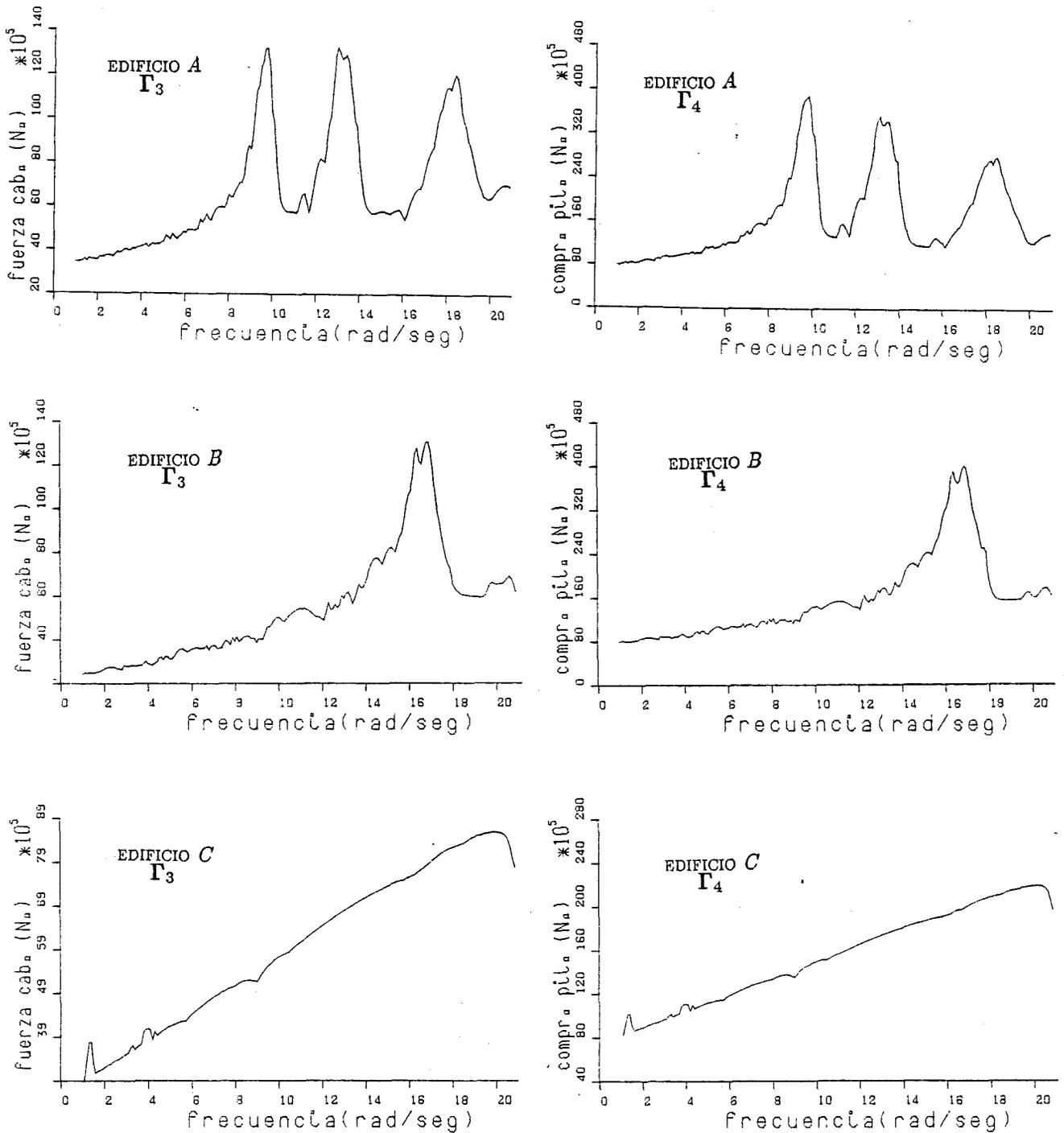


Figura 8.9b Valores de  $\Gamma_3$  y  $\Gamma_4$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 8 fuerzas de control.

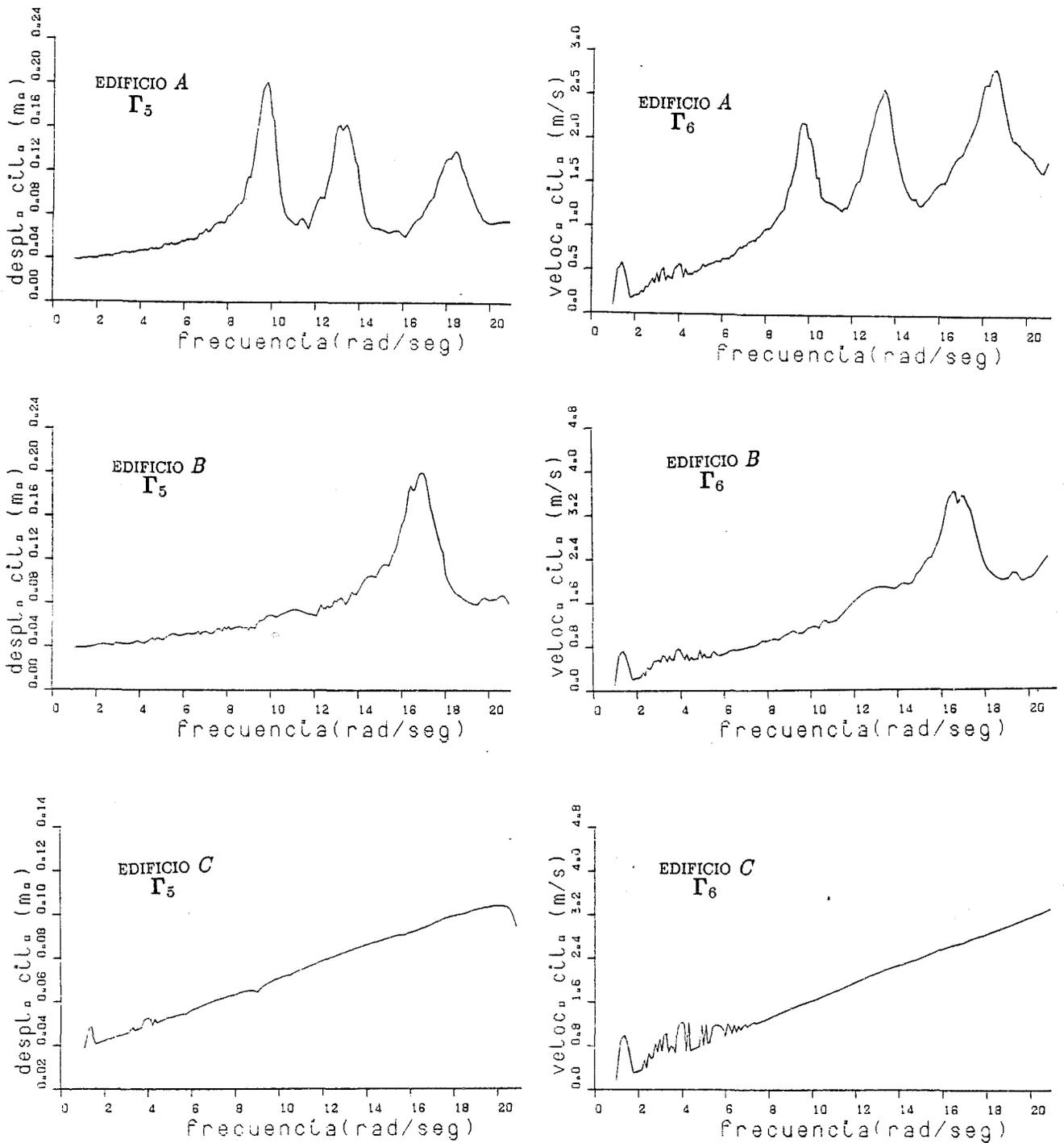


Figura 8.9c Valores de  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 8 fuerzas de control.

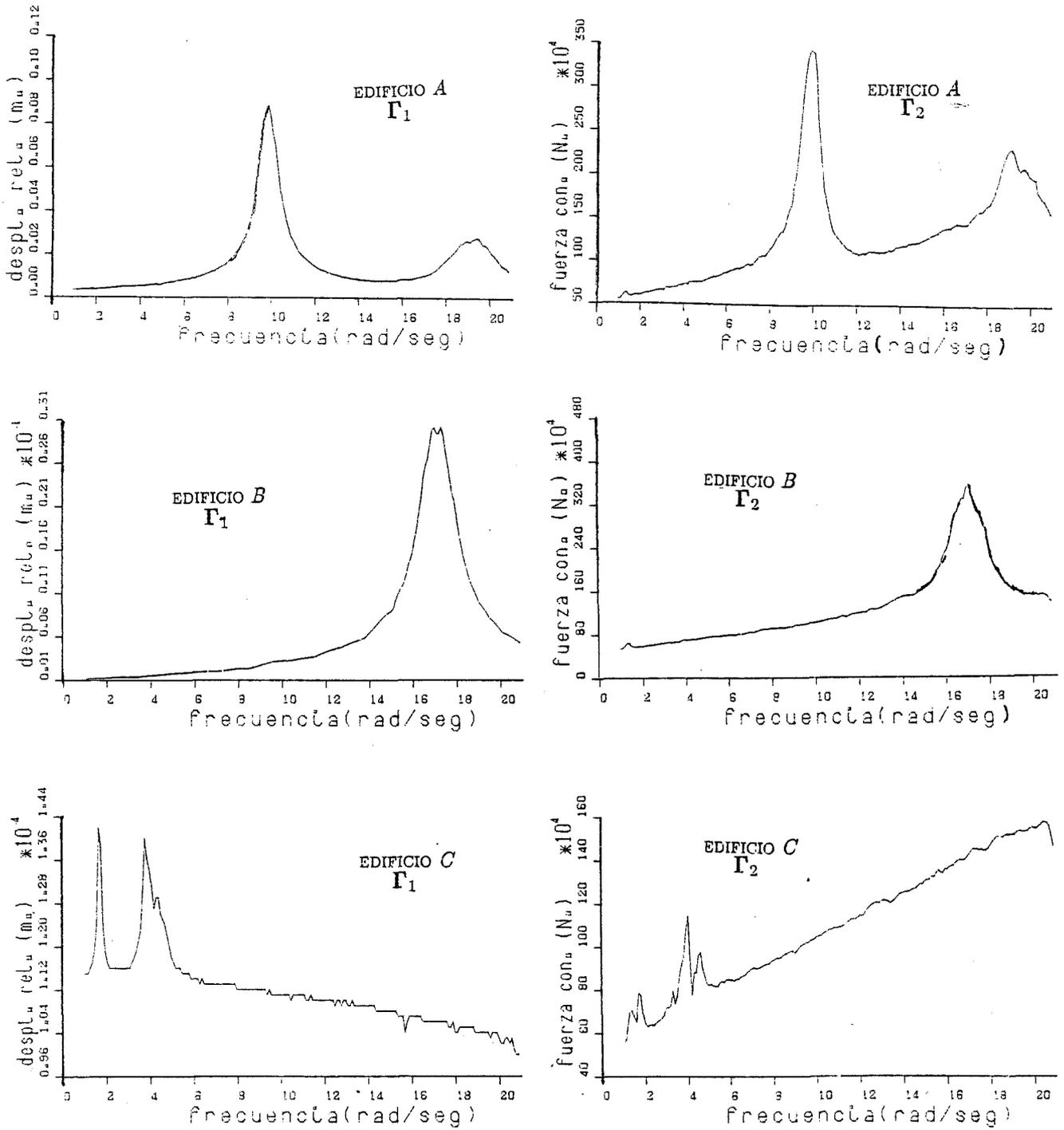


Figura 8.10a Valores de  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 11 fuerzas de control.

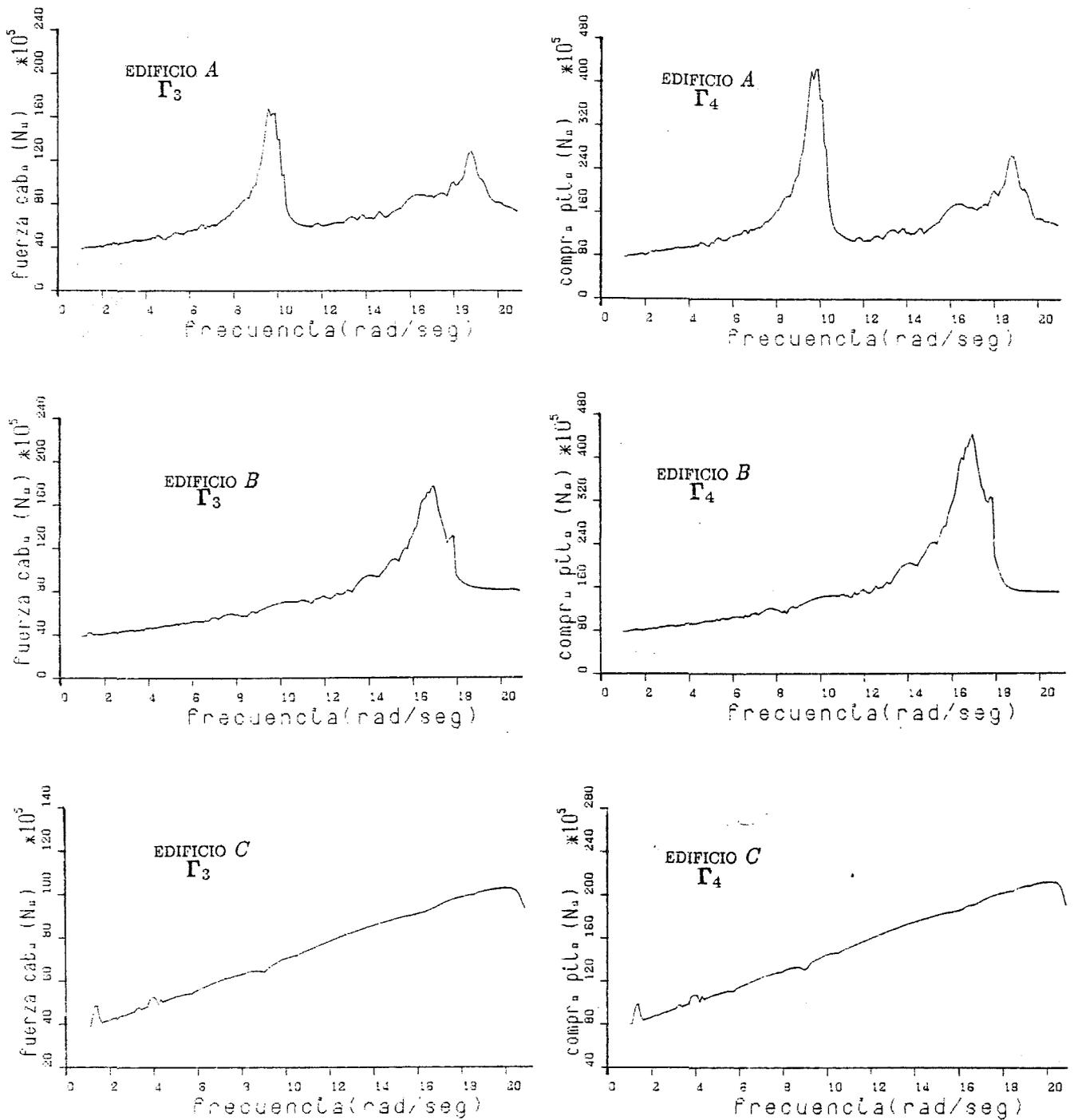


Figura 8.10b Valores de  $\Gamma_3$  y  $\Gamma_4$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 11 fuerzas de control.

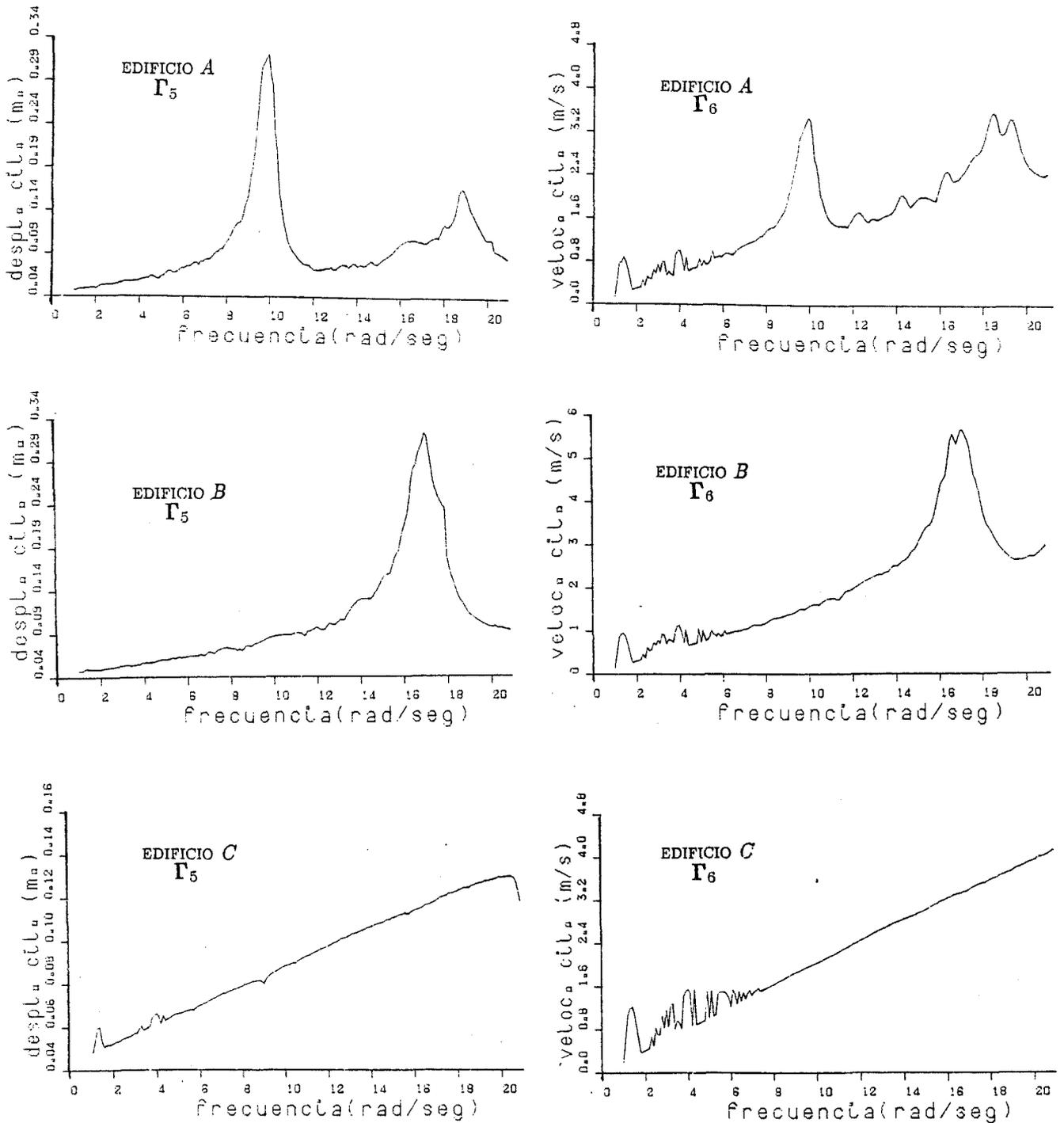


Figura 8.10c Valores de  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 11 fuerzas de control.

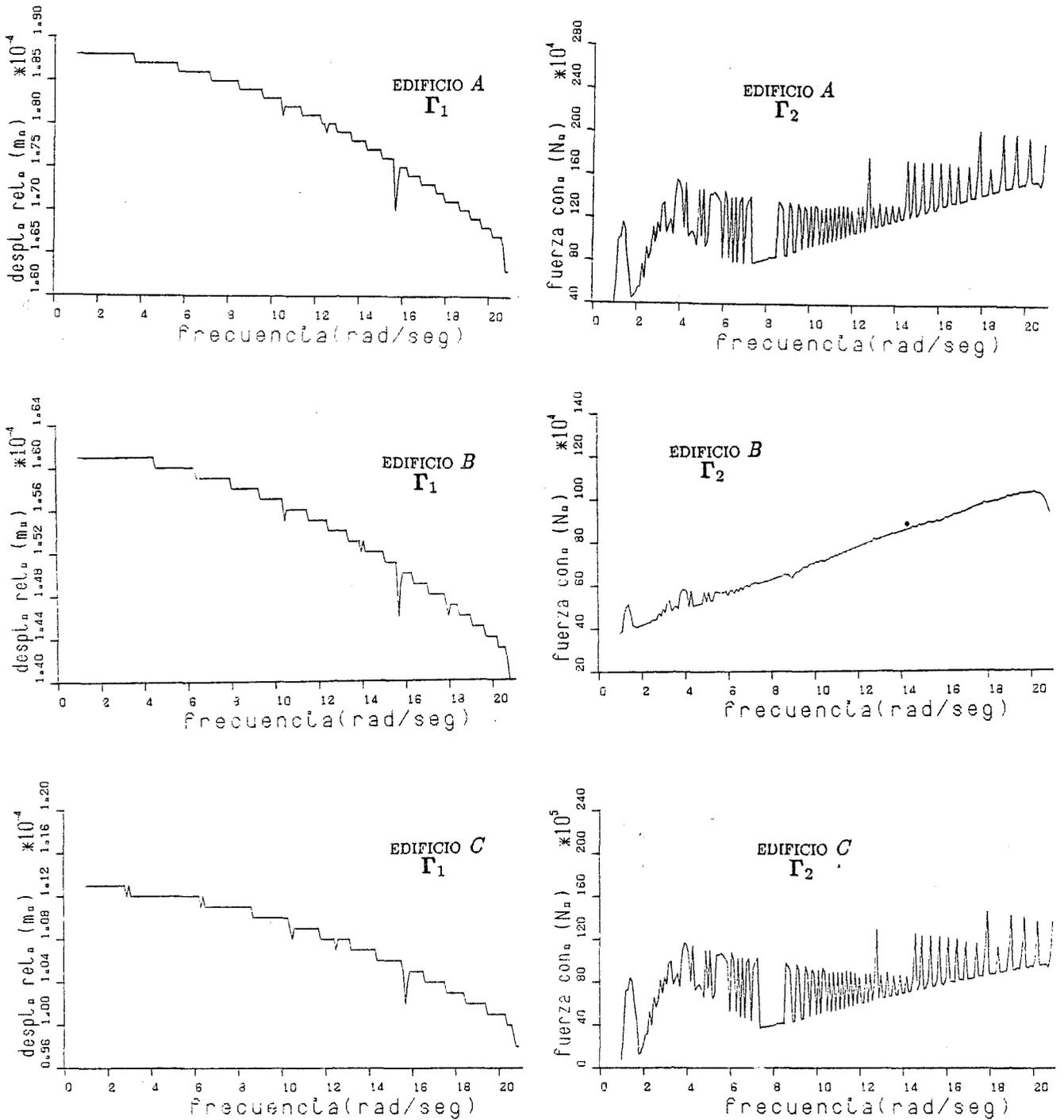


Figura 8.11a Valores de  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 23 fuerzas de control.

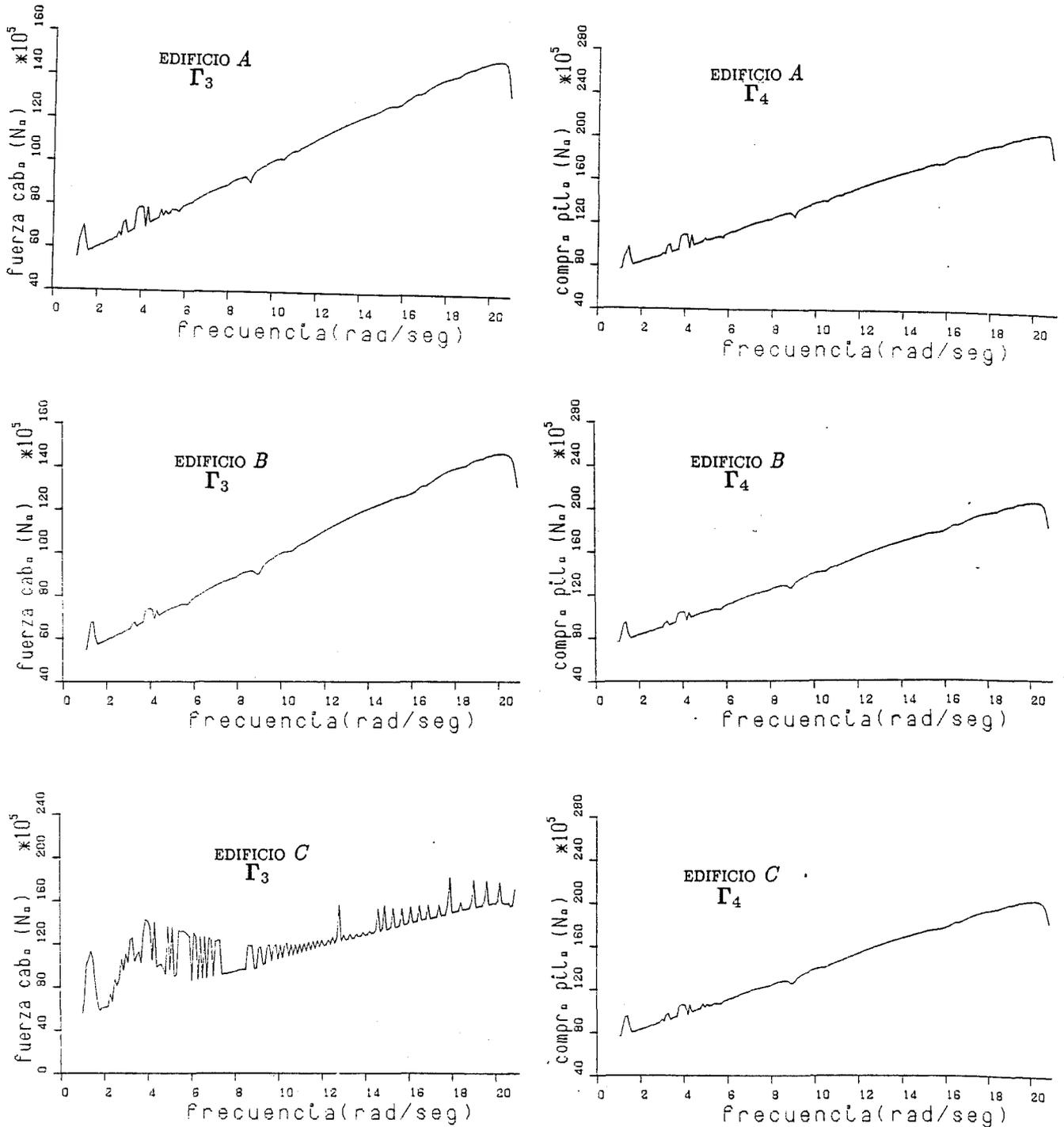


Figura 8.11b Valores de  $\Gamma_3$  y  $\Gamma_4$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 23 fuerzas de control.

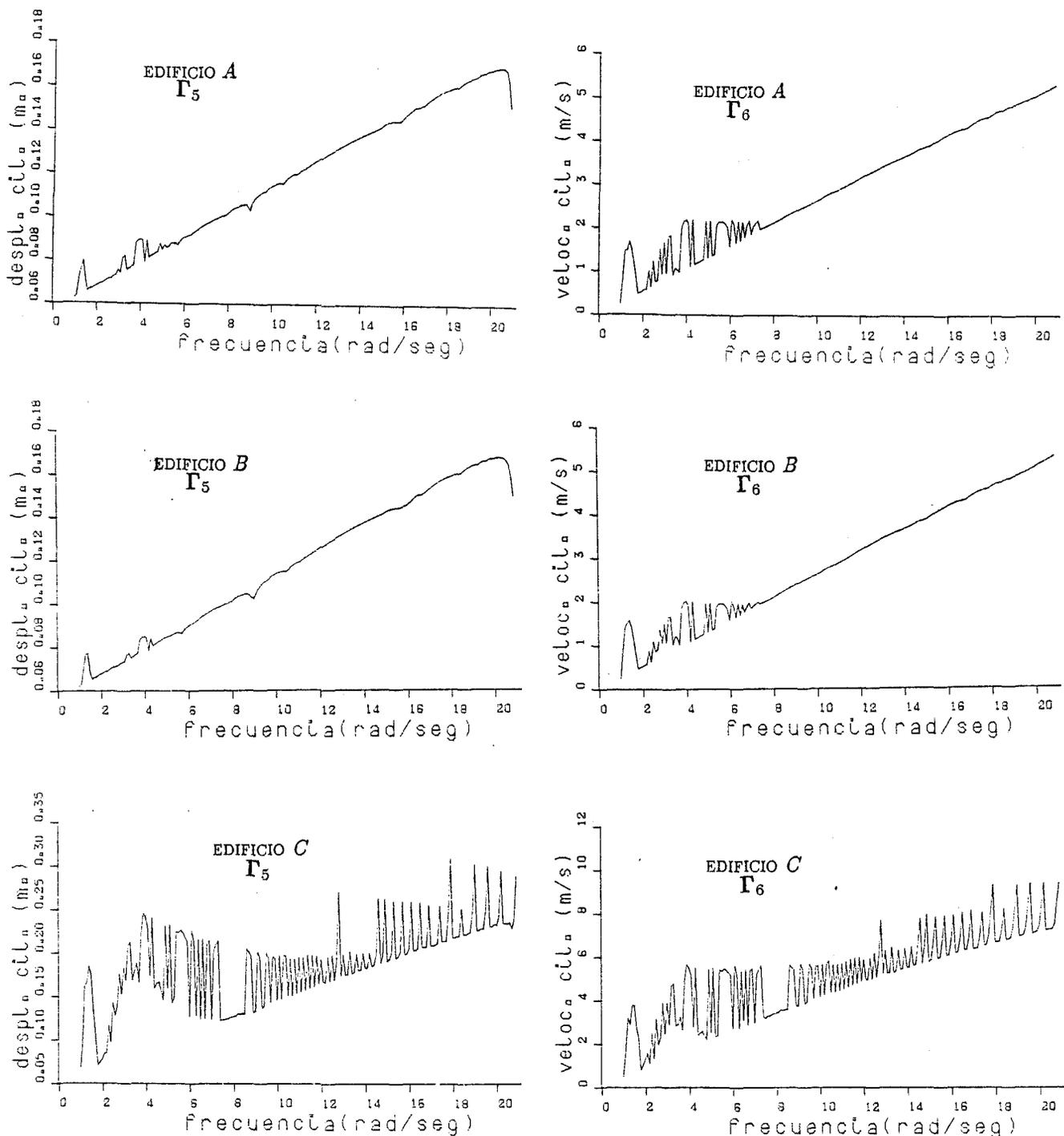


Figura 8.11c Valores de  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  para distintas frecuencias de excitación sinusoidal con 23 fuerzas de control.

cual corresponde a una acción de control más intensa. Las figuras 8.3a a 8.11c muestran que, para el mismo edificio y el mismo número de fuerzas de control, los mismos picos para  $\Gamma_1$  aparecen para  $\Gamma_2, \dots, \Gamma_6$ ; no obstante, al crecer el número de fuerzas de control las solicitaciones en el sistema de control (caracterizadas por los valores de los índices  $\Gamma_2, \dots, \Gamma_6$ ) no aumentan, con la única excepción del índice  $\Gamma_6$  correspondiente a la velocidad lineal del émbolo del cilindro hidráulico. Dicha última circunstancia se debe a que, cuando actúan más fuerzas de control, los valores máximos de dicho índice corresponden a mayores frecuencias de excitación que generan respuestas más rápidas frente a las cuales es necesario que los émbolos de los cilindros hidráulicos sigan el movimiento del edificio para generar una acción de control eficaz.

- La comparación entre la figura 8.2 y las figuras 8.3 y 8.4 muestra que en el edificio C puede obtenerse una apreciable reducción de la respuesta y un notable incremento de las frecuencias naturales de vibración con pocas fuerzas de control mientras que en los edificios A y B la acción es poco eficaz con 3 fuerzas de control y totalmente ineficaz con 1. Las figuras 8.5 a 8.11 muestran que en los edificios A y B se precisa un número importante de fuerzas de control para conseguir una atenuación de la respuesta y un incremento de las frecuencias naturales similares a las obtenidas en el edificio C con pocas fuerzas de control. Ello se debe a las características del comportamiento dinámico del edificio C, por una parte, y de los edificios A y B, por otra parte, descritas en el apartado 1 del presente capítulo: en la respuesta dinámica del edificio C la única componente con peso apreciable es casi exclusivamente la correspondiente al modo propio fundamental mientras que en la respuesta de los edificios A y B intervienen en proporciones significativas los 5 modos propios superiores lo cual, teniendo en cuenta la configuración de los vectores modales correspondientes a dichos modos, significa que en los edificios A y B son posibles deformadas con una mayor "sinuosidad" que en el edificio C; de dicha circunstancia se deduce que, con un número pequeño de fuerzas de control, no es posible impedir la aparición en los edificios A y B de deformadas muy sinuosas que corresponden a un valor elevado del índice  $\Gamma_1$  y, consecuentemente, de las tensiones en las barras de la estructura. La figura 8.3a muestra que con una única fuerza de control en la planta superior no es posible generar en los edificios

A y B una acción de control eficaz mientras que sí que lo es en el edificio C.

- Para un mismo número de fuerzas de control, el porcentaje de reducción de la respuesta dinámica es similar para los edificios A y B. El coste energético (estimado a partir de los valores de los índices  $\Gamma_2, \dots, \Gamma_6$ ) es también similar y, consecuentemente, es proporcionalmente superior en el edificio B cuya respuesta dinámica es menor. Ello se debe a la mayor rigidez del edificio B.
- Cuando actúa una fuerza de control en cada una de las 23 plantas las figuras 8.11a a 8.11c muestran que las respuestas dinámicas y las solicitaciones sobre el sistema de control son casi iguales en los tres edificios A, B y C. Ello se debe a que, en dicho caso, la influencia de la acción de control en el comportamiento dinámico del edificio es más importante que la influencia de las características de los edificios. La figura 8.11a muestra que la reducción de la respuesta dinámica es muy importante para cualquier valor de la frecuencia de las excitaciones consideradas en dicha figura. Para frecuencias superiores a  $21 \text{ rad/seg}$  se han efectuado experiencias numéricas que permiten extrapolar dichas conclusiones fuera del rango considerado en las figuras 8.3a a 8.11c.

Teniendo en cuenta la intensidad de la excitación sinusoidal considerada en el presente apartado y las conclusiones anteriores, puede afirmarse que los sistemas de control considerados en este capítulo son factibles y útiles para reducir la respuesta sísmica de estructuras de edificación de altura similar a la de los edificios A, B y C. En cada situación concreta es preciso un análisis particular que tenga en cuenta las características de la estructura y de la excitación sísmica esperada. Para dicho estudio pueden ser útiles las curvas contenidas en el presente apartado y otras similares para distintos valores de los parámetros  $\lambda$ ,  $r_0$ ,  $\hat{n}_r$  y  $T$ .

## 8.7 ENSAYOS NUMERICOS CON EXCITACION DEL VIENTO.

En el presente apartado se muestran los resultados de experiencias numéricas de simulación de procesos de control activo de los edificios A, B y C mediante cables activos en presencia de una excitación dinámica provocada por ráfagas de viento.

En el subapartado 8.7.1 se describe el modelo matemático que representa el efecto dinámico que el viento ejerce sobre los edificios y en el subapartado 8.7.2 se presentan (de forma paralela al subapartado 8.6.2) espectros de respuesta para distintos valores de la frecuencia predominante en el viento y para distintos sistemas de control mediante cables activos instalados en los edificios A, B y C.

### 8.7.1 Acción dinámica del viento.

La acción dinámica del viento se representa mediante fuerzas horizontales cuya intensidad varía con el tiempo y con la altura sobre el terreno. La presión  $p_w$  ejercida por el viento en un punto de remanso a una altura  $h$  y en un instante  $t$  se considera igual a

$$p_w(h, t) = \kappa v_m(h)^2 \xi(t) \quad (8.12)$$

en donde  $\kappa$  es una constante,  $v_m(h)$  es la velocidad media del viento a la altura  $h$  y  $\xi(t)$  es un factor que representa las oscilaciones temporales de la velocidad del viento.

La variación de la velocidad media del viento  $v_m$  con la altura  $h$  se establece a partir de la expresión

$$v_m(h) = v_g \left( \frac{h}{h_g} \right)^\alpha \quad (8.13)$$

en donde  $h_g$  es una altura constante de valor 1300 *pies*,  $v_g$  es la velocidad del viento a

dicha altura y el exponente adimensional  $\alpha$  tiene por valor 0.28 [1].

La variación de  $\xi$  con el tiempo responde a la igualdad [2]

$$\xi(t) = 3 \sin(\omega t) + 7 \sin(2\omega t) + 5 \sin(3\omega t) + 4 \sin(4\omega t) \quad (8.14)$$

en donde  $\omega$  es la frecuencia predominante de las ráfagas de viento.

En los ensayos numéricos mostrados en el presente apartado se consideran los siguientes valores de la velocidad límite del viento  $v_g$  y de la constante  $\kappa$ :

$$v_g = 120 \text{ Km/h} \quad \kappa = 0.1096 \text{ N s}^2/\text{m}^4 \quad (8.15)$$

### 8.7.2 Espectros de respuesta.

En la figura 8.12 se muestra el valor del índice  $\Gamma_1$  en función de la frecuencia de la excitación del viento para los edificios A, B y C en ausencia de control.

En las figuras 8.13a a 8.21c se muestran los valores de los índices  $\Gamma_1, \dots, \Gamma_6$  en función de la frecuencia predominante en la excitación del viento para los edificios A, B y C en presencia de los sistemas de control descritos en el apartado 2 del presente capítulo.

El análisis de las figuras 8.13a a 8.21c permite generalizar las conclusiones formuladas en el subapartado 6.2 del presente capítulo para excitación sísmica al caso de excitación del viento considerada en el presente apartado.

La comparación entre los espectros mostrados en los subapartados 8.6.2 y 8.7.2 muestra que los valores de las fuerzas de control y de las solicitaciones sobre el sistema de control son menores en los casos correspondientes a excitación del viento. Ello se

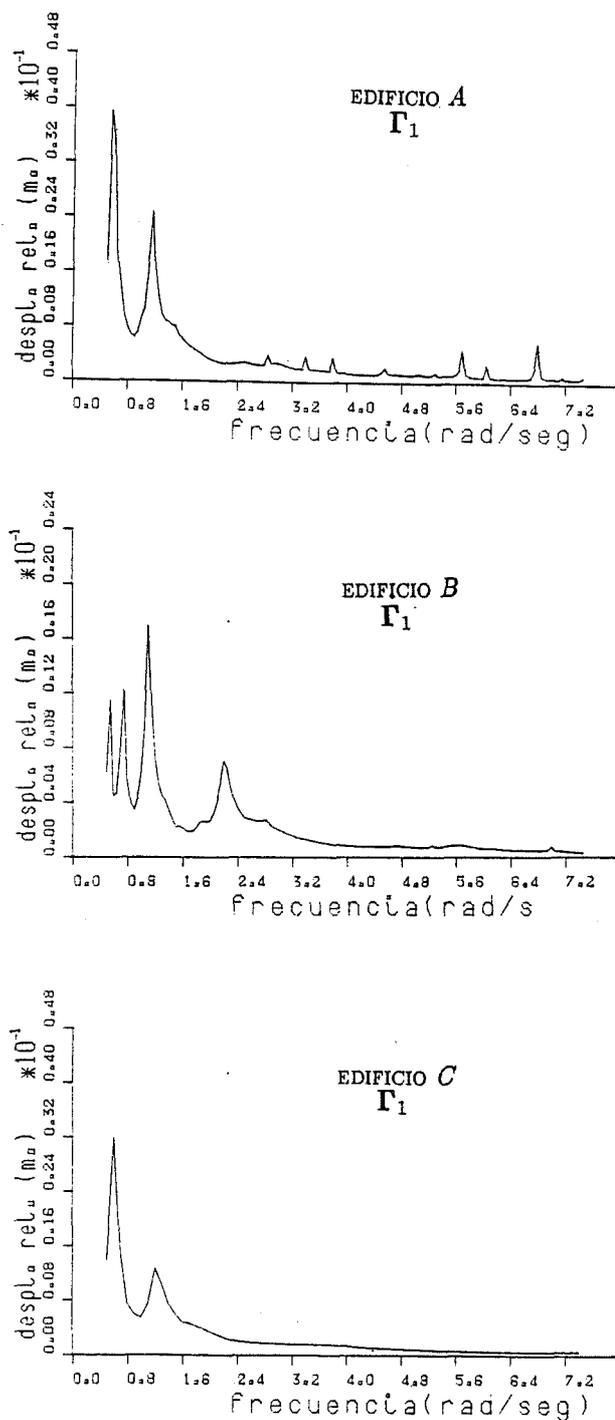


Figura 8.12 Valores de  $\Gamma_1$  para distintas frecuencias de excitación del viento en ausencia de control.

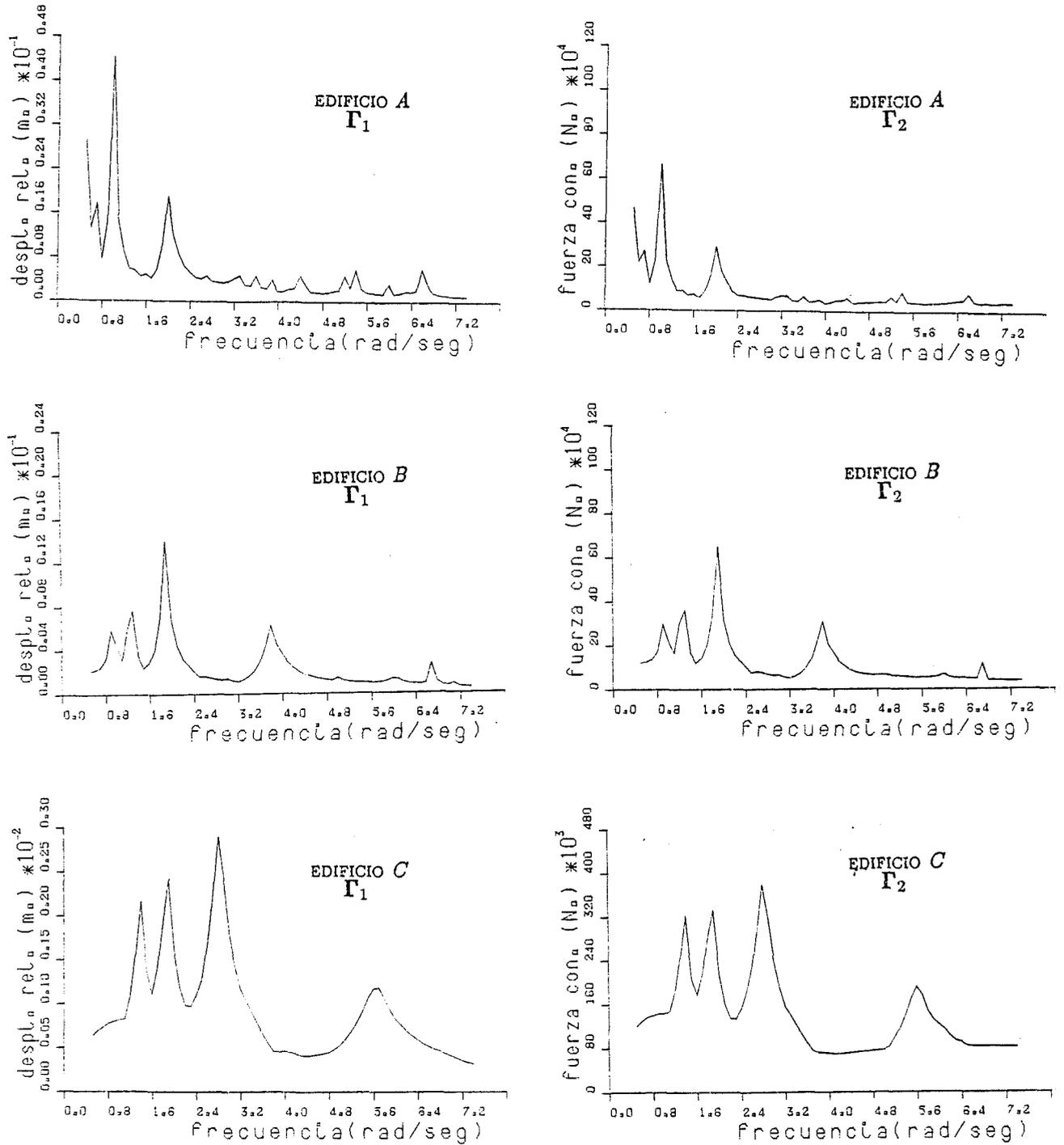


Figura 8.13a Valores de  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 1 fuerza de control.

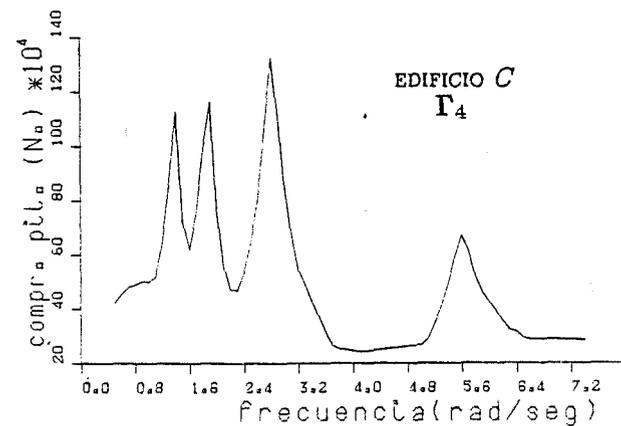
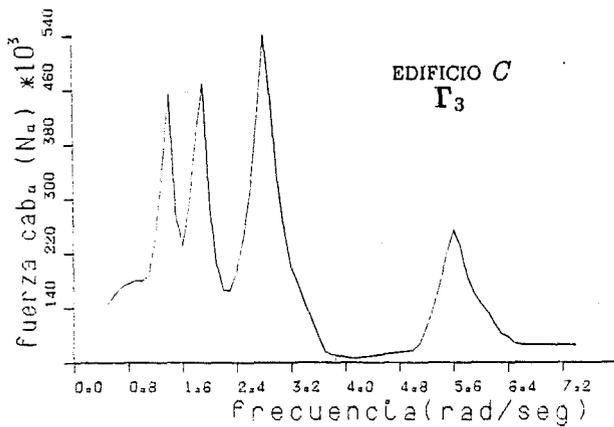
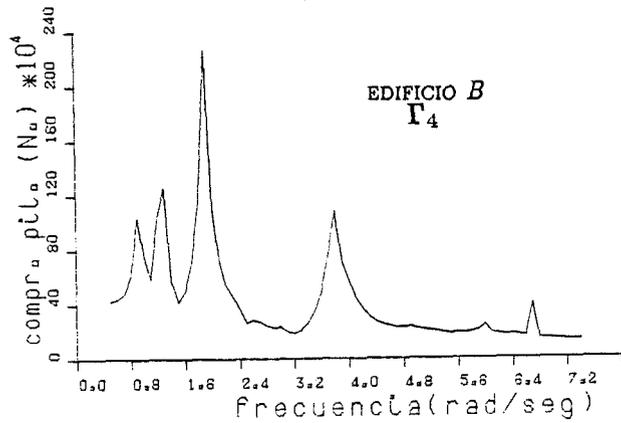
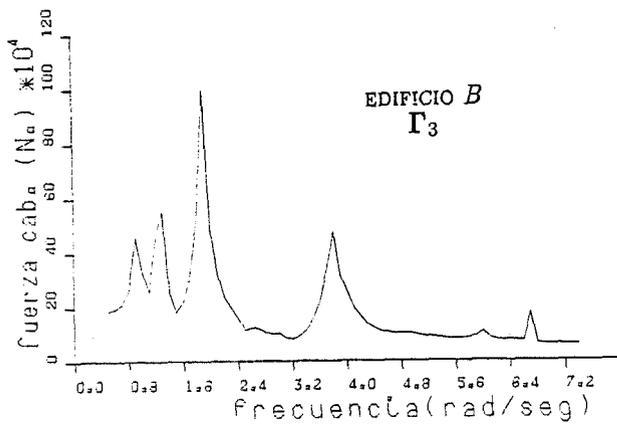
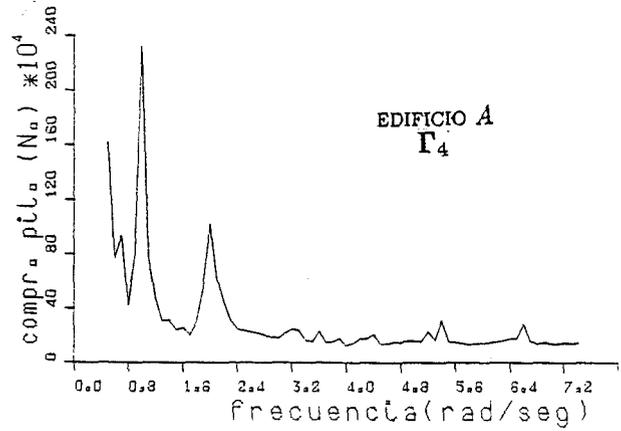
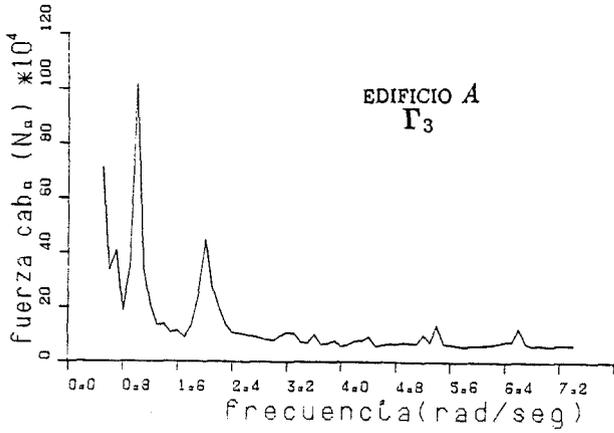


Figura 8.13b Valores de  $\Gamma_3$  y  $\Gamma_4$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 1 fuerza de control.

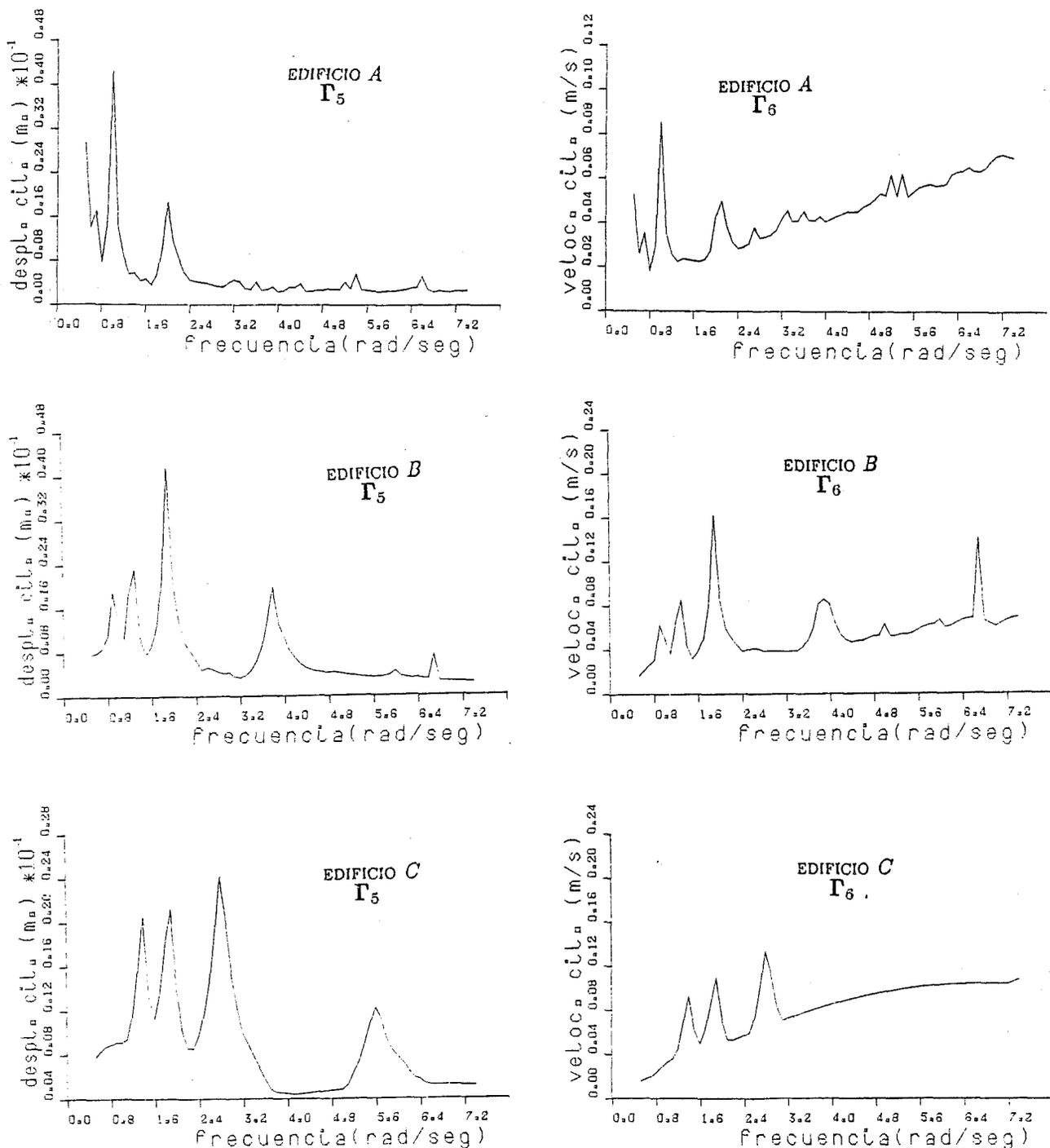


Figura 8.13c Valores de  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 1 fuerza de control.

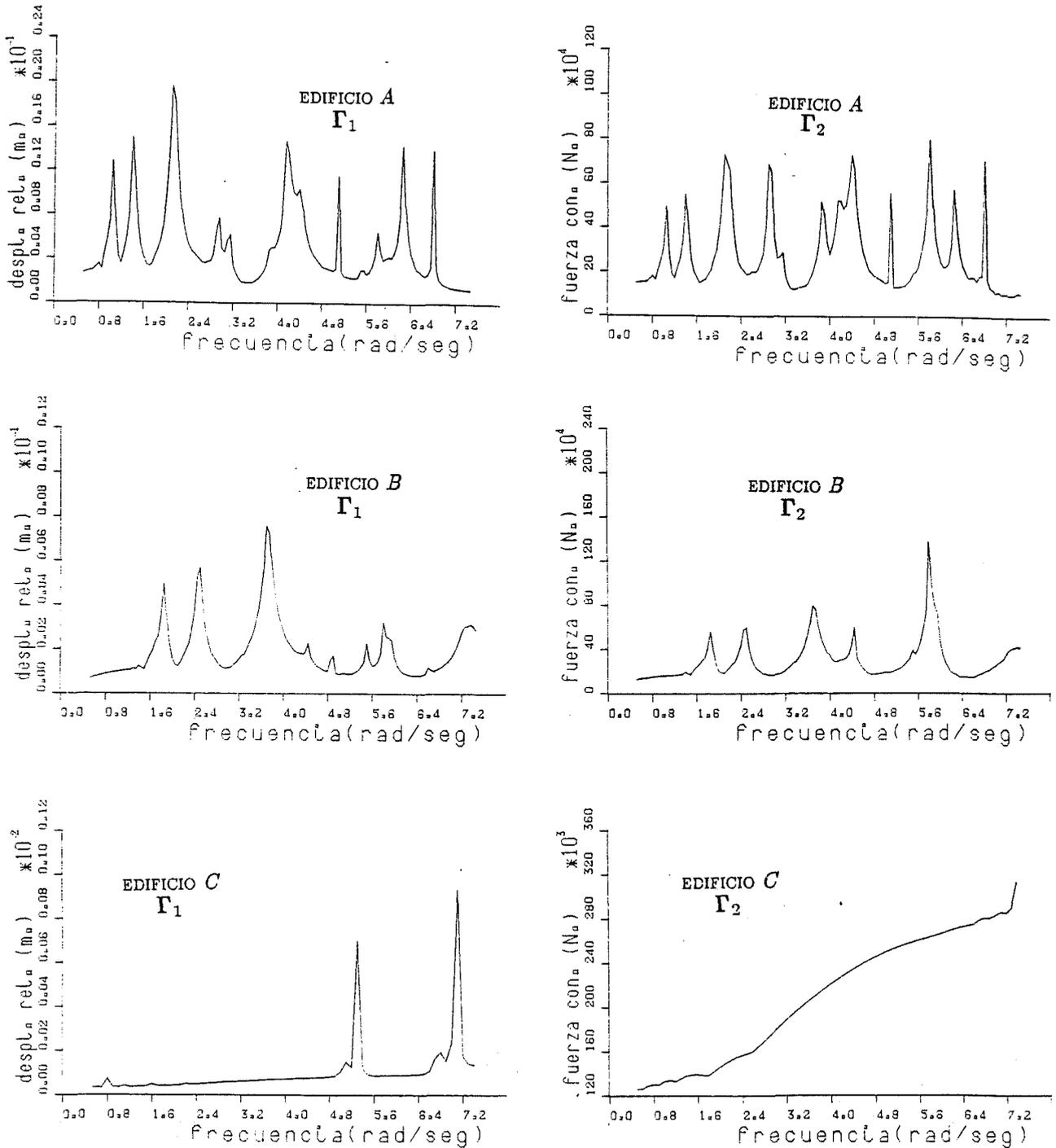


Figura 8.14a Valores de  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 3 fuerzas de control.

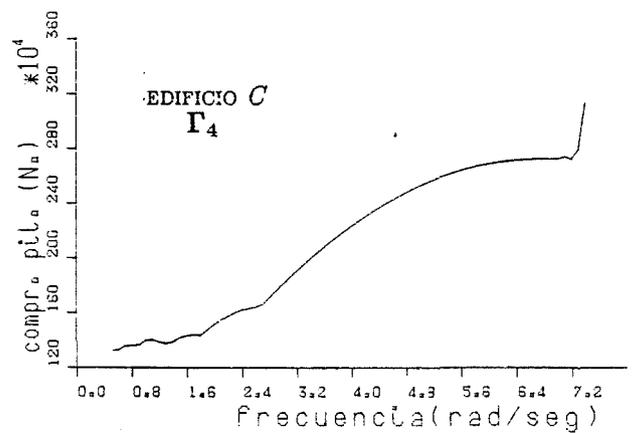
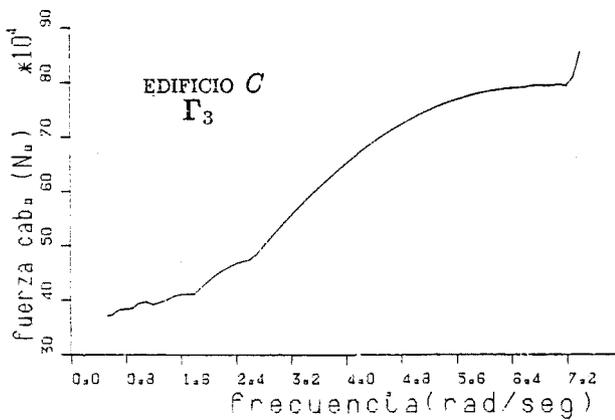
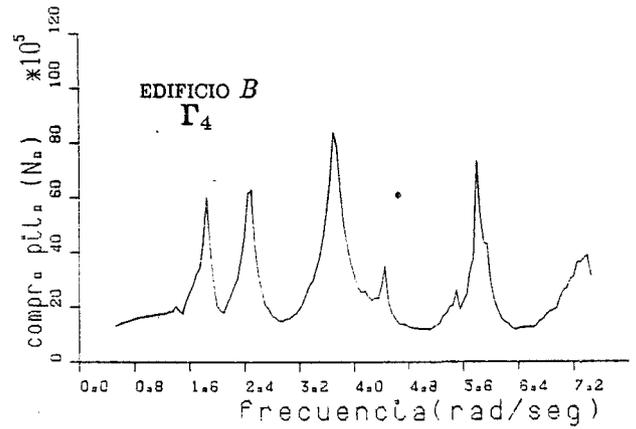
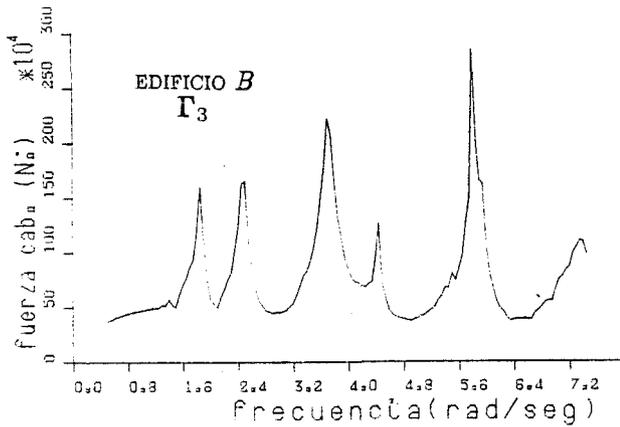
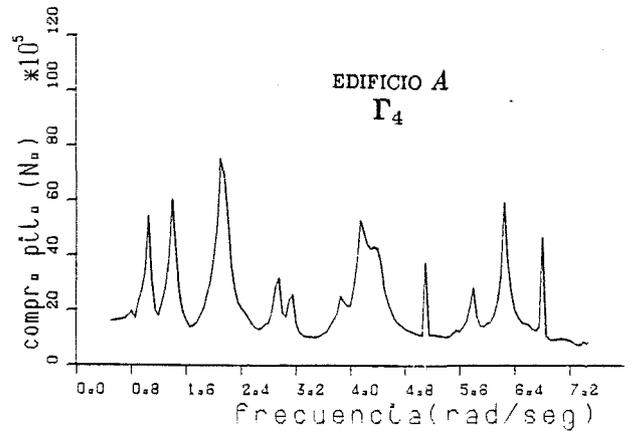
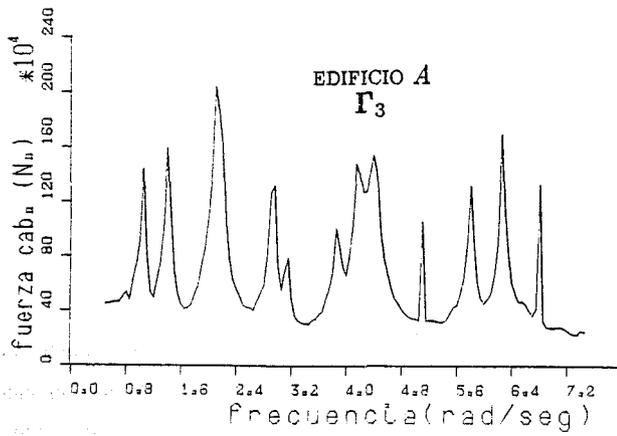


Figura 8.14b Valores de  $\Gamma_3$  y  $\Gamma_4$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 3 fuerzas de control.

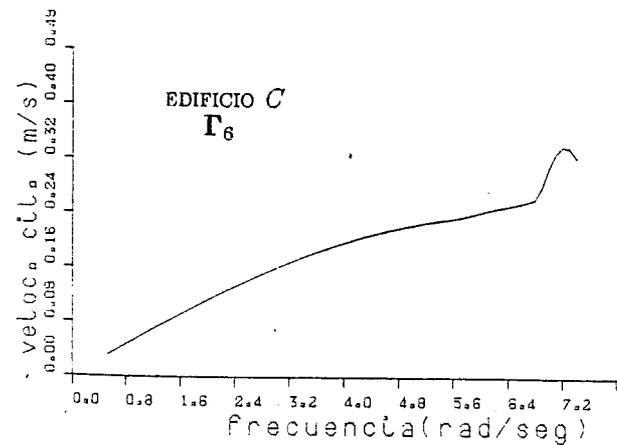
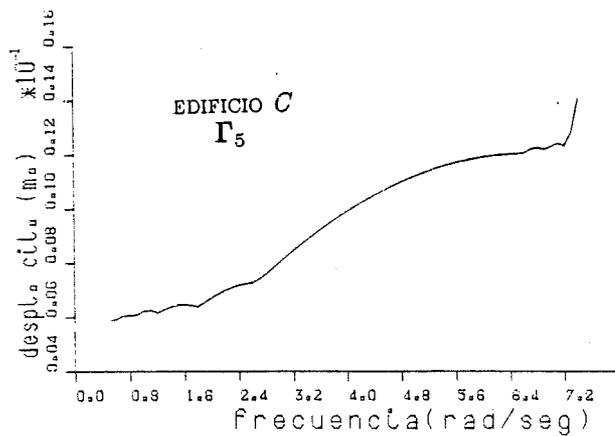
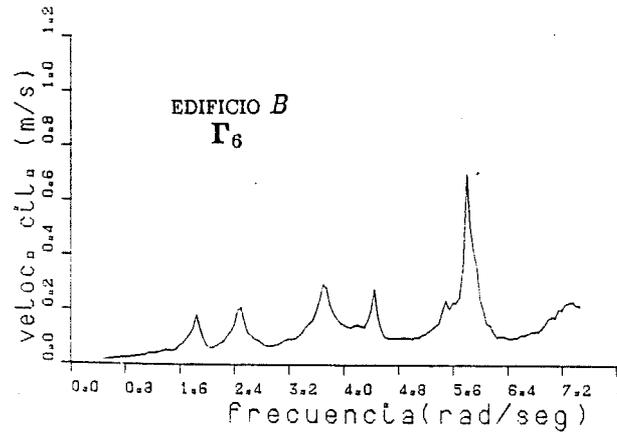
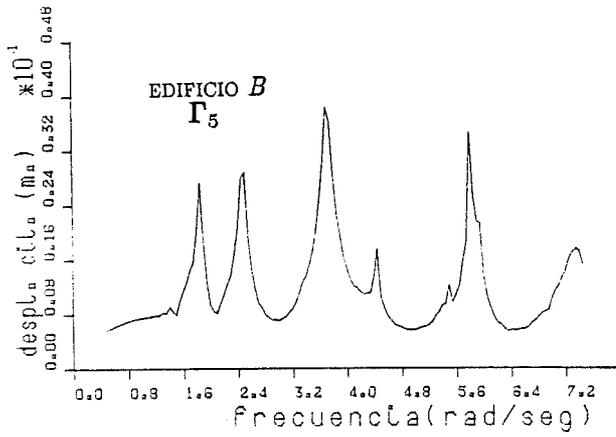
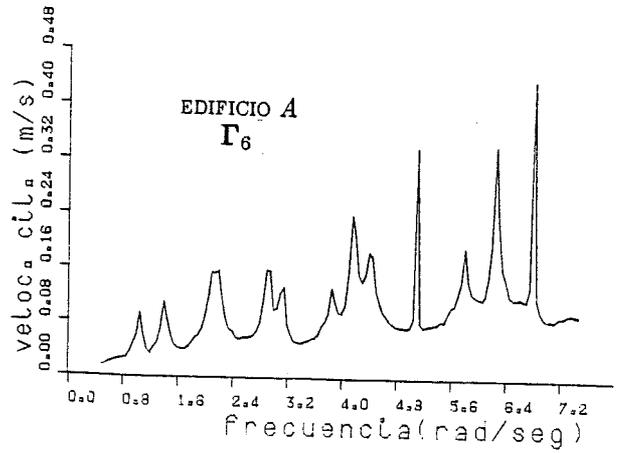
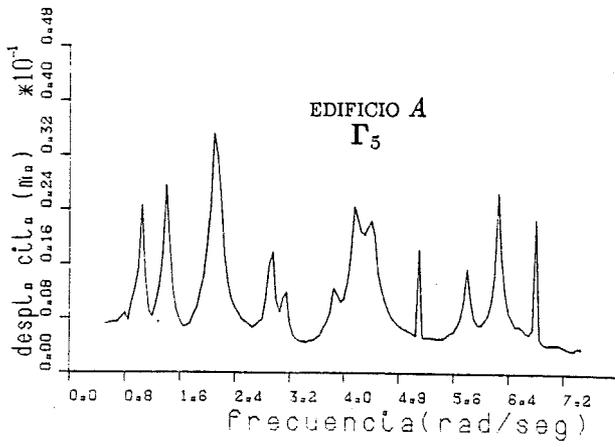


Figura 8.14c Valores de  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 3 fuerzas de control.

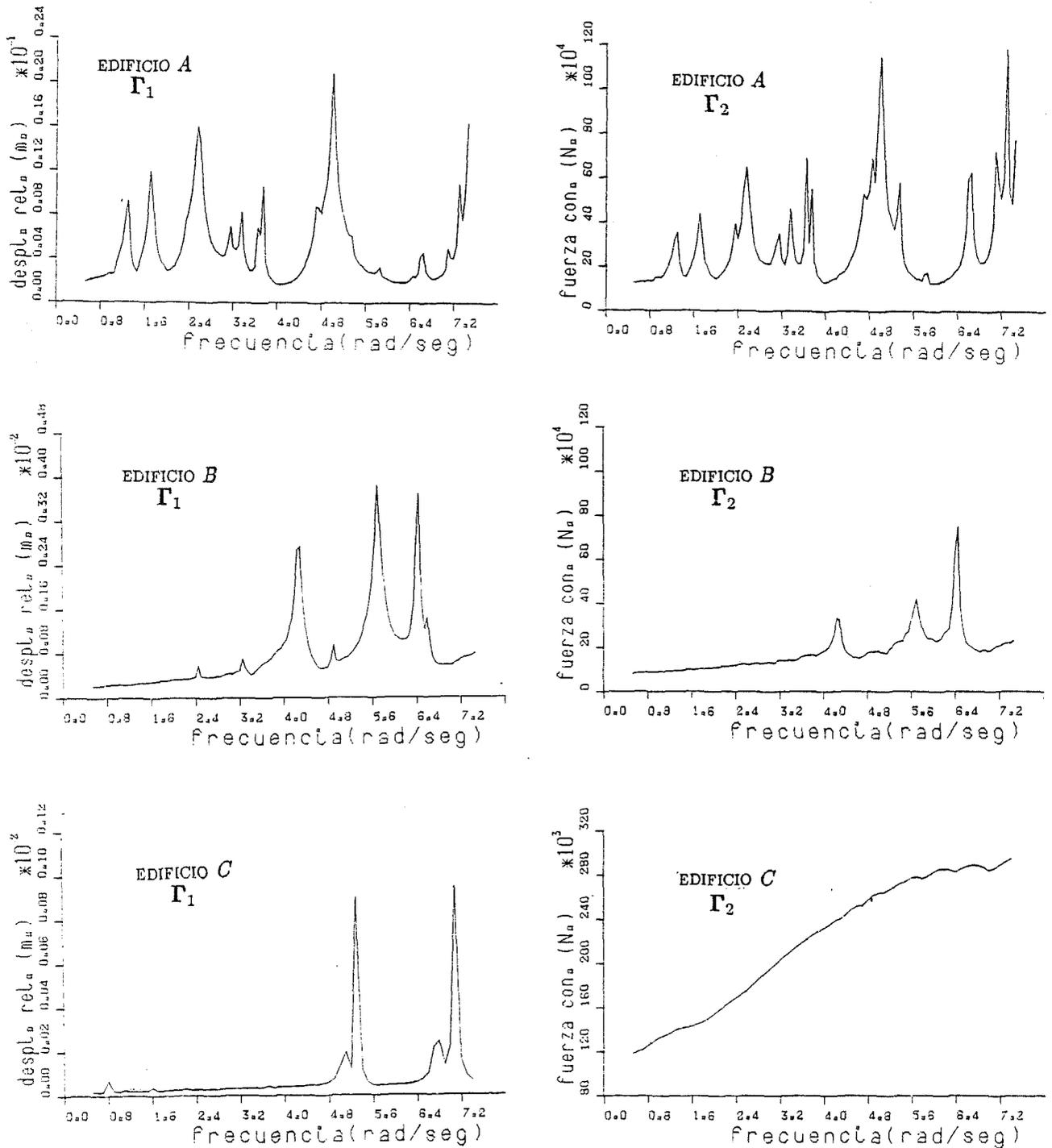


Figura 8.15a Valores de  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 4 fuerzas de control.

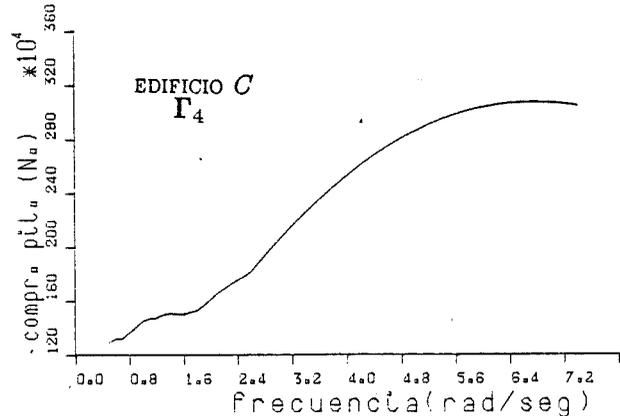
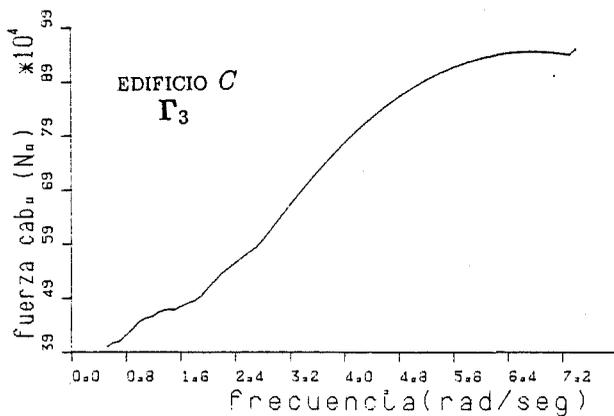
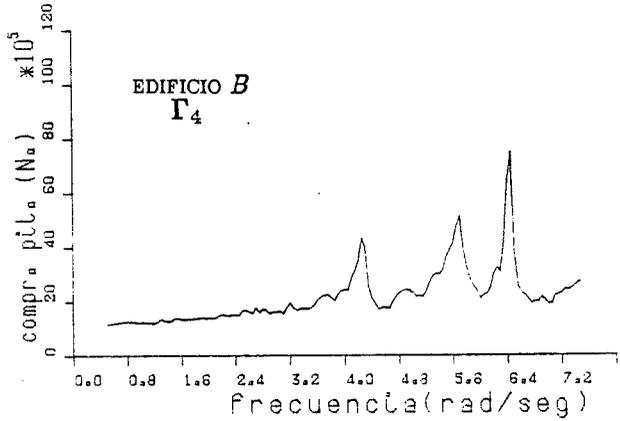
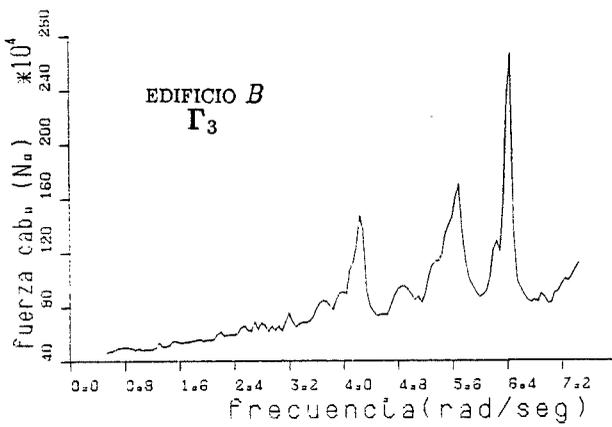
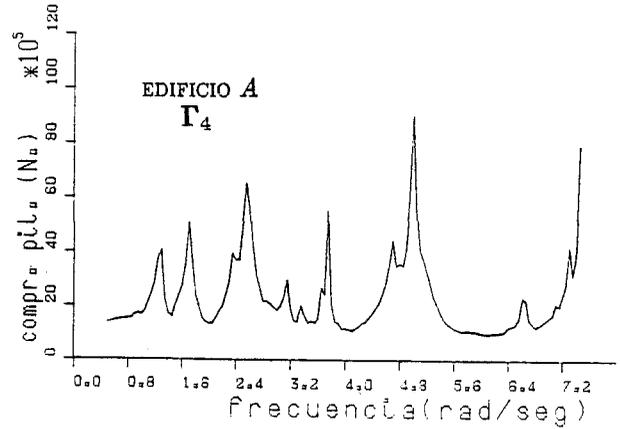
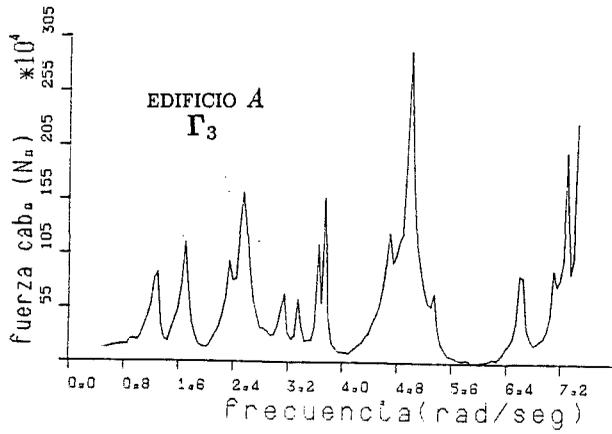


Figura 8.15b Valores de  $\Gamma_3$  y  $\Gamma_4$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 4 fuerzas de control.

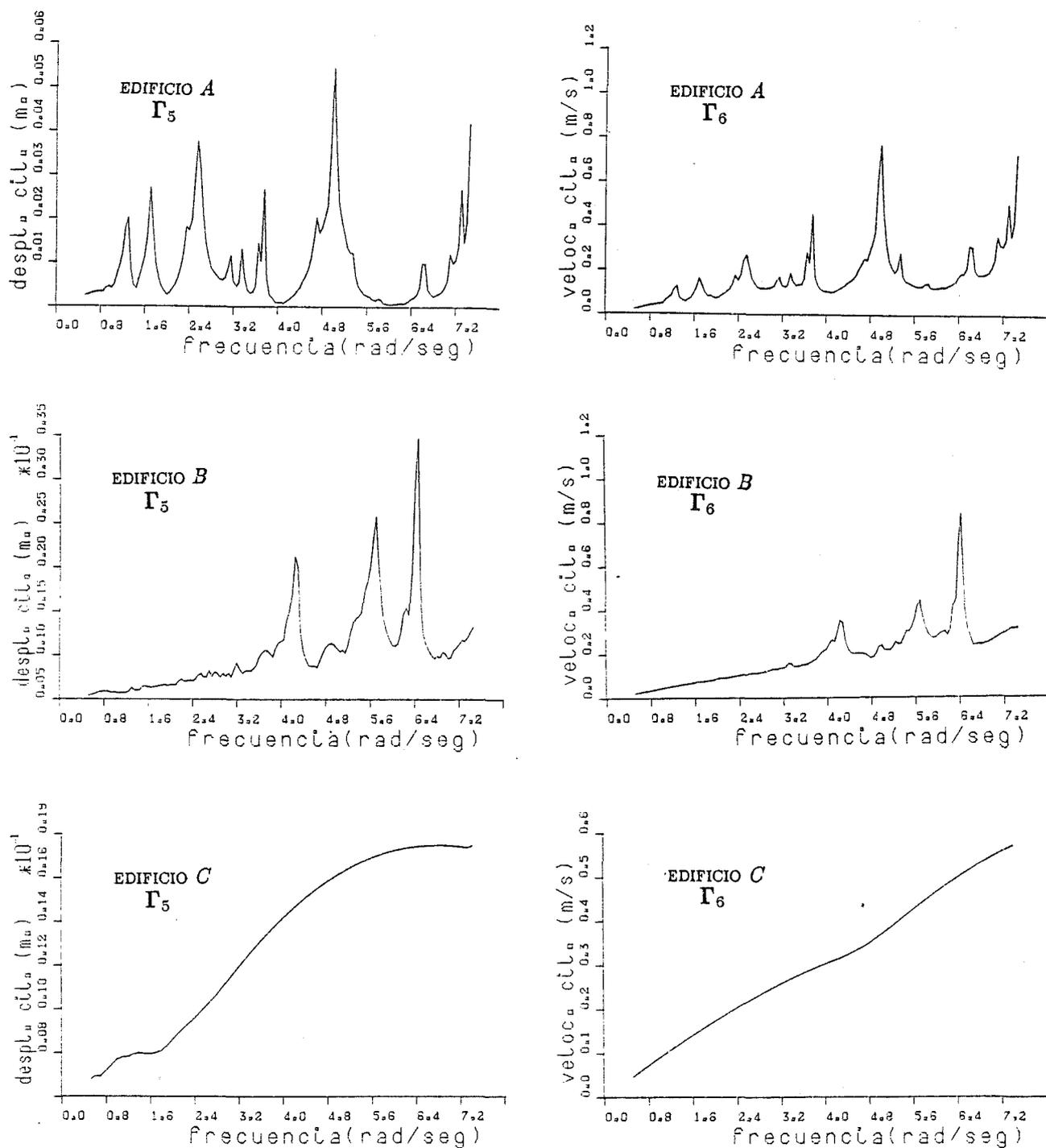


Figura 8.15c Valores de  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 4 fuerzas de control.

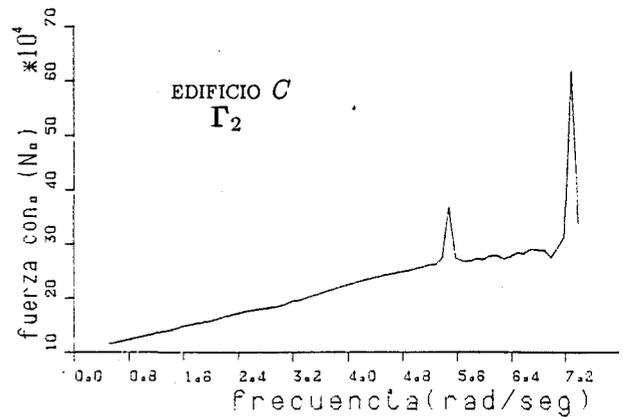
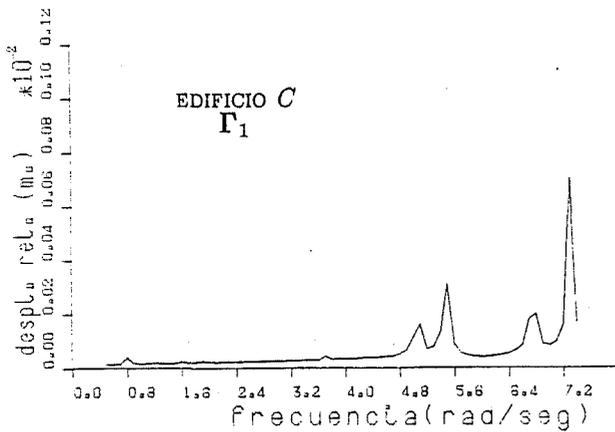
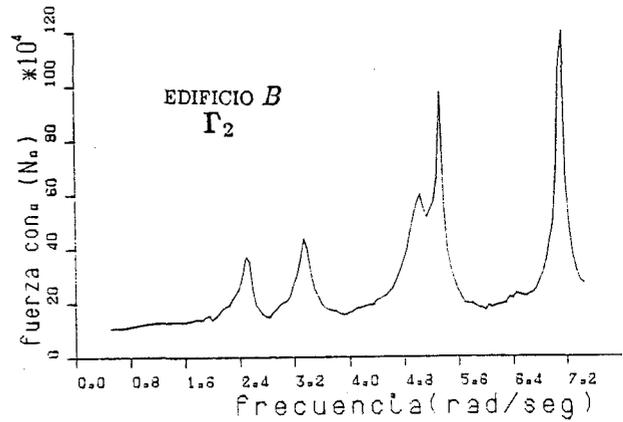
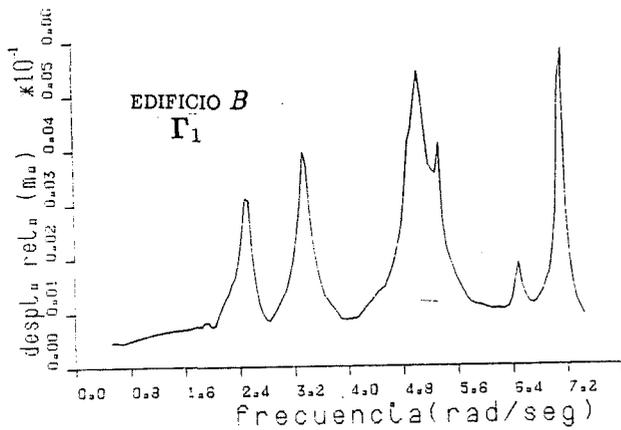
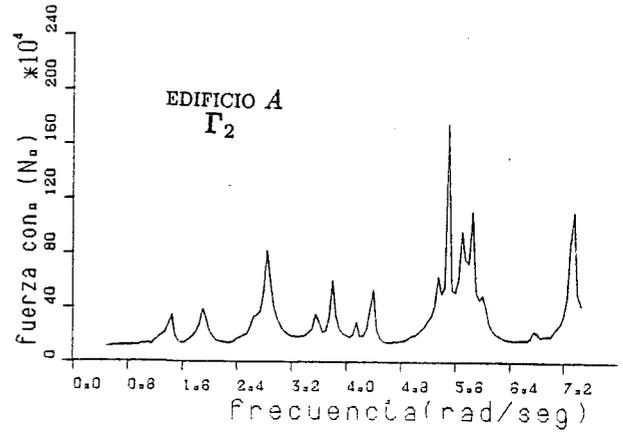
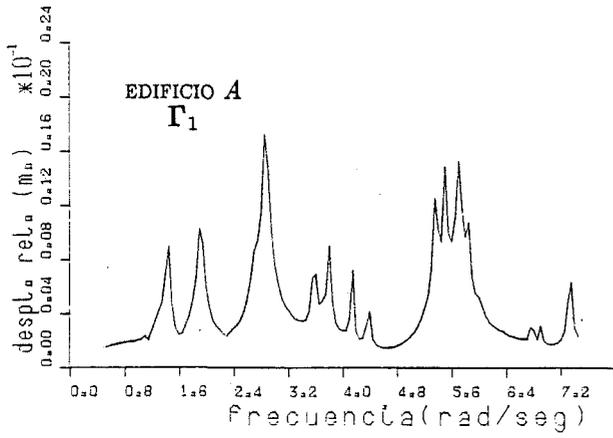


Figura 8.16a Valores de  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 5 fuerzas de control.

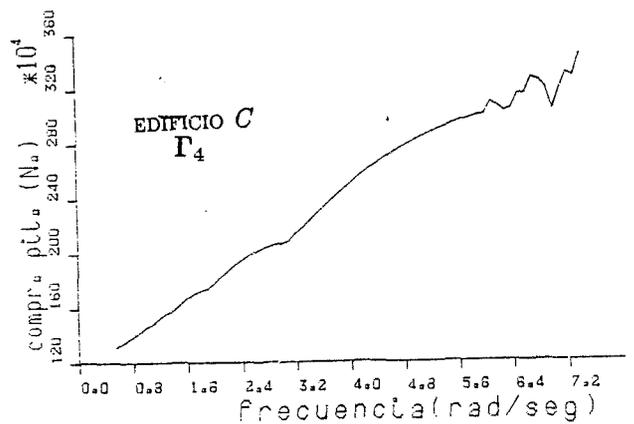
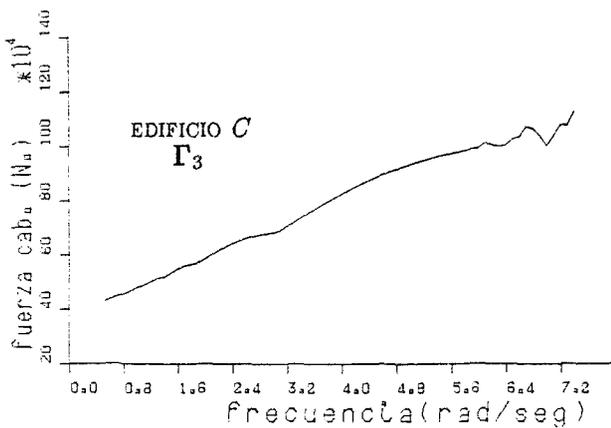
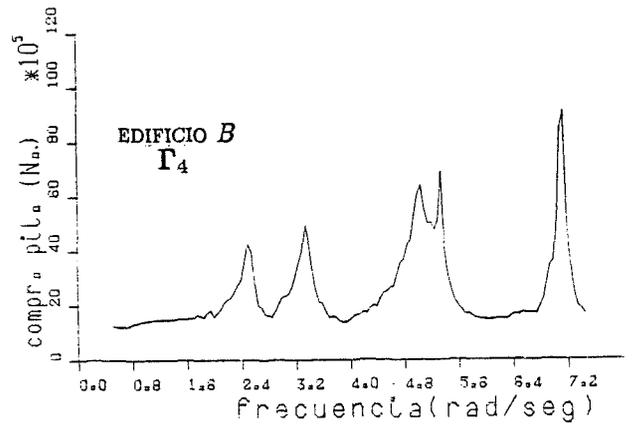
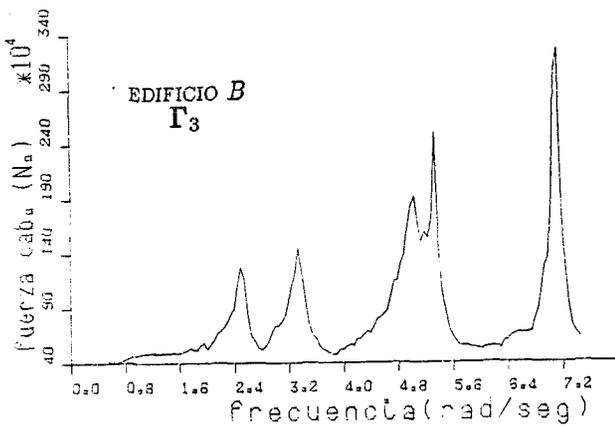
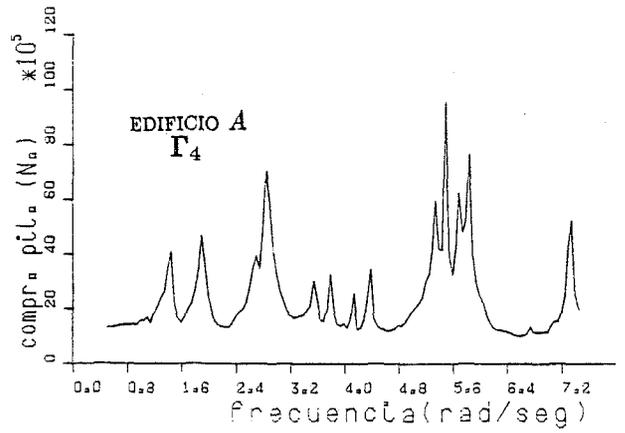
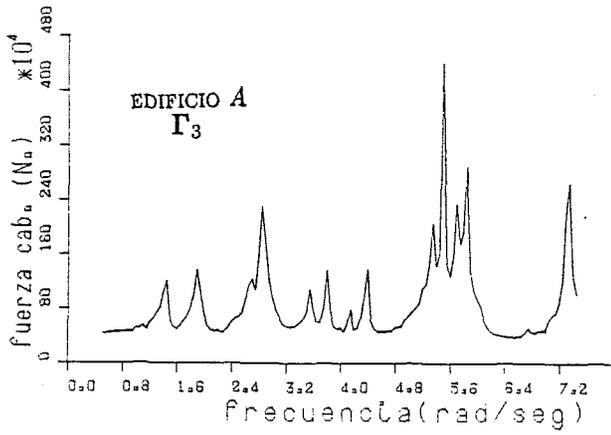


Figura 8.13b Valores de  $\Gamma_3$  y  $\Gamma_4$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 5 fuerzas de control.

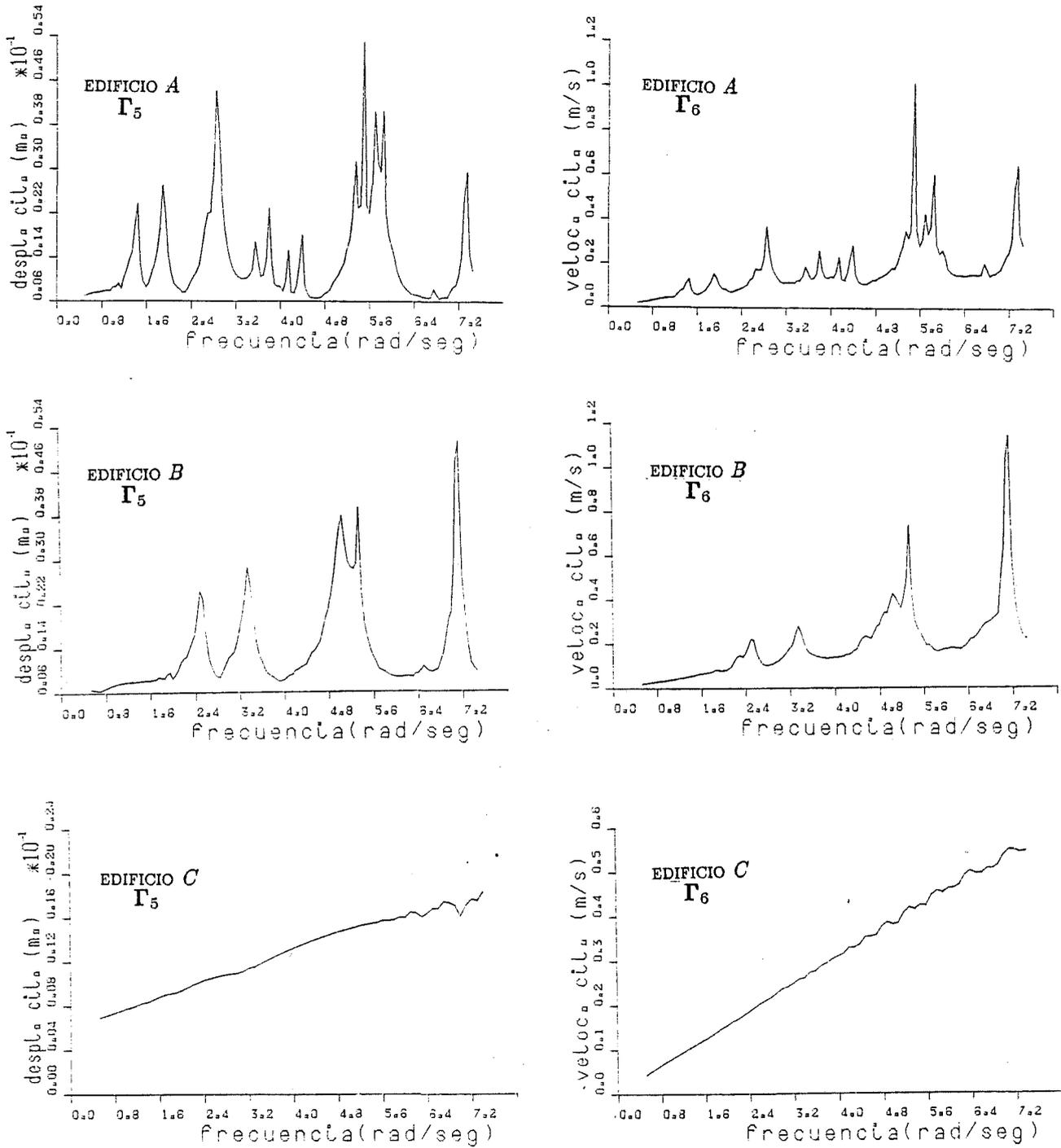


Figura 8.16c Valores de  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 5 fuerzas de control.

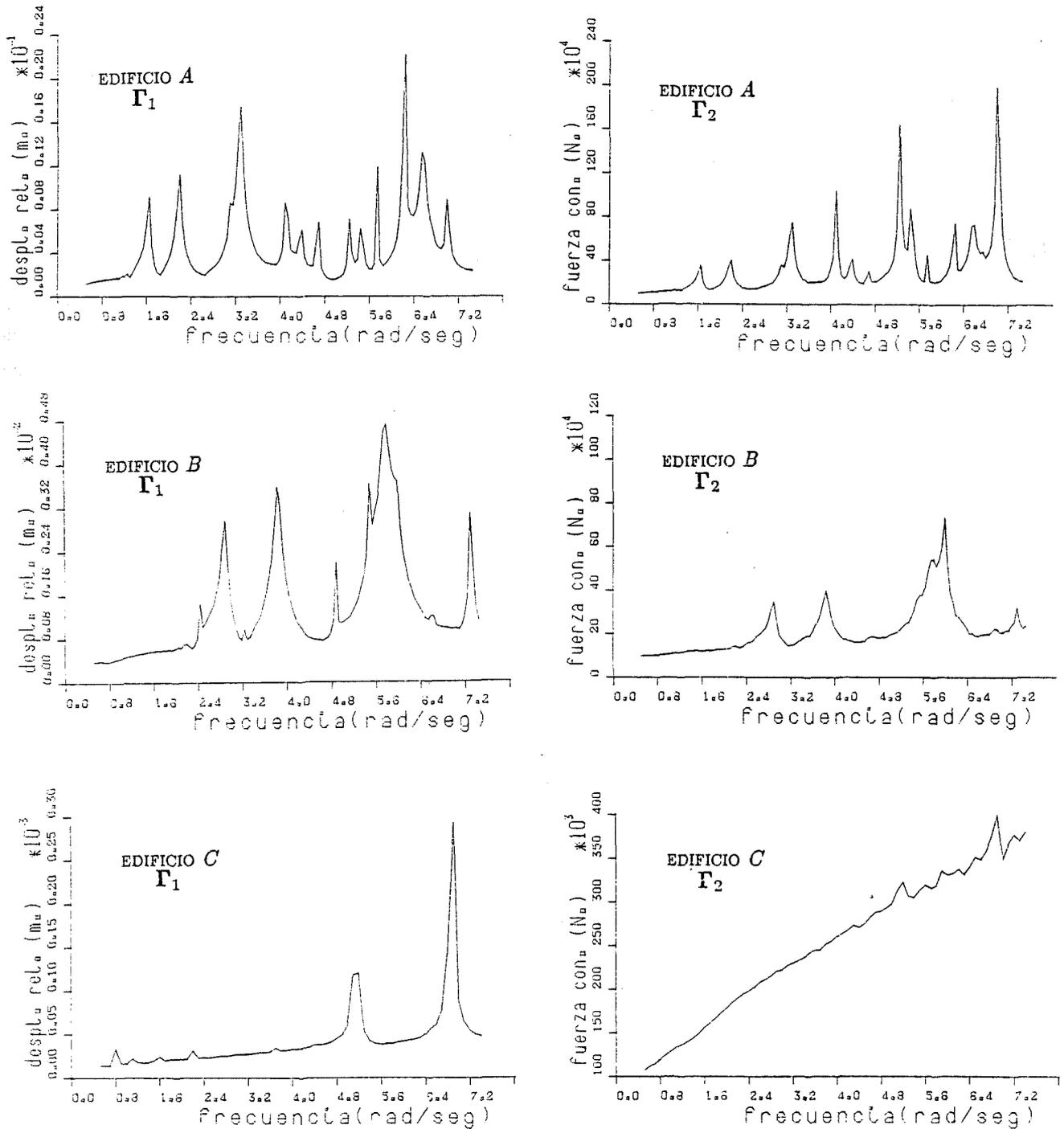


Figura 8.17a Valores de  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 6 fuerzas de control.

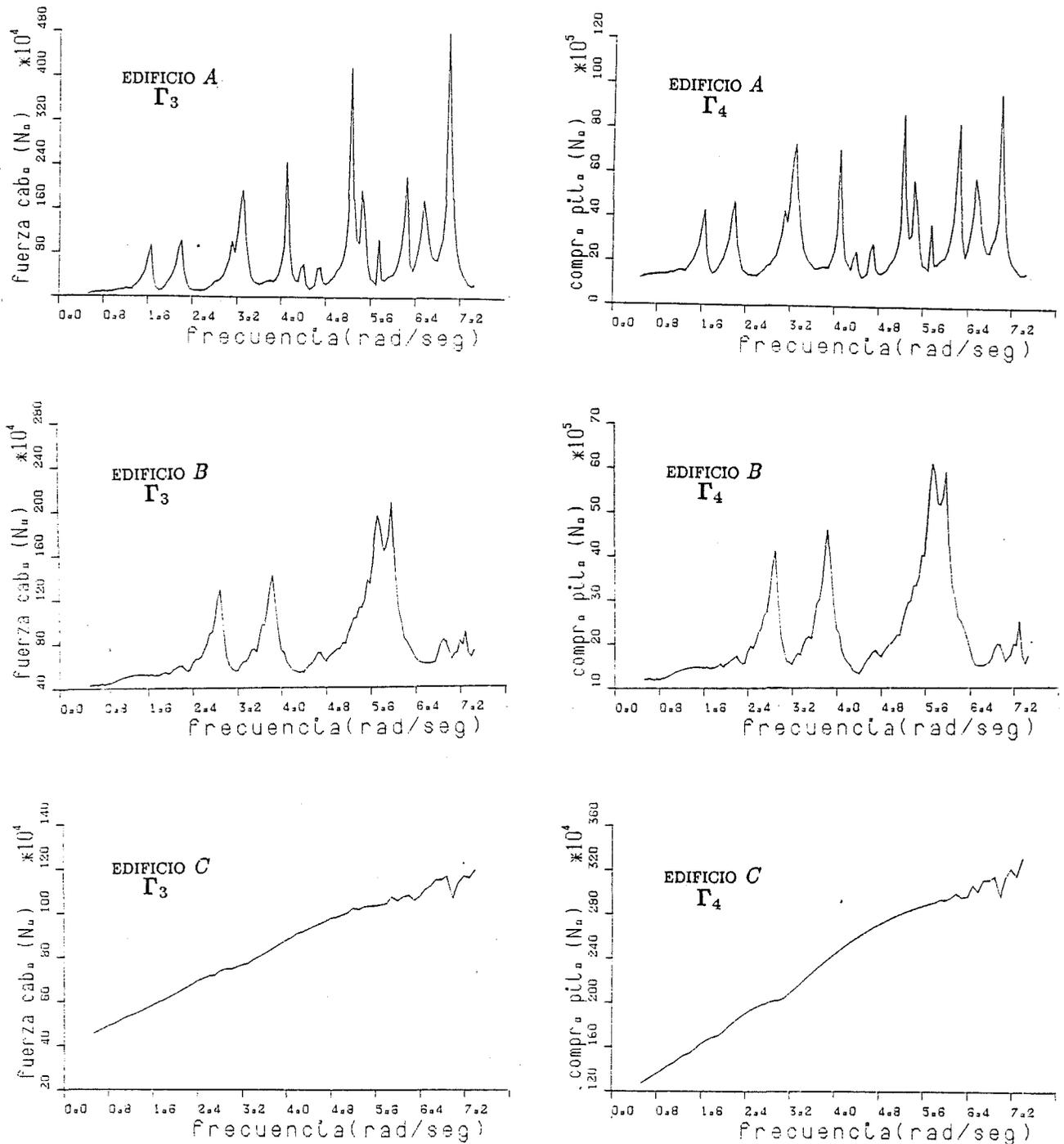


Figura 8.17b Valores de  $\Gamma_3$  y  $\Gamma_4$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 6 fuerzas de control.

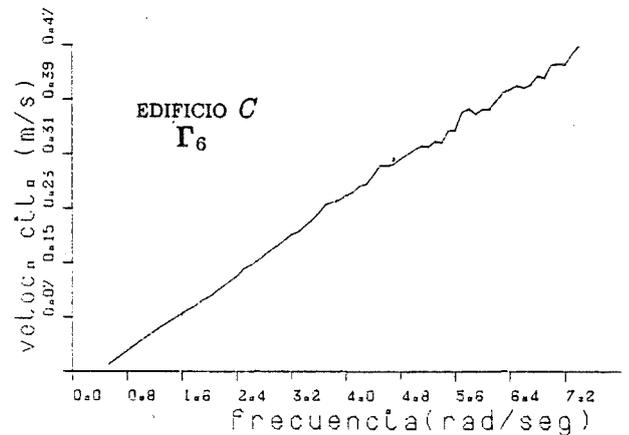
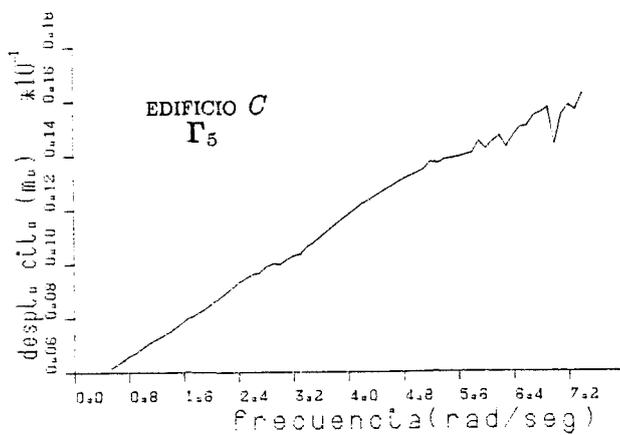
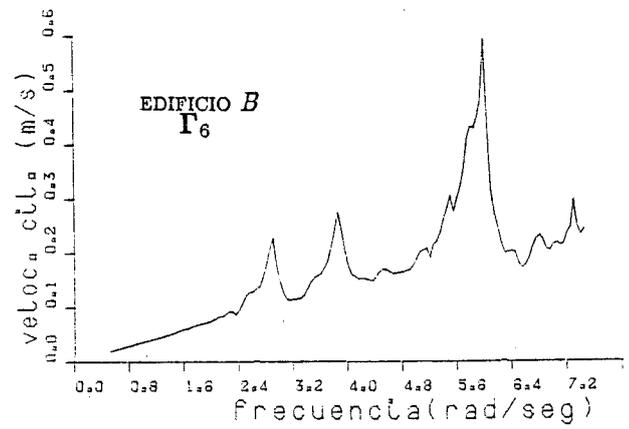
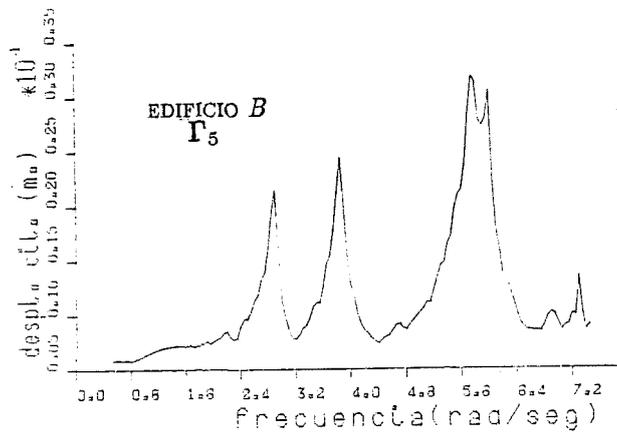
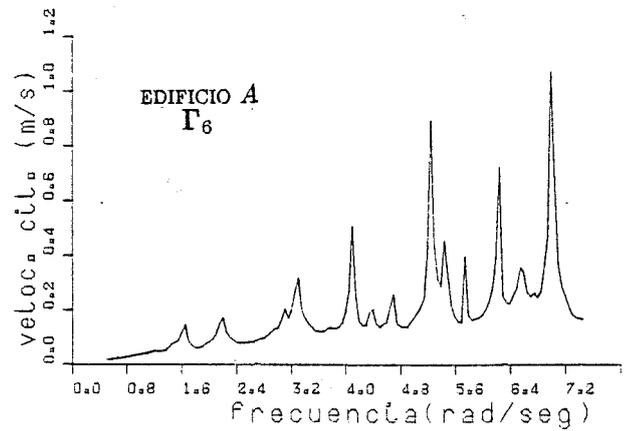
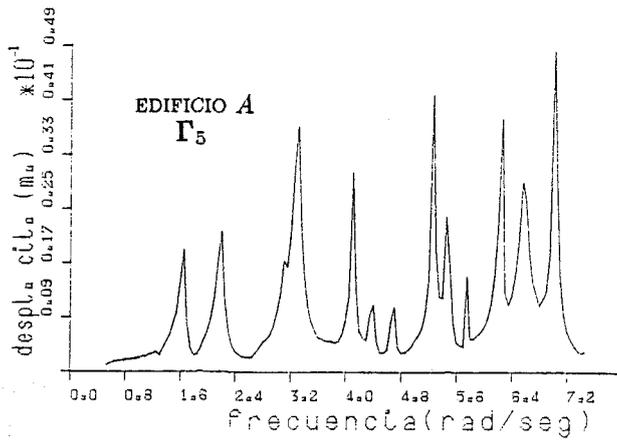


Figura 8.17c Valores de  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 6 fuerzas de control.

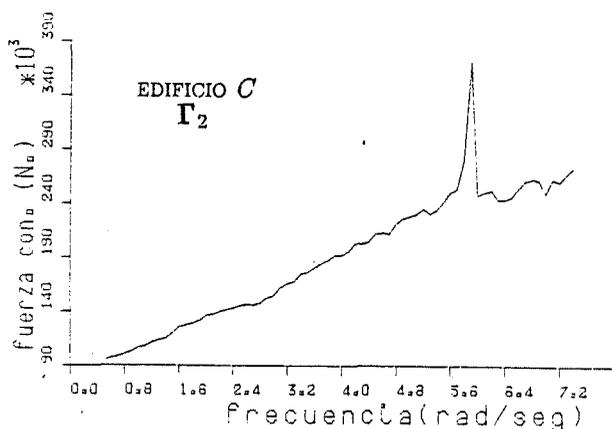
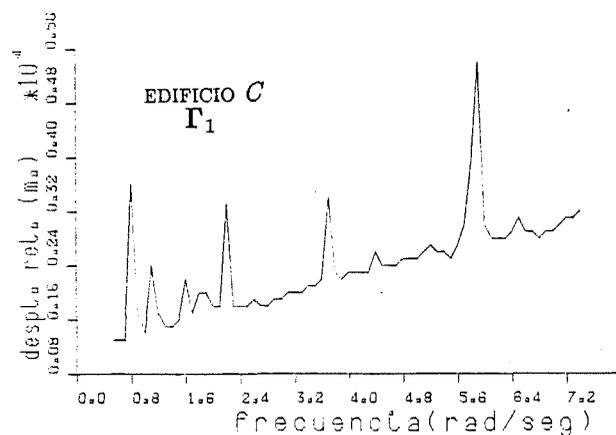
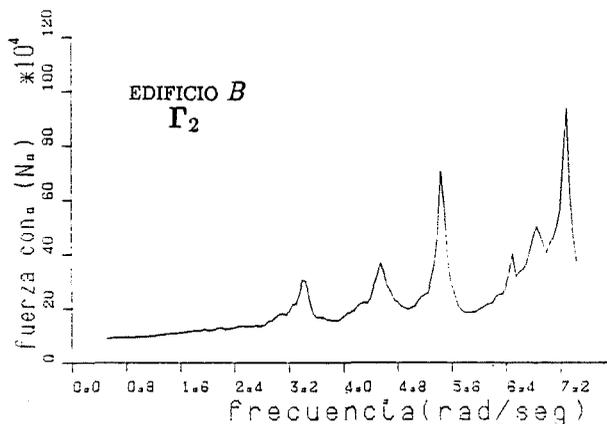
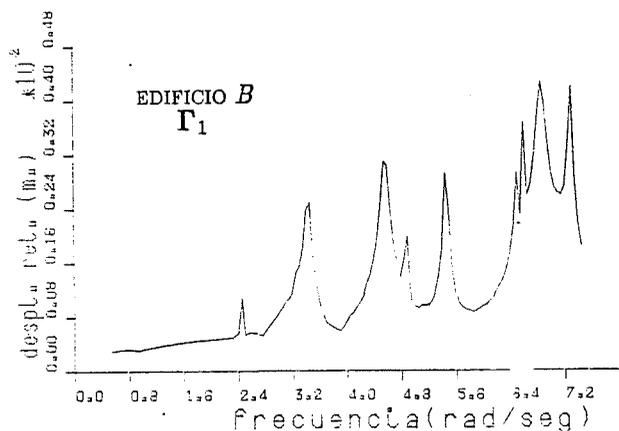
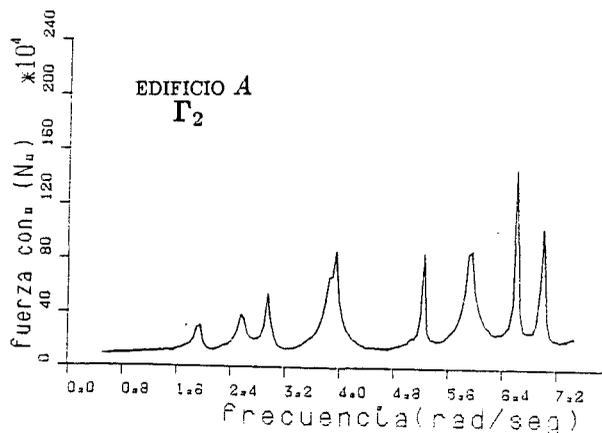
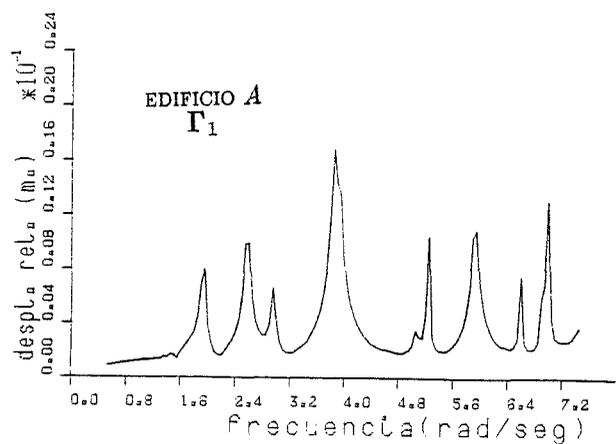


Figura 8.18a Valores de  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 7 fuerzas de control.

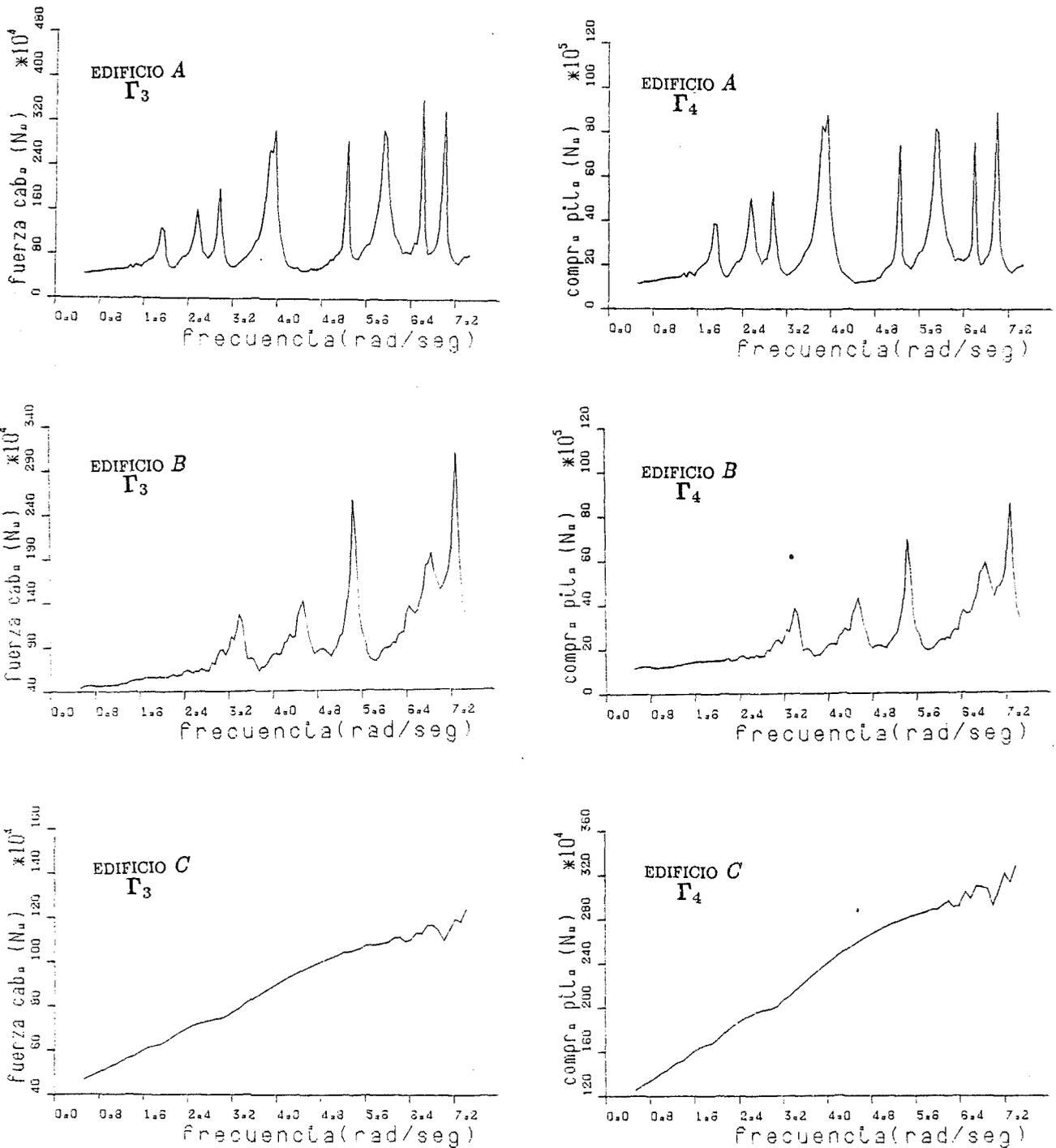


Figura 8.18b Valores de  $\Gamma_3$  y  $\Gamma_4$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 7 fuerzas de control.

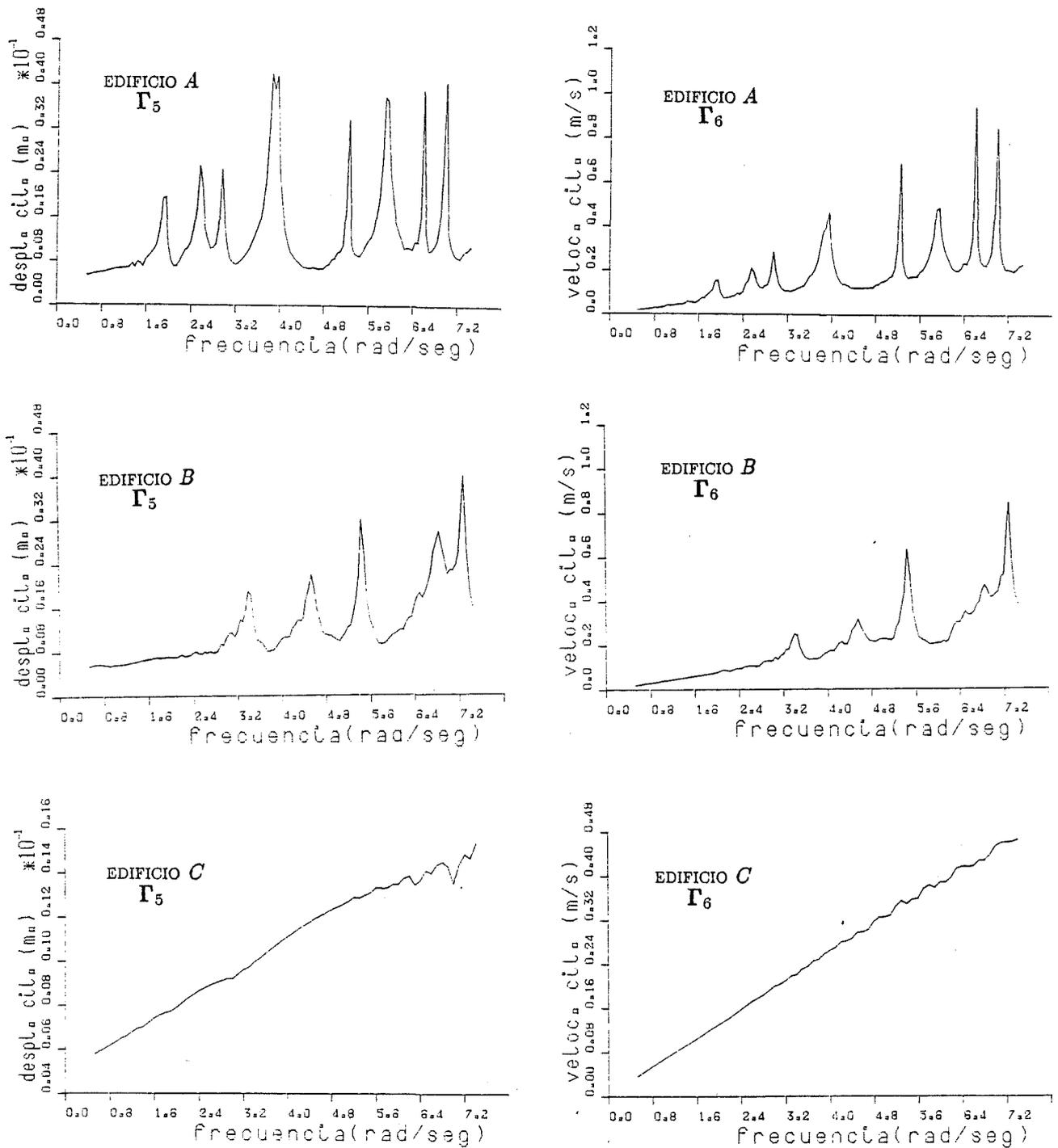


Figura 8.18c Valores de  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 7 fuerzas de control.

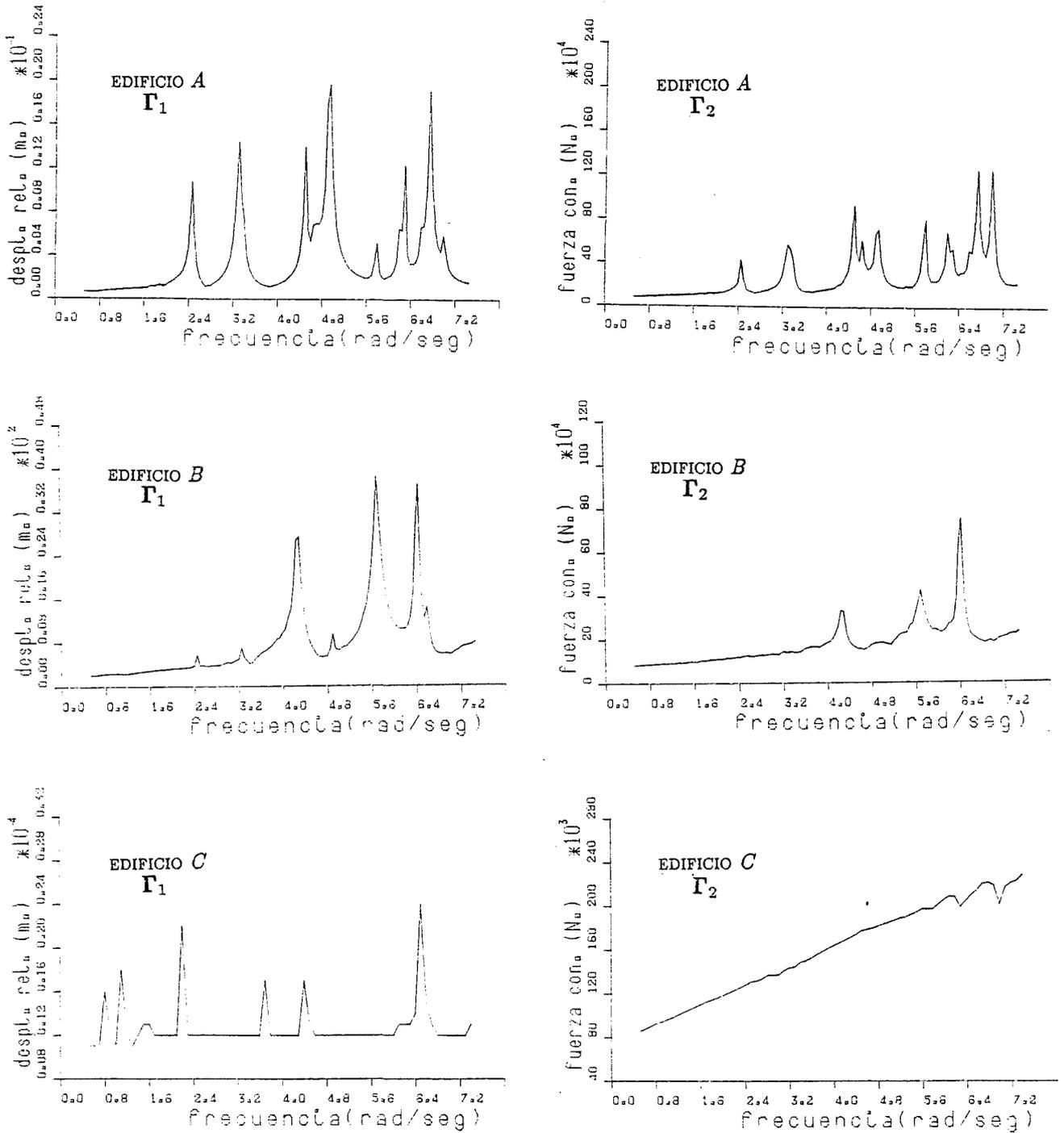


Figura 8.19a Valores de  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 8 fuerzas de control.

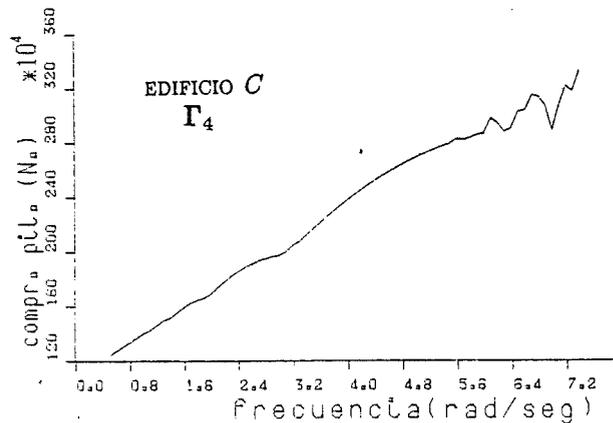
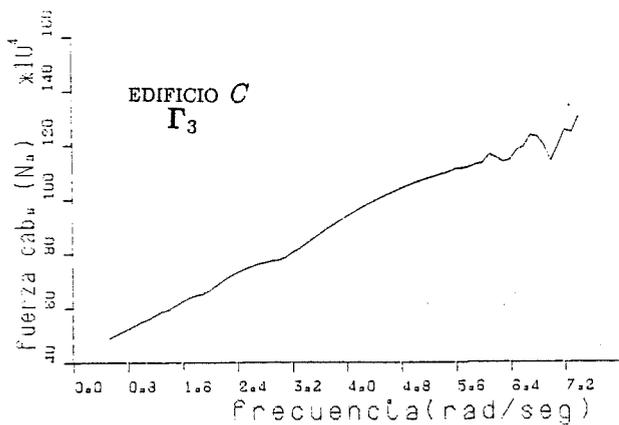
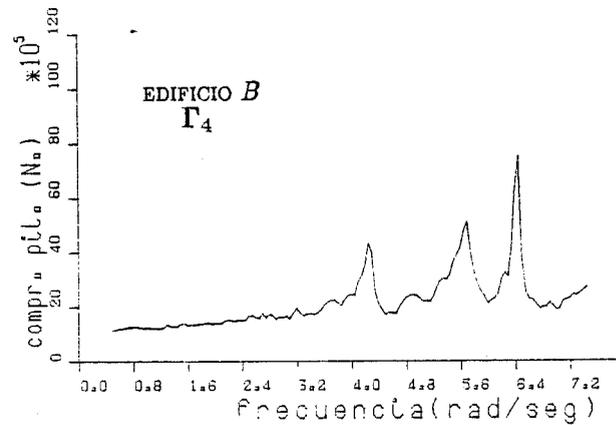
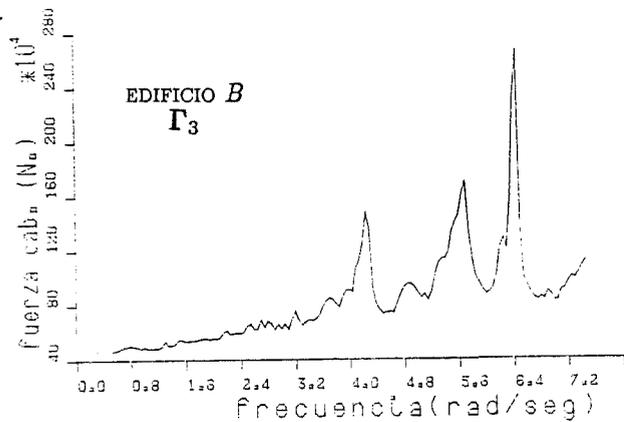
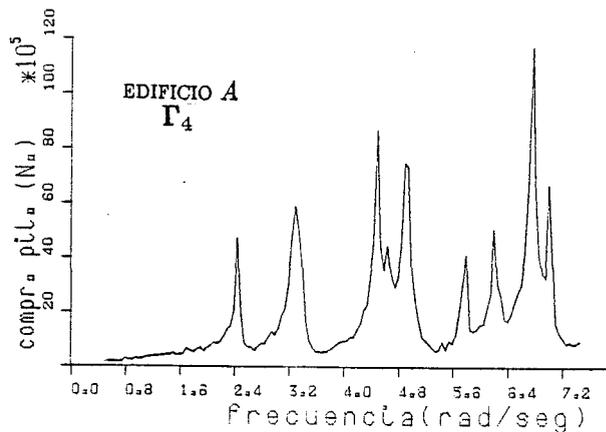
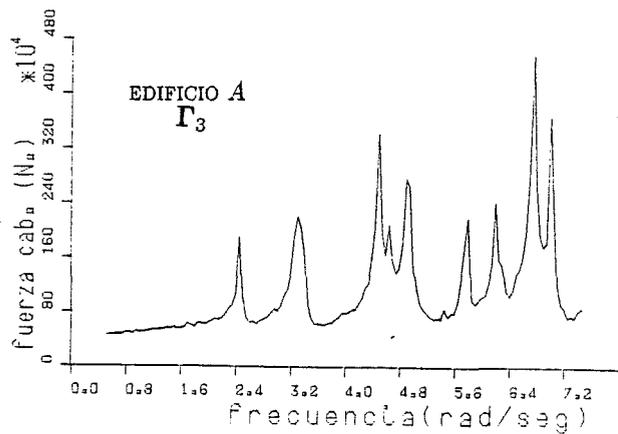


Figura 8.19b Valores de  $\Gamma_3$  y  $\Gamma_4$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 8 fuerzas de control.

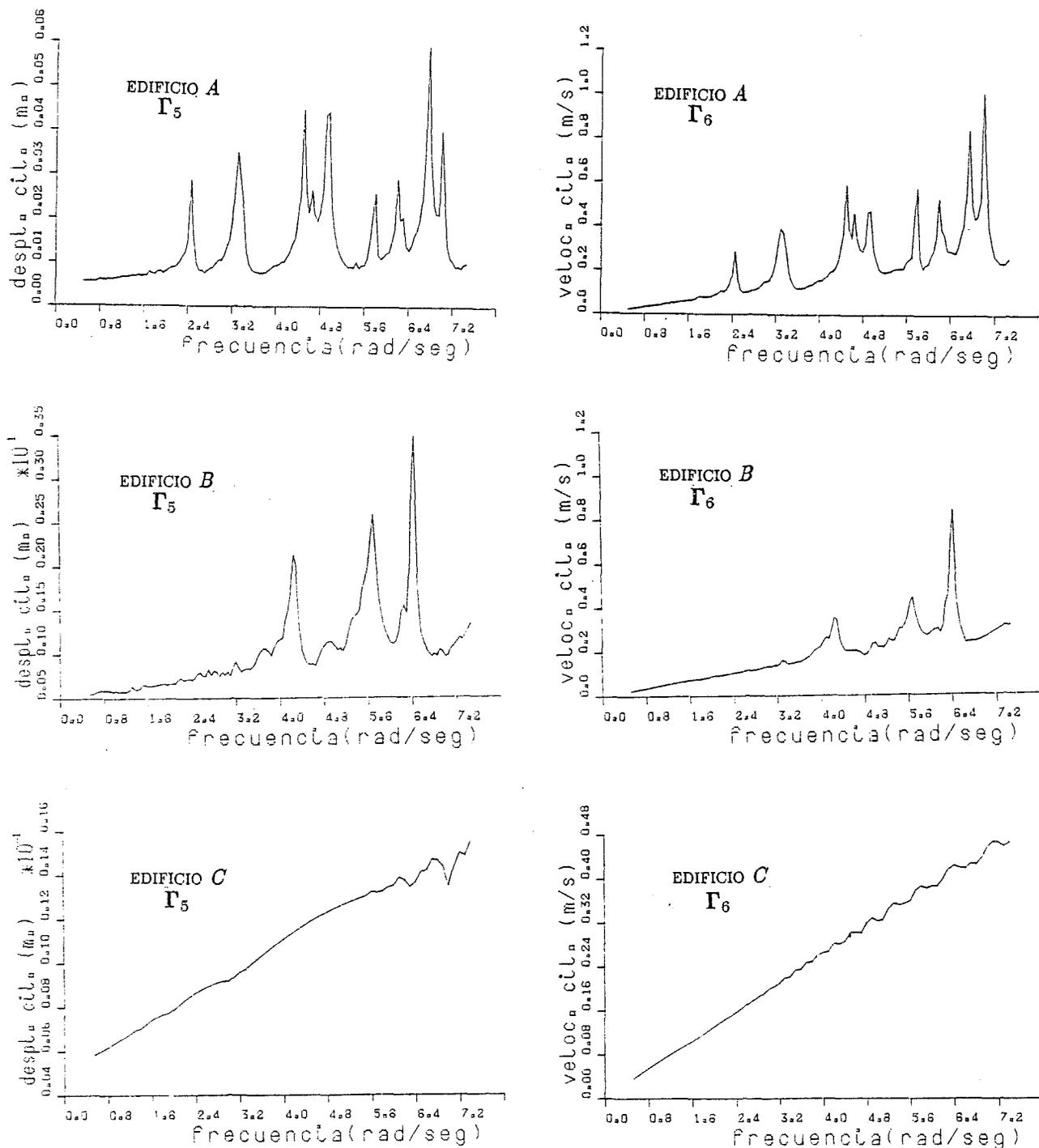


Figura 8.19c Valores de  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 8 fuerzas de control.

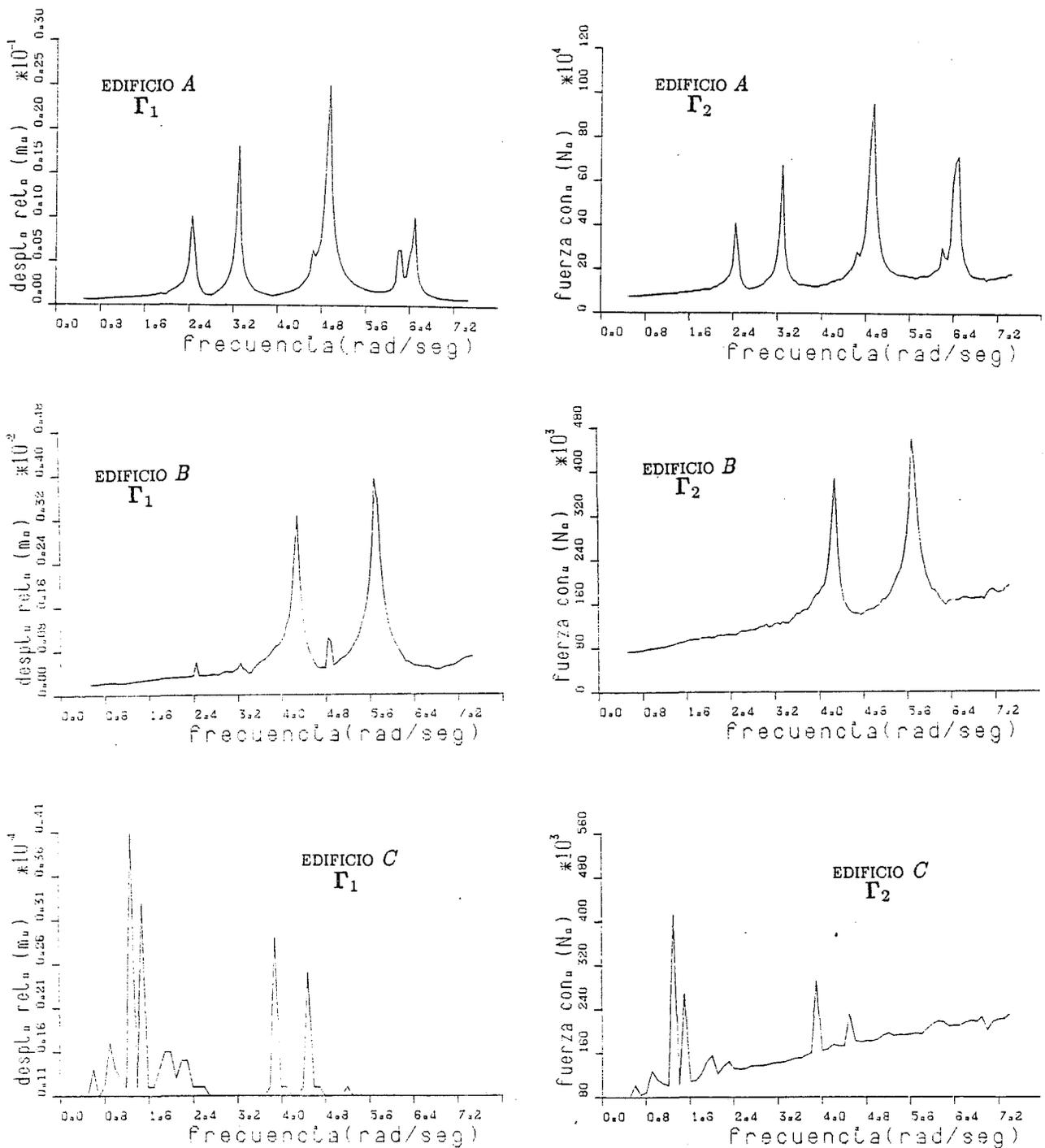


Figura 8.20a Valores de  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 11 fuerzas de control.

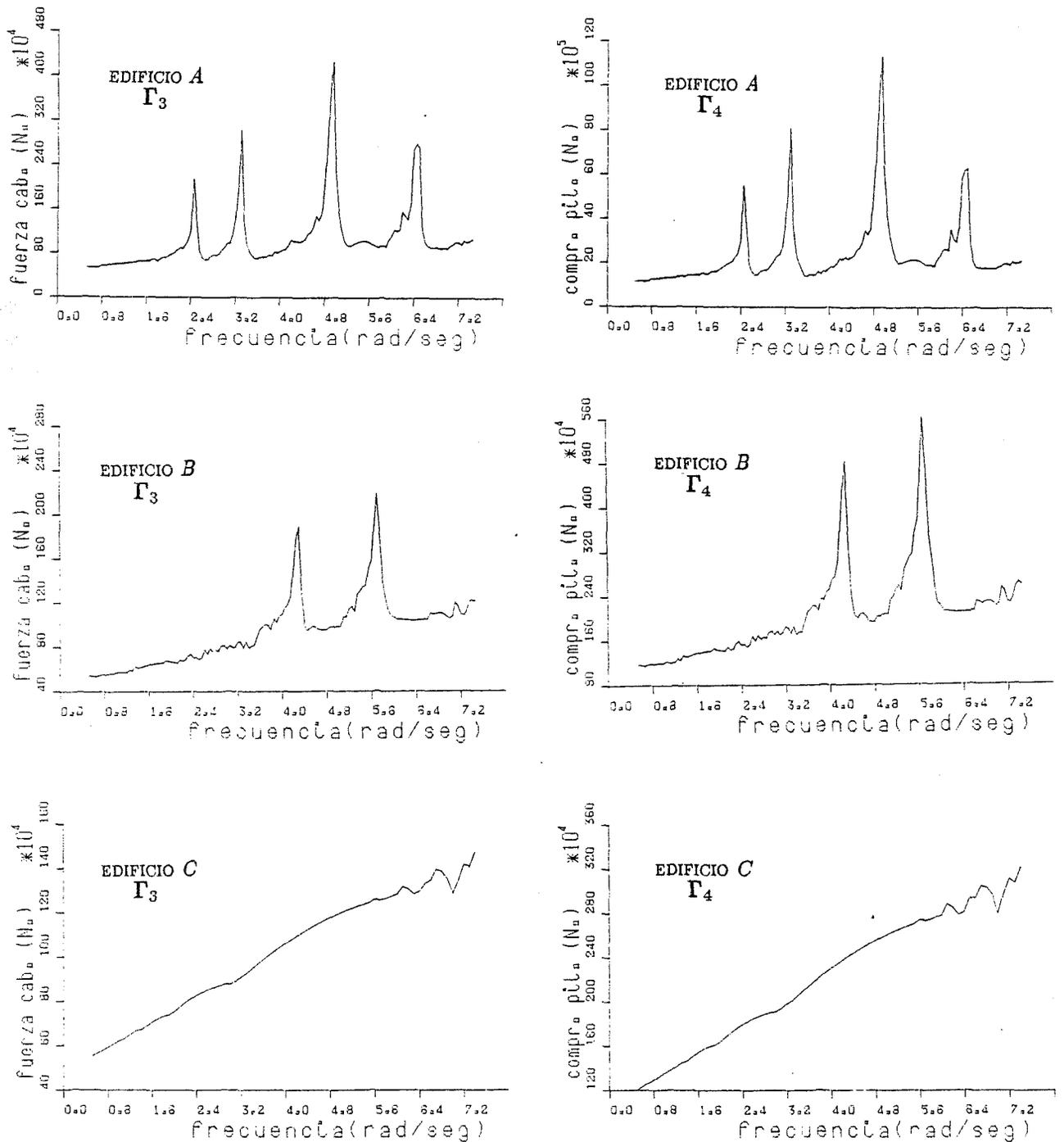


Figura 8.20b Valores de  $\Gamma_3$  y  $\Gamma_4$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 11 fuerzas de control.

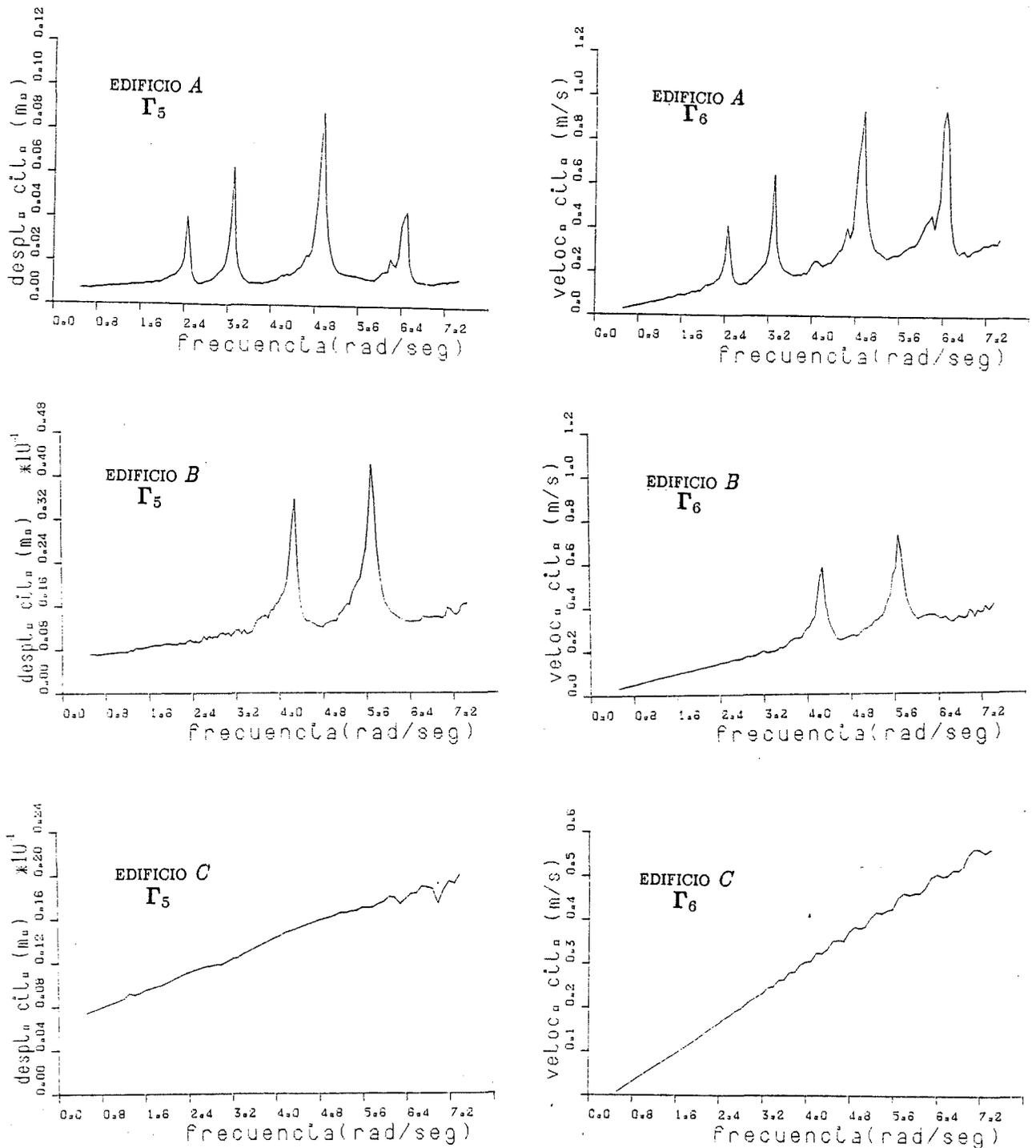


Figura 8.20c Valores de  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 11 fuerzas de control.

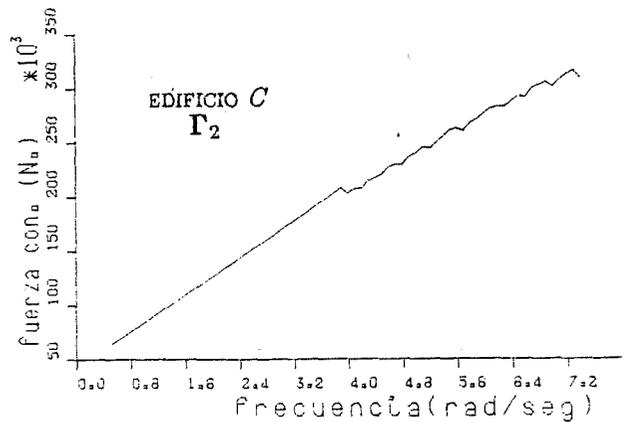
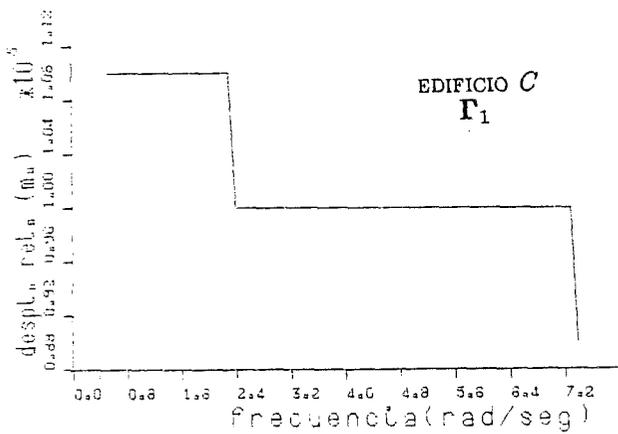
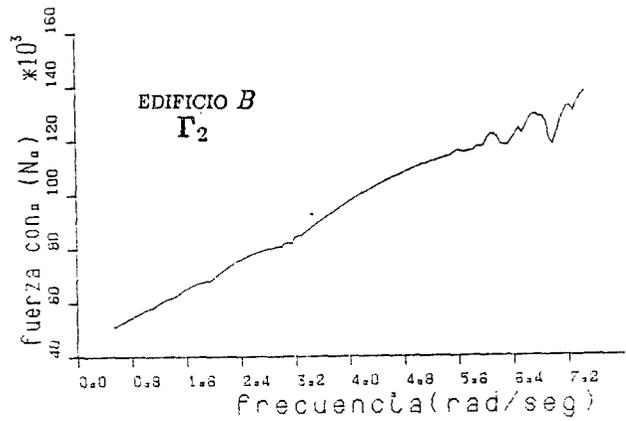
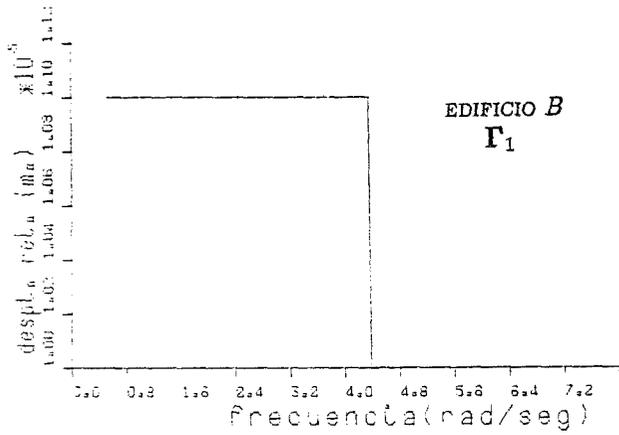
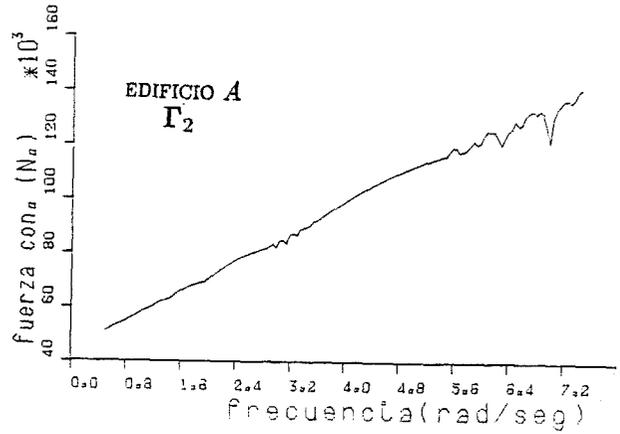
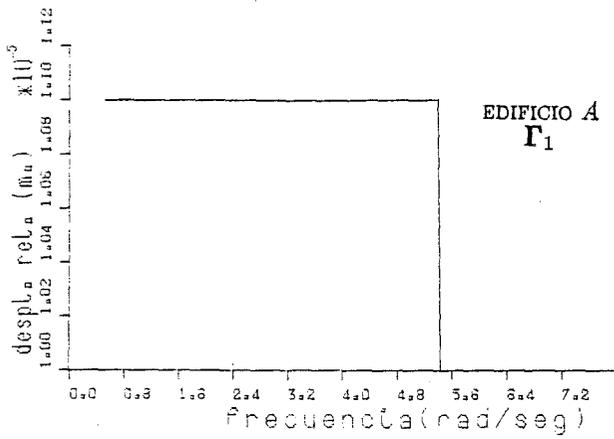


Figura 8.21a Valores de  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 23 fuerzas de control.

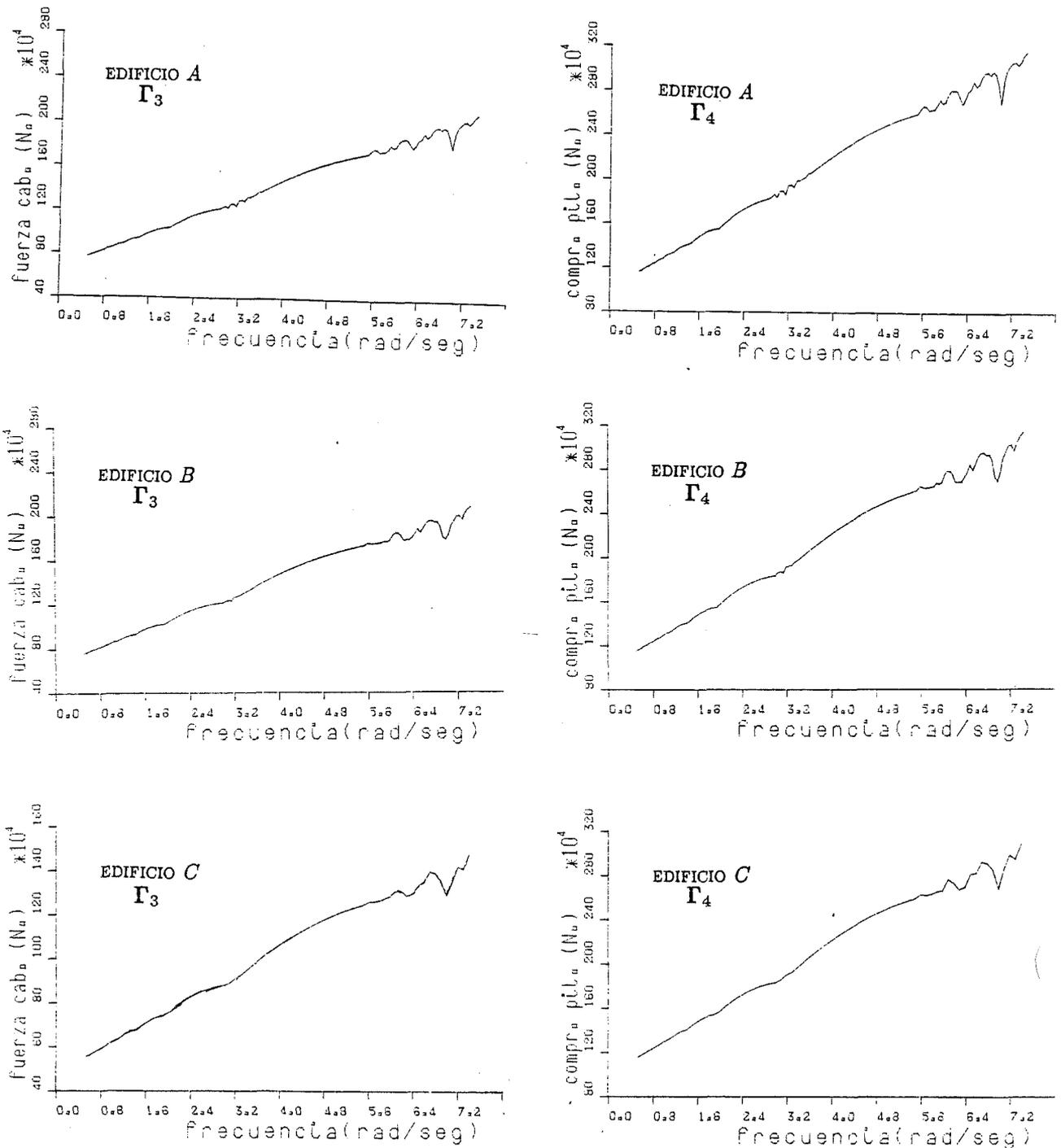


Figura 8.21b Valores de  $\Gamma_3$  y  $\Gamma_4$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 23 fuerzas de control.

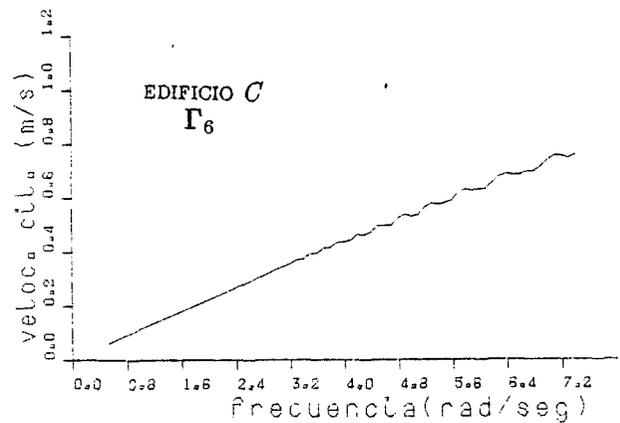
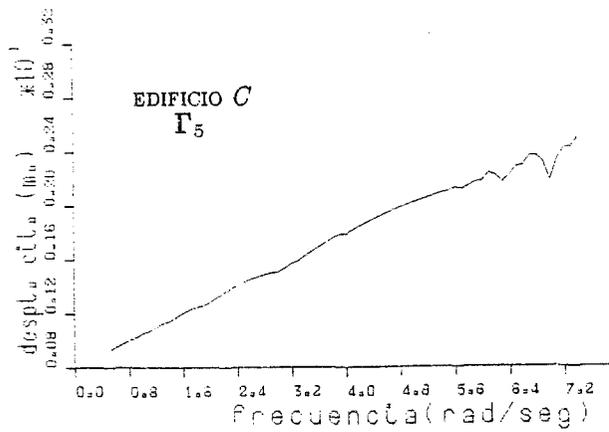
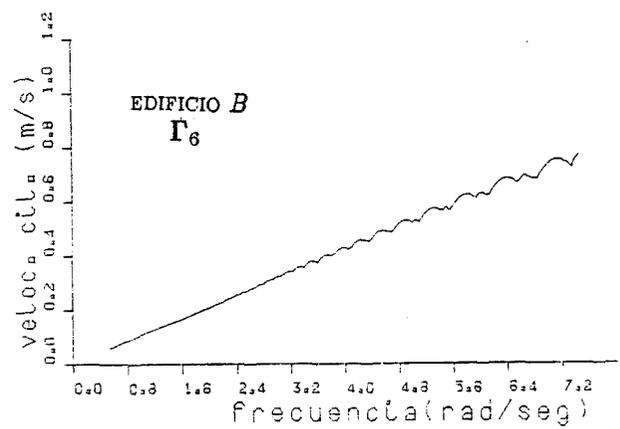
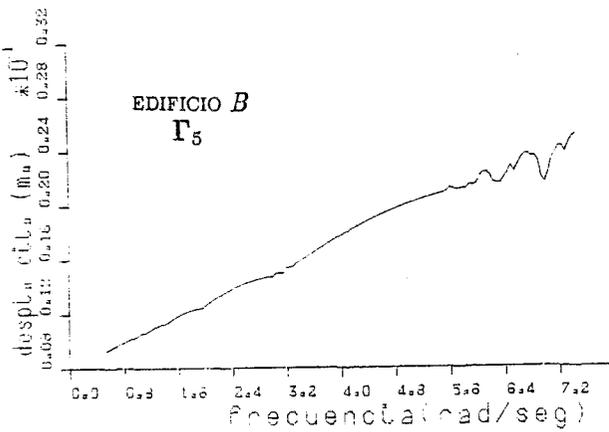
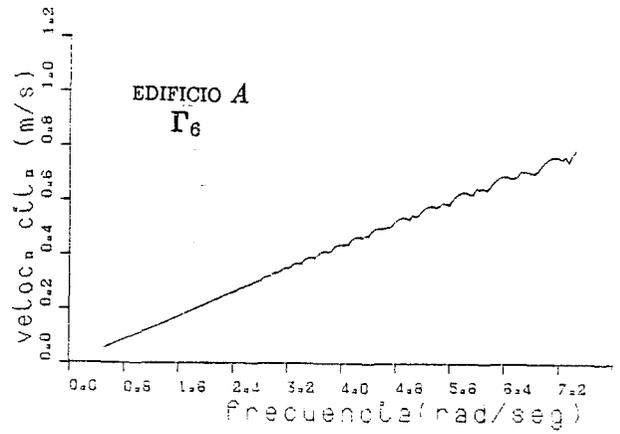
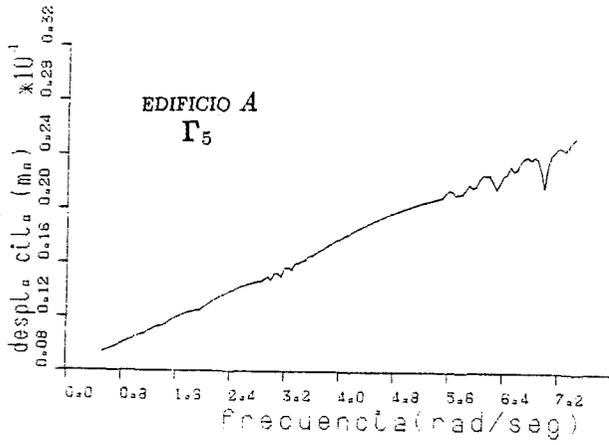


Figura 8.21c Valores de  $\Gamma_5$  y  $\Gamma_6$  para distintas frecuencias de excitación del viento con 23 fuerzas de control.

debe a que dicha excitación es menos violenta que la excitación sísmica considerada en el subapartado 8.7.2.

## 8.8 EJEMPLO DE DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE CONTROL.

En el presente apartado se muestra, a título de ejemplo, el dimensionamiento de un sistema de control por cables activos para el edificio B sometido a la acción del terremoto de EL CENTRO (California 1940).

El sistema de control responde a la tipología descrita en el apartado 8.2, siendo capaz de ejercer 11 fuerzas horizontales de control sobre la estructura del edificio B. Las secciones de los cables son proporcionales a las representadas en la tabla 8.1b siendo el factor de proporcionalidad igual a 4.

Para generar el algoritmo de control se han considerado los siguientes valores del período de muestreo  $T$  y de los parámetros  $n_r$ ,  $\hat{n}_r$ ,  $\lambda$  y  $r_0$ :

$$T = 0.05 \text{ s} \quad n_r = \hat{n}_r = 0 \quad \lambda = 2 \quad r_0 = 0.5 \cdot 10^{-16} \quad (8.16)$$

En los ensayos sin control y en los ensayos con control se obtienen los valores de las tensiones máximas en cada barra para poder evaluar la reducción de sus valores provocada por la acción de control.

En ausencia de control, el valor obtenido para el índice  $\Gamma_1$  es:

$$\Gamma_1 = 0.03068 \text{ m} \quad (8.17)$$

En presencia de control, para los valores contenidos en (8.16), los índices  $\Gamma_1, \dots, \Gamma_6$  toman los siguientes valores:

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= 0.00956 \text{ m} & \Gamma_2 &= 2028000. \text{ N} & \Gamma_3 &= 14869120. \text{ N} \\ \Gamma_4 &= 31060052. \text{ N} & \Gamma_5 &= 0.04686 \text{ m} & \Gamma_6 &= 0.76894 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (8.18)$$

La comparación entre los valores de  $\Gamma_1$  dados en (8.17) y (8.18) muestra que la acción de control produce una importante reducción de la respuesta dinámica de la estructura. Los valores de  $\Gamma_2, \dots, \Gamma_6$  dados en (8.18) muestran que los esfuerzos a que están sometidos los elementos que constituyen el sistema de control no son excesivos.

A continuación se desarrolla un análisis más cuidadoso que el que puede deducirse de la mera observación de (8.17) y (8.18).

Se obtienen, en primer lugar, los valores de las tensiones normales máximas en todas las barras en tres situaciones distintas: en reposo (es decir, las tensiones producidas por el peso propio y la mitad de las sobrecargas de uso), bajo la actuación del terremoto EL CENTRO en ausencia de control y bajo la actuación de dicho terremoto en presencia del sistema de control considerado en el presente apartado. Los valores medios cuadráticos  $\sigma_1$  (tensión en reposo),  $\sigma_2$  (tensión en ausencia de control) y  $\sigma_3$  (tensión en presencia de control) de las tensiones máximas en dichas tres situaciones son los siguientes:

$$\sigma_1 = 893.24 \text{ Kg/cm}^2 \quad \sigma_2 = 3215.46 \text{ Kg/cm}^2 \quad \sigma_3 = 1675.74 \text{ Kg/cm}^2 \quad (8.19)$$

(8.19) muestra que la acción de control ejercida por los cables activos produce una importante reducción de las tensiones máximas en las barras.

En ausencia de control y considerando comportamiento lineal de la estructura se obtienen tensiones normales máximas superiores al límite elástico del acero A-52 ( $3600. \text{ Kg/cm}^2$ ) en 40 barras (que corresponden a los pilares de las plantas superiores), siendo el valor de la mayor tensión máxima de  $6124.00 \text{ Kg/cm}^2$  para un pilar de la

penúltima planta. Ello hace presumible que los daños producidos al edificio B por el terremoto EL CENTRO en ausencia de control serían muy graves.

En presencia del sistema de control por cables activos únicamente en una barra se obtiene una tensión superior a  $3600. Kg/cm^2$  ( $3804. Kg/cm^2$  en un pilar extremo de la planta superior) y, consecuentemente, puede afirmarse que, bajo la protección del sistema de control por cables activos considerado en el presente apartado, el edificio B puede resistir la acción del terremoto EL CENTRO sin daños en su estructura. Ello constituye una muestra palpable de la utilidad de dicho sistema de control.

La mayor diferencia entre las tracciones que soportan los dos cables que constituyen un mismo mecanismo actuador es de  $30838056. N$  en los cables instalados entre las plantas 0 y 2. Considerando que la fuerza *final* con la que se pretensa a los cables es igual a dicha diferencia (lo cual constituye una hipótesis que no está del lado de la seguridad), la máxima tensión que soportan los cables es de  $8250. Kg/cm^2$  en el mecanismo actuador instalado entre las plantas 6 y 8, valor claramente inferior al límite elástico que se estima superior a  $17000. Kg/cm^2$ . El máximo desplazamiento del émbolo del cilindro hidráulico es de  $8.5 cm$  para el cilindro instalado en la planta 20 y la máxima velocidad lineal del émbolo es de  $1.30 m/s$  en el cilindro instalado en la planta 16. Los datos anteriores muestran que el sistema de control considerado en el presente apartado puede ser dimensionado para resistir los esfuerzos exigidos por la actuación del acelerograma EL CENTRO lo cual puede ser considerado como una muestra de su realizabilidad.

En el siguiente apartado se analiza la robustez del sistema de control dimensionado en el presente apartado.

## 8.9 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL EN CONDICIONES DE SATURACION DE LOS ACTUADORES.

En el presente apartado se desarrolla para el sistema de control considerado en el apartado 2 un análisis similar al estudio realizado en el apartado 7 del capítulo 7 para el modelo experimental allí considerado. Se trata de analizar el comportamiento del sistema de control cuando una excitación más violenta que aquella para la que ha sido dimensionado exige de los cables activos prestaciones que no pueden proporcionar. En dicho caso se dice que trabajan en condiciones de saturación.

En el apartado 4 del capítulo 5 se definen los límites de las prestaciones de cada mecanismo actuador por cables activos:  $f_{hLIM}$  (máxima fuerza horizontal que es capaz de ejercer sobre la estructura),  $z_{LIM}$  (máximo recorrido libre del émbolo del cilindro hidráulico) y  $\dot{z}_{LIM}$  (máxima velocidad lineal de dicho émbolo). Los tres valores anteriores son los límites que han sido considerados en el capítulo 7. En el presente apartado se considera que dichos valores son comunes a los 11 mecanismos actuadores que constituyen el sistema de control.

Las experiencias numéricas desarrolladas muestran que el sistema de control definido en el apartado 8.8 es robusto respecto del funcionamiento de los actuadores en condiciones de saturación.

En las tablas 8.11, 8.12 y 8.13 se presentan los resultados de distintas experiencias numéricas consistentes en repetir los ensayos descritos en el apartado 8 en condiciones de saturación de los actuadores. En los ensayos contenidos en dicho apartado los valores de la máxima fuerza horizontal, del máximo desplazamiento y de la máxima velocidad del émbolo son, respectivamente

$$f_{hMAX} = 30871000. N \quad z_{MAX} = 0.08496 m \quad \dot{z}_{MAX} = 1.31777 m/s \quad (8.20)$$

consecuentemente, las limitaciones consideradas en el presente apartado serán inferiores a dichos valores.

En la tabla 8.11 se muestran los resultados de experiencias en las que el valor de  $f_{hLIM}$  es inferior al mostrado en (8.20) para  $f_{hMAX}$ .

TABLA 8.11						
RESPUESTA DINAMICA EN CONDICIONES DE SATURACION DE LOS ACTUADORES						
Acelerograma: EL CENTRO      11 fuerzas de control      Edificio B						
$n_r = \hat{n}_r = 0$ $\lambda = 2$ $r_0 = 0.50 \cdot 10^{-16}$						
$f_{hLIM}(N)$	$\Gamma_1(m)$	$\Gamma_2(N)$	$\Gamma_3(N)$	$\Gamma_4(N)$	$\Gamma_5(m)$	$\Gamma_6(m/s)$
28 $10^6$	0.00960	2049728.	14342408.	30615160.	0.04613	0.77425
24 $10^6$	0.00920	2132276.	13174168.	29268788.	0.04449	0.82679
20 $10^6$	0.01196	2472752.	11589764.	26884056.	0.04236	0.80358
16 $10^6$	0.01632	3056900.	9710204.	23441256.	0.03878	0.71033

En la tabla 8.12 se muestran los resultados de experiencias en las que el valor de  $z_{LIM}$  es inferior al mostrado en (8.20) para  $z_{MAX}$ .

TABLA 8.12						
RESPUESTA DINAMICA EN CONDICIONES DE SATURACION DE LOS ACTUADORES						
Acelerograma: EL CENTRO      11 fuerzas de control      Edificio B						
$n_r = \hat{n}_r = 0$ $\lambda = 2$ $r_0 = 0.50 \cdot 10^{-16}$						
$z_{LIM}(m)$	$\Gamma_1(m)$	$\Gamma_2(N)$	$\Gamma_3(N)$	$\Gamma_4(N)$	$\Gamma_5(m)$	$\Gamma_6(m/s)$
0.08	0.00992	2026216.	14859192.	30962472.	0.04648	0.76491
0.07	0.01140	2292548.	14603836.	29999076.	0.04459	0.76147
0.06	0.01336	2491888.	13389360.	27442584.	0.04060	0.82275
0.05	0.02644	2482488.	11390660.	23256200.	0.03447	0.82157

En la tabla 8.13 se muestran los resultados de experiencias en las que el valor de  $\dot{z}_{LIM}$  es inferior al mostrado en (8.20) para  $\dot{z}_{MAX}$ .

Los resultados de las experiencias descritas en las tablas 8.11, 8.12 y 8.13 muestran que, aunque la capacidad de respuesta de los cables activos esté notablemente mermada,

TABLA 8.13						
RESPUESTA DINAMICA EN CONDICIONES DE SATURACION DE LOS ACTUADORES						
Acelerograma: EL CENTRO    11 fuerzas de control    Edificio B						
$n_r = \hat{n}_r = 0$ $\lambda = 2$ $r_0 = 0.50 \cdot 10^{-16}$						
$\dot{z}_{LIM}(m/s)$	$\Gamma_1(m)$	$\Gamma_2(N)$	$\Gamma_3(N)$	$\Gamma_4(N)$	$\Gamma_5(m)$	$\Gamma_6(m/s)$
1.30	0.00956	2027972.	14869120.	31060052.	0.04686	0.76762
1.20	0.01000	2071292.	14869120.	31060052.	0.04686	0.75086
1.10	0.01176	2296884.	14869120.	31060052.	0.04686	0.72070
1.00	0.01340	2320892.	14869120.	31060052.	0.04688	0.66790
0.90	0.01096	2732700.	15680408.	31085268.	0.04844	0.60583
0.80	0.01460	3544172.	15943972.	33326236.	0.04991	0.54181
0.70	0.02544	4142412.	18218108.	35668712.	0.05466	0.47882

se obtiene una importante reducción de la respuesta dinámica sin un excesivo incremento de la energía invertida en el proceso. Dicha robustez es atribuible en gran parte al algoritmo de control predictivo considerado en el lazo cerrado de control.

### 8.10 CONCLUSIONES.

A partir de las consideraciones y de los resultados numéricos expuestos en el presente capítulo pueden formularse varias conclusiones relativas a los sistemas de control de edificios mediante cables activos descritos en el apartado 8.2:

- Es posible diseñar sistemas de control de edificios de media altura capaces de reducir su respuesta dinámica frente a excitaciones sísmicas y del viento con un coste de energía razonable y unas solicitaciones sobre los elementos que los constituyen que puedan ser resistidos por éstos sin necesidad de considerar un dimensionamiento excesivo de los mismos. Los sistemas de control generan una acción de control estable y robusta frente a las limitaciones mecánicas impuestas a sus elementos.
- En los edificios A y B (cuyo comportamiento dinámico es el propio de estructuras aporricadas) es necesario diseñar sistemas de control capaces de ejercer un número elevado de fuerzas de control para conseguir una reducción de la respuesta en

un margen de frecuencias amplio. Por el contrario, en el edificio C (cuyo comportamiento dinámico es similar al de una viga) es posible generar una acción de control eficaz con una única fuerza de control (aunque se obtienen mejores resultados con varias fuerzas). A igualdad del número de fuerzas de control, la reducción de la respuesta es mayor en el edificio C que en los edificios A y B, no existiendo diferencias cualitativas importantes entre éstos.

- Para dimensionar un sistema de control como los descritos en el presente capítulo es necesario conocer las características de la excitación esperada. Puesto que la misma se conoce frecuentemente a través de espectros, las curvas contenidas en los subapartados 8.6.2 y 8.7.2 pueden ser útiles para dicho dimensionamiento.

## REFERENCIAS

- 1 Gould, P.L. y Abu-Sitta, S.H. "Dyanamic Response of Structures to Wind and Earthquake Loading", Pentech Press, London-Plymouth (1975).
- 2 Chang, J.C.H. y Soong T.T., "Structural Control using Active Tuned Mass Dampers", *ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 106, N<sup>o</sup> EM6, pp. 1091-1098, (1980).