

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS DEL PERIODO CONSIDERANDO INTERACCIÓN**

#### **RESUMEN**

A continuación se presenta el cálculo del periodo de vibración plástico y elástico de 84 estructuras con vigas banda y de 120 estructuras con vigas descolgadas, interactuando con diferentes tipos de suelo considerando 10 variaciones de su rigidez traslacional ( $j$ ) y 3 variaciones de su rigidez rotacional ( $i$ ). Los rangos de análisis de “ $i$ ” van de 5 a 25 y de “ $j$ ” varían de 5 a 50. Después de obtener gráficas comparativas fruto de este trabajo, los resultados son comparados con lo que las Normas Mexicanas dicen al respecto y se vierten comentarios al respecto.

## 4.1 MANEJO DEL PROGRAMA PUSHUELO.

A continuación se detalla el uso del programa PUSHUELO, Aguiar (2005), en donde se indica los datos necesarios de la estructura para hacer el análisis considerando interacción suelo estructura, se describe paso a paso el ingreso de datos y la forma de correr el programa.

Con las ecuaciones descritas en el capítulo 3, se desarrolló el programa PUSHUELO, Aguiar (2005), que analiza la estructura a través del pushover considerando la interacción suelo-estructura, cuyo manejo se describe a continuación.

Los datos que son necesarios conocer de la estructura son:

- Área en planta de la estructura de análisis.
- Número de pisos.
- Carga distribuida sobre cada planta
- Altura de entrepiso
- Puntos notables de la curva de capacidad espacial:
  - Cortante de fluencia
  - Desplazamiento de fluencia
  - Alfa  $\alpha$
- Periodos de vibración elásticos y plásticos

Primero se necesita calcular la carga axial de la estructura que no es más que el producto del área de la estructura por la carga distribuida y por el número de pisos, este valor debe estar en toneladas. A continuación la masa total, que es la carga axial dividida para la gravedad. Finalmente se determina la masa distribuida que es igual a la masa total dividida para la altura total de la edificación.

Como la figura 4.1 y 4.2 indican, el ingreso de datos se lo hace a través de un archivo de entrada que será generado en el editor del DOS, en la misma carpeta que el programa PUSHUELO.

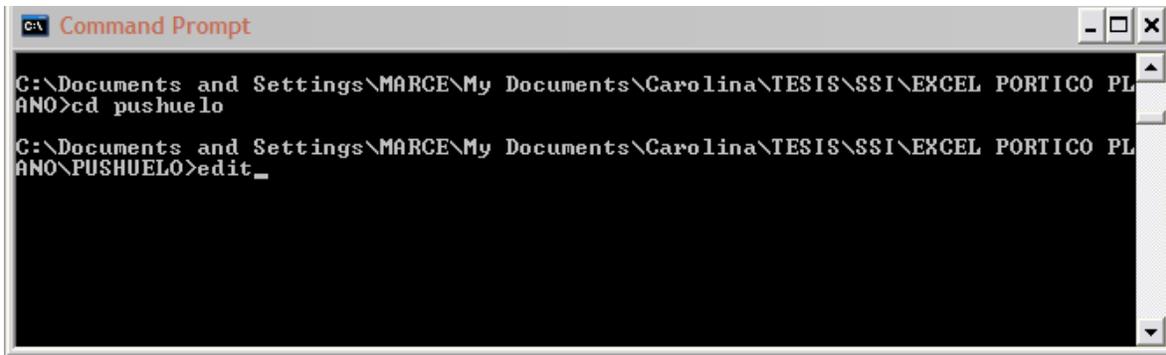


Figura 4.1 Ejemplo como direccionar para ingresar datos.

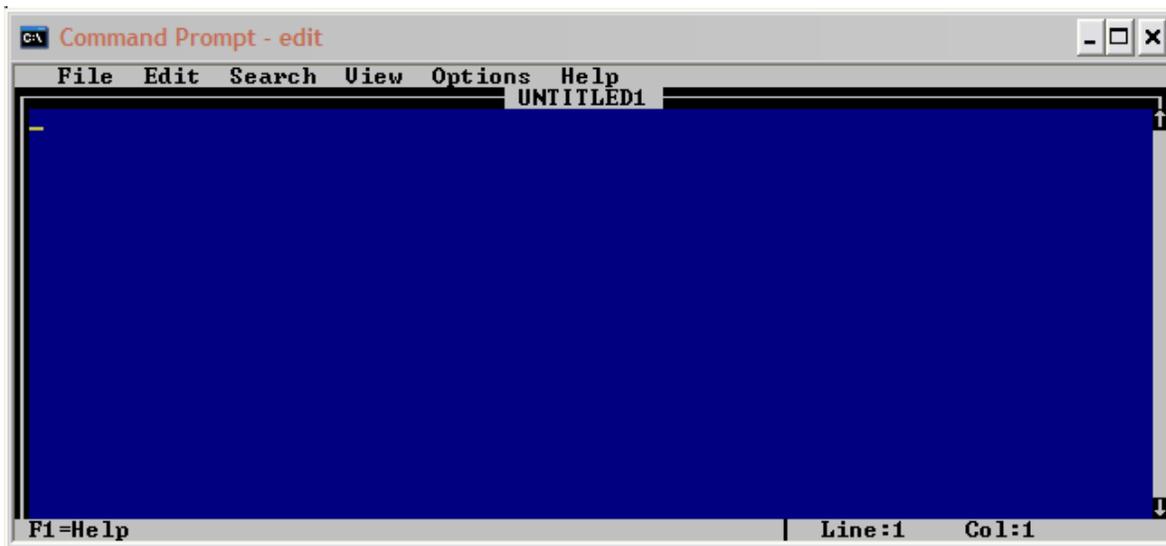


Figura 4.2 Ventana en la que se ingresarán los datos

Los datos a ingresar en el programa y el orden en que se lo realizará se indican a continuación:

- Línea 1:  
Línea del usuario
- Línea 2:  
Cortante de fluencia                      Desplazamiento de fluencia    Alfa    (rigidez  
post fluencia)    Altura de la estructura                      Masa

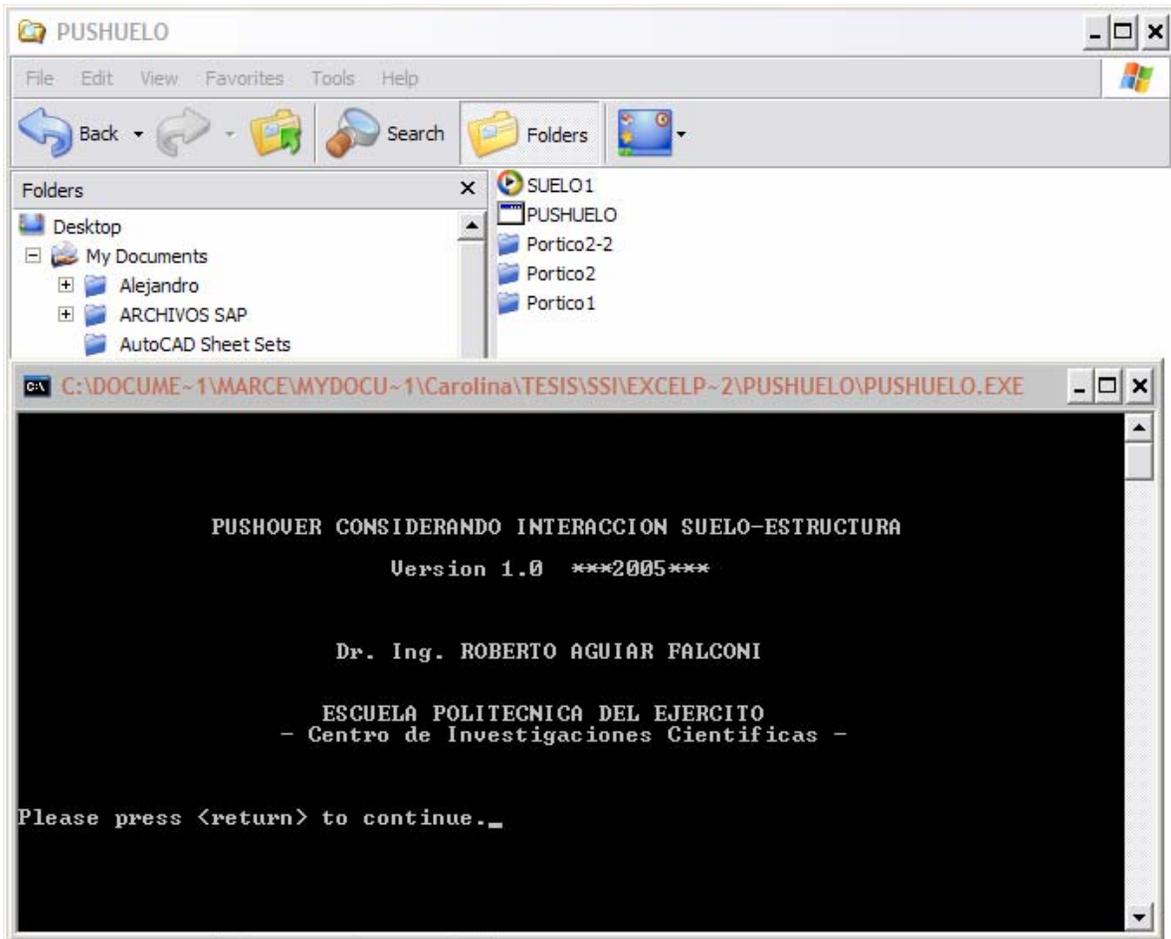
- Línea 3:  
Línea del usuario
- Línea 4:  
Periodo de vibración elástico                      Periodo de vibración plástico
- Línea 5:  
Línea del usuario
- Línea 6:  
Rigidez del suelo parámetro i
- Línea 7:  
Línea del usuario
- Línea 8:  
Velocidad de aplicación de la carga                      Carga axial total

La figura 4.3 indica gráficamente el ingreso de los datos de la estructura.



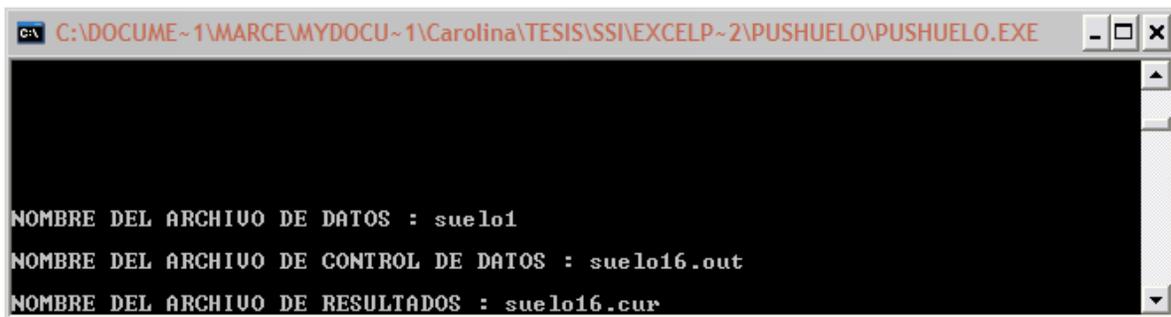
**Figura 4.3** Ingreso de datos

Dando doble clic sobre el icono del programa pushuelo, este corre, como se muestra en la figura 4.4.



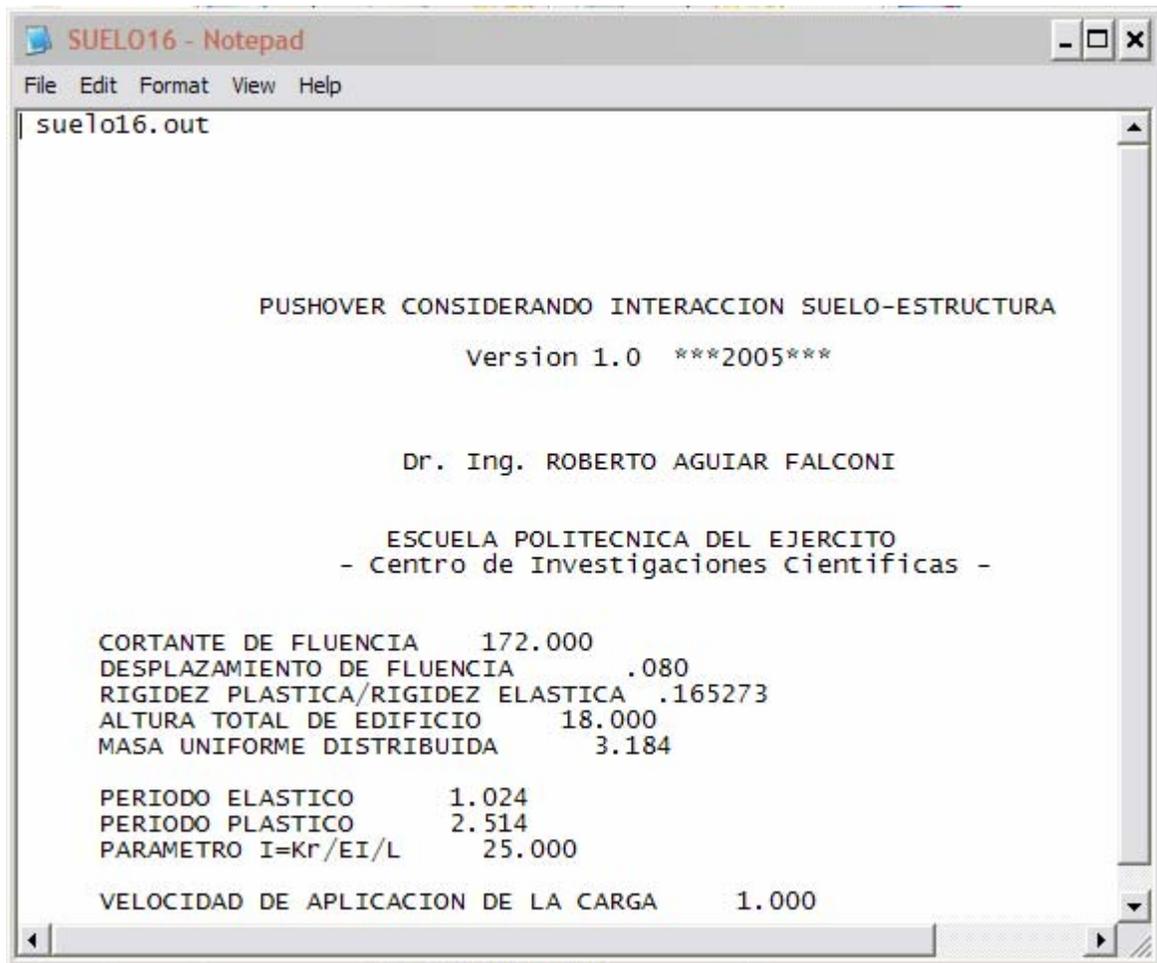
**Figura 4.4** Corrida del programa PUSHUELO

A continuación el programa pide se ingrese el nombre del archivo de datos (generado anteriormente), el del archivo de control de datos (que generará el programa) y el de resultados (en donde el programa reportará los resultados), como la figura 4.5 lo indica.



**Figura 4.5** Ingreso del nombre de archivos

El archivo de control de datos servirá para verificar que se hayan ingresado correctamente los valores de entrada como muestra la figura 4.6, y el de resultados presenta los valores del periodo elástico, periodo plástico, gama, desplazamiento de fluencia, cortante de fluencia y cortante último para los diferentes valores de J que indican la variación del comportamiento del suelo



```
suelo16.out

PUSHOVER CONSIDERANDO INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA
Version 1.0 ***2005***

Dr. Ing. ROBERTO AGUIAR FALCONI

ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO
- Centro de Investigaciones Cientificas -

CORTANTE DE FLUENCIA      172.000
DESPLAZAMIENTO DE FLUENCIA .080
RIGIDEZ PLASTICA/RIGIDEZ ELASTICA .165273
ALTURA TOTAL DE EDIFICIO  18.000
MASA UNIFORME DISTRIBUIDA  3.184

PERIODO ELASTICO          1.024
PERIODO PLASTICO          2.514
PARAMETRO I=Kr/EI/L      25.000

VELOCIDAD DE APLICACION DE LA CARGA  1.000
```

**Figura 4.6** Archivo de control de datos

SUELO16 - Notepad

File Edit Format View Help

CON DIOS TODO SE PUEDE, I = 25.0

J	Te	Tp	Gama	Dty	Vy	Vu
5	.8970	2.2065	1.2524	.0829	48.7642	54.3836
10	.7339	1.8054	1.4431	.0879	139.3807	155.2834
15	.6700	1.6480	1.5106	.0919	210.1846	234.3069
20	.6354	1.5629	1.5387	.0948	263.5863	293.7172
25	.6136	1.5094	1.5514	.0972	304.9872	339.7229
30	.5986	1.4725	1.5573	.0990	337.5878	376.1266
35	.5877	1.4456	1.5599	.1004	363.9883	405.5291
40	.5793	1.4250	1.5608	.1017	385.7886	429.9309
45	.5727	1.4088	1.5608	.1027	403.9888	450.3324
50	.6009	1.4780	1.5769	.1040	428.1893	477.3353
55	.5961	1.4662	1.5755	.1047	439.7894	490.1360
60	.5920	1.4563	1.5741	.1053	449.9895	501.3366
65	.5886	1.4478	1.5728	.1057	458.7896	511.3371
70	.5856	1.4405	1.5716	.1062	466.5897	519.9375
75	.5831	1.4342	1.5704	.1066	473.5897	527.7379
80	.5808	1.4286	1.5693	.1069	479.7898	534.7382
85	.5788	1.4237	1.5683	.1072	485.3898	540.9385
90	.5770	1.4193	1.5673	.1075	490.3899	546.5387
95	.5754	1.4154	1.5664	.1077	494.9899	551.7390
100	.5740	1.4118	1.5656	.1080	499.3899	556.3392
105	.5726	1.4086	1.5648	.1082	503.1900	560.7393
110	.5714	1.4056	1.5641	.1084	506.7900	564.7395
115	.5703	1.4029	1.5634	.1086	509.9900	568.3397
120	.5693	1.4005	1.5628	.1088	512.9900	571.7398
125	.5684	1.3982	1.5622	.1089	515.9901	574.9399
130	.5676	1.3961	1.5616	.1091	518.5901	577.7400
135	.5668	1.3941	1.5611	.1092	520.9901	580.5402
140	.5660	1.3923	1.5606	.1094	523.3901	583.1403
145	.5653	1.3906	1.5601	.1094	525.3901	585.5403

Figura 4.7 Archivo de resultados.

## 4.2 VARIACIÓN DEL PERIODO ELÁSTICO

En el programa PUSHUELO, Aguiar (2005), de las estructuras descritas en el Capítulo II se obtienen los resultados del periodo elástico y plástico en función de la rigidez rotacional y traslacional del suelo, se presentan graficas comparativas, mostrando los resultados de cada caso, y finalmente se comparan las curvas de las medias de todos los casos de cada estructura para luego concluir comparándolos con lo que dicen Normas Internacionales.

### 4.2.1 Estructura con vigas banda

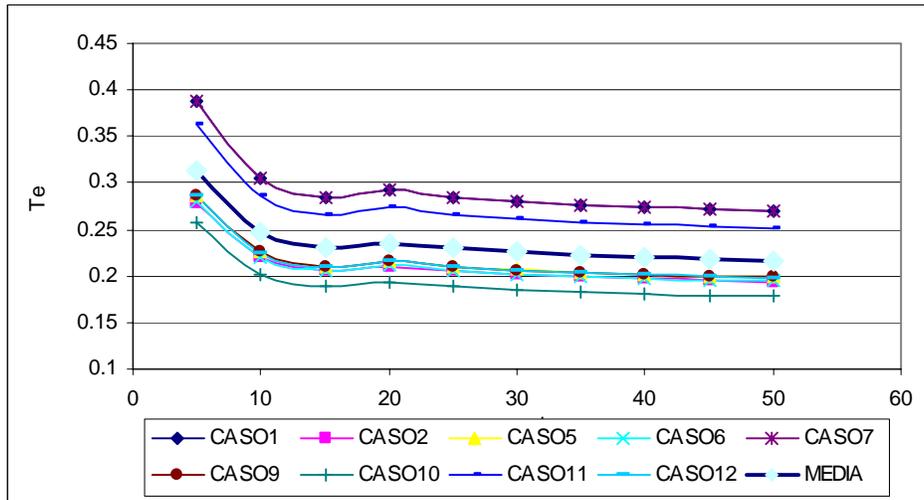
A continuación se analizan las estructuras de vigas banda de 3 vanos en X por 3 vanos en Y, cuyas características fueron descritas en el capítulo II de esta tesis.

Los resultados mostrados a continuación corresponden a un incremento de la velocidad de aplicación del sismo  $\beta = 1$ . La carga axial con que se analizarán las estructuras se muestra en la tabla 4.1.

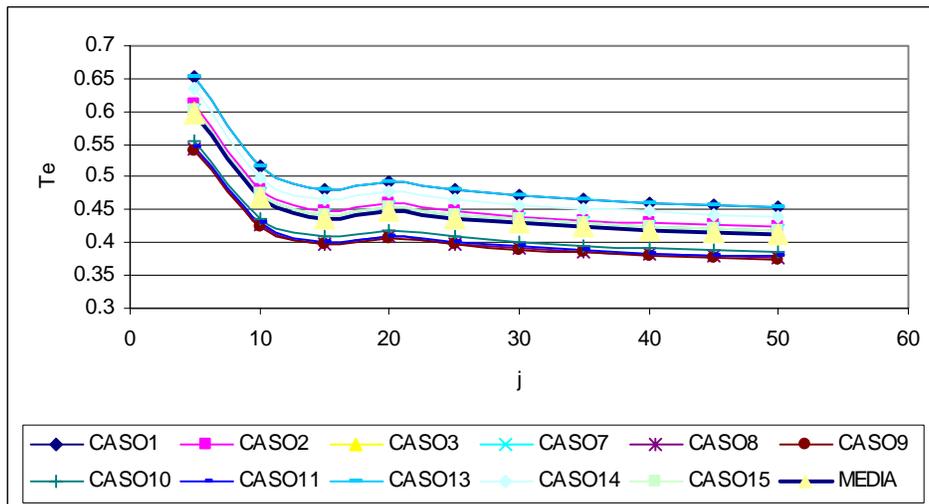
En la figura 4.8, para todos los casos analizados de cada estructura, se muestra la variación del periodo elástico en función de la rigidez traslacional del suelo, para una rigidez rotacional  $i=5$ .

**Tabla 4.1.** Carga axial P

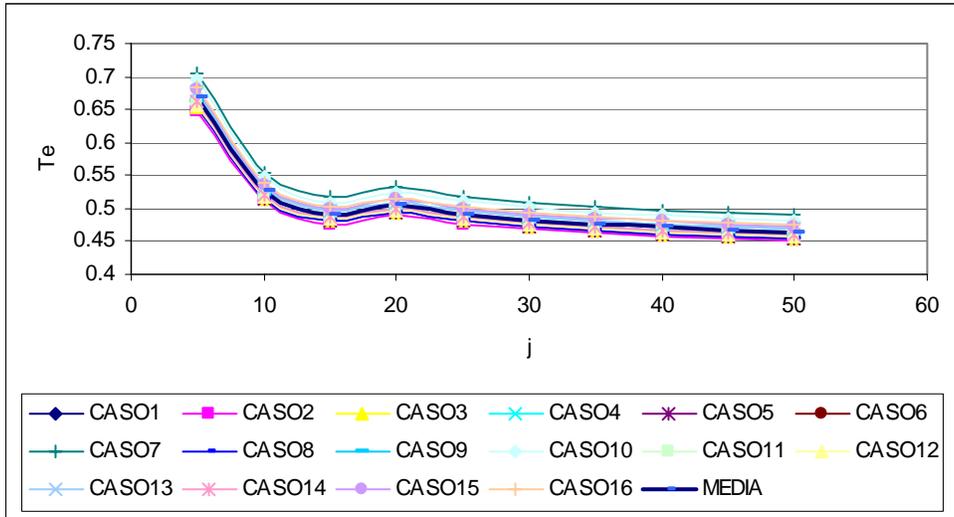
Estructura	1 Piso	2 Pisos	3 Pisos	4 Pisos	5 Pisos	6 Pisos
Carga axial P	64,8T	158,4T	237,6T	316,8T	432T	561,6T



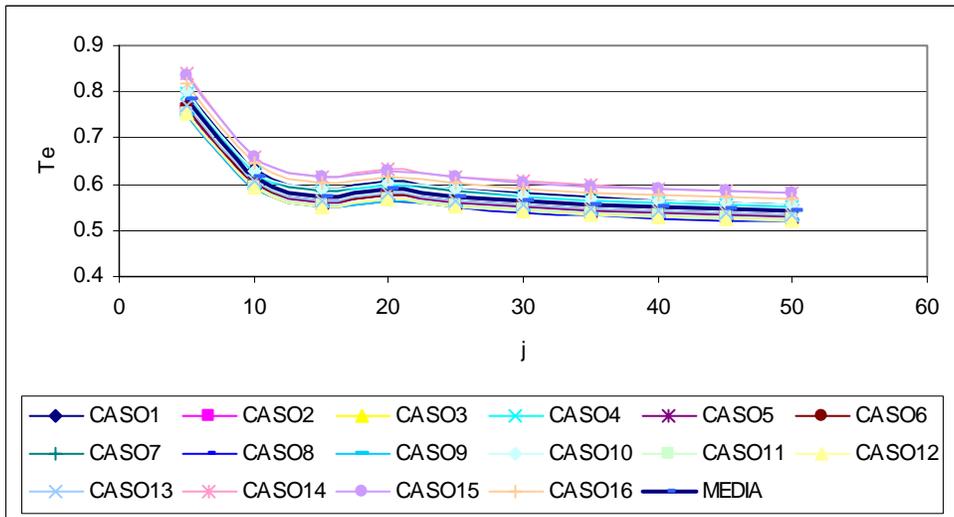
**Figura 4.8.1** Estructura vigas banda de 1 piso  $i=5$



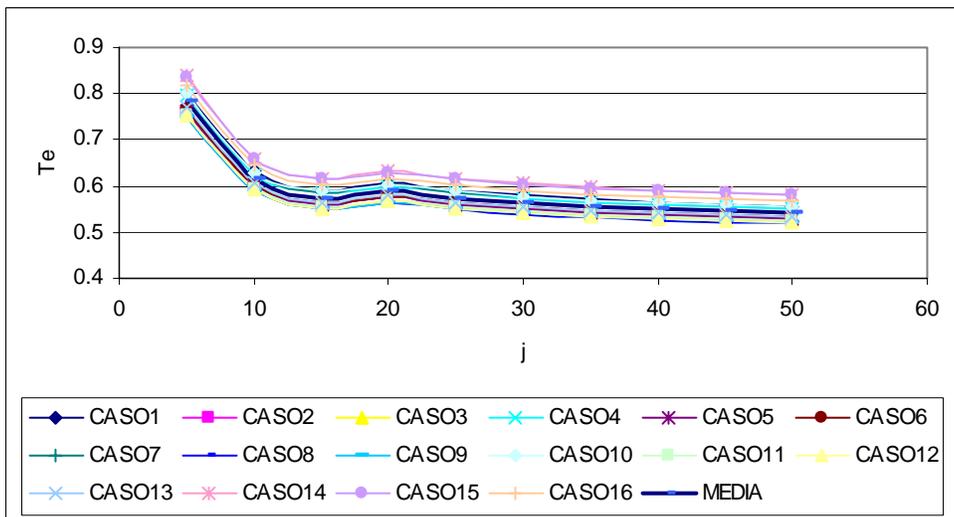
**Figura 4.8.2** Estructura vigas banda de 2 pisos  $i=5$



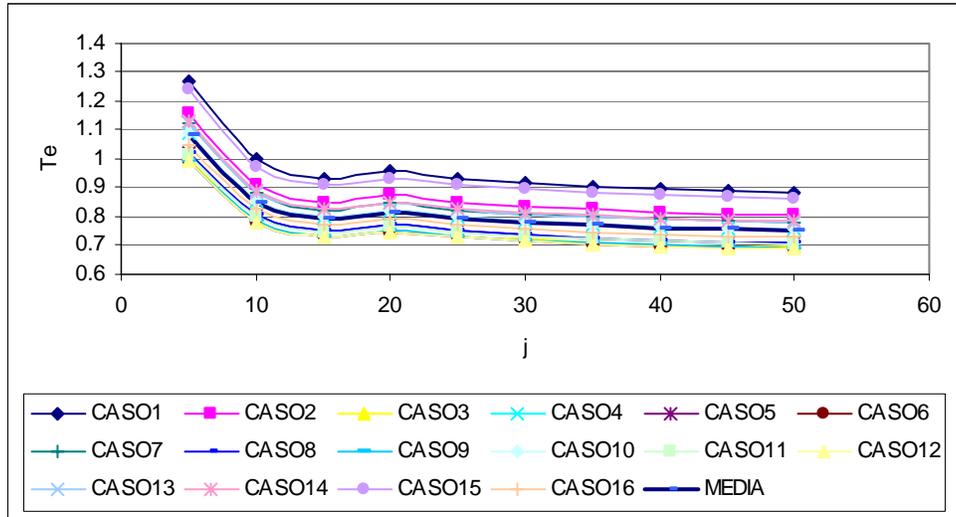
**Figura 4.8.3** Estructura vigas banda de 3 pisos  $i=5$



**Figura 4.8.4** Estructura vigas banda de 4 pisos  $i=5$

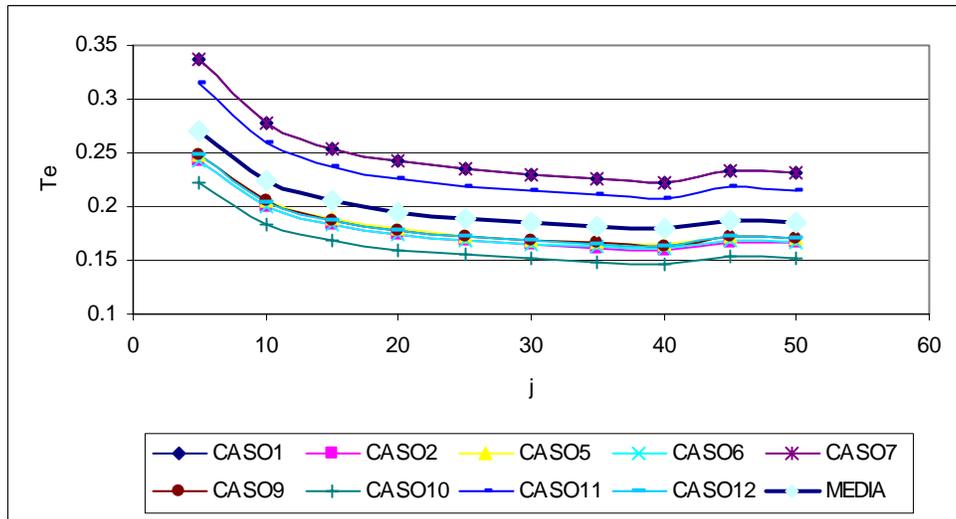


**Figura 4.8.5** Estructura vigas banda de 5 pisos  $i=5$

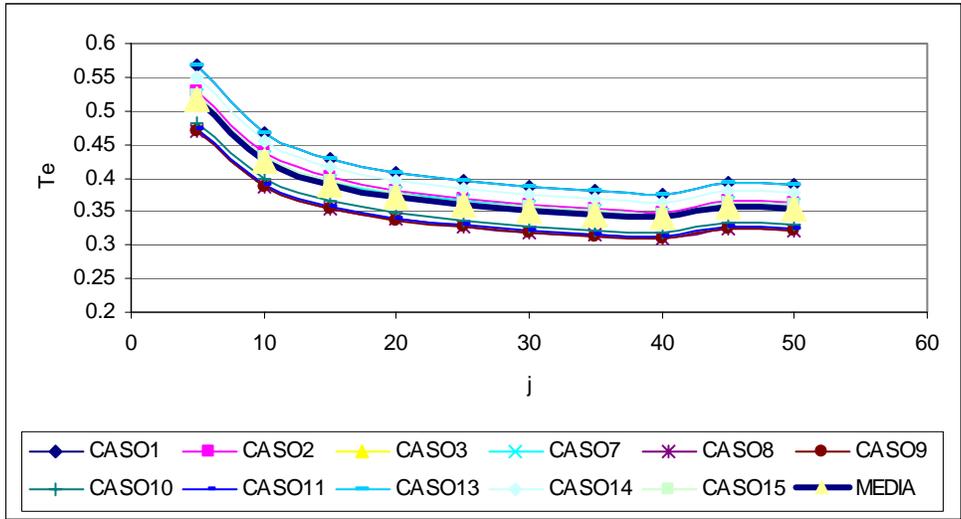


**Figura 4.8.6** Estructura vigas banda de 6 pisos  $i=5$

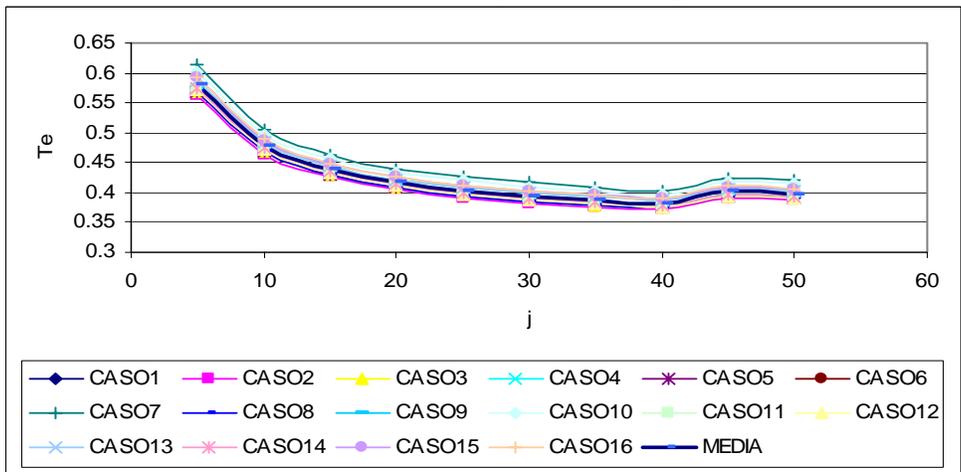
En la figura 4.9, para todos los casos analizados de cada estructura, se muestra la variación del periodo elástico en función de la rigidez traslacional del suelo, para una rigidez rotacional  $i=15$ .



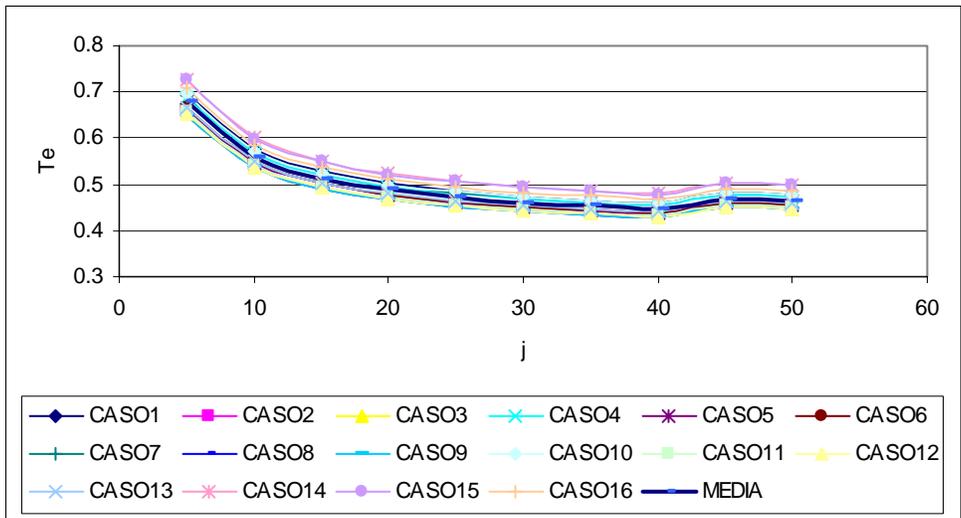
**Figura 4.9.1** Estructura vigas banda de 1 piso  $i=15$



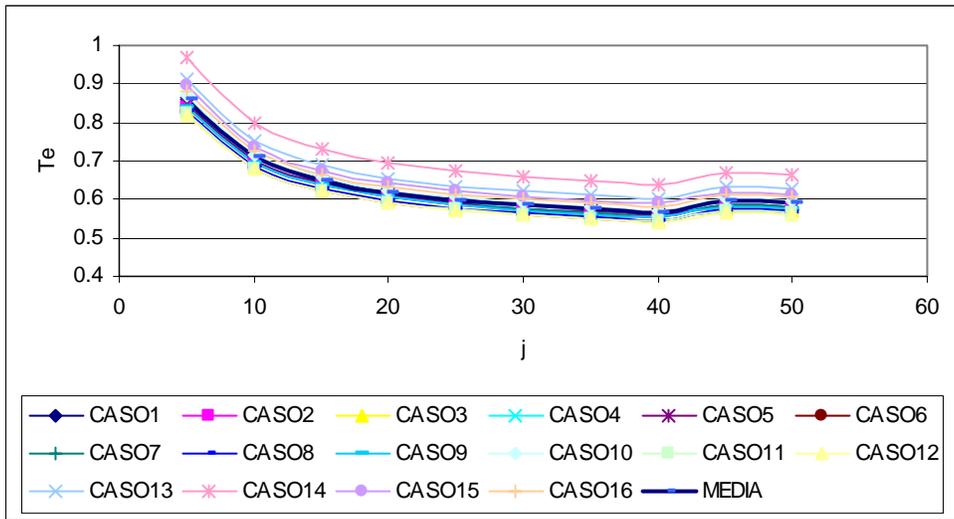
**Figura 4.9.2** Estructura vigas banda de 2 piso  $i=15$



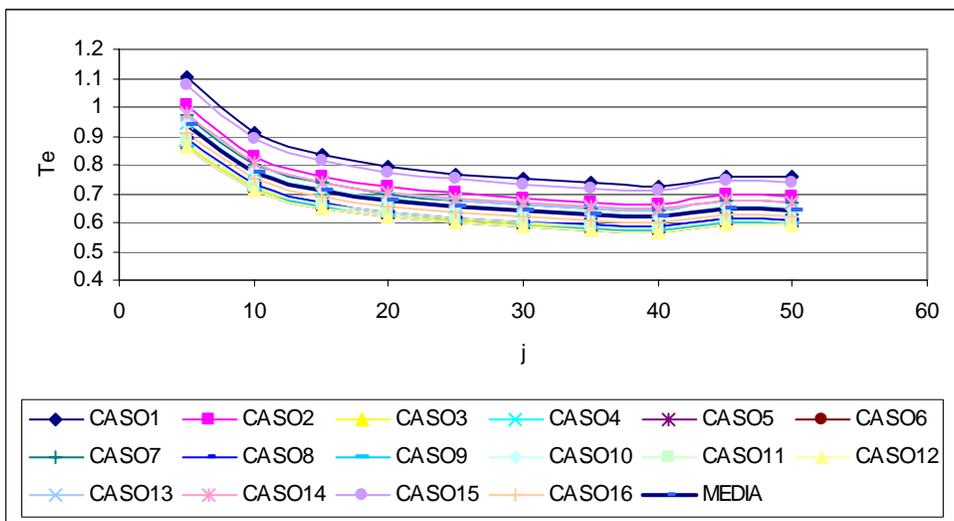
**Figura 4.9.3** Estructura vigas banda de 3 pisos  $i=15$



**Figura 4.9.4** Estructura vigas banda de 4 pisos  $i=15$

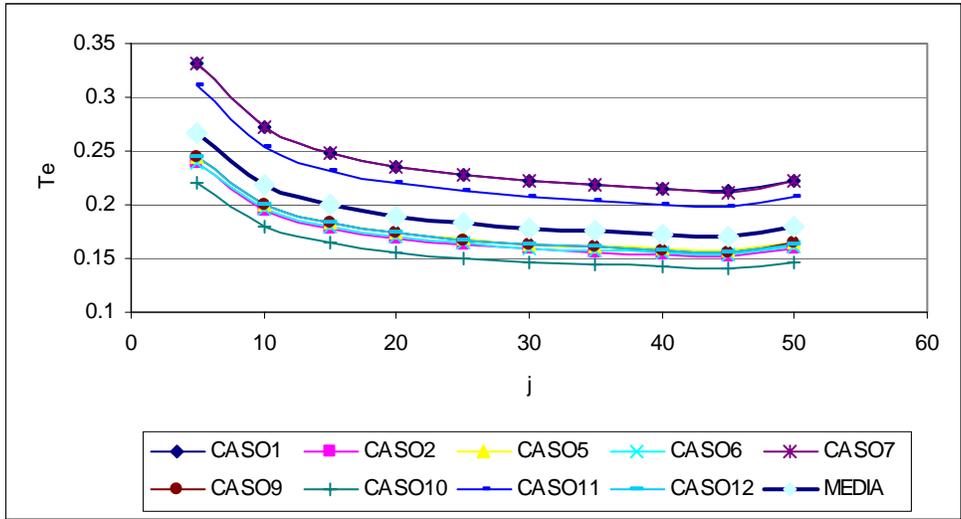


**Figura 4.9.5** Estructura vigas banda de 5 pisos  $i=15$

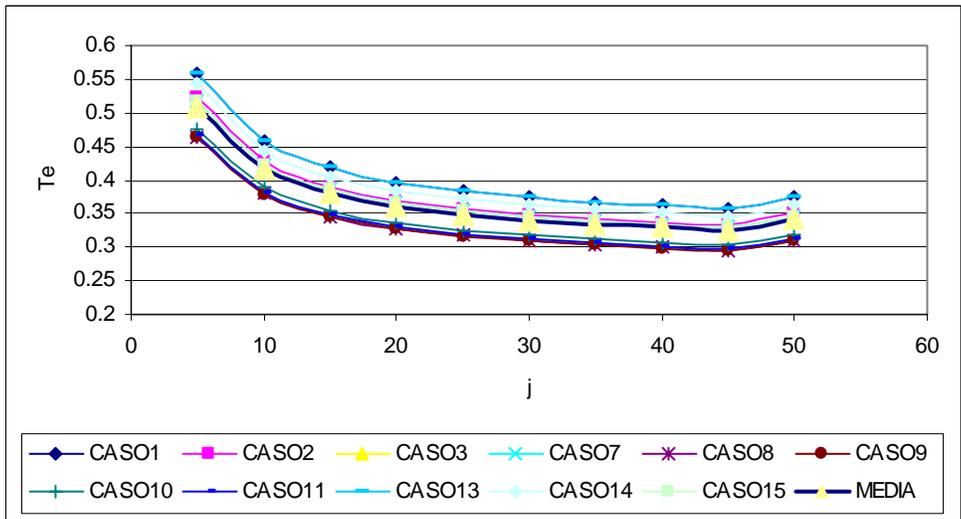


**Figura 4.9.6** Estructura vigas banda de 6 pisos  $i=15$

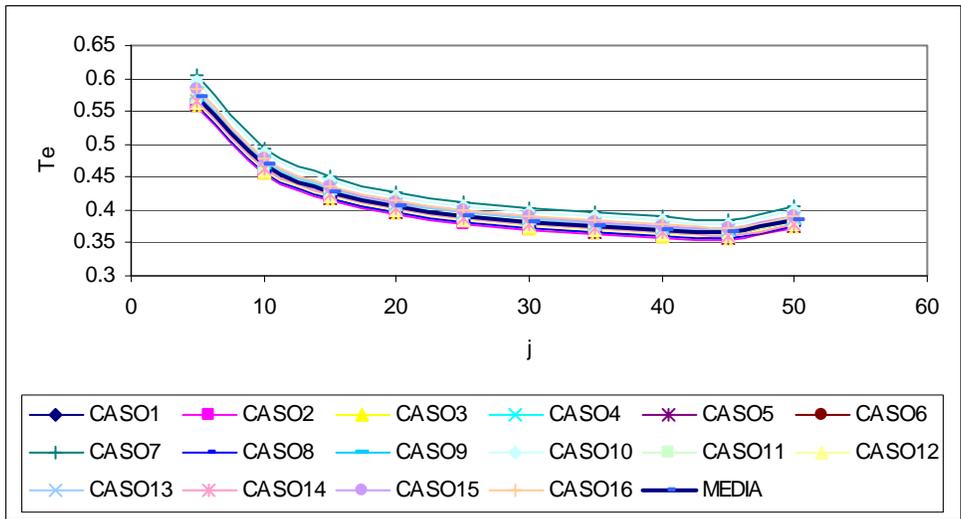
En la figura 4.10, para todos los casos analizados de cada estructura, se muestra la variación del periodo elástico en función de la rigidez traslacional del suelo, para una rigidez rotacional  $i=5$ .



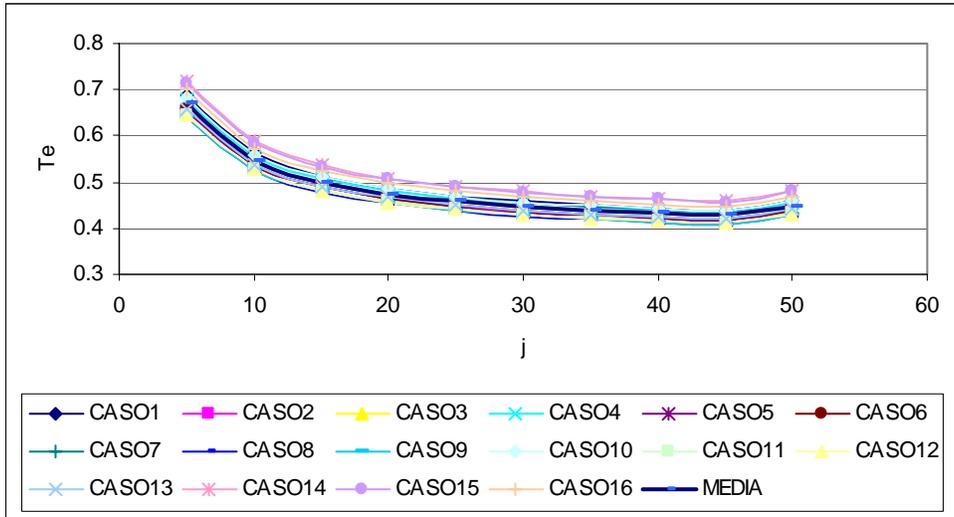
**Figura 4.10.1** Estructura vigas banda de 1 pisos  $i=25$



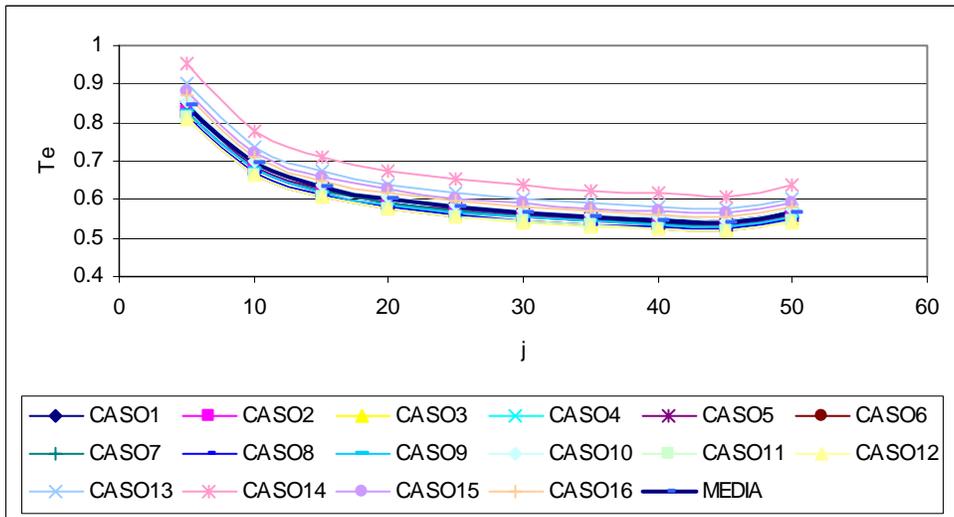
**Figura 4.10.2** Estructura vigas banda de 2 pisos  $i=25$



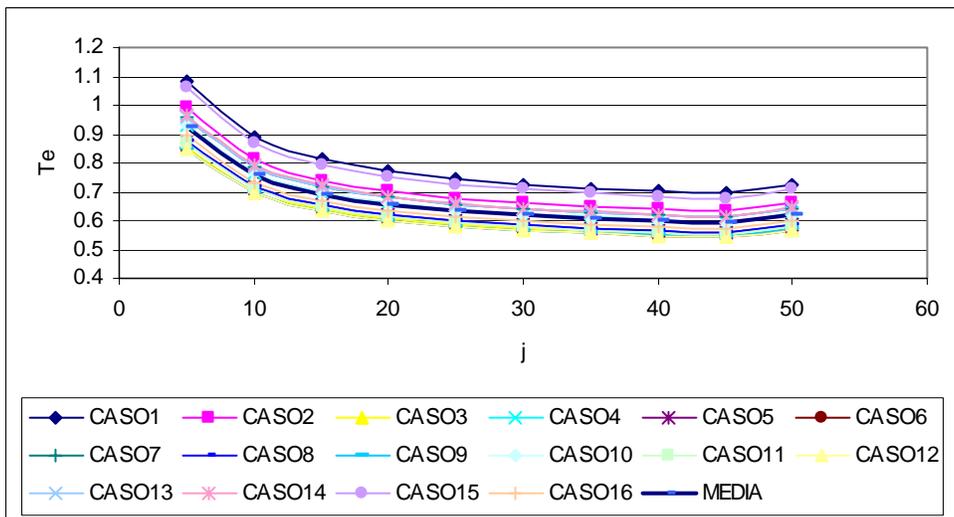
**Figura 4.10.3** Estructura vigas banda de 3 pisos  $i=25$



**Figura 4.10.4** Estructura vigas banda de 4 pisos  $i=25$

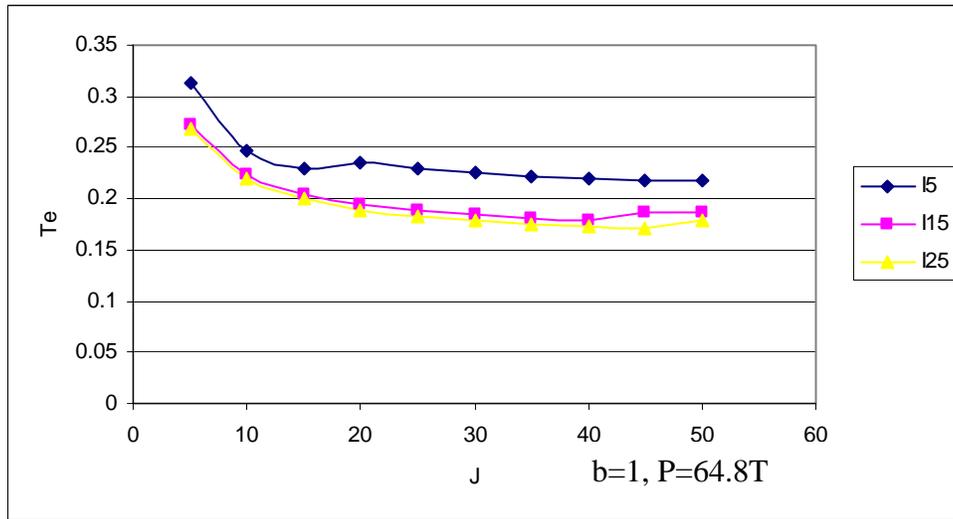


**Figura 4.10.5** Estructura vigas banda de 5 pisos  $i=25$

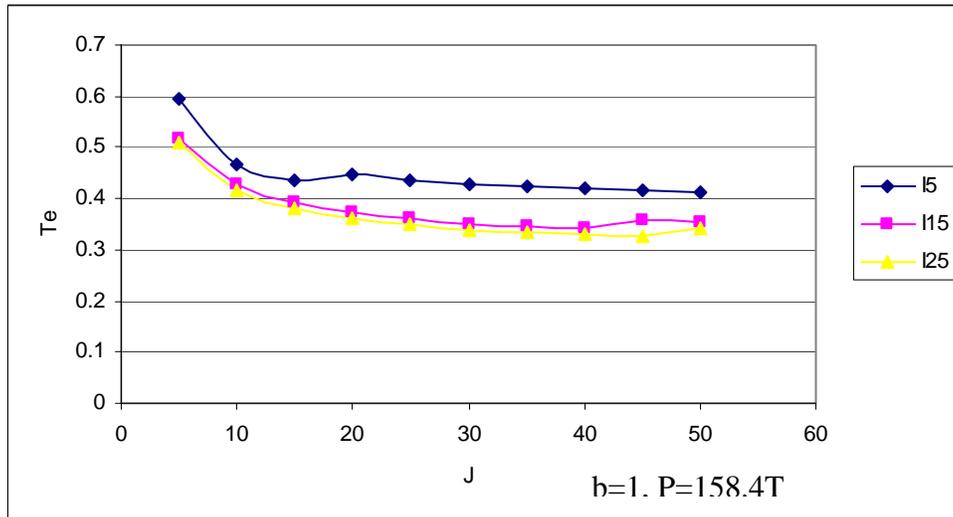


**Figura 4.10.6** Estructura vigas banda de 6 pisos  $i=25$

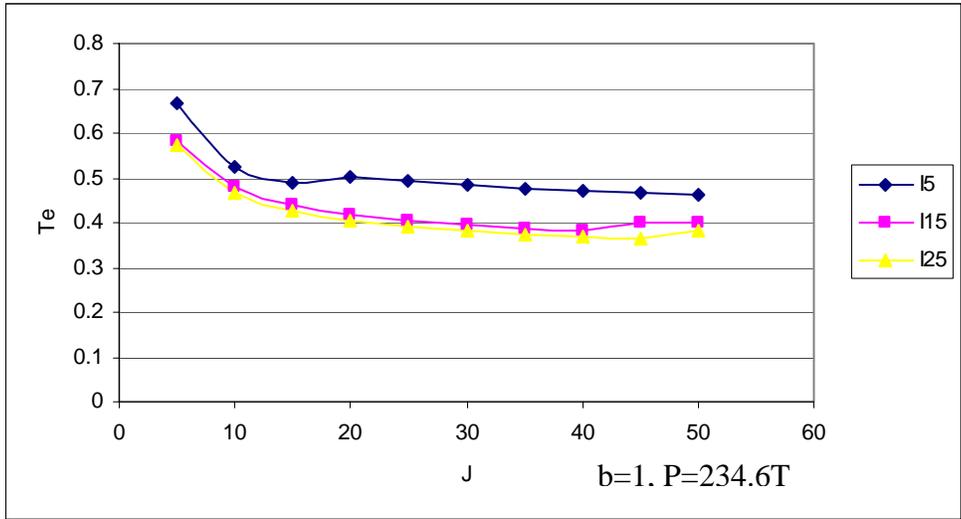
En las figuras 4.11 se describe la variación de la media del periodo elástico en estructuras con vigas banda de 1 a 6 pisos para rigideces rotacionales del suelo de  $i=5, 15$  y  $25$ .



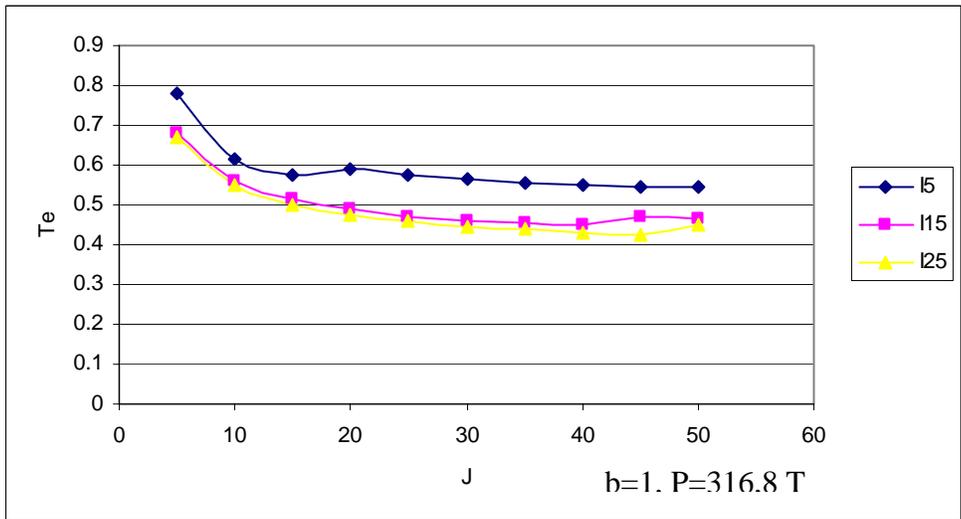
**Figura 4.11.1** Estructura vigas banda de 1 piso



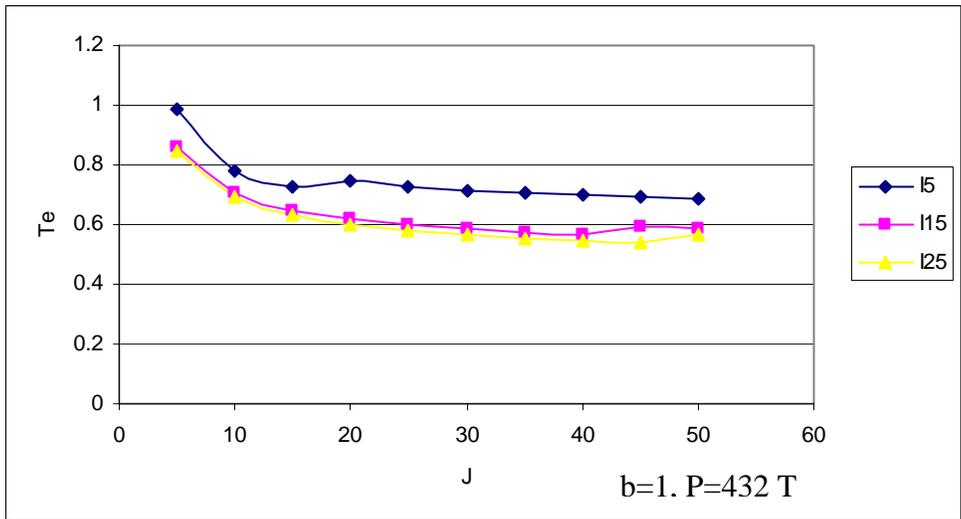
**Figura 4.11.2** Estructura vigas banda de 2 pisos



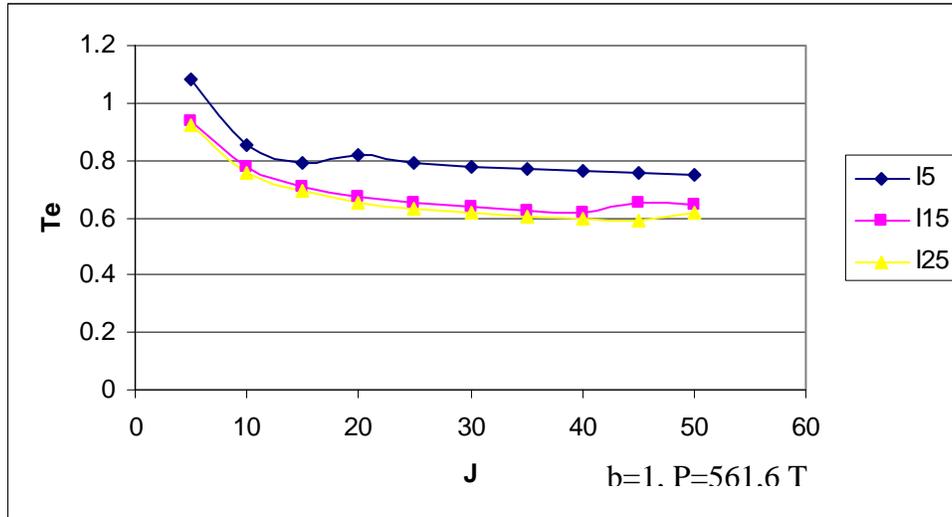
**Figura 4.11.3** Estructura vigas banda de 3 pisos



**Figura 4.11.4** Estructura vigas banda de 4 pisos



**Figura 4.11.5** Estructura vigas banda de 5 pisos

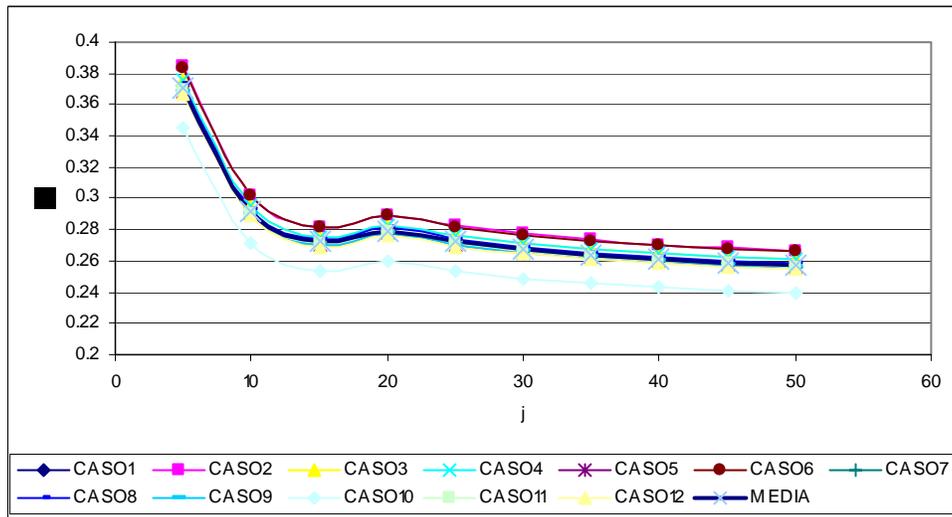


**Figura 4.11.6** Estructura vigas banda de 6 pisos

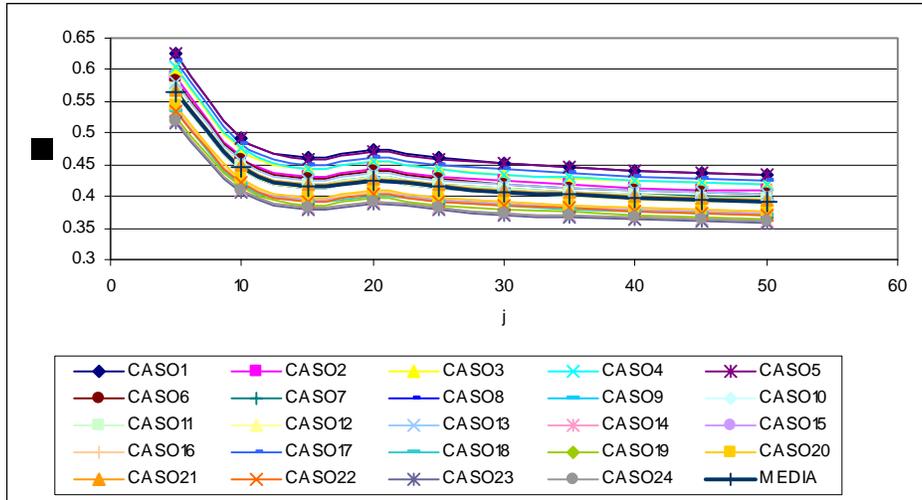
#### 4.2.2 Estructura con vigas descolgadas

Se analizan las estructuras con vigas descolgadas de 2 vanos en X por 2 vanos en Y, cuyas características fueron descritas en el capítulo II de esta tesis.

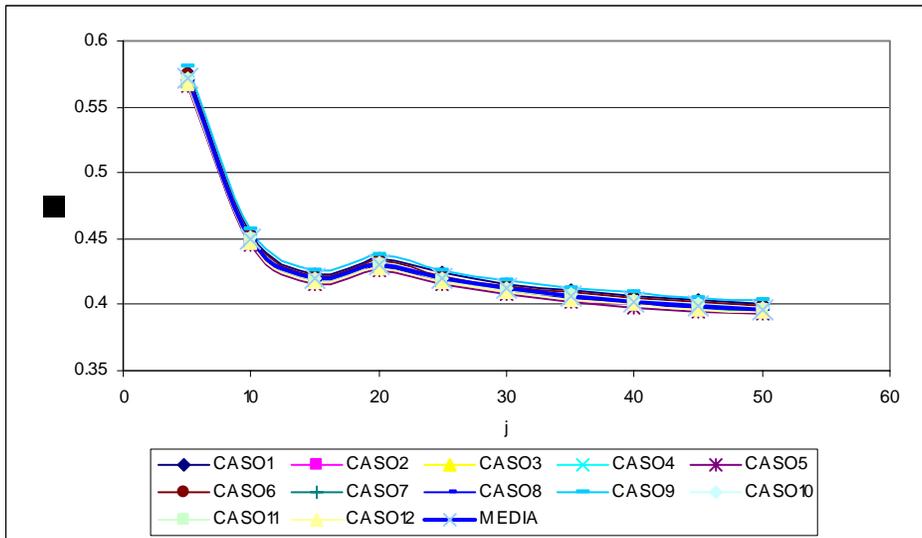
En la figura 4.12, para todos los casos analizados, se muestra la variación del periodo elástico en función de la rigidez traslacional del suelo para  $i=5$ .



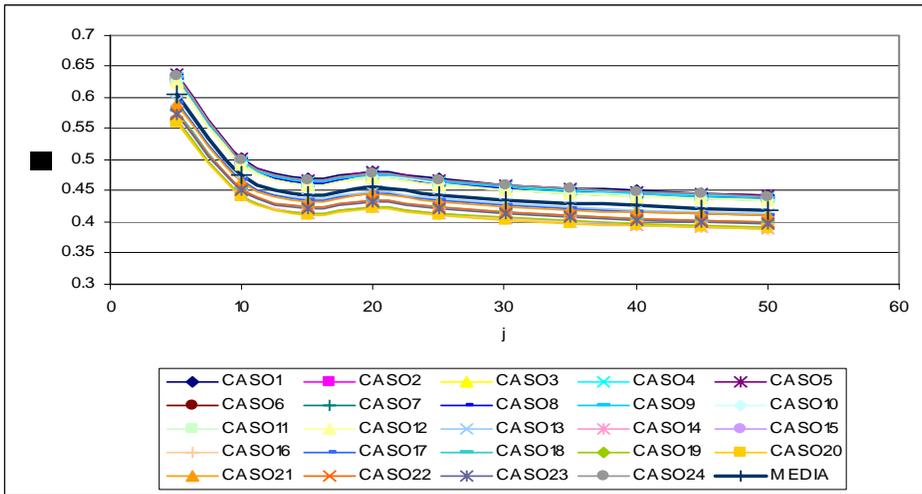
**Figura 4.12.1** Estructura vigas descolgadas 1 piso.  $i=5$



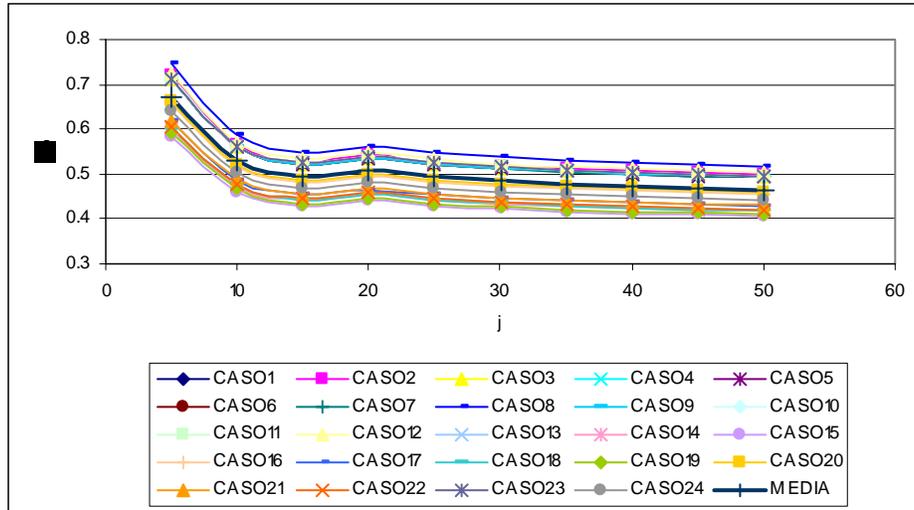
**Figura 4.12.2** Estructura vigas descolgadas 2 pisos.  $i=5$



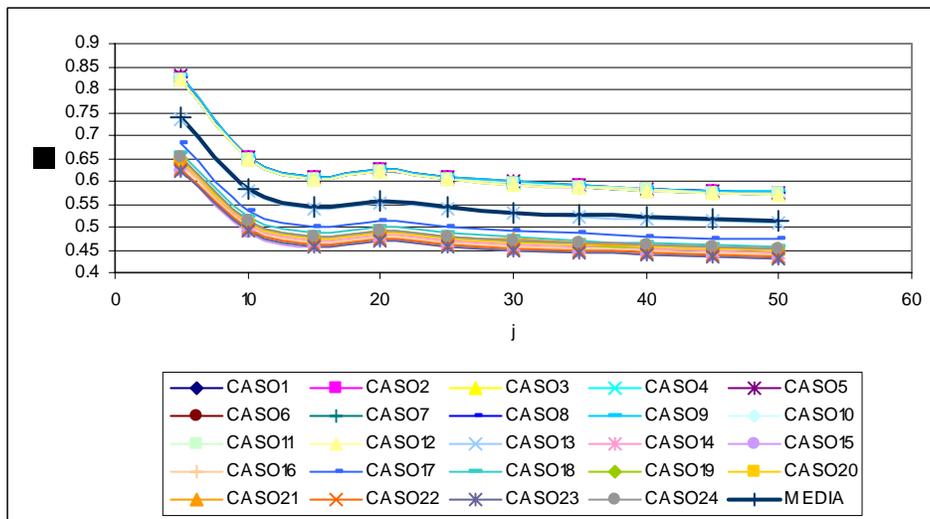
**Figura 4.12.3** Estructura vigas descolgadas 3 pisos.  $i=5$



**Figura 4.12.4** Estructura vigas descolgadas 4 pisos.  $i=5$



**Figura 4.12.5** Estructura vigas descolgadas 5 pisos.  $i=5$



**Figura 4.12.6** Estructura vigas descolgadas 6 pisos.  $i=5$

En la figura 4.13, para todos los casos analizados, se muestra la variación del periodo elástico en función de la rigidez traslacional del suelo para  $i=15$ .

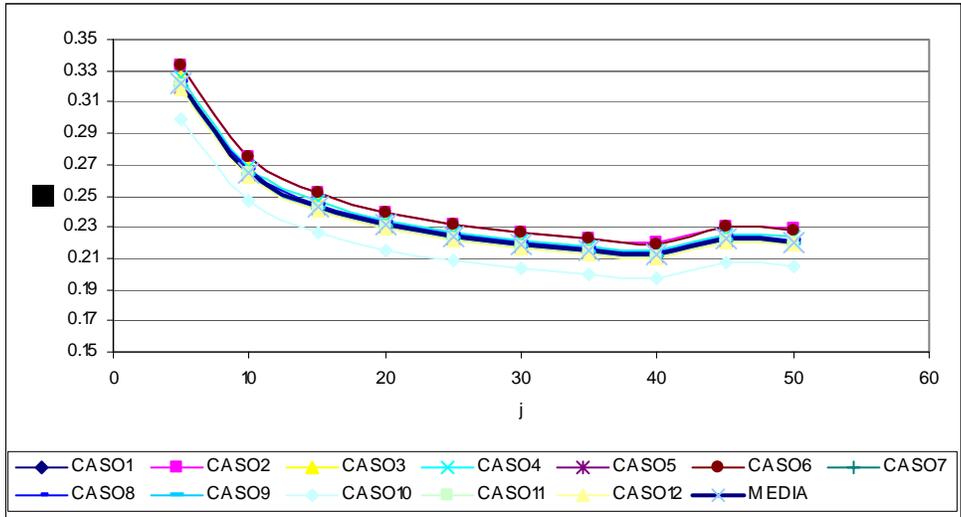


Figura 4.13.1 Estructura vigas descolgadas 1 piso.  $i=15$

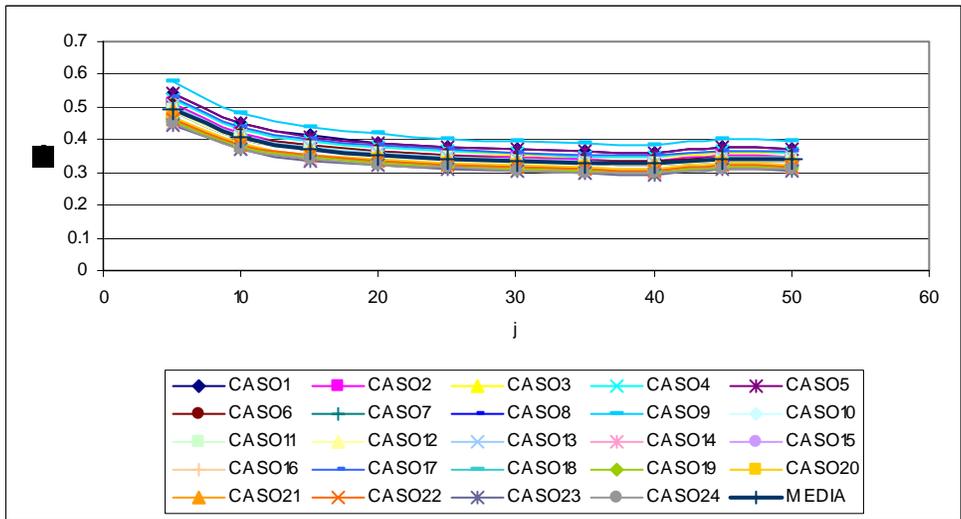


Figura 4.13.2 Estructura vigas descolgadas 2 pisos.  $i=15$

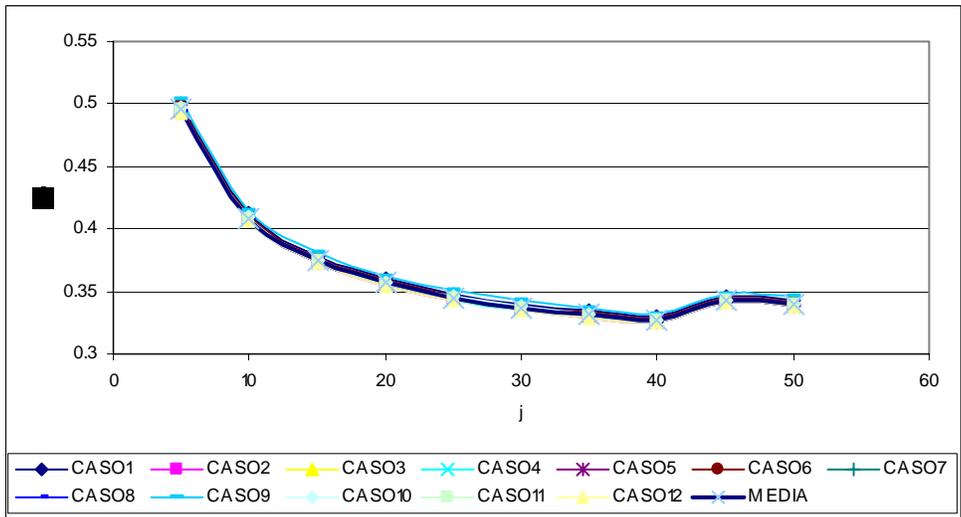


Figura 4.13.3 Estructura vigas descolgadas 3 pisos.  $i=15$

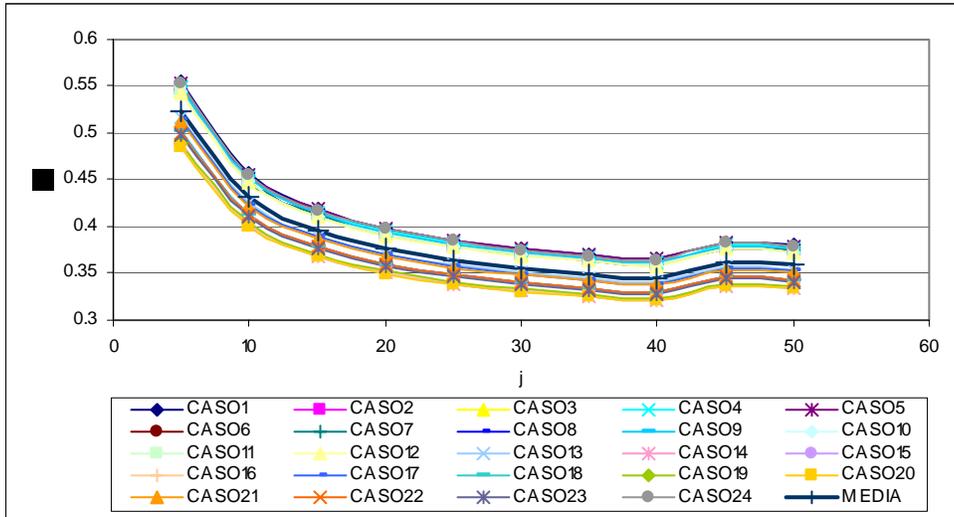


Figura 4.13.4 Estructura vigas descolgadas 4 pisos.  $i=15$

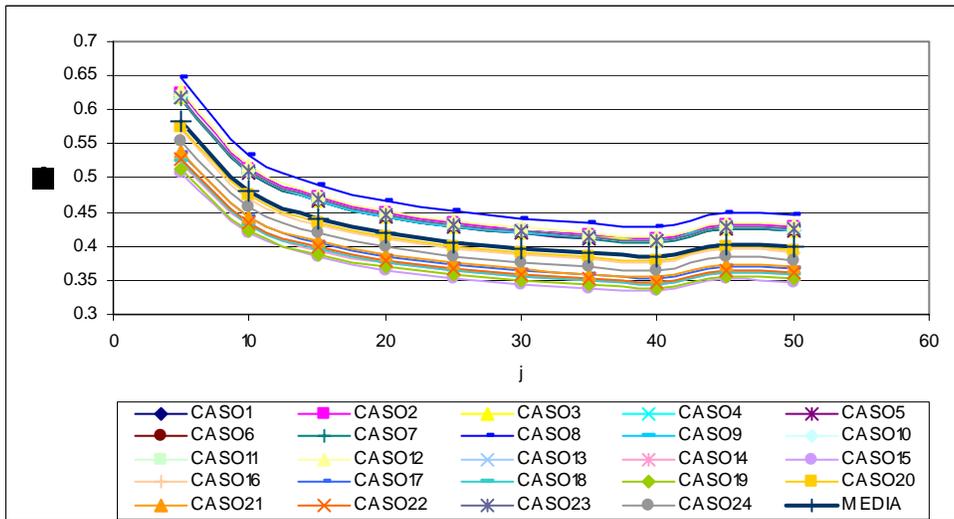


Figura 4.13.5 Estructura vigas descolgadas 5 pisos.  $i=15$

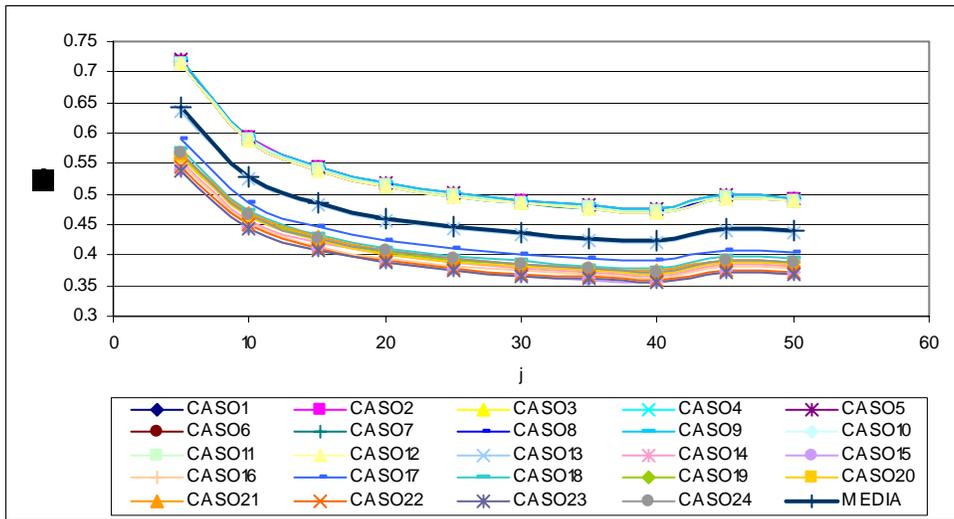
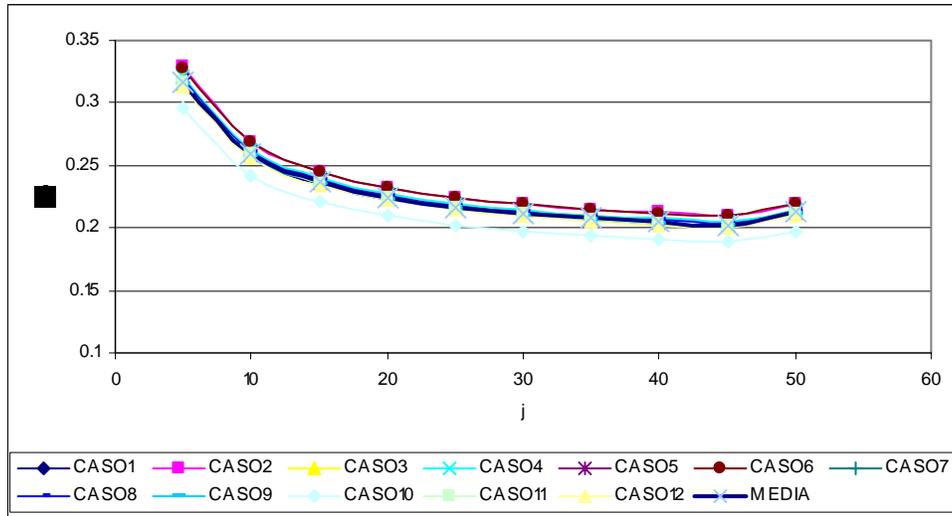
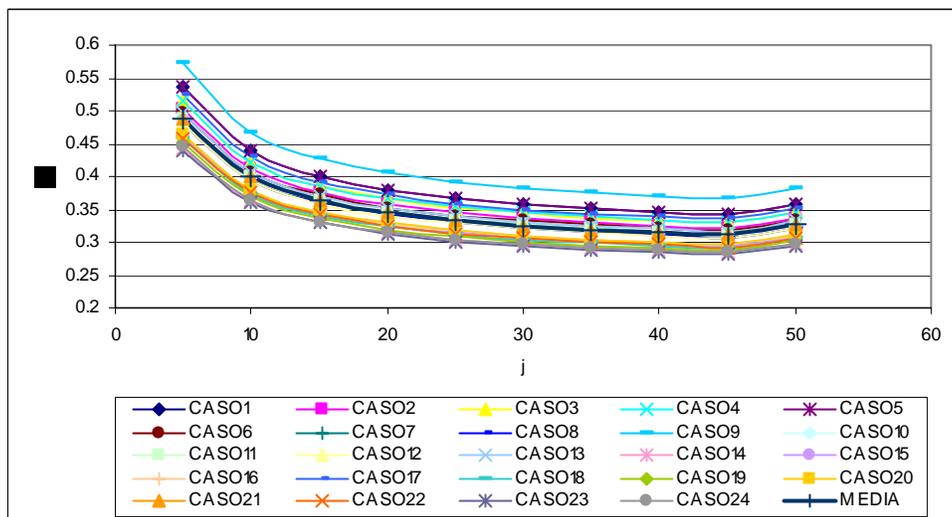


Figura 4.13.6 Estructura vigas descolgadas 6 pisos.  $i=15$

En la figura 4.14, para todos los casos analizados, se muestra la variación del periodo elástico en función de la rigidez traslacional del suelo para  $i=25$ .



**Figura 4.14.1** Estructura vigas descolgadas 1 piso.  $i=25$



**Figura 4.14.2** Estructura vigas descolgadas 2 pisos.  $i=25$

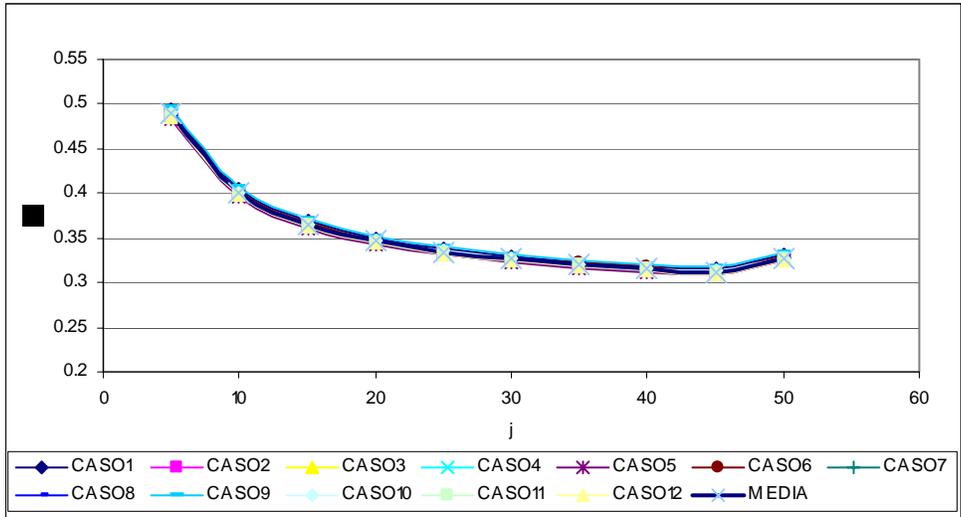


Figura 4.14.3 Estructura vigas descolgadas 3 pisos.  $i=25$

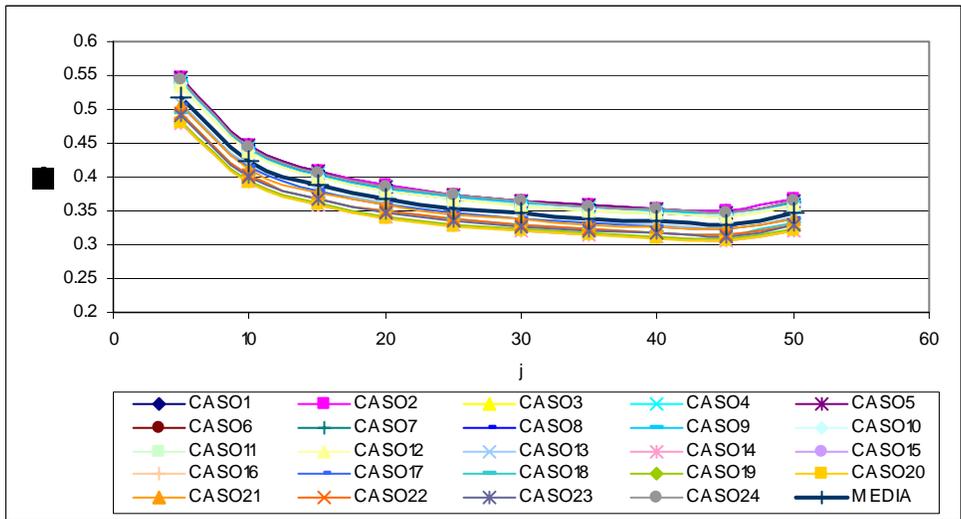


Figura 4.14.4 Estructura vigas descolgadas 4 pisos.  $i=25$

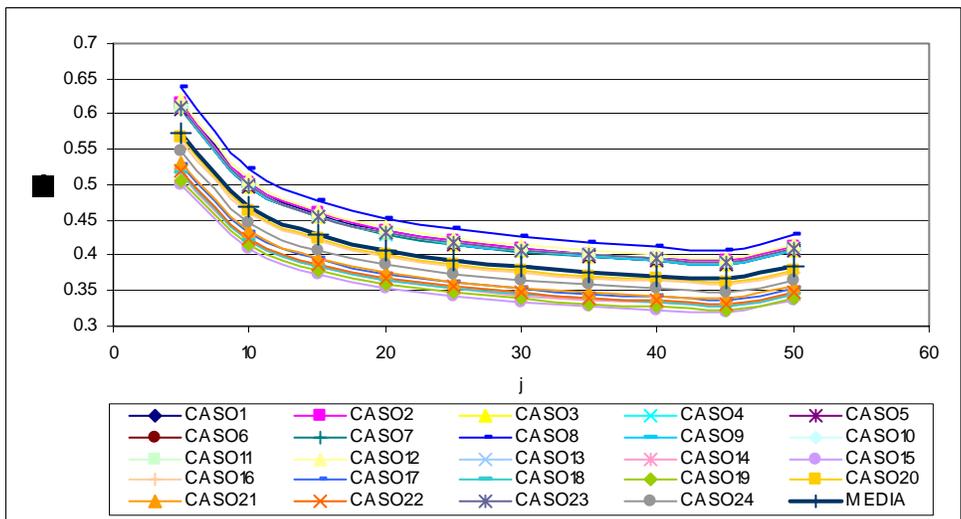
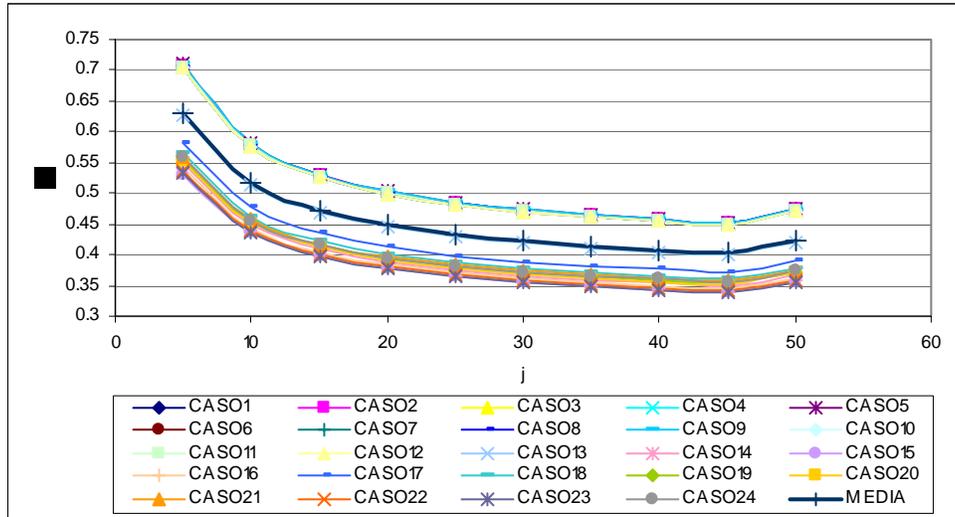
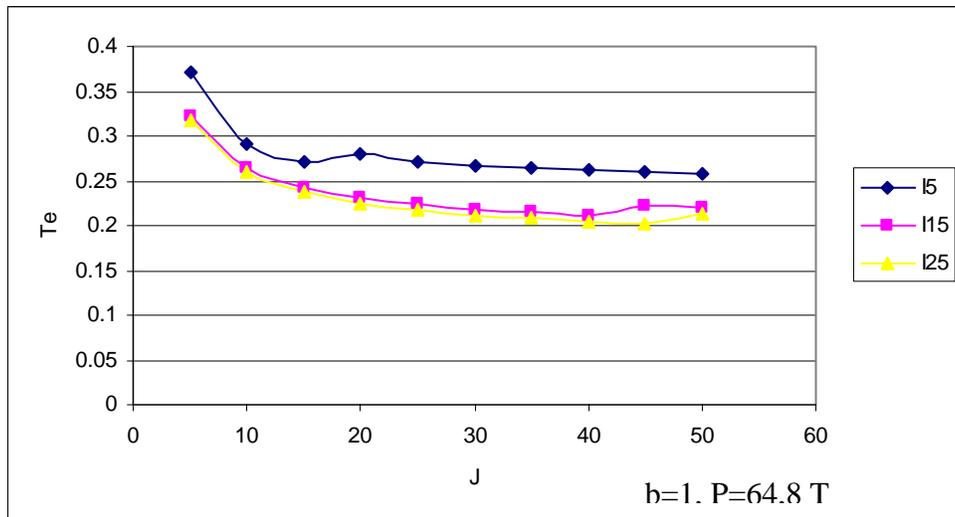


Figura 4.14.5 Estructura vigas descolgadas 5 pisos.  $i=25$

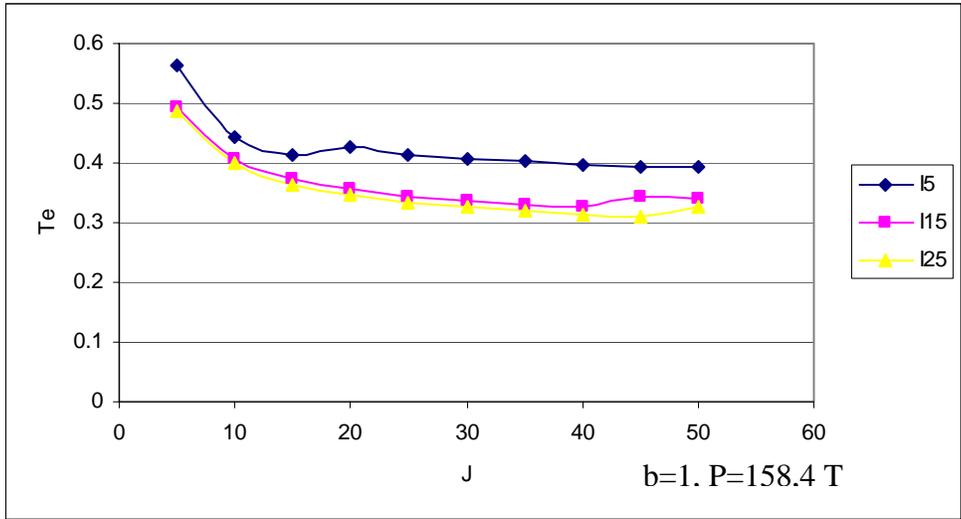


**Figura 4.14.6** Estructura vigas descolgadas 6 pisos.  $i=25$

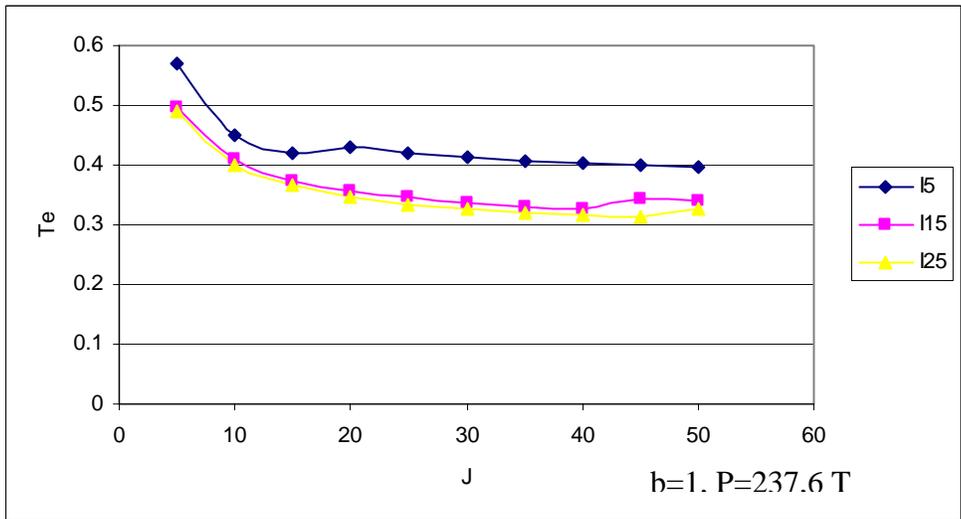
En las figuras 4.15 se compara la variación de la media del periodo elástico en estructuras con vigas descolgadas de 1 a 6 pisos para rigideces rotacionales de  $i= 5, 15$  y  $25$ .



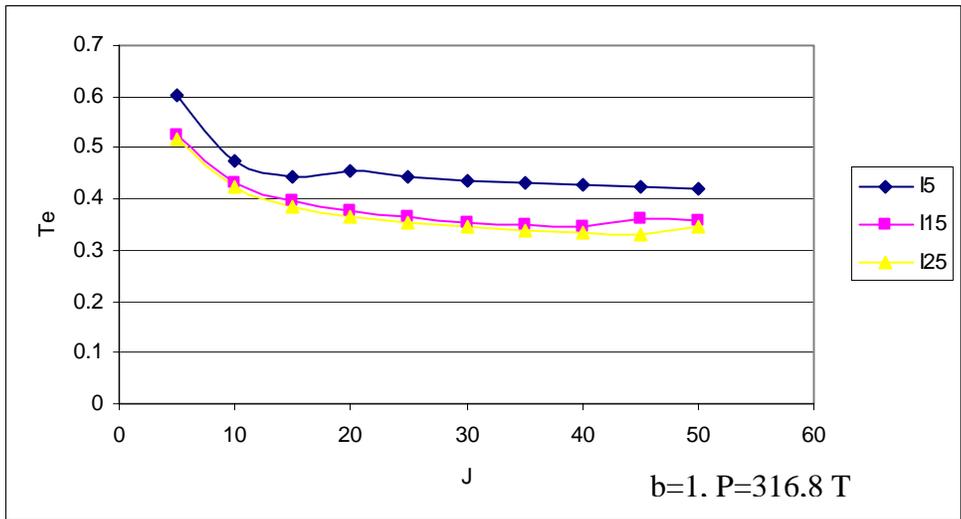
**Figura 4.15.1** Estructura vigas descolgadas 1 piso



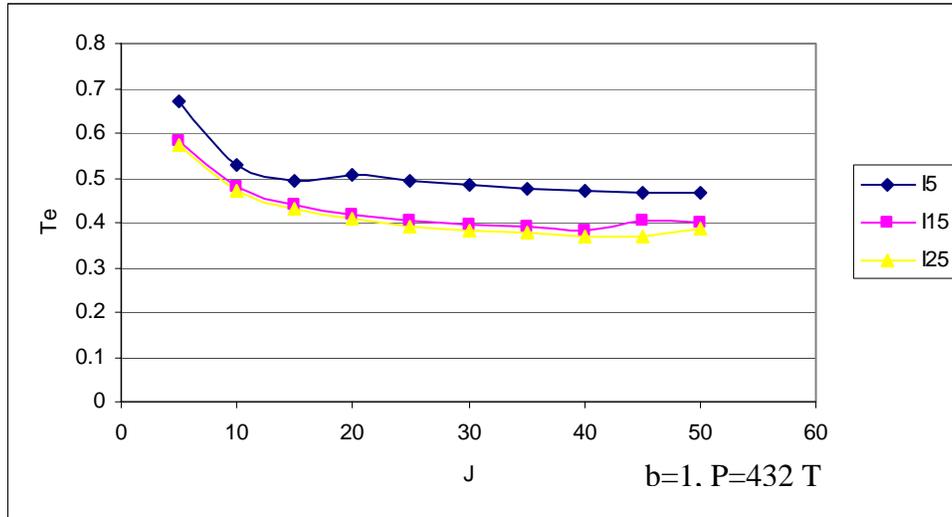
**Figura 4.15.2** Estructura vigas descolgadas 2 pisos



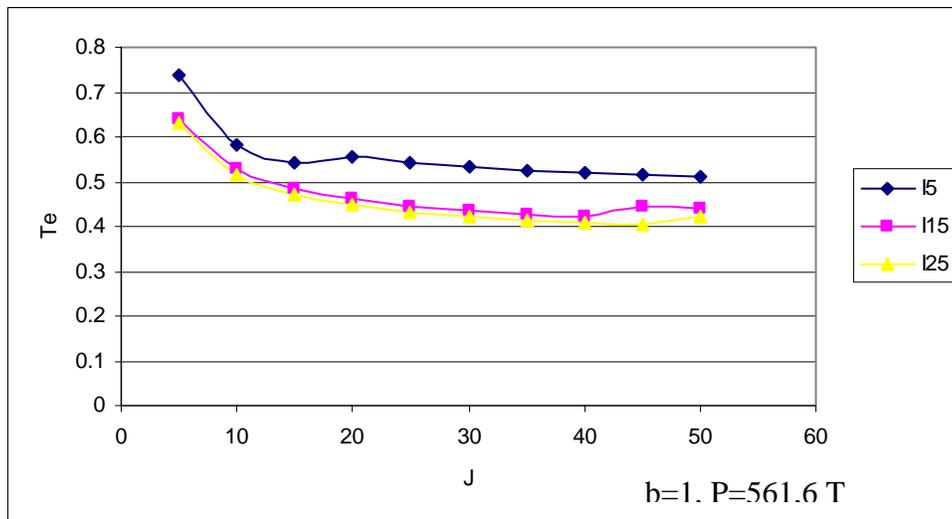
**Figura 4.15.3** Estructura vigas descolgadas 3 pisos



**Figura 4.15.4** Estructura vigas descolgadas 4 pisos



**Figura 4.15.5** Estructura vigas descolgadas 5 pisos



**Figura 4.15.6** Estructura vigas descolgadas 6 pisos

### 4.3 VARIACIÓN DEL PERIODO PLÁSTICO

A continuación se muestra la variación del periodo plástico para las estructuras con vigas banda y vigas descolgadas, cuyos resultados fueron obtenidos del programa PUSHUELO, Aguiar (2005).

### 4.3.1 Estructura con vigas banda

A continuación en la figura 4.16 se muestra de la estructura con vigas banda, para  $i=5$ , la variación del periodo plástico en función de la rigidez traslacional del suelo, de los casos analizados, para cada piso y la media de los resultados.

Todas las estructuras han sido analizadas para un  $\beta=1$  y la carga axial P mostrada en la tabla 4.1.

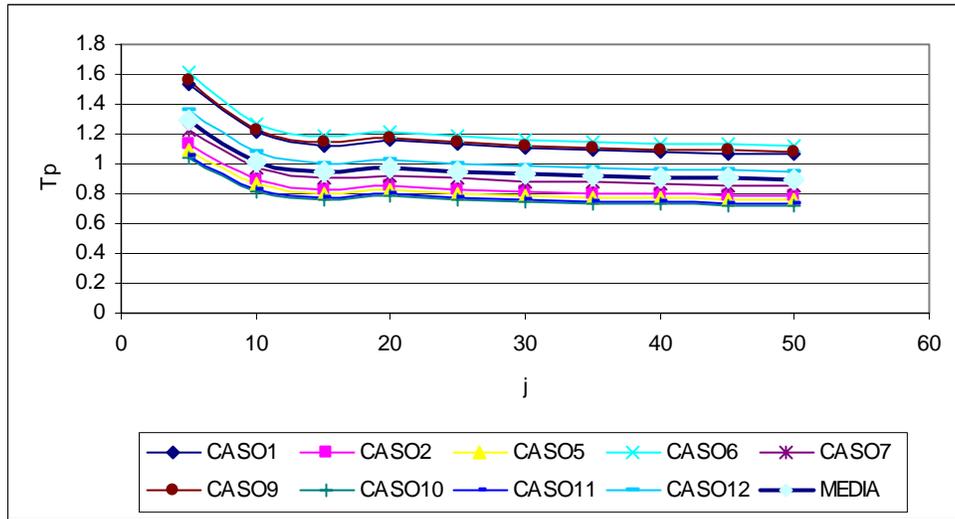


Figura 4.16.1 Estructura vigas banda 1 piso.  $i=5$

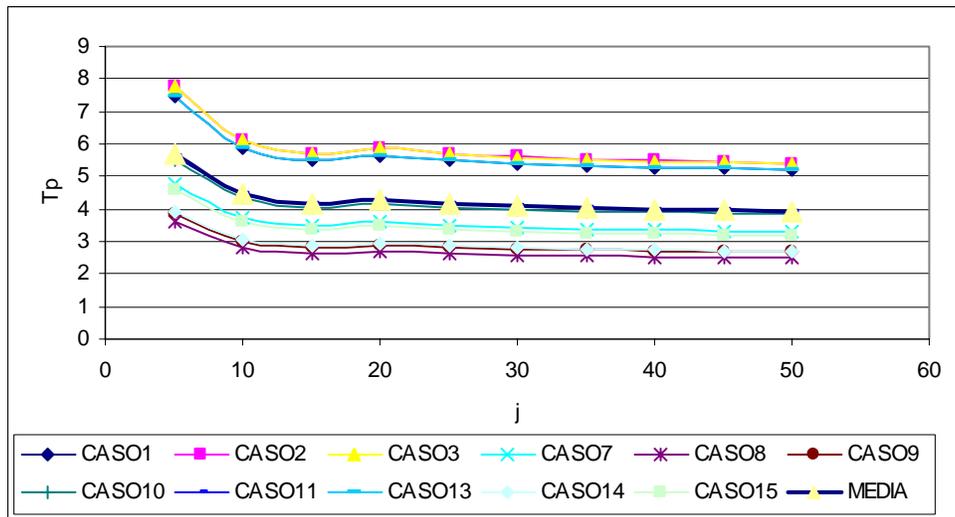


Figura 4.16.2 Estructura vigas banda 2 pisos.  $i=5$

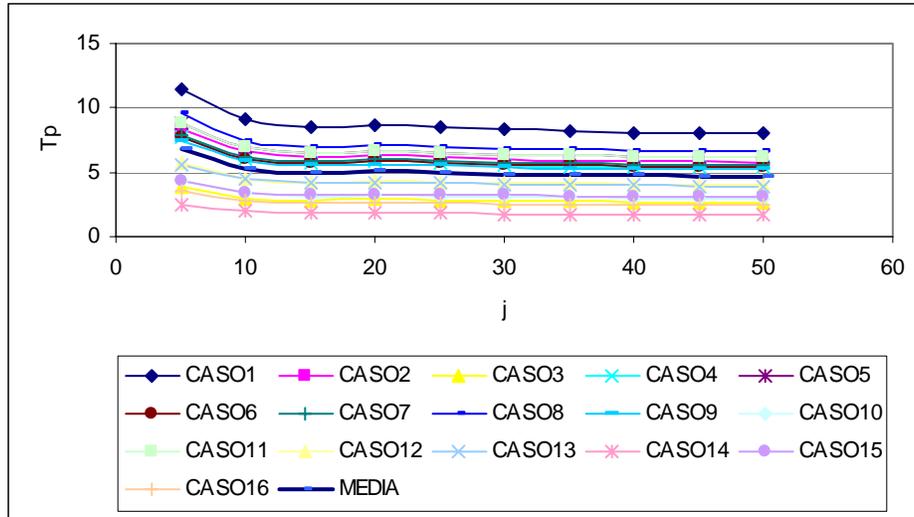


Figura 4.16.3 Estructura vigas banda 3 pisos.  $i=5$

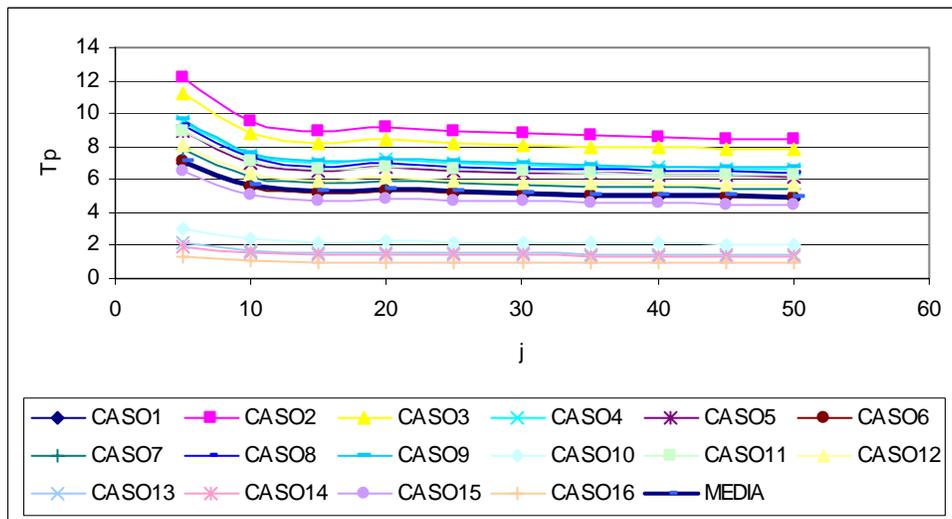


Figura 4.16.4 Estructura vigas banda 4 pisos.  $i=5$

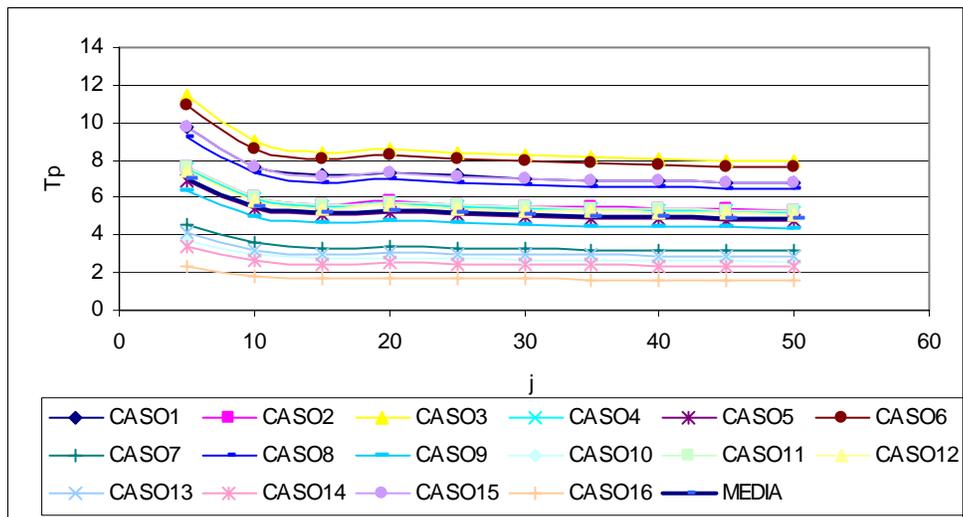
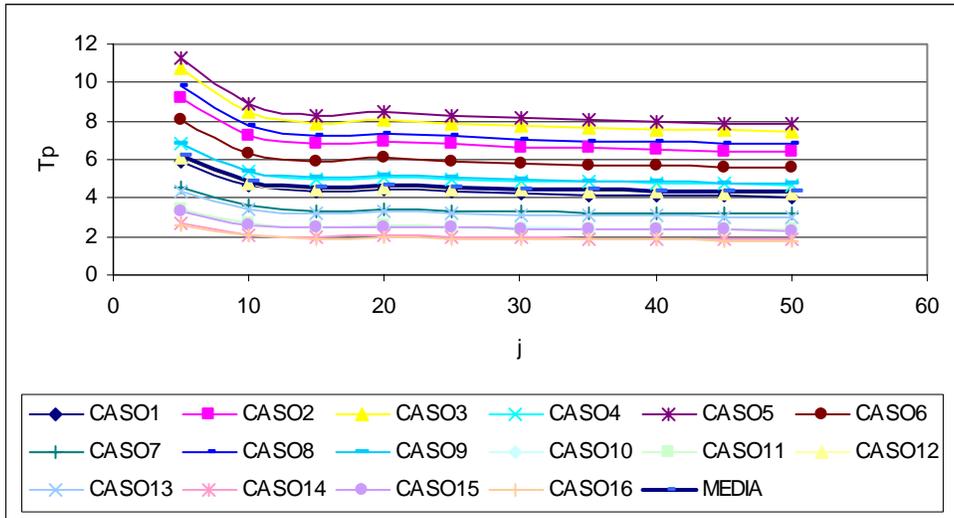
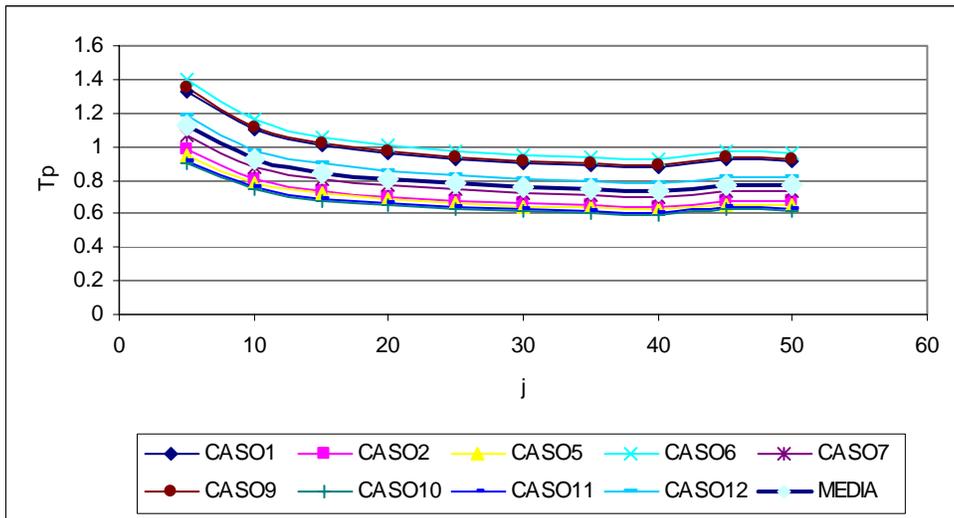


Figura 4.16.5 Estructura vigas banda 5 pisos.  $i=5$

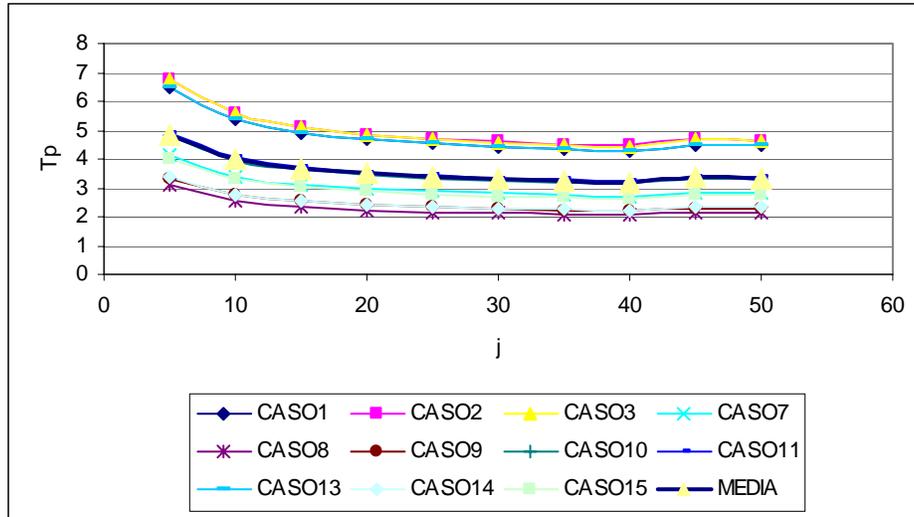


**Figura 4.16.6** Estructura vigas banda 6 pisos.  $i=5$

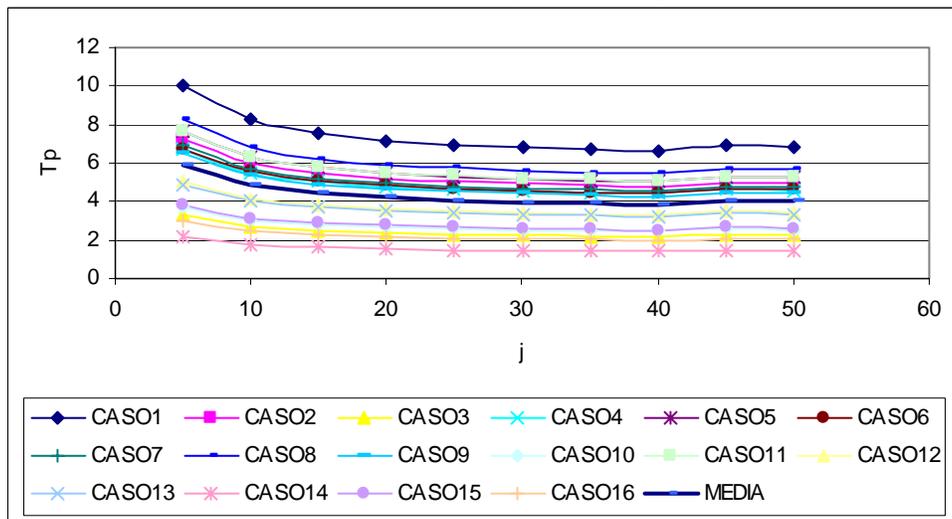
En la figura 4.17 se muestra, la variación del periodo plástico de todos los casos de las estructura con vigas banda, para  $i=15$  en función de la rigidez traslacional del suelo.



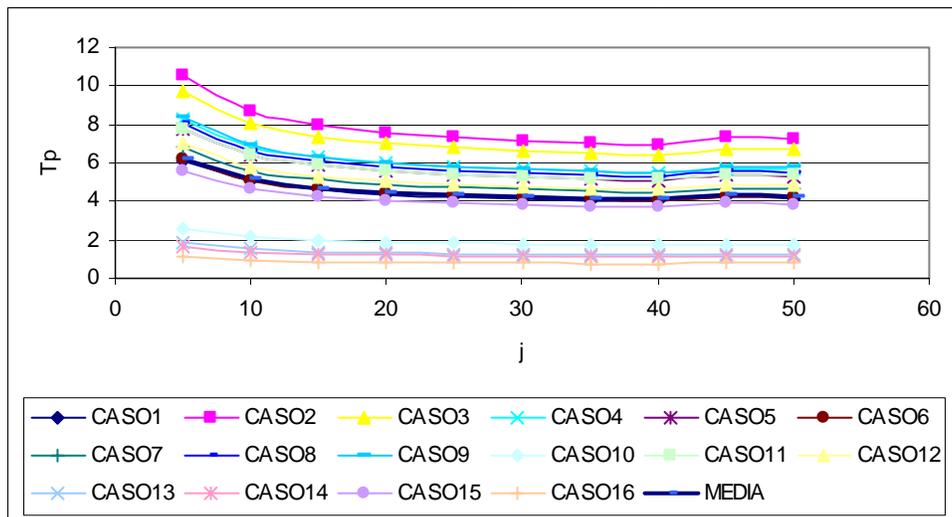
**Figura 4.17.1** Estructura vigas banda 1 piso.  $i=15$



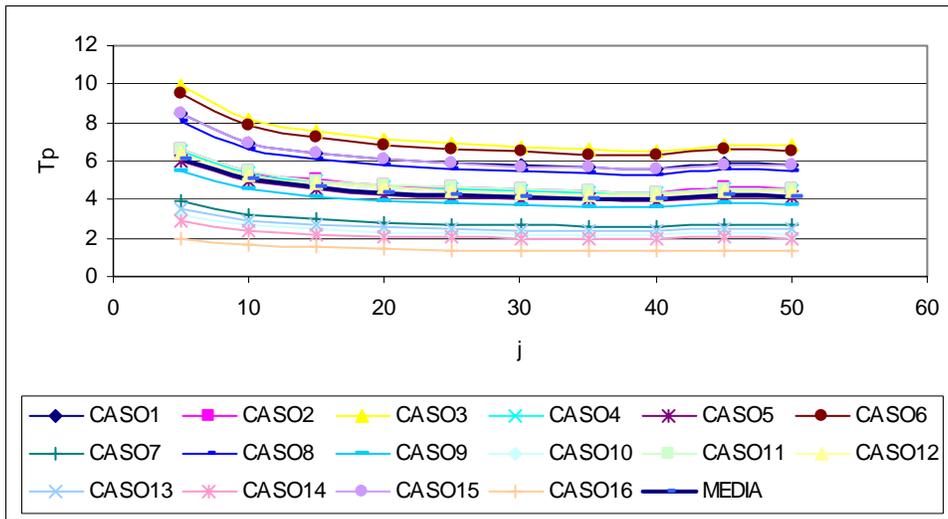
**Figura 4.17.2** Estructura vigas banda 2 pisos.  $i=15$



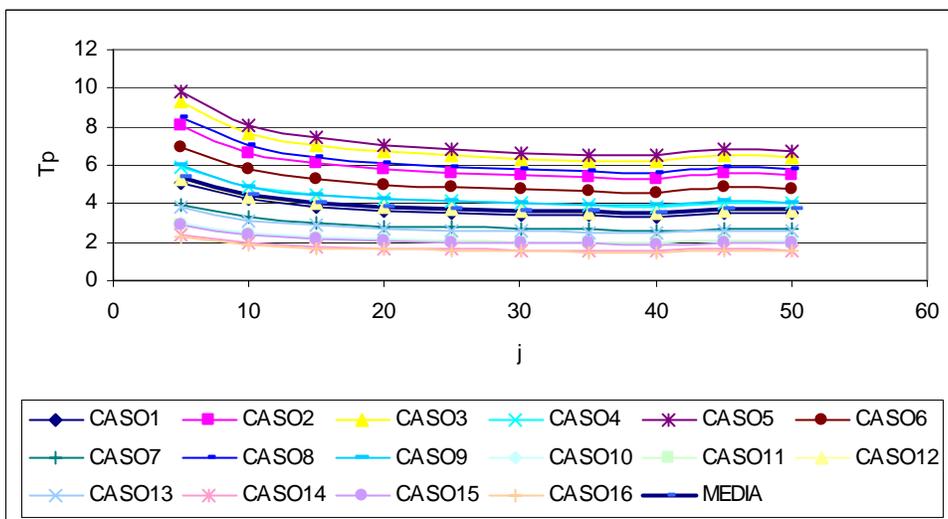
**Figura 4.17.3** Estructura vigas banda 3 pisos.  $i=15$



**Figura 4.17.4** Estructura vigas banda 4 pisos.  $i=15$



**Figura 4.17.5** Estructura vigas banda 5 pisos.  $i=15$



**Figura 4.17.6** Estructura vigas banda 6 pisos.  $i=15$

En la figura 4.18 se muestra, la variación del periodo plástico de todos los casos de las estructura con vigas banda, para  $i=25$  en función de la rigidez traslacional del suelo.

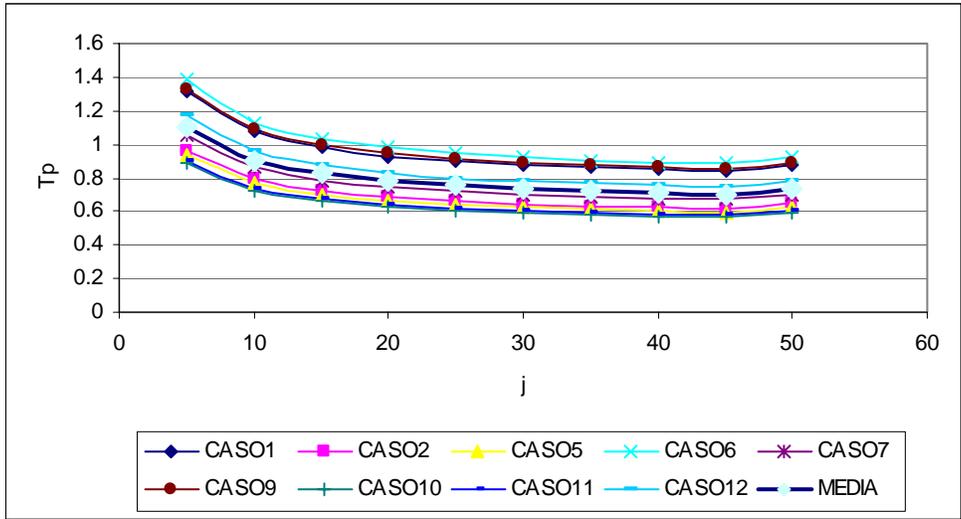


Figura 4.18.1 Estructura vigas banda 1 piso.  $i=25$

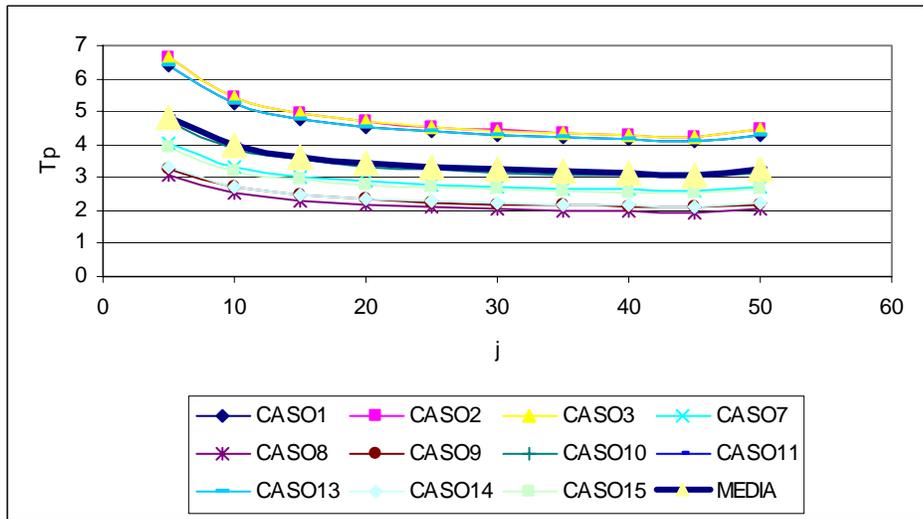


Figura 4.18.2 Estructura vigas banda 2 pisos.  $i=25$

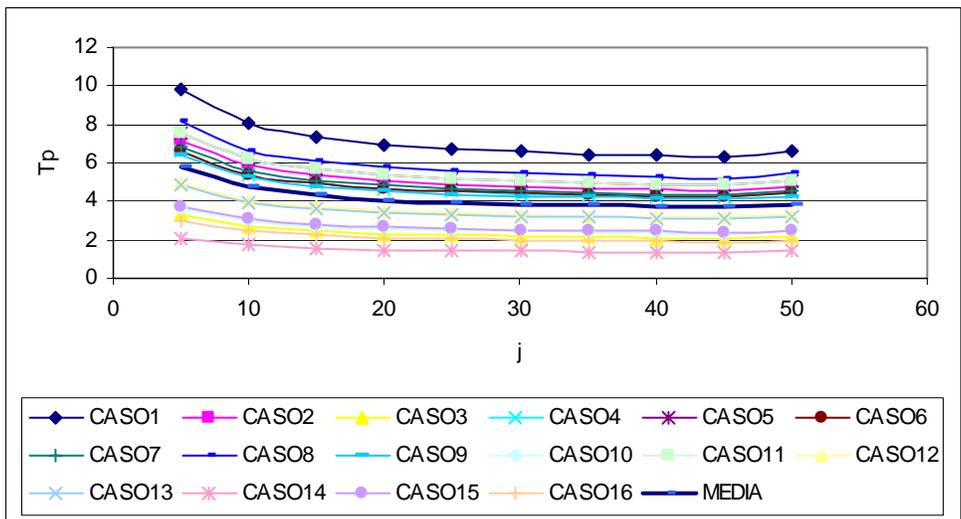
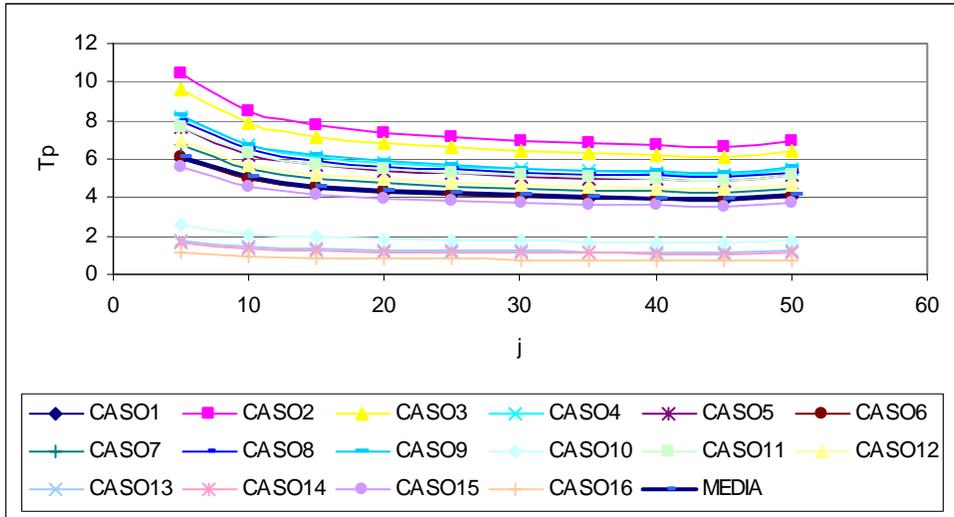
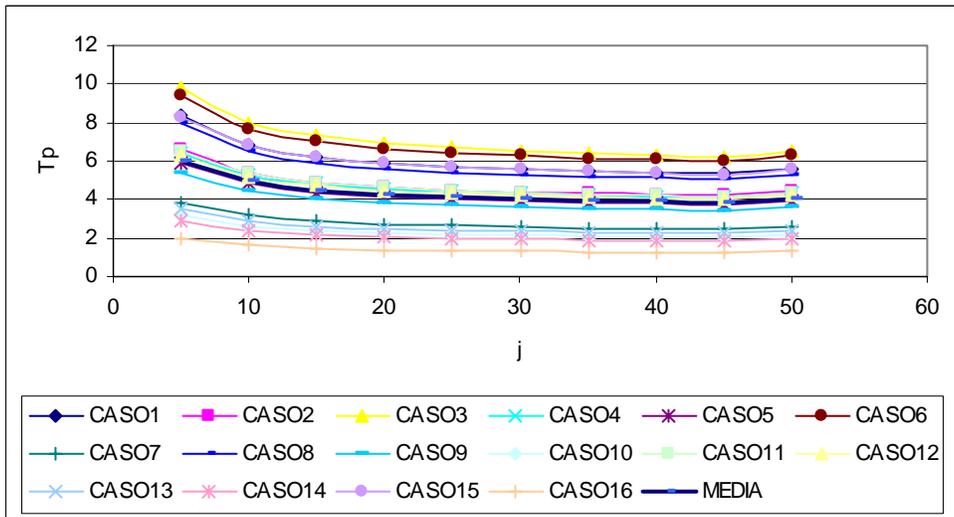


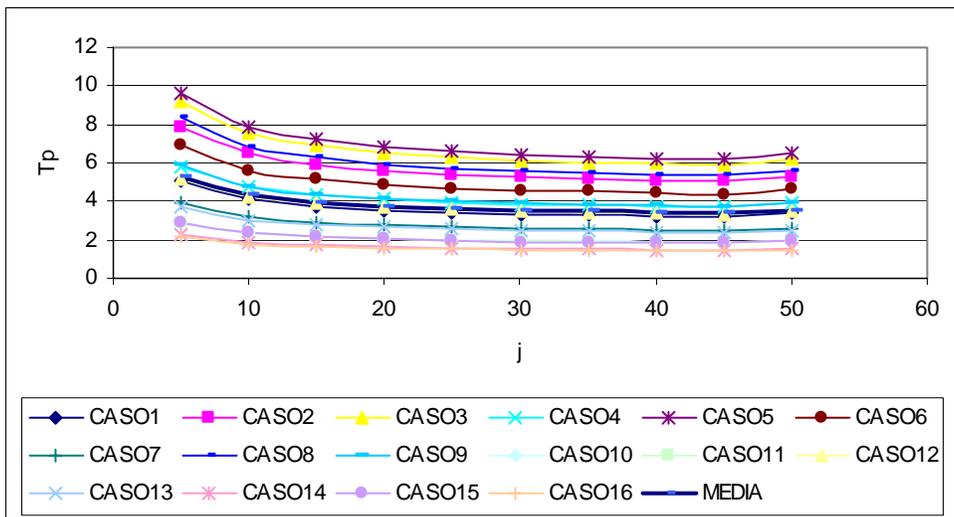
Figura 4.18.3 Estructura vigas banda 3 pisos.  $i=25$



**Figura 4.18.4** Estructura vigas banda 4 pisos.  $i=25$

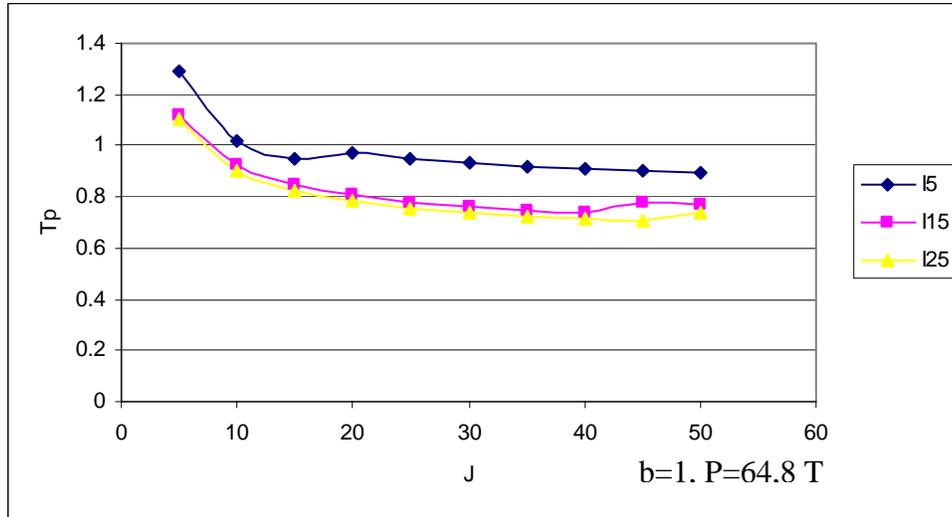


**Figura 4.18.5** Estructura vigas banda 5 pisos.  $i=25$

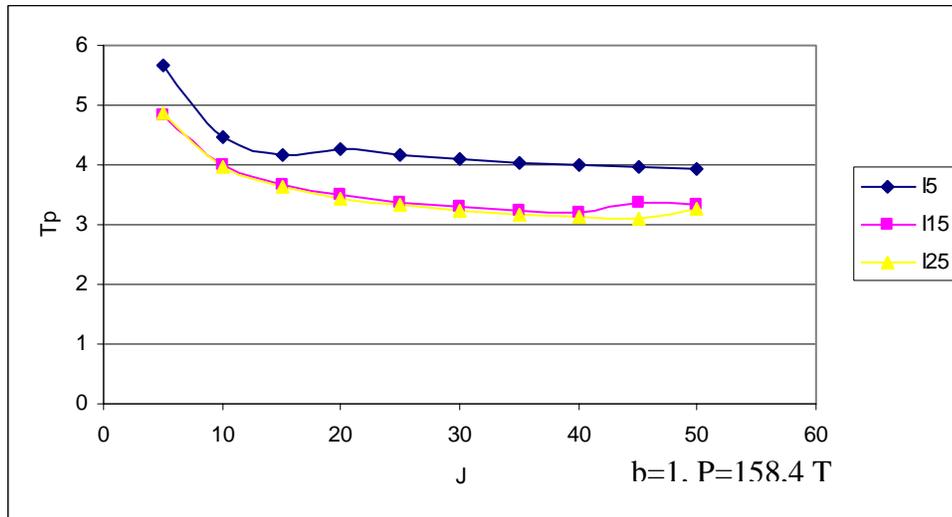


**Figura 4.18.6** Estructura vigas banda 6 pisos.  $i=25$

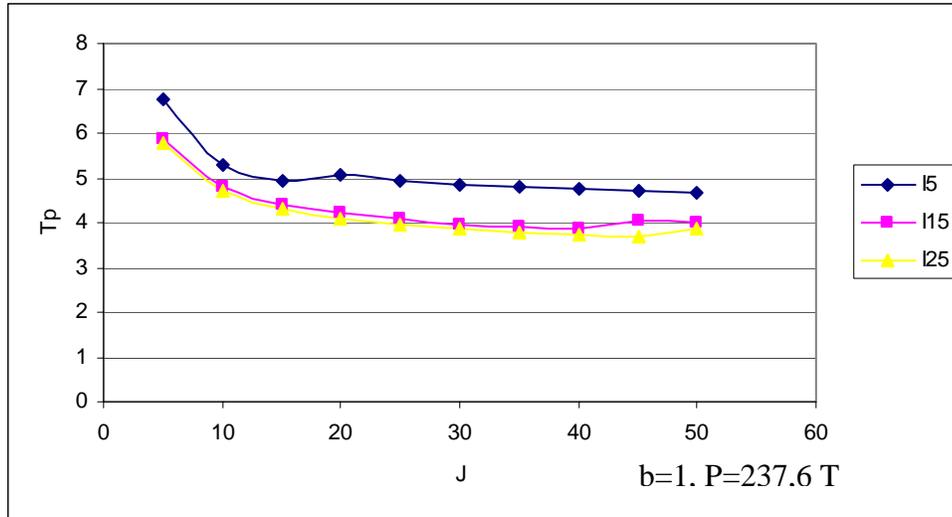
En las figuras 4.19 se describe la variación de la media del periodo plástico en estructuras con vigas banda de 1 a 6 pisos para  $i= 5, 15$  y  $25$ .



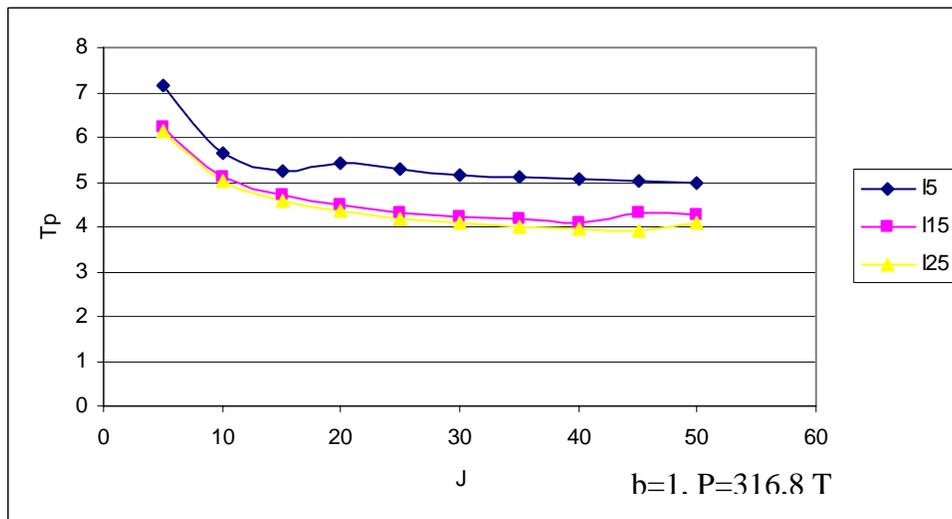
**Figura 4.19.1** Estructura vigas banda 1 piso



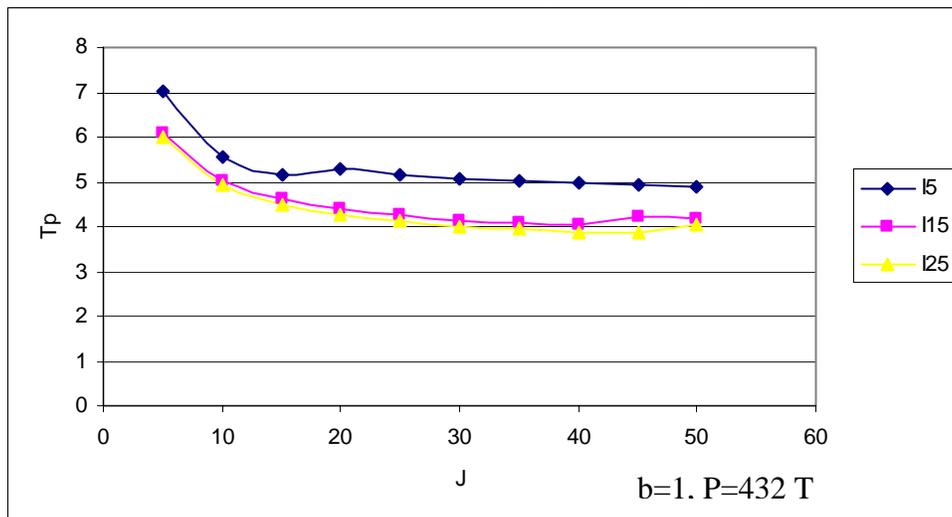
**Figura 4.19.2** Estructura vigas banda 2 pisos



**Figura 4.19.3** Estructura vigas banda 3 pisos



**Figura 4.19.4** Estructura vigas banda 4 pisos



**Figura 4.19.5** Estructura vigas banda 5 pisos

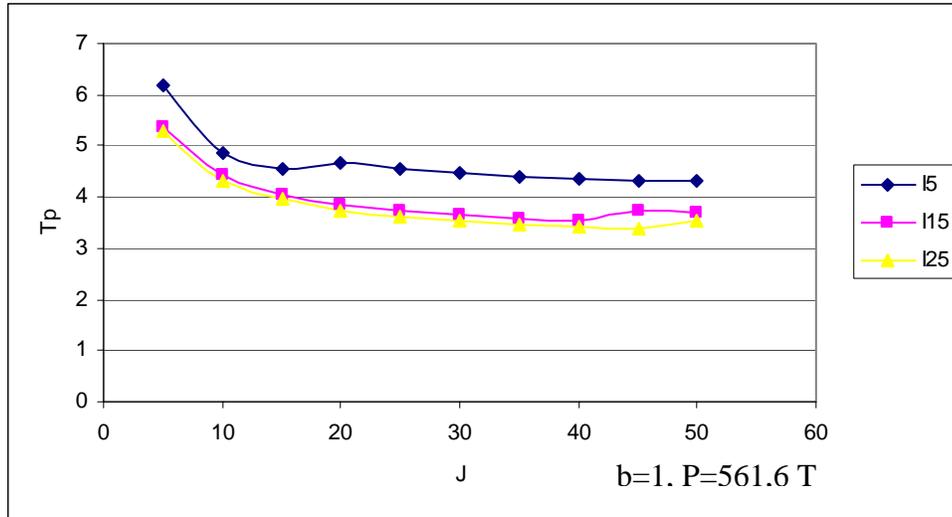


Figura 4.19.6 Estructura vigas banda 6 pisos

### 4.3.2 Estructura con vigas descolgadas

De las estructuras con vigas descolgadas, en la figura 4.20 se muestra para todos los casos analizados la variación del periodo plástico en función de la rigidez traslacional del suelo para  $i=5$ , y la media de los resultados.

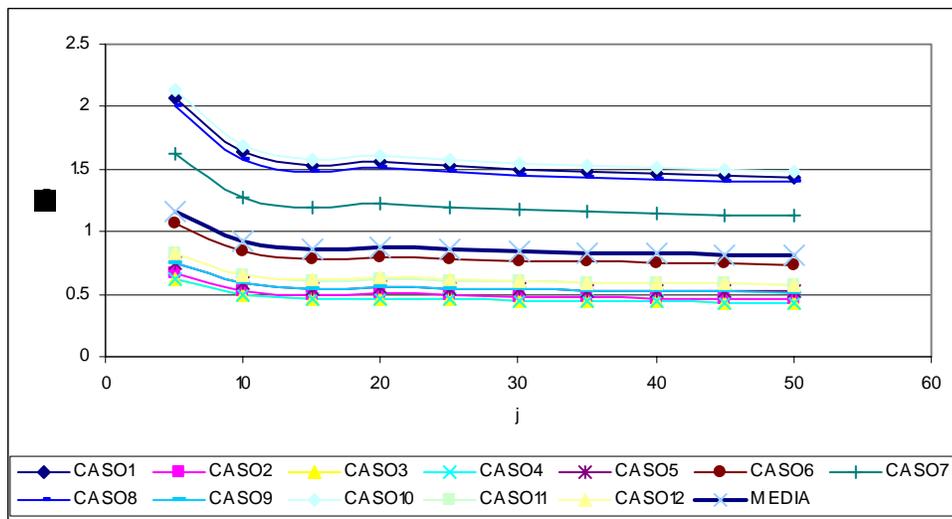


Figura 4.20.1 Estructura vigas descolgadas 1 piso.  $i=5$

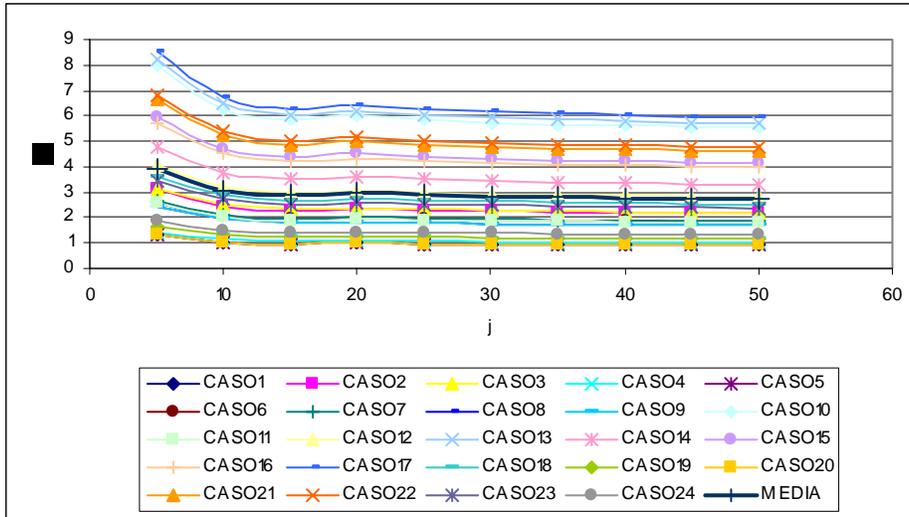


Figura 4.20.2 Estructura vigas descolgadas 2 pisos.  $i=5$

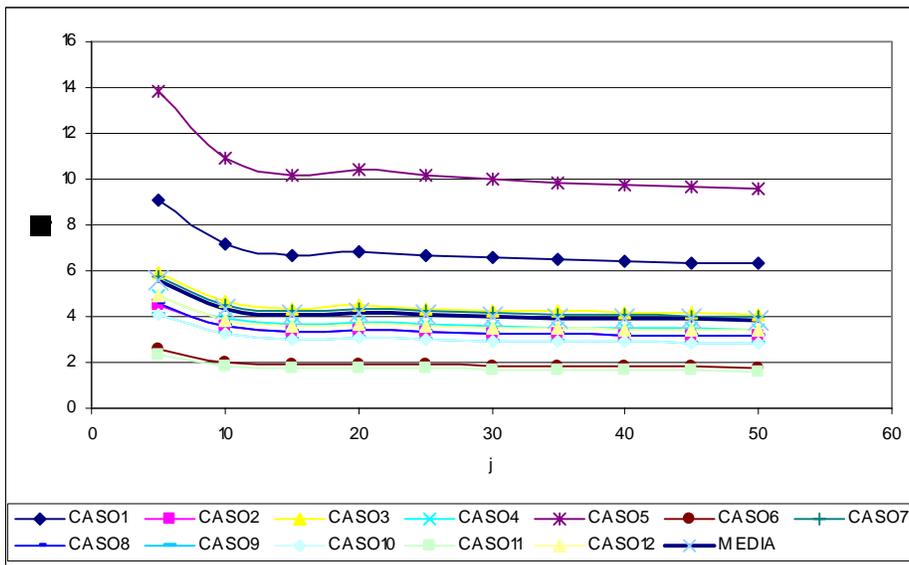


Figura 4.20.3 Estructura vigas descolgadas 3 pisos.  $i=5$

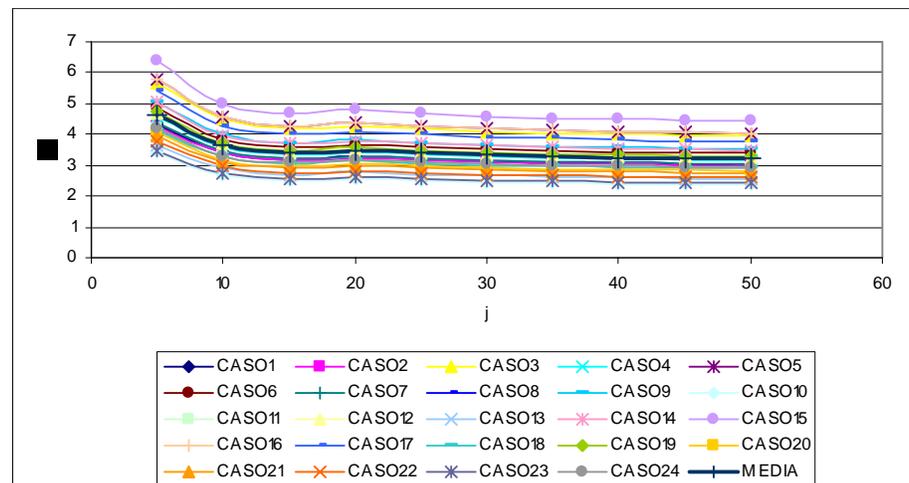
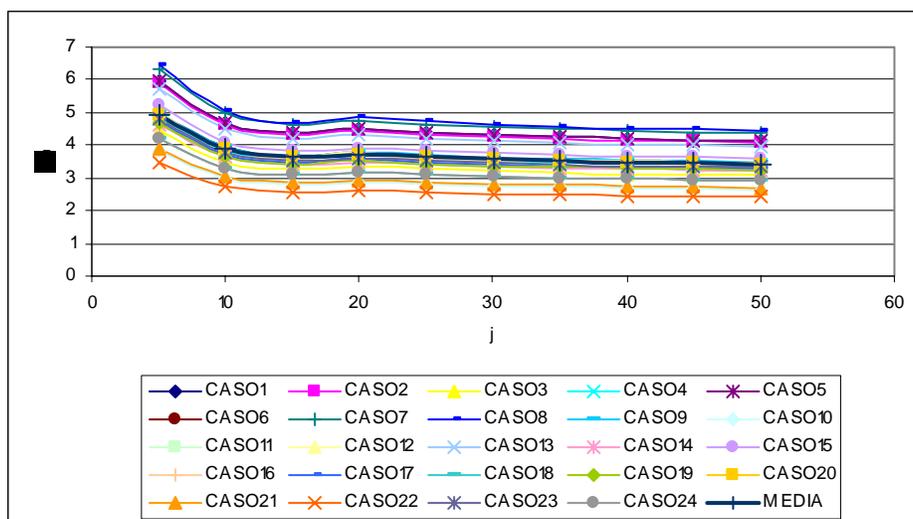
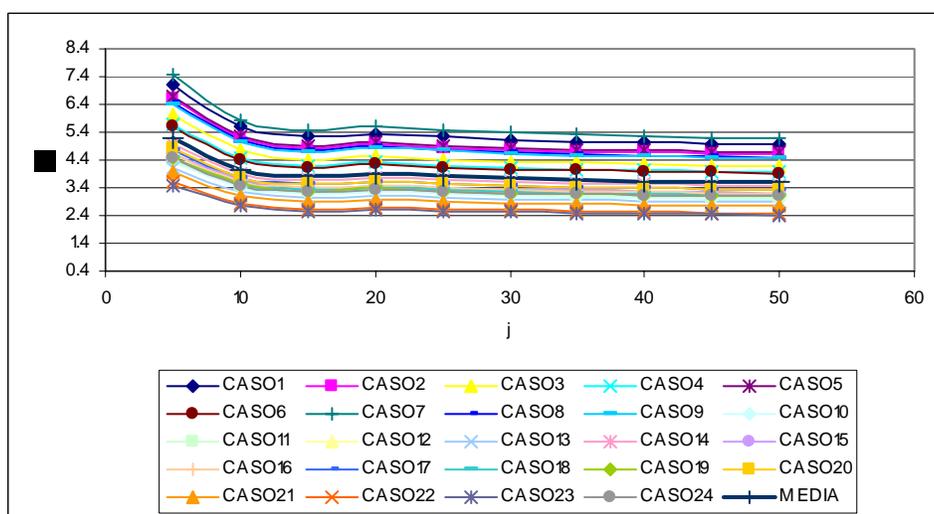


Figura 4.20.4 Estructura vigas descolgadas 4 pisos.  $i=5$

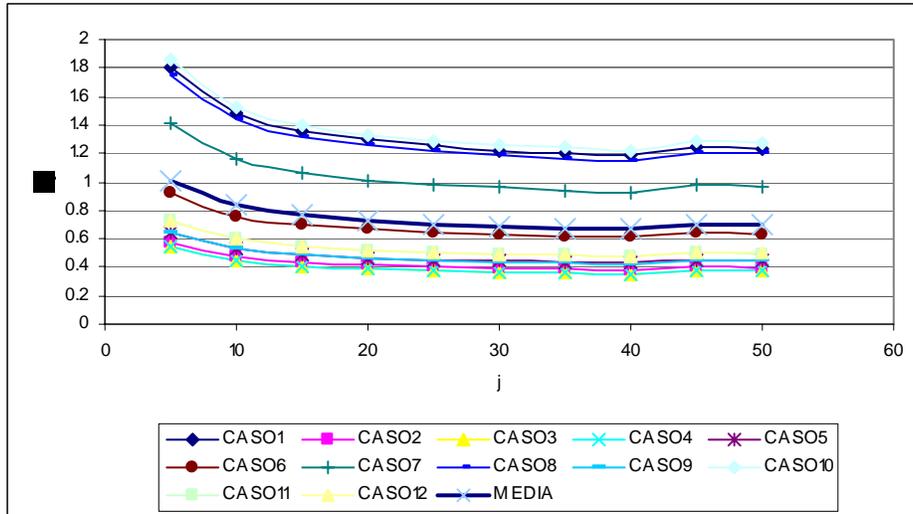


**Figura 4.20.5** Estructura vigas descolgadas 5 pisos.  $i=5$

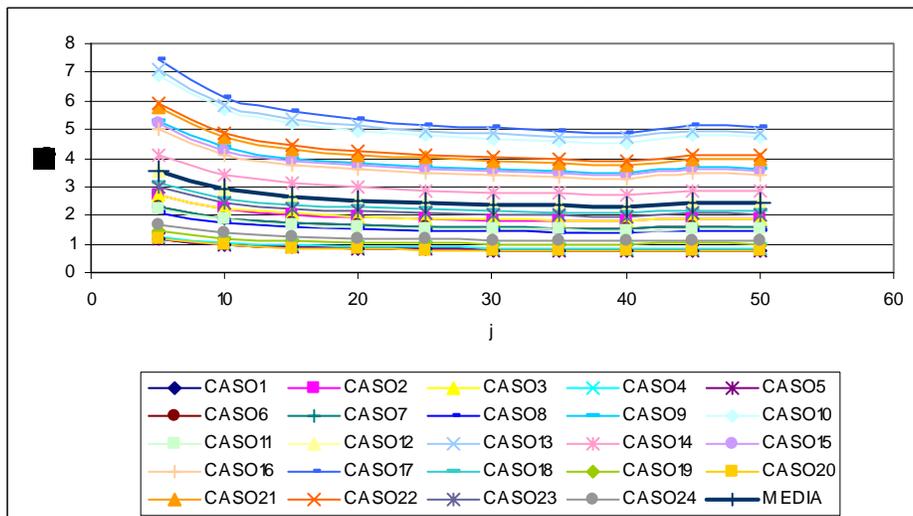


**Figura 4.20.6** Estructura vigas descolgadas 6 pisos.  $i=5$

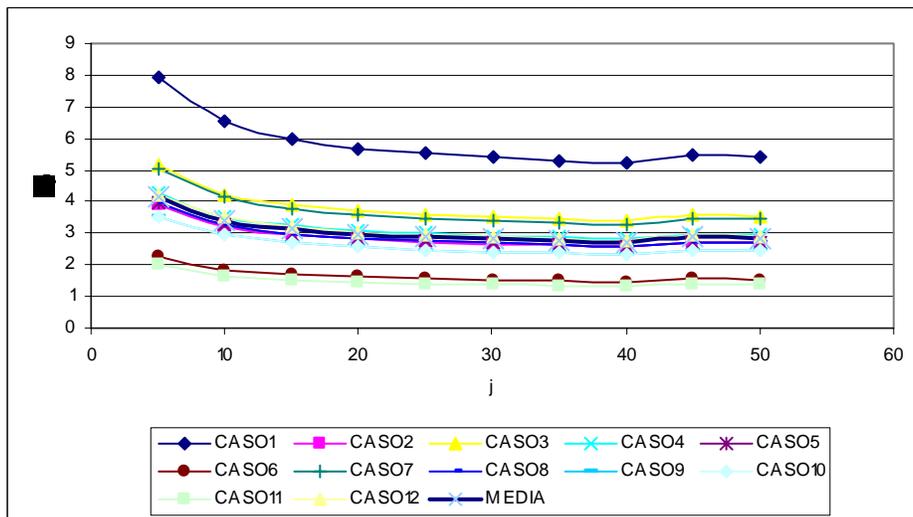
De las estructuras con vigas descolgadas, en la figura 4.21 se muestra para todos los casos analizados la variación del periodo plástico en función de la rigidez traslacional del suelo para  $i=15$ , y la media de los resultados.



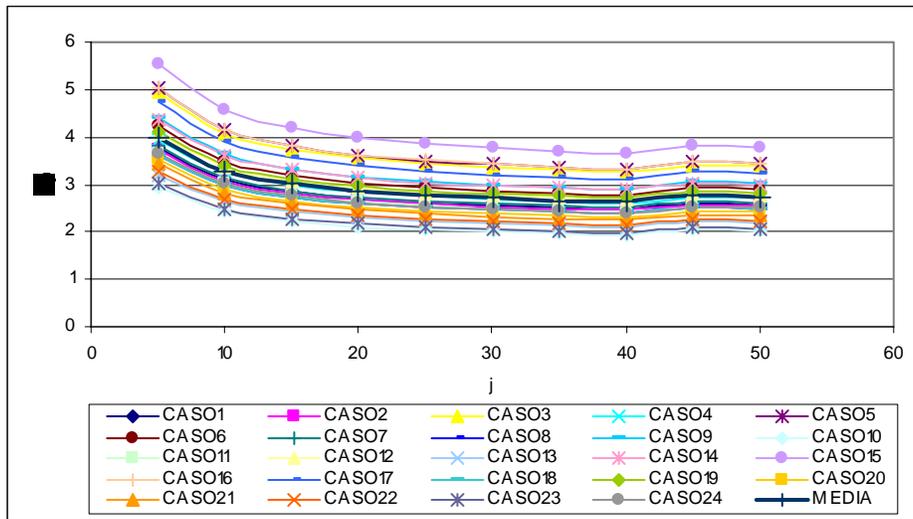
**Figura 4.21.1** Estructura vigas descolgadas 1 piso.  $i=15$



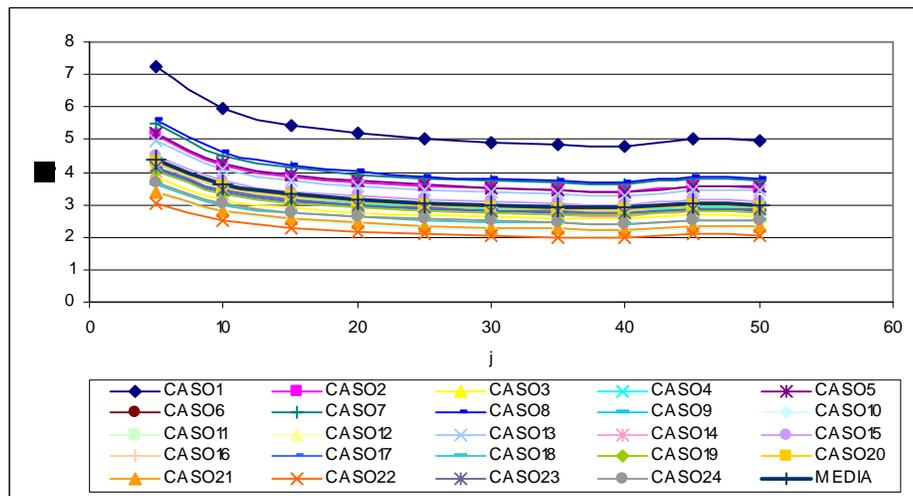
**Figura 4.21.2** Estructura vigas descolgadas 2 pisos.  $i=15$



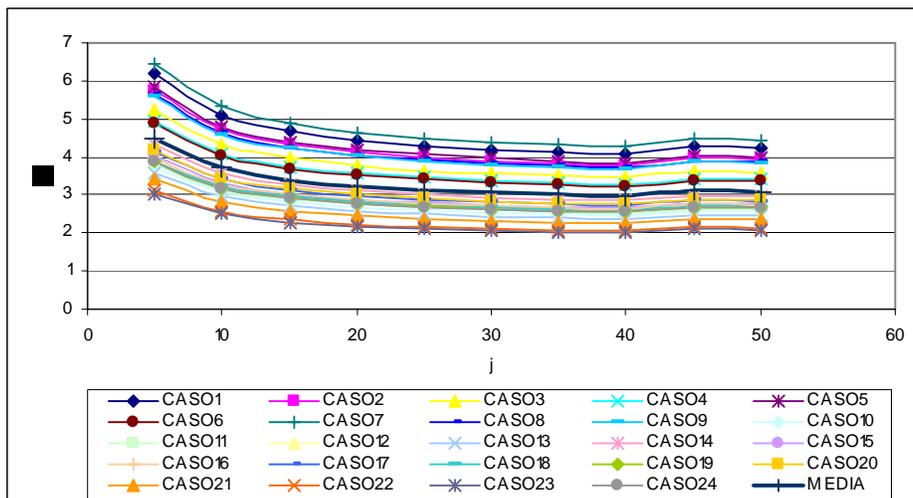
**Figura 4.21.3** Estructura vigas descolgadas 3 pisos.  $i=15$



**Figura 4.21.4** Estructura vigas descolgadas 4 pisos.  $i=15$



**Figura 4.21.5** Estructura vigas descolgadas 5 pisos.  $i=15$



**Figura 4.21.6** Estructura vigas descolgadas 6 pisos.  $i=15$

De las estructuras con vigas descolgadas, en la figura 4.22 se muestra para todos los casos analizados la variación del periodo plástico en función de la rigidez traslacional del suelo para  $i=5$ , y la media de los resultados.

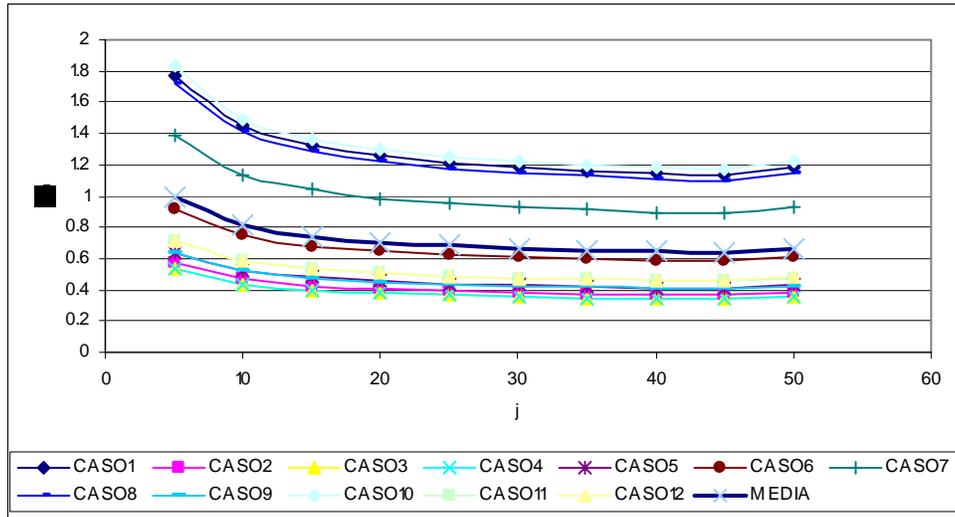


Figura 4.22.1 Estructura vigas descolgadas 1 piso.  $i=25$

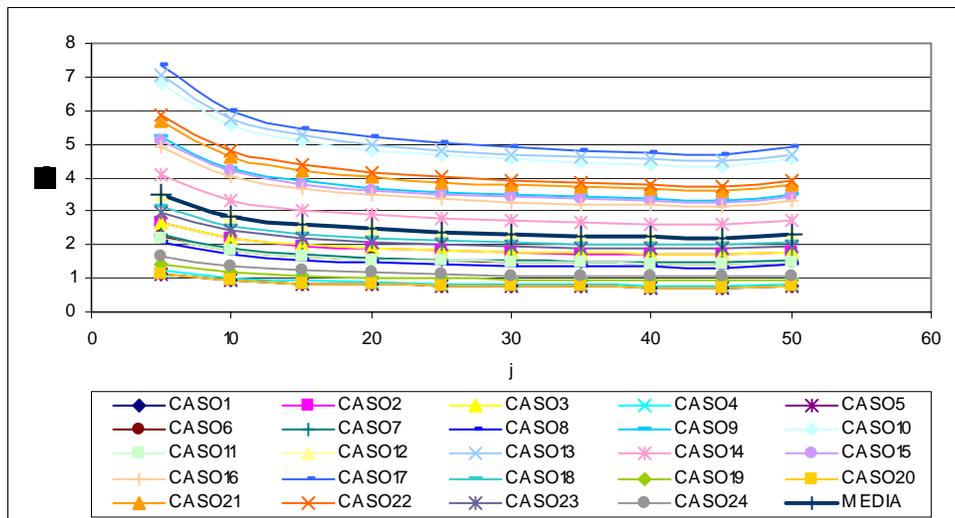


Figura 4.22.2 Estructura vigas descolgadas 2 pisos.  $i=25$

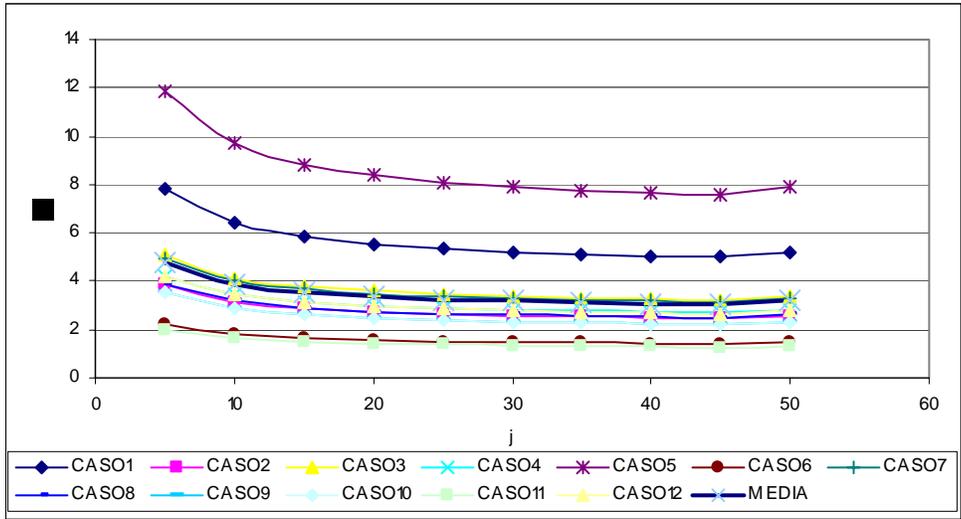


Figura 4.22.3 Estructura vigas descolgadas 3 pisos.  $i=25$

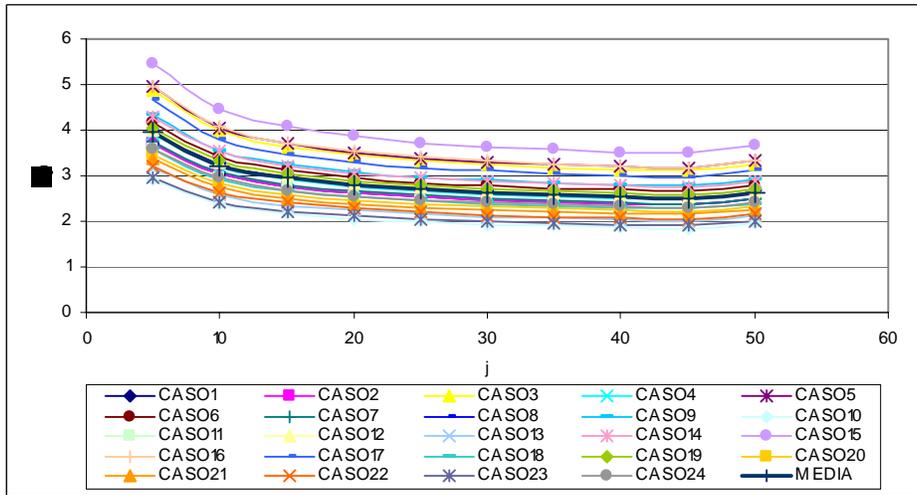


Figura 4.22.4 Estructura vigas descolgadas 4 pisos.  $i=25$

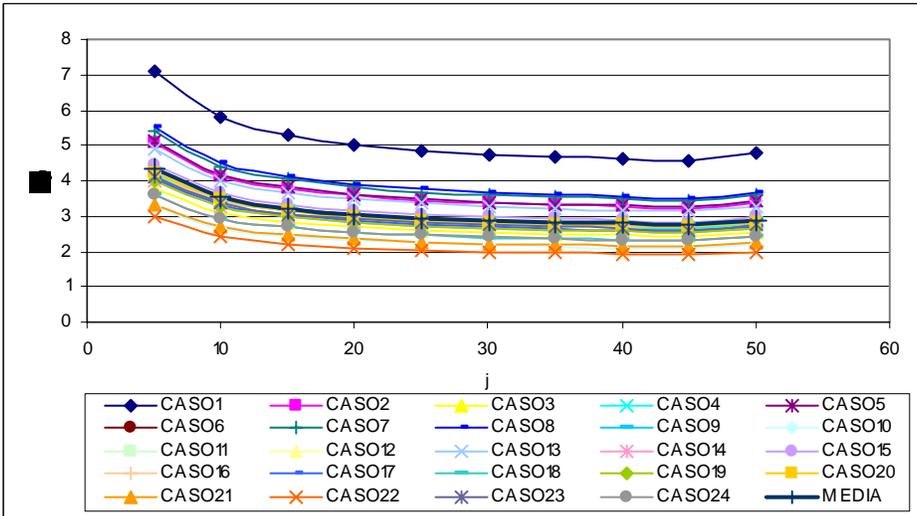
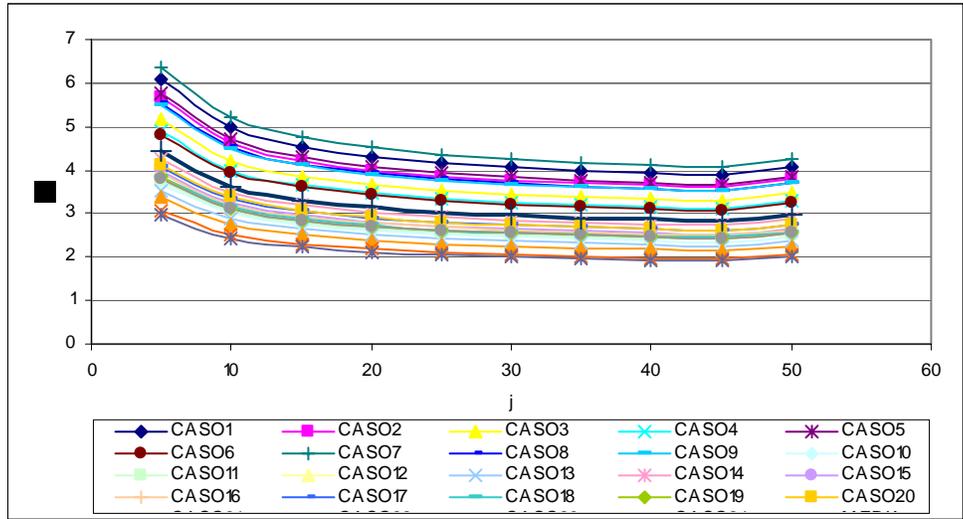
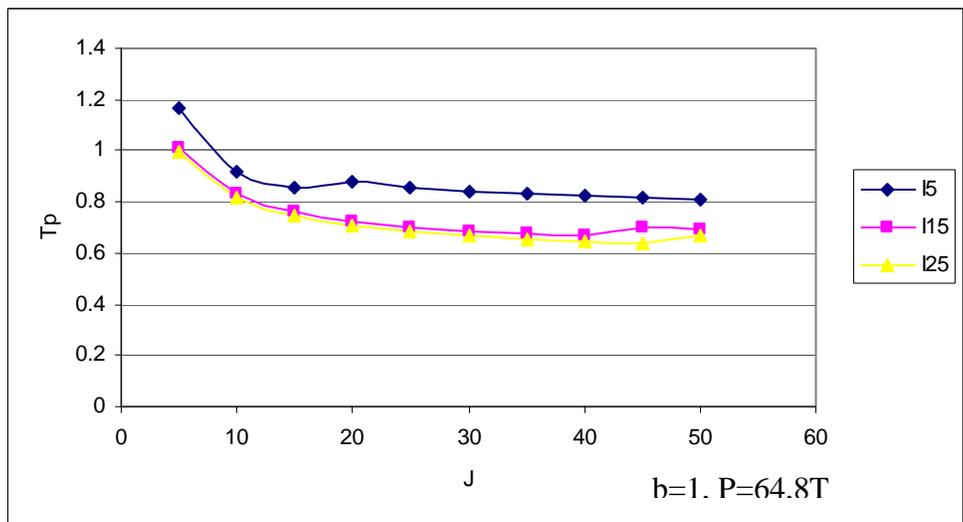


Figura 4.22.5 Estructura vigas descolgadas 5 pisos.  $i=25$

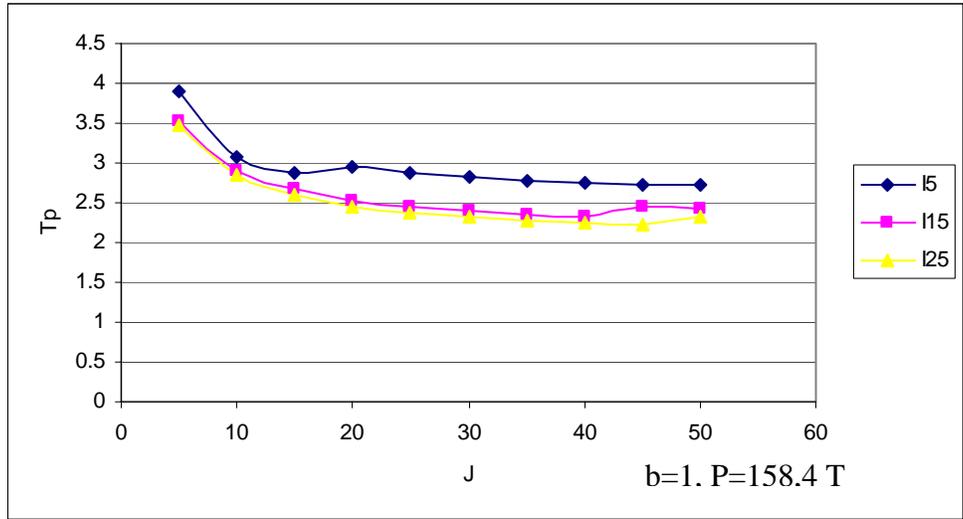


**Figura 4.22.6** Estructura vigas descolgadas 6 pisos.  $i=25$

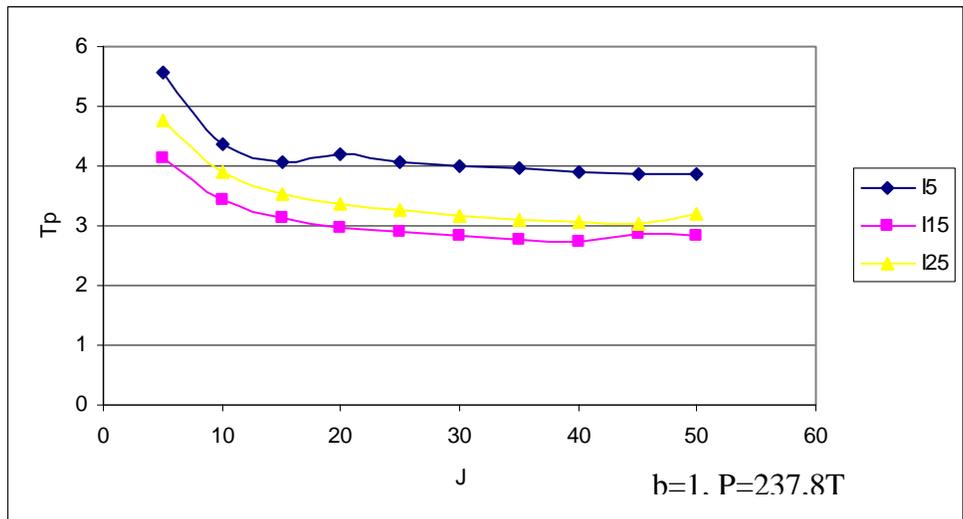
En las figuras 4.23 se describe la variación de la media del periodo plástico en estructuras con vigas descolgadas de 1 a 6 pisos para rigideces rotacionales del suelo de  $i=5, 15$  y  $25$ .



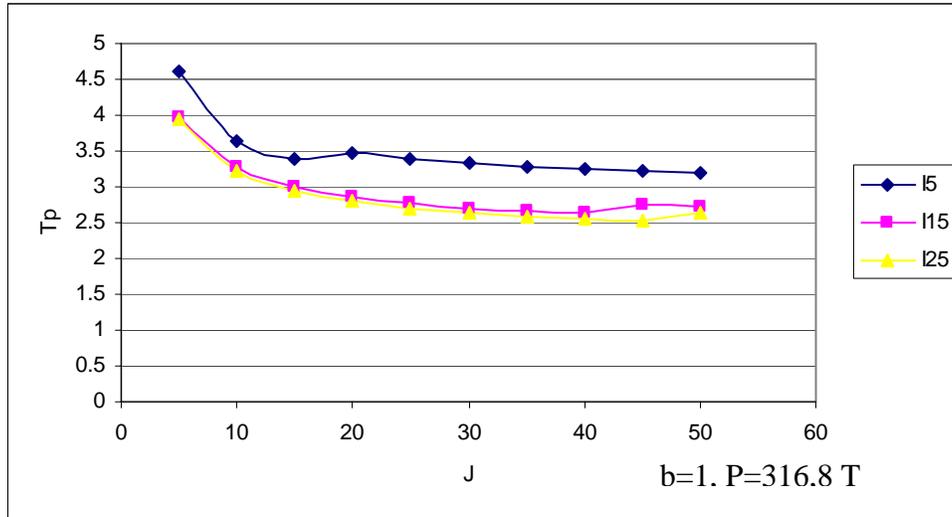
**Figura 4.23.1** Estructura vigas descolgadas 1 piso



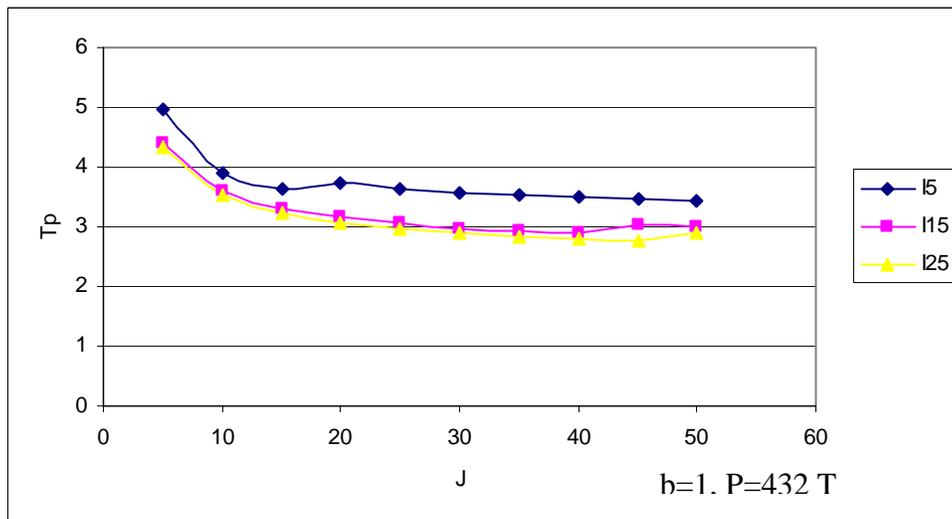
**Figura 4.22.2** Estructura vigas descolgadas 2 piso



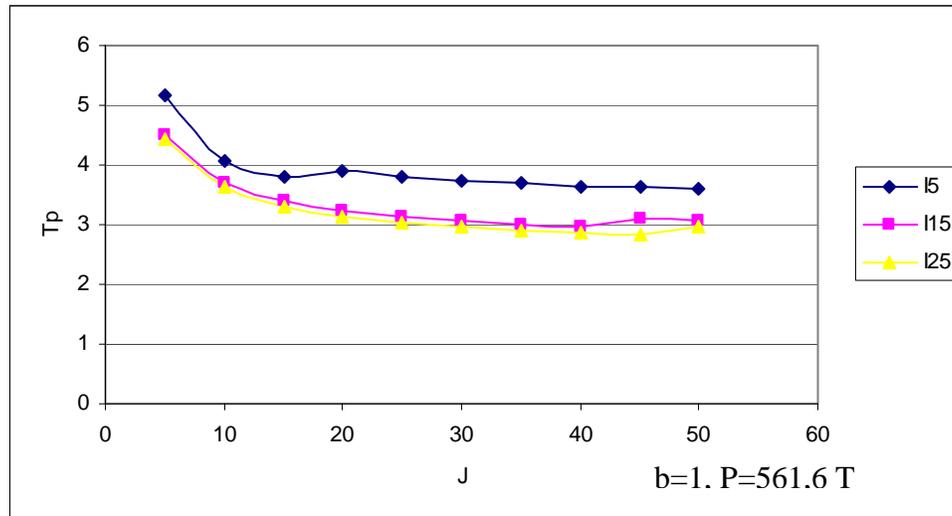
**Figura 4.23.3** Estructura vigas descolgadas 3 piso



**Figura 4.23.4** Estructura vigas descolgadas 4 pisos



**Figura 4.23.5** Estructura vigas descolgadas 5 pisos



**Figura 4.23.6** Estructura vigas descolgadas 6 pisos

#### 4.4 COMENTARIOS DE RESULTADOS OBTENIDOS.

Como en el CEC no explica que sucede con los períodos de la estructura cuando se considera la interacción suelo-estructura, se hace referencia a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México, por la basta experiencia que ellos tienen respecto al tema.

Tanto en el periodo elástico como en el periodo plástico según las Normas Mexicanas, el alargamiento del periodo es proporcional a la flexibilidad de la estructura. Si se observan las figuras 4.11 (vigas banda) y 4.15 (vigas descolgadas) que son un resumen de lo que sucede con el periodo elástico, claramente se ve que mientras mayor es la rigidez traslacional ( $j$ ) del suelo, el periodo disminuye, fenómeno que también ocurre con la rigidez rotacional ( $i$ ) del suelo, para  $i=5$ , el periodo de la estructura es mayor que para  $i=15$  y este mayor que para  $i=25$ .

En el caso del periodo plástico sucede lo mismo, a medida que el suelo es más rígido, tanto rotacional como traslacionalmente, el periodo se reduce como las figuras 4.19 para vigas banda, y 4.23 para vigas descolgadas muestran.

Para  $i=5$ , tanto en el periodo elástico como en el plástico varían significativamente hasta que  $j = 15$ , para  $i = 15$  y  $25$  la pendiente de la curva es más pronunciada hasta que  $j=20$ , cumpliéndose el rango que se presenta en la tabla 3.1