

CAPÍTULO 5

FÓRMULAS EMPÍRICAS

La respuesta de una estructura sometida a acciones dinámicas en general y en particular a terremotos, depende fundamentalmente de las características de la estructura y de la excitación como el intervalo de frecuencias, amplitud, duración e historia temporal (Bazán y Meli, 1992).

En el diseño de nuevos edificios el ingeniero tiene la posibilidad de elegir las características del sistema estructural, así como las propiedades de los materiales empleados en su construcción para que el edificio, considerando también las propiedades del suelo, tenga un comportamiento adecuado ante una excitación dinámica (Takewaki, 1998). Un aspecto importante de este tipo de estudios consiste en evitar que los periodos fundamentales del suelo y de la estructura coincidan ya que, fenómenos de resonancia pueden producir su colapso. Este fenómeno ocurrió durante el sismo de 1985 en la Ciudad de México donde 265 edificios colapsaron o fueron severamente dañados y fallecieron alrededor de 6000 personas (Kobayashi et al., 1986).

Sin embargo, la mayoría de las estructuras actuales fueron construidas en otras épocas y en estudios de riesgo sísmico es necesario conocer las características dinámicas de los edificios existentes. A pesar de que las normas sísmicas dan fórmulas simplificadas para el cálculo de los periodos propios de los edificios, las incertidumbres involucradas en la construcción, en los materiales utilizados y su estado de conservación, hacen que no sea sencillo conocer de forma determinista las características de estos edificios. Por otra parte, muchos de estos edificios han sufrido modificaciones, reparaciones, por lo que muchos de ellos tienen característica distantes de las que constan en los planos estructurales iniciales y su geometría ha pasado a ser irregular y compleja. Por lo tanto, la indeterminación de la información disponible complica abordar su análisis modal desde un punto de vista analítico, por lo que parece más fiable el uso de métodos empíricos que permitan medir los periodos fundamentales de forma económica, expedita y fiable. Por otra parte, la enorme cantidad de edificaciones existentes en las grandes ciudades hacen inviable la medición exhaustiva de los periodos de todos ellos; por lo tanto es conveniente recurrir a métodos probabilistas que, a partir de mediciones en una muestra representativa de las principales tipologías existentes, ajusten fórmulas empíricas simplificadas que permitan estimar los periodos de los edificios a partir de información fácil de obtener como p.e. la altura del edificio o el número de niveles. De esta manera, la determinación del periodo propio permite identificar zonas con probabilidad de ocurrencia de resonancias así como estimar el cortante basal resistente de la estructura con el objeto de realizar un diagnóstico estructural y una revisión individualizada en los casos que se considere necesario o conveniente.

5.1 CÁLCULO DEL PERIODO

Para obtener las frecuencias propias de oscilación de los sistemas de más de un grado de libertad sometidos a una acción dinámica son necesarios una serie de cálculos que requieren información detallada y precisa de las características estructurales. Incluso utilizando métodos analíticos se suelen realizar simplificaciones razonables como por ejemplo suponer las masas concentradas al nivel de cada piso y usar métodos aproximados o fórmulas directas. Entre los métodos frecuentemente usados desde hace años, se encuentran los de Rayleigh, Dunkerley, Vianello-Stodola, H. Holzer, M.P. White, M.G. Salvadori, R.G. Merrit, G.W. Housner, R. Husid, M. Ifrim, el método simplificado Geiger, y el del Sistema Equivalente. Entre las fórmulas directas están las de Taniguchi, F.P.; Ulrich, D.S.; Carder, Rosenblueth, K. Nakagawa, M. Takeuchi, A. Arias, R. Husid, G.W. Housner, A.G. Brady, M. Baeza, H. Sandi, G. Serbanescu, J.S. Carmona. J.H. Cano, M. Ifrim y la de Rayleigh (Beles et al 1975), siendo esta última (Ec. 5.1) de las más utilizadas en las normas sísmicas.

$$P = 2\pi \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n W_i \delta_i^2 \right) / \left(g \sum_{i=1}^n W_i \delta_i \right)} \quad (5.1)$$

donde P es el periodo, W_i el peso muerto asignado al nivel i, δ el desplazamiento lateral elástico y g la aceleración de la gravedad.

La Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (IAEE, 1996), publica desde 1960 una lista mundial de normas sísmicas. De allí y de Paz (1994) se tomaron las fórmulas empíricas que se presentan en el Anexo 5.1.

La mayoría de los países basa sus fórmulas en las de los códigos de Estados Unidos. El 68% de los países tienen una fórmula en función de $\frac{h}{\sqrt{L}}$, siendo h la altura del edificio y L la longitud en planta en la dirección de la acción (ambas magnitudes medidas en metros). Un 29% la tienen en función de $h^{0.75}$. Además, un 44% dan una fórmula en función del número de niveles N (IAEE, 1996; Paz, 1994). En este estudio se han ensayado diversas fórmulas obteniéndose ajustes razonables usando las variables h, L y N.

La mampostería es un tipo de material muy utilizado en el área mediterránea. Sin embargo tan sólo España y otros seis países tienen una fórmula específica en sus normativas. La Figura 5.1 muestra las gráficas de dichas fórmulas que permiten hallar el periodo en función de la altura y la dimensión en planta (L). Para mayor facilidad en la comparación de las fórmulas se han dibujado considerando L constante (L=20 m). Se observa una gran dispersión, posiblemente por causa de diferencias en los procedimientos constructivos y de los materiales de construcción. Diferencias similares se dan también en las fórmulas para edificios de hormigón armado (Figura 5.2).

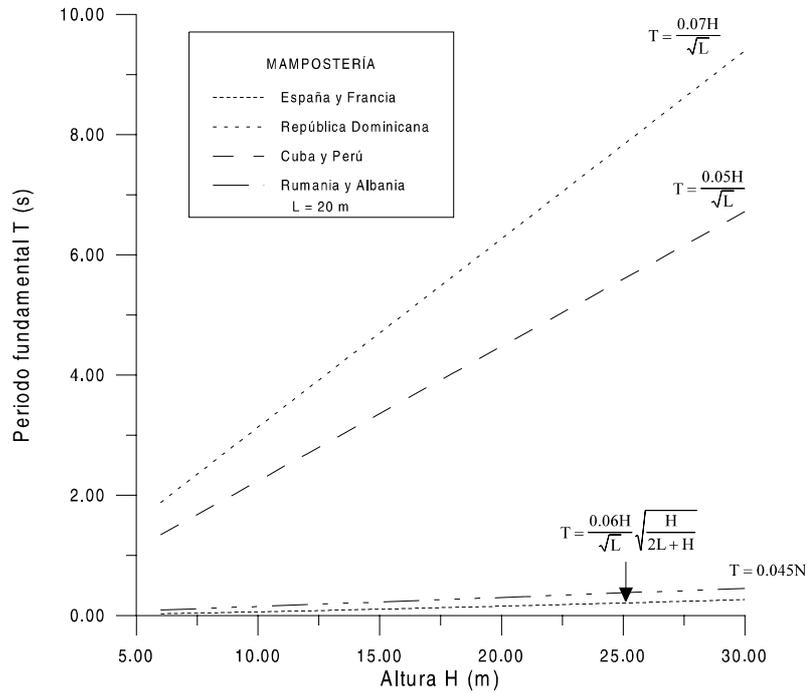


Figura 5.1 Gráfica de las fórmulas empíricas para edificios de mampostería tomadas de las normas sísmicas de diversos países.

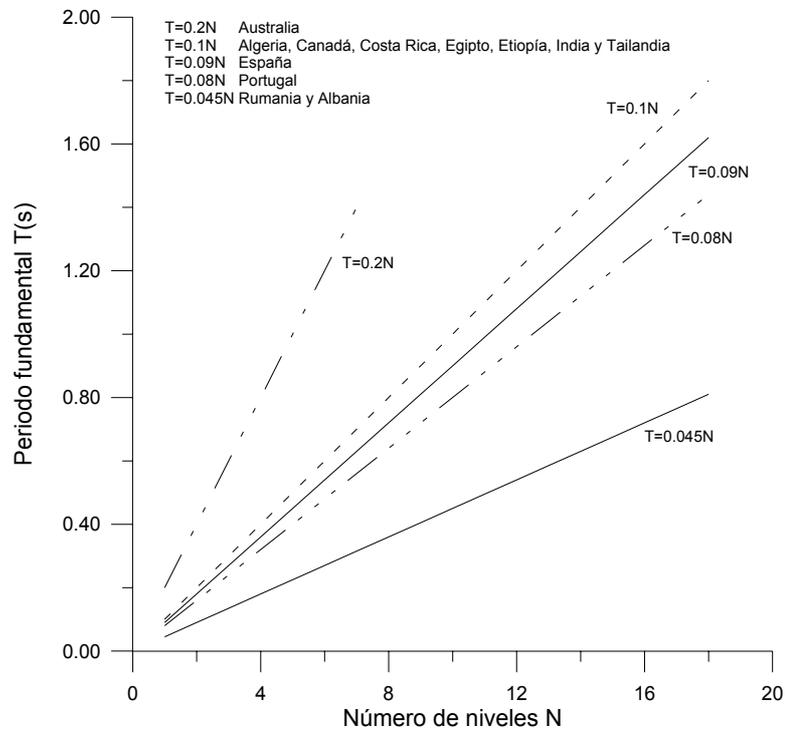


Figura 5.2 Fórmulas para estructuras aporricadas de hormigón armado tomadas de los códigos de diversos países.

5.2 REEVALUACIÓN DE FÓRMULAS EMPÍRICAS

En la onceava Conferencia Mundial sobre Ingeniería Sísmica, realizada en México, Goel y Chopra (1996), presentaron una evaluación de las fórmulas para el cálculo del periodo fundamental de edificios utilizando una amplia base de datos. Ellos concluyen que las fórmulas empíricas de los códigos sísmicos de Estados Unidos (UBC-94, ATC3-06, SEAOC-90 Y NEHRP-91) deberían ser revisadas y lógicamente también las de aquellos países que las hayan tomado como base.

Además, algunos científicos, entre ellos Muriá-Vila y González (1995) sostienen que las relaciones para estimar los periodos fundamentales de vibrar son sensibles a las características del suelo donde están desplantados (aunque sólo Suiza incluye un coeficiente de suelo en sus fórmulas empíricas) y proponen contar con fórmulas calibradas localmente.

Es importante que las fórmulas empíricas estén ajustadas a las características constructivas propias de cada región, especialmente las de mampostería debido a la poca uniformidad de los materiales empleados. En este sentido ya se están realizando distintos trabajos en la península Ibérica. En España Kobayashi et al (1996) obtuvieron para edificios de hormigón armado de Granada la relación $T = 0.051 N$ (Figura 5.3) y Enomoto et al (1997) trabajando en Almería dedujeron la fórmula $T = 0.048 N$ para el mismo tipo de edificios. En Portugal, Oliveira (1997) obtuvo relaciones lineales entre el periodo y la altura para diferentes tipologías de edificios (Figura 5.4) proponiendo trabajar con otras variables que permitan reducir la dispersión de los datos.

5.3 MEDICIONES EN BARCELONA

5.3.1 Obtención de datos

Desde 1996 se está trabajando en Barcelona en la medición del periodo fundamental de diferentes tipologías de edificios (Canas et al., 1998; Caselles et al., 1998 a; Caselles et al., 1998 b; Espinoza, 1996; Espinoza et al., 1997; Espinoza et al., 1998 b). En las tablas del Anexo 5.2 se presentan los datos correspondientes a 64 edificios medidos. Se han elegido edificios de mampostería y hormigón armado por ser las tipologías constructivas más representativas de Barcelona. Los edificios se han escogido principalmente por la viabilidad de su acceso. De algunos de ellos se dispone de planos estructurales que permiten correlacionar los datos obtenidos con modelos matemáticos. De ese grupo de edificios se utilizaron solamente 47 (Tabla 5.1), 25 de hormigón armado y 22 de mampostería; se buscó principalmente que tuvieran bien definida su altura, esto es, que no estuvieran construidos en terrenos con pendientes importantes. Parte de la información de esos edificios se obtuvo de una base de datos proporcionada por el Ayuntamiento de Barcelona. En los casos de plantas irregulares, la dimensión en planta que aparece en la Tabla 5.1 se obtuvo suponiendo que su área estaba contenida en una superficie rectangular.

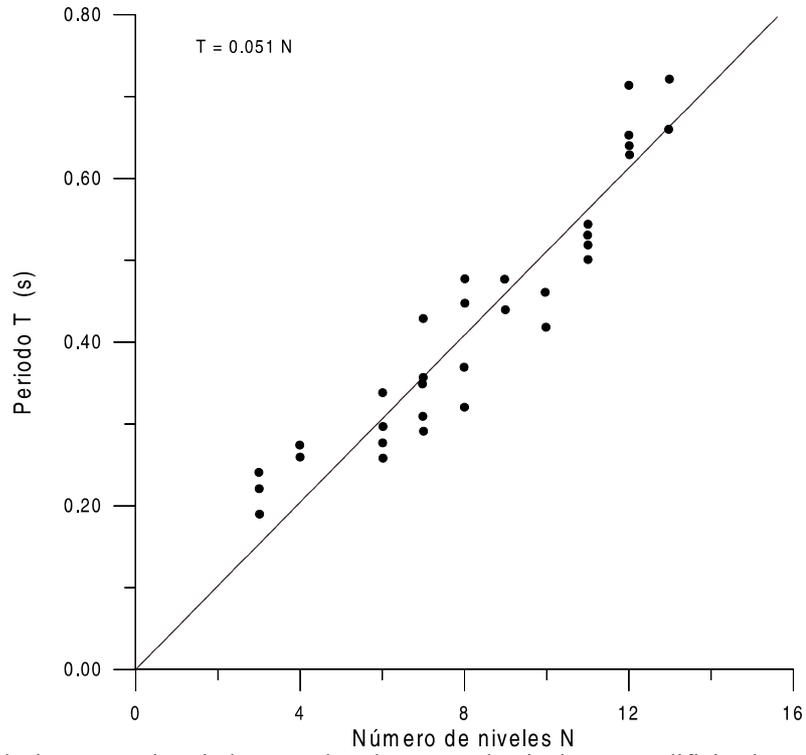


Figura 5.3 Relación entre el periodo natural y el número de niveles para edificios hormigón armado de Granada, España (Kobayashi et al, 1996).

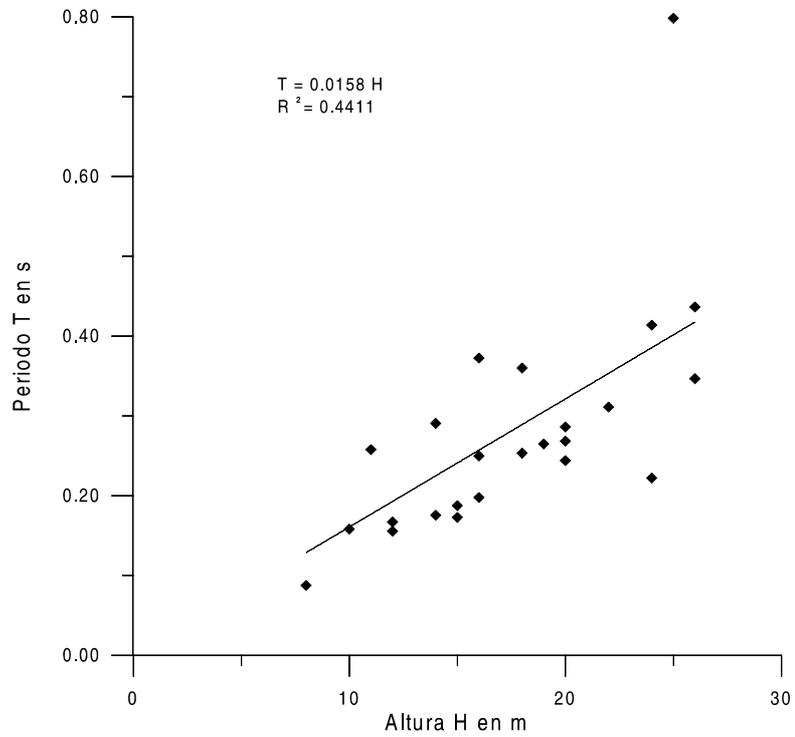


Figura 5.4 Periodo de vibración transversal para edificios de mampostería de Portugal (Oliveira, 1997).

ID	T	F _L	P _L	F _T	P _T	N	h	dimensión	en planta
119	H	5.12	0.20	5.36	0.19	2	7.01	50.14	27.89
120	H	7.44	0.13	9.04	0.11	2	6.08	45.11	40.18
116	H	2.88	0.35	4.00	0.25	3	9.15	50.00	24.00
112	H	3.84	0.26	3.92	0.26	4	15.90	29.70	11.50
113	H	5.84	0.17	4.48	0.22	4	17.20	37.80	10.00
121	H	4.16	0.24	4.48	0.22	4	17.80	102.43	14.95
111	H	3.44	0.29	5.76	0.17	5	14.60	27.20	22.67
14	H	3.60	0.28	3.60	0.28	6	20.80	25.00	17.33
114	H	3.12	0.32	4.88	0.20	6	19.20	36.97	21.14
50	H	3.20	0.31	4.40	0.23	7	21.86	20.93	11.90
88	H	3.76	0.27	3.20	0.31	8	23.20	37.86	21.42
53	H	2.48	0.40	3.28	0.30	8	25.30	13.36	11.90
8	H	2.80	0.36	3.12	0.32	9	24.10	66.90	21.43
49	H	3.36	0.30	2.40	0.42	9	27.19	14.42	8.00
89	H	2.72	0.37	3.44	0.29	9	26.40	16.68	8.16
110	H	2.16	0.46	2.40	0.42	9	31.50	29.69	24.85
124	H	2.48	0.40	2.48	0.40	9	24.54	24.70	15.50
39	H	2.48	0.40	2.48	0.40	10	30.00	19.74	17.50
41	H	2.80	0.36	3.60	0.28	10	30.35	23.81	15.27
42	H	2.64	0.38	2.40	0.42	10	30.96	28.93	20.07
59	H	2.88	0.35	2.32	0.43	10	31.00	18.75	11.00
68	H	3.44	0.29	2.56	0.39	10	30.80	35.17	13.77
30	H	1.92	0.52	1.92	0.52	11	27.60	50.60	10.00
43	H	1.76	0.57	1.68	0.60	12	33.50	40.00	20.00
2	H	1.60	0.63	1.60	0.63	15	34.40	17.25	17.16
127	M	9.92	0.10	8.08	0.12	1	5.10	20.88	8.35
83	M	9.04	0.11	8.48	0.12	2	7.00	9.60	7.60
122	M	9.60	0.10	10.40	0.10	2	8.02	28.06	19.28
126	M	6.24	0.16	8.32	0.12	2	7.40	29.51	6.11
125	M	6.16	0.16	4.40	0.23	3	10.75	23.83	13.31
15	M	3.92	0.26	3.20	0.31	4	17.75	11.14	8.01
16	M	3.76	0.27	3.68	0.27	4	11.10	11.10	11.00
117	M	3.60	0.28	2.72	0.37	4	19.33	35.60	16.00
118	M	4.24	0.24	4.08	0.25	4	13.50	36.80	36.70
17	M	4.72	0.21	3.12	0.32	5	26.00	13.82	8.68
51	M	3.60	0.28	3.68	0.27	5	18.50	19.48	15.72
18	M	4.40	0.21	4.80	0.23	6	21.02	22.90	19.87
20	M	5.20	0.19	4.48	0.22	6	16.76	17.63	8.67
21	M	3.60	0.28	3.44	0.29	6	20.90	17.25	5.74
72	M	3.68	0.27	3.68	0.27	7	21.35	24.23	14.89
26	M	3.36	0.30	2.56	0.39	8	23.00	27.59	11.88
27	M	3.44	0.29	3.04	0.33	8	28.00	23.47	9.40
28	M	2.08	0.48	2.08	0.48	8	26.00	26.00	11.00
52	M	2.72	0.38	2.00	0.50	8	27.75	25.95	14.06
87	M	2.80	0.36	2.96	0.34	9	30.40	52.97	27.24
29	M	2.80	0.36	3.28	0.30	10	29.20	28.06	23.04
129	M	2.64	0.38	2.64	0.38	10	32.35	11.00	14.00

Tabla 5.1 Relación de los 47 edificios de Barcelona utilizados para calcular las fórmulas empíricas. 25 edificios son de hormigón armado (H) y 22 de mampostería (M); ID es un número de identificación del edificio, T es la tipología, F_L es la frecuencia longitudinal, P_L es el periodo longitudinal, F_T y P_T son respectivamente la frecuencia y el periodo en la dirección transversal, N es el número de niveles y h es la altura en metros. Las dos últimas columnas contienen las dimensiones en planta mayor y menor respectivamente.

Como ejemplo, en la Figura 5.5 se presenta el caso de reducción para el edificio N. 39; ambas secciones, la irregular y la modificada, tienen un área de 345.5 m². El valor del área se conserva, siendo las dimensiones de la figura regular un tanto subjetivas. En el caso que se presenta, se ha considerado razonable reducir cada dimensión ortogonal alrededor de dos metros.

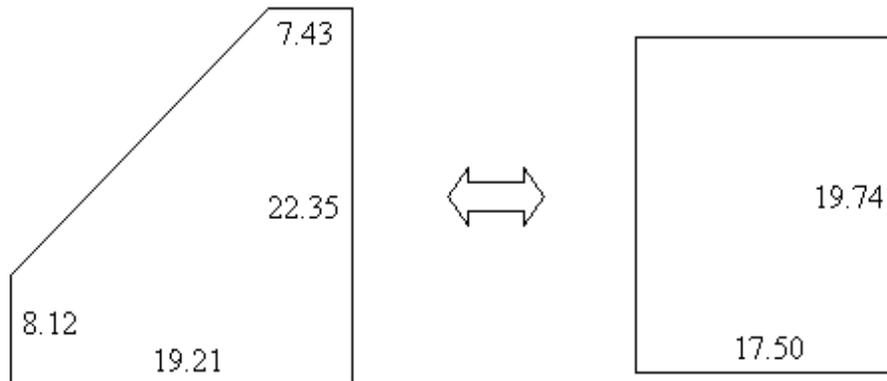


Figura 5.5 Reducción de la superficie irregular en planta del edificio 39 a una rectangular. Todas las dimensiones están en metros y el área de ambas secciones es 345.5 m².

5.3.2 Resultados

Con los datos de la Tabla 5.1 se han ensayado 5 fórmulas empíricas (las más frecuentemente utilizadas) considerando combinaciones de componentes (longitudinal y transversal), tipologías (hormigón y mampostería) y subtipologías (escuelas y viviendas). La Tabla 5.2 presenta las agrupaciones de datos consideradas y las fórmulas empíricas obtenidas.

Para evaluar la bondad del ajuste se utiliza la desviación estándar residual (Anexo 5.3), que representa la cantidad de dispersión de los datos que no es explicada por la ecuación ajustada. Se ha tomado como mejor ajuste el que presenta desviación estándar residual mínima. Frecuentemente concuerda también con el que da un coeficiente de correlación más alto aunque cuando las fórmulas a ajustar no son idénticas no tiene por que suceder.

De acuerdo con el criterio de los mínimos cuadrados, la relación entre el periodo y el número de niveles es la más adecuada para edificios de hormigón armado mientras que para mampostería la expresión que contiene el término $h^{0.75}$ proporciona mejores ajustes. En las Figuras 5.6 a 5.17 se presentan los mejores ajustes obtenidos para cada agrupación de edificios. Estas figuras han sido obtenidas con un programa estadístico estándar e incluyen: gráfica del ajuste (a), gráfico de los residuos (b), histograma de los residuos con la curva normal ajustada (c) y la curva normal de residuos transformada junto con la recta ajustada (d). En los anexos 5.3 y 5.4 se describen, de forma somera, los aspectos relacionados con los estimadores de la bondad del ajuste y con el análisis de residuos.

Determinación de Características Dinámicas de Estructuras

Edificios	componente	$P=Ah^B$	$P=A+Bh^{0.75}$	$P=A+\frac{Bh}{\sqrt{L}}$	$P=A+\frac{Bh}{\sqrt{L}}\sqrt{\frac{h}{2L+h}}$	$P=A+BN$
25H+22M	longitudinal y transversal	A=0.036 B= 0.70 R ² =0.71 σ _R =5.07	A=0.002 B=0.031 R ² =0.64 σ _R =4.98			A=0.094 B=0.032 R ² =0.72 σ _R =3.85
25H+22M	longitudinal	A=0.039 B= 0.67 R ² =0.68 σ _R =5.22	A=0.017 B= 0.029 R ² =0.61 σ _R =5.12			A=0.095 B=0.031 R ² =0.74 σ _R =3.38
25H+22M	transversal	A=0.033 B= 0.73 R ² =0.74 σ _R =4.90	A=-0.009 B= 0.033 R ² =0.67 σ _R =4.84			A=0.093 B=0.032 R ² =0.70 σ _R =4.30
25H	longitudinal y transversal	A=0.045 B= 0.64 R ² =0.62 σ _R =6.37	A=0.001 B= 0.032 R ² =0.75 σ _R =6.05	A=0.171 B= 0.032 R ² =0.39 σ _R =8.99		A=0.089 B=0.032 R ² =0.74 σ _R =3.77
25H	longitudinal	A=0.059 B=0.56 R ² =0.57 σ _R =6.44	A=0.046 B=0.029 R ² =0.53 σ _R =6.15	A=0.189 B= 0.035 R ² =0.40 σ _R =7.77		A=0.117 B=0.030 R ² =0.70 σ _R =3.84
25H	transversal	A=0.034 B=0.72 R ² =0.69 σ _R =6.04	A=0.044 B=0.036 R ² =0.66 σ _R =13.5	A=0.103 B= 0.038 R ² =0.51 σ _R =7.98		A=0.060 B=0.035 R ² =0.79 σ _R =3.44
16H viviendas	longitudinal y transversal	A=0.007 B= 1.20 R ² =0.46 σ _R =6.15	A=-0.283 B= 0.056 R ² =0.47 σ _R =6.06	A=0.261 B=0.020 R ² =0.10 σ _R =10.26		A=-0.048 B= 0.046 R ² =0.73 σ _R =3.08
9H escuelas	longitudinal y transversal	A=0.064 B=0.49 R ² =0.47 σ _R =4.18	A=0.067 B= 0.024 R ² =0.53 σ _R =3.81	A=0.156 B= 0.30 R ² =0.33 σ _R =5.35		A=0.101 B=0.034 R ² =0.60 σ _R =3.20
22M	longitudinal y transversal	A=0.033 B= 0.71 R ² =0.77 σ _R =3.43	A=0.021 B= 0.028 R ² =0.67 σ _R =3.40	A=0.116 B= 0.032 R ² =0.51 σ _R =5.08	A=0.165 B= 0.034 R ² =0.42 σ _R =6.00	A=0.101 B=0.030 R ² =0.62 σ _R =3.93
22M	longitudinal	A=0.033 B=0.70 R ² =0.77 σ _R =2.82	A=0.019 B= 0.027 R ² =0.70 σ _R =2.83	A=0.122 B= 0.033 R ² =0.45 σ _R =5.12	A=0.150 B= 0.030 R ² =0.39 σ _R =7.38	A=0.087 B= 0.031 R ² =0.72 σ _R =2.62
22M	transversal	A=0.032 B=0.74 R ² =0.77 σ _R =3.69	A=0.023 B= 0.029 R ² =0.67 σ _R =3.66	A=0.100 B= 0.034 R ² =0.56 σ _R =4.91	A=0.148 B= 0.037 R ² =0.49 σ _R =5.72	A=0.115 B= 0.030 R ² =0.56 σ _R =4.94
16M viviendas	longitudinal y transversal	A=0.037 B= 0.67 R ² =0.61 σ _R =4.14	A=0.039 B= 0.0 R ² =0.49 σ _R =4.07	A=0.151 B= 0.026 R ² =0.31 σ _R =5.54	A=0.207 B= 0.025 R ² =0.24 σ _R =6.14	A=0.115 B=0.028 R ² =0.48 σ _R =4.21
6M escuelas	longitudinal y transversal	A=0.023 B= 0.88 R ² =0.79 σ _R =1.03	A=-0.044 B= 0.040 R ² =0.85 σ _R =1.04	A=0.025 B= 0.06 R ² =0.66 σ _R =2.25	A=0.091 B= 0.083 R ² =0.51 σ _R =3.26	A=0.014 B=0.064 R ² =0.74 σ _R =1.72

Tabla 5.2 Ecuaciones ajustadas junto con un parámetro que las evalúa, la desviación estándar residual. Esta cantidad se obtiene de la tabla dividiendo el valor σ_R entre mil. En la primera columna se tienen los tipos y número de edificios considerados, hormigón armado, H, y mampostería, M.

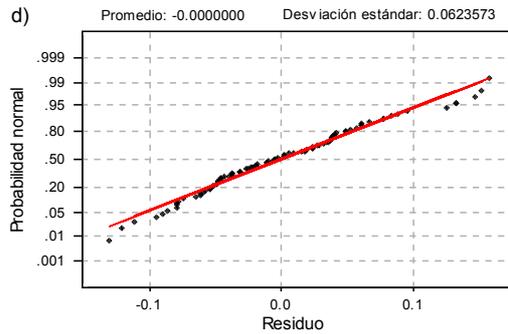
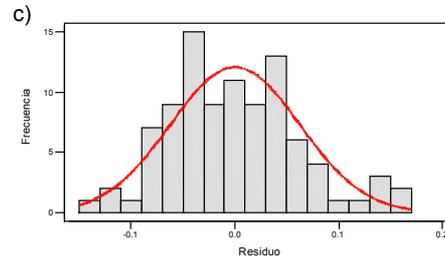
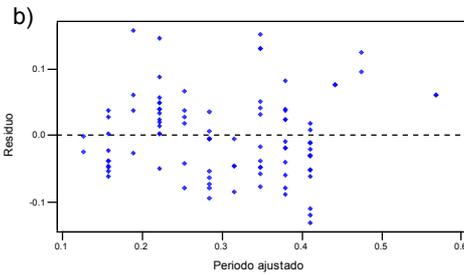
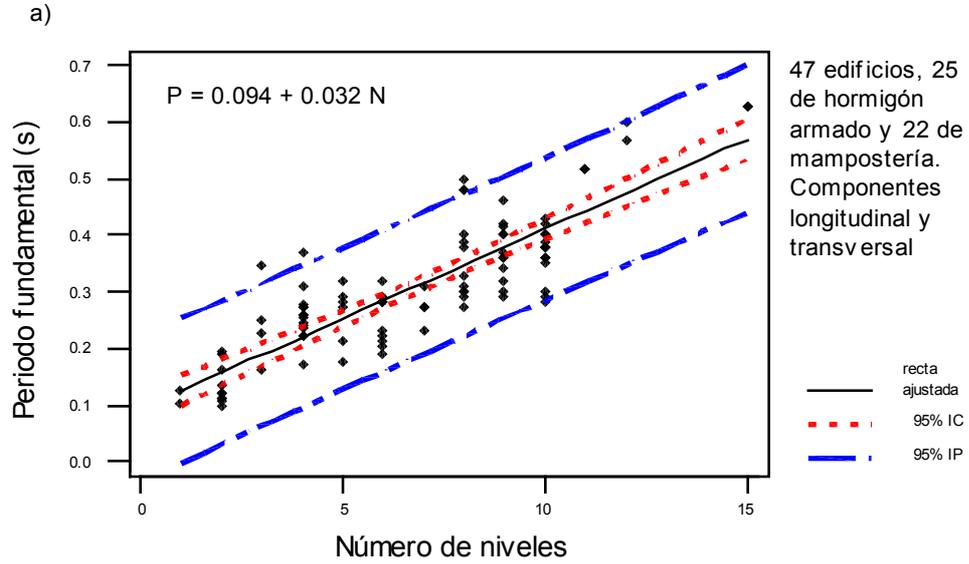


Figura 5.6 Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de hormigón armado y mampostería. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (en ambas direcciones) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.

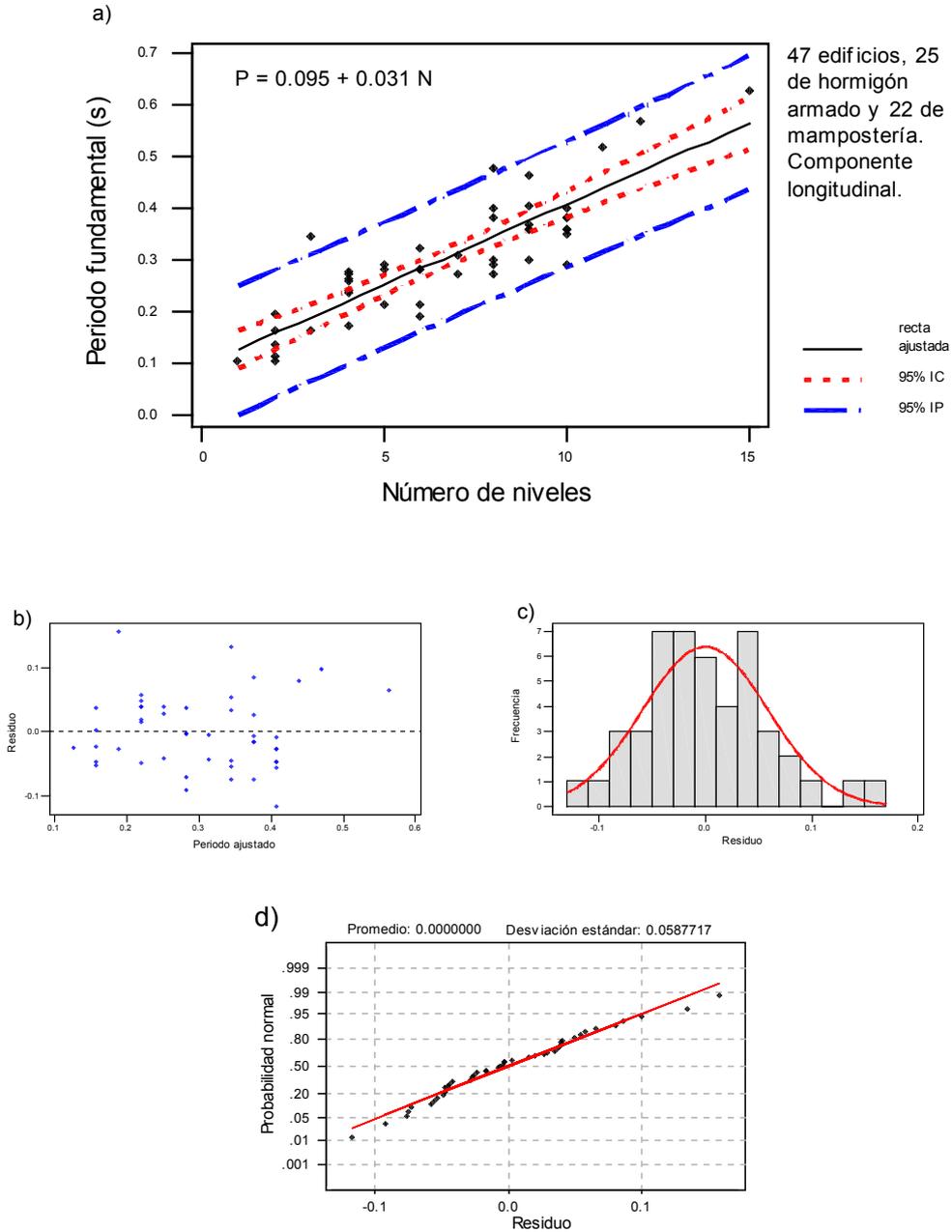


Figura 5.7 Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de hormigón armado y mampostería. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (dirección longitudinal) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.

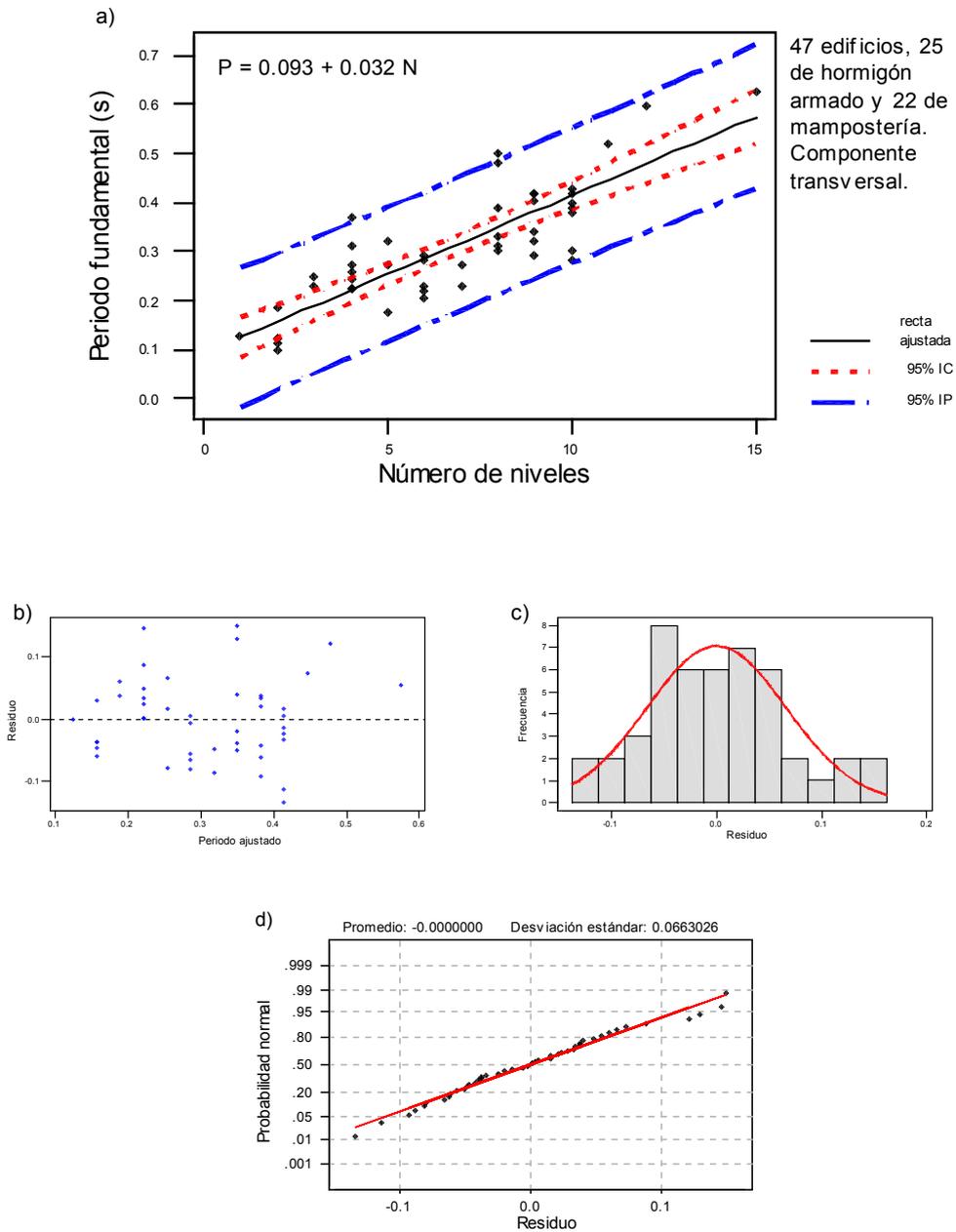


Figura 5.8 Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de hormigón armado y mampostería. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (dirección transversal) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.

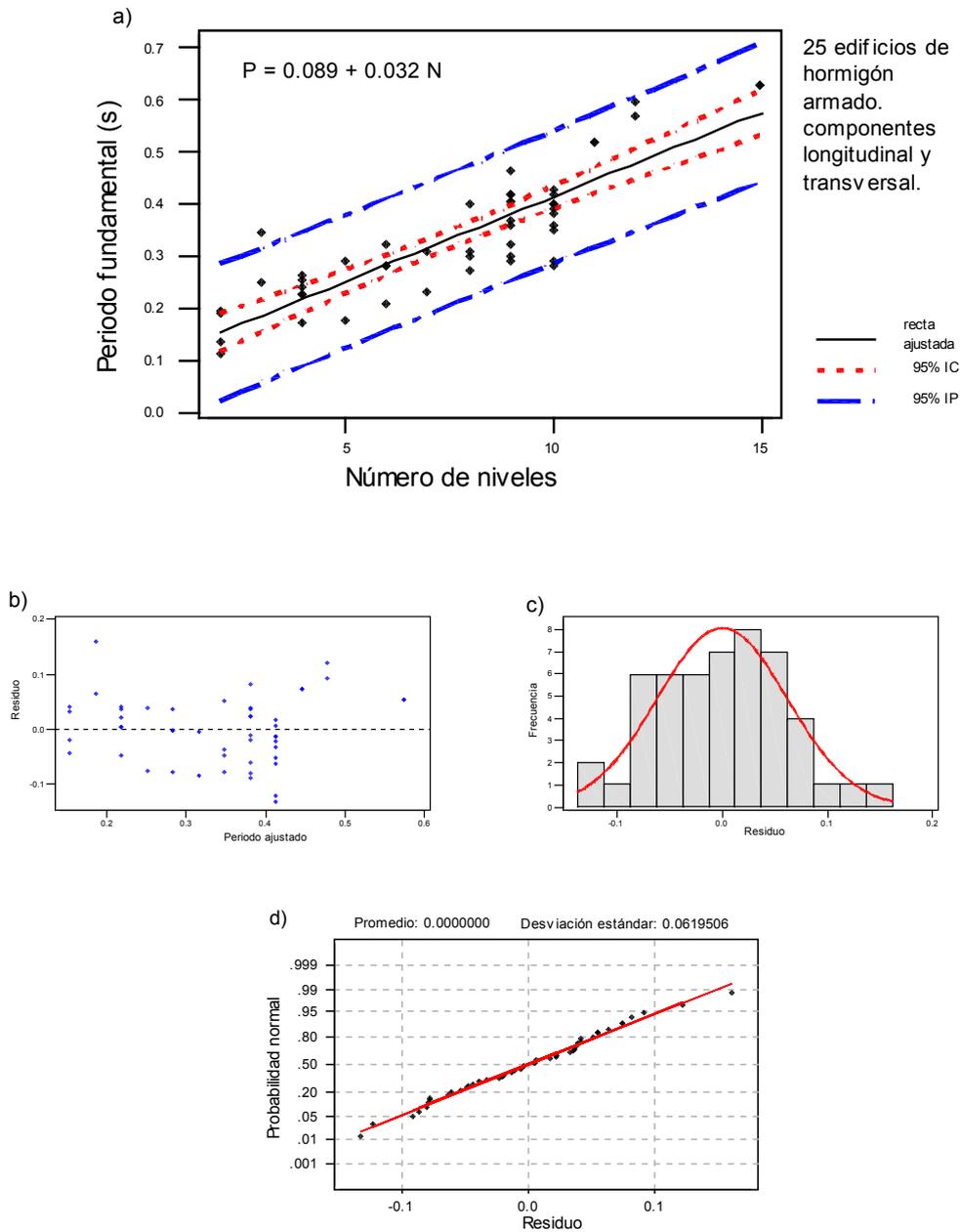


Figura 5.9 Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de hormigón armado. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (ambas direcciones) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.

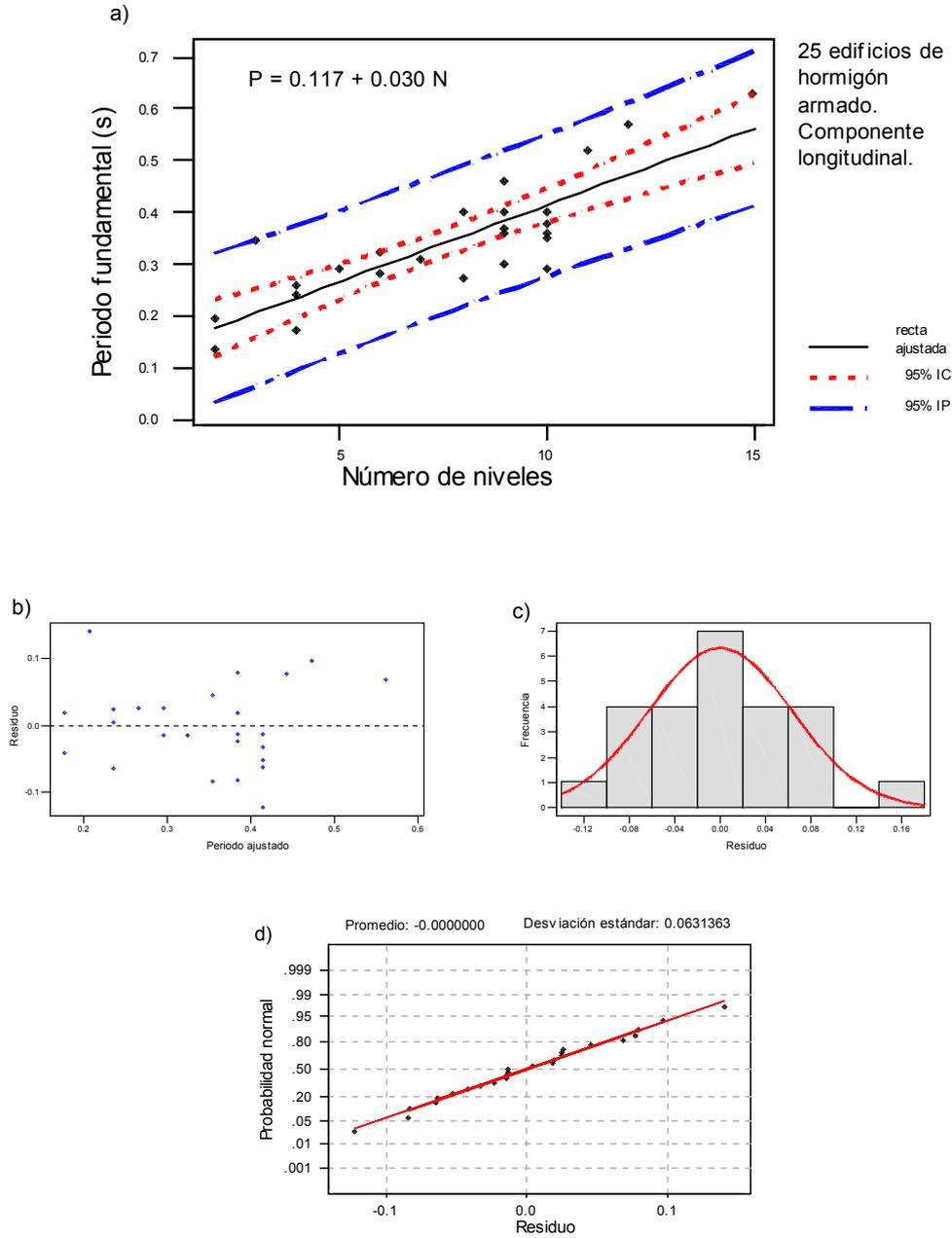


Figura 5.10 Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de hormigón armado. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (dirección longitudinal) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.

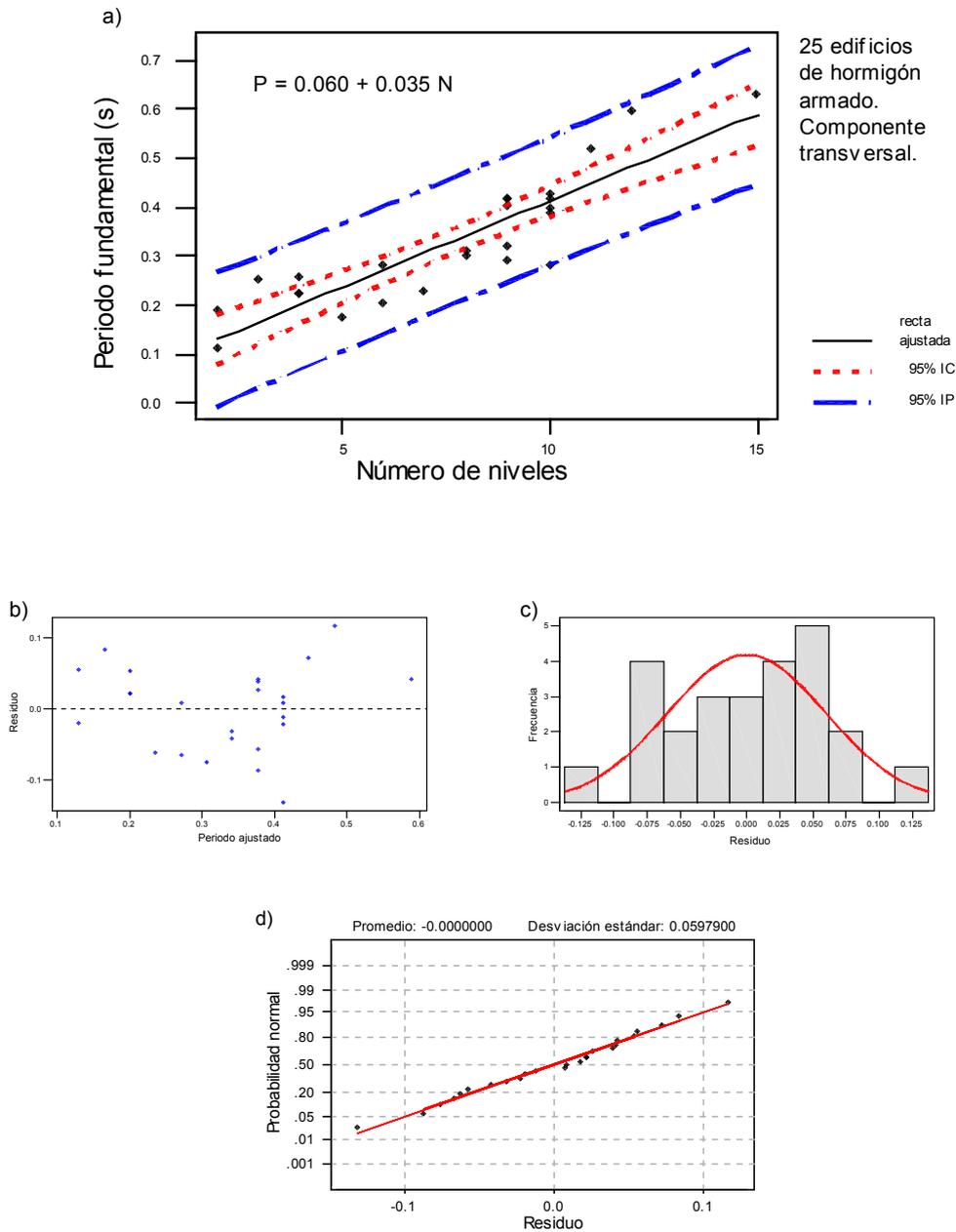


Figura 5.11 Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de hormigón armado. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (dirección transversal) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.

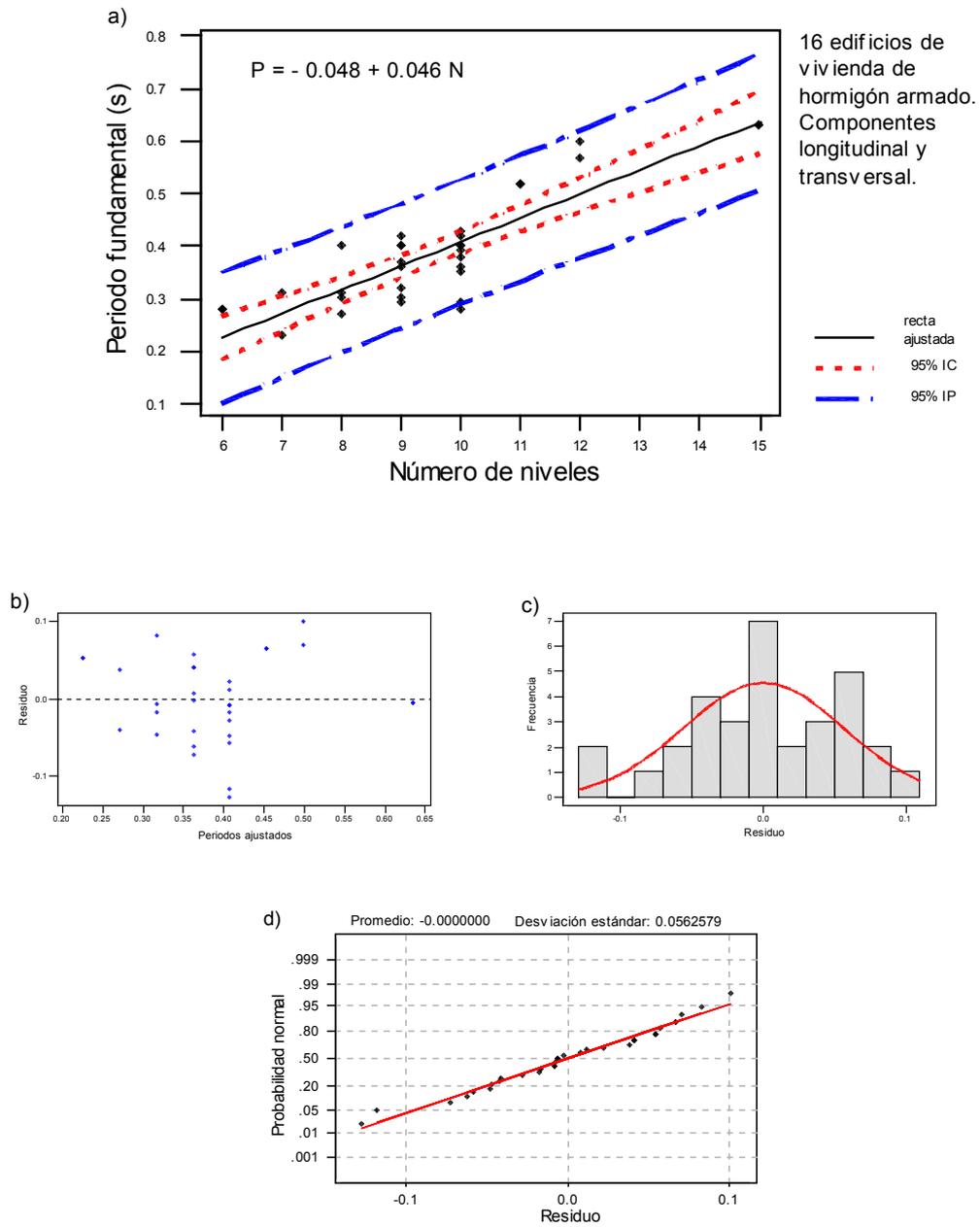


Figura 5.12 Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de vivienda de hormigón armado. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (ambas direcciones) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.

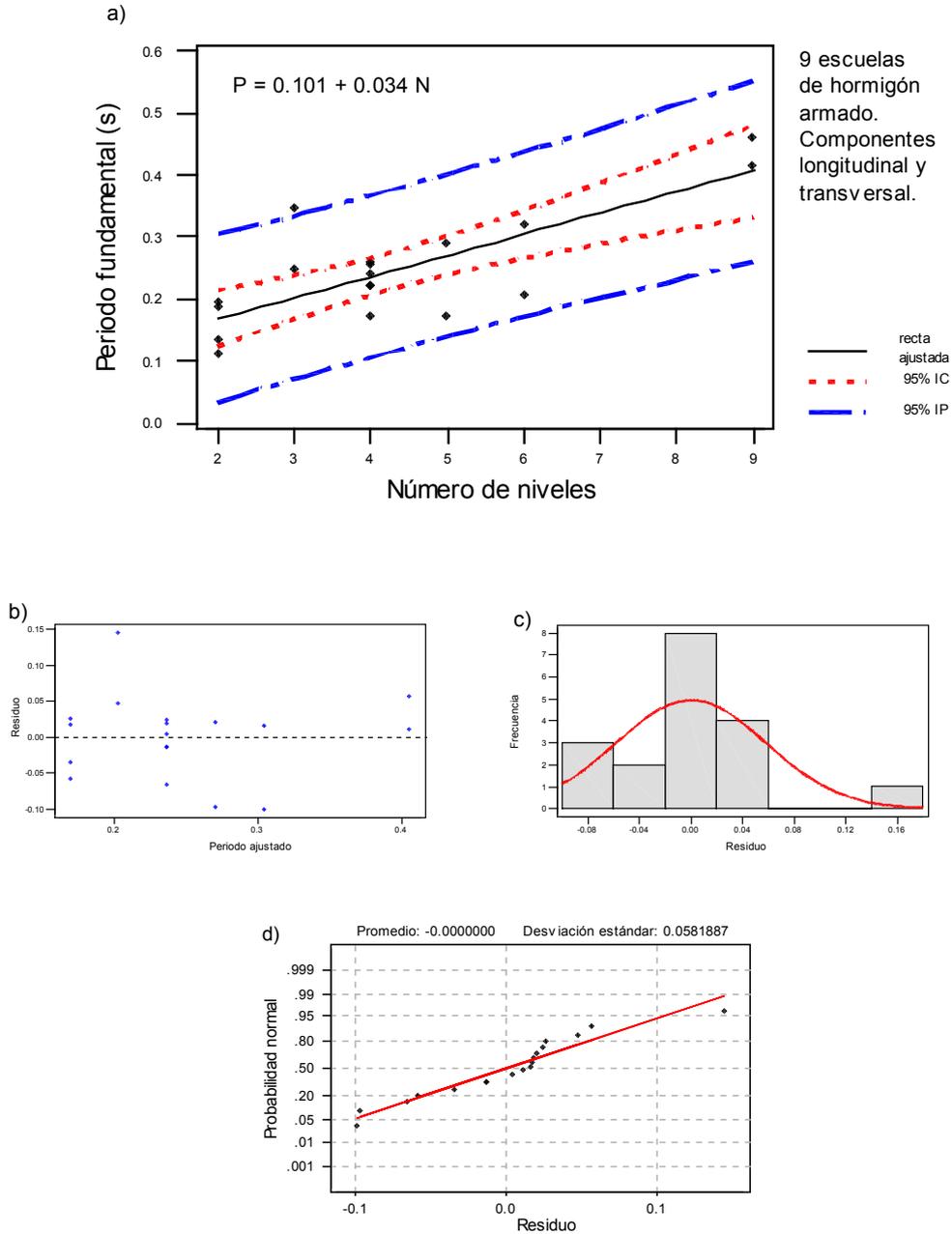


Figura 5.13 Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de escuelas de hormigón armado. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (ambas componentes) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.

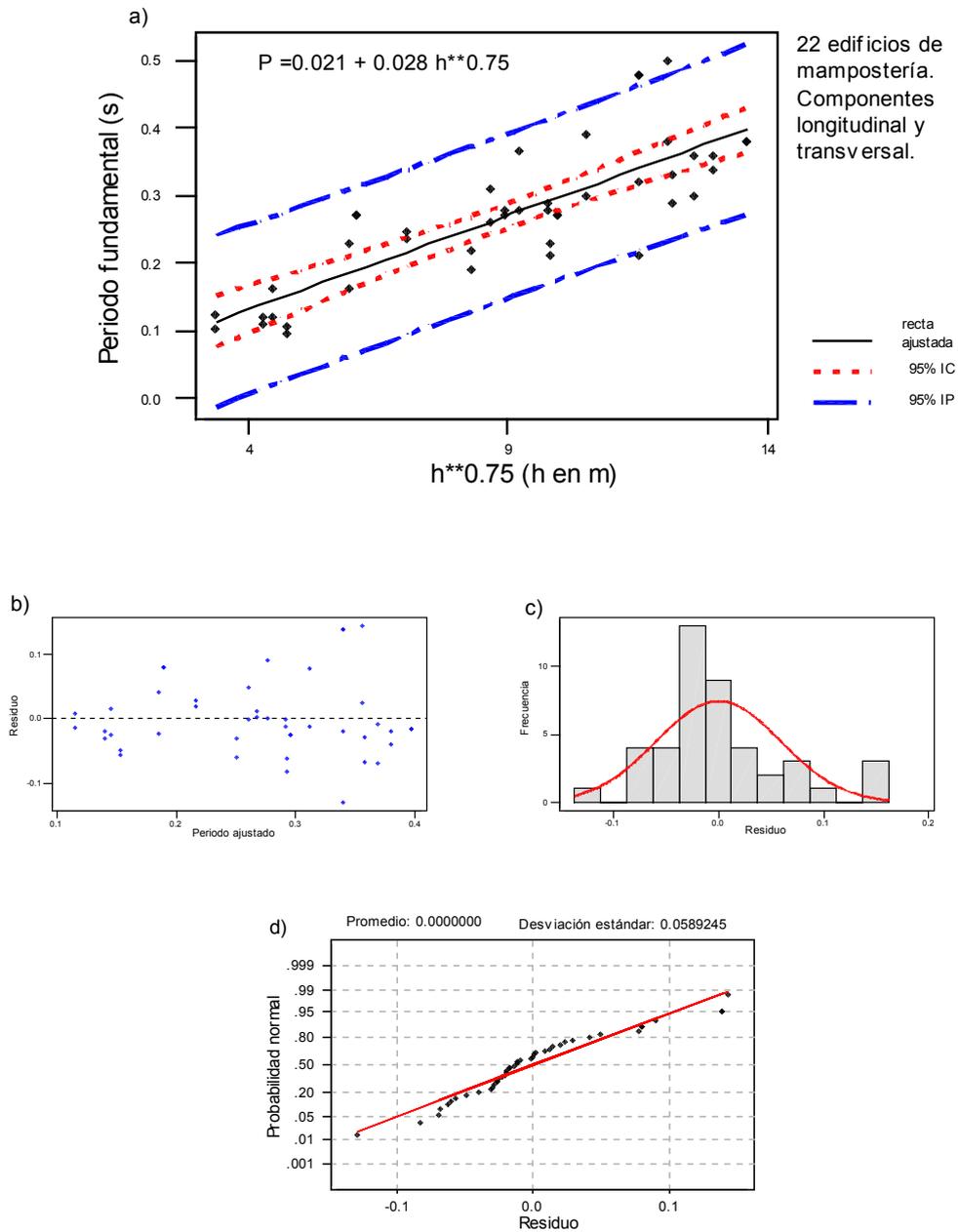


Figura 5.14 Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de mampostería. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (ambas direcciones) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.

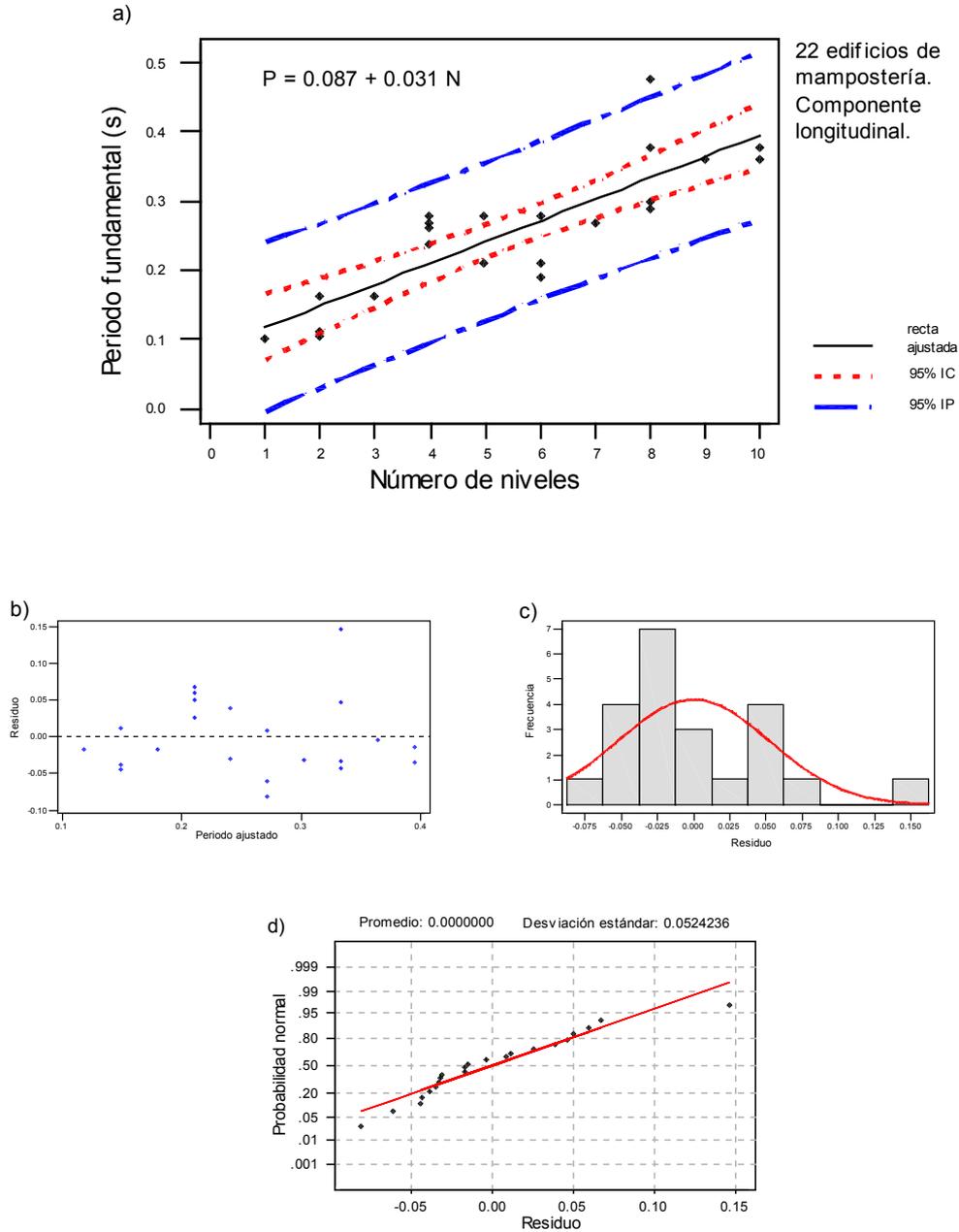


Figura 5.15 Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de mampostería. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (componente longitudinal) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.

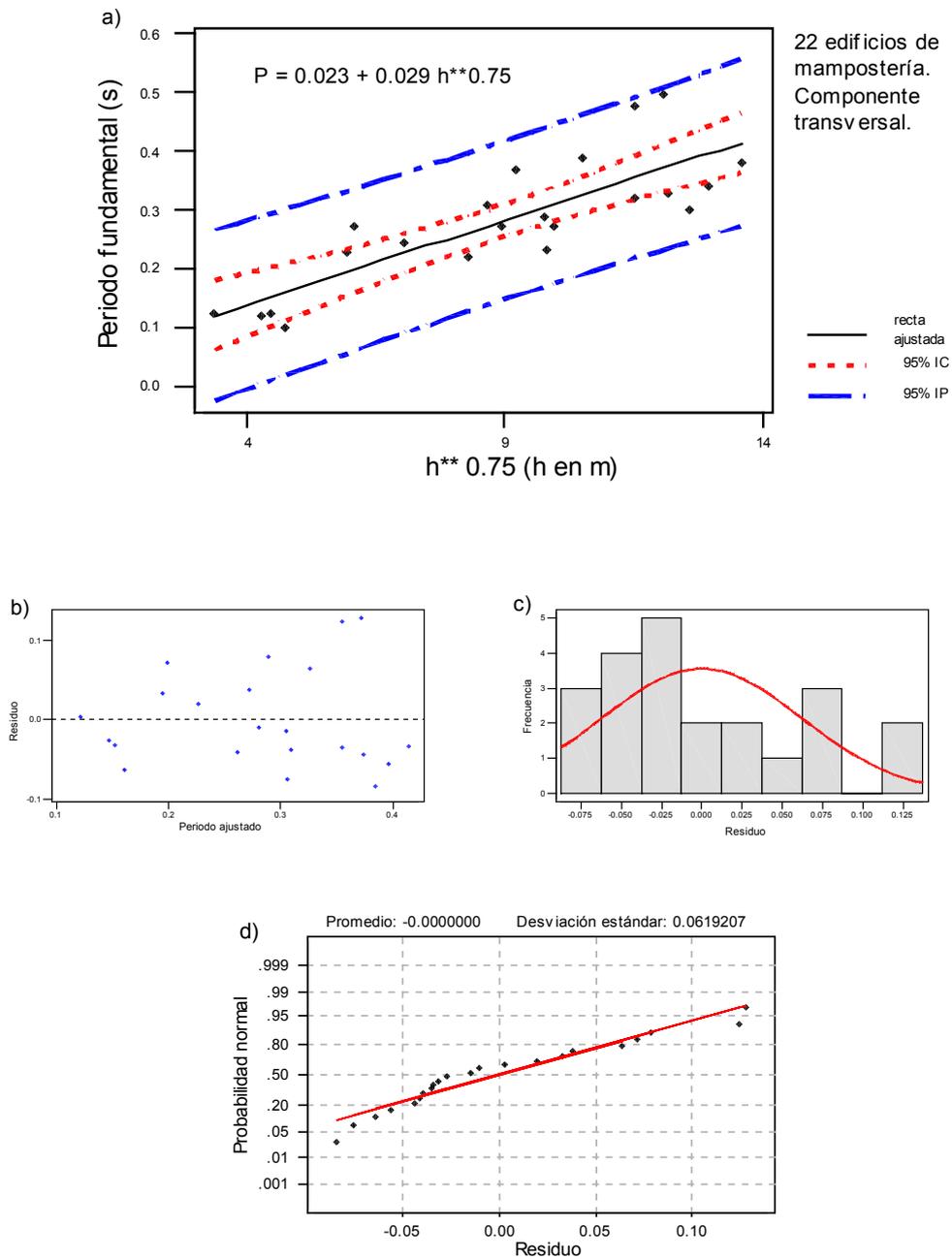


Figura 5.16 Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de mampostería. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (dirección transversal) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.

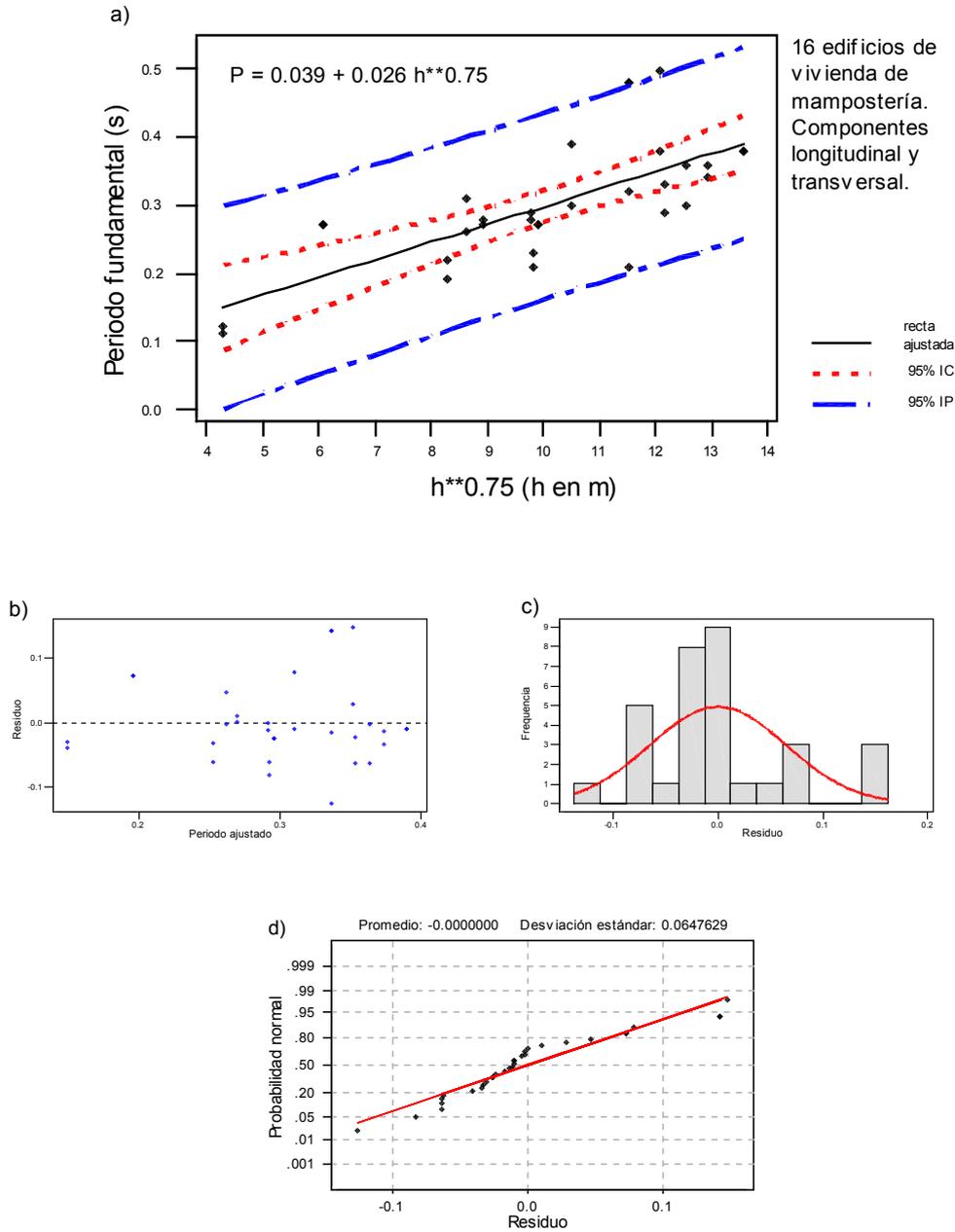


Figura 5.17 Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de vivienda de mampostería. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (ambas direcciones) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.

Los ajustes correspondientes a las figuras 5.13, 5.14 y 5.17 presentan una distribución de residuos que no se ajusta a una distribución normal, poniendo de

manifiesto la escasez de puntos utilizados. El mismo efecto también es notorio en las figuras 5.15 y 5.16.

Para los ajustes correspondientes a las figuras se han usado los datos de la Tabla 5.1. Se ha comprobado que se obtienen mejores ajustes mediante rectas que no pasan por el origen. La Tabla 5.3 resume las fórmulas empíricas halladas junto con las varianzas residuales medias. En los casos en que la varianza residual media de los ajustes correspondientes a rectas que pasan y que no pasan por el origen coinciden, se presentan ambas fórmulas. La Tabla 5.3 también incluye las desviaciones típicas asociadas a los coeficientes de las rectas ajustadas.

Edificios	Componente	Varianza Residual Media		Ecuación Ajustada	
		sin pasar por el origen	pasando por el origen		
25H+22M	longitudinal y transversal	0.004	0.006	P = 0.094 + 0.032 N 0.015 0.002	
25H+22M	longitudinal	0.004	0.005	P = 0.095 + 0.031 N 0.020 0.003	
25H+22M	transversal	0.005	0.006	P = 0.093 + 0.032 N 0.023 0.003	
25H	longitudinal y transversal	0.004	0.005	P = 0.089 + 0.032 N 0.023 0.003	
25H	longitudinal	0.004	0.006	P = 0.117 + 0.030 N 0.033 0.004	
25H	transversal	0.004	0.004	P = 0.060 + 0.035 N 0.032 0.004	
16H viviendas	longitudinal y transversal	0.003	0.003	P = -0.048 + 0.046 N 0.049 0.005	P = 0.041 N 0.001
9H escuelas	longitudinal y transversal	0.004	0.005	P = 0.101 + 0.034 N 0.033 0.007	
22M	longitudinal y transversal	0.004	0.004	P = 0.021 + 0.028 h ^{0.75} 0.028 0.003	P = 0.030 h ^{0.75} 0.001
22M	longitudinal	0.003	0.004	P = 0.087 + 0.031 N 0.027 0.004	
22M	transversal	0.004	0.004	P = 0.023 + 0.029 h ^{0.75} 0.042 0.004	P = 0.031 h ^{0.75} 0.001
16M viviendas	longitudinal y transversal	0.004	0.004	P = 0.039 + 0.026 h ^{0.75} 0.050 0.005	P = 0.030 h ^{0.75} 0.001

Tabla 5.3 Datos de los conjuntos de edificios clasificados por su tipología. El valor más bajo de la varianza residual media determina el mejor ajuste. Las últimas columnas muestran las ecuaciones ajustadas y bajo los coeficientes, sus errores estimados. También se añade la ecuación con el término constante igual a cero.

Pocos países diferencian las direcciones longitudinal y transversal para el cálculo de las fórmulas. En esta tesis se han analizado las componentes separadas. La Tabla 5.4 resume los resultados obtenidos en nueve casos, tres para cada una de las siguientes colecciones de datos: 1) todos los edificios juntos; 2) sólo edificios de hormigón armado; 3) sólo edificios de mampostería. En cada uno de estos casos se han

considerado: a) ambas componentes, longitudinal y transversal; b) sólo componente longitudinal, c) sólo componente transversal. Teniendo en cuenta los márgenes de error de los coeficientes de las fórmulas ajustadas se observa que las 3 fórmulas obtenidas para el caso de todos los edificios son equivalentes y a su vez, estas son equivalentes con las dos primeras fórmulas obtenidas para los edificios de hormigón. Sólo la componente transversal (P_T) de los edificios de hormigón parece apartarse ligeramente.

EDIFICIOS	P	P_L	P_T
25H+22M	$P=0.032N+0.094$	$P_L=0.031N+0.095$	$P_T=0.032N+0.093$
25H	$P=0.032N+0.089$	$P_L=0.032N+0.094$	$P_T=0.035N+0.060$
22M	$P=0.028h^{0.75}+0.021$	$P_L=0.027h^{0.75}+0.019$	$P_T=0.029h^{0.75}+0.023$

Tabla 5.4 Comparación de las fórmulas cuando se separan las componentes longitudinal de la transversal, para todos los datos juntos, los que corresponden a edificios de hormigón y los correspondientes a los edificios de mampostería.

Para los edificios de mampostería se obtienen mejores ajustes utilizando la fórmula que depende de $h^{0.75}$, pero, de forma análoga, las fórmulas obtenidas usando las componentes juntas y separadas son equivalentes.

Es importante resaltar la concordancia de los resultados obtenidos con los que obtuvieron Kobayashi et al., (1996) y Enomoto et al., (1997) con sendas muestras de edificios de Granada y Almería. La Tabla 5.5 resume estas fórmulas. Un resultado importante de este trabajo, es que los periodos fundamentales obtenidos con las fórmulas para estructuras de hormigón armado de Barcelona son mucho menores que los calculados con la fórmula de la Norma Sísmica Española (Figura 5.2).

Por otra parte, en la Tabla 5.6 se comparan los periodos medidos con los calculados con la fórmula facilitada por la Norma Sísmica Española para los edificios de mampostería. Se observa que en el 84% de los casos el periodo medido es mayor que el calculado, en promedio 46% mayor.

5.3.4 Conclusión

La conclusión más importante de este capítulo es la diferencia significativa entre los periodos calculados mediante la norma sísmica y los medidos. Los edificios de hormigón armado son más rígidos que lo previsto en la norma española, mientras que los edificios de mampostería son más flexibles. Por lo tanto, es importante realizar medidas *“in situ”*, cuando se requiera este tipo de información. Una posible causa de

estos efectos puede ser la influencia de los llamados elementos no estructurales en el comportamiento dinámico del edificio finalizado.

Lugar	Número de edificios	Utilización	Fórmula	R ²
Almería	23	vivienda	$P=0.048N$	--
Granada	18	mixta	$P=0.047N+0.034$	0.88
Barcelona	16	vivienda	$P=0.046N-0.048$	0.74

Tabla 5.5 Fórmulas empíricas obtenidas para edificios de hormigón armado en Almería, Granada y Barcelona. La mayoría de los datos de Granada provienen de edificios utilizados como vivienda y el resto de hospitales, escuelas y oficinas, incluyendo algunos edificios especiales.

ID	P _L	P _T	P _{CL}	P _{CT}	%L	%T
15	0.26	0.31	0.21	0.27	18	12
16	0.27	0.27	0.12	0.12	57	57
17	0.21	0.32	0.29	0.41	-39	-28
18	0.21	0.23	0.15	0.17	30	28
20	0.19	0.22	0.14	0.24	28	-9
21	0.28	0.29	0.19	0.42	34	-45
26	0.30	0.39	0.14	0.28	52	28
27	0.29	0.33	0.21	0.42	27	-28
28	0.48	0.48	0.18	0.35	63	28
29	0.36	0.30	0.19	0.23	46	24
51	0.28	0.27	0.14	0.17	49	37
52	0.38	0.50	0.19	0.31	49	37
72	0.27	0.27	0.14	0.21	47	21
83	0.11	0.12	0.07	0.09	36	29
87	0.36	0.34	0.12	0.21	67	38
129	0.38	0.38	0.45	0.38	-19	0
117	0.28	0.37	0.09	0.18	68	52
118	0.24	0.25	0.05	0.05	78	78
122	0.10	0.10	0.03	0.05	69	53
125	0.16	0.23	0.06	0.09	65	58
126	0.16	0.12	0.03	0.11	83	8
127	0.10	0.12	0.02	0.05	78	59

Tabla 5.6 Comparación de los valores de periodo fundamental de edificios de mampostería medidos (P) longitudinales y transversales, con los calculados mediante la norma española (Pc). Se incluyen también las diferencias porcentuales (%L, %T).

Por otra parte la fórmula empírica que más se ajusta a los periodos propios de los edificios típicos de la ciudad de Barcelona, es diferente para los edificios de hormigón armado y los de mampostería. Para edificios de hormigón o para las muestras en las que

interviene un número significativo de edificios de hormigón armado se obtienen mejores ajustes utilizando como parámetro el número de niveles. Sin embargo, para los edificios de mampostería, se obtienen resultados mejores utilizando el parámetro la altura elevada a una potencia de $3/4$ ($h^{0.75}$). Por lo tanto conviene utilizar este tipo de fórmulas para los edificios de mampostería. Además tanto para edificios de hormigón armado como para los de mampostería, no se observan variaciones significativas entre las componentes longitudinales y transversales, tan sólo la componente transversal del periodo propio de los edificios de hormigón parece apuntar un comportamiento ligeramente distinto al de la longitudinal.

Los resultados obtenidos concuerdan bien con otros trabajos efectuados en Almería, Granada y Lisboa por otros autores.

Para analizar la dependencia del periodo propio de los edificios, con la inclusión de lo que se da en llamar elementos no estructurales, se ha considerado interesante el seguimiento del acabado de un edificio, desde que se finalizó la construcción de los elementos estructurales hasta su acabado. Las lecciones aprendidas de esta investigación se describen en el apartado siguiente.

5.4 EVOLUCIÓN DEL PERIODO EN UN EDIFICIO.

Un número importante de casos y estudios, han puesto de manifiesto la importancia de considerar los elementos llamados no estructurales para el cálculo del periodo propio de los edificios. Kobayashi et al. (1996) encuentran en Granada, hasta una disminución del 33% entre el periodo de la estructura de un edificio de losa aligerada y el periodo del mismo edificio terminado. También Torkamani y Ahmadi (1988) encuentran para un edificio de Pennsylvania, una disminución del periodo del 15% entre la estructura inicial y el edificio final. En este último caso la fachada es de vidrio por lo que el aumento de rigidez probablemente proviene de los muros interiores y de la caja del ascensor y escalera.

La variación del período propio de un edificio durante la fase constructiva que va desde la construcción de la estructura hasta su acabado se debe fundamentalmente a la inclusión de elementos no estructurales (muros, tabiques, elementos de fachada, etc.). Estos elementos juegan un papel mucho más importante del que habitualmente se supone en los algoritmos utilizados para estimar numéricamente su periodo. La forma en que estos elementos no estructurales pueden variar la rigidez de la estructura será forzosamente dependiente de las formas constructivas locales. De entre estos elementos cabe mencionar los muros de mampostería que pueden hacer variar el periodo propio del edificio dependiendo de cómo se unan a la estructura, cómo se distribuyan, su forma, etcétera.

Durante la realización del trabajo se consideró importante realizar un seguimiento de un edificio que se hallaba con la estructura losa-columna finalizada. A este edificio se le llamará FU. Se han efectuado medidas de ruido cultural para estimar su periodo varias veces durante la fase final de construcción con el propósito de

analizar la influencia de estos elementos sobre el periodo y también clarificar la influencia de los diferentes elementos estructurales sobre el periodo. Este aspecto puede contribuir también a separar posibles causas de la dispersión observada en las mediciones de periodos en edificios estructuralmente parecidos pero cuya distribución interior puede ser distinta.

5.4.1 Características del edificio FU.

El edificio FU originalmente fue diseñado con la finalidad de albergar un ente administrativo, por lo tanto con las características de un edificio de oficinas. Dificultades presupuestarias y de diversa índole llevaron al abandono del proyecto cuando la estructura del edificio estaba prácticamente finalizada. Con posterioridad, se retomó el proyecto pero con un destino mixto con actividades de tipo administrativo y docente. Esto supuso una remodelación menor de la estructura y modificaciones importantes de la distribución interior de espacios. La Figura 5.18 presenta el edificio prácticamente terminado, la Figura 5.19 muestra su estructura formada por losas reticulares y columnas y la Figura 5.20 presenta el estado del edificio durante su construcción. La Tabla 5.7 presenta un esquema de las etapas constructivas.



Figura 5.18 Fotografía del edificio FU ya terminada su construcción.

Se aprovechó que el edificio estaba en construcción para efectuar mediciones sucesivas de vibración ambiental para analizar la variación del periodo fundamental debido al efecto de los elementos no estructurales, principalmente los muros.

El edificio FU está formado por cuatro secciones separadas por juntas de dilatación, centrándose el estudio en una sección de 8 niveles (Figura 5.21). Su estructura está compuesta por columnas y losas de hormigón armado. Cuatro de los niveles del edificio están por debajo de la rasante. La planta de sótano, más los dos primeros niveles, tienen losas macizas, mientras que los seis niveles superiores restantes tienen losas reticulares. Además, el último nivel tiene una zona con estructura de columnas y vigas metálicas y una cubierta de lámina de fibrocemento.



Figura 5.19 Fotografía de la estructura del edificio FU (etapa 1)



Figura 5.20 Fotografía de una sección del edificio FU durante la etapa 3 de su construcción.

De la Cruz (1999) analizó dos modelos analíticos de la estructura y calculó la respuesta dinámica mediante el programa de elementos finitos IMAGES-3D. Los dos modelos son tridimensionales formados por pórticos y losas. En uno de ellos se consideraron los muros exteriores. El valor del periodo fundamental del modelo estructural (sin muros) es de 0.28 s y el del modelo con muros es de 0.26 s. Se obtiene una variación del 7%.

La primera medida del periodo del edificio se realizó cuando la estructura estaba prácticamente terminada y se trabajaba en el refuerzo de la escalera mediante vigas de acero (Figura 5.22). El resto de medidas se efectuaron con posterioridad a la terminación de la estructura losa-columna. Estas etapas incluyen la finalización del nivel superior agregando algunos elementos metálicos, la construcción de los muros de separación y de la fachada, el acabado de los pisos y la finalización de las instalaciones.

ETAPA	Fecha de medición	OBRA
1	22/5/97	.- Estructura prácticamente terminada .- Refuerzo escalera con vigas de acero .- Inicio de cierre de fachadas con fábrica de ladrillo
2	3/10/97	.- Terminación de refuerzo de escalera .- Continuación de cierre de fachada .- Cierre de cámaras de escalera
3	10/3/98	.- Terminación de cierre de fachada .- Inicio de cierre de divisiones internas .- Inicio de colocación de pavimentos .- Inicio de algunas instalaciones
4	15/5/98	.- Continuación de colocación de pavimentos .- Continuación de instalaciones .- Continuación de cierre de divisiones internas .- Inicio de enyesado de techos y paredes
5	28/5/98	.- Se continúa como etapa anterior
6	2/9/98	.- Continuación de instalaciones .- Continuación de enyesado de techos y paredes .- Montaje de estructuras de apoyo de máquinas de aire
7	9/10/98	.- Continuación de instalaciones .- Inicio de montaje de suelos elevados

Tabla 5.7 Etapas constructivas con la descripción de las obras efectuadas y las fechas en que se realizaron las medidas.

5.4.2 Datos y resultados obtenidos

Los datos obtenidos muestran que el periodo disminuye a medida que avanza la construcción existiendo una variación total del periodo propio entre la estructura de losas y columnas y el edificio acabado del 40% para la componente longitudinal y del 33% para la transversal (Tabla 5.8). En la Figura 5.23 se presentan los espectros de Fourier de la aceleración medida en dos de las etapas constructivas en las que puede observarse el aumento de la frecuencia fundamental.

De forma simplificada, la masa del edificio M , junto con la rigidez k , influyen en el valor del periodo T , de acuerdo con la fórmula $T = \sqrt{\frac{M}{k}}$. Los aumentos de masa tienden a aumentar el periodo mientras que el aumento de la rigidez lo hace decrecer.

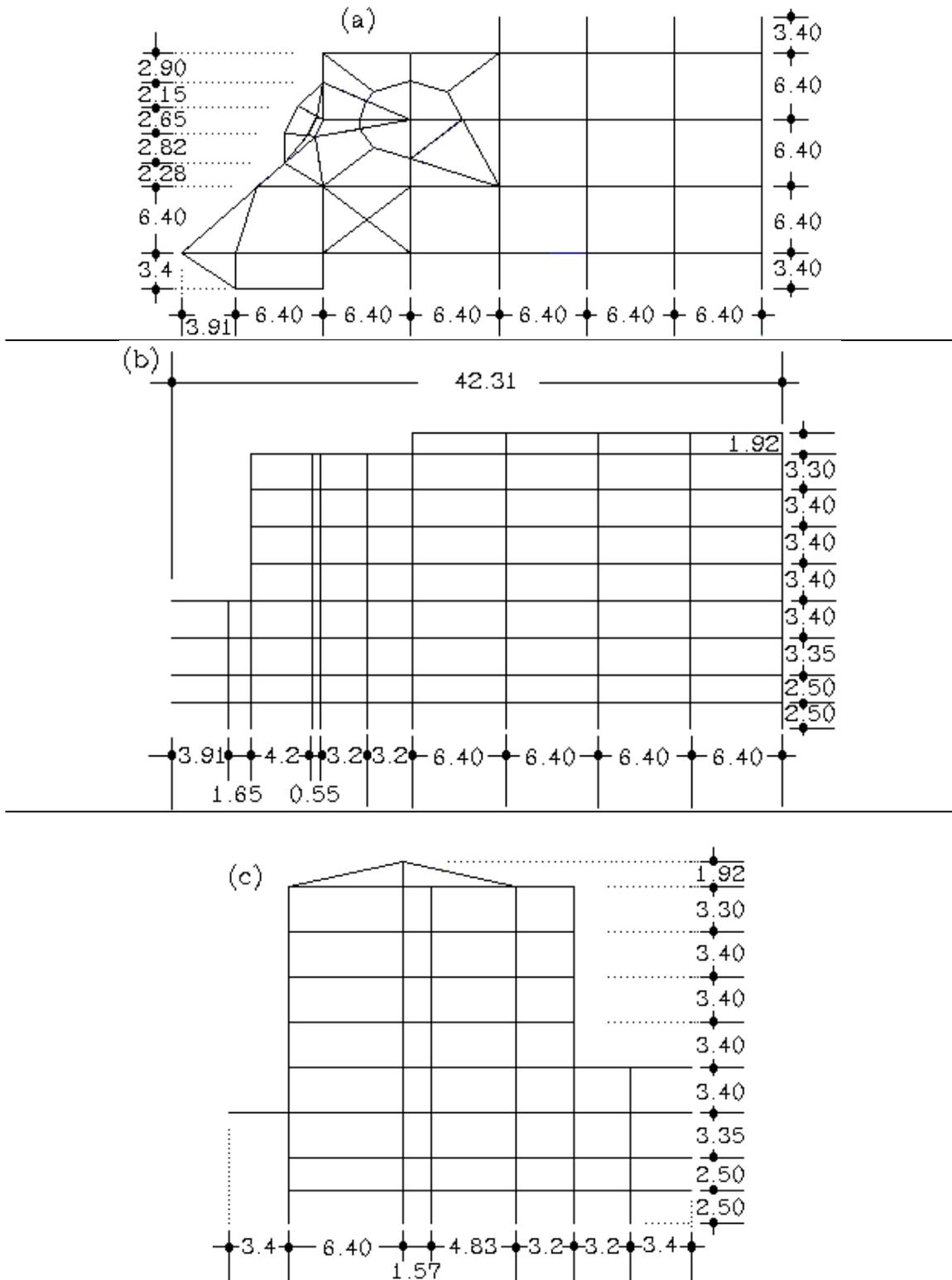


Figura 5.21 Esquema de la sección estudiada del edificio FU. a) Vista en planta; b) Alzado longitudinal; c) Alzado transversal. Todas las dimensiones se dan en metros.



Figura 5.22 Viga de acero con la que se refuerza la escalera de la sección del edificio FU analizada.

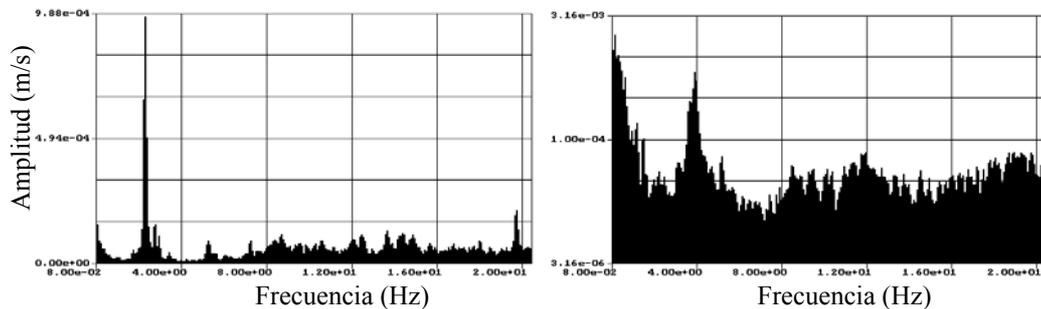


Figura 5.23 Ejemplos de señales medidas en el edificio FU. Espectros de Fourier de la componente longitudinal de la aceleración durante las etapas 1 y 7.

La Tabla 5.8 resume los valores de los periodos fundamentales medidos para las componentes transversal y longitudinal. Para la componente longitudinal se obtiene una variación sustancial entre los periodos correspondientes a las etapas 1 (0.43 s) y 7 (0.26 s). Se observa también que la variación importante se da entre las etapas 1 y 2 con una variación del 30%. Esta etapa corresponde al cierre de fachadas refuerzo y cierre de las escaleras. El periodo es menos sensible a la colocación del pavimento, tabiquería interior, montaje de estructuras de apoyo a instalaciones, etcétera. El aumento de masa, menos significativa respecto al total, queda compensada por la variación de la rigidez. No se observan diferencias significativas entre las etapas constructivas 4, 5, 6 y 7.

La componente transversal presenta un comportamiento análogo al de la longitudinal. Las diferencias más importantes se dan entre las fases constructivas 1 y 2 mientras que no se observan diferencias significativas en las etapas 5, 6 y 7.

ETAPA	P _L (s)	VP _L (%)	P _T (s)	VP _T (%)
1	0.43	-	0.40	-
2	0.30	30	0.32	20
3	0.28	35	0.30	25
4	0.26	40	0.30	25
5	0.26	40	0.28	30
6	0.24	44	0.27	33
7	0.26	40	0.27	33

Tabla 5.8 Valores de periodos fundamentales longitudinal y transversal (en segundos) medidos en las etapas constructivas del edificio FU. Las columnas tercera y quinta muestran, en %, la variación respecto de la fase 1 del periodo longitudinal (VP_L) y del periodo transversal (VP_T).

El mayor aumento de rigidez ha sido causado por la construcción de los muros de la fachada del edificio y del refuerzo de la escalera. Estas dos causas han provocado una disminución de entre el 20% y el 30% del periodo del edificio, mientras que los muros interiores han producido una disminución de alrededor del 10%. Aunque sólo cualitativamente, este resultado es congruente con los resultados de los modelos analíticos donde se encuentra que el periodo disminuye un 7% debido a la colocación de muros de la fachada. Las medidas experimentales indican variaciones más importantes, probablemente debido a un dimensionado distinto en la realidad y en el modelo.

5.4.3 Conclusiones

Un resultado importante del presente estudio es la gran importancia que presentan los elementos no estructurales en el periodo propio de un edificio. Elementos que son llamados no estructurales, realmente forman parte del sistema resistente de la estructura y deben ser considerados en el modelado estructural y en el análisis del comportamiento sísmico de los edificios. Especial relevancia presentan los muros de la fachada que son responsables de la variación más importante del periodo (superior al 25 %).

Otro punto importante es el comportamiento sísmico que presentarán los muros durante una acción sísmica. El deterioro durante un terremoto, de los muros de cortante causa la variación ya que su comportamiento como muros de cortante puede causar el cambio del periodo propio del edificio; al variar su rigidez varía la del edificio.

Es conveniente complementar este trabajo con el estudio de un edificio más sencillo que el aquí analizado. A ser posible coordinando las campañas de medida con las de ejecución de la obra, de forma que se pueda controlar minuciosamente la incorporación de los elementos estructurales y no estructurales. También es conveniente disponer de modelos más realistas del edificio analizado. Aunque de la experiencia de este trabajo se conoce que no es fácil coordinarse con las constructoras, se apunta esta

línea de trabajo futuro, por los beneficios especiales que se obtendrían de un seguimiento minucioso y controlado de las fases constructivas del edificio. Los resultados aquí obtenidos indican que se alcanzarían resultados importantes y valiosos.

5.5 ANÁLISIS DE DISPERSIÓN

El análisis de la variación del período con las fases constructivas de un edificio explica la dispersión que presentan las fórmulas empíricas que expresan el periodo con la altura, o con el número de niveles. Son fórmulas útiles pero excesivamente simples. La dispersión observada se debe a un gran número de variables y a la influencia tanto de elementos estructurales como no estructurales. Para evaluar las variables relevantes que afectan el esparcimiento de los datos se realizó un análisis de regresión lineal multivariante con los datos de los 18 edificios analizados en la ciudad de Adra y dos de Barcelona. Todos ellos edificios de hormigón de 4 niveles.

Para cada uno de ellos se estimaron las dimensiones longitudinal y transversal, el área de la planta, la edad, la altura y, en cada dirección, la densidad de muros, la esbeltez (altura dividida entre la dimensión) y la luz promedio entre columnas. Se utilizaron estas variables por considerarse las más importantes y por ser factible su medición directa en campo o sobre planos estructurales. El servicio de protección civil de Adra nos facilitó el acceso a los planos de los edificios medidos. A pesar que su contribución al periodo fundamental del edificio puede ser importante, otras cantidades como las características de la losa de hormigón (su refuerzo), la existencia y características de las vigas o la forma en altura del edificio no fueron consideradas por la dificultad en ser evaluadas y cuantificadas. La Tabla 5.9, presenta las variables analizadas y sus valores.

5.5.1 Método de análisis

Con los datos de la Tabla 5.9, se procedió a realizar un análisis de regresión lineal multivariante entre el periodo de los edificios y el resto de parámetros, sus inversos y la raíz cuadrada de las dimensiones en planta mediante el paquete de cálculo estadístico SPSS. Las regresiones se han hecho entre el periodo (transversal y longitudinal conjuntamente) y las características constructivas en su propia dirección y en la perpendicular. También se han realizado por separado los ajustes de los periodos propios longitudinal y transversal, respecto a 22 variables de las cuales 8 son independientes y el resto cantidades derivadas de ellas (productos, inversas y la raíz cuadrada de la dimensión en planta).

El método de cálculo utilizado fue el de regresión lineal múltiple con eliminación de variables hacia atrás (backward) con el criterio de probabilidad de F, cortándose el proceso iterativo cuando el nuevo ajuste provocaba una variación significativa del coeficiente de regresión R^2 . El método de eliminación de variables mediante el criterio de probabilidad de F garantiza que la variable excluida en cada paso sea la que su coeficiente presenta un error porcentual mayor y por tanto es menos significativa.

También se han realizado otras pruebas eliminando variables diferentes a las determinadas por el test de probabilidad de F.

ID	P	P _p	E	L	L _p	d	d _p	h	Luz	Luz _p
A2	0.177	0.240	14	30.0	19.0	0.023	0.020	12.0	3.8	4.5
A3	0.199		3	27.6	21.0	0.025	0.043	12.8	4.6	5.3
A5	0.272	0.171	6	18.4	7.7	0.033	0.035	12.0	3.7	4.4
A6		0.227	15	30.0	8.8	0.035	0.022	11.7	4.0	5.2
A7	0.321	0.187	7	23.0	8.5	0.040	0.028	12.8	3.9	3.8
A10		0.140	7	29.5	7.6	0.043	0.032	12.7	4.9	3.8
A11	0.167	0.187	15	10.7	10.8	0.034	0.019	11.8	6.6	6.6
A13	0.151	0.195	17	24.0	12.0	0.048	0.013	12.0	4.8	4.0
A15		0.167	23	11.9	10.0	0.036	0.020	12.7	4.2	3.5
A16	0.270	0.266	23	23.8	8.5	0.017	0.021	11.8	4.8	4.3
A17	0.154	0.153	25	14.7	9.5	0.023	0.034	12.0	3.7	4.4
A19	0.216	0.255	23	14.0	8.4	0.039	0.027	12.2	3.5	4.2
A20	0.133	0.162	23	30.0	11.0	0.028	0.017	11.9	3.8	3.6
A21	0.195	0.198	18	13.5	13.5	0.029	0.043	12.0	4.8	3.4
A22	0.223	0.189	18	24.0	13.0	0.026	0.038	12.0	4.3	3.9
A23	0.305	0.259	18	23.6	19.4	0.022	0.023	12.0	4.7	3.2
A24	0.195	0.153	18	13.6	13.6	0.025	0.037	12.0	3.3	4.2
A26	0.212	0.160	16	18.5	17.6	0.026	0.035	12.0	4.6	4.4
B112	0.261	0.255	30	29.7	11.5	0.006	0.002	15.9	4.5	6.5
B113	0.171	0.223	30	37.8	10.0	0.054	0.032	17.2	3.5	3.2

Tabla 5.9 Periodos propios y características básicas de los 18 edificios seleccionados en Adra y los 2 de Barcelona. Todos los edificios son de hormigón y tienen 4 niveles. ID es un número de identificación, P es el periodo en la dirección L (en segundos), P_p es el periodo en la dirección L_p (en segundos). E es la edad en años; L y L_p son, respectivamente, la dimensión en planta en una dirección y en la dirección perpendicular (la mayor de ambas direcciones es la dirección longitudinal y la menor es la transversal; ambas dimensiones en metros). d y d_p son las densidades de los muros en las direcciones de medida de L y L_p respectivamente, ambas densidades se definen como la razón entre el área de los muros en la dirección considerada y el área de la planta; d y d_p son parámetros adimensionales. h es la altura en metros y Luz y Luz_p son, respectivamente, las longitudes medias de las luces entre columnas en las direcciones de L y L_p, ambas expresadas en metros.

Para el ajuste final se ha dado especial atención a que los coeficientes de las variables fueran significativos y que tanto la suma de los cuadrados de los residuos como los residuos individuales fueran pequeños. Los coeficientes de las variables en el ajuste se han considerado significativos cuando su error es inferior al 25%. Los residuos se han considerado pequeños cuando individualmente no sobrepasan el 10% (se considera que es una cota superior del error de medida) y su media es dos órdenes de magnitud inferior a la media de los valores.

5.5.2 Resultados

Como se ha indicado anteriormente, se ensayaron un total de 22 variables, introduciendo todos los valores de la Tabla 5.9 y los derivados de ellos. De estas 22, tres fueron directamente rechazadas durante el proceso de análisis y se llegó a ajustar dos modelos. Ambos modelos, a los que se les llamó modelo 1 y modelo 2, dieron ajustes malos indicando la conveniencia de separar las componentes transversal y longitudinal de los periodos medidos. La Tabla 5.10 presenta las variables involucradas en cada uno de los dos ajustes, el valor de los coeficientes correspondientes y los intervalos de error de cada uno de ellos.

Seguidamente se procedió a ajustar los periodos longitudinales y transversales por separado, pero incluyendo todas las variables y dejando que el análisis multivariante eliminara los parámetros no significativos. Se obtuvieron así dos nuevos modelos, a los que nos referimos como modelo longitudinal y modelo transversal. Estos modelos proporcionan ajustes significativamente mejores con errores más pequeños y buenos coeficientes de correlación. Las fórmulas matemáticas completas se presentan más adelante y en la Tabla 5.11 se muestran las variables que intervienen, los coeficientes y los errores correspondientes. Se observa una gran diferencia entre los errores de los modelos 1 y 2 y los de los modelos longitudinal y transversal.

		Modelo 1		Modelo 2	
		coeficiente	error (%)	coeficiente	error (%)
Constante		5.366	87	-1.620	67
Altura	h	-0.352	60		
Altura ⁻¹	h ⁻¹	-61.500	59	-2.911	93
Area	A	6.862E-04	86		
Area ⁻¹	A ⁻¹	-23.751	130		
Densidad de Muros	d	-1.041	39	-2.622	35
Densidad de Muros ⁻¹	d ⁻¹	-5.273E-04	51		
Densidad de Muros Perpendicular	d _p	-1.041	124		
Dimensión	L	-1.015E-02	81		
Dimensión ⁻¹	L ⁻¹	30.084	49	16.345	56
Dimensión Perpendicular ⁻¹	L _p ⁻¹	7.813	93	6.730	43
Dimensión Perpendicular ^{1/2}	L _p ^{-1/2}	1.546	41	0.749	52
Edad	E	-6.678E-03	51	-5.493E-03	53
Edad ⁻¹	E ⁻¹	-1.174	47	-0.538	61
Esbeltez	Es	-2.382	51	-1.368	55
Esbeltez Perpendicular	Es _p	0.550	94		
Esbeltez Perpendicular ⁻¹	Es _p ⁻¹	-1.783	40	-0.798	55
Luz ⁻¹	Luz ⁻¹	-0.219	128		
Luz Perpendicular	Luz _p	-3.404E-02	41	-2.015E-02	55

Tabla 5.10 Resultados de dos modelos que relacionan el periodo fundamental (ambas componentes) con un grupo de variables que se consideran podrían ser importantes (ver explicación en el texto).

Las expresiones matemáticas de los modelos de la Tabla 5.11 son:

Modelo longitudinal

$$P_L = -7.85 - \frac{3.22}{h} - 0.00143A + \frac{69.6}{A} + 6.82d_p + \frac{0.00131}{d_p} + \frac{9.62}{L_p} + 0.779\sqrt{L_p} +$$

$$-1.271E_s + 0.680Luz + \frac{11.67}{Luz} - 0.0802Luz_p$$

Modelo transversal

$$P_T = -20.4 + 0.806h + \frac{137}{h} + \frac{143.1}{A} + \frac{0.00294}{d} - 15.9d_p - \frac{0.0088}{d_p} + 0.0261L +$$

$$-0.0305E - \frac{3.89}{E} - 0.867E_{sp} - 0.342Luz - \frac{4.38}{Luz} + 0.386L_p + \frac{5.70}{L_p}$$

		modelo longitudinal		modelo transversal	
		coeficiente	error (%)	coeficiente	error (%)
Constante		-7.85	6	-20.4	7
Altura	h	-	-	0.806	8
Altura ⁻¹	h ⁻¹	-3.22	23	137	8
Area	A	-0.00143	7	-	-
Area ⁻¹	A ⁻¹	69.6	12	143.1	7
Densidad de Muros ⁻¹	d ⁻¹	-	-	0.00294	17
Densidad de Muros Perpendicular	d _p	6.82	9	-15.9	20
Densidad de Muros Perpendicular ⁻¹	d _p ⁻¹	0.00131	7	-0.0088	24
Dimensión	L	-	-	0.0261	6
Dimensión Perpendicular ⁻¹	L _p ⁻¹	9.62	7	-	-
Dimensión Perpendicular ^{1/2}	L _p ^{-1/2}	0.779	5	-	-
Edad	E	-	-	-0.0305	9
Edad ⁻¹	E ⁻¹	-	-	-3.89	9
Esbeltez	Es	-1.271	8	-	-
Esbeltez Perpendicular	Es _p	-	-	-0.867	6
Luz	Luz	0.680	7	-0.342	14
Luz ⁻¹	Luz ⁻¹	11.67	8	-4.38	18
Luz Perpendicular	Luz _p	-0.0802	8	0.386	13
Luz Perpendicular ⁻¹	Luz _p ⁻¹	-	-	5.70	14

Tabla 5.11 Parámetros que intervienen en el ajuste, valor de los coeficientes y errores correspondientes, para dos modelos ensayados considerando variable independiente los periodos predominantes en la dirección longitudinal y transversal respectivamente. Los lugares vacíos corresponden a parámetros rechazados por el análisis multivariante.

La Tabla 5.12 resume los parámetros de dispersión de los 4 modelos finales. En esta última tabla también se presenta el número de variables de cada modelo.

	R^2	suma de residuos al cuadrado	suma de valores al cuadrado	máximo residuo individual	número total de variables	variables independientes	variables dependientes
modelo 1	0.563	3.530E-02	4.538E-02	40 %	18	8	10
modelo 2	0.396	4.780E-02	3.198E-02	47 %	10	8	2
longitudinal	0.997	3.401E-04	4.847E-02	5.8 %	11	6	5
transversal	0.998	1.491E-04	3.009E-02	5.4 %	14	8	6

Tabla 5.12 Comparación de los cuatro modelos finales, dos (modelos 1 y 2) con ambas componentes del periodo fundamental juntas y dos (longitudinal y transversal) con las componentes separadas.

Es clara la mejora de los parámetros de dispersión en los modelos longitudinal y transversal respecto a los modelos 1 y 2. Este hecho pone de manifiesto la conveniencia de separar ambas componentes e indica que, sin menospreciar las fórmulas empíricas simplificadas, que son útiles y cómodas de aplicar, es conveniente avanzar en la cuantificación de otros factores que, sin duda, influyen en el periodo. Además de los parámetros aquí ensayados pueden existir otros como por ejemplo: las características de la losa y de las vigas, la forma o la carga del edificio.

Otra conclusión de este trabajo es la importancia que adquieren los elementos no estructurales en los edificios de hormigón armado. También es importante destacar que se necesitan más datos para determinar cuáles de las variables constructivas son más significativas en el cálculo del periodo fundamental. Un método económico y posible de aumentar la información a utilizar sería modelar edificios mediante programas de cálculo dinámico de estructuras que tengan en cuenta la interacción con los elementos no estructurales. El ajuste de este programa se realizaría con los edificios utilizados en este trabajo y con el edificio FU (Espinoza et al., 1998 a). Esto permitiría acercar los modelados numéricos a las características reales de los edificios medidos.

5.6 APLICACIÓN EN UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Una ventaja de las fórmulas empíricas simplificadas, consiste en su facilidad de uso para determinación masiva de periodos propios de edificios. A partir de los datos sobre los edificios de la ciudad de Barcelona implementados en un sistema ARC-Info, es sencillo conocer la altura o el número de niveles de cada uno de ellos. Mena (1999) utiliza las fórmulas aquí desarrolladas para estimar periodos fundamentales de los edificios de hormigón armado y mampostería. En la Figura 5.24 se presentan los barrios de Barcelona y en la Figura 5.25 se presentan los edificios de l'Eixample Dreta con el periodo propio de cada uno de los edificios. En la Figura 5.26 se muestran los periodos fundamentales correspondientes a los edificios del barrio del Bon Pastor. Existen diferencias significativas entre el comportamiento de los edificios de ambos barrios. El cruce de esta información con las características de los suelos es de gran importancia para detectar posibles fenómenos de resonancia. Los suelos de l'Eixample están

constituidos por arcillas consolidadas del terciario mientras que los del Clot están formados por sedimentos cuaternarios poco consolidados aportados por el río Besós.

Se presentan los resultados utilizando un código de colores que agrupa los periodos en 6 clases que van desde 0.09 s (color amarillo) hasta 0.57 s (rojo intenso).

Figura 5.25 Edificios del Eixample Dreta, con los periodos propios correspondientes.

5.7 CONCLUSIONES

Las fórmulas empíricas para el cálculo del periodo fundamental de edificios de la ciudad de Barcelona que mejor ajustan son los que están en función del número de niveles para edificios de hormigón armado y de $h^{0.75}$ para los edificios de mampostería no encontrándose una diferencia apreciable entre las direcciones longitudinal y transversal.

Al comparar los resultados de las mediciones de periodos de los edificios de Barcelona con los periodos calculados con la norma sísmica española se observa que los edificios de hormigón armado son más rígidos y los de mampostería más flexibles que los supuestos por la norma.

El seguimiento de las fases constructivas de un edificio, ha permitido establecer que su periodo fundamental depende de los llamados elementos no estructurales, siendo ésta una de las posibles causas de dispersión detectada en las fórmulas empíricas simplificadas, y de las diferencias entre los periodos simulados y los medidos.

Se efectuó un análisis de la dispersión de los datos tomando constante el número de niveles y trabajando con variables constructivas que se consideraron relevantes no obteniéndose ajustes satisfactorios cuando se unieron los valores longitudinales y transversales del periodo, mientras que el ajuste fue bueno cuando ambas componentes estaban separadas. Los resultados señalan una línea de continuación de este trabajo y es la búsqueda de relaciones potenciales, como la encontrada entre el periodo fundamental y la altura, ahora entre dicho periodo y el área, la densidad de muros perpendicular y la luz en sus dos direcciones.

Los resultados de este capítulo, son directamente aplicables a la estimación masiva de los periodos propios de los edificios de zonas urbanas. La aplicación a dos barrios característicos de la ciudad de Barcelona ha puesto de manifiesto diferencias significativas en los periodos propios de los edificios de ambos barrios. Esta aplicación permite identificar con rapidez y sencillez posibles zonas de resonancia entre los edificios, los periodos predominantes de los suelos y las señales sísmicas esperadas, constituyendo, por tanto una excelente herramienta para la prevención y minoración de riesgo sísmico en zonas urbanas.