

ANALISIS DE LAS MEDIDAS DE PERIODOS DE VIBRACION DE EDIFICIOS NUEVOS

Raúl HUSID*

RESUMEN

Se hace un análisis de las medidas de períodos de oscilación en edificios nuevos de estructura de acero y otras de hormigón armado con el objeto de investigar la validez de las fórmulas dadas por la ordenanza SEAOC, actualmente en vigencia, cuando se aplican a edificios modernos.

Se demuestra que es posible encontrar expresiones mejores para estimar el período de edificios, que las actualmente en uso.

Cuando se dispone de datos se comparan las medidas de períodos efectuados antes y después de sismos fuertes, para investigar la posibilidad de cambios en dichos períodos. Se demuestra la imposibilidad de obtener una conclusión general con los datos disponibles y se recomienda proseguir estudiando el tema.

INTRODUCCION

Varios autores han señalado que los períodos naturales de vibración dan mucha información respecto de las características dinámicas de edificios de muchos pisos^{1, 2, 3}. Desde que se desarrollaron y codificaron las técnicas espectrales para medir fuerzas laterales producidas por sismos^{4 a 7}, el período de los edificios ha llegado a ser un factor importante para el ingeniero en el cálculo de edificios que han de resistir fuerzas laterales.

Durante muchos años, el U.S. Coast and Geodetic Survey ha realizado mediciones de períodos de edificios en los Estados Unidos. Recientemente se ha intensificado este programa de medición de períodos, y se ha obtenido una

*Profesor Auxiliar de Mecánica Racional, Escuela de Ingeniería, Universidad de Chile, becado en el California Institute of Technology, por la Organización de Estados Americanos (OEA).

considerable cantidad de datos de edificios nuevos. El propósito del presente artículo es analizar estos nuevos datos a la luz de algunos tipos de fórmulas que relacionan los períodos con las características de los edificios y que se utilizan o proponen en algunas ordenanzas. El autor expresa sus agradecimientos a Mr. W.K. Cloud, jefe del Seismological Field Survey, USCGS, por facilitar dichos datos para este propósito⁹.

Un segundo propósito es examinar los datos sobre mediciones de períodos de una estructura, realizadas antes y después de un terremoto, para ver si ocurre algún cambio significativo.

Los edificios nuevos que se consideran, son de dos clases: de estructura de acero y de hormigón armado. En la primera parte de este artículo sólo se incluyen edificios construidos desde 1957, los cuales se encuentran ubicados en Los Angeles, Beverly Hills, Santa Ana y Long Beach, en California; y Seattle en Washington.

ANÁLISIS DE LAS FORMULAS DE PERIODOS

En los edificios de estructura de acero que se consideran, las fuerzas laterales se soportan principalmente por una estructura resistente a los momentos. Primeramente se compararán las medidas de períodos con la fórmula dada en la ordenanza antisísmica vigente de la Structural Engineers Association of California⁹.

$$T = 0,1 N \quad (1)$$

en la cual T es el período y N el número de pisos.

La Tabla I da las medidas de los períodos.

Comenzando con una muestra de cinco edificios de estructura espacial, Housner y Brady¹ demuestran que se obtiene un buen ajuste de las medidas de los períodos usando, ya sea la fórmula

$$T = 0,5 \sqrt{N} - 0,4 \quad (2)$$

o bien

$$T = 0,08 N \quad (3)$$

Debido a que actualmente se dispone de una mayor información sobre este tipo de edificios, se puede estudiar el período como una función de N o de H.

En función de la variable N se han ajustado dos tipos de expresiones a los datos de la Tabla I.

TABLA I
EDIFICIOS DE ESTRUCTURA DE ACERO

N	H (pies)	D (pies)	T (seg)
7	115	150	0.82
7	115	70	1.10
18	240	70	1.36
18	240	210	1.19
21	260	285	1.22
21	260	56	1.37
12	136	41	0.94
12	136	36	0.88
25	272	--	2.40
25	272	--	2.60
25	272	--	1.74
25	272	--	2.12
25	272	--	1.71
25	272	--	2.14
18	260	165	1.12
18	260	152	1.03
20	222	130	1.67
20	222	92	1.60
20	222	130	1.75
20	222	92	1.67
15	198	66	1.13
4	53	260	0.23
4	53	108	0.26
22	287	210	1.50
22	287	90	2.10
21	298	134	1.06
21	298	115	1.19
21	298	134	1.11
21	298	115	1.25
21	256	115	1.69
21	256	138	1.65
19	297	70	2.19
19	297	70	2.41
10	114	100	0.86
10	114	47	0.83
4	60	--	0.21
4	60	--	0.25
12	--	180	1.10
12	--	64	1.23
8	114	220	0.98
8	114	40	1.03
11	152	72	0.60
11	152	216	1.08

$$T = AN + B \quad (4)$$

y

$$T = CN \quad (5)$$

En las cuales A, B y C son constantes.

La línea de mínimos cuadrados da para estos casos:

$$T = \frac{N+2}{14} \quad (4')$$

$$T = 0,08 N \quad (5')$$

Con el fin de visualizar estos resultados y también para tener una manera simple de decidir cuál de las expresiones es la que mejor se ajusta a las medidas las ecuaciones (1), (4') y (5') se representan gráficamente en la Fig. 1, y la ecuación (2) en la Fig. 2. En la Fig. 1 se ve que (4') y (5') dan prácticamente los mismos resultados.

Es interesante notar que la fórmula (5') es igual a una de las tres sugeridas recientemente por Housner y Brady¹.

En la Fig. 1 puede verse que la fórmula (1) usada en la ordenanza vigente, da por lo general períodos mayores que los correspondientes a la recta de mejor ajuste. Puesto que las fuerzas laterales prescritas por la ordenanza disminuyen para grandes períodos, un error por exceso en el período va en menoscabo de la seguridad.

Considerando todas las mediciones, se ve que sólo hay seis valores de períodos que sobrepasan en más de 30% a los valores dados por la ecuación (5').

La Fig. 2 muestra que la fórmula (2) no es muy adecuada para hacer una estimación del valor del período de un edificio de estructura espacial, ya que tiende a dar un resultado no conservador.

Aunque en edificios regulares, la altura H y el número de pisos N son prácticamente la misma variable, hay casos en los cuales es más conveniente usar H.

Se puede encontrar una relación simple para T en función de H, en la expresión:

$$T = a H \quad (6)$$

Usando los datos de la Tabla I, el ajuste de la línea de mínimos cuadrados da:

$$a = \frac{1}{160} \quad (7)$$

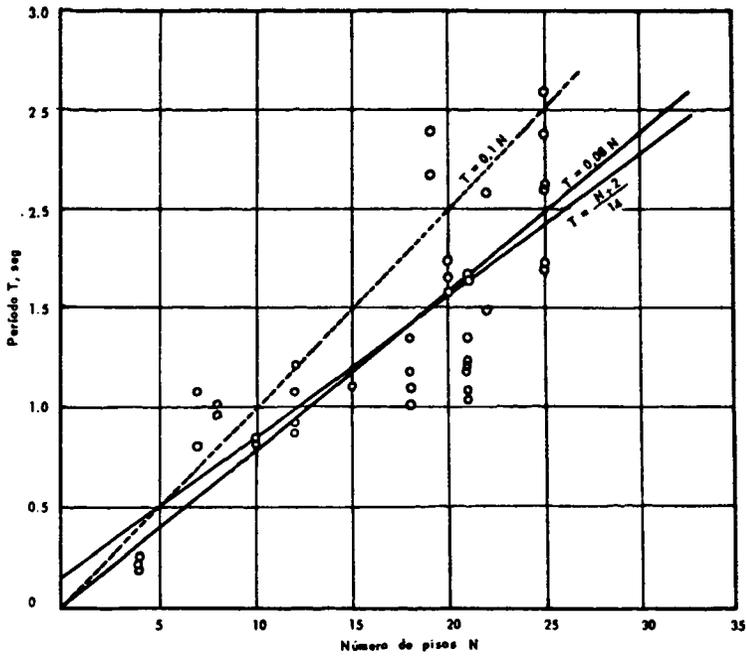


Fig. 1. Edificios de estructura de acero. Período en función del número de pisos, N.

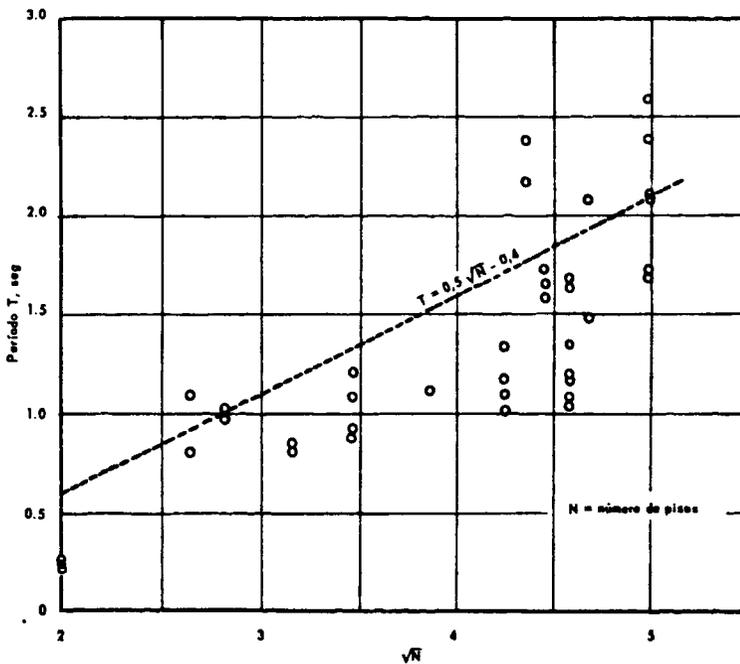


Fig. 2. Edificios de estructura de acero. Período en función de \sqrt{N} .

Los resultados se pueden ver en la Fig. 3. La mayor discrepancia por exceso es del orden de 50%.

Considerando que a veces los ingenieros usan la ecuación

$$T = 0,05 \frac{H}{\sqrt{D}} \quad (8)$$

para hacer una estimación del período de un edificio, resulta interesante encontrar el mejor ajuste entre T y la variable

$$\frac{H}{\sqrt{D}}$$

con los datos mencionados anteriormente. Los resultados pueden verse en la Fig. 4.

La ecuación de la línea de mínimos cuadrados es:

$$T = 0,06 \frac{H}{\sqrt{D}} \quad (9)$$

y las medidas de períodos son un 20% mayores que las prescritas en la ordenanza.

Se encuentra, como antes^{1,3,10}, que las ecuaciones (8) y (9) no son conve-

TABLA II
EDIFICIOS DE HORMIGON ARMADO

H (pies)	N	D (pies)	T (seg)	$N\sqrt{B}$
119	9	--	0.37	--
119	9	--	0.39	--
184	12	234	1.06	186.0
184	12	240	0.96	183.0
165	10	250	0.89	158.0
227	17	--	0.62	--
227	17	--	0.59	--
174	14	--	0.91	--
174	14	--	0.98	--
117	8	100	0.64	65.5
117	8	67	0.62	80.0
160	14	--	0.57	--
160	14	--	0.73	--
153	12	100	1.13	170.0
153	12	200	0.87	120.0
115	9	121	0.74	70.0
115	9	61	0.73	99.0
153	12	100	1.07	170.0
153	12	200	0.83	120.0
51	4	173	0.30	44.0
51	4	120	0.30	52.5
62.5	5	25	0.44	56.0
62.5	5	125	0.39	25.0

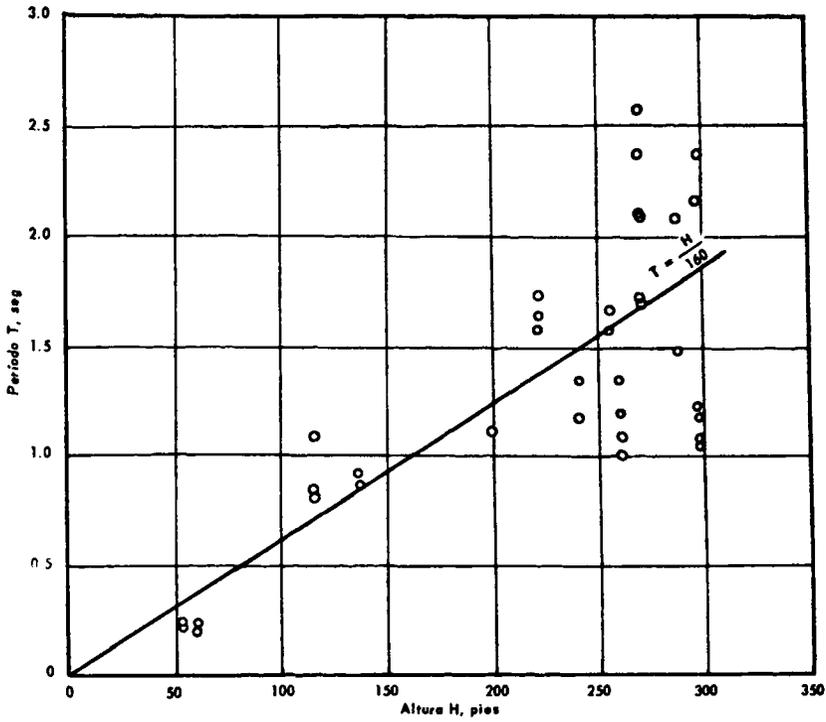


Fig. 3. Edificios de estructura de acero. Período en función de la altura, H.

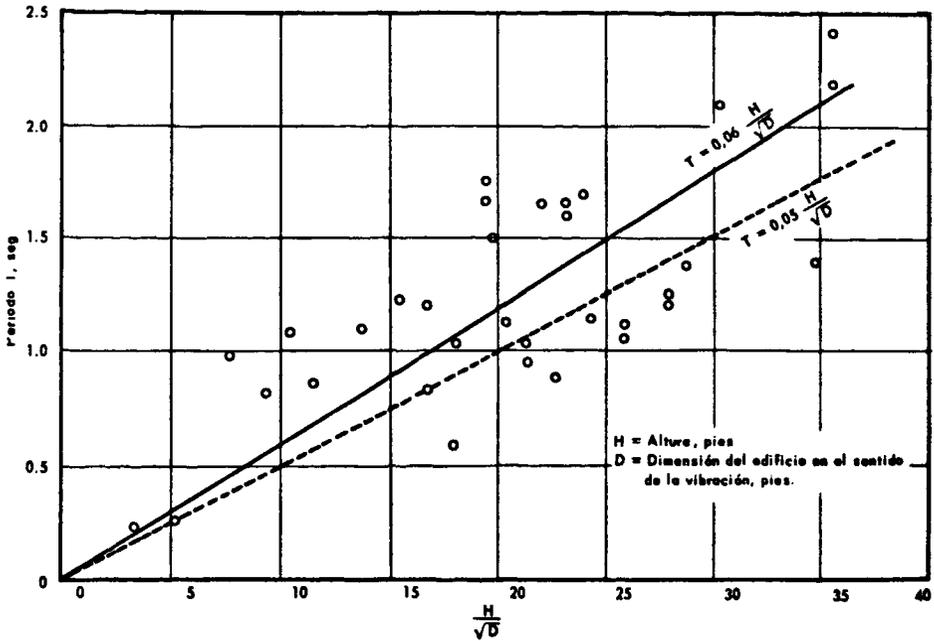


Fig. 4. Edificios de estructura de acero. Período en función de $\frac{H}{\sqrt{D}}$

nientes para expresar el período de un edificio. Se puede observar que hay, respectivamente, un 55% y un 36% de los períodos medidos, que muestran diferencias mayores de $\pm 30\%$ con respecto a los períodos determinados por dichas ecuaciones. Al usar las ecuaciones (5') y (6), que son más sencillas, el número de datos que caen fuera de los límites mencionados es de 23% y 34% respectivamente.

El mismo análisis anterior se repite ahora para edificios de hormigón armado. Los datos correspondientes se pueden encontrar en la Tabla II.

En la Fig. 5 se da el período como una función del número de pisos. La recta de mejor ajuste fue:

$$T = 0,064 N \quad (10)$$

En la Fig. 6 se da un gráfico de T vs. H , en el cual se ha trazado la recta de mejor ajuste:

$$T = \frac{H}{205} \quad (11)$$

Con los datos disponibles se han encontrado discrepancias máximas del orden de 50% al usar las ecuaciones (10) y (11).

Se va a examinar ahora la conveniencia del parámetro $\frac{H}{\sqrt{D}}$ para edificios de hormigón armado. En la Fig. 7 se da el resultado de la recta de mejor ajuste, junto con la fórmula de T que recomienda el SEAOC Code para estimar el período⁹. Nuevamente se puede observar que las discrepancias son grandes, como ya ha sido señalado por varios investigadores a base de datos antiguos^{1,3,10,11}.

Se ha mencionado¹ que para el tipo de edificios norteamericanos con muros resistentes al cizalle, la fórmula:

$$T = C N\sqrt{B} \quad (12)$$

puede dar una buena estimación del período fundamental.

Usando los datos chilenos³, se concluye que en este caso, la ecuación (12) no es una buena aproximación. Los nuevos datos norteamericanos pueden usarse ahora para verificar la fórmula (12).

En la Fig. 8 se ve que las mismas conclusiones son extensivas tanto a estos edificios como a los edificios chilenos. La línea de la Fig. 8 representa el mejor ajuste para los datos y muestra discrepancias sobre el 150%.

PERIODOS DE EDIFICIOS ANTES Y DESPUES DE TERREMOTOS

Durante muchos años los ingenieros han supuesto que los períodos de los edi-

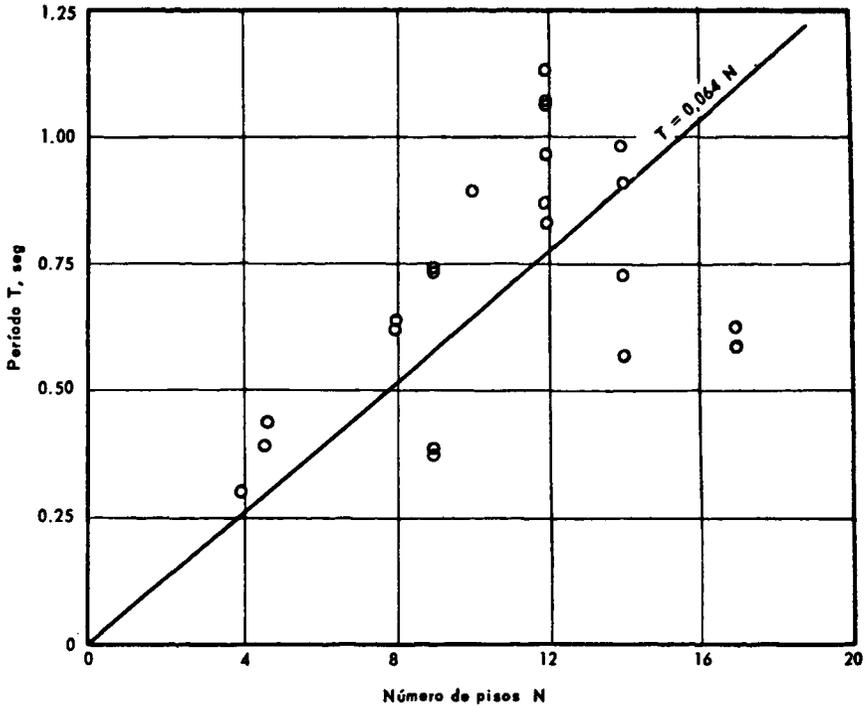


Fig. 5. Edificios de hormigón armado. Período en función del número de pisos, N.

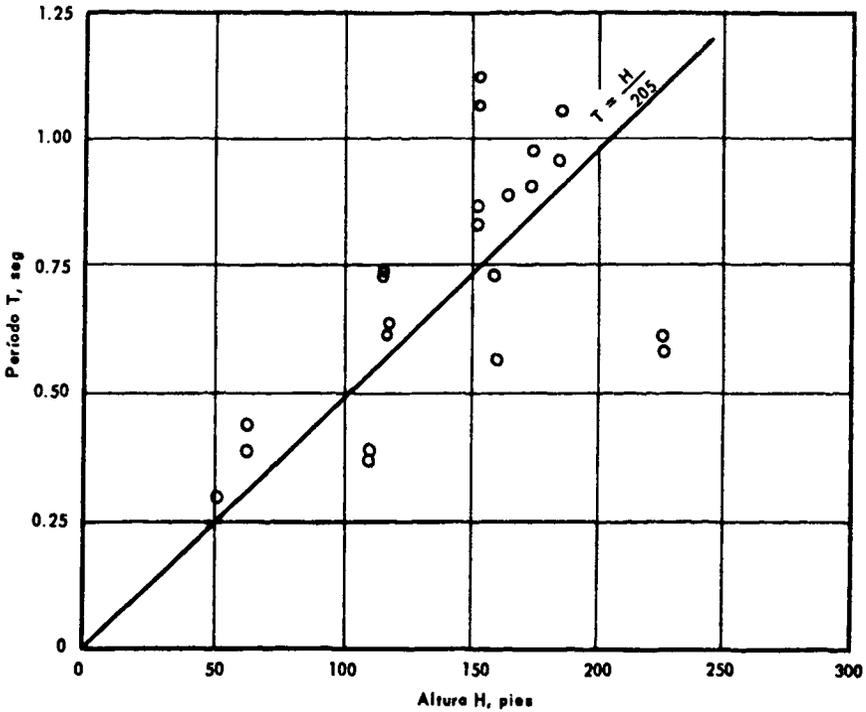


Fig. 6. Edificios de hormigón armado. Período en función de la altura H.

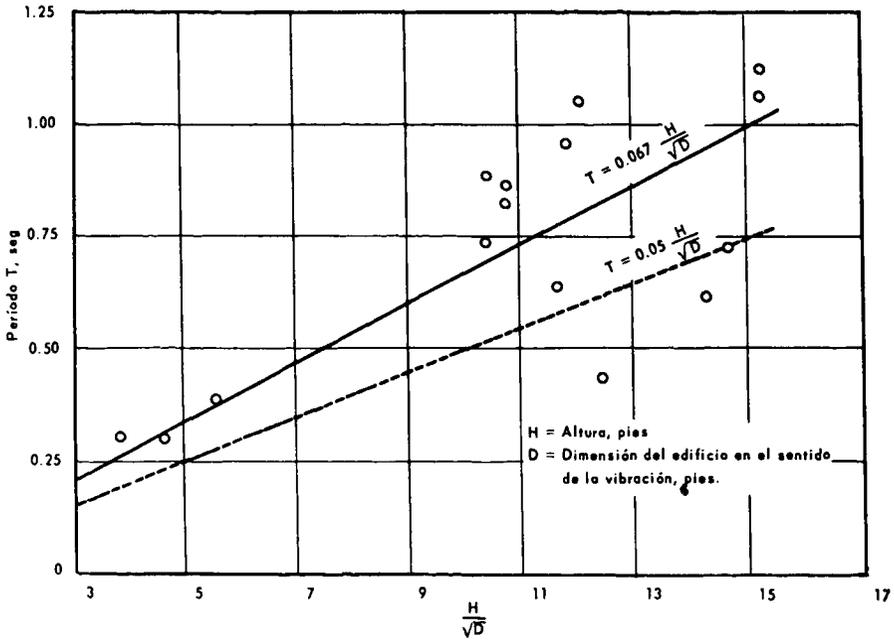


Fig. 7. Edificios de hormigón armado. Período en función de $\frac{H}{\sqrt{D}}$

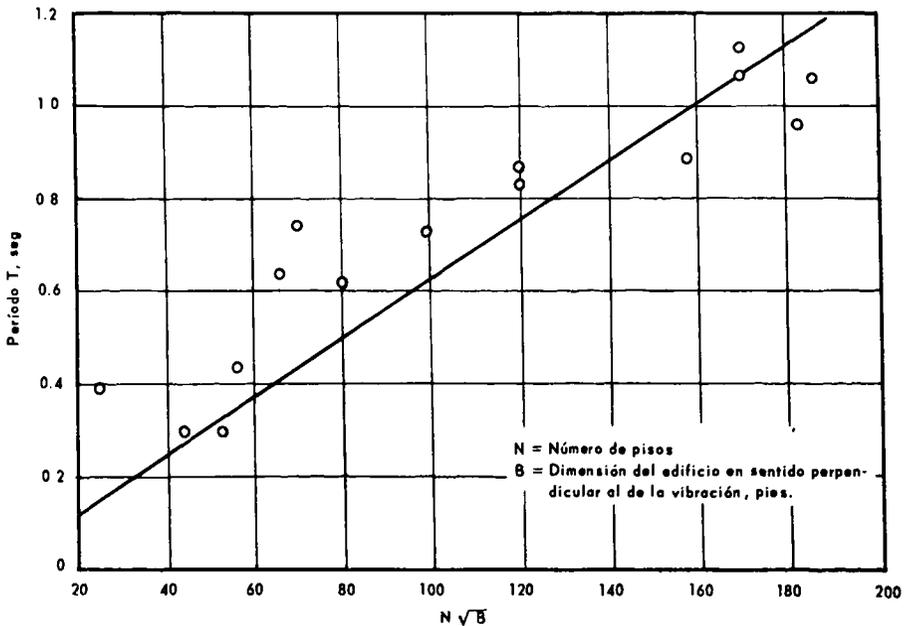


Fig. 8. Edificios de hormigón armado. Período en función de $N \sqrt{B}$.

ficios pueden alterarse por efecto de grandes terremotos, y que el cambio del período podría ser un índice significativo del daño de la estructura. Para investigar estas posibilidades, la U.S. Coast and Geodetic Survey ha medido recientemente los períodos de un cierto número de edificios en Long Beach, Los Angeles y Helena en Montana que han sufrido terremotos y para los cuales se disponía de mediciones de períodos con anterioridad a los sismos. Estos datos no son satisfactorios en varios aspectos. Primero, porque se usaron diferentes instrumentos para medir el período antes y después de los terremotos, y, segundo, porque muchos de los edificios fueron reparados en distintas formas antes de que se hicieran las mediciones posteriores al terremoto. En algunos casos los pisos superiores habían sido suprimidos durante la reparación. Por lo tanto no se puede esperar que los resultados sean muy concluyentes, pero señalan el tipo de estudios que deberá realizarse en el futuro.

La Tabla III resume los datos de estas mediciones antes y después de los terremotos. Un examen de la Tabla III lleva a las siguientes conclusiones:

- (a) En Helena, Montana, los períodos medidos en 1963 son más cortos que los medidos en 1935. La mayor diferencia es del orden de 25%.

TABLA III
PERIODOS DE EDIFICIOS ANTES Y DESPUES DE TERREMOTOS

H (pies)	N	L _x (pies)	L _y (pies)	Antes de 1938 1962 - 1963				Lugar
				T _x (seg)	T _y (seg)	T _x (seg)	T _y (seg)	
200	--	--	--	1.15	1.28	1.13	1.23	Helena, Montana
60	4	--	--	0.37	0.35	0.31	0.29	"
90	7	110	110	0.60	0.63	0.53	0.52	"
75	6	--	--	0.66	0.55	0.53	0.52	"
400	25	--	--	2.10	2.25	2.10	2.30	Los Angeles
71	7	106	60	0.34	0.315	0.27	0.314	Long Beach
250	13	73	145	1.23	--	1.09	--	"
135	10	54	148	1.00	--	0.92	--	"
--	6	--	--	0.36	0.36	0.47	0.51	"
130	12	52-95	184	0.94	0.94	1.05	0.83	"
136	10	54-150	100	1.00	0.87	0.89	0.83	"
130	12	50	160	1.00	1.00	1.05	0.70	"
110	11	46	144	0.68	0.44	0.69	0.47	"
96	7	50	74	0.95	0.85	1.04	0.76	"
112	9	135	180	0.70	0.74	0.80	0.78	"
95	9	50	150	0.56	0.66	0.58	0.44	"
105	9	172	340	0.32	0.33	0.31	0.30	"
185	11	78	261	0.76	0.52	0.68	0.46	"
94	8	50	150	0.60	0.34	0.61	0.36	"
193	13	75	150	1.49	1.12	1.51	1.15	"
127	12	99	60	0.88	0.98	0.84	0.96	"
100	12	100	100	0.89	0.90	1.04	1.03	"
41	3	90	118	0.18	0.16	0.23	0.156	"
184	16	--	--	1.25	0.83	1.24	0.76	"
63	4	150	150	0.43	0.45	0.48	0.38	"
132	11	47-142	47-145	0.73	0.74	0.73	0.66	"

(b) En Long Beach, donde se dispone de más datos, el período es en algunos casos mayor después del terremoto, y menor en otros. En algunos edificios los períodos después del terremoto son más grandes en una dirección y más cortos en otra. El mayor incremento del período es del orden de 50%.

Es obvio que estos resultados tan pobres no conducen a una conclusión general. Resulta evidente la importancia de continuar las mediciones y estudios al respecto.

DISCUSION

Algunos ingenieros han señalado que no es necesario buscar fórmulas empíricas simples para estimar el período fundamental de los edificios, ya que existen varios métodos exactos para un cálculo preciso. Parece haber, sin embargo, varias razones de peso para introducir fórmulas simples de períodos, del tipo discutido con anterioridad.

Los edificios son en general sistemas estructurales muy complejos, y las suposiciones que se suele hacer en el curso de las soluciones numéricas pueden no ser realistas y conducir a resultados muy poco precisos. El cálculo de períodos por los métodos de Stodola, Rayleigh, etc. requiere valores de las rigideces, módulos de elasticidad, etc. de los edificios. El uso del módulo estático de elasticidad en vez del módulo dinámico y el desconocimiento del largo efectivo de las columnas, conducen a errores en el cálculo del período. La poca precisión de estas cantidades puede introducir diferencias en el período mayores que 100%, dependiendo de los materiales, diseño y método de construcción. Esto se ha confirmado mediante investigaciones en las cuales los períodos calculados por proyectistas fueron confrontados con mediciones posteriores.

Si se puede encontrar y verificar una fórmula para edificios de un cierto tipo y región, los ingenieros tendrán un método simple y rápido para estimar los períodos. Debido a que en la mayoría de los casos, los códigos modernos recomiendan algún tipo de fórmula empírica para estimar el período de los edificios, es necesario tener una base sobre la cual evaluar si dichas fórmulas son apropiadas.

CONCLUSIONES

Después de hacer un análisis de los nuevos edificios norteamericanos, se

pueden resumir las siguientes conclusiones:

1. Es posible encontrar fórmulas empíricas simples que den mejores resultados que los que se obtienen con las de las ordenanzas norteamericanas vigentes.
2. Para edificios de estructura de acero, la fórmula

$$T = 0,08 N$$

da mejores resultados que la del SEAOC Code.

3. En edificios de estructura de acero, una fórmula para el período como función de la altura total H, de la forma

$$T = \frac{H}{160}$$

también da un resultado mejor que la fórmula del SEAOC Code.

4. Para los nuevos edificios de hormigón armado se ha encontrado que expresiones lineales de los parámetros $N\sqrt{B}$ o $H\sqrt{B}$, no dan mejor estimación del período que expresiones lineales en N o en H, las cuales tienen la ventaja de utilizar una sola variable.
5. Para edificios de hormigón armado, la fórmula patrón

$$T = 0,05 \frac{H}{\sqrt{D}}$$

da resultados más pobres que las fórmulas deducidas usando las variables H o N.

6. Se propone que los estudios señalados para sustituir las fórmulas del período de los actuales códigos por expresiones más apropiadas, debieran completarse rápidamente y los resultados incorporarse a los códigos vigentes.

REFERENCIAS

1. HOUSNER, G.W., y BRADY, A.G. "Natural Periods of Vibration of Buildings", Proc. ASCE, vol. 89, EM 4, Paper 3613, (agosto 1963).
2. HOUSNER, G.W. "The Significance of the Natural Period of Vibration of Structures". Primeras Jornadas Argentinas de Ingeniería Antisísmica, Mendoza y San Juan, abril 1962.
3. HUSID, R. Discusión sobre "Natural Periods of Vibration of Buildings" por HOUSNER G.W., y BRADY, A.G, Proc. ASCE, vol. 89, EM 4, (agosto 1963).
4. BENIOFF, H. "The Physical Evaluation of Seismic Destructiveness", Bull. Seism. Soc. Amer., vol. 24, (1934), pp. 398-403.
5. BIOT, M.A. "A Mechanical Analyzer of the Prediction of Earthquake Stresses", Bull. Seism. Soc. Amer., vol. 31, (1941), pp. 151-171.

6. HOUSNER, G.W.; MARTEL, R.R. y ALFORD, J.L. "Spectrum Analysis of Strong-Motion Earthquakes", Bull. Seism. Soc. Amer., vol. 43, (1953), pp. 97-119.
7. HUDSON, D.E. "Response Spectrum Techniques in Engineering Seismology", Proc. World Conf. on Earthquake Engrg., Earthquake Engrg. Research Inst., University of Calif., Berkeley (1956).
8. CLOUD, W.K. Preliminary Building Period Report, U.S. Coast and Geodetic Survey, 1963-64.
9. INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR EARTHQUAKE ENGINEERING. "Earthquake Resistant Regulations". A World List (1963).
10. ARIAS, A.; HUSID, R., y BAEZA, M. "Períodos de vibración de edificios chilenos de hormigón armado", Primeras Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Santiago, julio 1963.
11. JOINT COMMITTEE ASCE. "Lateral Forces of Earthquake and Wind", Trans. ASCE, vol. 117, Paper 2514 (1952).

AN ANALYSIS OF MEASUREMENTS OF THE VIBRATION PERIODS OF NEW BUILDINGS

SUMMARY:

An analysis is made of measurements of periods of new steel frame and reinforced concrete buildings to investigate the validity of the formulas in the current SEAOC Code as applied to modern buildings.

It is shown that it is possible to find better expressions to estimate the periods of buildings than the ones in actual use.

A comparison is made for a number of buildings for which period measurements before and after strong earthquakes were available in order to investigate the possibility of significant changes in period. It is shown that no general conclusion can be obtained with the data available and further studies of this subject are recommended.