

Aplicación del Método simplificado de la Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE-02) a un edificio de 2 modos de vibración

Apellidos, nombre	Basset Salom, Luisa (lbasset@mes.upv.es)
Departamento	Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Centro	Universitat Politècnica de València

1 Resumen de las ideas clave

En este artículo explicaremos como se aplica el Método Simplificado que contempla la Norma de Construcción Sismorresistente Española, NCSR-02, (norma de obligado cumplimiento en el territorio español) a un edificio de viviendas que tiene dos modos de vibración¹. Como resultado de la aplicación de este método obtendremos la fuerza equivalente a nivel de cada forjado.

2 Introducción

La Norma de Construcción Sismorresistente tiene como objeto proporcionar los criterios necesarios para la consideración de la acción sísmica en el proyecto, construcción y conservación de edificios de nueva planta así como en su reforma o rehabilitación. Una parte importante del diseño y cálculo de la estructura consiste en la modelización de la acción sísmica que dependerá del método de cálculo a adoptar (estudio dinámico, análisis mediante espectros de respuesta o método simplificado).

Teniendo conocimiento el alumno de dicha normativa y de las condiciones en las que se puede aplicar el método simplificado² se determinarán las fuerzas estáticas equivalentes a nivel de cada uno de los forjados de un edificio de viviendas de 12 plantas ubicado en Torrevieja, provincia de Alicante.

Este método permite abordar de forma estática la acción sísmica e incorporarla fácilmente al cálculo de la estructura. Por eso es importante que el alumno conozca y sepa aplicar este método ya que, dentro de la Comunidad Valenciana, la provincia de Valencia tiene una sismicidad media y la de Alicante una sismicidad alta, por lo que la acción sísmica debe tenerse en cuenta.

3 Objetivos

Al terminar este documento el alumno será capaz de:

- Obtener el valor de la aceleración sísmica de cálculo, a partir de la aceleración básica, del coeficiente de riesgo y del coeficiente de amplificación del terreno
- Calcular el periodo fundamental de vibración del edificio, determinar el número de modos de vibración a considerar y obtener el periodo correspondiente a cada modo.
- Calcular las masas que intervienen a nivel de cada forjado
- Estimar el coeficiente de ductilidad y el coeficiente de respuesta
- Calcular, para cada planta y cada modo, el coeficiente de distribución, el coeficiente sísmico, la fuerza equivalente y el cortante

¹ Modo de vibración normal o natural es un movimiento armónico, sin amortiguación, de un sistema en el que todas las masas de la estructura se mueven en fase con la misma frecuencia natural.

² Se recuerda al alumno que revise el artículo 3.5.1. de la NCSE-02 en el que se enumeran estas condiciones.

- Calcular el cortante combinado y finalmente el valor de la fuerza estática equivalente a nivel de cada forjado

4 Aplicación del Método simplificado a un edificio con 2 modos de vibración.

El método simplificado de la Norma de construcción sismorresistente da indicaciones y tablas para determinar los parámetros que nos permitirán calcular las fuerzas equivalentes pero no proporciona ningún ejemplo de aplicación, por lo que consideramos de gran ayuda para el alumno contar con un ejemplo completo. Por supuesto, partimos de que éste ha leído la Norma y, si no es así, le recomendamos que la lea antes de seguir adelante.

Definiremos pues en este apartado las características geométricas del edificio, el tipo de estructura y el tipo de terreno sobre el que está cimentado, datos imprescindibles para el cálculo. Posteriormente seguiremos, paso a paso, el proceso que marca la NCSE02 hasta obtener las fuerzas equivalentes a nivel de cada forjado

4.1 Datos del edificio de viviendas

Se trata de un edificio de viviendas (construcción de importancia normal) cuyas dimensiones en planta son de 24 m x 14 m. situado en Torrevieja (Alicante).

El edificio, con una altura total de 36 m tiene 12 plantas sobre rasante (altura de cada piso=3m.) y 2 sótanos,

La estructura está formada por pórticos de hormigón armado con vigas de cuelgue, con la colaboración de 4 pantallas rigidizadoras diseñadas para la absorción de las acciones horizontales. Las pantallas están situadas de forma simétrica en planta y varían de dimensión en altura (3 tamaños diferentes: plantas baja y 1 a 3, plantas 4 a 7 y plantas 8 a 11). En la figura 1 se puede ver un esquema de la distribución de la estructura en planta.

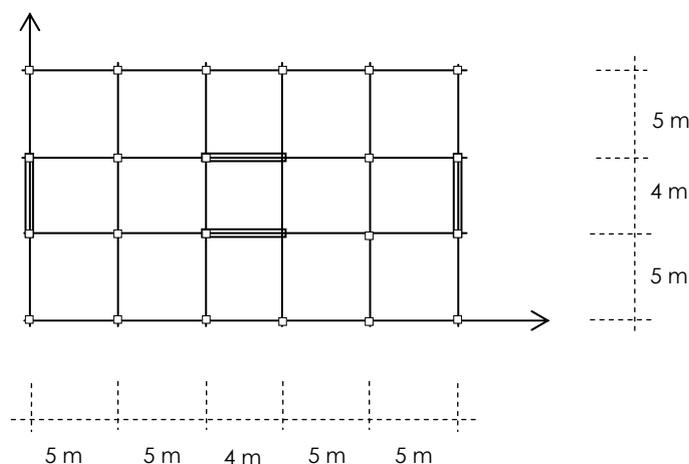


Figura 1. Esquema en planta de la estructura (autora: L. Basset)

El terreno bajo el edificio está formado por una capa de suelo granular suelto de 2.5 m de espesor y, por debajo de ésta, un suelo granular de compacidad media.

Las cargas gravitatorias correspondientes a cada una de las zonas del edificio son las siguientes (no se incluyen las cargas de planta baja por estar a cota +0.0m y solo debe considerarse las plantas sobre rasante):

PLANTA TIPO:

PERMANENTES:

- Vivienda (320 m²): 5.25 kN/m²
- Accesos (6 m²): 4.25 kN/m²
- Escalera (10 m²): 6.50 kN/m²
- Cerramientos de fachada (68m): 7.50 kN/m
- Cerramientos de escalera y medianera (24m): 5.70 kN/m

SOBRECARGA DE USO:

- Vivienda (320 m²): 2 kN/m²
- Escalera y accesos (16 m²): 3 kN/m²

PLANTA CUBIERTA:

PERMANENTES:

- Forjado cubierta (320 m²): 6.25 kN/m²
- Escalera (10 m²): 6.50 kN/m²
- Accesos (6 m²): 4.25 kN/m²
- Antepecho (76m): 1.50 kN/m
- Cerramiento escalera (14 m): 5.70 kN/m

SOBRECARGA DE USO:

- Terraza accesible privadamente (320 m²): 1 kN/m²
- Escalera y accesos (16 m²): 3 kN/m²

NIEVE (permanece menos de 30 días) 0.4 kN/m² (no se tendrá en cuenta a la hora de computar las masas que intervienen)

PANTALLAS DE HORMIGÓN

peso propio (plantas baja y 1 a 3)	30.00 kN/m
peso propio (plantas 4 a 7)	26.25 kN/m
peso propio (plantas 8 a 11)	22.50 kN/m

4.2 Aceleración sísmica de cálculo

La aceleración sísmica de cálculo (a_c) se obtiene a partir de la expresión:

$$a_c = S_p a_b \quad (1)$$

siendo:

a_b : La aceleración básica (valor característico de la aceleración horizontal de la superficie del terreno) se obtiene a partir del mapa de peligrosidad sísmica (figura 2) y del listado de municipios (anejo1)

Para Torreveja: $a_b = 0.14 g$

De este mapa (o del listado de municipios) se obtiene también el valor del coeficiente de contribución $K=1$



Figura 2. Mapa de peligrosidad sísmica (NCSE-02)

p: coeficiente adimensional de riesgo: $\rho = (t/50)^{0.37}$

Para edificios de viviendas, considerados construcciones de importancia normal ($t=50$ años) $\rho=1.0$

S: coeficiente de amplificación del terreno depende de $(\rho \cdot a_b)$ y de C , siendo C el coeficiente del terreno

$\rho \cdot a_b = 0.14g$

para $0.1g < \rho \cdot a_b < 0.4g$ $S = \frac{C}{1.25} + 3.33(\rho \frac{a_b}{g} - 0.1)(1 - \frac{C}{1.25})$ (2)

C depende del tipo de terreno obtenido hasta una profundidad de de 30 m. Este coeficiente debe proporcionarlo el estudio geotécnico.

Suelo granular de compacidad media (27.5 m): terreno tipo III: $C= 1.6$

Suelo granular suelto (2.5 m): TIPO IV: $C= 2$

Si el terreno no es uniforme, se utilizará la expresión siguiente:

$$C = \frac{\sum C_i \cdot e_i}{30} \quad C = \frac{2 \cdot 2.5 + 1.6 \cdot 27.5}{30} = 1.63 \quad (3)$$

Por tanto:

$$S = \frac{1.63}{1.25} + 3.33(0.14 - 0.1)(1 - \frac{1.63}{1.25}) = 1.2635 \quad (4)$$

El valor de la aceleración sísmica de cálculo es:

$$a_c = S \rho a_b = 0.17689 g \quad (5)$$

4.3 Periodo fundamental del edificio

A partir de la tipología del edificio (edificio con pórticos de hormigón armado con la colaboración de pantallas rigidizadoras) se determina el periodo

fundamental del edificio (n es el número de plantas sobre rasante, B es el lado de la pantalla y H la altura total).

$$T_F = 0.07 n \sqrt{\frac{H}{B+H}} = 0.07 \cdot 12 \sqrt{\frac{36}{4+36}} = 0.797 \text{ seg} \quad (6)$$

Como las pantallas tienen las mismas dimensiones en ambas direcciones el periodo coincidirá en la dirección X y en la Y, por lo que las fuerzas sísmicas serán las mismas en las dos direcciones ortogonales.

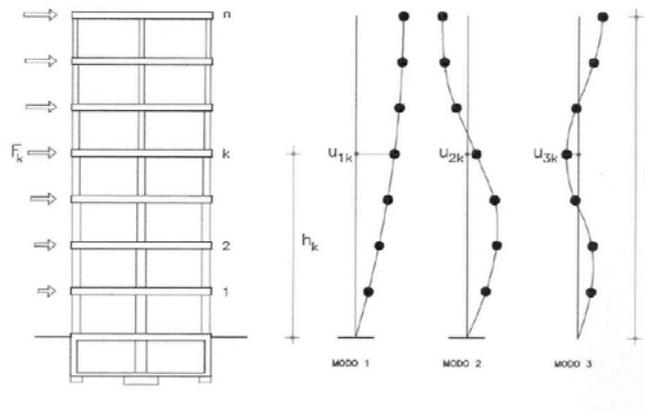


Figura 3.1. Modos de vibración en modelos planos de estructuras de pisos.

Figura 3. Modos de vibración (NCSE-02)

4.4 Número de modos a considerar y periodos

Como el periodo fundamental es mayor que 0,75 seg pero menor que 1.25 seg se tienen que considerar los dos primeros modos (figura 3).

El periodo para cada modo es: $T_1 = T_F = 0.797 \text{ seg}$ y $T_2 = T_F/3 = 0.266 \text{ seg}$

4.5- Cálculo de la Fuerza sísmica estática equivalente final a nivel de cada planta

Obtendremos en este apartado las fuerzas sísmicas equivalentes finales correspondientes a la combinación de ambos modos para cada planta. Como hay dos modos de vibración, tendremos que calcular primero las fuerzas a nivel de cada planta para cada modo, posteriormente calcularemos los cortantes correspondientes a cada modo y planta, luego los combinaremos y finalmente obtendremos las fuerzas estáticas equivalentes finales en cada planta,

Las fuerzas a nivel de cada planta para cada modo se obtienen mediante las expresiones:

$$F_{1k} = s_{1k} \cdot P_k \quad F_{2k} = s_{2k} \cdot P_k \quad (7)$$

siendo

P_k : peso correspondiente a la masa m_k , de la planta k

Los pesos de cada planta (sobre rasante) se obtienen multiplicando las cargas superficiales por la superficie de actuación y las lineales por la longitud. Cada carga se verá afectada por el coeficiente correspondiente según el apartado 3.2 de la norma. Para las cargas permanentes este coeficiente es 1, para la sobrecarga de uso de viviendas 0.5 y para la carga de nieve, si permanece menos de 30 días, es 0. Las cargas se han definido en el apartado 4.1.

Agrupamos las plantas según el tamaño de las pantallas 8 no se incluye la baja tal y como se ha comentado en el apartado 4.1):

- PLANTAS (1 a 3):

Permanente:

$$5.25 \cdot 320 + 4.25 \cdot 6 + 6.5 \cdot 10 + 7.50 \cdot 68 + 5.7 \cdot 24 + 30 \cdot 16 = 2897.3 \text{ kN}$$

$$\text{Sobrecarga de uso: } 2 \cdot 320 \cdot 0.5 + 3 \cdot 16 \cdot 0.5 = 344 \text{ kN}$$

$$P_{1-4} = 2897.3 \text{ kN} + 344 = 3241.3 \text{ kN}$$

- PLANTAS (4 a 7):

Permanente:

$$5.25 \cdot 320 + 4.25 \cdot 6 + 6.5 \cdot 10 + 7.5 \cdot 68 + 5.70 \cdot 24 + 26.25 \cdot 16 = 2837.3 \text{ kN}$$

$$\text{Sobrecarga de uso: } 2 \cdot 320 \cdot 0.5 + 3 \cdot 16 \cdot 0.5 = 344 \text{ kN}$$

$$P_{5-8} = 2837.3 + 344 = 3181.3 \text{ kN}$$

- PLANTAS (8 a 11):

Permanente:

$$5.25 \cdot 320 + 4.25 \cdot 6 + 6.5 \cdot 10 + 7.5 \cdot 68 + 5.70 \cdot 24 + 22.5 \cdot 16 = 2777.3 \text{ kN}$$

$$\text{Sobrecarga de uso: } 2 \cdot 320 \cdot 0.5 + 3 \cdot 16 \cdot 0.5 = 344 \text{ kN}$$

$$P_{9-11} = 2777.3 + 344 = 3121.3 \text{ kN}$$

- PLANTA CUBIERTA (12):

Permanente:

$$6.25 \cdot 320 + 6.5 \cdot 10 + 4.25 \cdot 6 + 1.5 \cdot 76 + 5.7 \cdot 14 = 2284.3 \text{ kN}$$

$$\text{Sobrecarga de uso: } 1 \cdot 320 \cdot 0.5 + 3 \cdot 16 \cdot 0.5 = 184 \text{ kN}$$

$$P_{12} = 2284.3 + 184 = 2468.3 \text{ kN}$$

s_{ik} coeficiente sísmico adimensional correspondiente a la planta k, modo i. Se obtiene mediante la expresión:

$$s_{ik} = (a_c / g) \cdot \alpha_i \cdot \beta \cdot \eta_{ik} \quad (8)$$

Por tanto para cada modo:

$$s_{1k} = (a_c / g) \cdot \alpha_1 \cdot \beta \cdot \eta_{1k} \quad s_{2k} = (a_c / g) \cdot \alpha_2 \cdot \beta \cdot \eta_{2k} \quad (9)$$

siendo

a_c : aceleración sísmica de cálculo $a_c = 0.17689 \text{ g}$ ((5), apartado 4.)

α_i : coeficiente de espectro de respuesta elástica correspondiente al modo i (método simplificado)

El periodo del modo 1 (apartado 4.4) es: $T_1 = 0.797 \text{ seg}$

El periodo característico del espectro es: $T_B = K \cdot C / 2.5 = 1 \cdot 1.63 / 2.5 = 0.652$

siendo K el coeficiente de contribución, que se obtiene del mapa de peligrosidad sísmica (figura 2)

El coeficiente α_1 , se obtiene, para $T_1 > T_B$, con la expresión:

$$\alpha_1 = 2,5(T_B/T_1) = 2,5 (0.652/0.797) = 2.045$$

El periodo del modo 2 (apartado 4.4) es: $T_2 = 0.266$ seg

El periodo característico del espectro es: $T_B = K \cdot C/2.5 = 1 \cdot 1.63/2.5 = 0.652$

El coeficiente α_2 , es, para $T_2 \leq T_B$: $\alpha_2 = 2,5$

β : coeficiente de respuesta que tiene en cuenta la capacidad de la estructura de absorber energía de deformación. Este coeficiente depende del tipo de estructura, del amortiguamiento y del coeficiente de comportamiento por ductilidad.

Se obtiene el coeficiente β de la tabla 3.1 de la NCSE-02 (figura 4) para este ejemplo, suponiendo un coeficiente de ductilidad, $\mu = 3$ (por ser las vigas de cuelgue y disponer de pantallas) y una planta compartimentada (edificio de viviendas).

Por tanto $\beta=0.33$

**Tabla 3.1.
VALORES DEL COEFICIENTE DE RESPUESTA β**

TIPO DE ESTRUCTURA	COMPARTIMENTACIÓN DE LAS PLANTAS	Ω (%)	COEFICIENTE DE COMPORTAMIENTO POR DUCTILIDAD			SIN DUCTILIDAD ($\mu = 1$)
			$\mu = 4$	$\mu = 3$	$\mu = 2$	
HORMIGÓN ARMADO O ACERO LAMINADO	Diáfana	4	0,27	0,36	0,55	1,09
	Compartimentada	5	0,25	0,33	0,50	1,00
MUROS Y TIPOS SIMILARES	Compartimentada	6	-	-	0,46	0,93

Figura 4. Tabla para obtención del coeficiente de respuesta β (NCSE-02)

η_{ik} : factor de distribución correspondiente a la planta k, modo i

Se obtiene a partir de la expresión 10, en la que sustuiremos las masas por los pesos puesto que se simplifica g, por estar en el numerador y en el denominador.

$$\eta_{ik} = \Phi_{ik} \frac{\sum_{k=1}^n m_k \Phi_{ik}}{\sum_{k=1}^n m_k \Phi_{ik}^2} = \Phi_{ik} \frac{\sum_{k=1}^n P_k \Phi_{ik}}{\sum_{k=1}^n P_k \Phi_{ik}^2} \quad (10)$$

n número de plantas = 12

P_k peso de la planta k

Φ_{ik} coeficiente de forma correspondiente a la planta k, modo i

$$\Phi_{ik} = \text{sen} \left[\frac{(2i-1) \pi h_k}{2H} \right] \quad (11)$$

h_k altura sobre rasante de la planta k.

H altura total de la estructura del edificio (36 m).

Los valores de los coeficientes que varían para cada planta y para cada modo, así como el valor de las fuerzas sísmicas correspondientes a cada planta y a cada modo (F_{ik}) están en las tablas 1 y 2.

PLANTA	$P_k(\text{kN})$	$h_k \text{ (m)}$	Φ_1	Φ_1^2	$P_k \cdot \Phi_1$	$P_k \cdot \Phi_1^2$	η_{1k}	S_{1k}	F_{1k}
12	2468.3	36	1	1	2468.3	2468.3	1,263	0,152	375,947
11	3121.3	33	0,991	0,983	3094,60	3068,12	1,252	0,151	471,338
10	3121.3	30	0,966	0,933	3014,94	2912,21	1,220	0,147	459,206
9	3121.3	27	0,924	0,854	2883,71	2664,20	1,167	0,141	439,217
8	3121.3	24	0,866	0,750	2703,12	2340,97	1,094	0,132	411,713
7	3181.3	21	0,793	0,629	2523,89	2002,34	1,002	0,121	384,414
6	3181.3	18	0,707	0,500	2249,52	1590,65	0,893	0,108	342,624
5	3181.3	15	0,609	0,371	1936,65	1178,96	0,769	0,093	294,971
4	3181.3	12	0,500	0,250	1590,65	795,32	0,631	0,076	242,272
3	3241.3	9	0,383	0,146	1240,39	474,68	0,483	0,058	188,924
2	3241.3	6	0,259	0,067	838,91	217,13	0,327	0,039	127,774
1	3241.3	3	0,131	0,017	423,07	55,22	0,164	0,0198	64,438
					24967,75	19768,09			

Tabla 1. Fuerzas a nivel de cada planta MODO 1

PLANTA	$P_k(\text{kN})$	$h_k \text{ (m)}$	Φ_2	Φ_2^2	$P_k \cdot \Phi_2$	$P_k \cdot \Phi_2^2$	η_{2k}	S_{2k}	F_{2k}
12	2468.3	36	-1	1	-2468.30	2468.30	-0,369	-0,054	-134,143
11	3121.3	33	-0,924	0,854	-2883,70	2664,188	-0,341	-0,05	-156,718
10	3121.3	30	-0,707	0,500	-2207,09	1560,64	-0,261	-0,038	-119,947
9	3121.3	27	-0,383	0,146	-1194,46	457,097	-0,141	-0,021	-64,914
8	3121.3	24	0,000	0,000	0,0083	0,000	0,000	0,000	0,000
7	3181.3	21	0,383	0,146	1217,43	465,89	0,141	0,021	66,163
6	3181.3	18	0,707	0,500	2249,52	1590,65	0,261	0,038	122,253
5	3181.3	15	0,924	0,854	2939,14	2715,41	0,340	0,050	159,731
4	3181.3	12	1,000	1,000	3181,30	3181,30	0,367	0,054	172,891
3	3241.3	9	0,924	0,854	2994,57	2766,62	0,341	0,050	162,743
2	3241.3	6	0,707	0,500	2291,95	1620,65	0,261	0,038	124,558
1	3241.3	3	0,383	0,146	1240,39	474,68	0,141	0,021	67,41
					7360,77	19965,44			

Tabla 2. Fuerzas a nivel de cada planta MODO 2

Una vez obtenidas las fuerzas correspondientes a cada modo el procedimiento a seguir es el siguiente:

- Obtención para cada modo de los cortantes V_{ik} en cada planta, como suma de las F_{ik} entre la última planta y la planta k considerada.
- Obtención del cortante combinado V_k de la planta k para los dos modos considerados mediante la expresión

$$V_k = \sqrt{\sum_{i=1}^2 V_{ik}^2} \quad (12)$$

- Obtención del sistema de fuerzas estáticas equivalentes F_k para cada planta k , por diferencia entre los valores del cortante V_k y del cortante de la planta superior V_{k+1} .

Estos cálculos están recogidos en la tabla siguiente (tabla 3):

PLANTA	F_{1k}	V_{1k}	F_{2k}	V_{2k}	V_k	F_k
12	375,947	375,947	-134,143	-134,143	399,162	399,162
11	471,338	847,285	-156,718	-290,860	895,819	496,657
10	459,206	1306,491	-119,947	-410,807	1369,555	473,736
9	439,217	1745,708	-64,914	-475,721	1809,367	439,811
8	411,713	2157,421	0,000	-475,721	2209,248	399,881
7	384,414	2541,835	66,163	-409,558	2574,619	365,371
6	342,624	2884,459	122,253	-287,305	2898,732	324,113
5	294,971	3179,431	159,731	-127,574	3181,989	283,257
4	242,272	3421,702	172,891	45,317	3422,002	240,013
3	188,924	3610,627	162,743	208,060	3616,616	194,614
2	127,774	3738,401	124,558	332,619	3753,169	136,553
1	64.438	3802,839	67,41	400,029	3823,821	70,653

Tabla 3. Fuerzas sísmicas equivalentes a nivel de cada planta

Las fuerzas sísmicas obtenidas son para cada planta y en las dos direcciones. Estas fuerzas se repartirán o no entre los elementos resistentes o los pórticos en cada una de las direcciones, dependiendo de cómo vaya a modelizarse para el cálculo de la estructura.

5 Cierre

A lo largo de este objeto de aprendizaje se han obtenido las fuerzas sísmicas equivalentes a nivel de cada forjado en el caso de un edificio de viviendas con 2 modos de vibración.

Para comprobar que realmente has aprendido cómo se obtienen las fuerzas equivalentes, es el momento de que te pongas manos a la obra e intentes hacerlo tú. Te propongo que consideres el mismo edificio con 9 plantas y sin pantallas ubicado en Orihuela. ¡¡ÁNIMO!!

(Resultado: la $a_b=0.16g$. Fuerzas equivalentes: $F_1= 146.7$ kN, $F_2= 281.4$ kN, $F_3= 398.5$ kN, $F_4= 491.9$ kN, $F_5= 585.2$ kN, $F_6= 673.6$ kN, $F_7= 751.4$ kN, $F_8= 791.03$ kN, $F_9= 810.5$ kN)

6 Bibliografía

6.1 Libros:

[1] NCSE-02. Norma de Construcción Sismorresistente. Ministerio de Fomento. RD 997/2002, 27 septiembre 2002