

ASPECTOS DEL DISEÑO DE MUROS PORTANTES DE FÁBRICA SIMPLE SEGÚN DIFERENTES NORMAS: EXCENTRICIDADES, REDUCCIÓN DE LA CAPACIDAD PORTANTE, E HIPOTESIS DE CARGAS A CONSIDERAR (*)

A. Lijdens **

Ingeniero Civil

L. Villegas***

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Dentro de un amplio programa de investigación desarrollado en el Departamento de Estructuras de la Universidad de Cantabria, sobre las propiedades y posible utilización de las estructuras de fábrica en España, en este trabajo se comparan criterios de cálculo dados por las normativas española (NBE-FL-90 y PIET-70), europea (Eurocódigo EC6), y británica (BS5628).

Luego de exponer algunos conceptos básicos del diseño de muros portantes, y basándose en los resultados de un modelo estructural simplificado resuelto en las mismas condiciones con todas las normas estudiadas, el artículo analiza las diferencias obtenidas en la excentricidad de carga y la consideración del efecto de esbeltez, y su influencia en la reducción de la capacidad de carga del muro. Finalmente, se dan pautas acerca de la combinación de cargas a considerar en el diseño de un muro por ser la más desfavorable.

Results obtained from a research program about the properties and possible uses of masonry structures in Spain, developed in the Structural Design and Construction Department of Cantabria University; design criteria for load bearing walls in the Spanish (NBE-FL-90 and PIET-70), European (Eurocode EC6) and British (BS-5628) standards are compared.

Based on the results from the analysis of a simplified structural model, using the above standards, this paper studies the resultant differences in loading eccentricity and slenderness consideration, and their influence on the vertical load capacity reduction of walls. Finally, guide lines are given for the worst loading combinations to be considered in wall design.

1. Introducción

La estructura de muros de fábrica ofrece la mejor alternativa en edificación en el caso de plantas compartimentadas con luces moderadas y paredes continuas en altura. La razón de su conveniencia económica está fundamentalmente en su polivalencia (estructura, cierre, división del espacio, aislación acústica y térmica, etc.) todo ello con una buena apariencia exterior.

En este trabajo se realiza una comparación de ciertos criterios de diseño de las dos normativas de aplicación directa en España, que son la europea y la española. Además, como punto de referencia para realizar dicha comparación se agregó la normativa británica por tratarse de un país pionero en la investigación experimental, donde el uso de este tipo de estructuras está ampliamente difundido. De modo que las normas analizadas son:

**Univ. Nac. Cuyo, Argentina

***Univ. de Cantabria

Departamento de Diseño y Construcción de Estructuras de Edificación y Obras Públicas

Recibido en ROP: enero 1994

1) Eurocódigo EC6: Estructuras de Fábrica - Parte 1 (Norma Europea) [2]

2) PIET-70 y NBE-FL-90 (Normas Españolas) [4], [6]

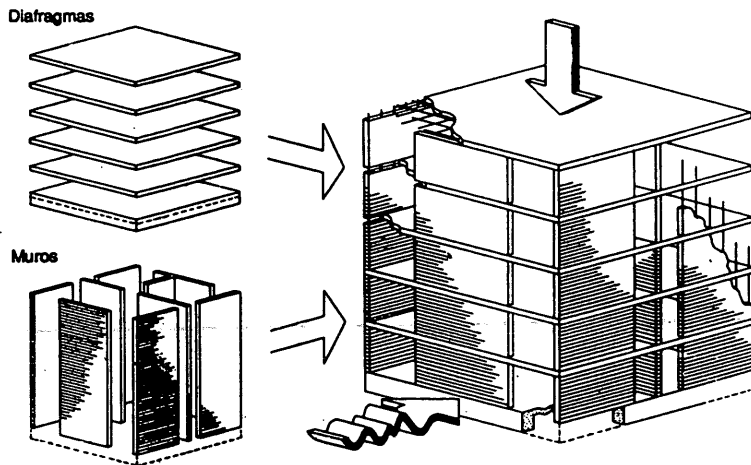


Figura 1. Esquema resistente de una estructura (3).

3) BS5628 - Parte 1 (Norma Británica) [1]

2. Conceptos básicos

2.1. La Estructura de Muros - Efectos Reductores de la Capacidad

La estructura de muros consiste en una configuración espacial de elementos planos o diafragmas, constituida por planos verticales (muros), y planos horizontales (forjados), en la cual los muros en compresión llevan a los cimientos las cargas verticales, mientras que frente a una acción horizontal, la presencia del diafragma rígido del forjado anula los corrimientos relativos entre muros en cada nivel y reparte la carga entre los mismos según sus rigideces, de modo que la acción es llevada a la fundación por los muros paralelos a la fuerza (figura 1).

Básicamente, son dos los fenómenos que reducen la capacidad portante de los muros: la excentricidad de la carga vertical, y la deformabilidad, que está regida, sobre todo, por su esbeltez.

En la zona de apoyo del forjado las cargas son transmitidas al muro con una cierta excentricidad, que depende principalmente de la rigidez relativa de ambos elementos. Es evidente el efecto desfavorable que esta excentricidad tiene en la capacidad del muro, ya que reemplaza la compresión centrada por una flexocompresión perpendicular a su plano.

Esta flexocompresión origina flechas que inducen a efectos de segundo orden, los cuales pueden ser importantes en el caso de muros esbeltos. Así, la esbeltez debe ser tenida en cuenta como un factor adicional que minorra la capacidad de carga del muro.

Se define como esbeltez λ de un muro al cociente entre su altura efectiva " h_{ef} " (entre nodos de la deformada) y el espesor del mismo " t ".

$$\lambda = h_{ef} / t$$

2.2. Cálculo de Muros Portantes

Si bien cada normativa realiza el cálculo de un modo particular, la verificación de la capacidad de un muro para todas las normas puede expresarse como una verificación de estado límite último por agotamiento resistente, llevándose a la forma general

$$N_d \leq R_d; \quad R_d = C \cdot N_o (C \leq 1)$$

donde N_d es la carga de diseño y R_d la capacidad resistente real del muro; la cual puede expresarse como la capacidad resistente del muro a cargas centradas N_o (dada por el producto del área y la resistencia de diseño), minorada con un coeficiente reductor que denominamos genéricamente "C", el cual tiene en cuenta la excentricidad de la carga y la esbeltez del muro, y que en general tiene la forma

$$C = K(1 - 2\frac{e}{t})$$

El valor de K y la forma particular en que se expresa esta verificación son algo diferentes para cada norma.

2.3. Determinación de las Excentricidades

La *norma europea* propone dos métodos para la obtención de las excentricidades. El primero es mediante la resolución de la estructura en base al comportamiento elástico de los materiales, dismi-

nuyendo en 1/3 los momentos así obtenidos ya que éstos son conservadores. Como alternativa, el EC6 permite estimar simplificada la excentricidad de la carga del forjado como el 5% de la luz del vano adyacente en caso de muros exteriores, o el 5% de la diferencia de las mismas en caso de muros internos, con una variación lineal hasta cero en la base del muro (figura 2.a).

La *normativa española* asume una distribución elástica simplificada del flector de nudo según las rigideces de forjado y muro, mediante el desarrollo de una formulación que puede consultarse en aquella.

En la *norma británica*, se considera que la carga del forjado está aplicada a una distancia de un tercio del ancho de la zona de apoyo medida desde el lado cargado. La variación de la excentricidad se asume lineal desde este valor, anulándose en el pie del muro (figura 2.b).

2.4. Coeficientes Reductores de la Capacidad Portante

Como se expresó anteriormente, la reducción de la capacidad portante está dada por un coeficiente que siempre es menor o igual que 1, el cual multiplica a la capacidad del muro a carga centrada. La forma de este coeficiente y su obtención según cada norma se resumen en la tabla 1. La figura 3 muestra la incidencia de la esbeltez en la reducción de la capacidad portante de la sección media, para el caso particular de excentricidad igual a 10% del espesor en la sección superior, y cero en la base del muro.

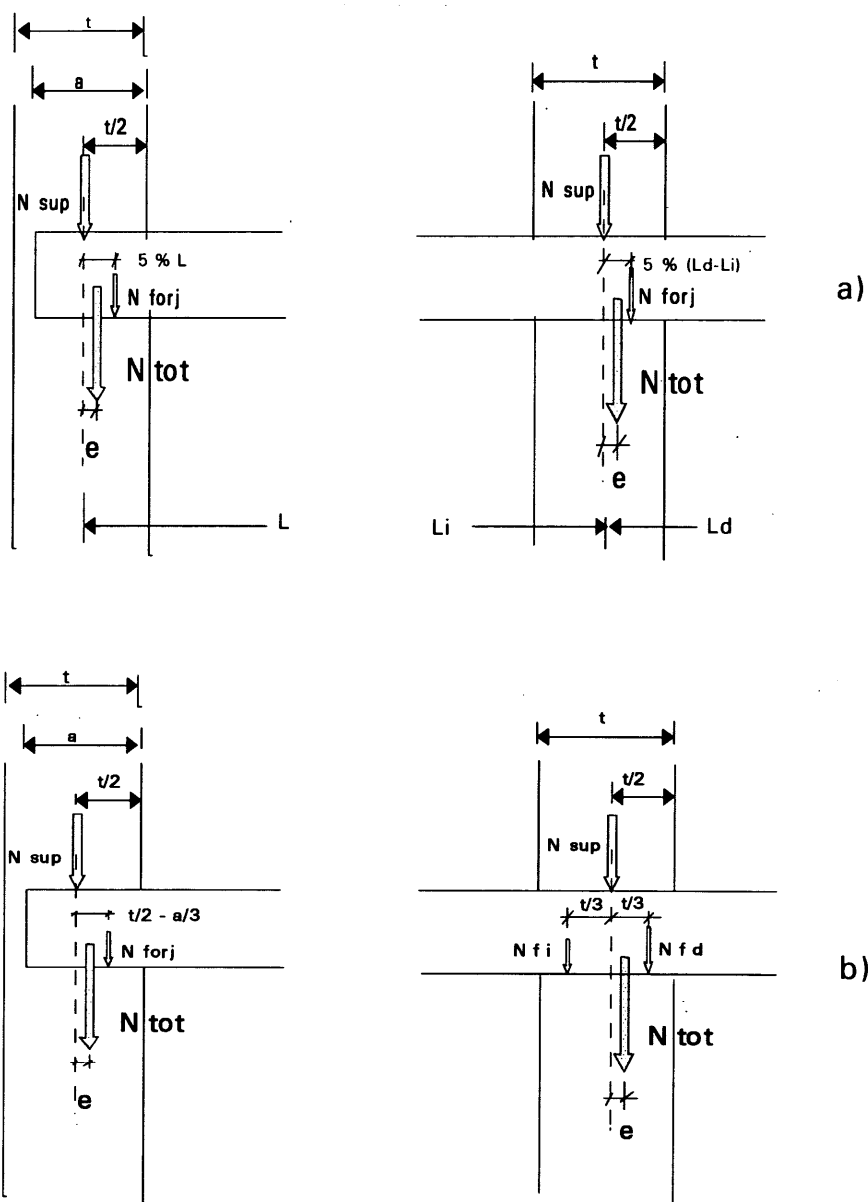


Figura 2. Excentricidades de la carga.
a) Método simplificado del Eurocódigo.
b) Método de la norma británica.

TABLA 1 - COEFICIENTES REDUCTORES DE LA CAPACIDAD PORTANTE

NORMA	SECCION	COEFICIENTE REDUCTOR	PARAMETROS DE LOS QUE DEPENDE
EC6	SUPERIOR CENTRAL	ϕ sup ϕ med	e sup - Control Obra e med - Control Obra
NBE(*)	SUPERIOR CENTRAL	C sup C med	e sup e med - λ - Módulo Elástico
BS5628	SUPERIOR CENTRAL	β sup β med	e sup e med - λ

(*)La normativa española no define explícitamente este Coeficiente Reductor.

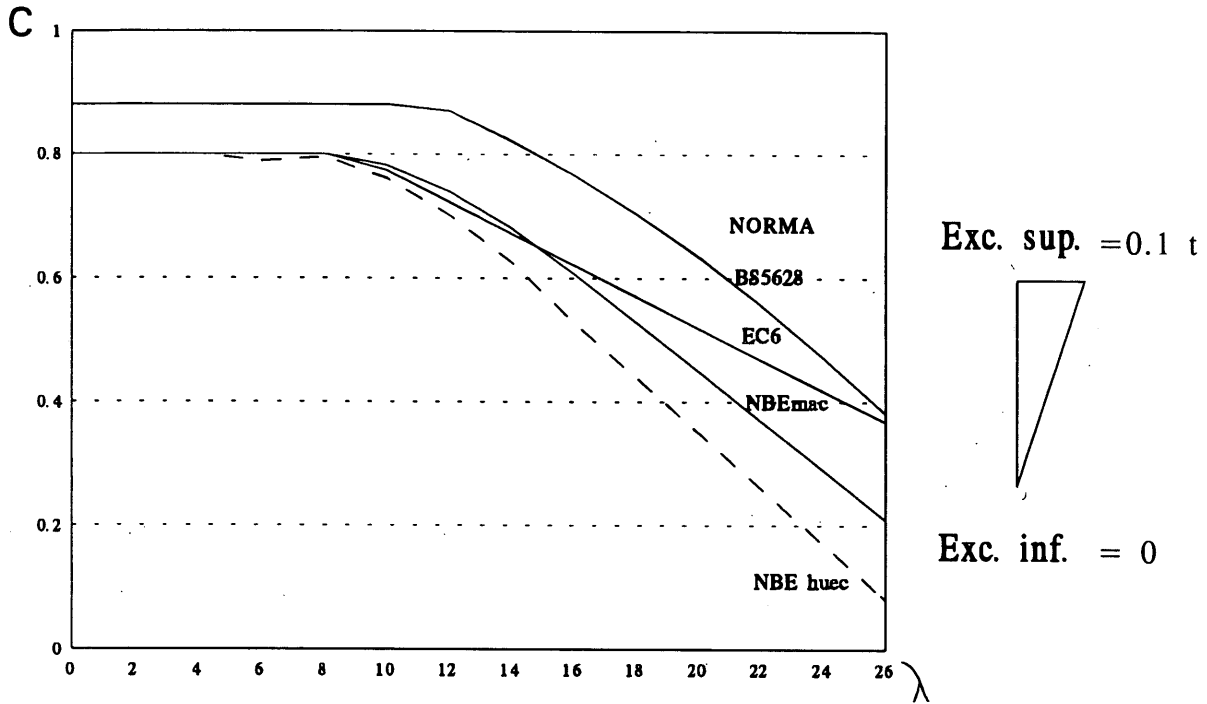


Figura 3. Variación del coeficiente reductor de la capacidad para la sección media con la esbeltez (exc. sup.=0.1 t - exc. inf.=0).

3. Determinación de la excentricidad de la carga e influencia en la reducción de la Capacidad Portante

3.1. Modelo Estructural Escogido

Con el objeto de analizar la incidencia de los diferentes modelos adoptados por las normas en el valor de las excentricidades y coeficientes reductores de la capacidad obtenidos, se calcularon los valores de los mismos producidos por la carga permanente en los muros "A" (exterior) y "B" (interior) de la estructura ideal simplificada de la figura 4, que consta de cinco muros paralelos en los cuales apoyan los forjados.

Sobre el modelo estructural escogido, para ambos muros considerados, se han variado los siguientes parámetros:

- espesor de los muros
- luz de los forjados
- relación de luces de vanos adyacentes
- número total de pisos del modelo estructural

Así, se analizó un total de 648 casos, determinados por todas las combinaciones indicadas en la tabla 2.

Para la resolución con el Eurocódigo además del método simplificado y de acuerdo a lo prescripto por la norma se analizaron los tres modelos de pórtico completo de la figura 5:

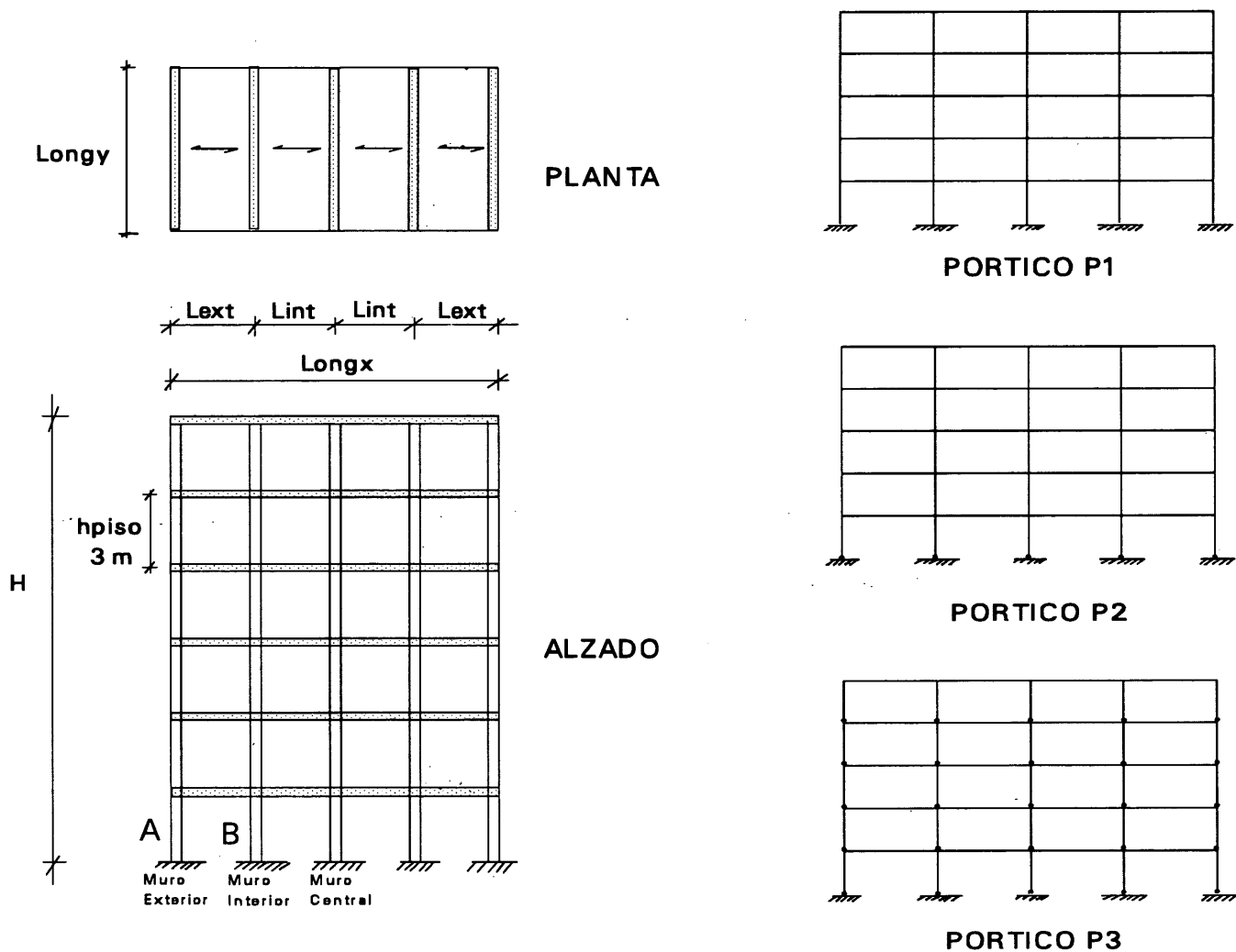
- a) Pórtico de nudos rígidos (P1).
- b) Pórtico con bases articuladas (P2).
- c) Pórtico con muros articulados en su base en todos los niveles (P3).

3.2. Valores Calculados

- a) Excentricidad de la Carga: en todos los casos analizados se ha calculado la excentricidad

TABLA 2 - RESUMEN DE CASOS ANALIZADOS

VARIABLE	VALORES ADOPTADOS
Número de pisos.	3, 6, 9
Espesor de muro.	19 cm, 29 cm
Luz base de vanos (módulo).	3 m, 4.5 m, 6 m
Relación luces vanos Lext / Lint	0.80, 1.0, 1.2
Tipo de muro	Exterior (A), Interior (B)



de la carga obtenida según cada norma en la sección superior o cabeza de muro (e_{sup}) y en la sección central del mismo (e_{med}), piso a piso.

b) Coeficientes Reductores de la Capacidad Portante: Siguiendo la formulación dada por cada norma se han calculado los siguientes valores:

- 1) Para la sección superior: coeficiente reductor por excentricidad e_{sup} (C_{sup}).
- 2) Para la sección media: coeficiente reductor por excentricidad e_{med} y esbeltez del muro (C_{med}), y coeficiente reductor por excentricidad e_{med} (C_0). El primero es el coeficiente real a utilizarse en la verificación de la sección media, mientras que el segundo es un coeficiente calculado únicamente con el objeto de cuantificar la incidencia de la esbeltez en la reducción de la capacidad portante de la sección central.

3.3. Resultados

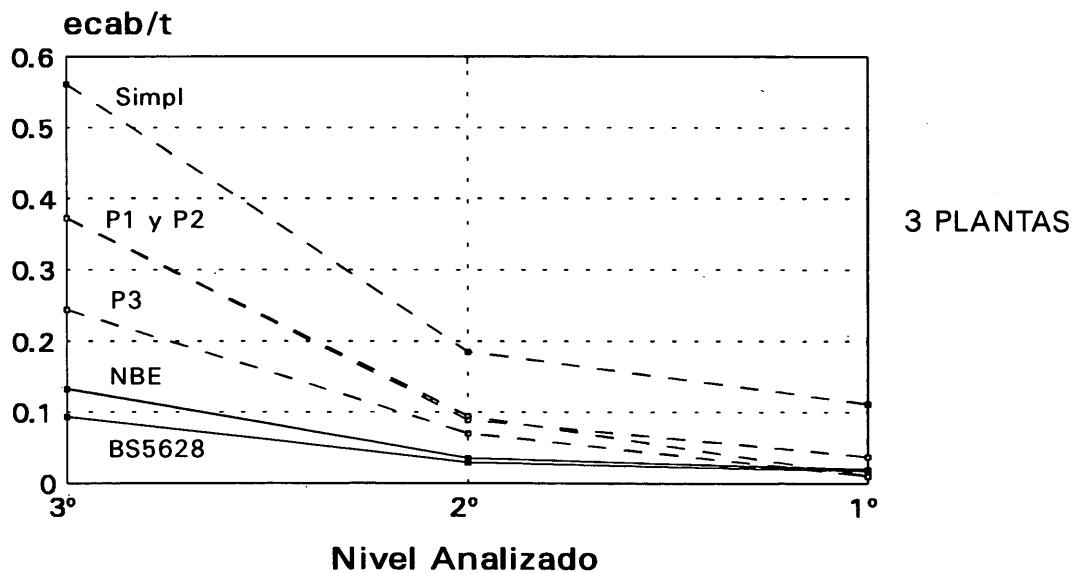
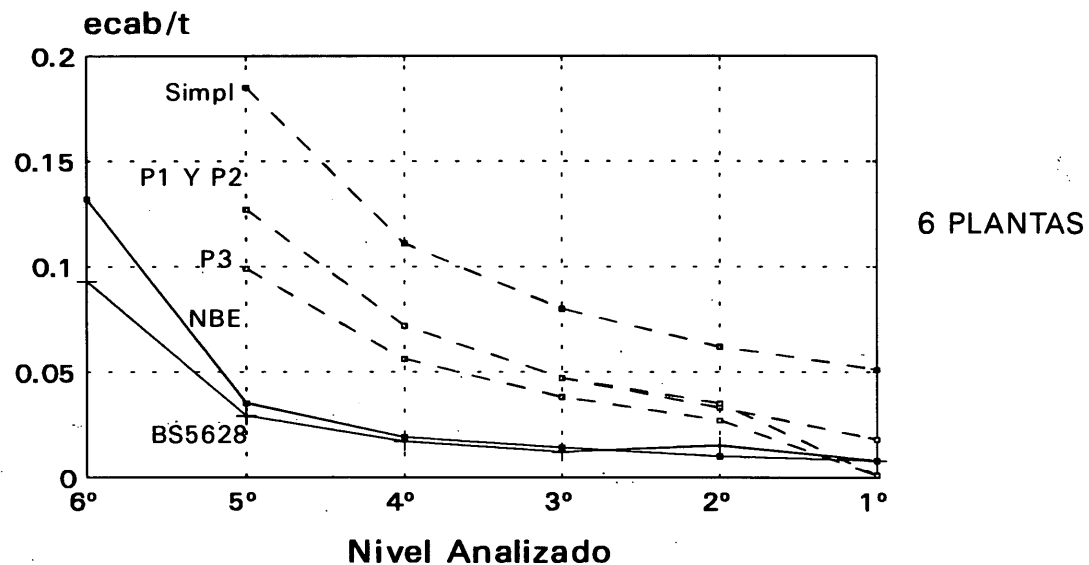
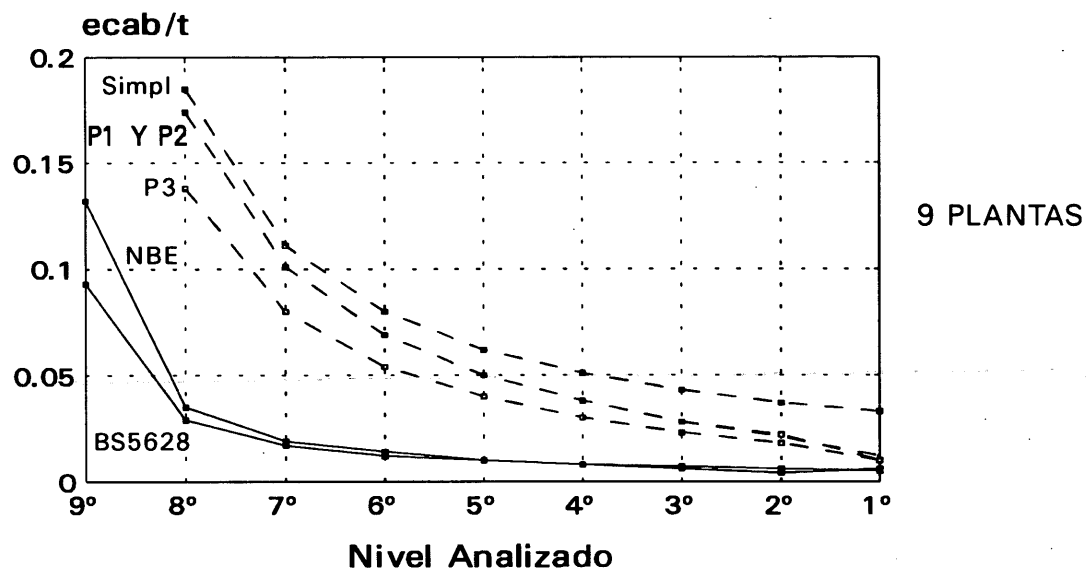
3.3.1. Comparación de las excentricidades dadas por las distintas normas

La figura 6 muestra los valores medios de las excentricidades relativas de cabeza de muro por planta para la totalidad de casos analizados, y contiene los resultados de ambos muros (exterior e interior). Cada punto de las gráficas es el promedio de los 36 valores obtenidos para cada nivel. En la figura 7 se realiza una comparación de los promedios (18 valores) de excentricidades por planta obtenidos en la estructura de 9 pisos para el muro exterior e interior.

Puede observarse que los valores obtenidos con el EC6 son mucho mayores que los dados por BS5628 y NBE, los cuales han sido para los casos analizados del orden del 18% al 20% de

Figura 4. Estructura analizada. A la derecha, figura 5. Modelos estructurales adoptados para la determinación elástica de las excentricidades con el Eurocódigo EC6.

Figura 6. Excentricidades relativas de sección superior para cada nivel. (Valores medios de 36 casos).



los datos por EC6 en los muros de 9 plantas, mientras que en los de 3 y 6 plantas fueron del orden del 35% de los mismos.

Existe un cierto orden entre los valores de e_{sup}/t obtenidos con los diferentes modelos adoptados. A modo de parámetro comparativo, los valores máximos se han obtenido con el método simplificado del EC6, con una media total de 0.17; lo siguen P1 y P2 los cuales prácticamente coinciden, con un valor medio de 0.13 para ambas; el modelo P3 ha dado los mínimos valores del EC6, con una media de 0.09. Las normas BS5628 y N.B.E. han dado excentricidades muy similares, con un promedio total de e_{sup}/t que coincidió para ambas normas en 0.03.

Para todas las normas, las excentricidades obtenidas en el muro exterior son mucho mayores que las del muro interior.

3.3.2. Comparación de los coeficientes reductores de la capacidad

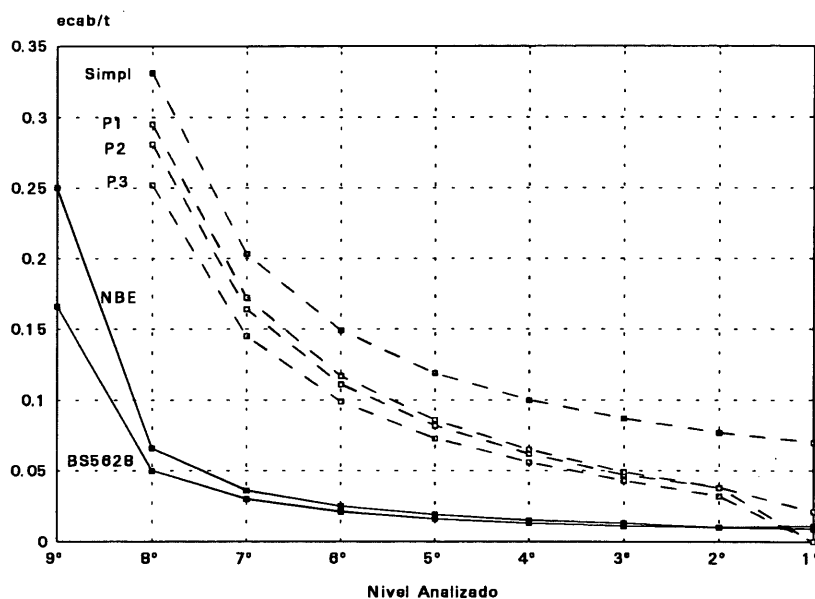
La tabla 3 muestra el promedio de cada uno de los tres coeficientes reductores obtenidos en la totalidad de los casos analizados. En la figura 8 se representan los coeficientes reductores medios para la sección superior y central en todos los muros resueltos de 9 plantas.

Debido a las grandes excentricidades obtenidas con el EC6, esta norma da las mayores reducciones de la capacidad. Respecto a las normas NBE y BS5628, si bien han dado reducciones de la capacidad bastante similares para la sección superior, en el caso de la sección central la norma española evidencia una tendencia mucho más conservadora debido a la gran incidencia de la esbeltez en la reducción de la capacidad, ya que del 22% del promedio total corresponde a la esbeltez el 20%, y sólo el 2% a la excentricidad de cargas de la sección media.

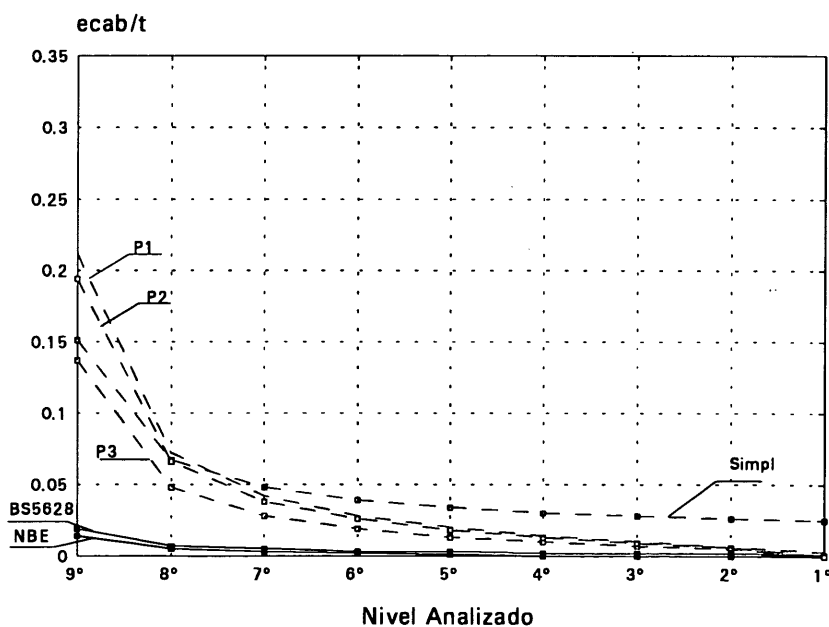
La figura 9 es una comparación, para cada norma, del promedio de los coeficientes reductores de sección superior y central, correspondientes a todos los muros de 9 pisos analizados. En las últimas plantas, menos cargadas, tiende a ser crítica la sección superior, mientras que en las inferiores el aumento de la carga hace disminuir las excentricidades, siendo crítica la sección central por efecto de esbeltez. Para los modelos P1 y P2,

la sección determinante es la superior aún en plantas inferiores, mientras que con P3 y el simplificado, esto sucede únicamente en las 3 ó 4 últimas plantas. Con N.B.E., en valores medios, la reducción para la sección central es mayor que la de la sección superior en todos los niveles. Con la norma BS5628, por último, la sección superior sólo fue crítica en la última planta en la mayoría de las ocasiones.

Figura 7. Variación de las excentricidades relativas de sección con la ubicación del muro -9 plantas. (Valores medios de 18 casos).



MURO EXTERIOR



MURO INTERIOR

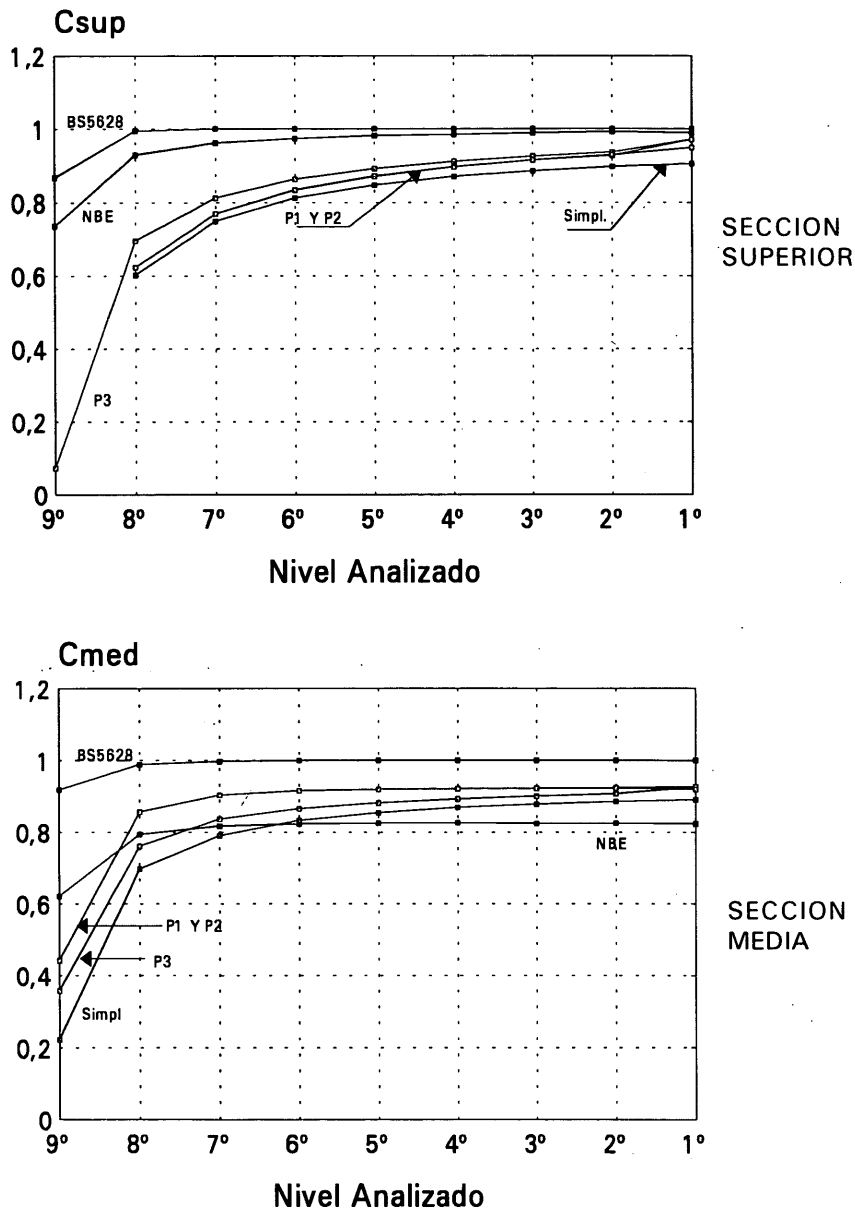


Figura 8. Coeficientes reductores de la capacidad. Modelo estructural de 9 plantas. (Valores medios de 35 casos).

4. Estado crítico de carga para cada norma

4.1. Introducción. Hipótesis de carga consideradas

Como se ha visto en el punto 2.2, existen dos aspectos que limitan la seguridad de la verificación en estado límite último, dados respectivamente por una baja capacidad de diseño R_d , o un valor grande de la acción N_d . Estas dos situacio-

nes extremas son incompatibles entre sí, ya que cuando el axil es importante la excentricidad es baja, y viceversa.

Este análisis tiene el objeto de determinar, de tres hipótesis de carga de partida, cuál es la que verifica con el mínimo margen de seguridad. A tal fin, se consideraron las siguientes hipótesis:

- HIPOTESIS A:** la que provoca el máximo axil, aplicando todas las cargas gravitatorias con los máximos coeficientes de mayoración.
- HIPOTESIS B:** la generada por una situación intermedia entre A y C. En este caso se optó por aplicar la carga permanente de forjados con su máximo valor, y el peso de los muros con el mínimo, y se aplicó la sobrecarga de uso únicamente en el vano de mayor luz adyacente al muro en estudio.
- HIPOTESIS C:** es la que genera el mínimo axil provocando la máxima excentricidad; las cargas permanentes se aplicaron todas con su mínimo valor, y la sobrecarga de uso se aplicó con el mismo criterio que en la hipótesis B.

4.2. Modelo Estructural

Se adoptó el modelo estructural simplificado de la figura 4, con una altura fija de 6 plantas. Para la determinación elástica de las excentricidades con el EC6, se abandonó el modelo P2 por brindar resultados muy próximos a los del modelo P1. Respecto a los modelos P1 y P3 se reemplazó el modelo de pórtico completo de 4 vanos por un modelo simplificado que se obtiene considerando al forjado empotrado en los muros adyacentes al analizado. En el caso de P1 se colocaron articulaciones a mitad de altura de piso, mientras que en el modelo P3 éstas se ubicaron en la base de los muros.

4.3. Datos

Respecto a los materiales, con el fin de cubrir todo el rango de espesores posible se adoptó como unidad el bloque de hormigón. Para la resistencia del mismo se tomó $f_b=180 \text{ kp/cm}^2$, y se consideró un mortero tipo M160. Si bien estos valores son mucho mayores que los corrientes y no corresponden a la práctica usual, se adoptaron buscando que la capacidad de los muros fuera en todos los casos superior a la sollicitación. Aún así, en varias ocasiones el coeficiente de seguridad R_d/N_d obtenido fue menor que 1.

TABLA 3 - VALORES MEDIOS DE LOS COEFICIENTES REDUCTORES

COEF. REDUCTOR SECCION	NORMA					
	E.C.6				NBE	BSt
	Spl	P1	P2	P3		
SUPERIOR C_{sup}	0.63	0.70	0.70	0.78	0.93	0.98
MEDIA POR EXCENTRICIDAD (C_0)	0.80	0.91	0.91	0.87	0.98	0.99
MEDIA POR EXC. Y ESBELTEZ (C_{med})	0.72	0.84	0.85	0.81	0.78	0.98

Las acciones verticales características se han determinado según la norma de acciones NBE-AE-88, tanto para la carga permanente como para la sobrecarga de uso. Para obtener las acciones de diseño, los coeficientes γ_f de mayoración de acciones considerados según las diferentes hipótesis analizadas son los indicados por cada normativa en particular, variando según la norma de 0.9 a 1 en caso de ser favorables, y de 1.4 a 1.65 en caso de ser desfavorable.

Debido a que la hipótesis que resulte pésima puede variar, en las mismas condiciones, al variar ciertos parámetros (luces, cargas, etc.), y con el fin de obtener conclusiones lo más generales posible, se han realizado los cálculos para diversos valores de las variables que pueden influir, en un amplio rango que cubre la mayoría de las situaciones usuales.

Los parámetros variados y los valores adoptados para los mismos se indican en la tabla 4, realizándose en total 486 verificaciones para los muros exterior y central, en los que con los modelos adoptados no incide una diferencia en las luces de ambos vanos. Para el muro interior de la figura 4, la cantidad de verificaciones realizadas fue de 1458 al agregarse 3 relaciones de luces de vanos adyacentes.

En todos los cálculos realizados se verificó tanto la capacidad de las secciones extremas como en la central, para cada una de las tres hipótesis de carga consideradas.

4.4. Desarrollo

Para hallar el estado de carga que resulta determinante, para una norma y modelo dados, en cada una de las verificaciones realizadas para cada nivel y cada uno de los 3 muros considerados, se calculó la capacidad y la carga de diseño (Rd y Nd) correspondiente a las tres hipótesis estudiadas. Posteriormente se calculó para cada una de ellas el margen de seguridad adicional γ_{ad} de la verificación:

$$\gamma_{adA} = \frac{Rd_A}{Nd_A}; \quad \gamma_{adB} = \frac{Rd_B}{Nd_B}; \quad \gamma_{adC} = \frac{Rd_C}{Nd_C}$$

Luego se procedió a la comparación de los márgenes dados por cada hipótesis, siendo la hipótesis crítica de la verificación la que dio el mínimo margen adicional de seguridad.

TABLA 4 - VARIABLES CONSIDERADAS

PISOS	LUZ VANO INTERIOR	RELACION DE LUCES DE VANOS L_{ext}/L_{int}	CARGA PERM. kp/m^2	SOBRECARGA DE USO kp/m^2	ESPESOR DE MUROS cm
6	3.0	0.8	300	200	11.5
	4.5	1.0	400	350	19
	6.0	1.2	500	500	29

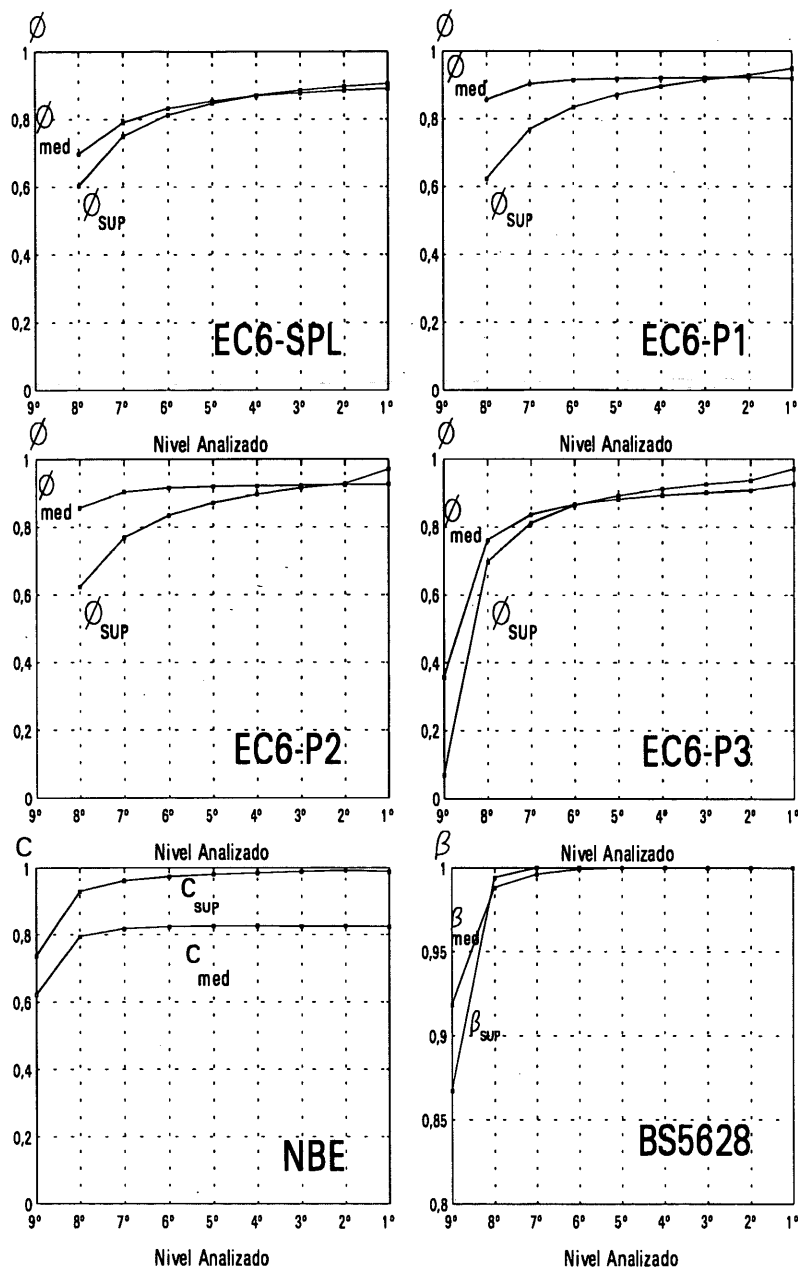


Figura 9. Comparación de los coeficientes reductores de sección superior y central - 9 plantas. (Valores medios de 35 casos).

4.5. Resultados

La tabla 5 muestra la cantidad de casos totales en que fue crítica cada hipótesis, para los tres tipos de muros resueltos. Puede observarse que la consideración de la hipótesis de máximo axil es conservadora en todos los casos para la norma BS5628, y en el muro central para NBE y EC6 simplificado, ya que en dichas situaciones siempre ha sido la hipótesis crítica.

En la figura 10 se representan, a modo de ejemplo, los márgenes adicionales de seguridad

correspondientes a cada una de las tres hipótesis consideradas (γ_{adA} , γ_{adB} , γ_{adC}), para el caso particular de método simplificado del EC6. En dicha figura, cada abscisa representa una verificación realizada, y en correspondencia con la misma se representaron las tres ordenadas correspondientes a los márgenes de seguridad obtenidos en dicha verificación γ_{adA} , γ_{adB} y γ_{adC} , según se ve en el detalle de la zona ampliada. Para facilitar la visualización del gráfico, se ordenaron todos los grupos de tres márgenes obtenidos según un orden creciente del margen de la hipótesis A (γ_{adA}).

5. Conclusiones

1) Las excentricidades obtenidas con el Eurocódigo EC6, tanto con el método simplificado como con los modelos elásticos, han sido del orden de 3 a 5 veces mayores que las dadas por las normas NBE y BS5628, las cuales presentan una gran semejanza entre sí.

2) Respecto a la reducción de la capacidad de la sección superior, la norma BS5628 presenta la tendencia menos conservadora, con un coeficiente promedio de 0.98. Le siguen NBE con 0.93, y los modelos adoptados con EC6: P3 con 0.78, P1 y P2 con 0.70 y el Simplificado con 0.63.

3) Para la sección media los coeficientes promedio obtenidos han sido 0.98 para BS5628, 0.845 para P1 y P2, 0.81 para P3, 0.78 para NBE y 0.72 para EC6 simplificado; observándose una gran incidencia de la esbeltez en la reducción de la capacidad para la norma española, que ha pasado del segundo lugar al penúltimo, al ser considerado este efecto.

4) En el cálculo de edificios con luces y cargas usuales, con la norma BS5628 sólo es necesario verificar la condición de cargas que provoca el máximo axil (Hipótesis A), aplicando las cargas verticales con los máximos coeficientes de mayoración en todos los vanos. En el caso de muros interiores que reciben luces iguales de forjados a ambos lados ("muro central"), esta recomendación puede extenderse a la norma NBE y al método simplificado del EC6.

6. Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Departamento de Diseño y Construc-

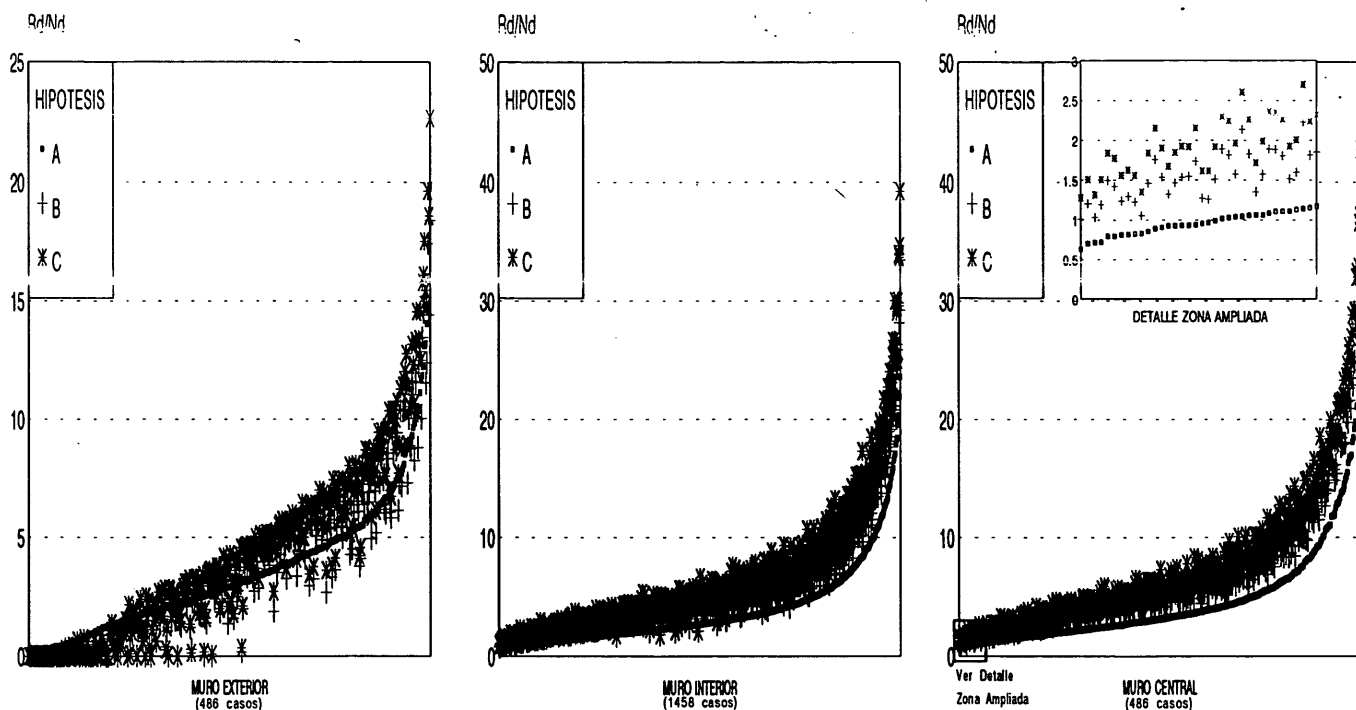


Figura 10. Márgenes adicionales de resistencia ordenados de menor a mayor. Norma: EC6 (Método simplificado).

ción de Estructuras de Edificación y Obras Públicas de la Universidad de Cantabria donde se ha llevado a cabo este trabajo como parte de un programa de investigación sobre las estructuras de fábrica, y a la Universidad de Cantabria y la empresa TECONSA (Tecnología de la Construcción S.A.) quienes han financiado los estudios realizados.

7. Bibliografía

- [1] BRITISH STANDARD INSTITUTION: "Code of practice for the use of masonry - BS5628 (Part 1)" - Londres, 1985.
- [2] COMMISSION OF EUROPEAN COMMUNITIES: "Eurocode EC6 - Common unified rules for unreinforced masonry structures - Part 1" - Bruselas, 1988.
- [3] GALLEGOS, H.: "Albañilería estructural" - Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 1989.
- [4] INSTITUTO EDUARDO TORROJA: "PIET 70, Obras de fábrica" - Prescripciones del Instituto Eduardo Torroja, Madrid, 1971.
- [5] LIJDENS, A: "Estudio de las posibilidades de utilización de estructuras de fábrica simple en edificios de altura según diferentes normas" - Tesina de Magister (Director: Villegas, L.) - Departamento de Diseño y Construcción de Estructuras de Edificación y Obras Públicas - Universidad de Cantabria, Santander, 1993.

[6] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO: "NBE-FL-90, Muros resistentes de fábrica de ladrillo" - B.O.E. 1990.01.04, Madrid, 1990.

[7] VILLEGAS, L.: "Estructuras de fábrica" - Servicio de Publicaciones, E.T.S. de Ing. de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, 1992. ■

(*) Este artículo está basado en el cap. 3 de la Tesina de Magister realizada por la Ing. Lijdens y dirigida por el Prof. Villegas [5], leída el 15 de octubre de 1993 en la E.T.S.I.C.C.y P. de Santander, obteniendo la calificación de apta por unanimidad.

TABLA 5. RESUMEN DE LOS CASOS EN QUE CADA HIPOTESIS FUE DETERMINANTE (RESULTADOS TOTALES)

MURO	HIPOT.	BS5628	N.B.E.	P1	P3	SIMPL
EXT.	A	1458	1363	1161	1120	532
	B	0	79	173	224	367
	C	0	16	124	114	559
INT.	A	1458	1453	1366	1413	1439
	B	0	4	38	26	17
	C	0	1	54	19	2
CENTR.	A	1458	1458	1377	1419	1458
	B	0	0	29	25	0
	C	0	0	52	14	0