

Capítulo 11

Capacidad de los edificios de mampostería no reforzada

11.1 Introducción

En este capítulo se evalúa la capacidad de los edificios de mampostería no reforzada del distrito de "l'Eixample" de la ciudad de Barcelona. Para definir los principales modelos que representan esta tipología, se utiliza: 1) la información contenida en la base de datos proporcionada por el Servicio de Protección Civil del Ayuntamiento de Barcelona, 2) la opinión de expertos en el sistema constructivo empleado en esta zona de la ciudad y, 3) los planos arquitectónicos y estructurales de un edificio específico de 6 niveles que se ha considerado altamente representativo de esta tipología. A partir de esta información y, considerando que aproximadamente el 80 % de los edificios de mampostería no reforzada de l'Eixample, tienen un número de niveles mayor o igual a 4, se definen en este trabajo, tres modelos de 4, 5 y 6 niveles (M.1, M.2 y M.3 respectivamente). Para estos tres modelos, mediante un análisis estático no lineal ("análisis pushover"), se construyen los espectros de capacidad, que representan la capacidad de resistir cargas laterales.

El capítulo comienza con una descripción de los edificios típicos de l'Eixample, desde el punto de vista estructural y arquitectónico. Se analiza el modelo tipo utilizado de forma generalizada para la construcción del distrito de l'Eixample. Finalmente, se definen los modelos estructurales que representan los edificios típicos de mampostería no reforzada de este distrito de la ciudad y se construyen los espectros de capacidad para cada uno de ellos.

11.2 Evolución y descripción de las construcciones

Una zona emblemática de la ciudad de Barcelona, con un importante valor histórico, arquitectónico y cultural es el distrito de l'Eixample, que fue proyectada a mediados del siglo XIX, como consecuencia directa de la expansión de la ciudad, luego de ser derribadas las murallas que la contenía (1858 – 1868). Esta zona fue construida siguiendo, aunque no de una forma estricta, el diseño urbanístico del famoso ingeniero civil Ildelfonso Cerdá, cuyo proyecto final fue aprobado en 1860 (Mañà, 1997). En 1888, se celebró en Barcelona, una gran exposición Universal en la zona del Arco del Triunfo, que dió un gran impulso al crecimiento y embellecimiento de la ciudad. Durante el período comprendido entre 1875 y 1900, que ha sido identificado como el de mayor crecimiento, se construyeron casi 10.000 edificios (cerca del 15% de la ciudad actual). A partir de este momento, el crecimiento en las siguientes décadas fue paulatino, hasta llegar a un punto máximo en la década de los 60, en la que se construyeron más de 12.000 edificios (lo que representa casi el 19% del total actual).

Los edificios de esta zona no son aislados sino que se encuentran agrupados en las denominadas islas o manzanas, las cuales son bloques casi totalmente simétricos, de 113×113 metros, perfectamente alineados y achaflanados en sus vértices mediante aristas de unos 20 metros (Yépez, 1996), tal y como se observa en la Figura 11.1.



Figura 11.1. Tejido urbano formado de las típicas islas o manzanas de "l'Eixample".

La construcción de los edificios fue realizada entre los años 1860 y 1940, con

25 edificios en promedio por cada manzana y con predominio de estructuras de mampostería no reforzada, diseñadas a carga vertical únicamente y, sin ninguna consideración sísmica, ya que casi todos los diseños son anteriores a la publicación de la primera normativa de diseño sismorresistente en España. Prácticamente, la totalidad de los edificios existentes en la zona, ya han cumplido su período de vida útil y, sólo una pequeña parte de los edificios del sector son nuevos, fruto de la demolición de antiguos edificios y de su sustitución por edificios de hormigón armado. Estos "nuevos" edificios de hormigón, construidos a partir de los años 60, presentan una estructuración de pilares y losas reticulares. Este tipo de sistema, ha sido identificado como altamente vulnerable frente a la acción sísmica, en zonas con amenaza sísmica moderada y/o alta. Finalmente, existen muy pocos edificios de estructura metálica.

Así pues, los edificios típicos de "l'Eixample", son de mampostería de ladrillo no reforzada, con forjados de vigueta de madera, hormigón armado y/o acero, según épocas, y bovedillas prefabricadas (de cerámica o de hormigón) o construidas manualmente. Estas edificaciones en general, tienen una vista en planta bastante regular, de forma generalmente rectangular, a excepción de los edificios de esquinas que tienen una forma particular. La gran mayoría de las edificaciones contienen los llamados pisos blandos, debido a que el primer nivel es dedicado a actividades comerciales, por lo tanto, se requiere de una mayor altura y de un espacio más diáfano y versátil, que se logra, con el uso de pilares y vigas que sólo están presentes en este nivel. Lo anterior, implica una reducción de la rigidez de esta planta, que unida a la carencia de detalles de diseño sismorresistente, hace intuir al autor, que la vulnerabilidad sísmica de estos edificios es alta.

El proceso urbanístico de l'Eixample se desarrolló durante aproximadamente 80 años, por lo tanto, los primeros edificios que se construyeron incluían diversas aportaciones de los diferentes arquitectos y maestros de obra. Transcurridos los primeros 10 años, comienza a utilizarse un proceso constructivo que deja como resultado, un conjunto de edificios con formas y diseños bastante similares, reflejados en lo que podría llamarse el modelo tipo de l'Eixample. Este modelo, corresponde a un edificio de mampostería no reforzada, con un número de niveles que varía entre 4 y 7 plantas. Su sistema resistente, consiste en muros de ladrillos con espesores de 30 cm en las fachadas y 15 cm en todos los demás muros portantes. En la planta del sótano y planta baja, se suelen utilizar pilares de fundición y jácnas, sobre las cuales se apoyan directamente los muros portantes de la estructura. Los pilares se apoyan en un dado, el cual a su vez se apoya en una zapata de mampostería con mortero de cal o en la propia cimentación corrida, dando lugar a conexiones entre estos elementos que pueden ser consideradas como nodos muy deformables (casi articulados). Los forjados suelen ser de dos tipos: para las dos primeras plantas, se utilizan forjados de viguetas metálicas y bovedilla cerámica simplemente apoyada en jácnas metálicas y pilares de fundición o bien en paredes. Encima de la bovedilla se colocan los cascotes y sobre ellos el mortero de cal y el pavimento (ver Figura 11.3).

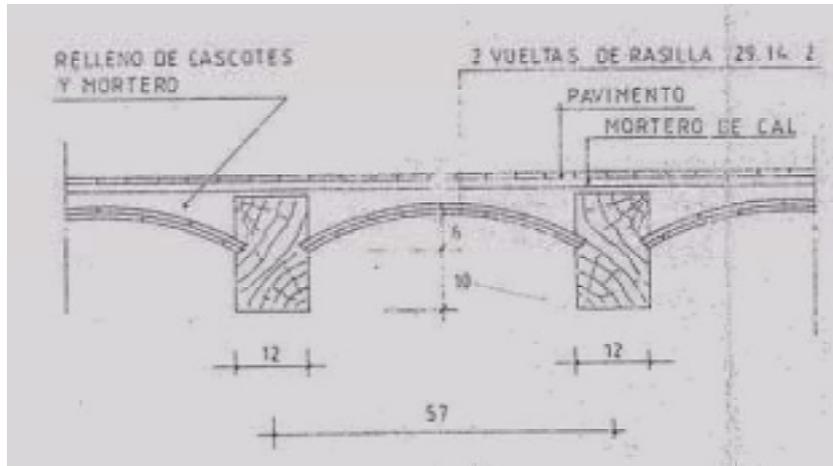


Figura 11.2. Detalle del forjado de vigueta de madera y bovedilla cerámica tomado de los planos arquitectónicos originales del edificio de 6 niveles (COTCA S.A, 2002).

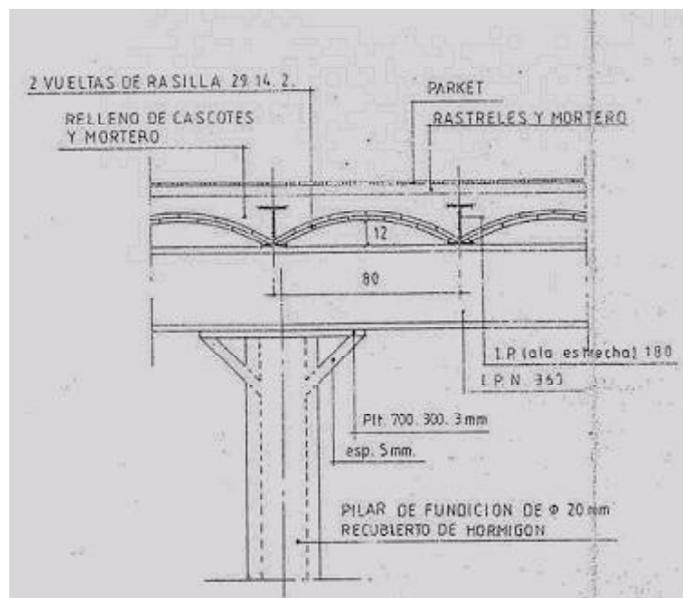


Figura 11.3. Detalle del forjado de vigueta metálica y bovedilla cerámica tomado de los planos arquitectónicos originales del edificio de 6 niveles (COTCA S.A, 2002).

Para las demás plantas, el tipo de forjado es de vigueta de madera y bovedilla cerámica, formado por dos hojas de rasilla, sobre la que se rellena con cascotes, mortero de cal y pavimento (ver Figura 11.2). En la actualidad existen aproximadamente 9.000 edificios en la zona de "l'Eixample", de los cuales 6.283 (70%) corresponden a edificios de mampostería no reforzada.

11.3 Definición de los modelos

Así pues, la mayoría de los edificios existentes en la zona son de mampostería no reforzada. Existen registrados en la base de datos proporcionada por el Servicio de Protección Civil del Ayuntamiento de Barcelona, 6.283 edificios de esta tipología en el distrito de l'Eixample. Por lo tanto, como un primer paso hacia la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios de la ciudad de Barcelona, se definen tres modelos de 4, 5 y 6 niveles (M.1, M.2 y M.3) que representan aproximadamente al 80% de los edificios de mampostería no reforzada del distrito de l'Eixample en Barcelona.

El modelo de 6 niveles (M.3) corresponde a un edificio de mampostería no reforzada, construido en el centro de "l'Eixample" en el año de 1882, del cual se dispone de los planos arquitectónicos proporcionados por la empresa Española COTCA S.A. En las Figuras 11.4 y 11.5 puede verse una imagen de la fachada del edificio y un detalle de la planta baja, respectivamente.

La distribución en planta del edificio es aproximadamente rectangular (18.9×24.5 metros) y cuenta con un patio cuadrado central y dos laterales. La Figura 11.6 ha sido obtenida directamente de los planos arquitectónicos originales y, muestran la distribución en planta y elevación del edificio. En elevación, el edificio muestra ciertas irregularidades, tales como: pilares de fundición solamente en la planta baja, muros portantes que se apoyan directamente sobre jácenas metálicas, apoyadas a su vez sobre los pilares mencionados y, disminución del área de la planta del nivel superior. Estos factores producen una variación considerable de la rigidez en la altura, lo que reduce la capacidad sismorresistente de la estructura y, puede producir un mecanismo de colapso (piso débil).

Este edificio se considera como representativo de las características geométricas y mecánicas de las estructuras que pertenecen a esta tipología. Por lo tanto, a partir del modelo de 6 niveles, manteniendo la misma distribución en planta y las propiedades mecánicas y, reduciendo el número de pisos, se definen los otros dos modelos de 4 y 5 niveles (M.1 y M.2 respectivamente).

11.3.1 Modelos estructurales

Para la modelización de estos tres edificios, se utiliza el programa TreMuri, desarrollado por Galasco et al. (2002), el cual, usa un modelo de macro elementos (Brencich



Figura 11.4. Fachada del edificio de 6 niveles de mampostería no reforzada, que ha sido modelado.



Figura 11.5. Vista interior de la planta baja del edificio de 6 niveles de mampostería no reforzada, que ha sido modelado.

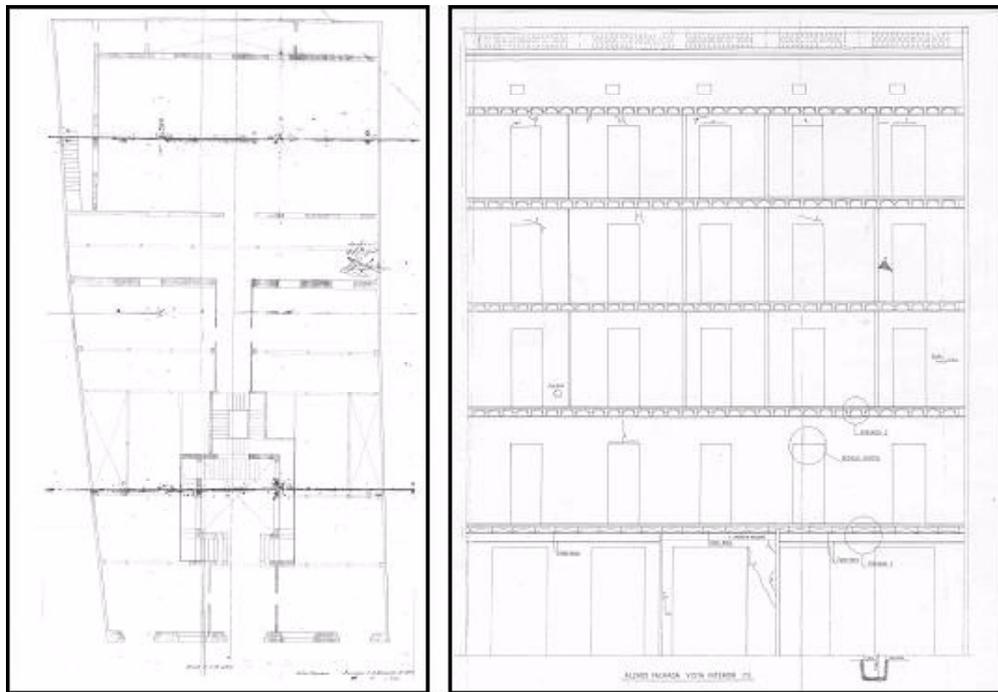


Figura 11.6. Copia del plano original de la planta y la fachada del edificio de 6 niveles de mampostería no reforzada (COTCA S.A, 2002).

y Lagomarsino, 1998) para representar los paneles de mampostería y, considera el daño estructural, por medio de modelos teóricos detallados que han sido calibrados a partir de los mecanismos de disipación observados en casos reales. En particular, el fenómeno de vuelco es modelado por un contacto elástico mono lateral en los dos extremos del macro elemento, mientras que el agrietamiento por cortante, se describe a través de una componente de deformación inelástica que tiene en cuenta los efectos de daño y fricción. El comportamiento global de los muros de mampostería, considerando los vacíos tales como ventanas y puertas, se obtiene mediante un adecuado ensamblaje de los macro elementos, utilizando tanto pilares de mampostería como dinteles. En adelante, se entenderá por pilares de mampostería a un grupo de macro elementos ubicados uno encima de otro, mientras que los dinteles corresponden a los macro elementos que se encuentran localizados entre pilares.

El modelo es útil para describir el comportamiento mecánico no lineal en el plano de los paneles de mampostería y, determinar el daño que sufren este tipo de estructuras cuando se ven sometidas a sismos. La bondad de los modelos que utilizan macro elementos para representar muros de mampostería no reforzada, radica en que éstos se caracterizan por tener un bajo número de incógnitas, con lo cual, los procedimientos empleados para describir la respuesta del muro en su plano hasta alcanzar el colapso son relativamente simples.

La ausencia de información, sobre las propiedades mecánicas de los materiales

utilizados para la construcción de edificios de "l'Eixample", se ha considerado mediante el uso de técnicas de simulación por el método de Monte Carlo. Por lo tanto, se definen los principales parámetros del modelo como variables aleatorias. Estas variables se generan a partir de funciones de distribución, caracterizadas por un valor medio y una covarianza. Este proceso de simulación permite considerar las incertidumbres asociadas a las propiedades mecánicas del material y, logra describir no sólo el comportamiento de una estructura, sino de toda una tipología estructural.

Modelo de macro elementos

El modelo de macro elementos para construcciones de mampostería, se basa en el ensamblaje de muros de cortante conectados unos con otros y con los respectivos diafragmas de piso. La experiencia muestra que los daños por cortante y vuelco, están localizados generalmente en ciertas zonas de los muros, mientras que otras regiones permanecen casi sin sufrir daños, lo que induce a modelar un muro por medio de macro elementos deformables que pueden experimentar daños y, elementos rígidos, los cuales representan la parte del muro donde no se producen daños.

La Figura 11.7 muestra las tres subestructuras que conforman un macro elemento: dos capas, inferior (1) y superior (3), en las cuales se concentran los efectos de flexión y fuerza axial y, una parte central (2) que sufre deformaciones por cortante y que no exhibe deformaciones axiales ni de flexión. Un modelo cinemático completo requiere tener en cuenta los tres grados de libertad para cada nodo "i" y "j" en las extremidades, esto es: el desplazamiento axial, w , el desplazamiento horizontal u y la rotación, φ . Para la zona central de altura h , se tienen dos grados de libertad que corresponden al desplazamiento axial, δ , y a la rotación, ϕ (ver Figura 11.7). Las hipótesis antes mencionadas, sobre la rigidez de las subestructuras, permiten utilizar algunas condiciones de compatibilidad en las interfaces entre los módulos (1), (2) y (3), que reducen el número de grados de libertad, esto es:

$$w_1 = w_2 = \delta \quad \varphi_1 = \varphi_2 = \phi \quad u_1 = u_i ; u_2 = u_j \quad (11.1)$$

Por lo tanto, la cinemática se describe mediante un vector de 8 grados de libertad, $\mathbf{a}^T = \{u_i, w_i, \varphi_i, u_j, w_j, \varphi_j, \delta, \phi\}$, el cual se obtiene para cada macro elemento. En esta descripción se supone la hipótesis que las extremidades tienen espesor infinitesimal ($\Delta \rightarrow 0$).

El mecanismo de vuelco que se produce, debido a que se supone que el material no soporta tracciones, se modela por medio de un contacto mono lateral elástico en las interfaces (1) y (3). Las ecuaciones constitutivas entre las variables cinemáticas w , φ y las correspondientes cantidades estáticas "n" y "m" son lineales y, están desacopladas hasta la condición límite $|\frac{m}{n}| \leq \frac{b}{\delta}$, cuando la sección es menor que toda la zona bajo compresión.

Para la subestructura (1) la fuerza axial N_i y el momento estático M_i se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

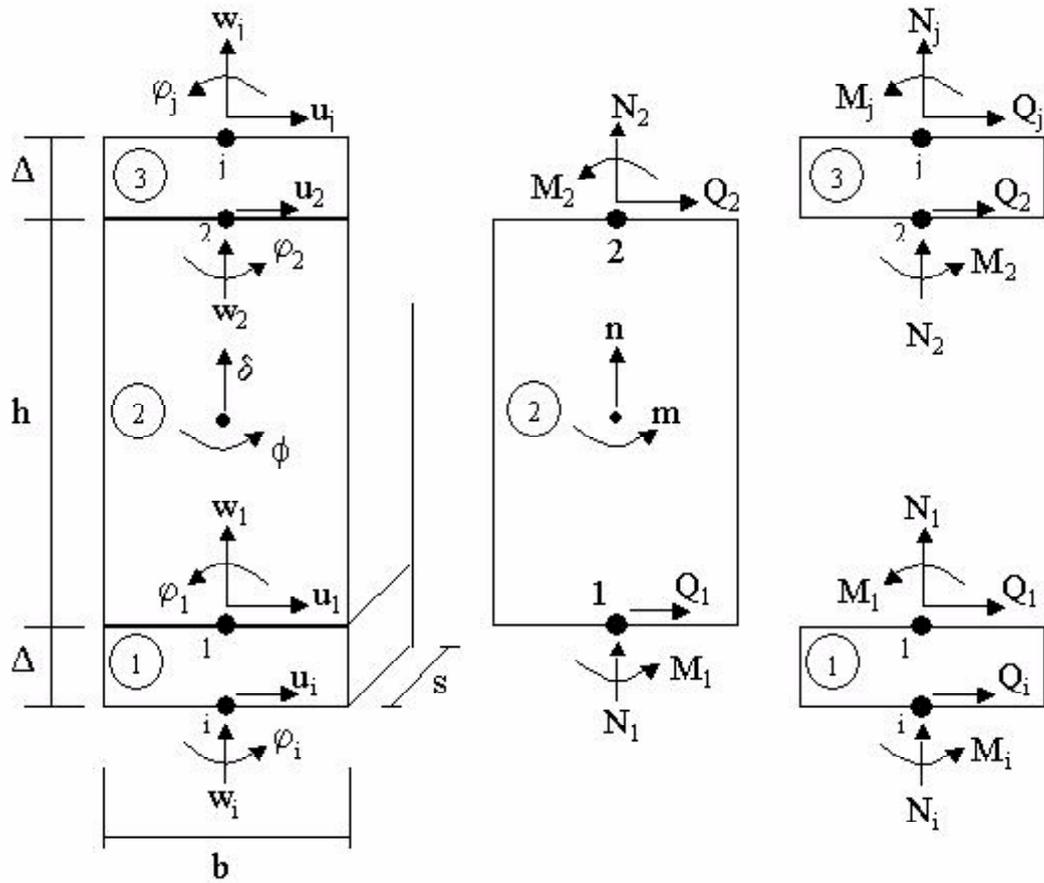


Figura 11.7. Esquema del modelo cinemático del macro elemento (Brencich y Lagomarsino, 1998). Ver explicación y nomenclatura en el texto.

$$N_i = kA (\delta - w_i) + N_i^* \tag{11.2}$$

$$M_i = \frac{1}{12} kAb^2 (\varphi_i - \phi) + M_i^* \tag{11.3}$$

donde k es la rigidez axial por unidad de área y $A = s * b$ corresponde al área de la sección transversal del panel. Las contribuciones inelásticas N_i^* y M_i^* se obtienen a partir de la condición unilateral de contacto elástico perfecto, esto es (Brencich y Lagomarsino, 1998):

$$N_i^* = \frac{-kA}{8|\varphi_i - \phi|} [|\varphi_i - \phi| b + 2(\delta - w_i)]^2 H\left(|e_i| - \frac{1}{6}b\right) \tag{11.4}$$

$$M_i^* = \frac{kA}{24(\varphi_1 - \phi)|\varphi_1 - \phi|} [(\varphi_i - \phi)b - (\delta - w_i)] * \\ * [|\varphi_i - \phi|b + 2(\delta - w_i)]^2 H(|e_i| - \frac{1}{6}b) \quad (11.5)$$

$H(\bullet)$ es la función Heaviside.

La respuesta a cortante del panel se expresa, considerando una distribución de deformación de cortante uniforme $\gamma = \frac{u_i - u_j}{h} + \phi$ en la parte central (2) e imponiendo una relación entre las cantidades cinemáticas u_i , u_j , y ϕ y las fuerzas de cortante $Q_i = -Q_j$. El daño por agrietamiento, usualmente está localizado sobre las diagonales del elemento donde el deslizamiento tiene lugar a lo largo de las juntas y, está representado, por una componente de deformación inelástica, la cual se activa cuando se alcanza la condición límite de fricción de Coulomb. A partir de la deformación de cortante efectiva del módulo (2), e indicando como G al módulo de cortante elástico, las ecuaciones constitutivas para la fuerza cortante del panel, se obtienen como la suma de una contribución elástica lineal clásica y una componente inelástica, esto es (Brencich y Lagomarsino, 1998):

$$Q_i = \frac{GA}{h} (u_i - u_j + \phi h) + Q_i^* \quad (11.6)$$

$$Q_i^* = -\frac{GA}{h} \frac{c\alpha}{1 + c\alpha} \left(u_i - u_j + \phi h + \frac{h}{GA} f \right) \quad (11.7)$$

La componente inelástica Q_i^* depende de: 1) la fuerza de fricción f , opuesta al mecanismo de deslizamiento, 2) el parámetro de daño, α , que aumenta con el valor de la deformación por cortante, γ , y 3) el coeficiente adimensional, c , que controla la deformación inelástica. En el marco de este modelo, la fuerza de fricción, f , juega el papel de una variable interna gobernada por la siguiente condición límite (Brencich y Lagomarsino, 1998):

$$\Phi_S = |f| - \mu N_i \leq 0 \quad (11.8)$$

donde μ corresponde al coeficiente de fricción. Estas ecuaciones constitutivas pueden representar la variación de la resistencia del panel debido a los cambios en las fuerzas axiales $N_j = -N_i$. El daño y, su efecto sobre las características mecánicas del panel, se describe por medio de la variable de daño α , la cual se incrementa de acuerdo al siguiente criterio de fallo (Brencich y Lagomarsino, 1998):

$$\Phi_d = Y(F_I) - R(\alpha) \leq 0$$

donde Y es la razón de liberación de energía por daño, R es la función de resistencia y $\mathbf{F}_I = \{q \ n \ m\}^T$ es el vector de fuerzas internas. Suponiendo R como una función creciente de α hasta el valor crítico $\alpha_C = 1$ y decreciente para valores más

elevados, el modelo puede representar la degradación de rigidez, la pérdida de resistencia y la deformación de ablandamiento del panel (Gambarotta y Lagomarsino, 1997).

El modelo constitutivo completo para el macro elemento puede ser expresado en la siguiente forma finita:

$$F = \mathbf{K}a + F^*$$

donde $F^* = \{T_i^* N_i^* M_i^* T_j^* N_j^* M_j^* N^* M^*\}$ contiene los términos no lineales que se evalúan por medio de las ecuaciones de evolución para la variable de daño α y la fricción f . La matriz de rigidez elástica \mathbf{K} se define como:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \frac{GA}{h} & 0 & 0 & -\frac{GA}{h} & 0 & 0 & 0 & -GA \\ 0 & KA & 0 & 0 & 0 & 0 & -KA & 0 \\ 0 & 0 & \frac{KA b^2}{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{KA b^2}{12} \\ -\frac{GA}{h} & 0 & 0 & \frac{GA}{h} & 0 & 0 & 0 & GA \\ 0 & 0 & 0 & 0 & KA & 0 & -KA & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{KA b^2}{12} & 0 & -\frac{KA b^2}{12} \\ 0 & -KA & 0 & 0 & -KA & 0 & 2KA & 0 \\ -GA & 0 & -\frac{KA b^2}{12} & GA & 0 & -\frac{KA b^2}{12} & 0 & GAh + \frac{kAb^2}{6} \end{bmatrix} \quad (11.9)$$

Los términos no lineales N^* y M^* se definen mediante la siguiente ecuación:

$$N^* = N_j^* - N_i^*; M^* = -M_j^* - M_i^* + T_i^* h \quad (11.10)$$

Parámetros del modelo

El modelo de cortante del macro elemento, es una simplificación de un modelo continuo más complejo (Gambarotta y Lagomarsino, 1993) cuyos parámetros están directamente correlacionados con las propiedades mecánicas de los elementos de la mampostería. Los parámetros del macro modelo deben ser considerados como representativos de un comportamiento promedio. Además de sus características geométricas, el macro elemento se define a partir de 6 parámetros que se describen a continuación: el modulo de cortante, G , la rigidez axial, k , la resistencia a cortante de la mampostería, τ , el coeficiente adimensional que controla la deformación inelástica, c , el coeficiente de fricción global, f , y el factor β que controla la fase de ablandamiento. Este último factor se define tanto para los pilares, β_p , como para los dinteles, β_d , de mampostería.

11.3.2 Modelo para los edificios de l'Eixample

La Figura 11.8 muestra una vista tridimensional y en planta del modelo del edificio de mampostería no reforzada de 6 niveles. El modelo está definido por 8 muros en la dirección "x" (muros M1 a M8) y 6 muros en la dirección "y" (muros M9 a M14).

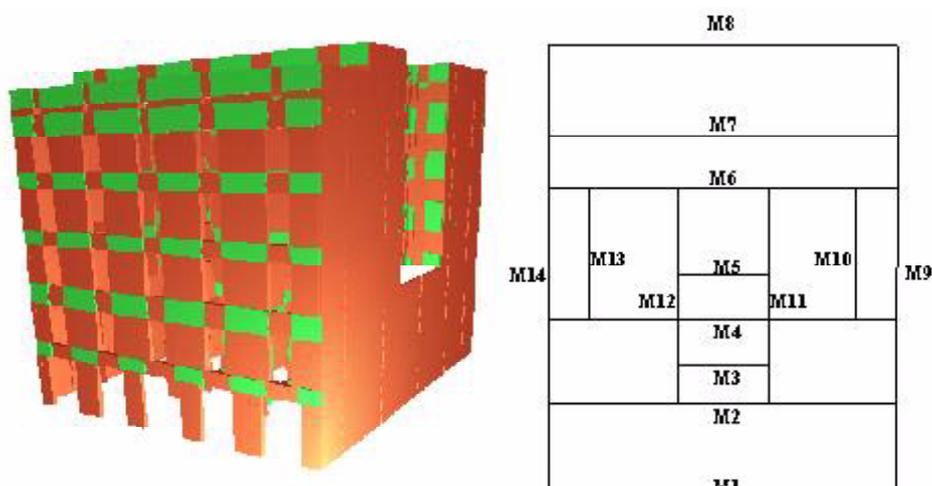


Figura 11.8. Modelo tridimensional del edificio de 6 niveles (M.3) del Eixample (Bonett et al., 2003).

Cada muro ha sido considerado como el ensamblaje de las pilares de mampostería, dinteles y elementos tipo barra (en algunos muros), conectados a los nodos del modelo por extremidades rígidas. Todos los nodos tienen 5 grados de libertad (3 componentes de desplazamiento y 2 de rotación alrededor de los ejes x , y) excepto los nodos de la base del modelo. Los forjados y techos se han modelado como una membrana de elementos finitos, definida por 3 o 4 nodos conectados con los nodos tridimensionales de cada nivel. Se identifica una dirección principal, la cual se caracteriza por su módulo de elasticidad E_1 y, la dirección perpendicular a ésta, se caracteriza por un módulo de elasticidad E_2 . La Figura 11.9 representa el modelo de macro elemento de los muros 1 y 2 respectivamente.

La distribución en planta y elevación de los modelos de 4 y 5 niveles, es exactamente igual a la que se muestra en la Figura 11.8.

11.3.3 Incertidumbre en los materiales

Para modelar el sistema constructivo de estos edificios, es necesario analizar los materiales primarios que constituyen sus principales elementos. Dentro de estos materiales es indispensable destacar los ladrillos y el mortero de cal, que al unirse, conforman lo que se conoce como "obra de fábrica" y que constituye, la técnica fundamental que define el sistema constructivo de los edificios de esta zona de la ciudad.

Los ladrillos son el material básico de la construcción, siendo utilizado ampliamente en muros, escaleras, revoltones y en las cubiertas. Consiste básicamente en unidades de arcilla cocida las cuales pueden ser macizas o con agujeros. La forma

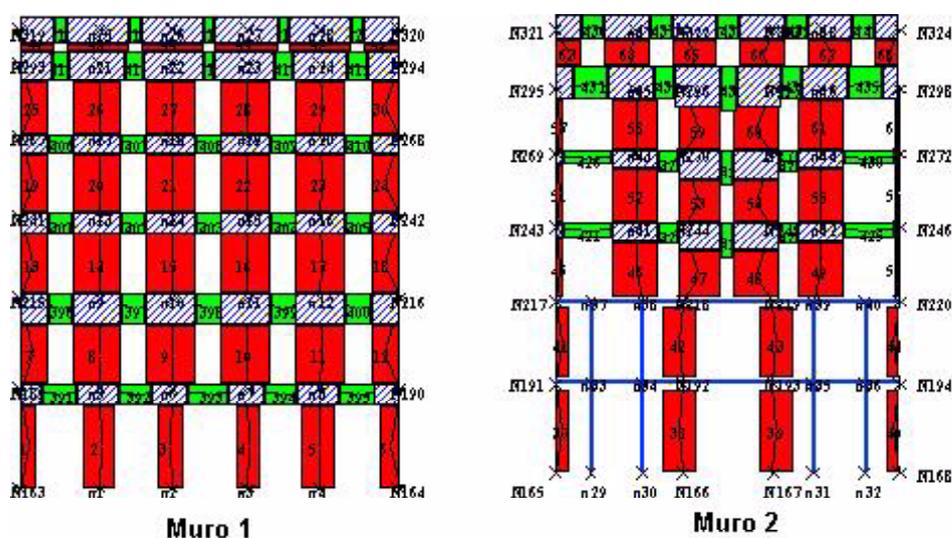


Figura 11.9. Modelo de macro elemento - Muros 1 y 2 del edificio de 6 niveles.

varía dependiendo del tipo y uso que se le dé a estas piezas, no obstante, las dimensiones más utilizadas son unidades de 30×15 cm con espesores que varían entre 3 y 11 cm. La producción de estas piezas, se realizaba de forma manual hasta principios del siglo *XX*. A partir de entonces, se implementó un sistema mecánico que mejoró considerablemente la compactación de las piezas y, como consecuencia directa, se redujo la porosidad, obteniendo así piezas más homogéneas y con una forma mucho más regular, lo que hizo más fácil su colocación en obra.

El mortero comúnmente utilizado en "l'Eixample" es de cal, que se conoce con el nombre de cal gruesa o cal ordinaria, para distinguirla de la cal hidráulica. El amplio uso que se le dio a este material, estuvo asociado a la tradición constructiva, a los hábitos de consumo y, aparentemente a su capacidad resistente, que para principios del siglo *XX*, se consideraba más que adecuada.

Hasta 1920, año en el cual comienza a funcionar el laboratorio de ensayos de la Universidad Industrial de Barcelona, las propiedades mecánicas de estos materiales se determinaban de forma empírica. A partir de este momento, se realizaron algunos ensayos, aunque las dispersiones obtenidas fueron bastante elevadas. Hasta la fecha, no se conoce de la existencia de estudios rigurosos que permitan definir con certeza, las propiedades mecánicas de los materiales que conforman este tipo de sistema constructivo. En casos como éste, suele ser útil la opinión y el juicio de expertos a partir de comportamientos observados en otras regiones, donde las características de los materiales y del sistema estructural, pueden ser similares. Tal es el caso de la ciudad de Barcelona, en donde se sabe claramente que la gran mayoría de las estructuras existentes, carecen de un diseño sísmico y, sólo consideran las cargas gravitatorias y de viento, lo cual induce a pensar que la respuesta de estas estructuras

frente la acción sísmica puede ser muy deficiente. Adicionalmente, se conoce el proceso constructivo empleado en la ciudad, lo cual permite claramente identificar las bondades y desventajas de este sistema (Mañà, 1997).

Considerando los aspectos mencionados, los principales parámetros y propiedades mecánicas de los materiales del modelo, se definen como variables aleatorias, para tener en cuenta las elevadas incertidumbres involucradas. Estas variables se definen mediante funciones de distribución de probabilidad, caracterizadas por un valor medio y una covarianza.

A continuación se describen las principales propiedades mecánicas de los materiales utilizados para definir el modelo tipo de l'Eixample.

- Mampostería

Módulo de elasticidad del muro, $E = 2.10 * 10^9 \text{ N/m}^2$.

Módulo de cortante, $G = 0.7 * 10^9 \text{ N/m}^2$.

Resistencia a cortante, $\tau = 1.0 * 10^5 \text{ N/m}^2$.

Factor de ablandamiento para pilares, $\beta_p = 0.5$.

Factor de ablandamiento para dinteles, $\beta_d = 0.05$.

- Pilares de fundición

Módulo de elasticidad, $E_s = 2.10 * 10^{11} \text{ N/m}^2$

Peso específico, $\gamma_s = 7850 \text{ kg/m}^3$.

- Pilares de hormigón

Modulo de elasticidad, $E_h = 2.8 * 10^9 \text{ N/m}^2$

Peso específico, $\gamma_h = 2500 \text{ kg/m}^3$

- Losas

Modulo de elasticidad en la dirección principal, $E_1 = 4.20 * 10^9 \text{ N/m}^2$.

Modulo de elasticidad en la dirección perpendicular, $E_2 = 4.20 * 10^7 \text{ N/m}^2$.

Módulo de cortante, $G = 0.4 * 10^9 \text{ N/m}^2$.

De todas estas propiedades, se han definido como variables aleatorias los parámetros que se muestran en la Tabla 11.1, los cuales son considerados como los más representativos dentro de la respuesta estructural de este tipo de edificios. Se ha utilizado para las tres variables, la función de distribución de probabilidad Normal, donde la media de cada parámetro corresponden al valor propuesto por los expertos y la covarianza ha sido definida de tal forma que se cubra el rango principal de variación de cada parámetro.

Parámetro	Función de distribución	Media	Covarianza
Módulo de elasticidad, E	Normal	$2.1 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	0.3
Resistencia a cortante, τ	Normal	$1.0 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$	0.3
Factor β_p	Normal	0.5	0.3

Tabla 11.1. Variables aleatorias de los parámetros estructurales.

11.4 Capacidad sísmica

Para determinar las curvas de capacidad de los tres modelos, se utiliza el programa TreMuri desarrollado por Galasco et al. (2002), el cual permite realizar un análisis estático no lineal. Para este análisis y de acuerdo con la propuesta del método N2, se utiliza un patrón de cargas correspondiente al modo de vibración que representa la respuesta de la estructura ante cargas laterales. Generalmente, la curva de capacidad se construye para representar el primer modo, basándose en la suposición de que el modo fundamental de vibración es la respuesta predominante. Esto es generalmente válido para construcciones con períodos fundamentales de vibración hasta aproximadamente de 1 segundo. Para construcciones más flexibles, con un período fundamental mayor, deben considerarse los efectos producidos por los modos más altos. Lo anterior supone que previamente a realizar un análisis pushover, deberá llevarse a cabo un análisis modal que permita definir las frecuencias y los modos de vibrar. En este caso, el análisis numérico se ha realizado con el programa de ordenador TreMuri. La Tabla 11.2 muestra los tres primeros períodos de vibración y los factores de participación modal para el modelo de 6 niveles.

Modo	Frecuencia (Hz)	Período (s)	Masa participante (toneladas)		
			X	Y	Z
1	1.143	0.875	1488.34 (89 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
2	1.855	0.539	3.49 (0.21 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
3	1.950	0.513	0 (0 %)	1332.11 (82 %)	0 (0 %)

Tabla 11.2. Períodos y factores de participación del análisis modal - Modelo M.3.

Los tres primeros modos de vibración se muestran en la Figura 11.10. El primer modo de vibración corresponde a una traslación en la dirección transversal "X", el segundo modo es rotacional y, finalmente el modo de interés en éste caso es el tercero, ya que es el de traslación en la dirección longitudinal "Y" que, en este caso, es la que interesa para realizar el análisis. Una situación análoga, se presenta para los modelos de 4 y 5 niveles.

TreMuri, para cada forma modal, proporciona el correspondiente campo de fuerzas obtenido como el producto entre la matriz de masa y el correspondiente auto vector del modo considerado. Por lo tanto, para el caso de los tres modelos



Figura 11.10. Los tres primeros modos de vibración del modelo M.3 (6 niveles) (Bonett et al., 2003).

de edificios de mampostería no reforzada, es posible determinar una distribución de fuerzas coherente con el tercer modo de vibración. Se trata de una forma modal de flexión, orientada principalmente a lo largo del eje " Y " y, por lo tanto, involucra los muros 9, 10, 11, 12, 13 y 14 (ver Figura 11.8). No obstante, por simplicidad, sólo se aplican las cargas a los muros 9 y 14, que son los que realmente proporcionan la mayor rigidez en esta dirección. La Figura 11.11 muestra el patrón de cargas aplicado a los muros del edificio de 6 niveles.

Realizando un análisis estático no lineal (análisis "pushover") con este patrón de fuerzas, e incrementando el desplazamiento en la dirección "Y" en un nodo perteneciente a los muros 9 y 14, se obtienen las curvas de capacidad correspondiente al tercer modo de vibración de los tres modelos.

Para considerar las incertidumbres en los parámetros que caracterizan la respuesta estructural de los tres modelos, se utiliza la técnica de simulación por Monte Carlo. Por lo tanto, se generan 100 muestras para las tres variables aleatorias definidas en la Tabla 11.1 y se define un modelo para cada grupo de muestras, con lo cual se obtienen en total 100 curvas de capacidad. Para el proceso de simulación y análisis, se utiliza una avanzada herramienta computacional, STAC (CIMNE, 2002), que permite realizar este tipo de estudios.

El método N2 requiere que estas curvas de capacidad se transformen a un sistema de 1 Grado De Libertad GDL. Para ello, se utilizan los valores del participación modal Γ de la Tabla 11.3. Dividiendo las ordenadas de estas curvas por la masa del sistema equivalente m^* , se obtienen los espectros de capacidad del sistema de

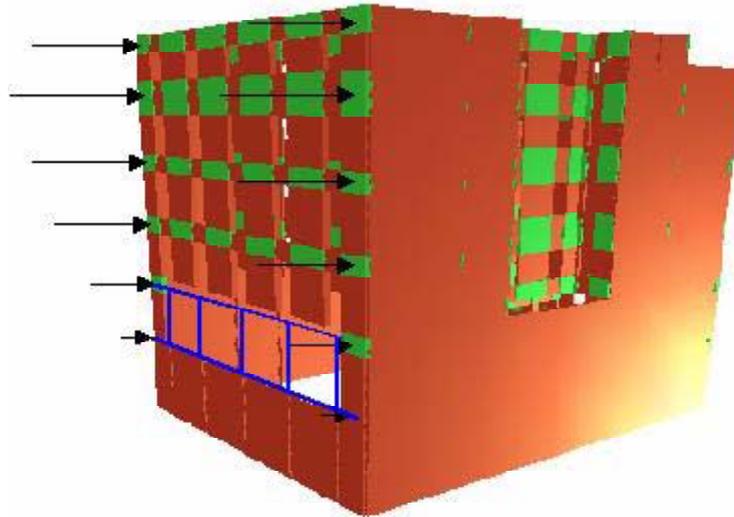


Figura 11.11. Sistema de fuerzas horizontales aplicado al modelo de 6 niveles para el análisis pushover (Bonett et al., 2003).

1 GDL equivalente para los tres modelos. La Figura 11.12 muestra el espectro de capacidad medio y sus correspondientes desviaciones (valor medio \pm una desviación estándar) para el modelo de 6 niveles (M.3), obtenidos mediante la simulación por el método de Monte Carlo. La influencia de las incertidumbres en la determinación de la capacidad de las estructuras sobre el valor de la demanda de desplazamiento (punto de desempeño) se analiza más adelante.

Modelo	No. Niveles	m^* (kN)	T^* (s)	Γ
M1	4	9204.5	0.44	1.22
M2	5	11262.8	0.47	1.22
M3	6	13321.1	0.51	1.23

Tabla 11.3. Parámetros del sistema de 1 GDL equivalente para los edificios de mampostería de la zona de l'Eixample en Barcelona.

La Figura 11.13 muestra los espectros de capacidad medios de los edificios de 4, 5 y 6 niveles (M.1, M.2 y M.3 respectivamente).

Para evaluar el desempeño sísmico de estos edificios, se utilizan los espectros medios, como la representación más adecuada de la capacidad resistente de los tres modelos estructurales.

Para estos tres espectros, se obtiene la representación bilineal mediante los valores de desplazamiento y aceleración espectral para los puntos de cedencia (D_y^* , S_{ay}^*)

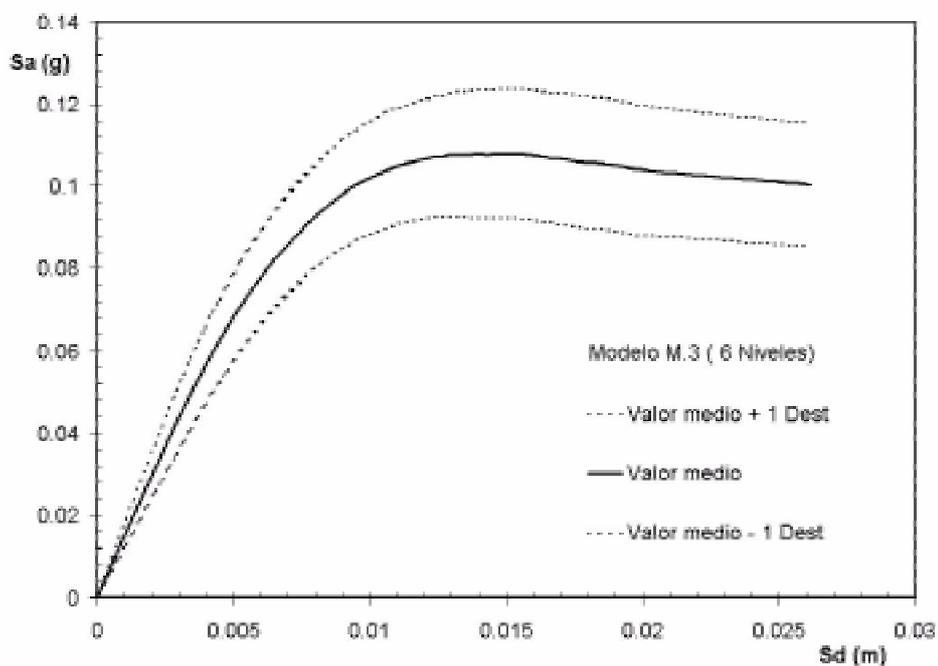


Figura 11.12. Espectros de capacidad: medio (\bar{x}), medio + 1 desviación estándar ($\bar{x} + 1\sigma$) y medio - 1 desviación estándar ($\bar{x} - 1\sigma$) - Modelo M.3 (Bonett et al., 2003).

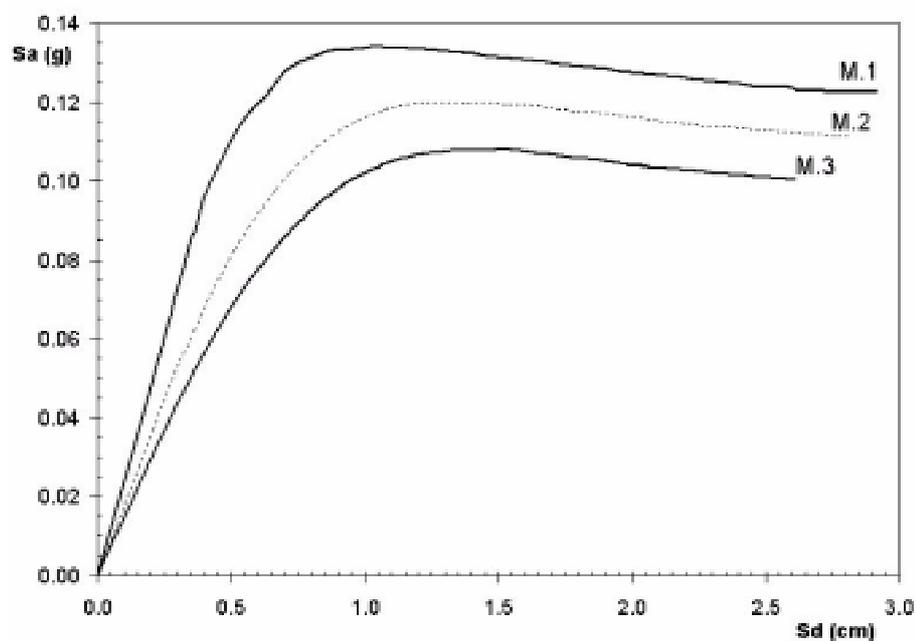


Figura 11.13. Espectros de capacidad medios para los modelos M.1, M.2 y M.3.

y capacidad última (D_u^* , S_{au}^*). La Tabla 11.4 muestra estos valores para los modelos M.1, M.2 y M.3. En esta Tabla, se observa que los tres modelos estructurales presentan una pequeña pérdida de resistencia, es decir, lo que en inglés se conoce como "softening". Los valores de capacidad última son menores que los correspondientes al punto de cedencia. La reducción en la resistencia es inferior al 7 % de la capacidad máxima para todos los modelos, por lo tanto, el uso del método N2, que requiere una rigidez post-cedencia igual a cero, como se explicó en el capítulo 3, puede ser aplicado perfectamente, debido a que la influencia de una reducción de este orden de magnitud, sobre la demanda de desplazamiento, es poco significativa (Fajfar, 2000).

Modelo	D_y^* (cm)	S_{ay}^* (g)	D_u^* (m)	S_{au}^* (g)
M.1	0.63	0.132	2.91	0.123
M.2	0.64	0.116	2.82	0.111
M.3	0.69	0.105	2.61	0.100

Tabla 11.4. Parámetros de la representación bilineal del espectro de capacidad de los modelos M.1, M.2 y M.3.

11.5 Resumen y discusión

Los edificios de mampostería no reforzada, representan el 70% de los edificios existentes en el distrito de "l'Eixample", el cual tiene un importante valor histórico, económico y cultural para la ciudad de Barcelona. Los edificios de este distrito, se encuentran agrupados por manzanas o islas de $113\text{ m} \times 113\text{ m}$, con chaflanes en las esquinas y un promedio de 25 edificios por manzana. La mayoría de los edificios han sido diseñados y construidos a partir de un mismo modelo estructural, que carece de cualquier consideración sísmica. Este "modelo tipo de l'Eixample" corresponde a un edificio que varía entre 4 y 7 niveles, con un sistema resistente de muros de ladrillo, con espesores de 30 cm en las fachadas y 15 cm en todos los demás muros portantes. En la planta del sótano y planta baja, se suelen utilizar pilares de fundición y jácenas, sobre las cuales se apoyan directamente los muros portantes de la estructura. Los pilares se apoyan en un dado, el cual a su vez se apoya en una zapata de mampostería con mortero de cal o en la propia cimentación corrida, dando lugar a conexiones entre estos elementos que pueden ser consideradas como nodos muy deformables (casi articulados). Los forjados suelen ser de dos tipos: para las dos primeras plantas, se utilizan forjados de viguetas metálicas y bovedilla cerámica simplemente apoyada en jácenas metálicas y pilares de fundición o bien en paredes. Encima de la bovedilla se colocan los cascotes y sobre ellos el mortero de cal y el pavimento. Para las demás plantas, el tipo de forjado es de vigueta de madera y bovedilla cerámica, formado por dos hojas de rasilla, sobre la que se rellena con

casco, mortero de cal y pavimento. Para definir los modelos que representan esta tipología, se utiliza una base de datos proporcionada por el Servicio de Protección Civil de Barcelona, a partir de la cual, es posible identificar el número de edificios de cada tipología en la ciudad y algunas características generales, tales como: el número de niveles, el tipo de forjado, la edad, el área en planta, entre otras. Adicionalmente, se utiliza para la modelación, los planos estructurales y las memorias de cálculo de un edificio de 6 niveles, construido en el año de 1882, que puede considerarse como altamente representativo de esta tipología en la ciudad. Por lo tanto, se ha optado por definir un modelo de 6 niveles con la misma distribución en planta y elevación de este edificio, que coincide perfectamente con el modelo tipo de "l'Eixample" descrito por Paricio (2001). A partir de este modelo, manteniendo la distribución en planta y elevación, se han definido dos modelos adicionales, reduciendo el número de niveles. En total, se tienen 3 modelos de 4, 5 y 6 niveles (M.1, M.2 y M.3 respectivamente), que representan el 80% de los edificios de mampostería no reforzada de "l'Eixample". Para la modelización de estos tres edificios, se utiliza el programa TreMuri, desarrollado por Galasco et al., (2002), que usa un modelo de macro elementos para representar los paneles de mampostería y considera el daño en la estructura, por medio de modelos teóricos que han sido calibrados a partir de los mecanismos de disipación observados en casos reales. La capacidad resistente de estos edificios ante cargas laterales, se representa por medio de espectros de capacidad, que se obtienen a partir de un análisis estático no lineal ("análisis pushover").

De los espectros de capacidad obtenidos para los tres modelos estructurales se concluye que la capacidad en este tipo de estructuras, disminuye con el incremento en el número de niveles. Así pues, el edificio de 4 niveles es el más resistente y el que posee mayor capacidad de deformación. Por lo tanto, en zonas de sismicidad moderada y alta, para evitar un mal desempeño ante cargas de tipo sísmico, no deben diseñarse ni construirse edificios de elevación alta, que tengan un sistema resistente de cargas laterales, a base de muros de mampostería no reforzada.