

Apéndice B

Descripción de la ciudad de Barcelona

Barcelona se encuentra situada en una zona de sismicidad moderada y dispone de varios estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico. En este anexo se presenta una breve descripción de la ciudad.

Barcelona es la segunda ciudad de España y se encuentra situada en el mar Mediterráneo. Es la capital política y económica de Cataluña y está dividida en 10 distritos llamados: Ciutat Vella, Eixample, Sants-Montjuic, Les Corts, Sarria-Sant Gervasi, Gràcia, Horta-Guinardó, Nou Barris, Sant Andreu y Sant Martí (figura B.1). Pero existe un cinturón de ciudades limítrofes que forman parte del área metropolitana de Barcelona, donde se acumula la mitad de la población de Cataluña.

Los edificios aquí modelados pertenecen a una emblemática zona de la ciudad de Barcelona, llamada distrito del *Eixample*, en castellano se conoce con el nombre de *Ensanche*. Este distrito tiene un importante valor histórico y arquitectónico, fue diseñado a mediados del siglo XIX por Ildefons Cerdà. Barcelona, en el año 2004, tenía una población de 1.578.546 habitantes, cifra oficial de población a 1 de enero de 2004. Como se puede observar en la figura



Figura B.1: Barrios de Barcelona, Mena (2002).

B.2 el Eixample es el barrio que mayor número de habitantes tiene (16%).

En el año 1860 se produjo la aprobación oficial, por parte del gobierno de Madrid, del proyecto de urbanización creado por el ingeniero Ildefons Cerdà, al margen del concurso convocado por el Ayuntamiento de Barcelona que decidió a favor del arquitecto Antoni Rovira i Trias. Cerdà propuso un proyecto de urbanización perfectamente racional, concebido para resolver de forma técnica y aséptica los problemas que creaban las estructuras obsoletas de las ciudades antiguas. Su estudio esmerado por las condiciones de vida de la Barcelona amurallada y el análisis comparativo con otras ciudades de Europa, dieron como resultado “La Teoría de la Urbanización”, el primer tratado moderno de urbanismo y que fue parte de la memoria de su proyecto de “Eixample”. Cerdà primero elaboró una teoría y después la aplicó al caso concreto que se le planteaba. (Información tomada de la página web: http://www.proeixample.com/ritme/ritme_cerda.htm).

El proyecto de Cerdà tenía un perfecto equilibrio, una dimensión global, es-

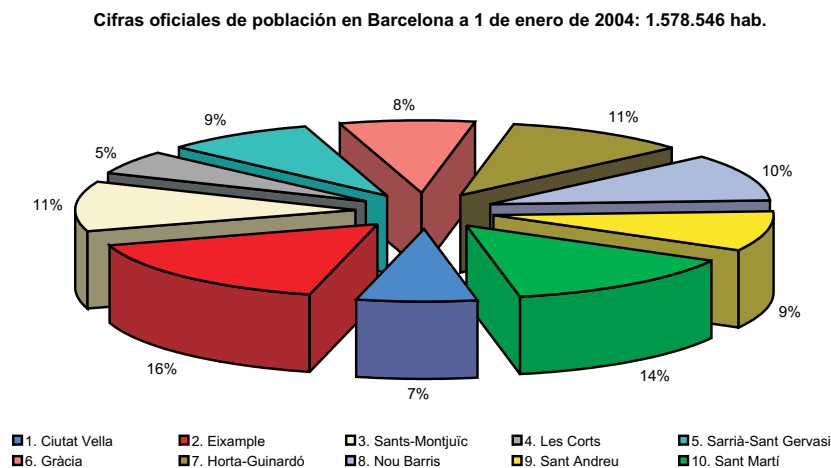


Figura B.2: Población de Barcelona por distritos (Datos dado en tanto %).

taba diseñando un tejido residencial, el cual estaba dividido en dos grandes unidades, que entonces se subdividían en cuatro sectores y estos cuatro sectores en cuatro pequeños barrios. La dotación de equipamientos corresponde a un hospital por cada unidad, un mercado por cada sector y una escuela por cada barrio, dejando para la periferia los grandes equipamientos, como el cementerio, el hipódromo, etc. (Información tomada de la página web: http://www.proeixample.com/ritme/ritme_cerda.htm).

L“Eixample” de Cerdà es una cuadrícula de 113,33 metros de lado, donde destinó unos 20m de ancho a las calles, de los cuales, 10m eran para las aceras de 5m cada una. Esta cuadrícula fue orientada de manera que los ángulos de las manzanas o bloques (o illas, en catalán como él las llamaba) coincidan con los puntos cardinales. También introdujo un gran detalle a las esquinas, el chafán, con 20m de costado, el cual permite una perfecta visibilidad de la circulación, un tráfico más fluido en todas las direcciones, sobre todo para el transporte público que él tenía en mente, el tranvía de vapor, siendo éste el que determinó el ángulo de 45° en las esquinas, además de esto, el chafán daba una notable ligereza al conjunto edificado. Estos bloques eran de un tamaño estándar, a una altura limitada, dejando un espacio interior abierto

para garantizar la cantidad máxima de sol, de luz y de ventilación. Este sistema cubría $12370 m^2$, de los cuales, por lo menos $800 m^2$ eran destinados a jardines (figura B.3). Aproximadamente, un total de 520 manzanas o bloques forman el Eixample. En la figura B.3 se muestra este sistema de manzanas o bloques diseñado por Cerdà.

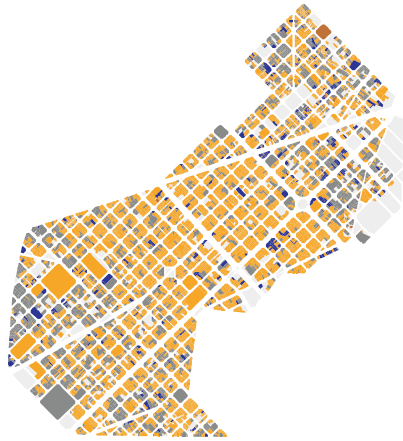


Figura B.3: Distrito l'Eixample (Lantada, 2006).

Algunas de las previsiones de Cerdà no se cumplieron. Él quería situar la plaza central de su *Eixample* en el punto de confluencia de las tres vías principales (la Meridiana, la Gran Vía y la Diagonal), lo que se conoce hoy en día como la “Plaça de les Glòries”, pero la dinámica urbana prefirió la “Plaça de Catalunya”. La trama ideada hace 150 años se ha probado perfectamente operativa para una Barcelona abocada al siglo XXI y, sin duda, éste es el mejor elogio que se puede hacer al creador del urbanismo moderno. A pesar que este espacio urbano fue construido en terrenos privados, sobrepasando las alturas previstas de los edificios y en todas las manzanas se han incluido, en la práctica, muy pocos jardines internos y hoy en día, *l'Eixample* cuenta con oficinas, hoteles, bancos, viviendas multifamiliares, etc. L'Eixample se divide en dos: Eixample Dret (Ensanche Derecho) y Eixample Esquerra (Ensanche Izquierdo). L'Eixample derecho contiene la mayoría de la arquitectura más distinguida, debido a que fue la primera área desarrollada, con muchos “palacios”, algunos de ellos, diseñados por Antonio Gaudí, para los

comerciantes ricos del textil. Muchos apartamentos han dejado de ser hogares familiares para pasar a ser oficinas profesionales, bancos, museos, avenidas principales de tiendas, bares modernos y restaurantes. L'Eixample izquierdo fue construido un poco más tarde que el derecho y es un poco más residencial y uniforme. Es más esparcido con los servicios generales de la ciudad tales como: el hospital clínico, la escuela industrial, la cárcel modelo de 1905, etc. Rápidamente, se convirtió en el área nueva para algunas actividades de la ciudad. Un matadero (scorxador) enorme fue construido en el extremo izquierdo, y fue cerrado en el año 1979. Esta zona tiene dos mercados muy grandes, un área para las instituciones académicas, incluyendo la universidad que se instaló en los años 1842. (Información tomada de la página web: www.geographyfieldwork.com).

En la figura B.4 se muestra la planta de estas manzanas y se puede ver que todos los edificios están unidos unos con otros para formar un solo bloque. Aunque muchos de ellos son independientes, es frecuente encontrar que entre dos edificios viejos se haya construido uno nuevo, aunque frecuentemente, los pisos de edificios contiguos tienen diversas elevaciones. En general, estos edificios tienen una planta rectangular con la excepción de los edificios situados en las esquinas. La mayoría de ellos presentan el problema de piso blando o suave, conocido en la literatura inglesa como “soft-storey”, donde la altura en las primeras plantas es diferente e importante respecto al resto de los pisos. Esto es debido a que estas primeras plantas son dedicadas al comercio.

La mayoría de las tipologías de edificios existentes en la ciudad de Barcelona son de obra de fábrica sin armar y de hormigón armado. Estas dos tipologías representan más de un 90% del total de los edificios construidos.

La mayoría de los edificios residenciales tienen alturas comprendidas entre 2 y 8 pisos. Los de una planta representan el 14% de los edificios y se encuentran en los barrios residenciales como Sarria-Sant Gervasi. Los edificios de más de once plantas ocupan el 2.4% y se localizan con mayor frecuencia en los barrios periféricos, como por ejemplo Sant Martí. Los edificios residenciales



Figura B.4: Planta típica sobre la rasante de los edificios existentes en el distrito l'Eixample de Barcelona

construidos hasta el año 1940 son de obra de fábrica de ladrillo no armada y la mayoría de los edificios construidos a partir de esta fecha, son edificios de hormigón armado con forjados reticulares.

B.1. El sistema constructivo

En el “Eixample” se pueden distinguir dos tipos de edificios, los edificios de línea o banda y los edificios de esquina o chafán. Estos edificios, con las mismas proporciones dan como resultado unas técnicas constructivas que se sistematizan debido a que se repiten constantemente, dando origen a un sistema constructivo que varía básicamente en la estética exterior, es decir en la fachada.

Los edificios del “Eixample” se pueden describir en cuatro épocas o períodos: durante los años 1860-1900 la época del pre-modernismo, de 1888 al 1915 el modernismo, y desde 1910 a 1936 la época del postmodernismo, siendo el sistema constructivo predominante la obra de fábrica, conocida también como mampostería; el último período se da a partir de la década de los 60, cuando la introducción del hormigón armado como sistema constructivo en edificaciones empieza a ser importante, dando lugar al comienzo de la arquitectura contemporánea (Paricio, 2001).

El “Eixample” es básicamente de obra de fábrica de ladrillo, la cual es una combinación entre el material y la mano de obra mediante una técnica, la construcción con obra de fábrica resuelve totalmente el sistema estructural de muros, siendo las paredes de carga, las de la caja de escaleras y las de carga y trabada, los elementos constructivos básicos del sistema.

Las paredes, como ya se dijo anteriormente, son el elemento principal del sistema estructural de los edificios del “Eixample” y, según su posición dentro del conjunto estructural, tienen espesores diversos. Las paredes de las fachadas principales tienen espesores que varían entre 40cm y 60cm, las fachadas posteriores tienen espesores del orden de 30cm y las paredes medianeras (paredes laterales) tienen espesores del orden de 15cm y 30cm, constituyendo estos 4 tipos de paredes el sistema estructural exterior. El sistema interior está constituido por las paredes interiores paralelas a las fachadas (principal y posterior) con espesores de 15cm, siendo éstas muy esbeltas y sometidas a grandes cargas. Cuando existen pórticos en la planta baja del edificio, estas paredes se apoyan sobre los pórticos de jácenas de madera o metálicas. Otro elemento que da rigidez y estabilidad a la estructura es la caja de escaleras y los patios interiores, éstos suelen tener paredes de 15cm de espesor. La caja de escaleras posee una componente estructural igual o más fuerte que el peso que soporta ella misma, debido a la forma de construcción de las escaleras. Finalmente, las losas terminan de constituir el sistema constructivo de los edificios y según el año de construcción pueden estar formadas

de viguetas de madera, metálicas o de hormigón. Los forjados de vigueta metálica y revoltón cerámico son muy comunes en los techos de planta baja, apoyándose en jácenas y pilares metálicos o bien en paredes. Los forjados de vigueta de madera y revoltón cerámico son muy comunes en el resto de las plantas, están formados por dos hojas de rasilla y sobre éstas existen cascos en relleno de senos, mortero de cal y pavimento. El revoltón constituye el sistema tradicional de resolver el sistema de entrevigados, las bovedillas de cerámica o de mortero son rellenas de cascotes de cemento o mortero de baja resistencia. Las jácenas también forman parte de estos edificios desde el primer momento, se empiezan a utilizar a partir de la segunda década del “Eixample”, sobretodo en la zona del Eixample derecho donde el textil es muy importante (Paricio, 2001). Las jácenas se comienzan a utilizar en las plantas bajas de los edificios para liberar espacio, éstas pueden ser de madera, de perfiles laminados, de celosía o de hormigón según la época de construcción.

Para simplificar el análisis de este modelo constructivo, se esquematizan estos modelos, a modelos que representen la mayoría de los edificios, estos se pueden agrupar en dos tipos: los edificios de banda, los cuales se pueden dividir en edificios de primera generación y edificios de segunda generación, y los edificios de esquina que actualmente se están construyendo de hormigón.

Los edificios de primera generación presentan una construcción continua y homogénea, donde todas las paredes llegan a la base y están constituidas por un sistema de entramado de paredes, presentan dimensiones pequeñas y la caja de escaleras o patios centrales se conectan con las paredes perimetrales mediante la prolongación de sus paredes. Los edificios de segunda generación, presentan un sistema de pórticos de pilares y jácenas para liberar espacio en las primeras plantas, el resto del edificio forma una construcción continua. Este sistema de pórticos, que en muchos casos son metálicos, también se ve aplicado a los edificios de esquina, los cuales no presentan siempre, un mismo patrón de axonometría (Paricio, 2001).

La función de la caja de escaleras y/o patios es muy importante ya que funcionan como un núcleo que colabora a la rigidez del conjunto estructural, debido a que casi siempre se encuentran en el centro geométrico de la planta, los patios además de contribuir a la rigidez de la estructura, sirven de ventilación. Pero, también hay que tener presente que estos elementos pueden modificar la rigidez del edificio en su base, porque por ejemplo, se puede dar el caso de que la caja de escaleras arranque del subterráneo, mientras que los patios pueden salir del primer piso. Este sistema constructivo también puede ser muy vulnerable debido a los cambios que se produzcan durante la vida útil del edificio, por ejemplo, los edificios pueden experimentar modificaciones generales dentro de cada piso, pueden crecer en vertical, etc.

Los edificios se encuentran clasificados según su tipología y altura. A continuación se presenta la clasificación de las dos tipologías estudiadas en este trabajo:

Tipología	Clasificación	Nº plantas
Hormigón armado	altos	+ 8
	medios	4-7
	bajos	1-3
Obra de fábrica de ladrillo	altos	+ 6
	medios	3-5
	bajos	1-2

En la figura B.5, se presentan una serie de fotos, que describen por sí solas el sistema constructivo de este distrito en estudio.

B.2. La amenaza sísmica en Barcelona

La amenaza sísmica de Barcelona está caracterizada a partir de un estudio hecho para Cataluña. Barcelona tiene una geología variada, en el relieve



Figura B.5: Sistema constructivo del Distrito l'Eixample.

montañoso se encuentran materiales metamórficos y terciarios, y granitos del paleozoico, en la parte central de la ciudad, se encuentran materiales del cuaternario antiguo y en los deltas (río Besòs y río Llobregat) se encuentran materiales del cuaternario reciente.

Los principales eventos históricos ocurridos en Cataluña, se encuentran en el Pirineo Central, en La Garrotxa, en el Ripollés y en el Vallès Oriental. Algunos de estos sismos fueron sentidos en toda Cataluña y en la ciudad de Barcelona se llegaron a percibir intensidades de VI y VII (Susagna y Goula, 1999).

En general, España no se encuentra localizada en zonas de alta sismicidad, a pesar de que muchas estructuras han sufrido daños debido a terremotos pasados y se han registrado un gran número de pérdidas humanas. La prime-

ra normativa sísmica es del 1968. En este año, la Comisión Interministerial de la Presidencia del Gobierno aprobó, provisionalmente, este código sísmico general (PGS-1, 1969) que incluía un mapa de peligrosidad sísmica para España. En el año 1974 se expidió una versión actualizada del código sísmico. De acuerdo a esta nueva normativa (PDS-1, 1974) la ciudad de Barcelona tenía asignada una intensidad VII en la escala MSK, una versión de esta escala se halla en el ATC-13 (1985). Con la norma posterior (NCSE-94, 1994), la cual estuvo vigente hasta el año 2002, Barcelona tenía asignada una aceleración de $0.04g$ y según esta normativa no era obligatoria la aplicación de la misma para una aceleración sísmica de cálculo inferior a $0.06g$; estudios realizados por el *Instituto Cartográfico de Cataluña*, predicen, para períodos de retorno de 500 años, aceleraciones superiores a $0.10g$, asemejándose a las aceleraciones propuestas por los primeros códigos españoles.

Barcelona no dispone de registros sísmicos de aceleración y, además, se encuentra situada en una zona de sismicidad moderada, con intensidades entre V y VII en la escala MSK. Cid (1998) realizó un estudio detallado sobre la zonificación sísmica de los suelos de Barcelona donde definió cuatro zonas bien diferenciadas, con las características principales de la respuesta sísmica del terreno. Para cada uno de los tipos de suelos existentes en Barcelona, se tienen espectros de respuesta y además se dispone de un grupo de acelerogramas artificiales generados, especialmente para la ciudad.

B.3. Información utilizada

Se dispone de una información bastante amplia, para una gran parte de los edificios existentes de la ciudad, se conoce la tipología, la altura, la geometría, el número de pisos, la edad, es decir, se dispone de una gran base de datos para llevar a cabo diferentes tipos de estudios en Barcelona.

En este trabajo se partió de documentación real, con planos estructurales

y arquitectónicos que se obtuvieron por parte de una empresa de ingeniería especialista en patología de edificaciones. También se contó con un estudio realizado en la Universidad Politécnica de Cataluña, sobre los posibles efectos durante la construcción de un túnel para el paso del tren de alta velocidad (TGV) bajo unas manzanas del “Eixample”, ubicadas en la zona del templo de la Sagrada Familia.

Con toda esta documentación relativa a los edificios, que en estudios anteriores no se disponía, se han seleccionado los datos más relevantes y los planos con mayor información, para poder realizar estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico.

Apéndice C

Descripción de los programas utilizados

C.1. Programa BCSEC

El programa BCSEC es un programa computacional que permite obtener las características mecánicas no lineales de las secciones. Fue desarrollado por (Bairán, 1999; 2000).

El programa BCSEC (Bairán, 2000) se utiliza para determinar las curvas momento-curvatura ($m - \phi$) para las secciones. Estas curvas se convierten posteriormente a un diagrama elastoplástico, para así poder calcular la ductilidad de la sección en función del esfuerzo axial. Se ha construido un módulo especial, que se ha incorporado al programa BCSEC, para el cálculo directo de las curvas momento-curvatura en los puntos requeridos por el programa RUAUMOKO y la correspondiente simplificación bilineal y el cálculo de la ductilidad de curvaturas, la cual se define de acuerdo a una aproximación elastoplástica (Paulay y Priestley, 1992):

$$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y}$$

En la figura C.1 se describe el diagrama $m - \phi$, donde la rama elástica se define como la recta que une el origen con el punto definido por la primera cedencia (ϕ'_y) y el momento de cedencia (M_y), la cual se prolonga hasta alcanzar el momento nominal resistente (M_n) y a partir de aquí se comienza la rama plástica; el fallo ocurre cuando se alcanza la curvatura última (ϕ_u). ϕ_y es la cedencia del modelo elasto-plástico (Moreno et al., 2004a).

$$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y} = \frac{\phi_u}{\phi'_y \cdot M_n} M_y \quad (C.1)$$

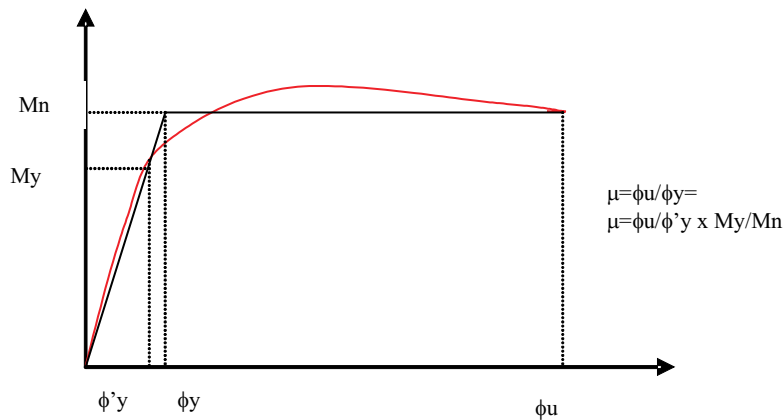


Figura C.1: Diagrama momento-curvatura.

Se ha tenido en cuenta el confinamiento del hormigón mediante la ecuación constitutiva de Kent y Park (Park y Paulay, 1994), el endurecimiento por deformación del acero y los planos de rotura según el Eurocódigo 2 (1992), excepto la deformación máxima a tracción del 1% que ha sido modificada a un valor suficientemente grande (0.08) para que no limite la curvatura última y se pueda desarrollar toda la ductilidad de la sección.

En el programa BCSEC se definen los distintos materiales que constituyen la sección, asignando a cada uno la curva de tensión-deformación correspondiente. En este caso los materiales son hormigón y acero y las curvas asignadas parábola-rectángulo y lineal-rectángulo, respectivamente (figura C.2). La

Apéndices

sección propiamente dicha se define geoméricamente asignando a cada geometría un material previamente definido. En la figura C.3, se puede observar la sección transversal definida y el gráfico de superficie mecánica que muestra los diagramas momento-curvatura y la ductilidad correspondiente para cada diagrama y para cada esfuerzo axial, así como los planos de deformación y diagramas de tensiones para cada curvatura y esfuerzo axial actuante.

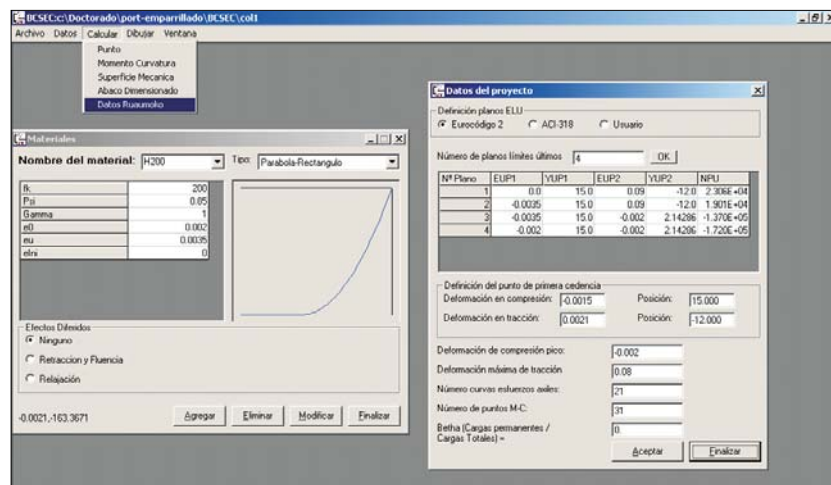


Figura C.2: Definición de los materiales y datos del proyecto.

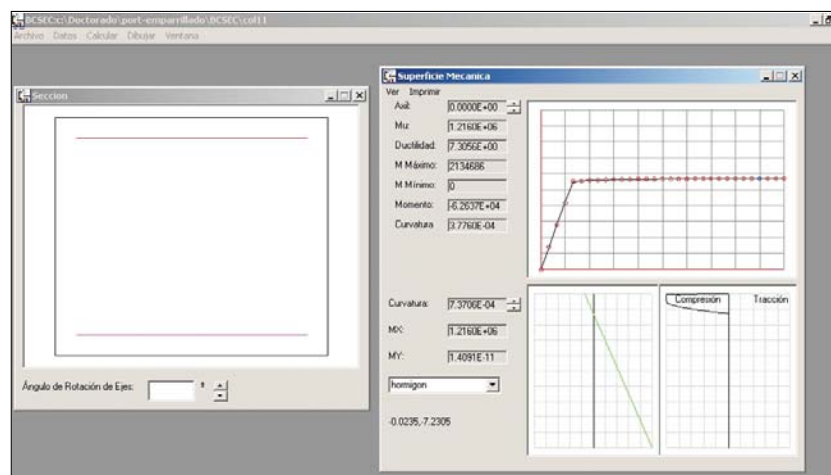


Figura C.3: Sección tipo y diagrama de interacción.

C.2. Programa RUAUMOKO

El programa RUAUMOKO es un programa de análisis no lineal estático y dinámico, desarrollado en la Universidad de Canterbury (Carr, 2000). RUAUMOKO incorpora un programa post-procesador llamado DYNAPLOT para poder graficar los resultados.

Este programa dispone de varios modelos para considerar el comportamiento de degradación y resistencia de las barras. La mayoría de las reglas de histéresis permiten considerar la degradación de rigidez en las barras.

En este trabajo se utilizó el RUAUMOKO 2D y las estructuras se modelaron como pórticos planos, conectados unos a otros, en cada piso se consideró el efecto del diafragma rígido.

El programa tiene diferentes modelos para representar la rigidez de la estructura en las barras. En este trabajo, se han utilizado las propiedades básicas de las secciones. Un modelo “Giberson” para las vigas y un modelo “Beam-column” para las columnas, los cuales tienen posibles formaciones de rótulas plásticas en uno o ambos extremos de las secciones. Para estos modelos se puede utilizar cualquier regla de histéresis que gobierne el comportamiento de la rótula plástica.

El programa RUAUMOKO tiene incorporadas muchas reglas de histéresis para la degradación de rigidez. La mayoría de las reglas de degradación han sido desarrolladas para representar el comportamiento de las barras de hormigón armado. Para representar el comportamiento inelástico de las barras dispone tanto de reglas sencillas, como la elasto-plástica, hasta la más complicada, como por ejemplo la desarrollada por Wayne Stewart (1987).

En este trabajo se emplearon las reglas de histéresis de Takeda Modificada y la de Clough. La regla de histéresis *Clough Degrading Stiffnes* se puede considerar como un caso particular de la *Modified Takeda* (Otani, 1974). En estas reglas de histéresis existen dos parámetros fundamentales; uno controla

la rigidez de la rama de descarga (α) y el otro la rigidez de la rama de recarga (β). El incremento de α decrece la rigidez de descarga y el incremento de β aumenta la rigidez de recarga. Estos parámetros se encuentran dentro de unos intervalos dados por Takeda et al. (1970), los cuales se obtuvieron a partir de ensayos experimentales ($0,0 \leq \alpha \leq 0,5$ y $0,0 \leq \beta \leq 0,6$). En este trabajo se tomaron los valores $\alpha = 0,4$ y $\beta = 0,3$ en base a experiencia de otros investigadores. Si $\alpha = 0$ y $\beta = 0$ se define la regla de Clough (Otani, 1981).

Para permitir la degradación de resistencia en los diagramas de interacción, los niveles de cedencia pueden ser reducidos en función de la ductilidad o del número de ciclos de cargas reversiles. Para más detalle se recomienda ver los manuales del programa RUAUMOKO.

C.3. Programa SAP2000

El programa SAP2000 es un programa de elementos finitos para el análisis estático y dinámico, lineal y no lineal de estructuras, desarrollado en Berkeley por Habibullah y Wilson (SAP2000, 2002). Permite elementos barras con 6 grados de libertad por nudo así como varios elementos lámina. En esta tesis se ha empleado utilizando siempre elementos barra, y tipos de análisis estático no lineal y dinámico lineal.

C.4. Programa SIMQKE

El programa SIMQKE es un programa para generar acelerogramas artificiales, desarrollado originalmente por Gasparini y Venmarcke (1976). El programa utilizado en este trabajo es de Carr (1997).

El programa calcula una función densidad del espectro de potencia a partir de un espectro de respuesta suavizado especificado; genera acelerogramas artificiales estáticamente independientes de las historias en el tiempo y trata de igualar por un proceso iterativo el espectro de respuesta especificado; lleva a cabo una corrección por línea base en el movimiento generado asegurando un cero al final de la velocidad del terreno; calcula el espectro de respuesta con las historias en el tiempo como entrada y, artificialmente eleva o baja la aceleración pico generada que corresponda exactamente a la aceleración pico objetiva.

C.5. Programa STAC

El programa STAC se orienta al método de Monte Carlo. El método de Monte Carlo es un método numérico que permite resolver problemas matemáticos mediante simulación de variables aleatorias. Este programa fue desarrollado en el Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE), Zárate et al., (2002).

Cuando se habla de variable aleatoria es porque se ignora el valor específico que ésta tomará, pero se conoce bien el conjunto de valores que puede tomar y sus probabilidades. Al generar dichas variables se obtiene una muestra de valores que ajustan bien la distribución de probabilidad del modelo estocástico adoptado.

Este programa, por tanto, permite tener en cuenta las incertidumbres existentes en las propiedades mecánicas de los materiales. Mediante el programa STAC se definen las funciones de distribución de las variables y se les asigna un coeficiente de variación (figura C.4) de acuerdo con las recomendaciones de trabajos previos. Para las variables utilizadas en este trabajo, el tipo de distribución adoptada y los valores de los parámetros que las caracterizan,

son asignados teniendo en cuenta trabajos previos. En los resultados se obtienen los valores medios y la desviación estándar de cada variable de salida.

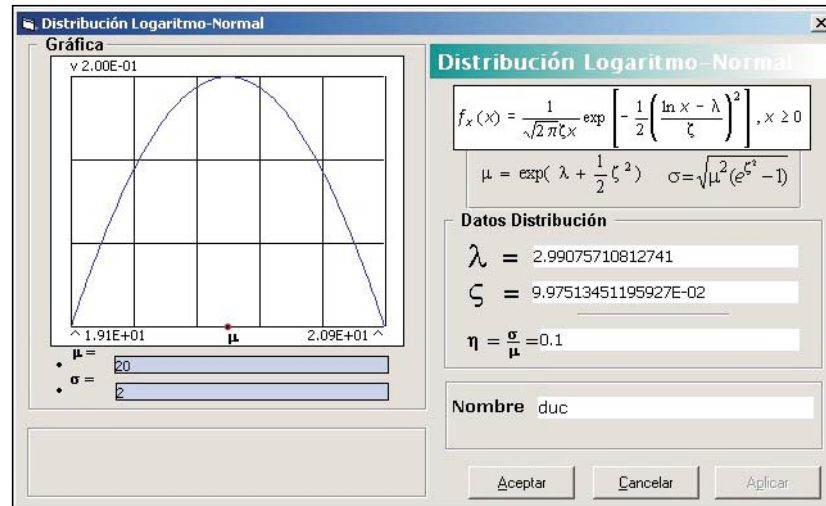


Figura C.4: Definición de variables aleatorias.

C.6. Programa TreMuri

El programa TreMuri es un programa tridimensional de análisis no lineal para estructuras de fábrica de ladrillo que ha sido desarrollado en la Universidad de Génova, Italia (Galasco et al., 2002). El programa representa los paneles de obra de fábrica de ladrillo mediante un modelo no lineal de macroelementos, propuesto por Gambarotta y Lagomarsino (1997).

El programa TreMuri es un programa de macroelementos, proyectado para un análisis incremental no lineal con control de fuerza o desplazamiento, análisis pushover, análisis modal y análisis dinámico con excitación sísmica en la base de la estructura de obra de fábrica de ladrillo, bidimensional o tridimensional.

El modelo implementado permite representar, con ocho grados de libertad

(gdl), los principales modos de fallo en el plano de la obra de fábrica de ladrillo. Los dos mecanismos de fallo son: el vuelco por flexión y el deslizamiento por cortante con fricción. En particular, el fenómeno de vuelco es modelado por un contacto elástico monolateral en los dos extremos del macro elemento, mientras que el deslizamiento por cortante se describe a través de una componente de deformación inelástica que tiene en cuenta los efectos de daño y fricción. El modelo considera, por medio de variables internas, la evolución del daño por deslizamiento, el cual controla el deterioro de la resistencia y la degradación de rigidez. El modelo de cortante del macroelemento, es una representación macroscópica de un modelo continuo (Gambarotta y Lagomarsino, 1997), en el cual los parámetros están directamente correlacionados a las propiedades mecánicas de los elementos de obra de fábrica de ladrillo.

Un macroelemento se divide en tres subestructuras o capas, donde en las zonas o capas extremas, con espesores infinitesimales, se concentran las deformaciones axiales (efectos axiales y vuelco) siendo infinitamente rígido a las acciones de corte y, en la zona central, se sitúan las deformaciones tangenciales. Esta zona corresponde prácticamente a la altura del panel y es indeformable axial y flexionalmente. En las zonas extremas se tienen 3 gdl: desplazamiento axial y horizontal y rotación; la parte central esta formada por 2 gdl, desplazamiento axial y rotación, formando un total de 8 gdl.

El modelo de daño del macromodelo utilizado en el programa para ensamblar el modelo de la pared, tiene en cuenta el efecto de la resistencia a compresión limitada de la obra de fábrica de ladrillo (especialmente en el mecanismo del vuelco) (Penna, 2002). El modelo incluye los efectos de agrietamiento por medio de una ley constitutiva no lineal con deterioro de la rigidez en compresión (Galasco et al., 2004).

A parte de sus características geométricas, el macroelemento es definido por seis parámetros: el módulo de cortante, la rigidez axial, la resistencia a cortante de la obra de fábrica de ladrillo, un coeficiente adimensional que controla la deformación inelástica, un coeficiente global de fricción y un factor que

controla la fase del ablandamiento (Galasco et al., 2004).

En cada edificio se identifican las paredes y las losas. Las paredes son los elementos portantes y poseen ciertas aberturas debido a las ventanas y puertas, mientras que las losas, a parte de compartir las cargas verticales con las paredes, son consideradas como elementos rígidos planos, sobre los cuales depende la distribución de las acciones horizontales entre las paredes. La representación en el plano de las paredes de obra de fábrica de ladrillo está dada por una subdivisión de cada pared en pilares y dinteles conectados entre si por áreas rígidas (nodos). Un pilar es una pared con longitud y altura igual a la altura adyacente de las aberturas de las puertas o ventanas; un dintel es una parte de la pared que une en dirección vertical dos aberturas, uniendo así las paredes en un plano. Todas las paredes unidas en un plano por las losas y los dinteles constituyen una pared plana.

En el modelo tridimensional se define un sistema de coordenadas global y en la conexión de dos o más paredes existen nodos tridimensionales con 5 grados de libertad, (desplazamientos en las 3 direcciones: x , y , z , y rotación alrededor del eje x e y). Las paredes se pueden definir como estructuras planas en un sistema de coordenadas local y con nodos dimensionales de 3 grados de libertad (dos desplazamientos y una rotación). Los elementos losa, son modelados como elementos finitos de membrana ortotrópicos, con 3 ó 4 nodos, y son identificados por una dirección principal con el módulo de Young E_1 , y en la dirección perpendicular con el módulo de Young E_2 , el módulo de cortante $G_{1,2}$ representa el grado de conexión de la pared debido a las losas, por medio de la dirección de armado de las mismas, representando en el plano la rigidez a cortante, la cual gobierna las acciones horizontales repartiéndola entre las diferentes paredes (Galasco et al., 2004).

Para llevar a cabo el análisis tridimensional hay que partir de algunas hipótesis sobre el comportamiento estructural y sísmico de las estructuras. La respuesta fuera del plano de las paredes y el comportamiento local a flexión en las losas no son considerados en la respuesta global del edificio, debido a que

esta es gobernada por su comportamiento en el plano.

Este programa permite la implementación de un análisis estático con 3 componentes de aceleración a lo largo de las 3 direcciones principales y, además, un análisis dinámico 3D con 3 componentes de entrada simultaneas (Galasco et al., 2004).