

- **Diseño sísmico de muros de cerramiento**
- **Modelos de análisis de muros de fábrica**
- **Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de la estructura mediante análisis no lineal**

El documento explica el uso de un programa de análisis sísmico de muros de mampostería distribuido comercialmente como TreMuri*, que ha sido desarrollado en la Universidad de Génova, Italia (Galasco et al., 2002).

Este programa esquematiza el edificio mediante “objetos estructurales” (paredes, forjados, vigas, pilares). Está 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. El tipo de análisis que realiza el programa permite evaluar directamente los mecanismos de colapso, la disipación de energía, mientras que permite determinar, en términos de estado límite de desplazamiento, una medida de la vulnerabilidad del edificio.

Dicho programa se ha utilizado dentro de la Tesis Doctoral “*Estudio del comportamiento de morteros reforzados con fibras de maíz, para componentes de viviendas de bajo coste*” [Cesar Reyes 2010] de la Universidad Politécnica de Cataluña, de donde se ha tomado este extracto.



dpr-barcelona

**ARQUITECTOS
POR CHILE** 



Sobre este documento: Reconocimiento-No comercial-Sin obras derivadas 3.0 España License.
Imágenes según fuente citada.

*.3muri distribuido por STA-DATA en <http://www.3muri.com/index.asp?lang=en> donde puede descargarse una demo gratuita, acceder a tutoriales (inglés-italiano) o comprar el programa completo.



8.3 Diseño sísmico de muros de cerramiento

Aparte del coste, la comodidad e higiene, un requisito indispensable y que además facilita la replicabilidad de una propuesta de bajo costo, es la seguridad estructural de la solución habitacional. Además de su propio peso y las cargas debidas al funcionamiento, las edificaciones se ven a veces sometidas a movimientos sísmicos.

La franja de países latinoamericanos ubicada al lado del Océano Pacífico se caracteriza por una actividad sísmica relevante, por lo que se hace necesario tomar en consideración una serie de parámetros que garanticen desde la fase de proyecto, la seguridad estructural del sistema.

Los sismos son causados por el movimiento de las placas tectónicas o por la actividad volcánica. La **Figura 8.7** muestra las regiones con mayor presencia de sismos en el mundo [7].

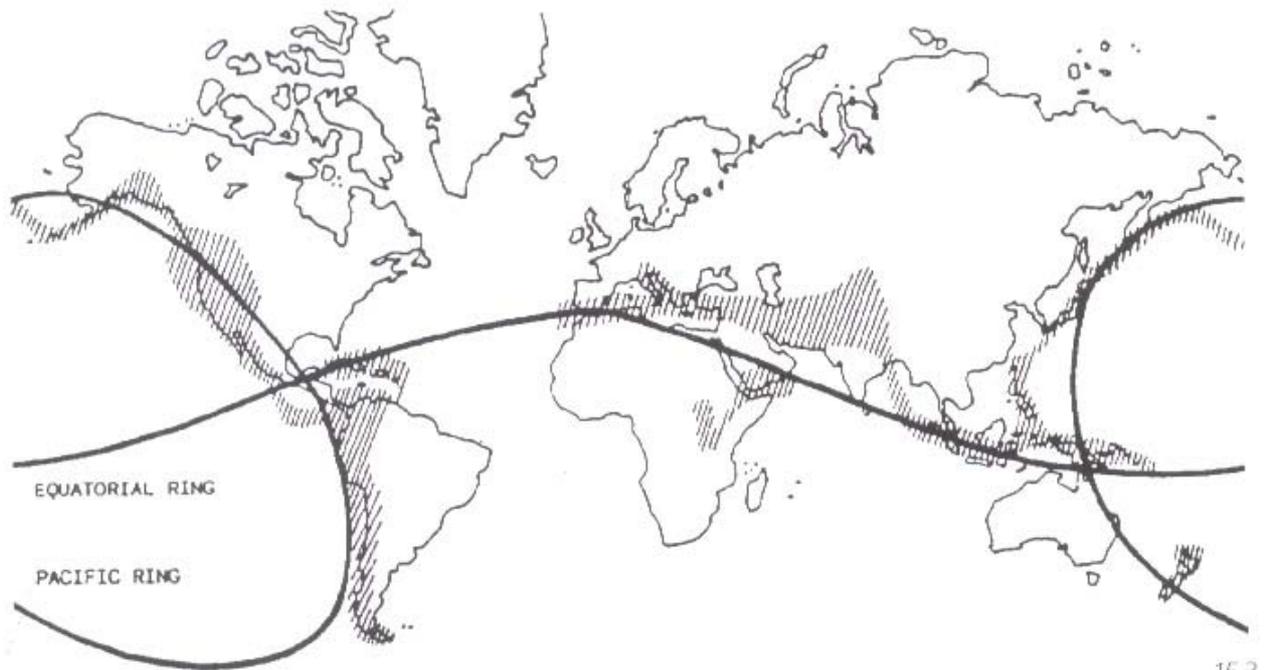


Figura 8.8. Zonas de riesgo sísmico. (Minke 2006)

La principal zona de riesgo sísmico es el llamado “Cinturón de Fuego del Pacífico”, que corresponde al litoral Pacífico en América del Sur, asciende hacia el Norte bordeando la costa Pacífica de Centro y Norteamérica y desciende a lo largo del litoral Asiático.

La otra zona cruza Europa de Este a Oeste, pasa por Turquía, Birmania y la India, y se une al Cinturón del Pacífico a la altura de las islas Célebes. En Asia se han registrado terremotos con intensidad 8 en la escala de Richter, mientras que en los andes se ha llegado a registros de 8.7 grados.

Anualmente se registran cerca de cien terremotos con intensidades superiores a los 6 grados, y alrededor de 20 con intensidades mayores de 7 grados en la escala Richter.

8.3.1 Consideraciones iniciales debidas al sismo.

Durante la etapa de diseño se ha de procurar que la forma geométrica de la edificación esté conformada por volúmenes de formas simples y dispuestos de manera simétrica con respecto a los ejes longitudinal y transversal de la planta. De esta forma se garantiza que los efectos de eventuales movimientos sísmicos le causen el mínimo daño dado el comportamiento homogéneo de su configuración.

Un sistema de resistencia sísmica eficiente está formado por un conjunto de muros estructurales, que resistan los empujes sísmicos horizontales en las dos direcciones principales de la planta; muros de rigidez en sentido perpendicular a los muros estructurales y diafragmas que facilite el trabajo conjunto de los muros estructurales. El buen comportamiento sísmico de una edificación de uno y dos pisos depende en gran medida de la aplicación de ciertos criterios generales apropiados:

1. Simplicidad:

Distribuciones que faciliten la distribución equilibrada de los muros, evitando en lo posible formas altamente irregulares que generen momentos críticos en la estructura. Edificaciones formadas por volúmenes diferentes ligados unos a otros, se deforman y reaccionan de manera independiente, no contribuyen al comportamiento homogéneo necesario en un sistema sismorresistente.²

2. Simetría:

Propiedad geométrica con la que se contrarrestan movimientos de torsión en planta. A medida que aumenta la simetría del edificio, disminuye el riesgo de concentración de esfuerzos, el momento torsor en planta y el comportamiento de la estructura es más fácil de analizar y más predecible. En una edificación con simetría estructural el centro de masa y el centro de resistencia están localizados en el mismo punto.

3. Rigidez:

Se refiere a la capacidad que un elemento estructural tiene para oponerse a ser deformado. Se dice que un cuerpo es más rígido cuanto mayor sea la carga que es necesario aplicar para alcanzar una deformación dada.

4. Uniformidad:

Se refiere a la homogeneidad de los materiales que forman los elementos que desempeñan trabajos similares dentro de la estructura.

5. Continuidad:

Para garantizar la efectiva transmisión de cargas de la cubierta a los cimientos, los elementos estructurales han de ser continuos verticalmente. La continuidad horizontal se logra cuando los muros estructurales están alineados en parejas con la misma cota de base y remate. Debe existir aproximadamente la misma cantidad de muros en las dos direcciones perpendiculares de la vivienda, ya que las fuerzas del sismo se pueden presentar en cualquier dirección

Para edificaciones de uno o dos plantas como suelen ser las viviendas en proyectos sociales, el mayor peligro es que durante un terremoto las paredes cedan y en consecuencia colapse el tejado. Es necesario entonces garantizar, como premisa estructural, que las paredes no fallen ante los sismos.

En un diseño sismorresistente los elementos estructurales se distribuyen siguiendo principios básicos como la simplicidad, simetría, resistencia, rigidez y continuidad.

La forma en que un edificio reacciona ante las fuerzas dinámicas generadas por los sismos, es bastante compleja. Esta situación debe tenerse presente al visualizar las fuerzas laterales sobre una configuración determinada de edificación. De manera general estas fuerzas son representadas separadamente en dirección de cada uno de los ejes principales del edificio (**Figura 8.8**).

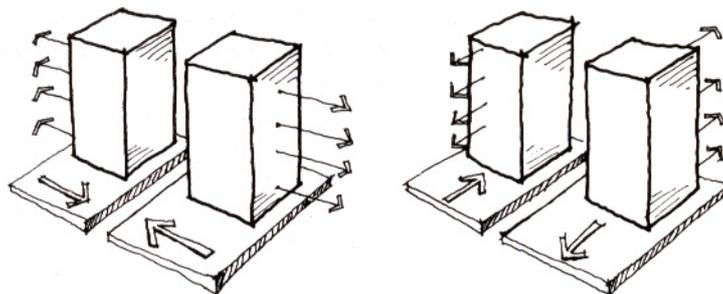


Figura 8.8 Diagrama analítico fuerzas sísmicas (Arnold 1987)

Cuando la forma es rectangular se consideran solamente dos ejes, mientras que para un círculo todos los ejes son iguales. Si la forma es irregular, deben entonces considerarse varios ejes.

En realidad las fuerzas sísmicas son mucho más complejas de lo que pueden representar los diagramas mencionados, ya que el movimiento del suelo es errático y es difícil que la dirección principal del movimiento coincida con uno de los ejes. Ya que siempre se tendrán componentes no axiales en el movimiento del suelo, la mejor manera de representar la respuesta de una edificación al sismo sería la mostrada en la **Figura 8.9**.

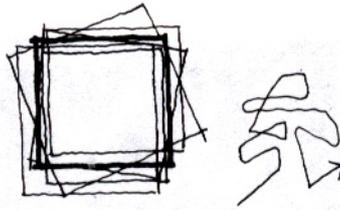
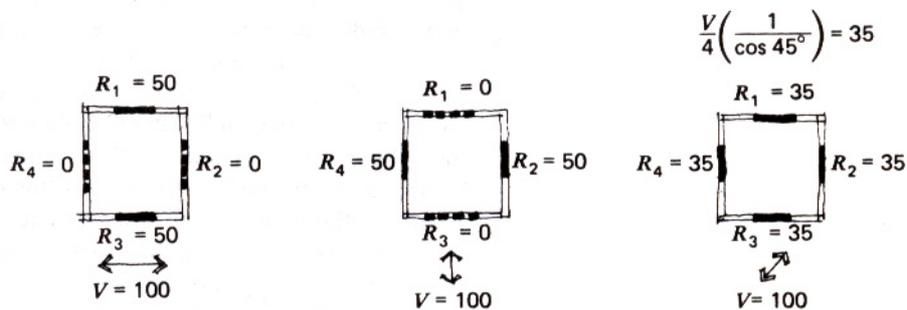


Figura 8.9. Movimiento real de las fuerzas sísmicas. (Arnold 1987)

Por razones prácticas, ya que las fuerzas sísmicas pueden provenir de cualquier dirección, la mejor manera de representar los casos peores es mediante la aplicación de fuerzas perpendiculares a los ejes principales de muros o marcos. Si el movimiento del suelo y sus fuerzas resultantes se presentan diagonalmente, los muros y marcos dentro de esos dos ejes pueden participar en su resistencia reduciendo la magnitud de la fuerza actuante (**Figura 8.10**).



R = resistencia de muros o marcos
 V = dirección predominante de las fuerzas de sismo

Figura 8.10. Consideraciones de fuerza según ejes de estructura (Arnold 1987)

La calidad de una estructura sismorresistente puede expresarse con la siguiente fórmula:

$$C_e = R \times D \quad [8.5]$$

donde

C_e = Calidad estructural

R = Resistencia

D = Ductilidad

Basados en esta relación puede concluirse que a menor resistencia de una estructura, mayor debe ser su flexibilidad ante movimientos sísmicos. Por otro lado si la estructura es altamente resistente la ductilidad ha de ser menor.

Al diseñar elementos para zonas sísmicas debe tomarse en consideración que las fuerzas que actúan sobre la edificación, son proporcionales a su masa, y que las deflexiones se incrementan significativamente con la altura de los elementos. Las edificaciones se ven afectadas durante el movimiento sísmico, por las fuerzas horizontales producidas por un sismo. Las aceleraciones verticales en cambio suelen ser un 50% menores que las horizontales.

Si se proyectan viviendas de dos plantas, es recomendable que la primera sea sólida hecha con bloques reforzados o sistema de vigas y columnas, mientras que la segunda sea liviana, de preferencia resuelta con estructura de marcos de madera o acero.

Minke (2006) cita una serie de puntos que deben ser tomados en cuenta a la hora de proyectar viviendas sismorresistentes:

1. La construcción no debería localizarse en laderas
2. La oscilación de la estructura no debería coincidir con la frecuencia de movimiento de la tierra, para evitar que entre en resonancia. Una buena regla consiste en procurar hacer estructuras flexibles en terrenos duros o cercanos a epicentros de sismos, en los cuales sus vibraciones son rápidas, y edificios rígidos en suelos suaves o lejanos de epicentros.
3. Los cimientos deben localizarse al mismo nivel. Si existieran diferencias de nivel significativas, la cimentación debería ser separada. Ya que elementos con diferente altura tienen una resonancia diferente, estos deberían oscilar independientemente.
4. La forma en planta debe ser lo más compacta y simétrica posible. Las plantas circulares son más estables que las rectangulares (**Figura 8.11**).

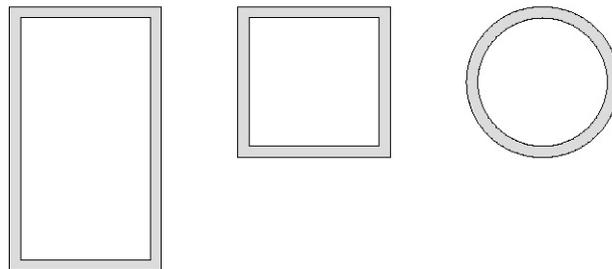


Figura 8.11 Consideraciones sísmicas. Tipos de plantas

En el comportamiento sísmico de una edificación, influye fuertemente el diseño del perímetro. Si existe gran variación de resistencia y rigidez alrededor del perímetro, el centro de masa no coincidirá con el centro de resistencia, originando fuerzas de torsión que tenderán a causar rotación del edificio respecto a su centro de masa, y por lo tanto riesgo de colapso.

5. La edificación ha de presentar uniformidad en los materiales que configuran componentes con solicitaciones similares. Se ha de garantizar la continuidad vertical y horizontal de la estructura, esto se logra alineando los planos de carga.

6. Los cimientos han de cumplir la función de anillos resistentes de anclaje y deben por lo tanto, ser reforzados.

8. Las paredes han de resistir movimientos de flexión y cortante. Los muros de mampostería han de tener juntas reforzadas con mortero de pega.

8. Los muros de mampostería que nos son de carga, han de tener refuerzos verticales en forma de pilares que los fijen estructuralmente a los cimientos.

9. Las esquinas y juntas entre paredes, así como los vanos de puertas y ventanas han de estar reforzados verticalmente por elementos anclados a los cimientos a fin de resistir los empujes horizontales.

10. Los muros han de rematarse por una solera o viga de coronamiento, que a su vez a de coincidir con los dinteles de puertas y ventanas.

11. Los techos han de ser lo más livianos que el entorno y el programa arquitectónico lo permitan.

12. Las cúpulas y bóvedas han de apoyarse en vigas de amarre.

13. Los vanos desestabilizan el sistema, por lo que han de ser cuidadosamente localizados y proporcionados.

Más importante que el uso de uno u otro material es la elección y el cálculo estructural del sistema así como las dimensiones y distribución de los vanos tal como se describirá en los siguientes apartados.

8.3.2 Parámetros de diseño sísmico de los muros

Usualmente los fallos en las paredes se producen porque carecen de una solera de coronamiento, por escasa resistencia al corte y flexión, o porque los vanos de puertas y ventanas están dispuestos de manera tal, que debilitan la estructura.

Existen tres aproximaciones básicas para diseñar viviendas sismorresistentes:

La primera consiste en construir las paredes, los techos y sus uniones conectados de forma rígida para que puedan resistir sin romperse los movimientos sísmicos.

La segunda opción es dotar a la estructura de suficiente ductilidad para que la energía cinética del sismo se disipe mediante la deformación.

En la tercera opción los muros se diseñan igual que la segunda, pero el techo se apoya sobre columnas exentas de los muros. De esta manera se asegura que los dos sistemas estructurales con diferentes frecuencias de movimiento, oscilen independientemente durante un sismo.

Desde el punto de vista estructural, el daño sísmico generalmente se relaciona con deformaciones irrecuperables (inelásticas), así que cualquier determinación de daño debe referirse preferentemente a cierta cantidad de deformación.

Bonet (2003) diferencia cuatro sistemas dentro de una estructura que se encuentran propensos al daño:

1. Elementos estructurales: Son los que resisten las cargas verticales (gravitatorias) y las cargas laterales (e.g. sismo).

2. Elementos secundarios⁵: Muros divisorios, ventanales, revestimientos, sin función portante pero que interactúan con el resto del conjunto y no pueden ser ignorados. Dentro de este tipo de elementos se encuentran los muros de cerramiento y divisorios formados con los bloques ensayados en este trabajo.

3. Instalaciones: Elementos auxiliares que suministran servicios a la edificación. Su importancia ante un evento sísmico está marcada por los accidentes asociados a su deterioro o colapso (fugas de gas, cortocircuitos)

4. Contenidos: Mobiliario, equipos, personas. Elementos que se encuentran dentro de la edificación, pero que no forman parte de la estructura. Su consideración como carga viva es importante en el proceso de diseño sismorresistente.

Los elementos estructurales puede formar, de manera inadvertida, parte del sistema resistente lateral. Si los muros divisorios, no se aíslan de la estructura mediante juntas deslizantes, entonces tienen que ser diseñados como parte integral de la estructura. Su localización constituye entonces un aspecto estructural [3].

A causa de su gran rigidez, una pequeña porción de muro situada en un lugar equivocado puede redistribuir las cargas y modificar el comportamiento de la estructura. Las distribuciones asimétricas de muros pueden generar esfuerzos de torsión en el sistema.

Por otro lado, los elementos no estructurales pueden proporcionar cierto grado de redundancia útil⁶. Un ejemplo común de resistencia sísmica no calculada, comprobado en varios sismos, es la capacidad de las divisiones de madera con marcos para sostener un edificio de mampostería no reforzada, después de que han colapsado totalmente los muros de carga.

8.3.3 Incidencia de vanos de puertas y ventanas

Ante movimientos sísmicos los vanos de puertas y ventanas tienden a desestabilizar el sistema. En estos casos suelen aparecer grietas en diagonal que empiezan en los bordes de los vanos. Bajo requerimientos sísmicos, las

⁵ Bonet se refiere a ellos como elementos arquitectónicos, descripción que no se comparte en este trabajo ya que se considera a los elementos estructurales como componentes básicos del lenguaje arquitectónico.

⁶ Los miembros redundantes son elementos estructurales que en condiciones normales de diseño, no desempeñan una función estructural o están muy poco solicitados, pero que son capaces de resistir fuerzas laterales si es necesario. Proporcionan un factor adicional de seguridad si existen incertidumbres analíticas en el diseño.

fuerzas se concentran en las esquinas de esos vanos, originando grietas en diagonal que si se combinan con un refuerzo horizontal deficiente pueden llevar al colapso del elemento y de toda la estructura.

Para garantizar un mínimo de anclaje los dinteles de puertas y ventanas han de empotrarse al menos 40cm dentro de la pared. En este caso el área de muro sobre el dintel tiene menor resistencia y podría colapsar en caso de sismo (**Figura 8.12**).

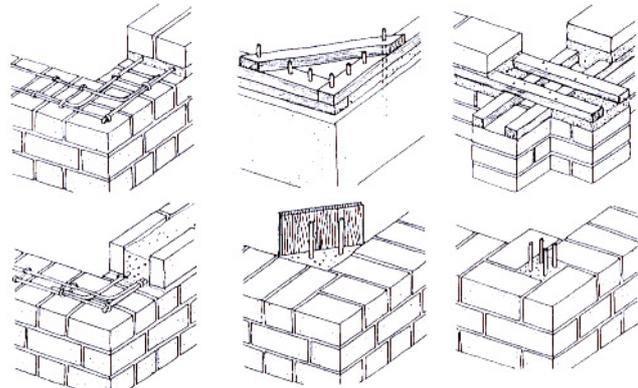


Figura 8.12. Medidas antisísmicas. Refuerzo en esquinas (Minke 2006)

Así que la mejor solución es utilizar la solera de coronamiento como dintel de puertas y ventanas y como apoyo de la estructura portante del techo (**Figura 8.13**).



Figura 8.13. Medidas antisísmicas. Refuerzo en dinteles (Minke 2006)

También es recomendable que la sección de muro debajo de las ventanas sea lo más liviana y flexible posible. Basados en experiencias de otros autores [4,5], se enumeran las siguientes recomendaciones a seguir a la hora de proyectar la posición y dimensiones de vanos de puertas y ventanas:

- Ancho máximo de puertas y ventanas: 1 metro y no mayores de 1/3 de la longitud del muro.
- Por consideraciones sísmicas, la longitud de pared entre intersecciones o esquinas no debe ser mayor de 4 metros⁷.
- La distancia de esquinas a puertas o ventanas no debe ser menor de 1 metro y al menos ha de ser equivalente a 1/3 del alto del muro [4].
- Las puertas han de abatir hacia afuera. Del lado opuesto a la puerta de entrada, es conveniente localizar otra puerta o ventana larga que pueda utilizarse como salida de emergencia.

⁷ Se muestra en 8.4 el análisis estructural realizado para determinar esta y las siguientes recomendaciones.

8.3.4 Comportamiento sísmico de la mampostería.

Como se mencionó anteriormente, por sencillez de análisis se suelen clasificar los mecanismos resistentes de las edificaciones de obra de fábrica en mecanismos en el plano y fuera del plano. Y aunque es imposible que un terremoto mueva exactamente a una estructura en dirección transversal y longitudinal, se acepta hacer la distinción entre mecanismos en el plano y afuera del plano, permitiendo una simplificación del análisis.

8.3.4.1 Resistencia y fallo en el plano.

Cuando se somete a paredes de fábrica a cargas cíclicas en el plano, estas adoptan tres tipos de mecanismos y modos de fallo.

El mecanismo depende de la geometría de la pared y de la calidad de los materiales, de las restricciones del contorno y de las cargas actuando sobre las paredes. Es por eso importante que en las paredes de cerramiento propuestas en este estudio, exista una adecuada conexión entre la estructura portante y el paño de fábrica, a fin de dotar de estabilizar el elemento de cerramiento asegurando las restricciones del contorno.

Una pared de fábrica es capaz de resistir las fuerzas laterales en el plano con el efecto combinado de la deformación a flexión, a cortante y el movimiento de cuerpo rígido. Si la pared es compacta, entonces el desplazamiento lateral está determinado por la deformación a cortante. Si la pared es esbelta, la mayor contribución se obtiene de su resistencia a flexión.

El mecanismo resistente en el plano determina los tres tipos de agrietamiento en las paredes de obra de fábrica:

-Las grietas diagonales, típicas de falla o a cortante y debidas al exceso de los esfuerzos tensionales principales.

-Grietas horizontales, producidas por el fallo de deslizamiento, se originan a lo largo de las juntas de mortero para las paredes compactas con poca carga vertical. Este sería el tipo de agrietamiento que podría presentarse en los muros de cerramiento con bloques de cal y maíz propuestos en este trabajo. Al no ser muros estructurales, la falta de carga vertical debe equilibrarse con uniones adecuadas a la estructura portante. Este nexo debe ser tomado en cuenta en el análisis sísmico de la estructura resistente a fin de no comprometer la estabilidad del sistema por los esfuerzos generados por la presencia esfuerzos generados por los diafragmas de cerramiento.

Por otro lado, dependiendo de la estabilidad del cerramiento, este podría contribuir a la estabilidad del conjunto gracias al efecto de redundancia útil.

-Grietas horizontales o aplastamientos en la base de la pared por fallos a flexión en paredes esbeltas. En este tipo de paredes podría darse el caso de fallo al vuelco, dependiendo de la carga vertical.

El colapso general de un muro en el plano ocurre generalmente por la combinación de estos modos de fallo y no por la concurrencia aislada de uno de ellos.

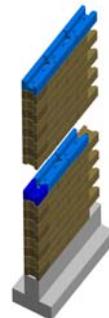
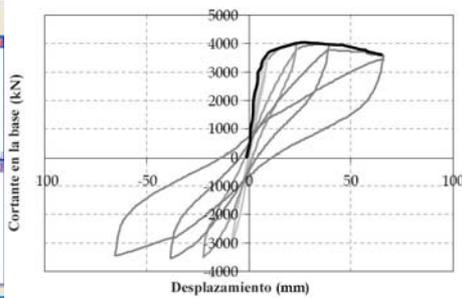
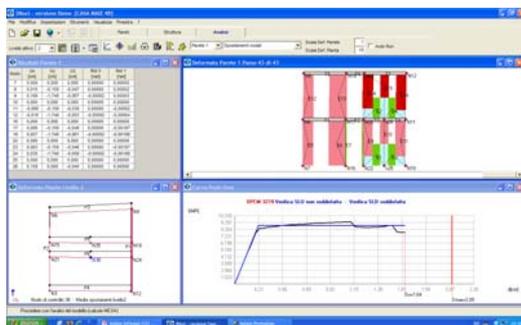
8.3.4.2 Resistencia y fallo fuera del plano.

El fallo más común fuera del plano se origina por un anclaje inadecuado de la pared al diafragma del piso. En estos casos la pared se comporta como una viga en voladizo y colapsa si las fuerzas de inercia sobre la pared empujan por encima del punto de inestabilidad.

Si se anclan adecuadamente, las paredes se comportan como elementos verticales en flexión, ya que las fuerzas de inercia sobre las paredes son distribuidas a los diafragmas adjuntos.

Como normalmente el mortero tiene limitada resistencia a la tensión, los muros anclados se agrietarán preferentemente por el centro de la pared. Esto da como resultado el vuelco en la dirección fuera del plano, por lo que si, los esfuerzos son lo suficientemente intensos la pared puede volverse inestable y colapsar.

Para garantizar una buena respuesta estructural de los bloques ante el sismo, estos deben formar parte de un sistema tridimensional de muros y forjados bien conectados, actuando en conjunto como una caja estable y robusta. De esta forma debe considerarse las propiedades de la fábrica como un conjunto de piezas y mortero. Un fallo común en las piezas consiste en la aparición de grietas verticales, originadas por la deformación vertical e incrementada por la deformación del mortero en las juntas. Las deformaciones en el mortero se generan porque éste tiende a expandirse más que el bloque al que une, debido a su mayor flexibilidad y mayor coeficiente de Poisson. Ya que el mortero está unido a la unidad de mampostería, es esta la que resiste la expansión lateral adicional del mortero.



8.4 Modelos de análisis de muros de fábrica.

Los elementos de obra de fábrica se comportan como un material inelástico y anisótropo. Las técnicas modernas de cálculo por ordenador que se basan en el método de los elementos finitos proponen modelos específicos que incorporan aspectos específicos de las obras de fábrica como la resistencia a compresión y tracción.

Cuando se analizan estructuras formadas por elementos lineales se usan modelos unidimensionales, llamados elementos barra. Las construcciones de obra de fábrica exhiben en cambio un comportamiento no lineal a causa de baja resistencia a tracción. Es por esto que la obra de fábrica experimenta fácilmente estados de intensa fisuración cuando se le somete a diversas solicitaciones. Debido a esto, la manera más sencilla de reproducir el comportamiento no lineal de estos elementos es considerarlos con limitada o nula resistencia a la tracción.

Para el análisis de paneles muro se utilizan entonces modelos bidimensionales o tridimensionales. Los modelos de análisis de estructuras de obra de fábrica se clasifican en dos grupos: micromodelos y macromodelos.

8.4.1 Micromodelos.

Basados en el método de los elementos finitos, estos modelos reproducen el comportamiento global de un material compuesto mediante una discretización geométrica detallada. Incorporan leyes constitutivas no lineales de cada uno de los componentes. Los micromodelos aplicados a elementos compuestos como el hormigón o la obra de fábrica exigen un enorme esfuerzo de cálculo debido a la necesidad de emplear discretizaciones densas y métodos iterativos para resolver los sistemas de ecuaciones no lineales resultantes.

Cuando lo que se analiza es un muro de fábrica, para las piezas se emplean elementos finitos de tensión plana⁸. La aplicación de estos modelos queda restringida al estudio de paneles individuales o muros con un reducido número de aperturas. Pueden analizarse además efectos locales sobre muros debidos a cargas concentradas.

Unida a la experimentación de probetas de fábrica, la micromodelización constituye una técnica válida para profundizar en el comportamiento real de la fábrica.

La aplicación de micromodelos al estudio de fábrica de ladrillo se remonta a 1978 cuando aparecen los primeros modelos simplificados en el que se considera que los ladrillos tienen un comportamiento indefinidamente elástico e isótropo. Los micromodelos desarrollados posteriormente emplean ya elementos finitos de tensión plana, posteriormente se implementan modelos triaxiales completos, elementos triangulares de tensión plana.

Los modelos más recientes diferencian el comportamiento elástico lineal de las piezas que forma la fábrica y el comportamiento no lineal del mortero.

⁸Tipo de análisis que considera un comportamiento estructural de elasticidad bidimensional.

8.4.2 Macromodelos.

En comparación con la complejidad de los micromodelos, este otro tipo de procedimientos de análisis se caracterizan por un menor número de incógnitas y se ha desarrollado al punto de poder describir la respuesta del muro en el plano a solicitaciones sísmicas hasta el colapso.

Consideran la fábrica como un material continuo con una determinada ecuación constitutiva, incluyendo una relación tensión-deformación y un criterio de rotura. Existen dos tipos básicos de macromodelos: los desarrollados para el hormigón armado y los que analizan la obra de fábrica.

El primer macromodelo para el análisis no lineal de obra de fábrica en estados biaxiales de tracción-compresión se basó en un modelo de comportamiento elasto-frágil para el material. Posteriormente se han incluido relaciones tensodeformacionales no lineales y criterios de rotura bidimensional.

Brencich y Lagomarsino (1998) propusieron un modelo de macroelementos para representar una estructura y determinar su capacidad sísmica mediante un análisis estático no lineal [8]. Este modelo se utiliza en un programa tridimensional de análisis no lineal para estructuras de fábrica de ladrillo o mixtas (como muros de cerramiento combinados con elementos de hormigón armado, acero o madera); que ha sido desarrollado en la Universidad de Génova, Italia (Galasco et al., 2002).

Este programa esquematiza el edificio mediante “objetos estructurales” (paredes, forjados, vigas, pilares). Está 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. El tipo de análisis que realiza el programa permite evaluar directamente los mecanismos de colapso, la disipación de energía, mientras que permite determinar en términos de estado límite de desplazamiento, una medida de la vulnerabilidad del edificio.

El programa distribuido comercialmente como TreMuri se ha utilizado en este trabajo para evaluar el comportamiento sísmico de dos viviendas proyectadas con estructura portante de hormigón y muros de cerramiento de bloques de cal y fibras de maíz estudiados en la tesis.

8.5 Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de la estructura mediante análisis no lineal.

El programa utilizado en esta fase del trabajo ha sido ideado para realizar el análisis estático no lineal de edificios de obra de fábrica tomando como base la normativa italiana OPCM-3274/03 y 3431/05[9] El proceso a seguir en la verificación de la estructura se muestra de forma esquematizada en la **Figura 8.14**.

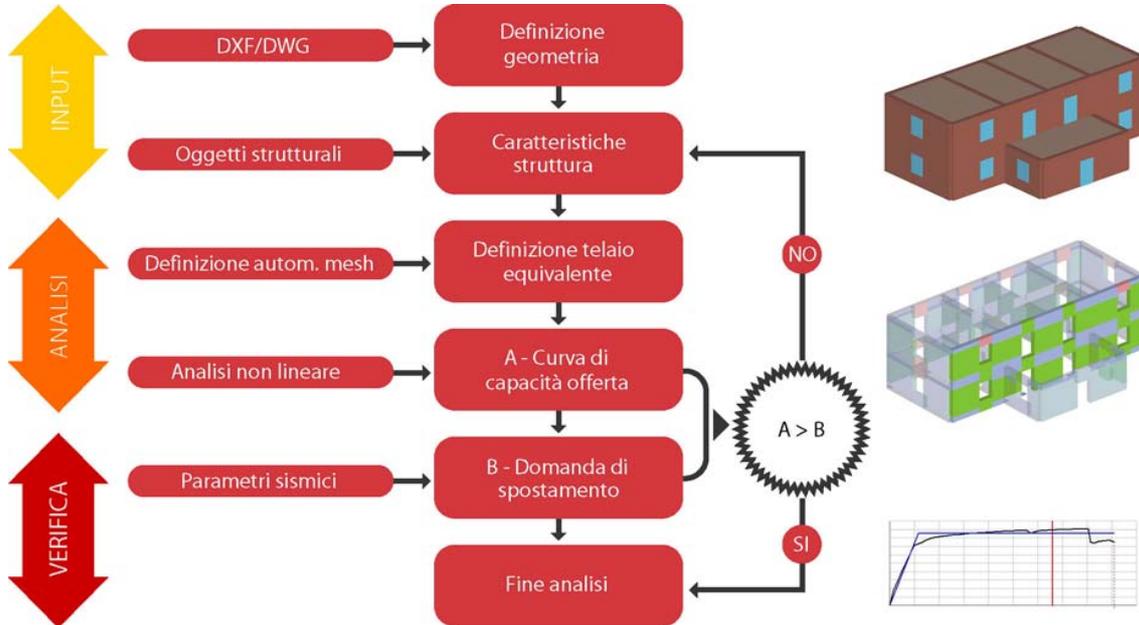


Figura 8.14.Fases de Análisis estático no lineal con programa TreMuri.

En la fase de input o introducción de datos se realiza la construcción del modelo de cálculo. Posteriormente se carga la geometría de la edificación y las características de los elementos estructurales, de los materiales, las cargas y de las uniones entre elementos.

Durante la fase de análisis se constituye el modelo “mesh” siguiendo el método FME (Frame by Macro Elements), el análisis push-over y de vuelco.

La última fase es la de Verificación y consiste en la evaluación de la capacidad de resistencia de la estructura, con la posibilidad de interactuar con los resultados. Si éstos no son satisfactorios, es posible modificar el proyecto, mediante sucesivas aproximaciones hasta obtener el resultado resistente deseado.

La mejor manera de determinar el efecto de los sismos sobre una estructura es la observación directa del daño ocasionado en las mismas. el problema es en realidad muy complejo y no permite un riguroso análisis teórico previo. Así que los autores de este programa han tomado como punto de partida el análisis de cómo la estructura responde a las sollicitaciones sísmicas.

Observando la **Figura 8.15**, puede notarse que los dos tipos de fallo que ocurren en un muro de fábrica suelen aparecer siempre entre dos aberturas. Al crear la malla, el programa de cálculo genera un macroelemento de

mampostería. La principal característica es que contiene en su interior los enlaces constitutivos para resistir el corte y la flexión.

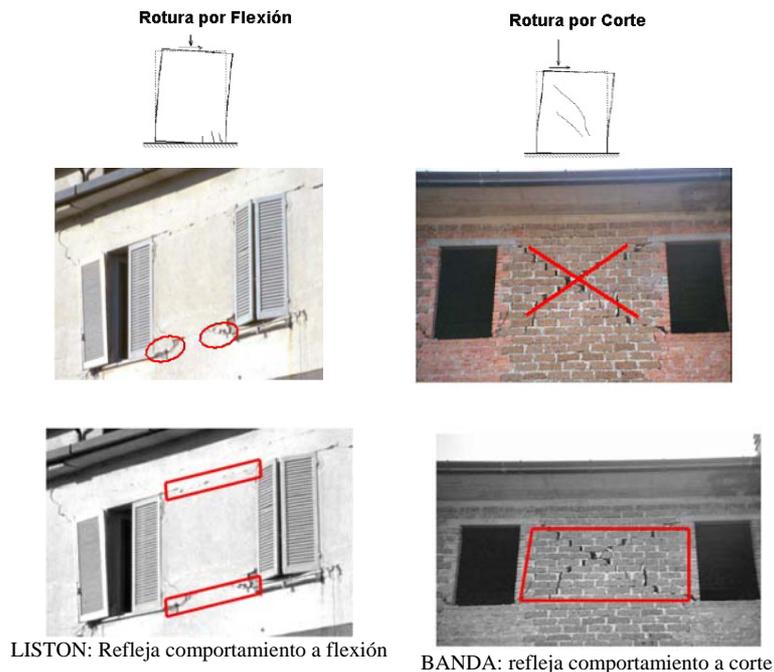


Figura 8.15 Modos de fallo de muros de fábrica por efectos del sismo y equivalente en modelo de malla (S.T.A. Data 2007)

Las áreas grises que se muestran en la **Figura 8.16** son trozos de muro que, basados en la observación de experiencias sísmicas, no sufren daño. En estas áreas se localizan los nodos para construir la malla. La malla equivalente se genera al conectar a los nodos las porciones de muro que sí sufren daño (listones/bandas) siguiendo el flujo de carga de las tensiones. En base a este principio, el programa es capaz de generar una malla que represente los aspectos técnicos del problema.

En la misma figura se muestra en línea discontinua en la malla equivalente, la dirección de las fuerzas que afectan a los elementos del muro. Una correcta modelización requiere un análisis espacial que examine el comportamiento complejo de la estructura. Los nodos pueden ser comunes a más paredes y representan el instrumento de transmisión de fuerzas entre un elemento y otro del sistema. Después de modelado, el programa realiza la fase de cálculo en dos etapas:

1. Asignación de la carga sísmica, mediante la designación de la sismicidad de la zona, tipo de suelo y de la sensibilidad sísmica.
2. Calculo “pushover” para generar la curva de capacidad resistente de la estructura.

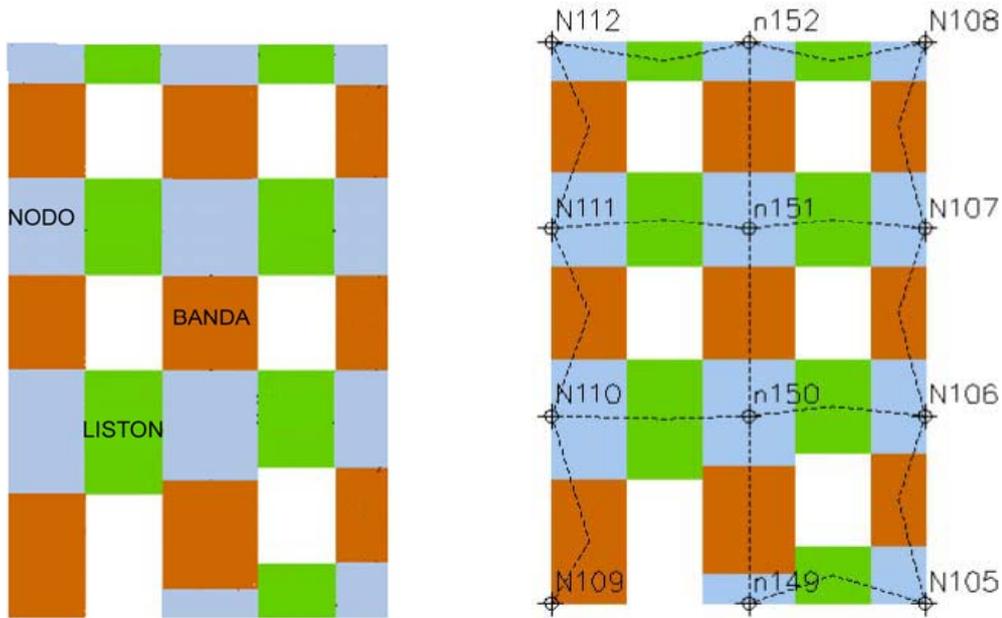
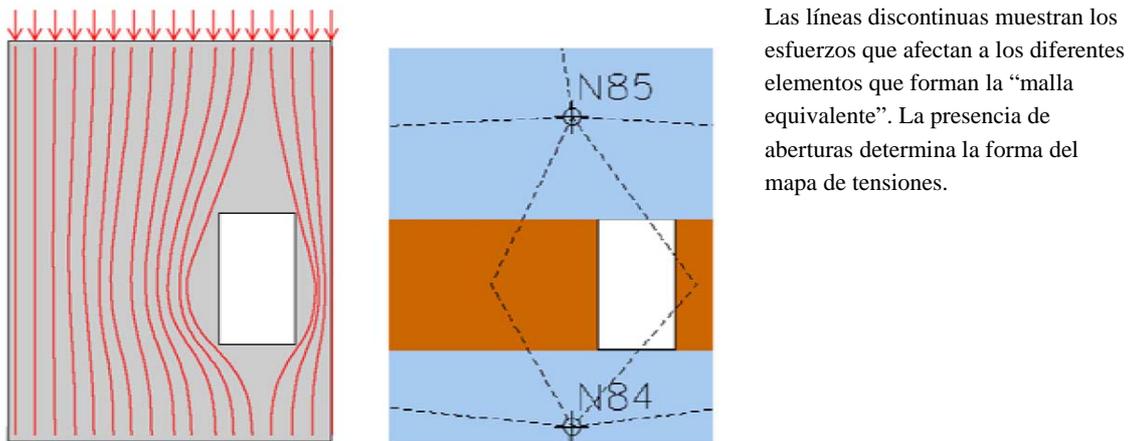


Figura 8.16. Programa 3Muri. Elementos que forman la malla, y diagrama de esfuerzos.



Las líneas discontinuas muestran los esfuerzos que afectan a los diferentes elementos que forman la “malla equivalente”. La presencia de aberturas determina la forma del mapa de tensiones.

Figura 8.18. Detalle malla equivalente.

Tomando los parámetros sísmicos predefinidos, el programa traza el espectro sísmico y lo utiliza para calcular la resistencia que la estructura debe garantizar.

8.5.1 Análisis Estático no lineal

Los métodos de cálculo y verificación modernos utilizados en la legislación sísmica de varios países, proponen una descripción de la respuesta estructural en términos de desplazamiento en lugar de fuerza.

En este tipo de análisis juega un papel fundamental los procedimientos estáticos no lineales. Al considerar la respuesta no lineal de los materiales tanto el cálculo de las fuerzas internas como los desplazamientos son más representativos de los esperados durante un sismo [10]. Este tipo de metodologías no son más que métodos simplificados en los que el problema de la valoración de la máxima respuesta esperada como consecuencia de un sismo, se traduce en el estudio de un sistema no lineal con un único grado de

libertad, equivalente al modelo dotado con “n” grados de libertad, que representa la estructura real [11].

La característica común de estos procedimientos es que se basan en el uso del análisis estático no lineal (*pushover*) para caracterizar el sistema sísmico resistente a través de **curvas de capacidad**. Se le llama **estático**, ya que la fuerza sísmica externa se aplica estáticamente a la estructura y **no lineal** por el modo de comportamiento mostrado por los elementos resistentes de la estructura.

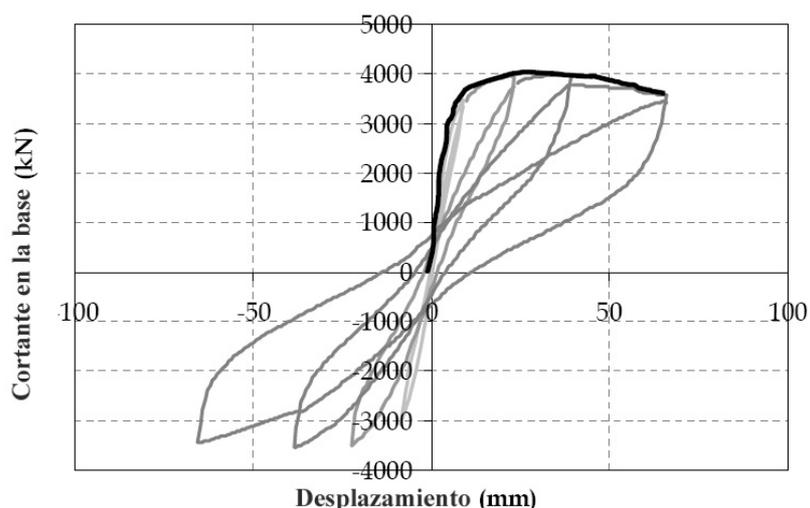


Figura 8.18. Curva de capacidad. Relación fuerza-desplazamiento.
(S.T.A. Data 2007)

Con estas curvas lo que se intenta es mostrar es la curva envolvente de los ciclos de histéresis producidos durante el sismo y pueden ser consideradas como un indicador del comportamiento post-elástico de la estructura (**Figura 8.18**).

La curva obtenida del análisis *pushover* (que se convertirá en curva de capacidad, teniendo en cuenta las características del sistema equivalente de un grado de libertad) muestra la relación del cortante en la base con el desplazamiento horizontal de un punto de control de la estructura. Cada punto de la curva puede asociarse con un determinado estado de daño global del sistema. De esta manera también es posible asociar a determinado nivel de desplazamiento, el grado de eficiencia estructural y el daño correspondiente.

La curva se obtiene a partir del *análisis pushover*, que prevé la aplicación de una distribución prefijada de fuerzas que son incrementadas de manera estática y monótonica. Esta aplicación de fuerzas se mantiene más allá del punto límite de rotura. De esta manera pueden hacerse análisis de control de fuerza o de la relación fuerza- desplazamiento.

La distribución de cargas aplicadas tiene el propósito de representar la distribución de las fuerzas inerciales inducidas por el sismo. De entre los datos que pueden obtenerse de la curva de capacidad de la estructura, es posible valorar de forma precisa el *factor de sobrerresistencia* definido por la relación α_u/α_1 . En el que α_1 se define como el punto sobre la curva que representa el

primer muro de la estructura que alcanza su resistencia última, mientras que α_u representa el momento en el que se ha alcanzado el 90% de la máxima fuerza resistente del edificio (**Figura 8.19**).

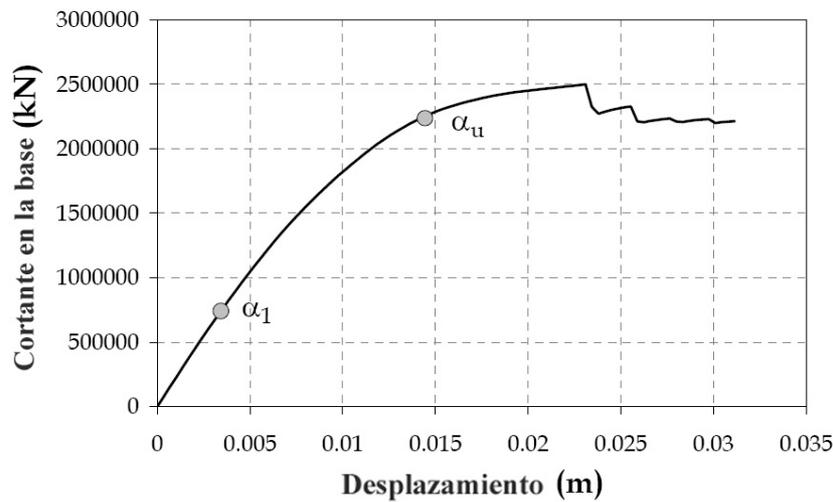


Figura 8.19. Curva de capacidad. Factor de sobrerresistencia (S.T.A. Data 2007)

El *factor de sobrerresistencia* permite cuantificar el comportamiento por el cual la resistencia estructural a cortante en la base sigue aumentando aún después de alcanzado el límite elástico del primer muro. Esto se debe a una redistribución no lineal de las tensiones sobre otros elementos de la estructura que aún se encuentran en fase elástica.

La **capacidad** ofrecida por la estructura debe entonces ser confrontada, desde una perspectiva sísmica, con la **demanda** requerida por la fuerza externa originada por un sismo. Los efectos de la disipación de energía, que ofrecen un margen adicional de resistencia (que no puede explicarse recurriendo solamente a la teoría elástica lineal), se revelan sobretodo en el campo de la respuesta no lineal de la estructura.

La **demanda** requerida por el sismo y la **capacidad** resistente de la estructura son dependientes una de la otra: ambas están vinculadas a las variaciones en la rigidez y de amortiguamiento desarrollados por el sistema estructural durante la sollicitación sísmica.

8.5.2 Análisis pushover

Para realizar una evaluación simplificada de la vulnerabilidad sísmica de una estructura pueden realizarse análisis estáticos no lineales conocidos como *análisis pushover*. El tipo de análisis es estático porque se genera al distribuir una serie de fuerzas estáticamente sobre la estructura. Tales fuerzas aplicadas horizontalmente, tienen el propósito de simular la acción del sismo. Las fuerzas se diferencian por su dirección y distribución.

El programa utilizado prevé la posibilidad, fijando un determinado tipo de esfuerzos, de controlar una respuesta genérica hasta el colapso, por lo que posibilita asumir una coherente distribución de fuerzas, controlar los mecanismos de fallo de un plano hasta la rotura; determinando de esta manera

la resistencia máxima y la vulnerabilidad de la estructura mediante un método simplificado.

La no linealidad se debe al tipo de enlace entre los distintos materiales que conforman el muro. La resistencia final del muro al colapso, se debe a la acción combinada de los elementos que conforman el muro, ya que aunque fallen ciertos tramos, las secciones resistentes soportan el conjunto.

El propósito del análisis global es estudiar el grado de desplazamiento de un nodo de control debido al progresivo aumento de la carga sísmica. El programa genera un diagrama que compara la resultante de la fuerza sísmica con el desplazamiento del nodo de control. Este diagrama recibe el nombre de “curva de capacidad portante” o “curva pushover”.

La curva de capacidad (desplazamiento-fuerza) se convierte a aceleración y desplazamiento espectral, dando origen a una nueva curva llamada *espectro de capacidad*. Este cambio a coordenadas espectrales se realiza para poder compararla con el espectro de demanda sísmica. En la Figura 8.16 se muestra un ejemplo del espectro de capacidad de una edificación y el espectro de demanda.

Para una tipología de edificio dada, definida por el sistema estructural, se obtiene el punto de desempeño al encontrar la intersección de los espectros de **capacidad** y **demanda**.

Con la técnica del pushover se empuja una estructura mediante una carga monotonica incremental, de manera que las deformaciones aumenten hasta llegar al colapso; esta técnica se aplica en un análisis estático no lineal, donde se considera la sección agrietada de los elementos estructurales, mediante la reducción de un % de el momento de inercia.

El diseño se realiza para un punto de desempeño en donde se igualan la demanda sísmica, con la capacidad a carga lateral de la estructura, en este método se puede ver los daños de los elementos estructurales en forma de articulaciones plásticas o de otro modo el agotamiento de las secciones por disipación de la energía que le introduce el sismo de diseño. En resumen se usa para saber la capacidad de la estructura a carga lateral.

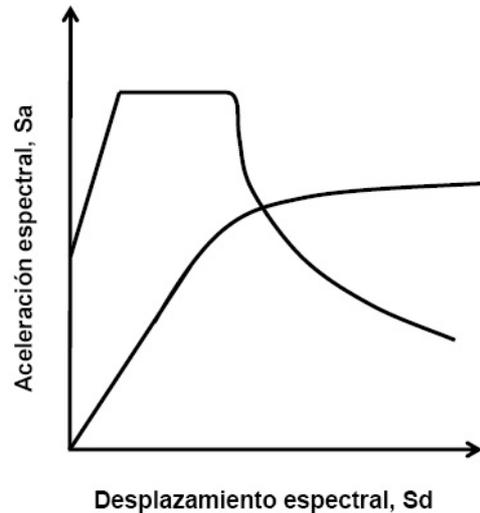


Figura 8.20. Espectro de Capacidad y Demanda (Moreno González, 2006)

8.5.3 Análisis dinámico

El programa de análisis sísmico permite realizar un análisis dinámico paso a paso, aplicando a la base de la estructura, en las tres direcciones principales, acelerogramas de tres componentes oportunamente seleccionados.

El resultado para cada análisis, es una visualización temporal de los movimientos en los nudos de la estructura, en los que puede apreciarse también los máximos desplazamientos relativos en el plano registrados durante el análisis y el estado de daño de cada uno de los elementos una vez terminada la sollicitación sísmica.

Durante el análisis, se aumenta el desplazamiento hasta que el daño de los elementos estructurales represente una disminución de la resistencia del 20% de su valor máximo. A partir de este momento se interrumpe el análisis y se muestra el desplazamiento límite que ofrece la estructura.

El desplazamiento máximo se compara con el desplazamiento generado por el sismo. Al ejecutar el cálculo, el programa presenta un listado de análisis posibles, que se generan para diferenciar la dirección y distribución de las cargas que afectan a la estructura y poder definir así la situación más desfavorable.

8.5.4 Comprobación estática de la estructura

Las sollicitaciones sobre los muros y losas debidas a la transmisión de cargas verticales se determinan considerando apoyos simples de muros, el momento flector generado por las cargas verticales, el tipo de ejecución, la carga lateral debida al viento y a la excentricidad de las cargas que actúan sobre el muro.

Para analizar estáticamente la estructura, el programa utiliza la malla creada para hacer el análisis no lineal, adaptando la teoría de la malla equivalente a un análisis en campo lineal. Las comprobaciones efectuadas están determinadas por la Norma Italiana D.M.1987 (punto 2.2.1) [12] que se detallan a continuación.

8.5.4.1 Esbeltez del muro

La comprobación de la esbeltez resulta satisfactoria si se cumple la siguiente condición:

$$h_0/t \leq 20 \quad [8.6]$$

h_0 : longitud libre de inflexión de la pared $\rho \cdot h$
 t : espesor del muro
 h : altura interna de la planta
 ρ : factor lateral de unión

8.5.4.2 Excentricidad de las cargas

Esta comprobación resulta satisfactoria si se cumplen las siguientes condiciones:

$$e_2/t \leq 0.33 \quad [8.7]$$

$$e_1/t \leq 0.33 \quad [8.8]$$

donde:

t : espesor del muro
 e_s : excentricidad total de las cargas verticales
 e_a : excentricidad debida a la tolerancia de ejecución $h/200$
 e_v : excentricidad debida al viento $e_v = M_v / N$

8.5.4.3 Resistencia a las cargas verticales

En este caso es necesario que se cumpla la siguiente condición

$$Nd \leq Nr \quad [8.9]$$

donde:

Nd : Carga vertical de calculo en la base del muro
 Nr : Carga vertical resistente; $Nr = \Phi f_d A$
 A : Área de la sección horizontal del muro
 f_d : resistencia de calculo del muro;
 Φ : coeficiente de reducción de la resistencia del muro (2.2.1.4.).

Para cada muro portante se efectúan análisis en tres diferentes secciones: superior, central e inferior. Para cada una de estas secciones se presenta el valor del esfuerzo normal solicitante (Nd) calculado en base a la masa y a la combinación de cargas) y el esfuerzo normal resistente ($Nr = \Phi f_d A$). El análisis se considera superado si se cumple la relación:

$$Nd/Nr \leq 1 \quad [8.10]$$

8.6 Descripción de resultados

8.6.1 Edificaciones Evaluadas

Para evaluar el comportamiento de los bloques de maíz ante solicitaciones sísmicas se estudió su aplicación teórica en dos tipologías diferentes de vivienda. Ambas corresponden a proyectos de vivienda de tipo social en Latinoamérica, uno ejecutado y otro en fase de diseño.

- El primer caso evaluado corresponde al proyecto *Casa para un Hombre de Maíz* diseñada por el autor de esta Tesis finalista del concurso EcoHabitat 2005, organizado por la red EcoSur⁹.
- El segundo caso analizado es un módulo del proyecto *Elemental* diseñado por el arquitecto Alejandro Aravena en Iquique, Chile [13].

Ambos proyectos están concebidos como viviendas-proceso, esto es, que permiten la adaptación de los usuarios dentro de un marco estructural definido, que ordena y regula las sucesivas modificaciones. El proceso de evaluación en ambos casos sigue el siguiente orden:

8.6.1.1 Descripción de la tipología de vivienda:

Premisas de diseño arquitectónico, programa y distribuciones, sistema estructural, áreas construidas y proceso constructivo

8.6.1.2 Definición de los parámetros sísmicos para la clasificación estructural de la vivienda:

Se definen los materiales y sus características mecánicas. Dependiendo del sistema estructural empleado se determina el factor de reducción de respuesta sísmica genérico. Se define la clasificación de ocupación a fin de establecer el índice de sismicidad, en base a la categoría de ocupación se define un factor de importancia de la estructura según la **Tabla 8.10**.

Categoría	Descripción de la edificación	Factor de importancia
<i>I</i>	Edificios de importancia fundamental para la protección civil en caso de terremoto: hospitales, bomberos, ayuntamientos.	1,4
<i>II</i>	Edificios importantes por la afección a muchas personas como consecuencia de un eventual colapso: teatros, escuelas.	1,2
<i>III</i>	Edificaciones ordinarias, no comprendidas entre las dos anteriores: vivienda, almacenes, naves industriales.	1,0

Tabla 8.10 Factor de importancia de la edificación

En el caso de los muros de bloques de maíz se utilizaron los valores obtenidos a partir de los ensayos hechos al mortero y a los bloques (**Tabla 8.11**)

⁹ <http://www.ecosur.org/content/view/304/291/>

Símbolo	Característica	Valor
f_m	Resistencia media a compresión del muro	133,33 N/cm ²
τ_0	Resistencia media al corte del muro	4,44 N/cm ²
E	Valor medio del Módulo de elasticidad Normal	1800 N/mm ²
G	Valor medio del Módulo de elasticidad tangencial	300 N/mm ²
w	Peso específico medio del muro	18 kN/m ³

Tabla 8.11 Parámetros mecánicos de resistencia de muros de bloques de maíz.

8.6.1.3 Definición de las características sísmicas del sitio:

Se describe el escenario de riesgo sísmico del lugar de emplazamiento. Se realizó la equivalencia a la norma italiana OPCM 3274 que es la que utiliza el programa de análisis sísmico. Las características descritas son:

Zona sísmica: Dependiente de las características geológicas del lugar de emplazamiento. Las zonas se clasifican del 1 al 4 según la aceleración de los movimientos sísmicos que sufren.

Zona	1	2	3	4
Aceleración	3.434 m/s ²	2,453 m/s ²	1.472 m/s ²	0.491 m/s ²

Tabla 8.12 Zonificación sísmica, según aceleración del terreno.

Categoría de suelo: Clasificado según el perfil estratigráfico del terreno de asentamiento. La **Tabla 8.13** muestra la clasificación según la norma de referencia¹⁴.

Tipo	Característica
<i>A</i>	Formaciones rocosas o suelo homogéneo muy rígido.
<i>B</i>	Depósitos de arena o grava muy densos, o de arcilla muy consistente
<i>C</i>	Depósitos de arena o grava medianamente densos.
<i>D</i>	Depósitos de terreno granular sueltos o poco densos de reciente formación.
<i>E</i>	Estratos aluviales superficiales sobre una base rígida de tipo A o B.

Tabla 8.13 Categorías de suelo según su perfil estratigráfico.

Espectro de respuesta elástica: Dependiente del tipo de suelo, está constituido por una forma espectral (espectro normalizado), independiente del nivel de sismicidad, multiplicada por el valor de la aceleración máxima (agS) característica del sitio. Se muestra por períodos (TB, TC, TD) que separan los diversos tramos del espectro, dependientes del nivel estratigráfico del terreno

de cimentación. La **Tabla 8.14** muestra los parámetros del espectro de respuesta elástica según el tipo de suelo.

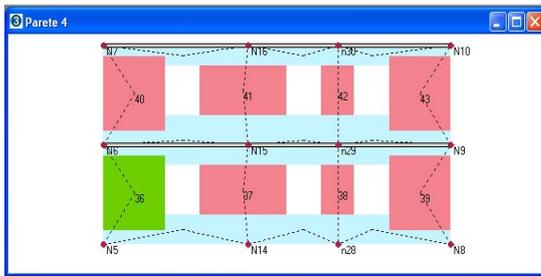
Categoría del suelo	S	T _B	T _C	T _D
A	1,0	0,15	0,40	0,20
B,C,E	1,25	0,15	0,50	0,20
D	1,35	0,20	0,80	0,20

Tabla 8.14 Parámetros de respuesta elástica de componente horizontal.

8.6.1.4 Comprobación estática de la estructura

Como se mencionó en 8.5.4 el análisis se considera superado si se cumple la relación:

$$Nd/Nr \leq 1 \quad [8.10]$$



8.21a

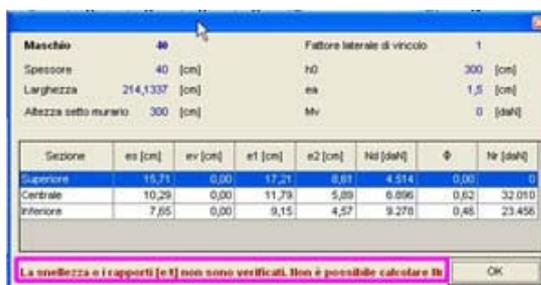
El software presenta los resultados de manera similar al análisis no lineal. Un esquema bicolor indica si los elementos de la malla cumplen o no, sin especificar las fases de daño. El color verde indica que el elemento ha superado el análisis. **Figura 8.21a**

Parete	Maschi rotti	Nd / Nr Max	h0 / t Max	e1 / t Max	e2 / t Max
4	7	2,34	7,50	0,477	0,207
6	6	3,02	7,50	0,882	0,206
2	1	0,79	7,50	1,191	0,345
1	0	0,45	7,50	0,038	0,038
5	0	0,39	7,50	0,038	0,038
3	0	0,74	7,50	0,038	0,038

8.21b

Una tabla muestra la relación de los muros analizados utilizando el mismo código de color que la malla del muro (**Figura 8.21b**).

Los valores mostrados detallan las paredes que han sufrido colapso y el número de bandas de la malla que no superan el análisis.



8.21c

Es posible visualizar todos los parámetros utilizados en el cálculo y determinar el punto donde falla el muro: parte superior, central o inferior (**Figura 8.21c**).

Con estos datos es posible mejorar el comportamiento estático de la estructura, modificando la geometría, el tipo de materiales y las condiciones de refuerzo.

8.6.1.5 Resultados del Análisis estático no lineal

Verificando el Estado Límite Último (*SLU*) y el Estado Límite de Daño (*SLD*) se determinó si las tipologías analizadas satisfacen los requerimientos sísmicos límites.

Verificación del Estado Límite Último (*SLU*). Los muros de mampostería estudiados varían su resistencia hasta que alcanzan los valores máximos de fallo por corte a lo largo de las juntas del mortero o flexión en la que las grietas atraviesan las unidades de mampostería. A medida que el sistema se acerca a tales valores, el aporte de los muros es menor. El valor de respuesta del edificio (D_u) se determina cuando finalmente se alcanza el 80% del Estado Límite Último.

Después de analizar la curva push-over de la edificación se analiza la curva de oscilación simple asociada, a fin de poder calcular el período del sistema equivalente con el que se calcula el valor máximo de respuesta requerido por el sismo. De esta manera la estructura es sismorresistente si se cumplen las condiciones:

$$D_{max}(sismo) < D_u (edificio) \quad [8.11]$$

$$q < 3 \quad [8.12]$$

q muestra la relación entre la carga sísmica y la resistencia elástica del sistema. Otros valores mostrados son el valor de la aceleración límite en el momento del colapso que a su vez genera el valor del desplazamiento generado.

Verificación del Estado Límite de Daño (*SLD*)

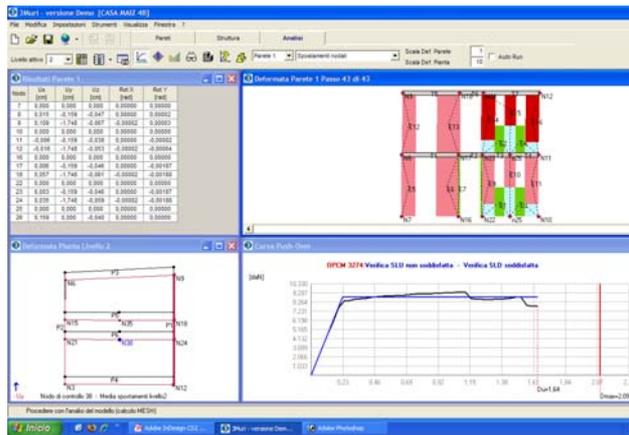
El desplazamiento máximo correspondiente a *SLD* (D_d) es el valor más pequeño entre el desplazamiento correspondiente al valor máximo de corte en la base de la edificación y el desplazamiento que genera la diferencia máxima en la verticalidad del muro en la base y la coronación permitida por la normativa de control:

$$d_r < 0.003 h \quad [8.13]$$

donde d_r es el desplazamiento entre planos (superior e inferior) y h es la altura interplanos.

El análisis se considera satisfactorio si se cumple la siguiente condición:

$$D_{max} (del sismo a SLD) < D_d (del edificio) \quad [8.14]$$



8.22a

El software utilizado permite mostrar los resultados de forma analítica, pero tiene además una interfaz gráfica que resulta muy útil de cara a visualizar los daños que sufren los diferentes elementos estructurales.

La **Figura 8.22a** muestra la ventana de resultados en donde puede verse el desplazamiento en planta y alzado de un muro sometido a carga sísmica.

Se complementa además con la tabla de analítica y la curva pushover que indican los valores SLU y SLD con los que se muestra si la estructura cumple ante las solicitaciones sísmicas.

Un mapa de colores mostrado en la **Figura 8.22b** indica el estado de daño de los elementos estructurales y un modelo en 3d permite hacer simulaciones de la forma en que la estructura va respondiendo a medida que se incrementa la carga lateral generada por el sismo.



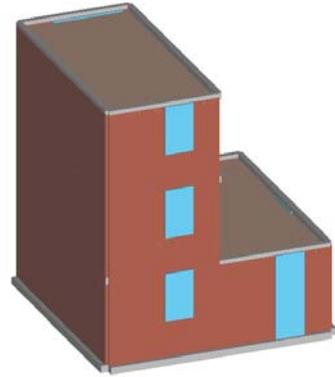
8.22b

8.6.2 Aporte de los muros de maíz

Para poder evaluar el aporte debido a los bloques de maíz se realizaron tres modelos de la misma estructura:

Modelo A.

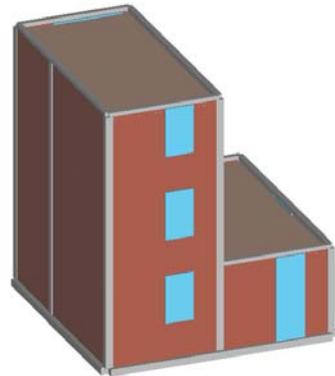
Estructura con bloques de maíz como elemento estructural portante.



8.23a

Modelo B.

Estructura con sistema de columnas y vigas como sistema portante y cerramiento con muros de bloque de maíz.



8.23b

Modelo C.

Estructura con sistema de vigas y columnas sin muros de cerramiento



8.23c

Con la comparación de los resultados obtenidos en el análisis de los 3 modelos diferentes se elaboraron unas tablas que muestran la respuesta de la estructura según la dirección de aplicación de la fuerza. De esta comparación puede observarse el aporte que los bloques de maíz han dado al sistema estructural.

Al sistema estructural analizado se le aplican fuerzas en sentido positivo y negativo (X-Y) perpendiculares a sus ejes principales. De esta forma para cada modelo se realizan inicialmente 8 análisis. Posteriormente se realiza una serie de análisis que tienen en cuenta la excentricidad accidental de la estructura, definida por la normativa de referencia como:

$$e_{ai} = \pm 5\%L \quad (8.6)$$

donde

L es la dimensión máxima del plano en dirección perpendicular a la acción sísmica.

De esta forma se pueden hacer tantos análisis como son las posiciones que puede asumir el centro de masa como consecuencia de tal excentricidad accidental en las direcciones X y Y . Así tenemos que todos los 8 análisis base se deben efectuar sin excentricidad, con excentricidad positiva y con excentricidad negativa. De esta forma se completa un total de 24 análisis.

Dirección de aplicación de la fuerza	Excentricidad	Distribución aplicada	No. análisis
+/- X	0	Proporcional a la masa Proporcional a la masa x altura.	4
+/- Y	0	Proporcional a la masa Proporcional a la masa x altura.	4
+/- X	positiva	Proporcional a la masa Proporcional a la masa x altura.	4
+/- Y	positiva	Proporcional a la masa Proporcional a la masa x altura.	4
+/- X	negativa	Proporcional a la masa Proporcional a la masa x altura.	4
+/- Y	negativa	Proporcional a la masa Proporcional a la masa x altura.	4

Tabla 8.15 Dirección de aplicación de fuerzas y número de análisis por modelo

Al final se realiza una comparación de los análisis efectuados a los tres modelos y en base a la diferencia de resultados se pueden encontrar las diferencias debidas al uso de bloques de maíz.

De cada uno de los análisis se generó la correspondiente curva *pushover* en la que se relacionan el esfuerzo cortante en la base del muro y el desplazamiento que se origina en el nodo de control. La relación completa de datos de cada uno de los modelos se muestra en el **Anexo 8.3**.