

## **CURVAS DE CAPACIDAD PARA EDIFICIOS MONUMENTALES: LA IGLESIA SANTA MARÍA DEL MAR DE BARCELONA**

*J. Irizarry<sup>(1)</sup>, S. Podestà<sup>(2)</sup> y S. Resemini<sup>(3)</sup>*

*<sup>(1)</sup>Instituto Cartográfico de Cataluña, Parc de Monjuïc, s/n, Barcelona, España*

*<sup>(2)</sup>Departamento Mecánica Estructural, Universidad de Pavía, Italia*

*<sup>(3)</sup>Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Universidad de Genova, Italia*

[jirizarry@icc.es](mailto:jirizarry@icc.es)

### **RESUMEN**

Los códigos recientes siguen la idea del diseño basado en el desempeño de las estructuras. En éstos se le presta atención al método del espectro de capacidad. Este método (Freeman, 1998) está basado en la comparación de la capacidad de la estructura con la demanda producida por un sismo, en términos de ductilidad y resistencia. Esta técnica permite evaluar directamente el comportamiento estructural bajo cierta acción sísmica. Sobre la base del estudio de la Iglesia de Santa María del Mar de Barcelona, realizado dentro del marco del proyecto RISK-UE, los autores sugieren la posibilidad de obtener la curva de capacidad a través de la síntesis de dos métodos: el análisis de equilibrio límite y el análisis de elementos finitos, realizado usando un modelo constitutivo no-lineal. Se considera un sistema estructural particular que representa los elementos de resistencia transversal de la iglesia, y que está compuesto por arcos, bóvedas, pilares, y contrafuertes. Se presentan los resultados obtenidos en el caso del mecanismo transversal de la Iglesia, proponiendo un método útil para evaluar la curva de capacidad de estructuras similares.

Palabras Clave: espectro de capacidad, monumentos, curva de capacidad, terremotos

### **SUMMARY**

Recent codes follow the idea of a performance-based design of structures. In these codes, some attention is addressed to the Capacity Spectrum Method. This method (Freeman, 1998) is based on the comparison between the capacity of the structure and the demand due to the seismic event, in terms of ductility and strength. This approach allows us to obtain a direct evaluation of the structural behavior under seismic actions. In the proposed paper, on the base of a specific case study (the Santa Maria del Mar church in Barcelona), the authors suggest a possible way to determine the Capacity Curve through the synthesis between two different approaches: the Equilibrium Limit Analysis and the Finite Element Analysis, carried out using a non-linear constitutive model. A particular structural system, which represents the transversal resistant elements of the church, and which is made up of the naves' arches and vaults, the pillars, and the buttresses, is taken into account. The results in the case of the transversal response mechanism of the church are presented, proposing a useful method in order to evaluate the Capacity Curve of similar structures.

Keywords: capacity spectra, monuments, capacity curve, earthquakes

### **Introducción**



Este estudio sobre la curva de capacidad de la iglesia Santa María del Mar en Barcelona se lleva a cabo como parte de la evaluación analítica de la vulnerabilidad de monumentos dentro del marco de la aplicación en la ciudad de la metodología del proyecto europeo RISKUE (2002).

Para calcular la curva de capacidad de Santa María del Mar se usarán metodologías basadas en el uso de elementos finitos y análisis de límite inspiradas en la filosofía del diseño basado en el desempeño. Este estudio permitirá también definir niveles de daño para la estructura que servirán para evaluar el impacto de acciones sísmicas en la misma

### **Objetivos**

El principal propósito de este trabajo es evaluar la curva de capacidad para al respuesta sísmica de la iglesia de Santa Maria del Mar, un monumento representativo del estilo gótico catalán. Las curvas de capacidad se evaluarán usando dos métodos principales: el análisis de elementos finitos y el análisis del equilibrio límite. Los resultados de ambos métodos serán comparados y analizados para definir los niveles de daño de la estructura.

### **Trasfondo histórico y descripción de la iglesia**

Santa Maria del Mar es una de las iglesias más emblemáticas de la ciudad de Barcelona. La iglesia de Santa Maria del Mar es un templo representativo del estilo gótico catalán del siglo XIV construido como resultado de la extensión de una iglesia pequeña dedicada a la Virgen María.

La iglesia está compuesta de tres naves formadas por cuatro secciones y un altar que consiste de un polígono de siete lados, todos cubiertos por bóvedas. Las columnas son octogonales, con una altura de 26 m y una separación entre sí de 15 m, forman cuatro secciones centrales de 15 x 15 m. El estilo del gótico catalán usa contrafuertes en vez de arbotantes, y el espacio entre el final de las naves laterales y el final de los contrafuertes se incluye en el interior de la estructura. Una foto de la nave central de la iglesia de Santa María del Mar y la vista en planta de la misma se muestran en la Figura 1.

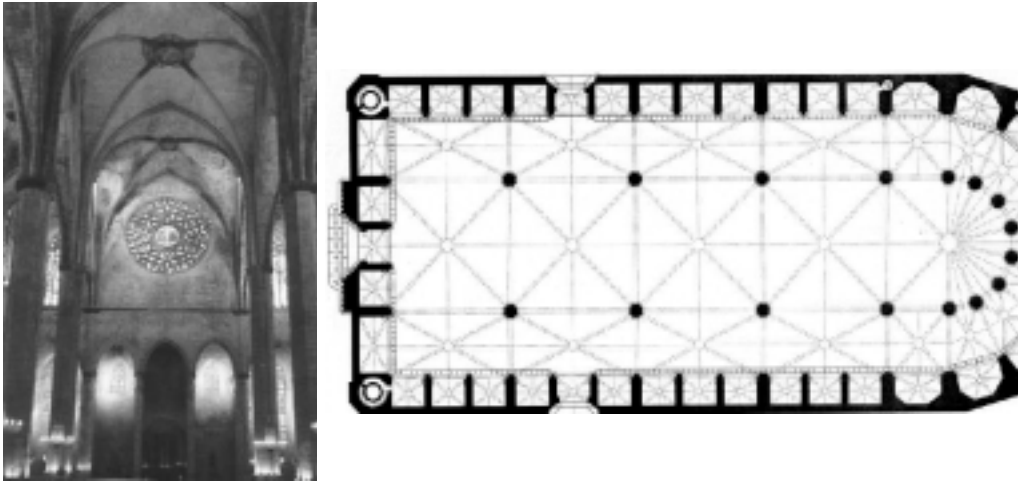


Figura 1 - Nave central de la iglesia Santa Maria del Mar y vista en planta de la iglesia..

En 1373, mientras la iglesia estaba aún en construcción, un terremoto con epicentro en los Pirineos con una intensidad epicentral de VIII-IX (MSK) fue sentido en Barcelona. Para este tiempo algunos elementos de cierre entre algunas paredes y arcos interiores aún no habían sido construidos. Debido a este sismo el daño principal en la iglesia fue la caída de la parte más alta del campanario. En 1428 otro sismo fue sentido en Barcelona, esta vez con una intensidad epicentral de IX (MSK). Santa María del Mar vuelve a verse afectada ante el sismo. El rosetón que adorna su fachada cae por la acción del sismo causando la muerte de varias personas en su caída.

Debido a los daños sufridos por este monumento en sismos anteriores, su geometría y su emblemática representación del estilo gótico catalán se decidió analizar su comportamiento ante acciones sísmicas.

### **Análisis sísmico de una nave de la iglesia Santa Maria del Mar**

El método propuesto para llevar a cabo el análisis sísmico de la iglesia de Santa María del Mar toma en consideración la división de la iglesia en macroelementos. Un macroelemento es una parte de la iglesia caracterizada por una respuesta sísmica suficientemente autónoma con respecto de otras partes de la estructura. El comportamiento global de la estructura es evaluado como la suma de la contribución de cada macroelemento de la iglesia.

Con respecto a la acción sísmica transversal, la nave de la iglesia se caracteriza por dos elementos bastante rígidos: la fachada, la cual está sujeta a acciones de cortante en el plano, y el arco triunfal, cuya rigidez aumenta debido a la presencia del crucero y otras estructuras como lo son la sacristía o la rectoría. La parte central es ciertamente menos rígida debido a la esbeltez de las paredes laterales. En el caso de una nave lo suficientemente larga asumir que la sección



central de la iglesia no está sujeta a efectos de esquina es bastante correcto. Por lo que es posible analizar esta sección como si fuera independiente de las otras.

En este caso el concepto de macroelementos es aplicado a la respuesta transversal de la iglesia. En esta iglesia, estos elementos parecen ser los más vulnerables a la acción sísmica. De hecho, la iglesia tiene naves anchas y pilares esbeltos con una luz notable que hace esta parte de la estructura particularmente vulnerable. Por esto se estudiará la vulnerabilidad de este sistema estructural compuesto del arco y los pilares de la nave central, y los arcos y contrafuertes de la nave lateral.

Para obtener la curva de capacidad del sistema transversal de la iglesia se usarán los siguientes métodos: análisis del equilibrio límite y análisis de elementos finitos. En las próximas secciones se discutirán las ventajas y desventajas de estas dos metodologías. Tomando en consideración esta discusión, la curva de capacidad para la respuesta transversal de la iglesia de Santa María del Mar será evaluada usando una metodología que combina los dos métodos mencionados.

### **Análisis del Equilibrio Límite**

Este tipo de análisis representa un método simplificado para evaluar el factor de carga horizontal que rompe el equilibrio estático y activa la condición de mecanismo en la estructura. Un mecanismo es una condición en la cual la estructura puede ser representada por una cadena cinemática de cuerpos rígidos.

Para aplicar este tipo de análisis, la estructura de mampostería es considerada como un conjunto de bloques rígidos, que se mantienen unidos por fuerzas de compresión y se agrietan cuando se comienzan a generar esfuerzos tensionales tal como fue descrito por Como (1992). Esta consideración se basó en la observación del comportamiento real de estructuras de mampostería. Para estudiar el equilibrio y colapso de una estructura de mampostería se suponen los siguientes principios introducidos por Heyman (1966): el fallo por deslizamiento no puede ocurrir, la mampostería tiene una capacidad infinita en compresión, la mampostería es un material no tensional y que las deformaciones elásticas son despreciables. Aunque se supone que sus deformaciones elásticas son despreciables, los desplazamientos y rotaciones son posibles debido al desarrollo de grietas.

El equilibrio de una estructura de mampostería es posible bajo una condición de cargas particular: considerando las suposiciones antes mencionadas y el principio de trabajos virtuales que requiere que las fuerzas externas no realicen trabajo. Cuando una estructura está en equilibrio, el valor de factor de carga,  $\zeta$ , se conoce como factor de colapso o cinemático.

Un mecanismo de colapso efectivo es aquel en el cual el factor de carga causa un estado admisible de esfuerzos en toda la estructura, es decir, que produzca una fuerza de compresión en cualquier sección del elemento de mampostería. Este factor de carga se conoce como factor de carga efectivo. Por el teorema del análisis de límite cinemático, el factor de colapso efectivo es el mínimo de los mecanismos de colapso efectivo posibles.

En el caso del análisis sísmico, las fuerzas consideradas en la suma de los trabajos virtuales son la carga lateral que representa la acción sísmica y las cargas verticales que representan el peso de los cuerpos rígidos. Al igualar esta suma a cero, se puede encontrar el factor de carga para el mecanismo considerado. De esta manera el factor de carga puede representar la aceleración espectral en la cual se espera se active dicho mecanismo.

Para determinar la curva de capacidad usando el análisis de límite se siguen los siguientes pasos: (1) definir un mecanismo particular, (2) determinar, para este mecanismo, el factor de carga,  $\zeta$ , asociado a una posición de las rótulas que se forman, (3) minimizar el valor del factor de carga obtenido para el mecanismo variando la posición de las rótulas, (4) analizar de esta manera diferentes mecanismos, y seleccionar el mecanismo con el factor de carga menor, (5) para seguir el desarrollo de la capacidad lateral de la estructura, una configuración modificada de los elementos es definida según la acción del mecanismo seleccionado, (6) se impone en la estructura un desplazamiento y se calcula un nuevo valor del factor de carga, (7) este último paso se repite hasta que el factor de carga sea igual a cero, es decir, cuando la estructura ya no es capaz de soportar mas carga horizontal. Con este procedimiento se obtienen dos valores del factor de carga que junto a sus desplazamientos asociados permiten dibujar la curva de capacidad de la estructura.

Cabe observar que en el análisis de equilibrio límite no se considera la capacidad de deformación de la estructura. Además, la hipótesis del material que no resiste tensión implica que no existe diferencia en la elección del plano a seccionar entre dos bloques. El comportamiento real de este tipo de estructuras refleja que la extensión e inclinación de la superficie seccionada, la interferencia de las bóvedas, etc. Puede modificar el mecanismo de colapso.

### **Análisis de elementos finitos**

En el análisis de elementos finitos, la estructura se puede modelar a través de elementos con un comportamiento no lineal, el cual toma en consideración una capacidad en tensión limitada y la degradación progresiva de la rigidez luego de un nivel predeterminado de esfuerzo. Se pueden considerar diferentes tipos de falla como por deslizamiento, aplastamiento, fricción, etc.

Para poder simular el comportamiento sísmico de la estructura se llevó a cabo una simulación estática no lineal en incrementos por medio de elementos finitos, considerando grandes deflexiones. Una aceleración horizontal en aumento representa, desde el punto de vista de la estática, la acción de la fuerza sísmica. En el análisis de elementos finitos, el modelo continuo permite considerar la capacidad de deformación estructural y no-linealidad.

Este método es una manera ideal para evaluar un patrón de agrietamiento realista, tomando en cuenta la presencia de elementos como las bóvedas. Además, también considera la influencia de los pasos sucesivos de carga (debido a la presencia



del fenómeno de la plasticidad asociada a los efectos de la fricción).

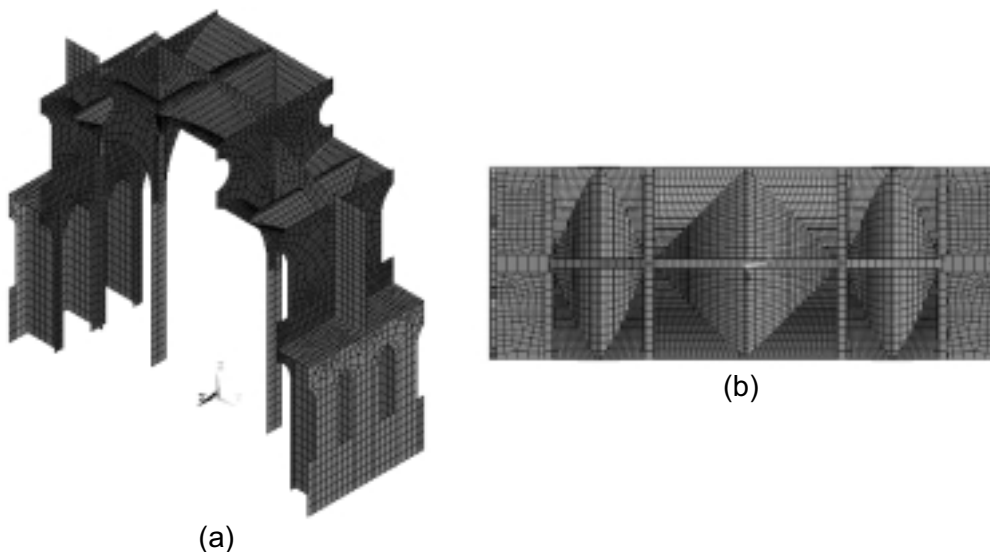
Una desventaja de este tipo de análisis es la dificultad en determinar una solución convergente, provocando un gran número de iteraciones de equilibrio. Otro problema importante surge cuando se llega a la fase de relajación, consecuente con el fallo en cortante y compresión, en la cual el material progresivamente pierde su resistencia. En cualquier caso, cuando se toman en consideración grandes desplazamientos, la fase de relajación está presente, aún si sólo se considera el fallo por tensión.

### **Aplicación del análisis de elementos finitos a la respuesta transversal de macroelementos**

El análisis de elementos finitos sea realizado con el código de uso general ANSYS versión 5.7. El modelo de elementos finitos se llevó a cabo usando un elemento plástico tipo lámina de gran deflexión denominado en el programa ANSYS como "SHELL 91- Nonlinear layered structural shell". Este elemento está definido por 8 nodos, espesor de capa, ángulos de dirección del material de la capa y las propiedades del material anisótropo. Este elemento tiene 6 grados de libertad en cada nodo.

El modelo geométrico para el análisis de elementos finitos es representativo de los elementos que intervienen en la respuesta transversal de la iglesia: un sistema de tres naves formado por arcos y pilares. Este modelo (Figura 2) incluye todos los elementos estructurales: arcos transversales, pilares, contrafuertes, bóvedas y las porciones de las paredes laterales correspondientes a la sección.

Las bóvedas de las naves centrales y laterales son modeladas considerando la mitad de cada bóveda a cada lado de los pilares y condiciones de borde apropiadas son impuestas para simular condiciones simétricas. En las porciones de paredes laterales se toman en cuenta las aperturas y condiciones de borde adecuadas. El uso de materiales diferentes en los elementos permitió describir el comportamiento estructural de la mejor manera posible.



**Figura 2 - (a) Modelo de los elementos que intervienen en la respuesta transversal; (b) Vista superior del sistema de arcos.**

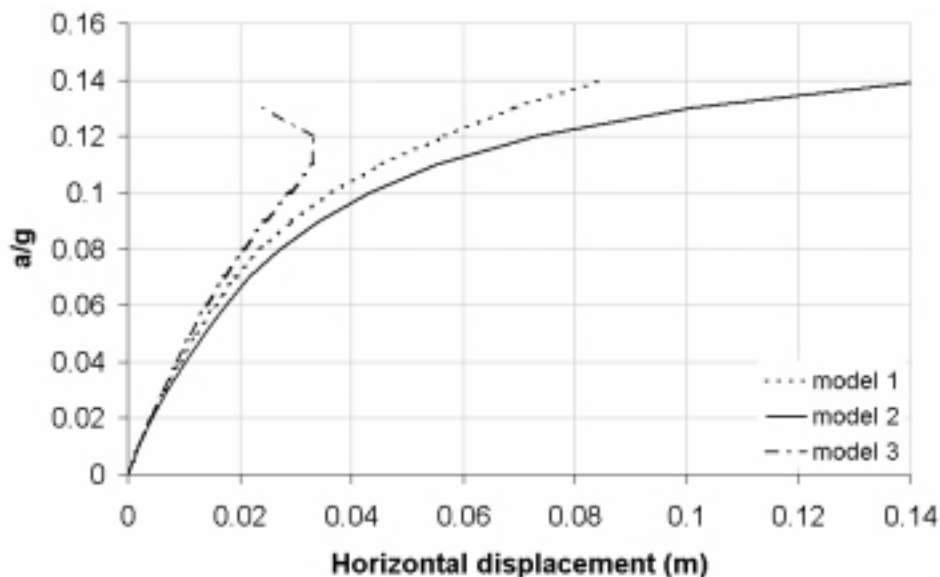
Como modelo constitutivo se escogió uno capaz de describir el comportamiento no lineal de las estructuras de mampostería, aún bajo niveles bajos de esfuerzo. El mismo corresponde al modelo constitutivo no lineal de Gambarotta y Lagomarsino (1997) puesto en servicio en el código de elementos finitos de ANSYS. Este modelo constitutivo considera la capacidad limitada en tensión de materiales frágiles. Su modelo de daño permite simular la progresiva degradación de la rigidez (respuesta no lineal) hasta llegar a un nivel de esfuerzo de falla determinado y la consecuente fase de relajamiento.

El modelo de Gambarotta y Lagomarsino (1997) no considera las grietas como un fenómeno localizado, sino que las simula a través de un campo de deformación inelástico equivalente. El modelo permite considerar el fallo en cortante por fricción mediante el criterio de Coulomb. Además las deformaciones inelásticas causadas por los esfuerzos en tensión (apertura de grietas), el deslizamiento también puede ser simulado. Finalmente, el aplastamiento es considerado en el caso en los cuales la sección de la pared es drásticamente reducida.

El realizar un análisis modal permitió obtener el periodo fundamental de la estructural ( $T_0 = 0.81$  segundos) y su primer modo de vibración. El periodo fundamental es un parámetro importante para entender las propiedades dinámicas de una estructura, por esto es usado para definir el comportamiento de la curva de capacidad en su fase elástica. El primer modo de vibración también puede sugerir un posible mecanismo de colapso.

Para evaluar la sensibilidad a algunos factores se llevaron a cabo otros modelos de simulación estática no lineal en incrementos por medio de elementos finitos. El Modelo 1 tiene un primer paso de carga correspondiente a la carga muerta de la estructura y una aceleración horizontal de 0.14 g aplicada en 14 incrementos. El Modelo 2 considera la sensibilidad respecto a la presencia de las bóvedas, mientras que el Modelo 3 investiga la sensibilidad respecto al historial de carga.

La curva de aceleración horizontal en unidades de  $g$  respecto el desplazamiento horizontal del tope del arco de la nave central para el Modelo 1 se puede observar en la Figura 3. El valor de aceleración horizontal en el cual la curva refleja un aumento notable en deformación correspondiente a un bajo incremento de aceleración representa un estado de daño en aumento. Al acercarse al valor de 0.14  $g$  en aceleración horizontal, la curva aun no ha alcanzado un comportamiento asintótico por lo que se puede decir que aun existen fuentes de resistencia.



**Figura 3 – Aceleración horizontal ( $g$ ) vs. el desplazamiento horizontal en el tope del arco central ( $m$ ) para los modelos 1, 2 y 3.**

Al usar un modelo continuo, el daño no se concentra en una sección de falla, sino que lo hace en una porción más amplia de la mampostería. Por esta razón el comportamiento global de la estructura no muestra una reducción repentina de capacidad. En el caso de un nivel de daño severo, el problema de convergencia de la solución implica que no se puede detectar claramente la asíntota.

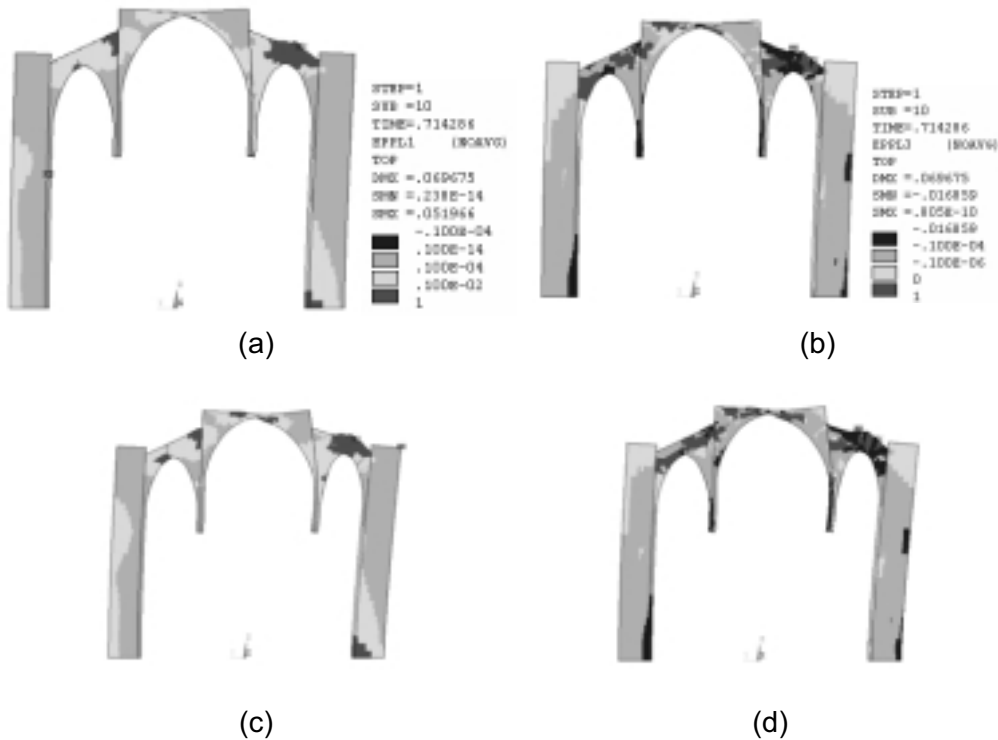
En el Modelo 2, se le asignó un módulo de Young más bajo al material de las bóvedas; con esta modificación se busca que estos elementos sean una mera carga muerta sobre las paredes transversales. En este caso, la curva muestra un comportamiento asintótico que corresponde a un valor menor de la aceleración horizontal como se puede observar en la Figura 4. Este hecho revela el efecto estructural que tienen las bóvedas en la iglesia al ayudar a resistir la carga lateral.

En el Modelo 3, el primer paso de carga considerado es la carga muerta y en el próximo se aplica una aceleración horizontal de 0.14  $g$  en 14 incrementos. Aun cuando esta carga es más real, los resultados luego del primer paso de carga reflejan que los elementos estructurales están muy dañados. Este estado de daño afecta severamente al próximo paso de carga, causando problemas de convergencia en la



solución. La curva de capacidad para este modelo no es confiable como se puede ver en la Figura 3. Además, esta condición de daño no corresponde a la condición real de la estructura.

Las deformaciones inelásticas principales de los elementos resistentes en los modelos 1 y 2 se muestran en la Figura 4.



**Figure 4 – Deformaciones inelásticas principales: deformación máxima Modelo 1(a), Modelo 2 (c); deformación mínima Modelo 1 (b), Modelo 2 (d).**

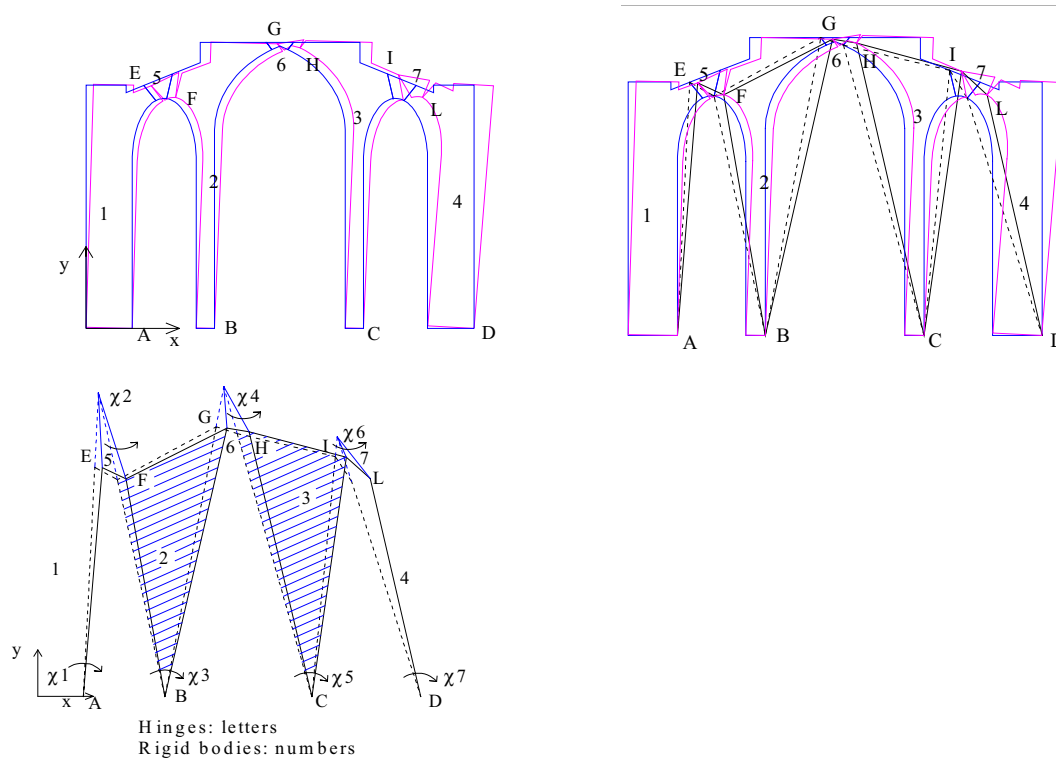
Analizando la estructura podemos notar que los Modelos 1 y 2 muestran diferentes patrones de daño. El Modelo 1 presenta grietas en las secciones de la base de los pilares y de los contrafuertes (rotaciones en sentido horario), dos grietas en el arco izquierdo, dos más en el arco derecho y aberturas no muy claras en el arco central. El Modelo 2 ha sufrido agrietamiento en la base de los pilares y contrafuertes por rotaciones en sentido horario, una grieta adicional en la sección de un pilar que corresponde a la rotación en sentido antihorario de la bóveda lateral, dos grietas en el arco izquierdo, dos grietas más en el arco central y una en el arco derecho.

#### **Aplicación del análisis de límite a la respuesta transversal de macroelementos**

El análisis de límite se llevó a cabo siguiendo el procedimiento para evaluar el factor de carga mínimo que había sido propuesto. La formulación analítica del principio del trabajo virtual se aplicó a un mecanismo seleccionado. Usando un modelo de la estructura considerado (Figura 5), se escoge una posición aleatoria de

las rótulas y se divide la estructura en 7 cuerpos rígidos. Usando el modelo se obtienen el centro de masa y el volumen de cada uno de estos cuerpos rígidos. Conociendo la localización exacta de las rótulas, las coordenadas del centro de masa de los cuerpos rígidos y sus volúmenes, el factor de carga se puede obtener matemáticamente. Entonces, se procedió a cambiar la posición de las rótulas hasta obtener un valor mínimo del factor de carga.

La Figura 5 muestra un posible mecanismo de colapso para los elementos transversales de la iglesia bajo la acción de cargas sísmicas. En esta figura también se muestra la posible localización de las rótulas y el diagrama de cuerpos rígidos usados para el cálculo del factor de colapso.



**Figure 5 – Posible mecanismo bajo carga sísmica y diagrama de cuerpos rígidos.**

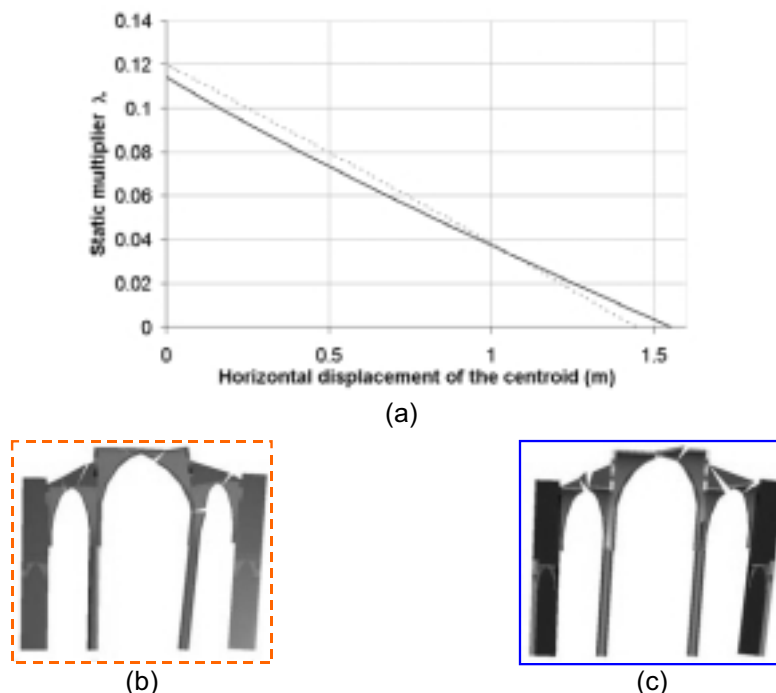
Para poder seguir el desarrollo de la capacidad de resistencia de la estructura se creó una configuración modificada de los elementos basada en la evolución del mecanismo seleccionado. Se asignó un valor arbitrario de rotación al primer bloque rígido definiendo así una cadena cinemática de cuerpos rígidos. En esta configuración modificada, se evalúa la nueva posición de los centros de masa. Aplicando la formulación del principio del trabajo virtual se obtiene un nuevo factor de carga. Este procedimiento se repite hasta obtener un factor de carga igual a cero, indicando que la estructura ha perdido toda capacidad para soportar carga horizontal.

Usando los resultados obtenidos en el análisis de elementos finitos, podemos

escoger un mecanismo basándose en las evidencias de daño de los modelos. Si hay una sección de la mampostería en la cual ocurre dilatación (apertura de grietas) en un lado y deformación por compresión en el lado opuesto, se puede decir que es posible que la sección divida dos cuerpos rígidos en el análisis de límite, es decir, que allí es posible la formación de una rótula del mecanismo.

Analizando las deformaciones principales del Modelo 1, la posición de las rótulas en las secciones en la base de los pilares y contrafuertes es muy clara. Además se ven claramente dos rótulas en el arco izquierdo y otras dos en el derecho, pero la localización de las rótulas que se podrían esperar en el arco central no está muy definida. De esta manera se obtiene un posible mecanismo para obtener el factor de carga.

Después de muchos intentos variando la posición de las rótulas en los arcos de la iglesia Santa María del Mar, se obtuvo un factor de carga mínimo de 0.11 g (de un rango de 0.11 g - 0.14 g). Esto significa que se espera que la iglesia colapse bajo la acción de una carga sísmica espectral igual o mayor al 11% de su propio peso. La posición de las rótulas asociadas al factor de carga mínima se muestran en la Figura 6-b.



**Figura 6 – (a) Diagrama del análisis de límite. Configuración modificada basada en el mecanismo con el factor de carga mínimo para el Modelo 1 (b) y el Modelo 2 (c).**

Al analizar las deformaciones principales del Modelo 2, la posición de las rótulas son más evidentes. Existen rótulas en la sección de la base de los pilares y contrafuertes en la sección de un pilar correspondiente a la rotación una bóveda



lateral, y en los tres arcos. Con esta nueva configuración de rótulas, se realizó el proceso para determinar el factor de carga mínimo. En este caso se obtuvo un factor de carga mínimo de 0.12. La posición de las rótulas asociadas al factor de carga mínima se muestra en la Figura 6-c.

Los gráficos del factor de carga versus el desplazamiento horizontal del centro de masa de todos los elementos para los modelos 1 y 2 se muestran en la Figura 6-a. El centro de masa de la sección transversal analizada tiene una altura de 15.65 m. Al compararlos se puede notar que no hay gran diferencia entre el comportamiento de las curvas por lo que se puede considerar que la curva derivada del primer mecanismo es la curva final. Este mecanismo representa una condición más conservadora aun cuando el patrón de daño obtenido por el análisis de elementos finitos no era muy evidente.

### **Definición de la curva de capacidad de la respuesta transversal de la iglesia de Santa María del Mar**

La curva de capacidad de la iglesia de Santa María del Mar se puede definir tomando en consideración los resultados discutidos previamente. Durante la fase elástica de los desplazamientos, la pendiente de la curva se define usando la siguiente expresión donde  $T_0$  es el periodo fundamental de la estructura:

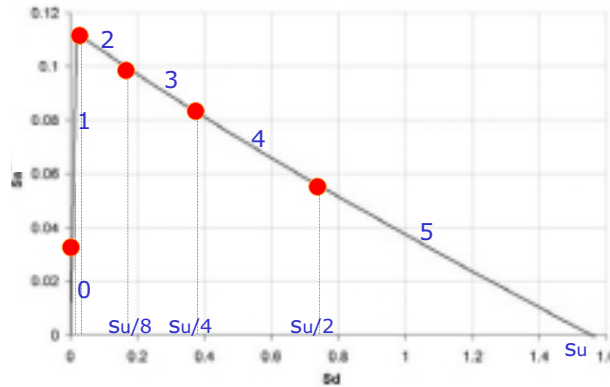
$$\text{pendiente fase elástica} \mid \frac{4\phi^2}{9.8T_0^2} \quad (1)$$

La fase elástica de la curva de capacidad se extiende hasta un valor del factor de carga,  $\gamma$ , en el cual se inicia el agrietamiento en el interior de la sección de mampostería. Este valor  $\gamma$  se obtiene moviendo las rótulas del mecanismo hacia el interior de la sección. La distancia desde la superficie hasta la nueva posición de la rótula equivale a un tercio el ancho de la sección. El valor obtenido para  $\gamma$  fue 0.035 g.

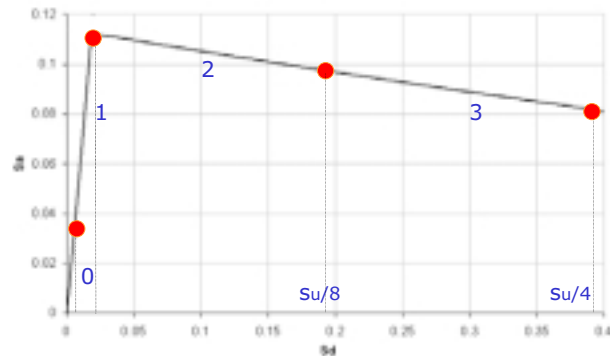
La siguiente parte de la curva, la fase no lineal, se describe con el factor de carga de colapso obtenido del análisis de límite, su desplazamiento correspondiente y el desplazamiento horizontal último del centro de masa obtenido del análisis de la configuración modificada del mecanismo,  $S_U$ . La Figura 7 muestra la curva de capacidad definida para la iglesia Santa María del Mar.

Los límites de los estados de daño se pueden definir tomando en consideración el desplazamiento último,  $S_U$ , obtenido en el análisis de límite. El nivel de daño 0 (no daño) se extiende hasta una aceleración espectral de 0.035 g que lleva la estructura al inicio del agrietamiento interno de sus elementos estructurales. El nivel de daño 1 (daño ligero) continua desde el límite del nivel de daño 0 hasta la intersección con el tramo de la curva, que corresponde a la fase no lineal, correspondiente a una aceleración espectral de 0.11 g.

Los niveles de daño restantes se definen usando fracciones del desplazamiento horizontal último,  $S_u$ . Sin embargo, los valores esperados de los desplazamientos espectrales son probablemente inferiores a 0.4m, por lo que la curva de capacidad representativa de la respuesta transversal de la iglesia de Santa Maria del Mar se muestra en la Figura 8.



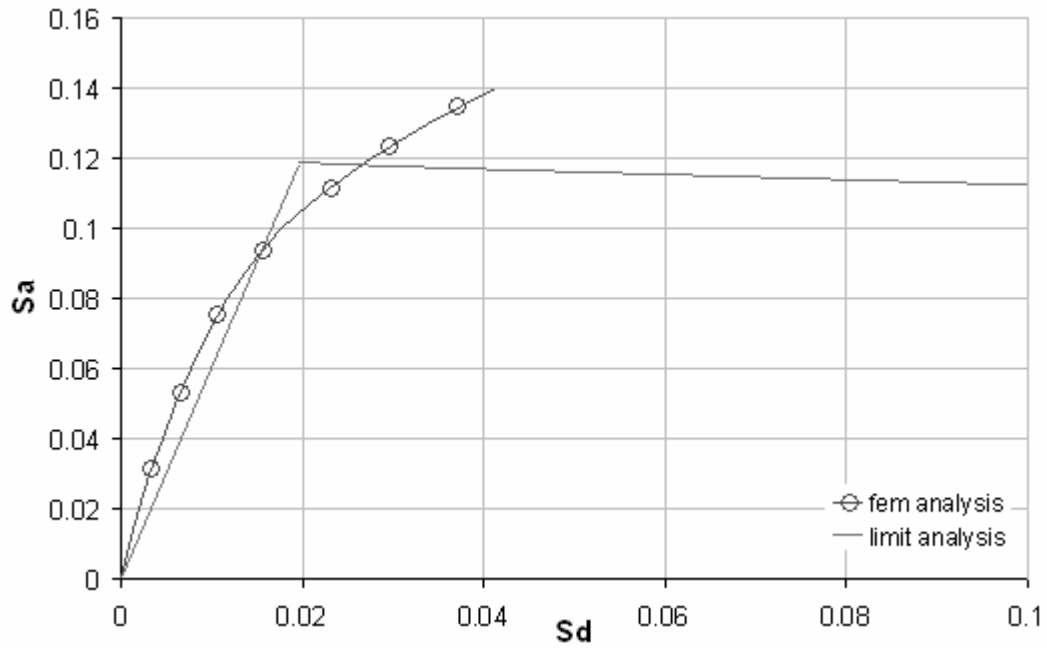
**Figura 7 – Curva de capacidad obtenida por el análisis de límite ( $S_a$  en g,  $S_d$  en m).**



**Figura 8 – Curva de capacidad con  $S_d < 0.4$  m ( $S_a$  en g,  $S_d$  en m).**

Las curvas de capacidad obtenidas en el análisis de límite y en el análisis por elementos finitos se comparan en la Figura 9. Para lograr esta comparación el desplazamiento horizontal en el tope de la sección obtenido en el análisis de elementos finitos ha sido adecuadamente escalado para representar el desplazamiento horizontal a la altura del centro de masa y así poder ser comprado con el desplazamiento obtenido del análisis de límite.

Se observa una buena correspondencia entre los desplazamientos obtenidos por ambos métodos en el rango de transición entre la fase elástica y la no-lineal aun cuando en la curva de elementos finitos esta transición es continua y en el caso del análisis de límite está reflejada por un cambio súbito de pendiente.



**Figura 9 – Comparación entre las curvas de capacidad obtenidas en el análisis de elementos finitos y el análisis límite ( $S_a$  en g,  $S_d$  en m).**

## Conclusiones

En este trabajo, los autores han propuesto una metodología, inspirada en el diseño basado en el desempeño estructural. , Para evaluar la vulnerabilidad sísmica de un sistema estructural particular en una edificio monumental. A través de los resultados de los elementos finitos y el análisis límite del equilibrio, los autores han definido la curva de capacidad de la respuesta del sistema transversal de la iglesia de Santa Maria del Mar. La oportunidad de comparar la curva de capacidad con la demanda sísmica, usando el método del espectro de capacidad, nos permitirá realizar el análisis de riesgo sísmico para este edificio en particular.

## Referencias:

- € RISKUE (2002), "RISKUE: An advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different European cities". Proyecto Unión Europea. Contrato: EVK4-CT-2000-00014
- € Como, M. (1992), "Equilibrium and collapse analysis of masonry bodies". Meccanica, Vol. 27 pp 185-194.
- € Freeman, S.A. (1998), "Development and use of capacity spectrum method". Proceeding Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Inst., Oakland California.
- € Gambarotta, L. y Lagomarsino, S. (1997), "Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls, Part II: the continuum model and its applications". Earth. Engineering and Structural Dynamics, Vol.26.
- € Heyman, J. (1966), "The stone skeleton". International Journal of Solids Structures. Vol. 2.

## Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado como parte de la participación de la ciudad de Barcelona en el proyecto europeo "RISKUE: an advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different European cities" financiado por la Comunidad Europea bajo el contrato: EVK4-CT-2000-00014.