



Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica

XVII



SALIR

■ Ponencias

■ Patrocinadores

■ Créditos

■ Aviso Legal

■ www.smis.org.mx

MATRICES DE PROBABILIDAD DE DAÑO PARA LA CATEDRAL DE MALLORCA, ESPAÑA

Guillermo Martínez Ruiz¹ Pere Roca Fabregat² Oriol Caselles Magallón³ Jaume Clapés Boixader³ y Alex H. Barbat Barbat⁴

RESUMEN

Se presenta la obtención de la vulnerabilidad sísmica para una catedral Gótica de grandes dimensiones mediante la aplicación del Método del Espectro de Capacidad, y la obtención de las probabilidades de daño asociadas.

ABSTRACT

A large Gothic cathedral seismic vulnerability is presented through the implementation of the capacity spectrum method and associated damage probabilities.

ANTECEDENTES

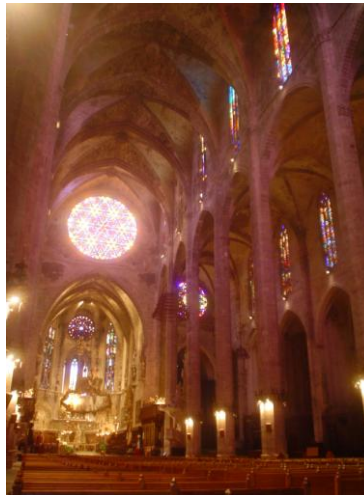


Figura 1. Vista interior de la nave de la catedral de Mallorca

Es bien conocida la alta vulnerabilidad sísmica de estructuras de mampostería sin reforzar incluso ante terremotos de baja intensidad. Si a la característica estructural mencionada anteriormente agregamos

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Edificio de Posgrado de Ingeniería Civil, Ciudad Universitaria, 58040, Morelia, Michoacán, México. gmrui@umich.mx

² Dpt. Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Cataluña, C/Jordi Girona 1-3, 0834, Barcelona, España. pere.roca.fabregat@upc.edu

³ Dpt. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña, C/Jordi Girona 1-3, 0834, Barcelona, España. oriol.caselles@upc.edu

⁴ Dpt. Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña, C/Jordi Girona 1-3, 0834, Barcelona, España. alex.barbat@upc.edu

irregularidades en planta y elevación, fisuración, deformaciones, daño acumulado producto de eventos sísmicos previos y varias décadas o siglos de haberse construido entre otros factores, podemos hablar entonces de una nada despreciable probabilidad de ocurrencia de daños o colapsos ante futuras acciones de este tipo.

Sin embargo, en algunas partes del mundo con alta sismicidad el comportamiento estructural y dinámico de los edificios antiguos sigue siendo una asignatura pendiente, debido principalmente a la reducida o prácticamente nula existencia de metodologías de aplicación práctica general, y al poco interés existente en la preservación del patrimonio construido. Es por tal motivo, que se presenta una propuesta para la obtención de las probabilidades de daño esperables en construcciones históricas de gran tamaño, a partir de detallados modelos numéricos de elementos finitos.

DESCRIPCION DE LA ESTRUCTURA

La catedral de Mallorca se comenzó a construir en el año de 1300 y se concluyó en 1606. A lo largo de su vida ha experimentado eventos sísmicos de consideración, tal es el caso de los ocurridos (con epicentros probables) en las regiones de Campos-Palma (1660), Selva (1721) y Palma-Marratxí (1851). El único terremoto que de acuerdo con la información disponible afectó de manera particular a la catedral, fue el ocurrido el 15 de mayo de 1851 (ver figura 4a), al cual se le asigna una intensidad máxima de VIII (M.S.K.) para el área de Palma y Marratxí (Mézcua y Martínez-Solares, 1983), motivo por el cual puede ser considerado como el mayor de los terremotos percibidos en la isla de Mallorca en los últimos cuatro siglos.

Dentro de sus características más relevantes el edificio tiene 120m de longitud y 55m de ancho, y una altura libre hasta la clave de las bóvedas de la nave principal de 44m. El punto más alto de la estructura son las torres de la fachada Oeste, las cuales alcanzan los 64m de altura total.

El cuerpo principal está formado por tres naves y capillas laterales ubicadas entre los contrafuertes. Los pilares de la nave central son de sección transversal octogonal y están contruidos mediante sillería de bloques de gran tamaño, sin ningún tipo de relleno de menor calidad al centro del elemento. Los arcos de las naves son diafragmáticos y a su vez están conectados a una doble batería de arbotantes. El edificio presenta un falso crucero que conecta las puertas Norte y Sur. En la zona norte del edificio se encuentra ubicado el claustro y una torre campanario de planta cuadrada. El ábside está conformado por dos cuerpos adicionales de menor altura (la capilla Real y la capilla de la Trinidad), lo anterior se aprecia en la figura 2.

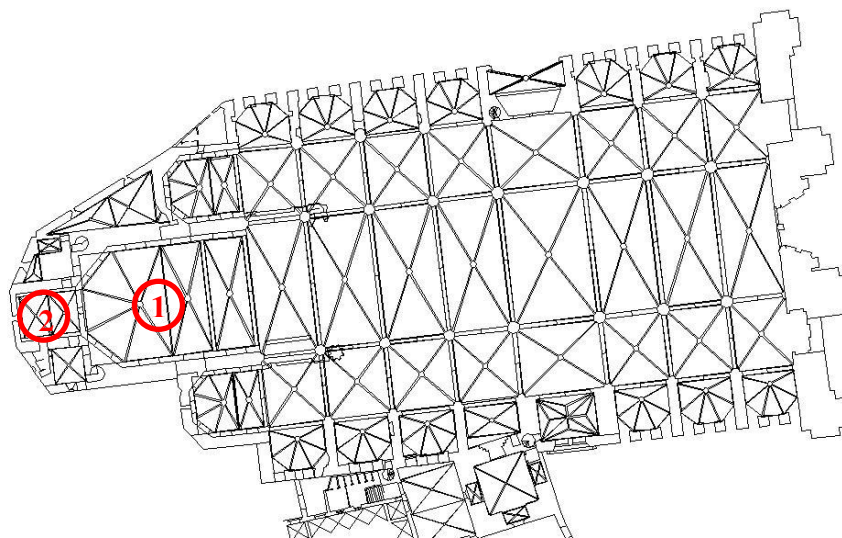


Figura 2. Planta de la catedral de Mallorca. Capilla Real (1) y capilla de la Trinidad (2).

MODELO NUMERICO

Para la determinación de la capacidad ante carga lateral del sistema resulta primordial la construcción de modelos numéricos del edificio en estudio, los cuales pueden establecerse bien de manera simplificada o detallada como es el presente caso, donde se modeló al conjunto mediante 463,768 elementos finitos tetraédricos tridimensionales (ver figura 3).

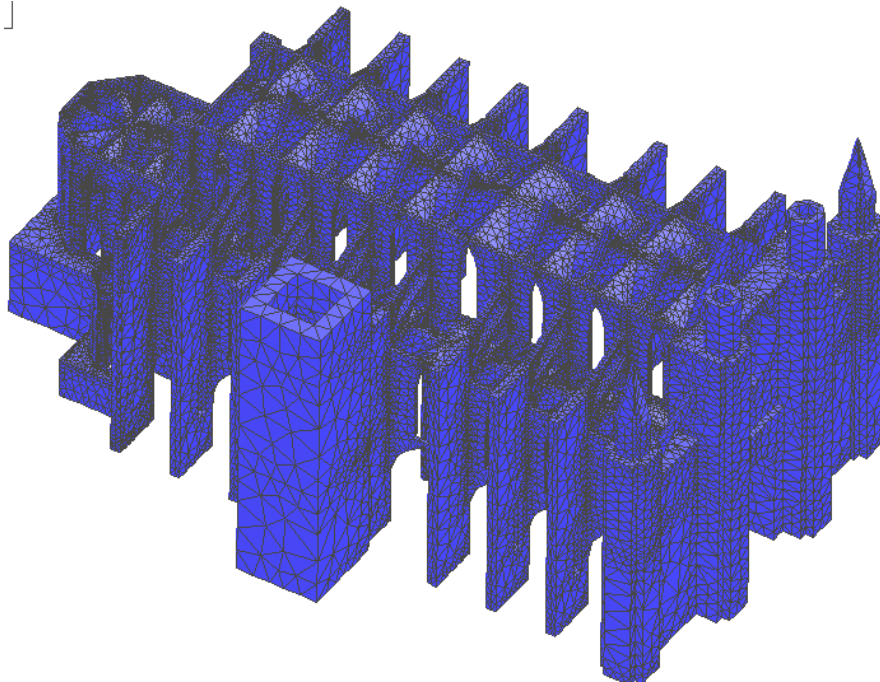


Figura 3. Malla de elementos finitos del modelo numérico global

Es importante hacer notar que la construcción de modelos detallados con elementos finitos para estructuras antiguas, sigue siendo una tarea que demanda una labor compleja y en algunas ocasiones de prolongados intervalos de tiempo, sin embargo, resultan benéficos como una inversión a largo plazo debido a que se garantiza la posibilidad de realización de estudios detallados muy variados (térmicos, dinámicos temporales, de interacción suelo-estructura, flujo plástico, etc.), situación que se torna bastante limitada en modelos simplificados.

PROPIEDADES DINAMICAS EXPERIMENTALES Y CALIBRACION DEL MODELO NUMERICO

Debido a las grandes incertidumbres asociadas a la determinación de las propiedades mecánicas de los diferentes elementos estructurales que conforman a los monumentos históricos, además de un adecuado modelo numérico la experimentación juega un papel fundamental. Con la finalidad de contar con propiedades equivalentes de rigidez para la calibración del modelo global, se realizaron mediciones de vibración ambiental sobre diferentes puntos sobre la estructura, a partir de las cuales se determinaron las frecuencias naturales de asociadas a los modos de vibración del sistema (Martínez *et al.*, 2006). En la tabla 1 se presentan las frecuencias medidas experimentalmente sobre tres alturas o niveles distintos del edificio, y las obtenidas a partir de la calibración del Módulo de Young en el modelo global arrojando finalmente las propiedades mecánicas que se resumen en la tabla 2.

Tabla 1. Frecuencias experimentales y calibradas para el modelo global (Martínez et al., 2006)

Modo de Vibración	Experimentales			Modelo calibrado (Hz)
	Nivel 3 (Hz)	Nivel 2 (Hz)	Nivel 1 (Hz)	
1	1.28	1.19	1.31	1.28
2	1.47	1.44	1.50	1.60
3	1.59	1.59	1.59	1.70
4	1.84	1.94	1.94	1.86
5	2.03	2.13	2.09	1.93

Tabla 2. Propiedades mecánicas posteriores a la calibración del modelo (Martínez et al., 2006)

Elemento estructural	Módulo de Young (MPa)	Densidad (kg/m ³)	Módulo de Poisson
Pilares y arbotantes	15264	2400	0.2
Bóvedas y muros	3816	2100	0.2
Rellenos en bóvedas	1908	2000	0.2
Contrafuertes	3600	2100	0.2

Con un modelo calibrado elásticamente es posible entonces proceder con un razonable nivel de certeza a la realización de análisis de tipo no lineal ante acciones permanentes y accidentales. Se hace la observación de que el proceso de calibración solo resulta representativo de la rigidez del sistema si se lleva a cabo sobre el modelo global, o bien sobre una parte de la estructura de tamaño representativo.

DEMANDA SISMICA

Se sugiere obtenerla de manera particular para el sitio donde se encuentra ubicada la estructura, evitando utilizar los espectros elásticos de pseudoaceleraciones propuestos por la mayor parte de las normativas existentes, ya que estos están calibrados para estructuras de edificación y no han sido pensados para su aplicación a edificios antiguos, además de solo considerar un período de retorno de 475 años, el cual en la mayor parte de los casos se ha visto excedido para este tipo de estructuras, lo cual obliga a analizar también períodos de recurrencia de 975 años; por tal motivo, es recomendable realizar un estudio de peligrosidad sísmica considerando los efectos del sitio, de preferencia utilizando tanto el enfoque determinista como el probabilista. Para el caso determinista se analizaron varios sismos ocurridos en la Isla de Mallorca, empleando finalmente el del 15 de mayo de 1851, el cual presenta ordenadas espectrales de poco más de 0.26g tal y como se muestra en la figura 4b. En la figura 5 se resumen los espectros probabilistas obtenidos sin efectos de sitio. Aunque como se ha mencionado no sea adecuado, para fines de comparativa en el presente trabajo se incluyeron las demandas establecidas en la Norma Sismorresistente Española NCSR-02 (ver figura 6); resulta importante hacer notar la gran diferencia existente en las ordenadas espectrales para los dos periodos de recurrencia considerados, las cuales son producto de una estimación del peligro del sitio en términos de intensidades y no de aceleraciones máximas del terreno como se suele hacer actualmente.

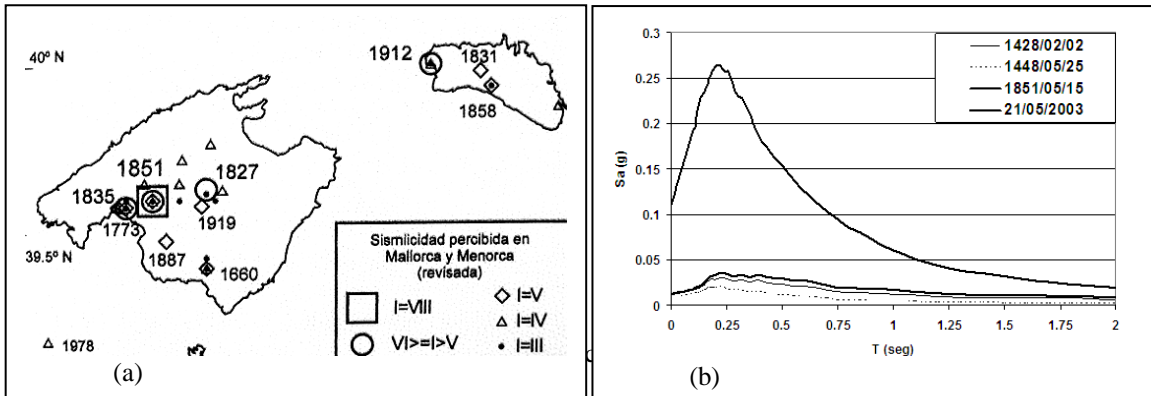


Figura 4. Isla de Mallorca y eventos sísmicos relevantes (a). Espectros de demanda deterministas (b)

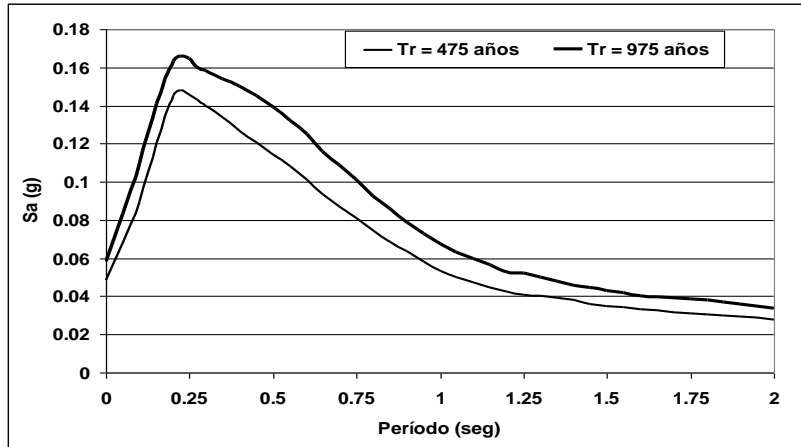


Figura 5. Espectros de demanda sísmica probabilista

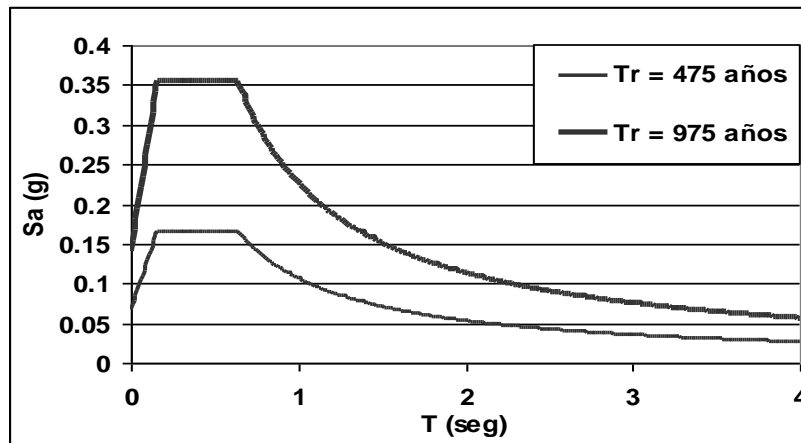


Figura 6. Demanda sísmica Norma Sismorresistente Española (NCSR-02)

EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD SISMICA

Según Doglioni *et al.* (1994), la estructura se puede subdividir en elementos con una respuesta sísmica que es autónoma del resto del sistema conformando así los llamados macroelementos. La definición anterior es válida para cuando la estructura se encuentre sujeta a niveles de desplazamiento inducidos por terremotos de intensidad considerable, y no para niveles bajos de vibración como se pudo constatar en las campañas de medición de ruido ambiente, en donde resulta indiscutible la inexistencia de tales macroelementos.

Muchas veces se cometen excesos al suponer que una parte de la estructura es (o parece ser) mas vulnerable que alguna otra, motivo por el cual se suele analizar solo algún macroelemento específico (bien sea también porque se repita varias veces o por la razón antes expuesta) y considerarlo representativo de la vulnerabilidad global. Sin embargo, para el caso de la catedral de Mallorca, lo anterior no resulta evidente desde ningún punto de vista debido a las grandes irregularidades en planta y elevación, y se opta entonces por realizar el análisis para los diferentes macroelementos que integran al edificio en las dos direcciones ortogonales de la estructura (ver figura 7).

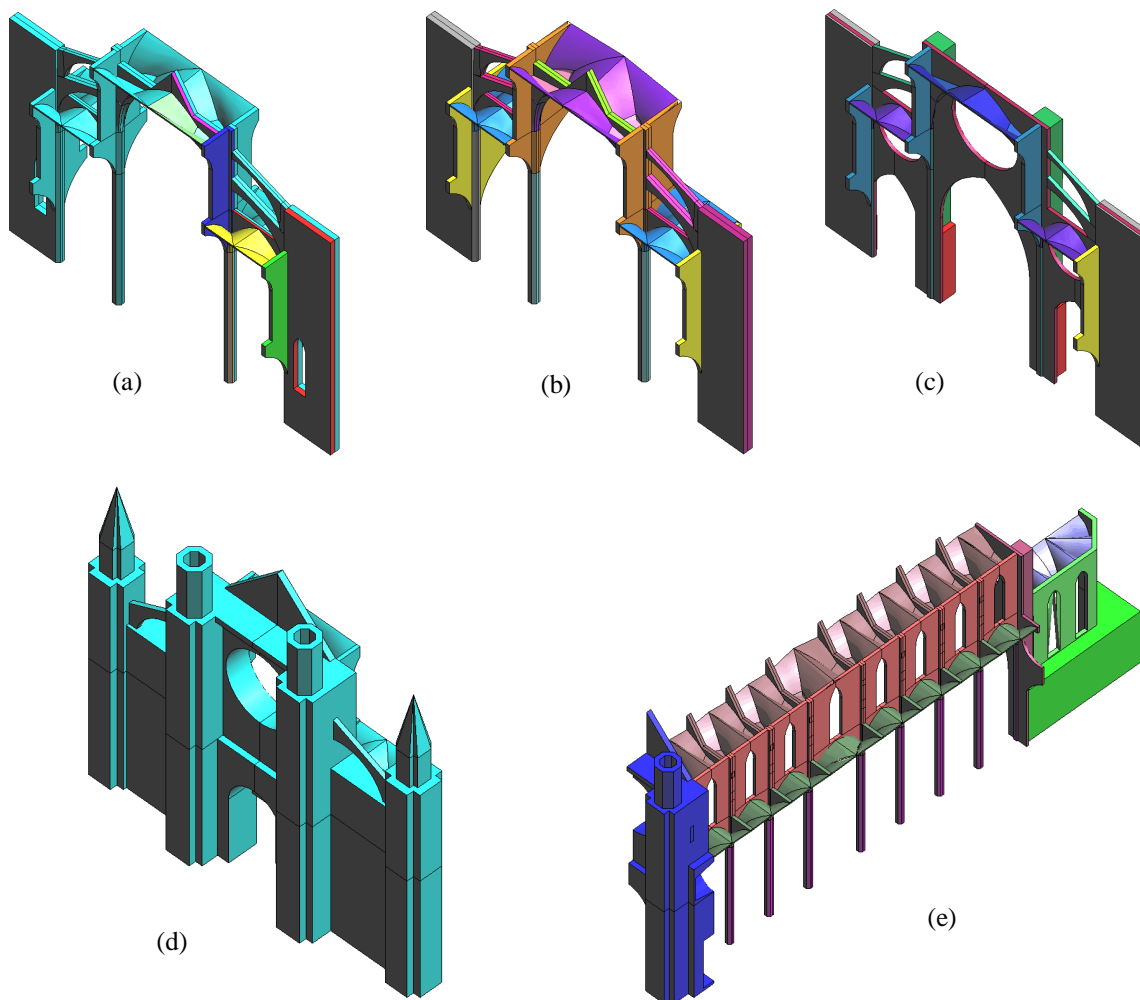


Figura 7. Macroelementos considerados para el estudio de vulnerabilidad sísmica de la catedral de Mallorca. Pórtico Tipo (a), Pórticos Transepto (b), Arco Triunfal (c), Fachada (d) y Macroelemento Longitudinal (e)

Para el caso en estudio, el modelo global se dividió en los macroelementos correspondientes a los pórticos tipo existentes en la dirección transversal del edificio, los pórticos de la zona de transepto, que únicamente son dos y definen el falso crucero que une a las puertas norte y sur, la fachada, el pórtico que define al arco triunfal, y los dos macroelementos que conforman los pórticos longitudinales y que a su vez están integrados por la fachada, naves y la zona absidal (ver figuras 7 y 8).

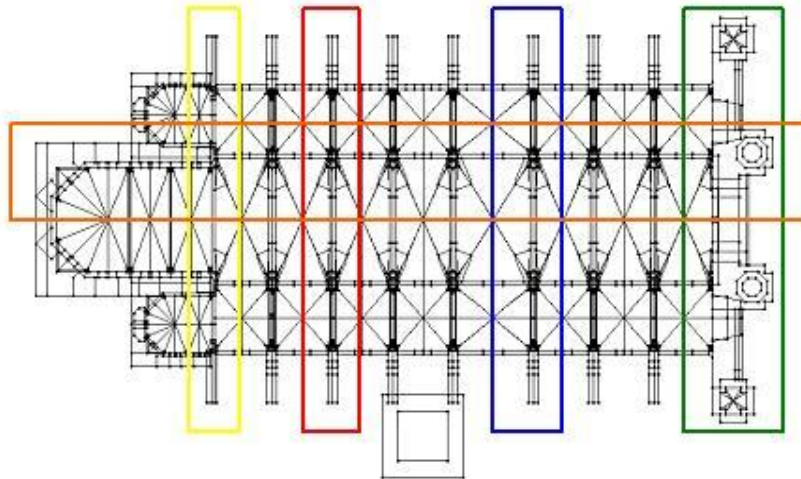


Figura 8. Ubicación esquemática en planta de los diferentes Macroelementos. Fachada (verde), Pórtico tipo (rojo), Pórtico transepto (azul), Arco triunfal (amarillo) y Macroelemento longitudinal (naranja)

Realizando un análisis de empuje incremental (*Pushover*) sobre cada uno de los macroelementos se definieron curvas y espectros de capacidad que posteriormente fueron bilinealizados, y que superpuestos con las demandas sísmicas obtenidas de los análisis determinista y probabilista de peligrosidad sísmica del sitio, conllevan a intersecciones entre los dos espectros conocidas como puntos de desempeño (Freeman, 1998, Fajfar, 1996), cuyos pseudodesplazamientos espectrales asociados son un indicador del estado de daño esperado. En la figura 9 se muestra el proceso anterior para el macroelemento correspondiente a los pórticos tipo, indicando su espectro de capacidad, los espectros de demanda sísmica para los escenarios determinista, probabilista y NCSR-02 además de los correspondientes puntos de desempeño asociados. Es importante resaltar que los espectros de demanda anteriormente mencionados ya contemplan los efectos del sitio, los cuales se obtuvieron aplicando la teoría unidimensional de propagación de ondas sísmicas en el terreno, además de haber sido suavizados empleando los criterios establecidos por el Eurocódigo 8 (EC-8). La tabla 3 resume la aplicación del mismo procedimiento para los restantes macroelementos, en donde Sdp (en metros) y Sap (en valores de g) corresponden respectivamente a los valores de pseudodesplazamiento y pseudoaceleración para cada punto.

Tabla 3. Puntos de desempeño para la catedral de Mallorca

MACROELEMENTO	Escenario Determinista		Escenario Probabilista				Escenario NCSR-02			
			Tr = 475 años		Tr = 975 años		Tr = 475 años		Tr = 975 años	
	Sdp	Sap	Sdp	Sap	Sdp	Sap	Sdp	Sap	Sdp	Sap
Pórticos Tipo	0.037	0.141	0.055	0.166	0.061	0.166	0.028	0.107	0.060	0.166
Pórticos Transepto	0.027	0.147	0.041	0.147	0.046	0.147	0.020	0.145	0.043	0.147
Arco Triunfal	0.029	0.187	0.044	0.249	0.049	0.249	0.021	0.140	0.045	0.249
Fachada	0.006	0.265	0.008	0.360	0.009	0.400	0.004	0.166	0.008	0.354
Pórticos Longitudinales	0.047	0.105	0.068	0.105	0.076	0.105	0.034	0.085	0.073	0.105

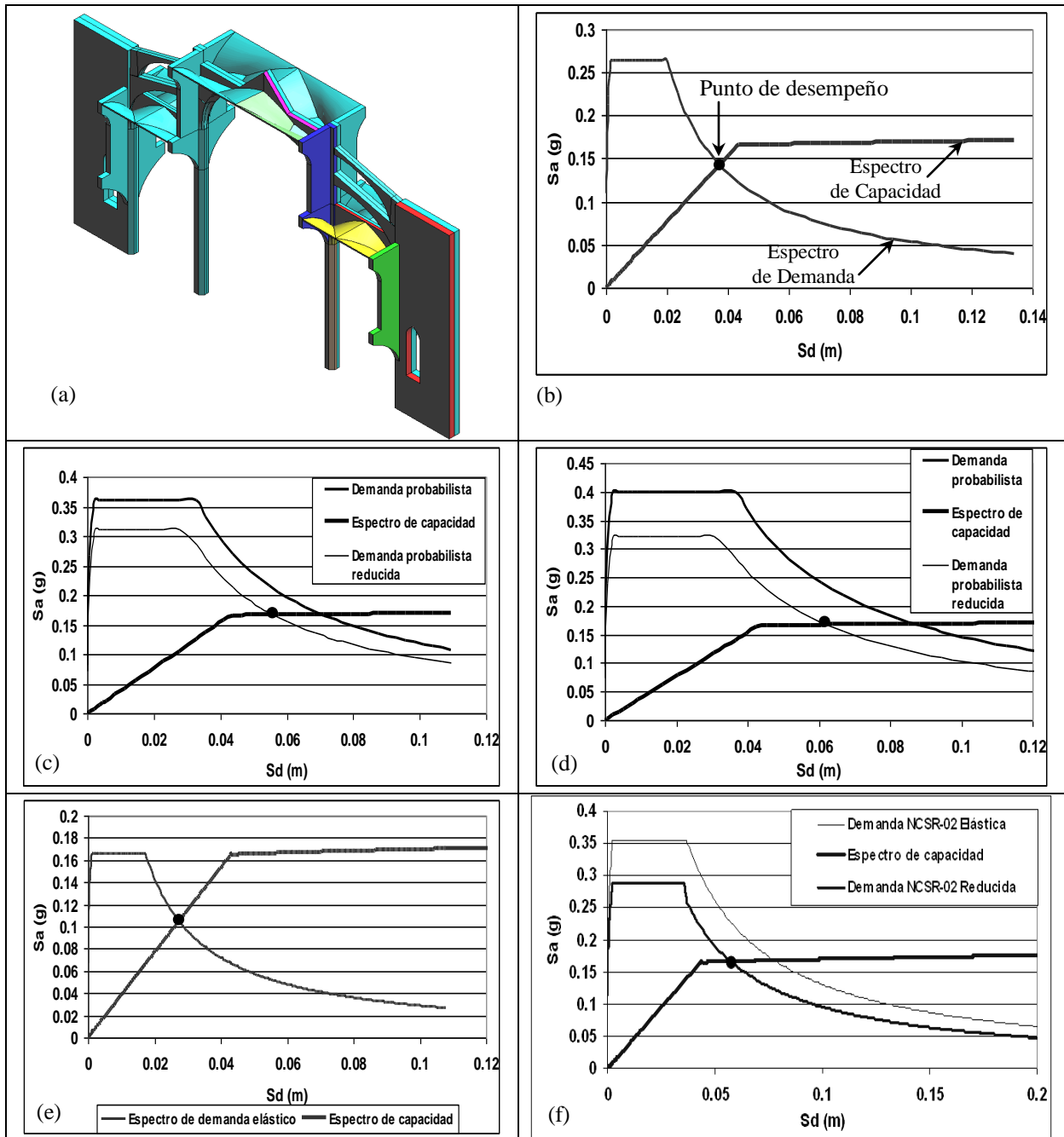


Figura 9. Macroelemento Pórtico Tipo(a). Espectros de demanda, de capacidad y Puntos de desempeño para los escenarios Determinista (b), Probabilista 475 años (c), Probabilista 975 años (d), NCSR-02 475 años (e) y NCSR-02 975 años (f)

Se han propuesto diferentes valores para los límites de los umbrales de daño (Bonett, 2003, Milutinovic y Trendafiloski, 2003), pero para el caso específico de edificios históricos, Lagomarsino *et al.*, 2003 sugiere otra definición de dichos valores basada en la escala macrosísmica europea (ver tabla 4), donde Sdy y Sdu son los desplazamientos de cedencia y últimos respectivamente. Los correspondientes grados de daño se muestran en la tabla 5.

Tabla 4. Umbrales de daño propuestos por Lagomarsino et al, 2003

Umbral de daño	Desplazamiento espectral
Sd1	0.7 Sdy
Sd2	Sdy
Sd3	0.125Sdu
Sd4	0.25Sdu
Sd5	0.5Sdu

Tabla 5. Grados de daño según la escala EMS-98 para edificios de mampostería antigua

Descripción del daño	EMS-98	
	Grado de daño (Dk)	
Sin daños	0	Ninguno
Ligero a despreciable	1	Ligero o menor
Estructural ligero, No estructural moderado	2	Moderado
Estructural moderado, No estructural pesado	3	Sustancial o pesado
Estructural pesado, No estructural muy pesado	4	Muy pesado
Estructural muy pesado, cerca de colapso o colapsado	5	Colapso

Comparando los valores de los desplazamientos de desempeño (ver tabla 3) con los diferentes umbrales de daño (ver tabla 6) obtenidos para cada macroelemento, y haciendo además uso de los valores indicados en la tabla 5, es posible determinar el grado de daño esperado para cada uno de los macroelementos que conforman la catedral. Los valores resultantes mediante este procedimiento se resumen en la tabla 7.

Tabla 6. Umbrales de daño para los diferentes macroelementos considerados (según Lagomarsino et al., 2003)

Macroelemento	Umbrales de Daño (m)				
	Sd1	Sd2	Sd3	Sd4	Sd5
Pórticos Tipo	0.0303	0.0433	0.0822	0.1644	0.3288
Pórticos Transepto	0.0141	0.0202	0.0652	0.1305	0.2609
Arco triunfal	0.0266	0.038	0.0502	0.1005	0.2009
Fachada	0.0093	0.0132	0.0255	0.051	0.1019
Pórticos Longitudinales	0.0295	0.0421	0.0456	0.0912	0.1823

Tabla 7. Grados de daño esperados para los macroelementos de la catedral de Mallorca

MACROELEMENTO	Escenario Determinista	Escenario Probabilista		Escenario NCSR-02	
	-	Tr = 475 años	Tr = 975 años	Tr = 475 años	Tr = 975 años
	Dk	Dk	Dk	Dk	Dk
Pórticos Tipo	D1	D2	D2	D0	D2
Pórticos Transepto	D2	D2	D2	D2	D2
Arco Triunfal	D1	D2	D2	D0	D2
Fachada	D0	D0	D0	D0	D0
Pórticos Longitudinales	D2	D3	D3	D1	D3

CURVAS DE FRAGILIDAD PARA LA CATEDRAL DE MALLORCA

Las curvas de fragilidad son gráficas que indican la probabilidad de que el nivel de daño esperado en la estructura, iguale o exceda un grado de daño preestablecido en función de la intensidad sísmica.

Para cada uno de los macroelementos de la catedral de Mallorca, dicha probabilidad se obtuvo mediante la ecuación 1, considerando valores medios para el desplazamiento espectral (\bar{S}_d, ds), una función de distribución acumulativa normal estándar (Φ) y una desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral (β_{ds}), correspondientes a estructuras de mampostería sin reforzar con características similares (Barbat *et al.*, 2006).

$$P[ds | Sd] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{Sd}{\bar{S}_d, ds} \right) \right] \quad (1)$$

La aproximación anterior surge por el hecho que actualmente no se cuenta con valores específicos para estos parámetros (obtenidos teóricamente a partir de los daños presentados en iglesias con las características generales de la catedral de Mallorca) en edificios históricos (Barbat *et al.*, 2006). Por tanto, las curvas de fragilidad presentadas, son una primera aproximación que deberá irse mejorando en función de los datos de campo y experimentales disponibles en el futuro.

En las figuras 10 a 14, se presentan las curvas de fragilidad obtenidas para cada uno de los macroelementos que integran la catedral de Mallorca.

MATRICES DE PROBABILIDAD ACUMULADA DE DAÑO

Una vez conocidos los pseudodesplazamientos espectrales para cada uno de los puntos de desempeño de los macroelementos contemplados y los diferentes escenarios de daño establecidos, es posible ingresar con tales valores a las curvas de fragilidad y conocer las probabilidades acumuladas de que se exceda cada uno de los grados de daño (ligero, moderado, extensivo y colapso) considerados. Finalmente el procedimiento anterior se resume en las tablas 8 a 12.

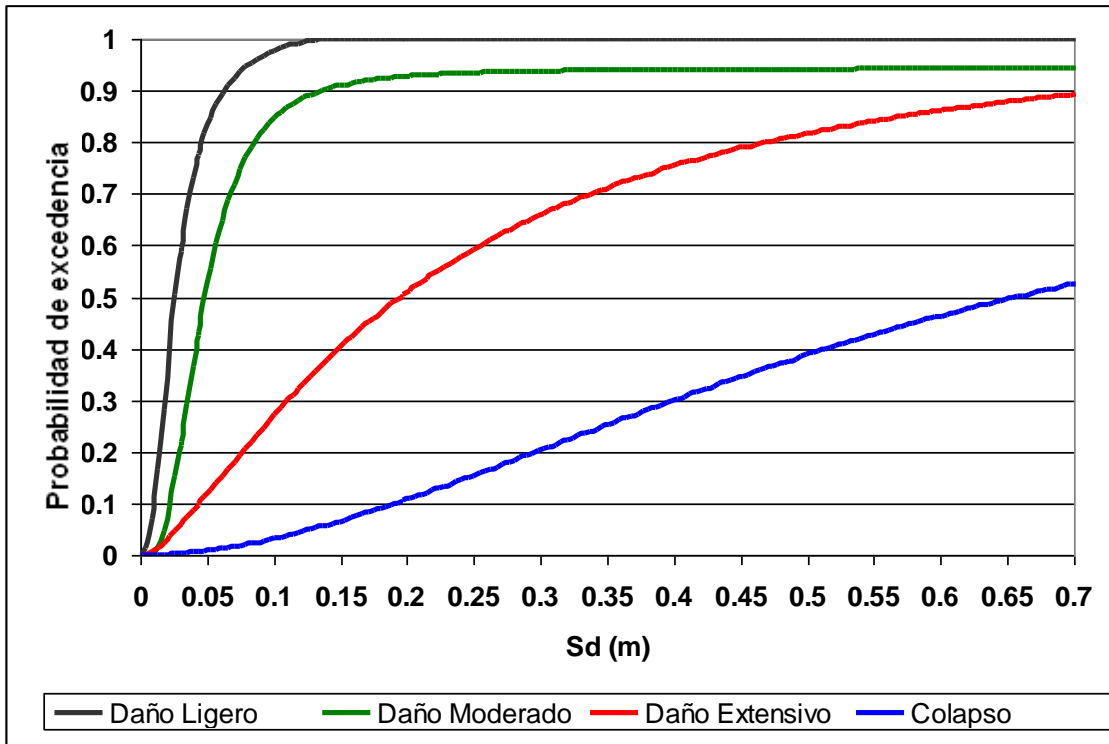


Figura 10. Curvas de fragilidad para los Pórticos Tipo

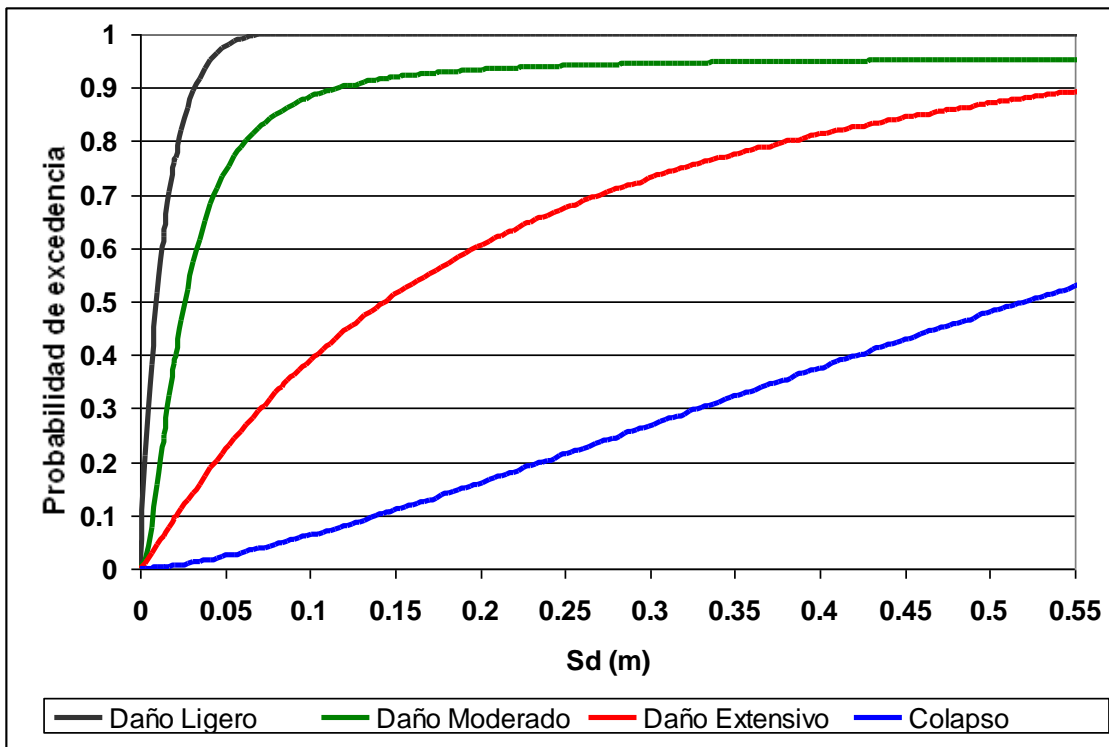


Figura 11. Curvas de fragilidad para los Pórticos Transepto

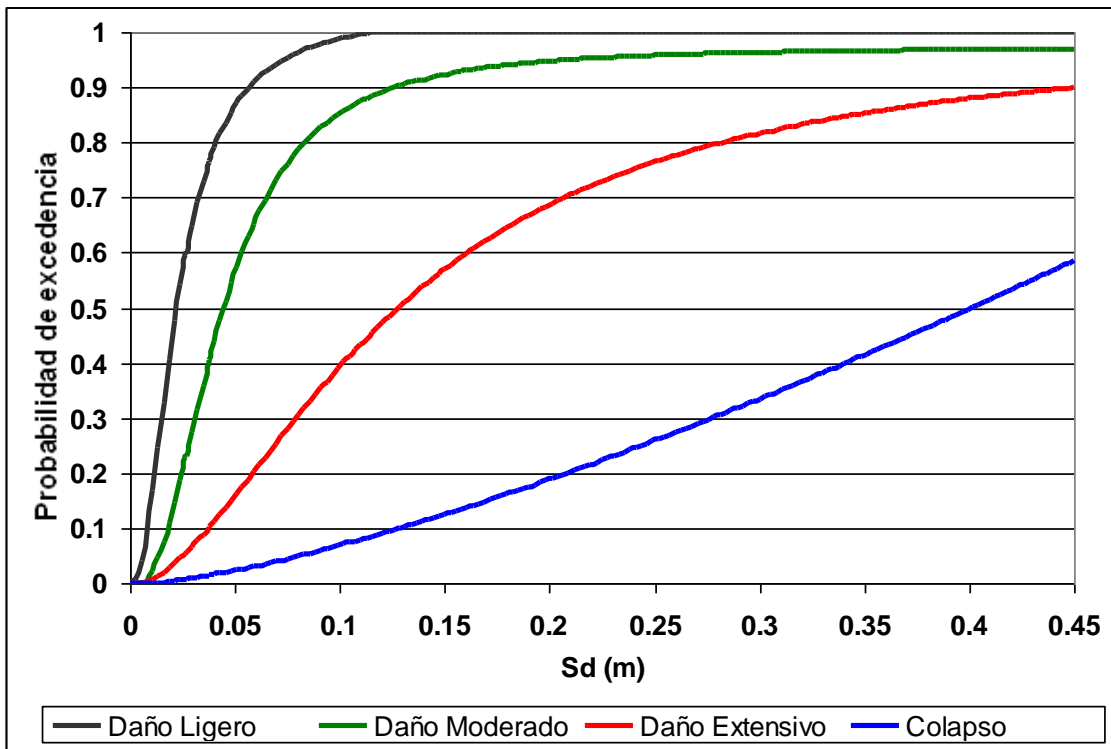


Figura 12. Curvas de fragilidad para el arco triunfal

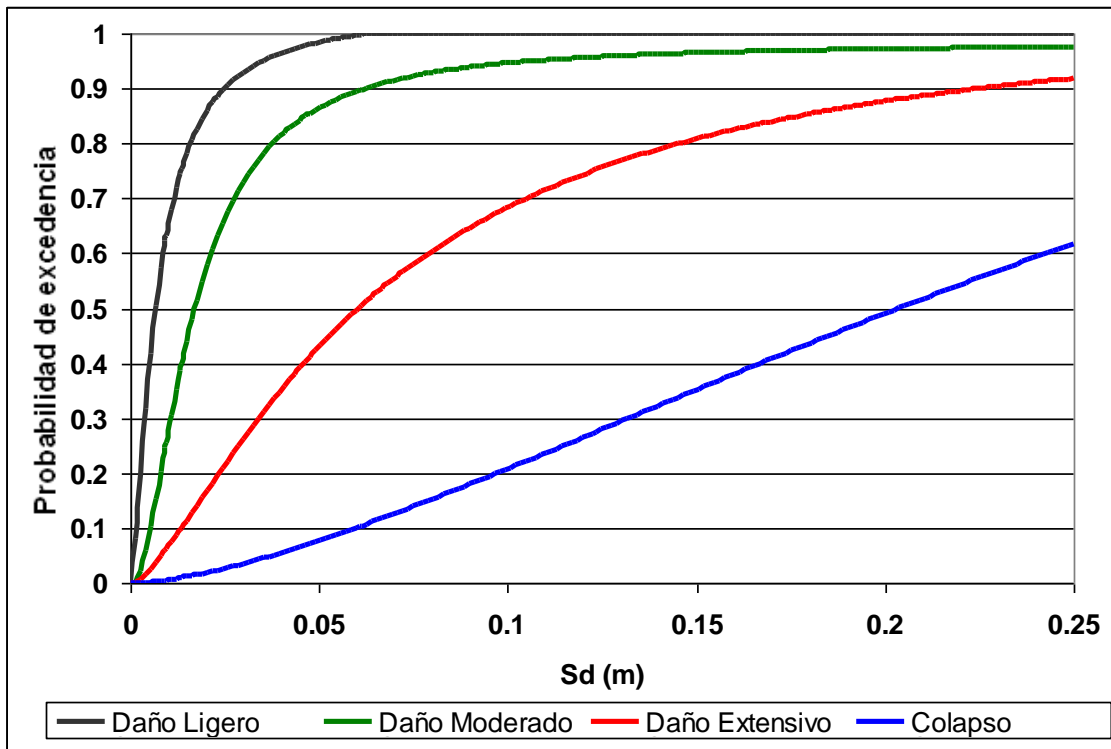


Figura 13. Curvas de fragilidad para la fachada principal

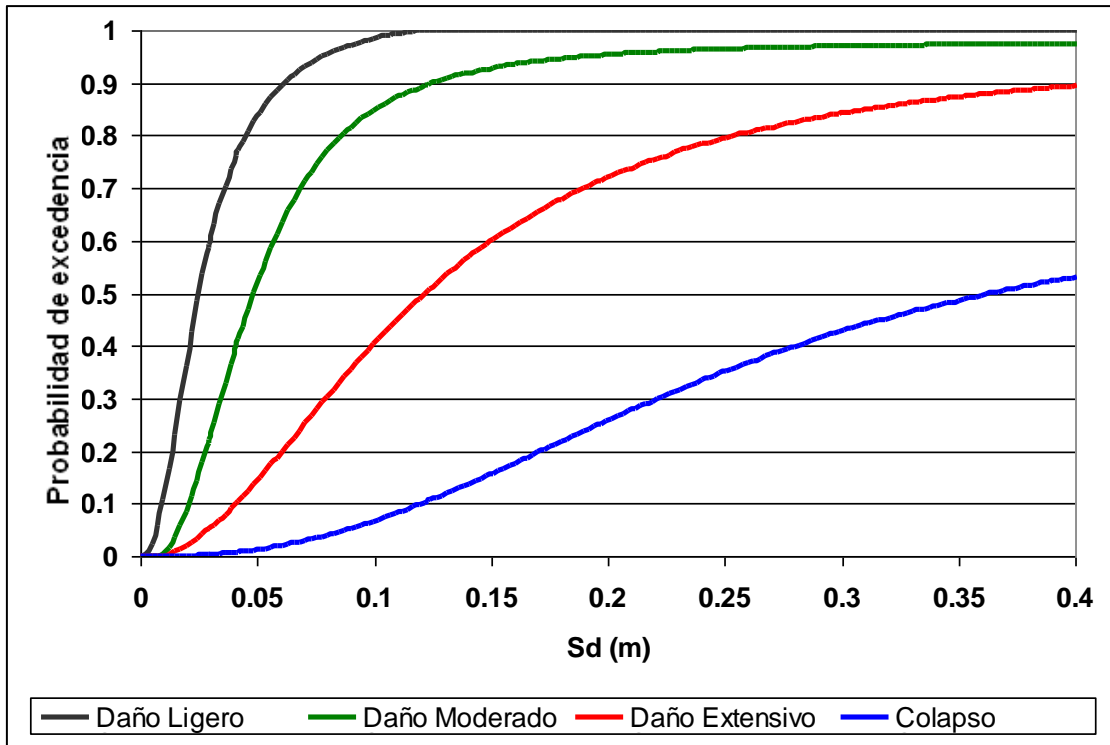


Figura 14. Curvas de fragilidad para los macroelementos longitudinales

Tabla 8. Matrices de probabilidad de daño del punto de desempeño obtenido para los pórticos tipo ante los diferentes escenarios sísmicos propuestos

PÓRTICOS TIPO					
GRADO DE DAÑO	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA ACUMULADA				
	Escenario Determinista	Escenario Probabilista		Escenario NCSR-02	
		-	Tr = 475 años	Tr = 975 años	Tr = 475 años
Daño Ligero	0.696	0.862	0.892	0.533	0.887
Daño Moderado	0.324	0.582	0.645	0.173	0.635
Daño Extensivo	0.078	0.133	0.152	0.051	0.148
Colapso	0.004	0.010	0.012	0.0024	0.0119

Tabla 9. Matrices de probabilidad de daño del punto de desempeño obtenido para los pórticos transepto

PÓRTICOS TRANSEPTO					
GRADO DE DAÑO	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA ACUMULADA				
	Escenario Determinista	Escenario Probabilista		Escenario NCSR-02	
	-	Tr = 475 años	Tr = 975 años	Tr = 475 años	Tr = 975 años
Daño Ligero	0.852	0.949	0.966	0.759	0.957
Daño Moderado	0.509	0.676	0.716	0.386	0.693
Daño Extensivo	0.123	0.185	0.205	0.091	0.193
Colapso	0.009	0.017	0.020	0.0058	0.018

Tabla 10. Matrices de probabilidad de daño del punto de desempeño obtenido para el macroelemento arco triunfal

ARCO TRIUNFAL					
GRADO DE DAÑO	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA ACUMULADA				
	Escenario Determinista	Escenario Probabilista		Escenario NCSR-02	
	-	Tr = 475 años	Tr = 975 años	Tr = 475 años	Tr = 975 años
Daño Ligero	0.640	0.824	0.859	0.465	0.832
Daño Moderado	0.265	0.491	0.553	0.140	0.504
Daño Extensivo	0.064	0.129	0.153	0.035	0.134
Colapso	0.0082	0.0185	0.022	0.0035	0.0192

Tabla 11. Matrices de probabilidad de daño del punto de desempeño obtenido para el macroelemento fachada

FACHADA					
GRADO DE DAÑO	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA ACUMULADA				
	Escenario Determinista	Escenario Probabilista		Escenario NCSR-02	
	-	Tr = 475 años	Tr = 975 años	Tr = 475 años	Tr = 975 años
Daño Ligero	0.454	0.567	0.611	0.317	0.567
Daño Moderado	0.124	0.198	0.235	0.060	0.198
Daño Extensivo	0.0303	0.0472	0.056	0.016	0.0472
Colapso	0.0017	0.0029	0.0039	0	0.0029

Tabla 12. Matrices de probabilidad de daño del punto de desempeño obtenido para los macroelementos longitudinales

MACROELEMENTOS LONGITUDINALES					
GRADO DE DAÑO	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA ACUMULADA				
	Escenario Determinista	Escenario Probabilista		Escenario NCSR-02	
	-	Tr = 475 años	Tr = 975 años	Tr = 475 años	Tr = 975 años
Daño Ligero	0.815	0.924	0.946	0.670	0.938
Daño Moderado	0.481	0.697	0.749	0.291	0.730
Daño Extensivo	0.129	0.239	0.282	0.070	0.266
Colapso	0.0104	0.027	0.035	0.0042	0.032

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir de la aplicación del Método del Espectro de Capacidad, proporcionan una visión clara del comportamiento esperado de la estructura. Referente a las demandas sísmicas a considerar se desarrollaron los escenarios de peligrosidad sísmica más probables (determinista y probabilista). Además, se ha hecho una comparación con las demandas propuestas por la NCSR-02 que, aunque están calibradas para estructuras de edificación, se utilizaron en la presente investigación como referencia, pudiendo destacarse, que al haber sido estas planteadas a partir de un estudio de peligrosidad sísmica en términos de intensidades sísmicas ($I = 6$ para $Tr = 475$ años e $I = 7$ para 975 años), la conversión a aceleraciones deriva en un incremento de poco más del doble en los platos de los espectros elásticos de demanda. Esta situación no se presenta en los resultados obtenidos a partir del estudio probabilista de peligrosidad sísmica (donde la diferencia es del 11%), poniéndose en evidencia que la normativa sismorresistente española presenta valores bajos de la acción sísmica de diseño para períodos de retorno de 475 años.

Por otro lado, como era de esperarse, la mayor capacidad lateral sísmica la presenta la fachada y la menor de todo el edificio corresponde al macroelemento longitudinal el cual, debido a su asimetría en alturas y rigideces, tiene comportamiento diferente en las dos direcciones este-oeste y oeste-este, siendo menor esta última. Como referencia, el este se encuentra hacia la zona absidal y el oeste hacia la fachada principal.

Se ha encontrado que los diferentes macroelementos que conforman a la catedral de Mallorca tienen una capacidad lateral con pseudoaceleraciones mayores al 0.10g en el punto de cedencia, lo cual revela un sistema sismorresistente razonablemente efectivo gracias a los muros enjutados existentes sobre los arcos principales conectando columnas y contrafuertes.

De los daños mencionados en el inciso anterior, en la dirección transversal del edificio (norte-sur) los menores desempeños (y en consecuencia mayores grados de daño) sísmicos corresponden a los pórticos ubicados sobre la zona del transepto, debido a que soportan bóvedas de mayor claro que los pórticos tipo (los cuales tienen un desempeño ligeramente mejor), lo que se traduce en mayor masa y asimetría de cargas en el plano. El mayor grado de daño esperado en esta dirección de análisis es de *estructural ligero* según la clasificación de Lagomarsino *et al.*, (2003), el cual se corrobora a partir de las curvas de fragilidad calculadas, y presenta una probabilidad acumulada del 95 a 97% para los escenarios probabilistas de demanda sísmica. Puede decirse que aunque en este punto de la investigación no se tenga implícito el costo probable de reparación o reforzamiento, con las probabilidades de daño acumuladas obtenidas con la curvas de fragilidad se tiene una primera aproximación al riesgo sísmico de la catedral de Mallorca

Por otro lado, y como se ha mencionado con anterioridad, en la dirección perpendicular de análisis el mayor grado de daño se espera en el macroelemento longitudinal, formado por el ábside, naves principal y laterales y la fachada, para el cual se espera un grado de daño *estructural moderado* de acuerdo con Lagomarsino *et al.*, (2003), asociado a una probabilidad acumulada (según sus correspondientes curvas de fragilidad) del 92 al 95% para las demandas sísmicas correspondientes al escenario probabilista.

En resumen se puede afirmar que la catedral de Mallorca es un edificio con características sismorresistentes suficientes para tolerar razonablemente los niveles de demanda sísmica probables en la isla de Palma de Mallorca, tal y como se ha podido comprobar a través de los grados de daño obtenidos y de las probabilidades asociadas a los mismos), lo cual permite establecer criterios generales de cara a tomar la mejor decisión relativa a su protección y conservación hacia el futuro.

REFERENCIAS

Barbat, A.H., Pujades, L., Lantada, N. (2006), "**Performance of buildings under earthquakes in Barcelona, Spain**", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 21, pp. 573–593.

Bonett, R., (2003), "**Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada**", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.

Doglioni F., Moretti A. and Petrini V. (1994), "**Churches and earthquakes**", *LINT*. Trieste (en italiano).

EC-8 (1998), Eurocódigo 8, "**Diseño de estructuras resistentes a sismo**", Comité Europeo de Normalización, AENOR, Madrid.

Fajfar P., Gaspersic P. (1996), "**The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings**", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25, pp. 23-67.

Freeman S.A. (1998), "**Development and use of capacity spectrum method**", In Proceedn Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Inst., Oakland California.

Lagomarsino S., Giovinazzi S., Podestà S., Resemini S. (2003), "**Wp5 – Vulnerability of historical and monumental buildings Handbook. Risk- UE: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns**", Contract No. EVK4-CT-2000-00014. 90 pp.

Martínez G., Roca P., Caselles O., Clapés J. (2006), "**Characterization of the Dynamic Response for the Structure of Mallorca Cathedral**" Structural Analysis of Historical Construction: Possibilities of Numerical and Experimental Techniques, MacMillan INDIA LTD, pp. 601-608.

Milutinovich Z., Trendafiloski G. (2003), "**WP4 Vulnerability of current buildings. Risk- UE: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns**", Contract No. EVK4-CT-2000-00014. 108 pp.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido realizada dentro del proyecto "Improving the Seismic Resistance of Cultural Heritage Buildings" funded the European Commission through the Heritage Buildings EU-INDIA Economic Cross Cultural Programme (contract ALA/95/23/2003/077-122), y con el apoyo adicional del Programa para el Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) de México.