Structural, seismic and geotechnical analysis of the Sant' Agostino church in L'Aquila (Italy)

Análisis estructural, sísmico y geotécnico de la iglesia de Sant' Agostino en L'Aquila (Italia)

Claudia Cennamo^{1*}, Marco Di Fiore^{2**}

* Seconda Università di Napoli, Aversa. ITALY

** Politecnico di Torino, Torino. ITALY

Fecha de Recepción: 08/02/2013

Fecha de Aceptación: 04/04/2013

PAG 7 -20

Abstract

Existing masonry buildings are often the result of constructions, changes and alterations that have developed over the centuries. Therefore, the adaptation and improvement of existing masonry buildings must be accompanied by an adequate level of knowledge of their history. The tragic consequences of the recent earthquakes, in Italy and abroad, have stimulated the belief that, sometimes, the cause of seismic damage might be just the wrong intervention of improvement or adaptation. In most cases, this is attributable to retrofit works which are carried out without any knowledge concerning the construction rules of the building. The case study presented here regards the seismic analysis of the Sant' Agostino Church in L'Aquila (seriously damaged by the earthquake occurred in April 2009), which takes into account the in-depth knowledge of the factory, respecting all three evaluation levels of seismic safety provided by the Italian seismic Guidelines for Cultural Heritage (Eurocode 8, 2003; NTC, 2008). In particular for LV1 (Evaluation Level 1), all the analyses requested to fill the annexes of the Directive of December 10th, 2007 were carried out, starting from Module A, which is the "identifier registry", passing through Module B, which concerns the study of "sensitivity factors", and ending with Module C, which considers the "morphology of the elements". From this examination, we concluded that the ground acceleration during the earthquake of April 6th, 2009 surpassed the acceleration value corresponding to the limit state of collapse. For LV2 (Evaluation Level 2), we especially focused on the verification of all macro-elements as a potential source of damage mechanisms. In particular, we found that these mechanisms concerned mostly the facade, the hall, the dome, the apse/presbytery, the roofing, the side chapels, the joints between horizontal and vertical alignment, and finally, the bell tower. Once we collected all data regarding the site, the geometry of construction, the characteristics of the materials, the structure, the soil, etc., we carried out a dynamic FEM modal analysis on the structure, valid for LV3 (Evaluation Level 3). Moreover, these dynamic tests are essential for the evaluation of seismic safety and they also present the clear advantage of being non-destructive. Finally, the analysis provided the most significant vibration modes and suggested the optimal structural interventions to remedy the existing damage and prevent the formation of these mechanisms under the action of future earthquakes.

Keywords: Seismic vulnerability, damage, seismic risk, modality of intervention, seismic analysis

Resumen

A menudo, las construcciones existentes en albañilería son el resultado de construcciones, cambios y modificaciones que se han ido desarrollando durante siglos. Por lo tanto, las adaptaciones y mejoras de las edificaciones en albañilería deben ir acompañadas de un nivel adecuado de conocimiento de su historia. Las trágicas consecuencias de los recientes terremotos ocurridos en Italia y otros países, han llevado a pensar que, a veces, la causa del daño sísmico podría ser justamente una errada intervención de la mejora o adaptación que se les ha realizado. En la mayoría de los casos, este hecho es atribuible a las modificaciones realizadas sin tener los conocimientos necesarios sobre las normas constructivas de esa edificación. El estudio de caso presentado en este trabajo se refiere al análisis sísmico de la iglesia de Sant' Agostino en L'Aquila (gravemente dañada por el sismo ocurrido en abril de 2009), y considera en profundidad los tres niveles de evaluación de la seguridad sísmica establecidos en el Código Italiano para la evaluación y reducción del riesgo sísmico del patrimonio cultural Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, (2003), Decreto Legislativo (2004), Norme tecniche per le costruzioni, DM. (2005), Norme tecniche per le costruzioni, DM. (2008), Circolare n. (2010), Direttiva del Presidente del Consiglio dei ministri per la valutazione e la riduzione del rischio sísmico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni. G.U. (2008). Así, para el LV1 (Nivel de evaluación 1) se realizaron todos los análisis exigidos en los anexos de la Directiva del 10 de diciembre de 2007, comenzando por el Módulo A que corresponde al "registro de identificación", continuando con el Módulo B que se refiere al estudio de los "factores de sensibilidad" y finalizando con el Módulo C que considera la "morfología de los elementos". A partir de esta evaluación, hemos concluido que la aceleración máxima del terreno durante el sismo del 6 de abril de 2009 superó el valor de aceleración correspondiente a los estados límite de colapso. Para el LV2 (Nivel de evaluación 2), nos enfocamos principalmente en la verificación de todos los macroelementos como una fuente potencial del mecanismo de daños. Descubrimos que los mecanismos ocurridos estaban mayormente relacionados con la fachada, la nave, la cúpula, el ábside/presbiterio, la techumbre, capillas laterales, las juntas entre la alineación horizontal y vertical, y por último, el campanario. Una vez recopilados todos los datos relacionados con el sitio, la geometría de la construcción, las características de los materiales, la estructura, el suelo, etc., realizamos un análisis modal a la estructura utilizando el Método de Elemento Finito dinámico (FEM, en inglés), válido para el LV3 (Nivel de evaluación 3). Además, estos ensayos dinámicos son esenciales para la evaluación de la seguridad sísmica y poseen la ventaja de no ser destructivos. Finalmente, el análisis entregó los modos de vibración más importantes y sugirió las intervenciones estructurales óptimas para reparar el daño existente y evitar la formación de los mismos mecanismos bajo la acción de un futuro sismo.

Palabras Clave: Vulnerabilidad sísmica, daño, riesgo sísmico, la modalidad de la intervención, el análisis sísmico

1. Aspecto histórico

El caso propuesto constituye la síntesis de análisis estructural y sísmico de la iglesia de Sant' Agostino en L'Aquila, gravemente dañada por una serie de sismos ocurridos en abril de 2009, realizada mediante una profunda comprensión tanto histórica como científica de la edificación.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: claudia.cennamo@unina2.it

La construcción de la iglesia data de comienzos del 1700. En la actualidad, la iglesia persiste, al menos parcialmente, en el emplazamiento de otra iglesia fundada en 1282 y dedicada a San Agustín (Cacciamali et al., 2010). La iglesia original fue seriamente dañada por diversos sismos, quedando destruida por un sismo ocurrido el año 1703. El proyecto de la actual iglesia pertenece al arquitecto Giovan Battista Contini y data de fines de 1708 y terminándose, probablemente, hacia 1725 (Cacciamali et al., 2010; Gavini I. C., 1926).

En su fase medieval, la iglesia tenía una planta en forma de cruz latina, con tres naves y crucero, ábside al fondo y la fachada principal orientada hacia el oeste, hacia las calles adyacentes en lugar de mirar hacia la plaza. Fue la iglesia de los tres órdenes mendicantes que residían en L'Aquila: los Agustinos, después de los Franciscanos y Dominicanos (Figura 1).

Figure 1. The medieval church

Figura 1. La iglesia medieval

En la iconografía de la ciudad de 1622 y 1680, la presencia de la fachada retranqueada de coronamiento recto, que caracterizaba a la iglesia original, apoya la teoría de la persistencia de su implante medieval (modificado posiblemente en 1656 con la introducción de la apertura principal hacia la plaza) hasta su colapso debido al sismo de 1703, cuando Contini trazó una nueva arquitectura, cubierta por una cúpula y abierta hacia la plaza pública (Cacciamali et al., 2010; Antonini, 2004; Antonini 1999; Chiodi, 1988).

Figure 2. Iconography of the Church after opening the main door towards the square
Figura 2. Iconografía de la iglesia después de abrir la puerta principal hacia la plaza

2. Descripción de la iglesia

La iglesia posee un plano longitudinal, la entrada se abre hacia un pequeño atrio cubierto por un techo inclinado, seguido por una nave de forma elíptica, coronada por una cúpula y por un largo ábside, cubierto por una bóveda cilíndrica. A ambos lados de la nave, tiene tres pares de capillas: las capillas mayores están ubicadas en el eje ortogonal principal, mientras que las capillas menores se ubican en los ejes diagonales. En el exterior un sistema de machones. El domo que se levanta sobre la nave tiene un largo máximo de veinte metros, se encuentra reforzado con cuaternas y coronado por una linterna.

Figure 3. Plan of the Sant'Agostino Church
Figura 3. Planta de la iglesia de Sant' Agostino

La fachada está dividida en dos partes, estructurada en una parte inferior y una superior. La parte inferior corresponde al cabezal del atrio; la parte superior está retranqueada unos siete metros aproximadamente y forma una de las caras del prisma octagonal de la linterna. La articulación escultórica de la fachada es simple y esencial, realizada por un medallón circular en alto relieve que representa a San Agustín. Un tímpano trapezoidal rematado en una balaustrada, enmascara el techo a dos aguas que corona la entrada y unifica las dos secciones de la fachada (Cacciamali et al., 2010; Ceravolo R., 2010; Calderini y Lagomarsino S., 2009).

Figure 4. *Sant'Agostino Church before and after the earthquake of April 2009*

Figura 4. Iglesia de Sant' Agostino antes y después del sismo ocurrido en abril de 2009

La iglesia está construida en albañilería. En el análisis visual, se observa que todas las superficies abovedadas, los arcos y las vigas (visibles por la caída del yeso) son de albañilería de ladrillo de excelente calidad. En cambio, todas las estructuras verticales son de albañilería mixta piedra/ladrillo de mediana calidad, con esquinales bien conectados en piedras cuadradas. Los machones son de piedra cuadrada de excelente calidad (Fiengo y Guerriero 2008). En algunos casos, sobre los dinteles de las aberturas externas, se reconocen elementos de refuerzos en madera. En el interior del edificio, no se aprecian cadenas metálicas a la vista. Sin embargo, algunos cabezales de cadenas metálicas, que señalan su presencia, son visibles en los muros exteriores. El diagrama de la Figura 5 muestra una distribución hipotética de las cadenas dentro de la estructura (Ceravolo, 2010; Calderini y Lagomarsino, 2009). Cabe señalar que los cabezales de las cadenas son sólo visibles en el muro externo libre que da hacia la Via Sant' Agostino y no en el que enfrenta la Prefectura.

Figure 5. Hypothetical distribution of the chains in the structure (Calderini and Lagomarsino, 2009)

Figura 5. Distribución hipotética de las cadenas en la estructura. (Calderini y Lagomarsino, 2009)

3. Análisis de vulnerabilidad y de daños

El daño sufrido por la iglesia de Sant' Agostino durante el sismo del 6 de abril de 2009, la dejó inaccesible y requería de una ayuda inicial provisoria, mediante la inserción de puntales y tensores en la fachada principal.

Para las intervenciones relacionadas con la reconstrucción post sismo y la reducción de la vulnerabilidad sísmica de los activos del patrimonio cultural, una referencia adecuada es la Directiva del Presidente del Consejo de Ministros para la evaluación y reducción del riesgo sísmico en el Patrimonio Cultural, en línea con la normativa técnica para las construcciones del 12 de octubre de 2007.

El comportamiento sísmico de la iglesia puede ser interpretado dividiéndolo en macroelementos, caracterizados por una respuesta estructural sustancialmente independiente a la de la iglesia completa (fachada, nave, ábside, muros laterales, arco principal, etc.), y los diferentes tipos de daños podrían ser sintetizados en un número básico de mecanismos de falla. De esta forma, los diversos modos en que los macroelementos se rompen, distintos a las dosificaciones y materiales, son reconocidos y asociados con los mecanismos específicos de colapso, que representan la esencia real de la vulnerabilidad (Calderini y Lagomarsino, 2009); Ceravolo y Demarie, 2009; Boscotrecase y Piccarreta, (2009); Gavarini, 1978; Gavarini 1994; Gavarini 1991).

Para el estudio de los daños y de la vulnerabilidad de la iglesia, se examinó la Tarjeta de Nivel II¹ del levantamiento de los daños y la vulnerabilidad sísmica de las iglesias, relacionado con 28 mecanismos, según las instrucciones contenidas en la Directiva.

El procesamiento de los datos recogidos nos permite obtener dos índices separados sobre una base estadística, a través de un simple promedio normalizado de los puntajes en los niveles de daño y en los indicadores de vulnerabilidad para cada mecanismo de colapso:

Índice de daño: es un parámetro numérico con rango del 0 al 1, evaluado por un promedio normalizado del daño detectado y que se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$i_d = \frac{1}{5} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k d_k}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} \quad (1)$$

Para el mecanismo k-th: d_k es el nivel de daño (0 a 5), ρ_k es el peso atribuido al mecanismo (0 para mecanismos que no podrían ser activados en la iglesia debido a la falta de macroelementos, y entre 0,5 y 1 en otros casos).

- Índice de vulnerabilidad: varía entre 0 y 1. Se define como el promedio ponderado del comportamiento de las diferentes partes de la iglesia y está dado por la siguiente ecuación

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2} \quad (2)$$

Para el mecanismo k-th: v_{ki} y v_{kp} son, respectivamente, el puntaje obtenido por el levantamiento de los indicadores de vulnerabilidad y por los principios sísmicos (Tabla 3).

Table 1. Assessment of the vulnerability score for each damage mechanism
Tabla 1. Evaluación del puntaje de vulnerabilidad para cada mecanismo de daño

Number of vulnerability indicators or seismic principles Número de indicadores de vulnerabilidad o principios sísmicos	Opinion on the effectiveness Opinión sobre la efectividad	v_k
at least 1/al menos 1	3	3
at least 2/al menos 2	2	3
1	2	2
at least 2/al menos 2	1	2
1	1	1
None	0	0

¹ En Italia, desde hace unos diez años, existen tres niveles para catalogar las Iglesias y palacios después de un evento sísmico (sin considerar el nivel cero, que corresponde a las operaciones inmediatas de protección civil).

Nivel 1: Inspección total post-terremoto
- Evaluación de la intensidad macro-sísmica – evaluación del daño económico – criterio de practicabilidad.

Nivel 2: Análisis expedito de vulnerabilidad / territorial
- Definición de índices de vulnerabilidad – pronósticos de comportamiento

Nivel 3: Análisis profundo de vulnerabilidad
- Rescate del sistema de albañilería para permitir la aplicación de un análisis de respuesta simplificado, basado en la identificación de mecanismos de falla en el plano y fuera del plano – elección de intervenciones

Las fichas fueron elaboradas por el Grupo Nacional de Defensa contra Terremotos CNR-GNDT, el Servicio Sísmico Nacional SSN y el Departamento de Protección Civil D.P.C., desarrolladas por la Universidad de Génova (profesor S. Lagomarsino), y aprobadas por el Ministerio de Patrimonio Cultural sobre actividad técnica post-terremoto

A partir de 1995, en las emergencias sísmicas se ha usado la tabulación de levantamiento de daño y vulnerabilidad de las iglesias, y la enorme cantidad de datos recopilados ha permitido, a través de un análisis estadístico, establecer una relación entre la acción sísmica y el daño, en función de un parámetro de vulnerabilidad de una iglesia y, por lo tanto, una correlación directa entre los datos sísmicos y la vulnerabilidad detectada (Cacciamali et al., 2010; Calderini and Lagomarsino, 2009). En la práctica, los valores de aceleración del suelo, correspondientes a los estados límite de daño (DLS, en inglés) y estados límite de colapso (Estados Límite Últimos o ULS, en inglés), se calculan según las funciones de las correlaciones propuestas:

$$a_{DLS} = 0.025 \times 1.8^{275-344i_v} \quad (3)$$

$$a_{ULS} = 0.025 \times 1.8^{51-344i_v} \quad (4)$$

La seguridad sísmica en los ULS se mide a través de un índice i_s , definido como el cociente entre la aceleración en los ULS y la aceleración correspondiente a una probabilidad de excedencia en 50 años, diferente del aceptado para edificaciones nuevas, y que depende de dos factores: la importancia de la construcción y la categoría de uso. Esta aceleración se obtiene multiplicando la aceleración sísmica de referencia en un suelo rígido a_g (con un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años) por un factor de importancia γ_I , cuyos valores promedio están dados por la Directiva, en base a los parámetros anteriores (Calderini and Lagomarsino, 2009; Ceravolo and Demarie, 2009).

- Por lo tanto, el índice de seguridad sísmica es:

$$i_s = \frac{a_{ULS}}{\gamma_I S a_g} \quad (5)$$

donde el coeficiente S depende del perfil estratigráfico de la fundación subterránea y de cualquier efecto morfológico, y el factor de importancia γ_I está definido por la Directiva como se aprecia en la Tabla 2.

Table 2. Exceedance probability in 50 years of seismic action (P), and importance factors γ_I for the ULS verification of protected Heritage

Tabla 2. Probabilidad de excedencia en 50 años de acción sísmica (P), y factores de importancia γ_I para la verificación del ULS del patrimonio cultural protegido

Use category/Categoría de uso	Relevance category/Categoría de importancia					
	Limited/Limitada		Medium/Media		High/Alta	
	Exceedance P/P Excedencia	γ_I	Exceedance P/P Excedencia	γ_I	Exceedance P/P Excedencia	γ_I
Occasional or not used/Ocasional o no utiliza	40%	0.50	25%	0.65	17%	0.80
Frequent/Frecuente	25%	0.65	17%	0.80	10%	1.00
Very frequent/Muy frecuente	17%	0.80	10%	1.00	6.5%	1.20

El índice de seguridad calculado de esta forma permite hacer una evaluación global de la vulnerabilidad de la iglesia, y es significativa sólo en la comparación de los elementos afectados por el mismo evento.

En la sección siguiente, se presenta un extracto de la tarjeta de levantamiento de daños y vulnerabilidad de la iglesia de Sant' Agostino, un resumen de los resultados, el cálculo de los tres índices, las descripciones de los mecanismos identificados, terminando con las propuestas de reparación (Cacciamali et al., 2010; Ceravolo, 2010; Calderini and Lagomarsino, 2009).

4. Cálculo de los índices sísmicos

Se calcularon los índices de daño y vulnerabilidad para la iglesia de Sant' Agostino (Cacciamali et al., 2010; Ceravolo, 2010; Calderini and Lagomarsino, 2009). La investigación de los daños y vulnerabilidad estuvo dirigida hacia la identificación de los mecanismos de colapso que pudieran ser potencialmente activados, así como hacia la evaluación del nivel de daño de los mecanismos realmente activados, a fin de calcular un índice que representara una síntesis del nivel de daño en los diferentes macroelementos de la iglesia.

Este último, evaluado en base a la expresión (1), es igual a:

$$i_d = 0.54 \quad (6)$$

Luego, se definió la evaluación de la vulnerabilidad de la iglesia en relación con los 28 mecanismos de daño, apreciando aquellas características tipológicas y constructivas que poseen un rol clave en la respuesta sísmica de la estructura, considerándose especialmente los indicadores de vulnerabilidad y las salvaguardias sísmicas, al definir un índice de vulnerabilidad que represente una síntesis del levantamiento de vulnerabilidad para los diversos macroelementos de la iglesia (Calderini and Lagomarsino, 2009).

El índice de vulnerabilidad, por la ecuación (2), resultó igual a:

$$i_v = 0.29 \quad (7)$$

Para comprender si el nivel de daño ocurrido como consecuencia del evento sísmico era previsible, y en consecuencia evitable en este caso, también se calculó el índice de seguridad usando el modelo LV1 mecánico simplificado propuesto por el Código Italiano para la evaluación y reducción del riesgo sísmico del patrimonio cultural (G.U. 29 de enero de 2008). Este modelo permite estimar de manera simplificada la aceleración del terreno (aULS) para los Estados Límite Últimos, y los Estados Límite de Daño (ADLS, en inglés), así como el índice de seguridad (Is), mediante la ecuación (5).

El modelo propuesto para las iglesias se basa en una elaboración estadística del daño sufrido por construcciones similares durante los grandes terremotos italianos, y emplea los parámetros de calidad de la tarjeta de levantamiento de daños (OJ N°55 del 7 de marzo de 2006) y anexo C (OJ del 20 de enero de 2008). En este caso, la evaluación se realizó considerando los peligros esperados del sitio, propuestos en la circular explicativa NTC2008 (D.M. del 14 de enero de 2008): a_g (ULS) = 0,27g a_g (DLS) = 0,07g. El espectro asociado se comparó con el obtenido de los registros recopilados durante el sismo en cuestión (estación AQK – fuente: base de datos Itaca, INGV). Dada la importancia del activo y su frecuencia de uso, el coeficiente de importancia se asume igual a 1,2. Como no existen investigaciones geognósticas disponibles, se adoptó un suelo tipo-B ($S=1,25$) y un coeficiente de amplificación topográfica igual a 1. La Tabla 2 muestra los valores dentro del rectángulo rojo.

Tabla 3. Valores destacados para la iglesia de Sant’ Agostino
Table 3. Highlighted values for the Sant’Agostino Church

Utilization category/ Categoría de uso	Relevance category/ Categoría de importancia					
	Limited/ Limitada		Medium/ Media		High/ Alta	
	Exceedance P/ P Excedencia	g_i	Exceedance P/ P Excedencia	g_i	Exceedance P/ P Excedencia	g_i
Occasional or not used/ Ocasional o no utilizada	40%	0.50	25%	0.65	17%	0.80
Frequent/ Frecuente	25%	0.65	17%	0.80	10%	1.00
Very frequent/ Muy frecuente	17%	0.80	10%	1.00	6.5%	1.20

Tabla 4. Texto integrado del Anexo 2 - Edificaciones - Ordenanza 3274, enmienda de OPCM 3431 del 3 de mayo de 2005
Table 4. Integrated Text of Annex 2 - Buildings - Ordinance 3274 as amended from OPCM 3431 of May 3rd, 2005

Zone/Zona	Value of a_g /Valor de a_g
1	0.35g
2	0.25g
3	0.15g
4	0.05g

Table 5. Parameter values in the expressions of the elastic response spectrum of horizontal components
Tabla 5. Valores parámetro en las expresiones del espectro de respuesta elástica de los componentes horizontales

Soil category/ Categoría del suelo	S	T_B	T_C	T_D
A	1.0	0.15	0.40	2.0
B, C, E	1.25	0.15	0.50	2.0
D	1.35	0.20	0.80	2.0

De la ecuación 5, para la estructura examinada, se obtiene:

$$i_s = 0.72 \quad (8)$$

y la Aceleración Máxima del Terreno (PGS, en inglés) es

$$PGA = 0.373 \text{ g (AQK station)} \quad (9)$$

La aceleración del terreno durante el sismo del 6 de abril de 2009 excedió la aceleración para los estados límite de colapso definido por el análisis LV1, validando así el modelo para calcular la aceleración (Cacciamali et al., 2010; Ceravolo, 2010; Calderini y Lagomarsino, 2009).

5. Análisis sísmico

Ya contando con datos precisos sobre la geometría y propiedades de los materiales, estructura y suelo, fue posible implementar un modelo numérico de elementos finitos (FEM) para el edificio (Cacciamali et al., 2010).

En este caso, se usó un análisis modal de un sistema dinámico lineal. Se creó, en primer lugar, un modelo tridimensional.

Figure 6. Three-dimensional model and classification of the various construction techniques in the Church

Figura 6. Modelo tridimensional y clasificación de diversas técnicas de construcción de la iglesia

A continuación, se eligieron los parámetros mecánicos y, al no contar con ensayos en el sitio, las recomendaciones se hicieron de acuerdo a lo sugerido por las actuales normativas [DPCM del 10 de diciembre de 2007 (4.1.7); OPCM 3274/2003 (11.d) NTC 2008 (11.10.3.4)].

A continuación, se realizó la discretización del edificio en 255.624 tetraedros (Figura 7), y se aplicó a la estructura el análisis modal de un sistema dinámico usando el FEM (Cacciamali et al., 2010; Ceravolo, 2010).

Los ensayos dinámicos fueron indispensables para la evaluación de la seguridad sísmica, teniendo, además, la ventaja de formar parte del grupo de ensayos no destructivos. Además, el análisis permitió identificar los modos más importantes de vibración entre los 300 que se examinaron (100 a lo largo del eje x, 100 a lo largo del eje y, 100 a lo largo del eje z), orientados hacia la realización de intervenciones estructurales diseñada para reparar el daño actual y prevenir la formación de mecanismos bajo la acción de un evento sísmico.

Figure 7. Solid element. Discretization into 255624 tetrahedrons

Figura 7. Elemento sólido. Discretización en 255.624 tetraedros

5.1 Análisis modal en 100 modos de vibración (eje X)

Figure 8. Modal analysis on 100 vibration modes along axis x. a) Mode 1, freq. 2.13 Hz, participating mass 56%; b) Mode 9, freq. 4.81 Hz, participating mass 7%

Figura 8. Análisis modal en 100 modos de vibración a lo largo del eje x. a) Modo 1, frecuencia 2,13 Hz, masa participativa 56%; b) Modo 9, frecuencia 4,81 Hz, masa participativa 7%

5.2 Análisis modal en 100 modos de vibración (eje Y)

Figure 9. Modal analysis on 100 vibration modes along axis y. a) Mode 2 freq. 2.61 Hz, participating mass 45%;
b) Mode 3, freq. 2, 93 Hz, participating mass 11%

Figura 9. Análisis modal en 100 modos de vibración a lo largo del eje y. a) Modo 2, frecuencia 2,61 Hz, masa participativa 45%; b) Modo 3, frecuencia 2,93 Hz, masa participativa 11%

5.3 Análisis modal en 100 modos de vibración (eje Z)

Figure 10. Modal analysis on 100 vibration modes along axis z. a) Mode 16 freq. 5.96 Hz, participating mass 12%;
b) Mode 19, freq. 6, 41 Hz, participating mass 14%

Figura 10. Análisis modal en 100 modos de vibración a lo largo del eje z; a) Modo 16, frecuencia 5,96 Hz, masa participativa 12%; b) Modo 19, frecuencia 6,41 Hz, masa participativa 14%

Finalmente, el modelo del FEM nos permitió confirmar y enriquecer los hallazgos mediante el análisis de los mecanismos de falla. Descubrimos que los daños observados mostraban los efectos de una respuesta global de la iglesia, mayormente en el sentido longitudinal (Calderini and Lagomarsino, 2009). Los siguientes mecanismos de daño parecen todos atribuibles a este tipo de respuesta:

- los daños en los muros laterales del atrio, que revelan un derrumbe de la fachada (Mecanismo 1);

- el daño en la cúpula (Mecanismo 14), con daño en la mediana paralela al ábside (un típico mecanismo “no cubierto” y los daños en diagonal en los segmentos, especialmente evidentes en los dos cortes diagonales del atrio (donde los elementos contrastantes no son efectivos para el ábside);
- el daño que denuncia el derrumbe del ábside y el desprendimiento del presbiterio de la sala (Mecanismo 16);
- los daños en los muros laterales y en las bóvedas del ábside y del presbiterio (Mecanismo 17 y 18);
- los daños en las bóvedas de las dos capillas mayores (Mecanismo 24).

La ocurrencia de esta respuesta en comparación con las del crucero, parece motivada por dos factores principales: la dirección longitudinal es aquella en la que se producen los mayores empujes por la cúpula (eje principal); en dirección transversal existen más elementos contrastantes efectivos (machones muy rígidos, sobre cada una de las demás piezas estructurales, y cadenas). El colapso de la linterna y los graves daños en la torre y campanario tienen sus propias peculiaridades. El colapso de la linterna, podría deberse al movimiento del domo que lo sustenta y a la presencia de la nueva cubierta metálica con un borde rígido en hormigón armado. El daño del campanario parece atribuible a un fenómeno de torsión como consecuencia de su forma irregular y por la presencia de restricciones asimétricas.

6. Conclusiones sobre el “comportamiento tipo caja” de la estructura post análisis sísmico

El objetivo del estudio era evaluar, desde el punto de vista arquitectónico e histórico del conjunto, el “comportamiento tipo caja” de toda la estructura, que recuperada después del análisis específico de los macroelementos debe continuar mostrando una unidad armoniosa entre la función, forma y el aspecto estático restaurado.

El estudio detallado y gráfico de los elementos estáticos necesario para la restauración del patio, que destaca de manera global la unidad de la estructura después de la consolidación estática, es un método raramente aplicado en combinación con la verificación de los macroelementos y al mismo tiempo, accesible solamente por una figura formada a través destrezas que se acercan tanto a la arquitectura como a la mecánica estructural.

El arquitecto restaurador, quien tiene la tarea de coordinar las capacidades dentro del proyecto de restauración estática, no puede prescindir de un examen gráfico final, que considere el “antes y después” que se obtiene al aplicar un modelo estático y/o dinámico.

Divorciada de los aspectos relacionados con los materiales que componen la estructura, la sola aplicación de los resultados de elementos finitos y macroelementos es inadecuada y no se ajusta completamente a la realidad. A contrario, como se señaló, las técnicas aplicadas por la Mecánica Estructural sobre los cuerpos continuos en el rango elástico y no elástico, no permite una aplicación rápida en los casos reales y, especialmente, en una emergencia.

En consecuencia, como alternativa a la implementación de un método que integre, a mediana escala, es decir de porción estructural, la velocidad computacional del FEM y de los métodos de los macroelementos, y la meticulosidad en la caracterización del material que pertenece al análisis tradicional del cuerpo continuo en el campo inelástico, normalmente la única forma de obtener un conocimiento completo de la construcción, pareciera ser un análisis historiográfico completo de ella; único recurso capaz de proporcionar y autorizar las herramientas de intervención junto con la retroalimentación gráfica general.

7. References/Referencias

- Eurocode 8 (2003)**, Design of structures for earthquake resistance.
- Decreto Legislativo (2004)**, Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 22/02/2004
- DM (2005)**, Norme tecniche per le costruzioni, DM. 14/09/2005, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.
- DM (2008)**, Norme tecniche per le costruzioni, DM. 14/01/2008, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.
- Circolare (2010)**, circolare n. 26/2010 - Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle nuove Norme tecniche per le costruzioni.
- NTC (2008)**, Direttiva del Presidente del Consiglio dei ministri per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni. G.U. 24 del 29/01/2008.
- Cacciamali L., Di fiore M., Matoda C., Tosini A. (2010)**, "Valutazione del rischio sismico della Chiesa di Sant'Agostino a L'Aquila", Esame del Corso di Conoscenza Strutturale, Sismica e Geotecnica dei Beni Culturali, Politecnico di Torino, Torino.
- Antonini O. (2004)**, "Chiese dell'Aquila", CARSA Edizioni, Sambuceto di S. Giovanni Teatino (CH).
- Ceravolo R. (2010)**, "La conoscenza strutturale della Chiesa di Sant'Agostino a L'Aquila", Lezioni nell'ambito del Corso di Conoscenza Strutturale, Sismica e Geotecnica dei Beni Culturali, Politecnico di Torino, Torino.
- Calderini C., Lagomarsino S. (2009)**, "Chiesa di Sant'Agostino. Note storiche e costruttive. Lettura del danno e della vulnerabilità. Considerazioni sul restauro e la ricostruzione", Convegno L'Università e la ricerca per l'Abruzzo. Il come e il perché dei danni ai monumenti, L'Aquila.
- Clementi A. (1998)**, "Storia de L'Aquila. Dalle origini alla prima guerra mondiale", Laterza, Roma-Bari.
- Antonini O. (1999)**, "Architettura religiosa aquilana", L'Aquila.
- Chiodi D. (1988)**, "Le 170 chiese di L'Aquila dal '200 al '900", L'Aquila.
- Leosini (1848)**, "Monumenti storici artistici della città di Aquila e i suoi contorni", L'Aquila.
- Gavini I. C. (1926)**, "Storia dell'architettura in Abruzzo", Milano-Roma.
- Fiengo G., Guerriero L. (2008)**, "Atlante delle tecniche costruttive tradizionali", Arte Tipografica Editrice, Napoli.
- Ceravolo R., Demarie G. V. (2009)**, "Analisi sismica per livelli di conoscenza del patrimonio architettonico", Clut, Torino.
- Boscotrecase L., Piccarreta F. (2009)**, "Edifici in muratura in zona sismica", Dario Flaccovio Editore, Palermo.
- Gavarini C. (1978)**, "Dinamica delle Strutture.", Edizioni Scientifiche Associate, Roma.
- Gavarini C. (1994)**, "Ingegneria Antisismica 1", Masson Editore, Milano.
- Gavarini C. (1991)**, "Ingegneria Antisismica 2", Masson Editore, Milano.