

# 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<sup>1\*</sup>, Marco Di Fiore<sup>2\*\*</sup>

\* 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 10<sup>th</sup>, 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 6<sup>th</sup>, 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. Un 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. Historical background

*The proposed case is the synthesis of the structural and seismic analysis for the Church of Sant'Agostino in L'Aquila, which was strongly damaged by the seismic swarm of April 2009, by means of a deep historical and scientific understanding of its construction.*

## 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.

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

The construction of the church dates back to the early decades of the '700. Today, the church still lies, at least partially, on the area of another church founded in 1282 and dedicated to St. Augustine (Cacciamali et al., 2010). It was heavily damaged by several earthquakes and destroyed by the earthquake of 1703. The project of the present church belongs to the architect Giovan Battista Contini and dates to the last months of 1708. It was probably completed in 1725 (Cacciamali et al., 2010; Gavini I. C., 1926).

In its medieval phase, the church had a Latin cross plan, with three naves and transept, apse at the bottom and main facade to the west, towards the surrounding streets rather than the square. It was the church of the three mendicant orders residing in L'Aquila: the Augustinians, after the Franciscans and the Dominicans (Figure 1).

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).

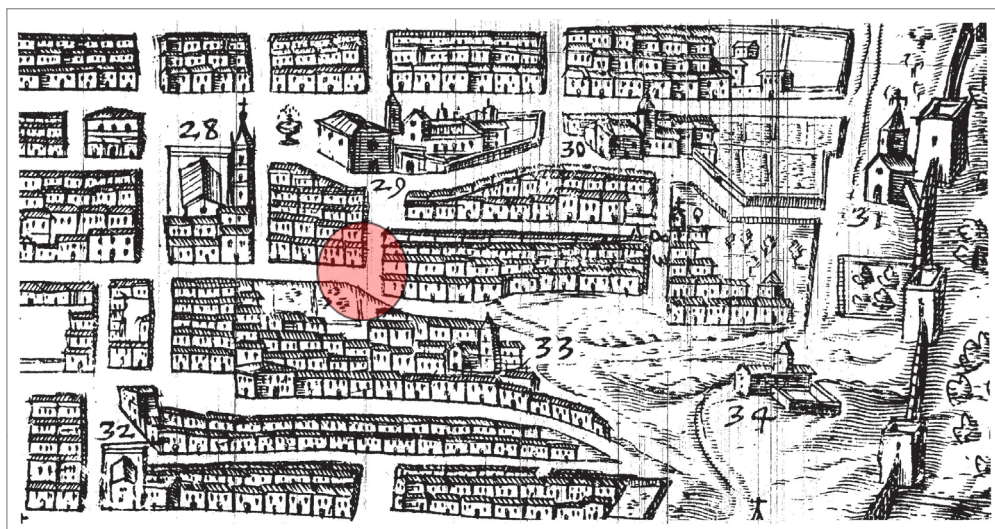


Figure 1. The medieval church  
Figura 1. La iglesia medieval

In the city's iconography of 1622 and 1680, the obvious presence of the sail facade with straight crown, which was the characteristic of the originally constructed church, supports the theory of persistence of the medieval implant (possibly modified in 1656 with the modification of the main door that was opened towards the square) until the collapse suffered during the earthquake of 1703, when Contini designed a new architecture covered by a dome and open to the public square (Cacciamali et al., 2010; Antonini, 2004; Antonini, 1999; Chiodi, 1988).

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).

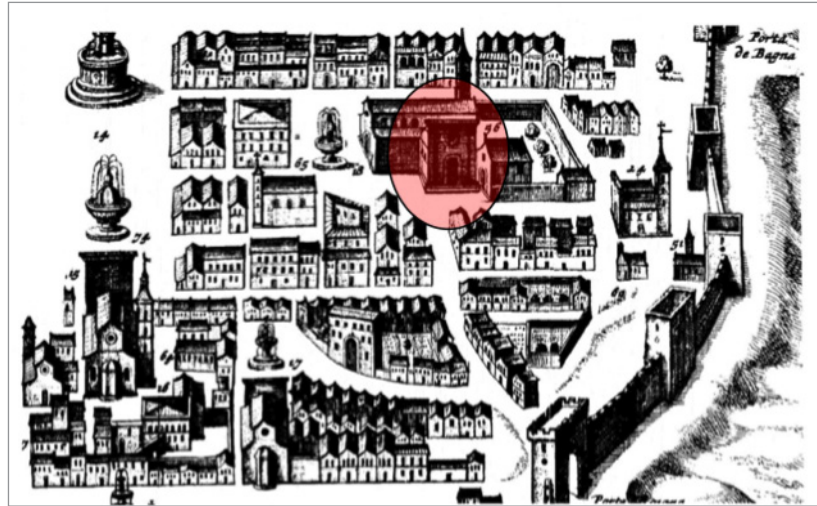


Figure 2. Iconography of the Church after opening the main door towards the square  
Figura 2. Iconografía de la iglesia después de abrir la puerta principal hacia la plaza

## 2. Church description

The church has a longitudinal plan and the entrance opens onto a small atrium covered by a pitched roof, followed by an elliptical-shaped room surmounted by a dome, and a long apse covered by a barrel vault. On both sides of the room, there are three pairs of chapels: the major chapels are located on the orthogonal principal axes, while the smaller rooms are located on the diagonal axes. Outside there is a buttress system. The dome that surmounts the room has a maximum length of twenty meters; it is ribbed and crowned by a lantern.

## 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 cuadernas y coronado por una linterna.

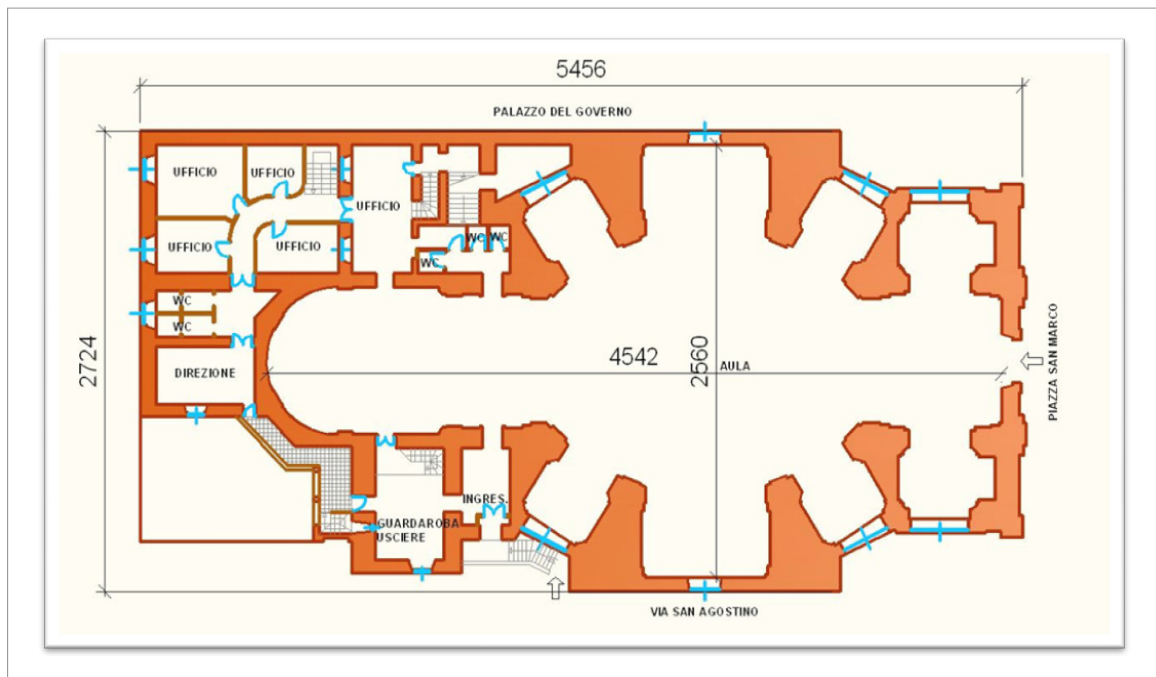


Figure 3. Plan of the Sant'Agostino Church  
Figura 3. Planta de la iglesia de Sant' Agostino



The facade is divided in two parts, structured into a lower and upper order. The basement corresponds to the head of the atrium; the upper part is retracted approximately seven meters and consists in one of the faces of the lantern's octagonal prism. The sculptural articulation of the facade is simple and essential, enhanced by a circular medallion in high relief representing St. Augustine. A trapezoidal tympanum surmounted by a balustrade masks the gable roof that crowns the entrance hall and unifies the two partitions of the facade (Cacciamali et al., 2010; Ceravolo R., 2010; Calderini and Lagomarsino, 2009).

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

The Church is in masonry. From a visual analysis, we observe that all the vaulted surfaces, the arches and the beams (visible due to loss of plaster) are made of excellent-quality masonry brick. Instead, all vertical structures are made of mixed stone/brick masonry of medium quality, with well-connected cantonal in square-shaped stone. The buttresses seem to be made of excellent quality square-shaped stone (Fiengo and Guerriero, 2008). In some cases, above the lintels of the external openings, wooden reinforcement elements are recognized. Inside the building, there are no visible metal chains. However, some metal chain heads, which report their presence, are visible on the exterior walls. The scheme in Figure 5 shows a hypothetical distribution of the chains in the structure (Ceravolo, 2010; Calderini and Lagomarsino, 2009). We can see that the chain heads are only visible on the free external wall towards Via Sant'Agostino and not on the one facing the Prefecture.

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 enfrente la Prefectura.

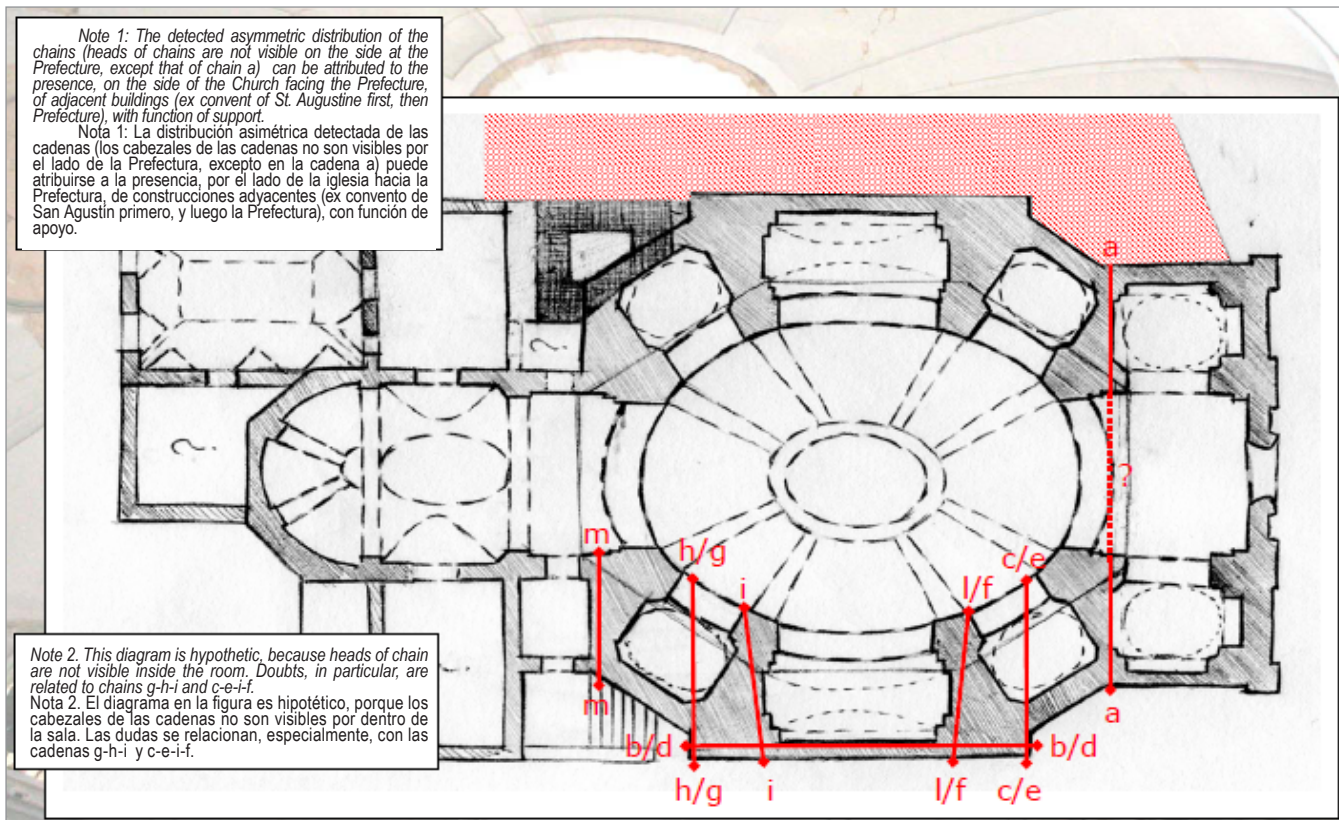


Figure 5. Hypothetical distribution of the chains in the structure (Calderini and Lagomarsino, 2009)  
 Figura 5. Distribución hipotética de las cadenas en la estructura. (Calderini y Lagomarsino, 2009)

### 3. Vulnerability and damage analysis

The damage suffered by the Church of St. Augustine following the earthquake of April 6<sup>th</sup>, 2009, led to its inaccessibility and necessitated a provisional first aid, with insertion of shore and tie rods in the main facade.

For interventions regarding post-earthquake reconstruction and reduction of seismic vulnerability on cultural heritage assets, the Directive of the President of the Council of Ministers for the Evaluation and Reduction of the Seismic Risk in the Cultural Heritage, in Line with the Building Technical Standard, October 12<sup>th</sup>, 2007 is a good reference.

The seismic behavior of the church can be interpreted through its division into macro-elements, characterized by a structural response substantially independent from that of the whole church (facade, room, apse, side walls, principal arch, etc.), and the different kinds of damages could be synthesized in a fundamental number of failure mechanisms. In this way, the various modalities in which the macro-elements break, differing for proportions and materials, are recognized and associated to specific mechanisms of collapse, which represent the real essence of vulnerability (Calderini and Lagomarsino, 2009; Ceravolo and Demarie, 2009; Boscotrecase and Piccarreta, 2009; Gavarini, 1978; Gavarini, 1994; Gavarini 1991).

### 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).

For the survey concerning the church's damage and vulnerability, the II level card <sup>1</sup> about the mapping of damage and the seismic vulnerability of the churches was examined in relation to 28 mechanisms, according to the instructions contained in the Directive.

The processing of the collected data allows us to obtain two separate indexes on a statistical basis, through a simple normalized average of the scores on damage levels and vulnerability indicators for each collapse mechanism:

Damage index: it is a numeric parameter ranging from 0 to 1, evaluated by a normalized average of the detected damage. It is provided by the following expression

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

For the k-th mechanism:  $d_k$  is the damage level (0 to 5),  $\rho_k$  is the weight attributed to the mechanism (0 for mechanisms that could not be activated in the church because of the lack of macro-elements, and between 0.5 and 1 in other cases).

- Vulnerability index: varies between 0 and 1 and it is defined as the weighted average of the behavior of different parts of the church. It is provided by the following expression

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

For the k-th mechanism:  $v_{ki}$  and  $v_{kp}$  are the scores obtained by the mapping of the vulnerability indicators and the seismic principles respectively (Table 3).

Para el estudio de los daños y de la vulnerabilidad de la iglesia, se examinó la Tarjeta de Nivel II<sup>1</sup> 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:

Para el mecanismo k-th:  $d_k$  es el nivel de daño (0 a 5),  $\rho_k$  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

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

<sup>1</sup> From about ten years, in Italy exist three levels of catalogation of the churches and palaces after the seismic event (if we don't consider the level zero, that is the immediate operations of the civil protection):

Level 1: Total post-earthquake inspection  
- evaluation of the macroseismic intensity - assessment of the economic damage - judgment of practicability  
Level 2: Analysis of vulnerability speditive / territorial  
- definition of vulnerability indexes - forecasts of behavior  
Level 3: Deep vulnerability analysis  
- relief of the masonry system to allow the application of simplified response analysis, based on the identification of the mechanisms of failure in the plane and out of the plane - choice of intervention

The cards were worked out by the National Group for the Defence against Earthquakes CNR-GNDT and the National Seismic Service SSN Department of Civil Protection D.P.C., developed by the University of Genoa (Prof. S. Lagomarsino), and approved by the Ministry of the Cultural Heritage for the technical activity post-earthquake.

<sup>1</sup> 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: Analisis expedito de vulnerabilidad / territorial  
- Definición de índices de vulnerabilidad - pronósticos de comportamiento  
Nivel 3: Analisis 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





The tab for damage and vulnerability mapping of the churches has been used in seismic emergencies since 1995; the huge amount of collected data made it possible, through statistical analysis, to establish a relationship between seismic action and damage, in terms of a vulnerability parameter for one church, and thus a direct correlation between seismic input and detected vulnerability (Cacciamali et al., 2010; Calderini and Lagomarsino, 2009). In practice, the ground acceleration values corresponding to the damage limit state (DLS) and collapse limit state (ultimate limit state or ULS), are calculated according to functions of the proposals' correlation:

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

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

The seismic safety at ULS is measured by an index  $i_s$ , defined as the ratio between the acceleration at the ULS and the acceleration corresponding to an exceedance probability in 50 years, different than that accepted for new constructions, and dependent on two factors: the relevance of the construction and the use category. This acceleration is obtained by multiplying the reference seismic acceleration on a stiff soil  $a_g$  (with 10% exceedance probability in 50 years) by a factor of importance  $\gamma_I$ , whose mean values are provided by the Directive, on the basis of the above parameters (Calderini and Lagomarsino, 2009; Ceravolo and Demarie, 2009).

- Therefore, the index of seismic safety is:

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

where the coefficient  $S$  depends on the stratigraphic profile of the foundation subsurface and any morphological effects, and the importance factor  $g_I$  is defined by the Directive as in Table 2.

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:

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  $\gamma_I$ , 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:

donde el coeficiente  $S$  depende del perfil estratigráfico de la fundación subterránea y de cualquier efecto morfológico, y el factor de importancia  $g_I$  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  $\gamma_I$  for the ULS verification of protected Heritage

**Tabla 2.** Probabilidad de excedencia en 50 años de acción sísmica ( $P$ ), y factores de importancia  $\gamma_I$  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	$\gamma_I$	Exceedance P/P Excedencia	$\gamma_I$	Exceedance P/P Excedencia	$\gamma_I$
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

The safety index calculated in this manner allows having a comprehensive assessment of the church's vulnerability, and it is significant only when comparing elements affected by the same event.

In the next section there is an excerpt of the mapping card concerning the damage and vulnerability of the Sant'Agostino Church, summary of results, calculation of the three indexes, and descriptions of the identified mechanisms, concluding with proposals for action (Cacciamali et al., 2010; Ceravolo, 2010; Calderini and Lagomarsino, 2009).

#### 4. Calculation of the Seismic Indexes

The damage and vulnerability indexes for the Church of Sant'Agostino were calculated (Cacciamali et al., 2010; Ceravolo, 2010; Calderini and Lagomarsino, 2009). The damage and vulnerability survey was aimed at identifying the mechanisms of collapse that could be potentially activated, as well as the assessment of the damage level of the actually activated mechanisms, in order to calculate an index that represents a synthesis of the damage level in the different macro-elements of the church.

The latter, evaluated on the basis of equation (1), is equal to:

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

The assessment of the church's vulnerability was then defined in terms of the 28 damage mechanisms, noting those constructive and typological features that have a key role in the structural seismic response; indicators of vulnerability and seismic safeguards were specially considered, in order to define a vulnerability index that represents a synthesis of the vulnerability mapping for the church's different macro-elements (Calderini and Lagomarsino, 2009).

The vulnerability index, by equation (2), was equal to:

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

In order to understand if the damage level derived from the seismic event was foreseeable and consequently avoidable, the safety index through the simplified mechanical model LV1 proposed in the Guidelines for the Evaluation and Reduction of Seismic Vulnerability in Cultural Heritage (G.U. January 29<sup>th</sup>, 2008) was also calculated. This model allows estimating the ground acceleration (a<sub>ULS</sub>), in a simplified way, for the ultimate limit state and the serviceability limit state for damage (ADLS), as well as the safety index (I<sub>s</sub>) through equation 5.

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:

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:

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 (a<sub>ULS</sub>) para los Estados Límite Últimos, y los Estados Límite de Daño (ADLS, en inglés), así como el índice de seguridad (I<sub>s</sub>), mediante la ecuación (5).



For churches, the proposed model is based on a statistical elaboration of the damage suffered by similar buildings during Italy's significant earthquakes, and it uses quality parameters of the damage mapping card (OJ N° 55 of March 7<sup>th</sup>, 2006) and annex C (OJ January 29<sup>th</sup>, 2008). In this case, the assessment considered the expected dangers of the site, proposed in NTC2008 (DM January 14<sup>th</sup>, 2008):  $a_g$  (ULS) = 0.27g  $a_g$  (DLS) = 0.07g. The associated spectrum was compared with that resulting from the recordings made at the time of the said earthquake (AQK station – source: Itaca INGV database). Given the importance of the asset and its use frequency, the importance coefficient is assumed to be equal to 1.2. Since geognostic surveys were not available, a ground of B-type (S=1.25) was adopted and a coefficient of topographic amplification equal to 1. Table 2 shows the values circled in red.

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 3<sup>rd</sup>, 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

From equation 5, we can obtain the following for the examined structure:

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

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

and the Peak Ground Acceleration is

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

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

The ground acceleration during the earthquake of April 6<sup>th</sup>, 2009 has exceeded the acceleration limit state of collapse defined by the LV1 analysis, thus validating the model for estimating the acceleration (Cacciamali et al., 2010; Ceravolo, 2010; Calderini and Lagomarsino, 2009).

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. Seismic Analysis

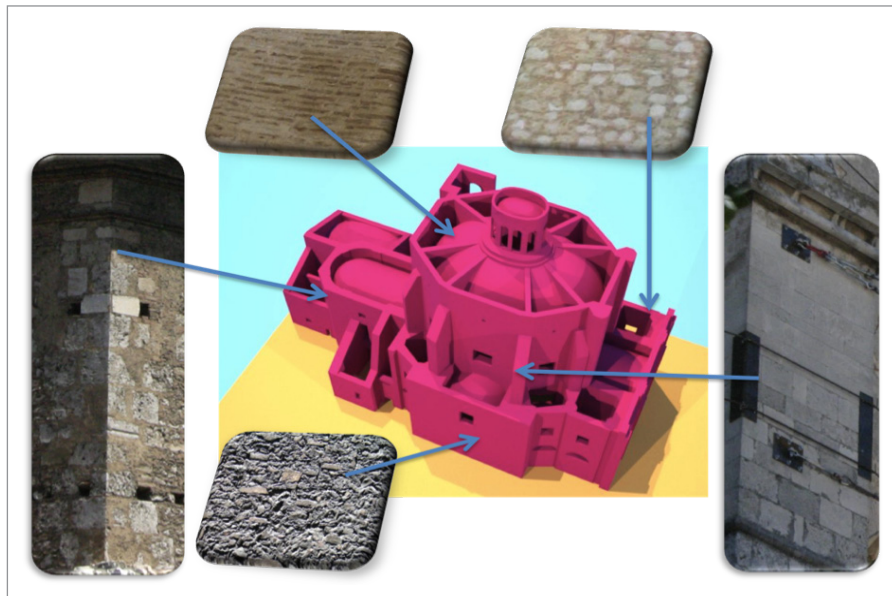
Once accurate data concerning the geometry and the material properties, the structure and the soil were available, it was possible to implement a finite element numerical model (FEM) for the building (Cacciamali et al., 2010).

In this case, a linear dynamic modal analysis has been used. First, a three-dimensional model was created.

## 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

Then, the mechanical parameters were chosen and since no in-situ testing was available, reference was made to what is suggested by current regulations [DPCM of December 10<sup>th</sup>, 2007 (4.1.7); OPCM 3274/2003 (11.d) NTC 2008 (11.10.3.4)].

Later on, first the factory's discretization into 255624 tetrahedrons (Figure 7), and then the structure's modal dynamic analysis by FEM was made (Cacciamali et al., 2010; Ceravolo, 2010).

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).

The dynamic tests were essential for the evaluation of seismic safety, with the extra advantage of being part of that category of non-destructive testing. Ultimately, the analysis allowed identifying the most significant vibration modes among the 300 modes under examination (100 along the x axis, 100 along y axis, and 100 along z axis), directing itself towards the realization of structural interventions designed to heal the current damage and prevent the formation of mechanisms under the action of a telluric event.

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.

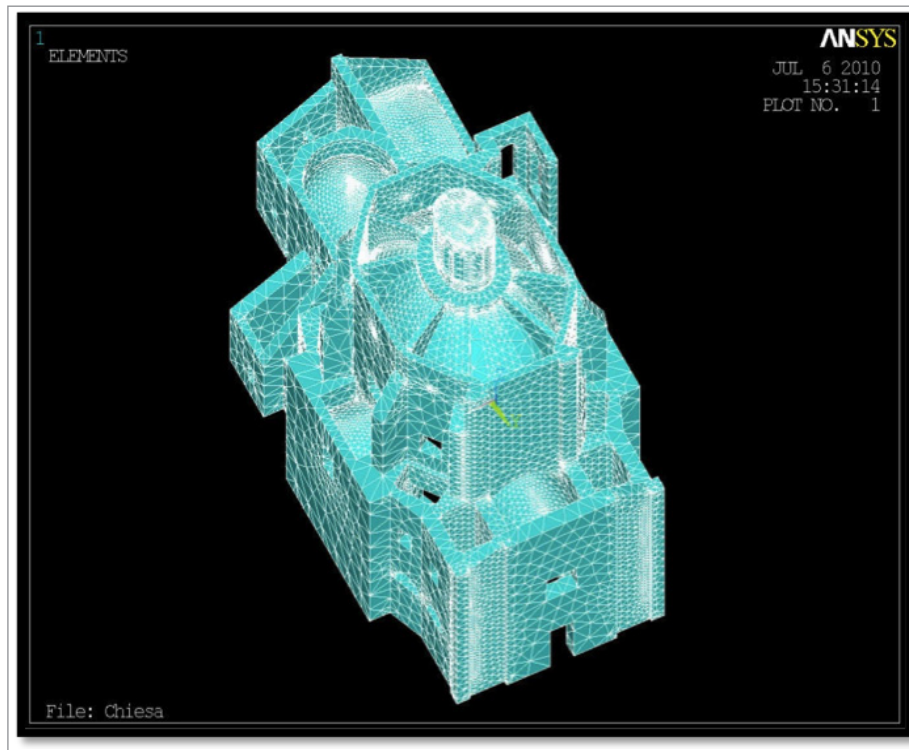


Figure 7. Solid element. Discretization into 255624 tetrahedrons  
Figura 7. Elemento sólido. Discretización en 255.624 tetraedros

### 5.1 Modal analysis on 100 vibration modes (axis X)

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

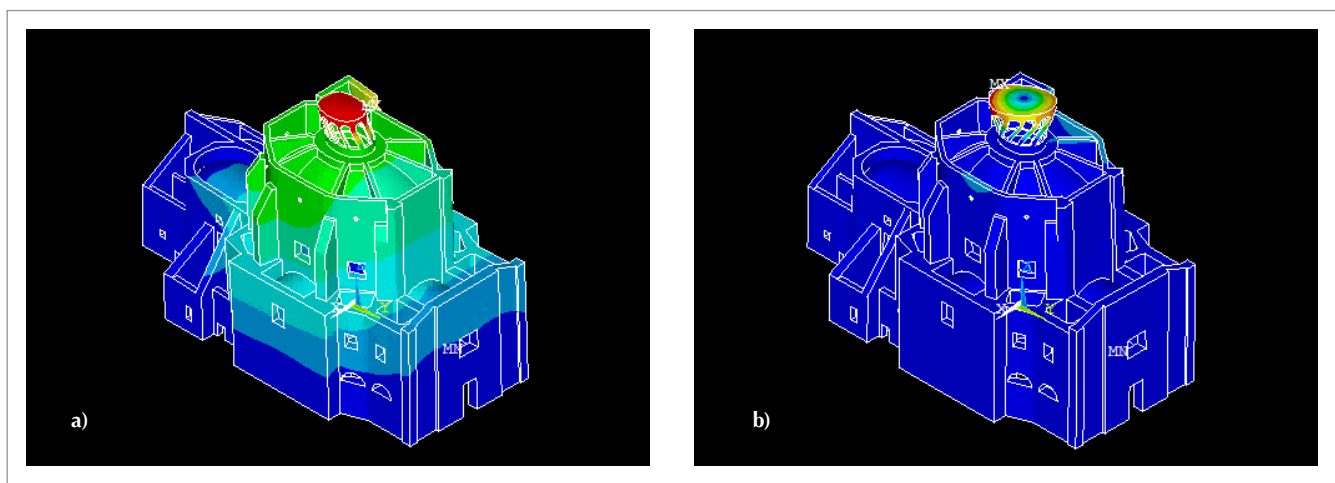
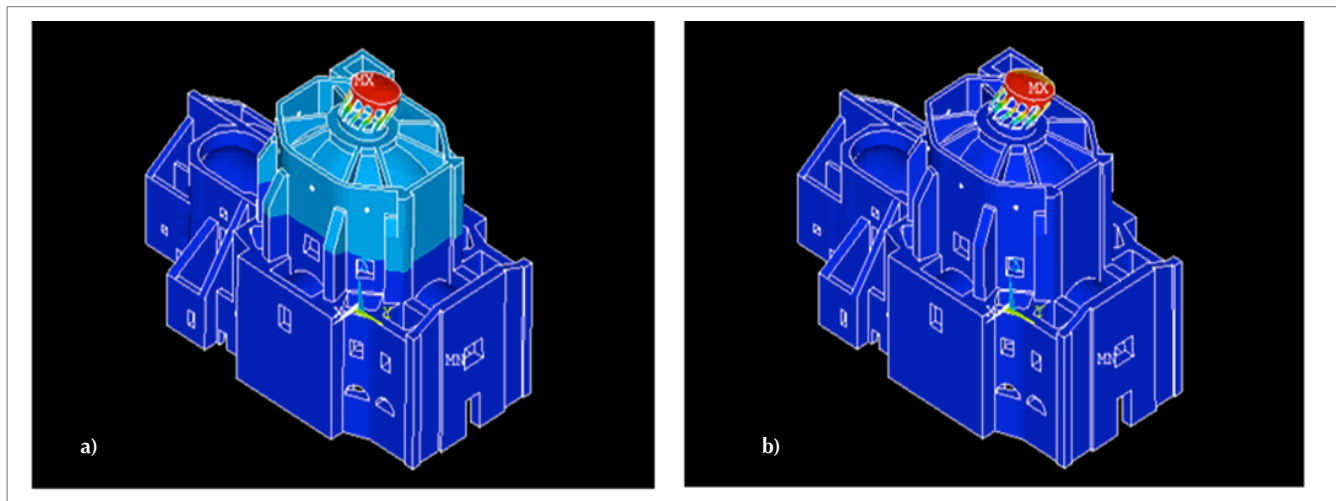


Figure 8. Modal analysis on 100 vibration modes along axis x. a) Mode 1, freq. 2.13 Hz, participating mass 56%; b) Mode 9, freq. 4.81 Hz, participating mass 7%  
Figura 8. Análisis modal en 100 modos de vibración a lo largo del eje x. a) Modo 1, frecuencia 2,13 Hz, masa participativa 56%; b) Modo 9, frecuencia 4,81 Hz, masa participativa 7%



## 5.2 Modal analysis on 100 vibration modes (axis Y)

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

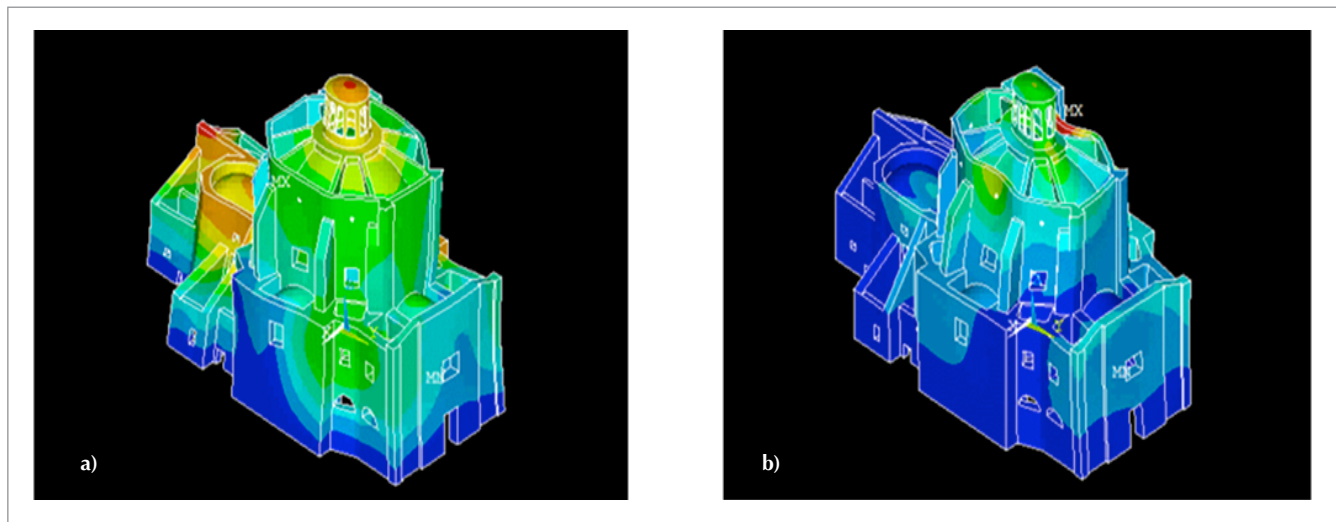


**Figure 9.** Modal analysis on 100 vibration modes along axis y. a) Mode 2 freq. 2.61 Hz, participating mass 45%;  
b) Mode 3, freq. 2, 93 Hz, participating mass 11%

**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 Modal analysis on 100 vibration modes (axis Z)

## 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%

Finally, the FEM model allowed us to confirm and enrich the findings of the failure mechanisms' analysis. We find that the observed damage shows the effects of a global response of the Church, mainly in the longitudinal sense (Calderini and Lagomarsino, 2009). In particular, the following damage mechanisms seem all attributable to this type of response:

- The damages on the lateral walls of the atrium, which betray an overturning of the facade (Mechanism 1);

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);

- The damage in the dome (Mechanism 14), with damage on the median parallel to the apse (which is a typical “uncovered” mechanism) and the diagonal damages on the segments, particularly evident in the two diagonal slices into the atrium (where the contrasting elements are not as effective as for the apse);
- The damage showing the overturning of the apse and the detachment of the presbytery of the room (Mechanism 16);
- The damages on the lateral walls and on the vaults of the apse and presbytery (Mechanisms 17 and 18);
- The damages on the vaults of the two major chapels (Mechanism 24).

The prevalence of this response compared to the transept ones seems to be motivated by two main factors: the longitudinal direction is that in which there is major pushing by the dome (major axis); in the transverse direction, more effective contrast elements are present (very rigid buttresses, over each other structural pieces, and chains). The collapse of the lantern and the serious damage in the tower and belfry, have proper peculiarities. The collapse of the lantern, in particular, may be due to the movement of the underlying dome and to the presence of the new metallic cover with rigid curb in reinforced concrete. The damage of the bell cell seems mainly attributable to a torsion phenomenon resulting from its irregular shape, and the presence of asymmetric constraints.

## 6. Conclusions about the “box-behavior” of the structure’s post-seismic analysis

In the work we intend to evaluate, from the historical and architectural point of view of the ensemble, the “box-behavior” of the whole construction that, once recovered after the specific analysis for macro-elements, must continue to show a harmonious unity between function, form and reinstated static aspect.

The graphic and detailed study of the static elements needed for the yard restoration, which highlights in a comprehensive manner the unity of the structure after the static consolidation, is a method so far rarely applied in combination with the verification to macroelements, and at the same time, it is accessible only by a figure that is formed through skills neighboring both architecture and structural mechanics.

The restorer architect, who has the task of coordinating the capabilities within the static restoration project, cannot leave out a final graphic examination, taking into account the “before and after” that derives from the application of a static and/or dynamic model.

- 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.

*The mere application of the results of finite elements and macro-elements are inadequate and not completely suited to reality, because it is divorced from aspects concerning the material that composes the structure. Conversely, as it is noted, the techniques applied by Structural Mechanics about continuous body in the elastic or non-elastic range, do not allow a fast application in practical cases and especially in an emergency.*

*Thus, as alternative for the implementation of a method that puts together, on a medium scale, i.e., of structural portion, the computer speed of FEM and macro-element methods, and the meticulousness in the characterization of the material belonging to the traditional analysis of the continuous body in inelastic field, currently the only way to get a complete knowledge of the construction would seem a thorough historiographical analysis thereof; it is the only means that is able to provide and authorize the intervention tools along with the overall graphical feedback.*

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.