TEMA
Technologies
Engineering
Materials
Architecture
e-ISSN 2421-4574
Vol. 5, No. 2 (2019)

The Pantheon of Gaetano Cima in Guasila. Interdisciplinary studies for its structural conservation

Paolo Sanjust, Fausto Mistretta, Elisa Pilia*

Highlights

The Sanctuary of the Beata Vergine Assunta (CA) was built by the architect Gaetano Cima in neoclassical style between 1839 and 1849. Since its construction, this monument has shown issues concerning infiltration of rainy water, diffused cracks in the internal spaces and the poor quality of the building materials. After one century of useless restoration works, the city council has recognised the need to understand the cause of this widely diffused decay in order to finally find a sustainable intervention of restoration.

Abstract

The paper presents the integrated results obtained from an interdisciplinary protocol of research designed for assessing the structural safety and state of conservation of the monument. Starting from the archival researches about the construction history and the restoration works, 3D geometric surveys, diagnostic as well as geognostic investigations have been performed for implementing the knowledge of the structures, characterised by several static problems since its construction. Overall the study has individuated the level of static efficiency of the basilic and the causes of its prolonged decay, stating a base point for the definition of future interventions.

Keywords

Construction history and preservation, Diagnostic, Materials and techniques for restoration

1. INTRODUCTION

This paper presents an interdisciplinary study carried out on the Sanctuary of the Beata Vergine Assunta (Figure 1) placed in Guasila, a monument designed by the Arch. Gaetano Cima (1839-1849) and object of several restoration works since its construction aimed at solving numerous problems such as infiltrations of water that have produced over time various phenomena of structural and material degradation. Recently, its state of conservation is gotten worse, requiring an integrated investigation aimed at understanding the causes of decay. For this reason, the Guasila council requested the collaboration of the DICAAR (Department of Civil Engineering, Environmental and Architecture) of the University of Cagliari, which specifically involved the

Paolo Sanjust
DICAAR - Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura, viale Marengo 2, Cagliari, 09123, Italia

Fausto Mistretta
DICAAR - Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura, viale Marengo 2, Cagliari, 09123, Italia

Elisa Pilia
DICAAR - Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura, viale Marengo 2, Cagliari, 09123, Italia

** Corresponding author*
Tel.: +39-070-6755356;
e-mail: epilia@unica.it

disciplinary areas of construction and architecture technology, topography and survey, architectural restoration, geomaterial and applied geophysics.
Therefore, the joined study has been finalised to assess the state of conservation and the static efficiency of the basilic as well as to definition possible lines for future interventions.
The research *Architectural and structural survey of the Santuario della B.V. Assunta in Guasila* has been financed by the Guasila council, Scientific coordinators: Prof. Fausto Mistretta and Paolo Sanjust. The study has been published in the short monography "Il santuario della Beata Vergine Assunta in Guasila. Storia, analisi e prospettive future per la conservazione", edited by CG Creazioni grafiche in 2017.

2. METHODOLOGY (P. S., F. M.)

The interdisciplinary protocol of research has been led by the D.M. LL.PP. 17.01.2018 "Technical Standards for Construction" (NTC), which set the fundamental steps in the procedure of safety assessment for historic structures and definition of possible intervention. Thus, the study consisted firstly in the historic investigation, through an accurate research in the local documentary archives focused to reconstruct the history of the Sanctuary and its restoration works. Thanks to this examination it has been possible not only

1. INTRODUZIONE

Il presente contributo presenta lo studio interdisciplinare condotto sul Santuario della Beata Vergine Assunta di Guasila (Figura 1), monumento progettato dall'Arch. Gaetano Cima tra il 1839 ed il 1849, che a partire da alcuni anni dopo la sua costruzione, e fino ad oggi, è stato oggetto di numerosi interventi di restauro, prevalentemente volti a risolvere i problemi di infiltrazione d'acqua, che hanno prodotto nel tempo diversi fenomeni di degrado strutturale e materico. La situazione, che negli ultimi anni è andata a peggiorare ha richiesto l'avvio di un'indagine conoscitiva approfondita ed integrata indirizzata alla comprensione delle cause dei fenomeni di decadimento in atto. Per questo motivo il Comune di Guasila ha richiesto la collaborazione del DICAAR (Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura) dell'Università di Cagliari che nello specifico ha coinvolto i settori disciplinari della tecnica delle Costruzioni e dell'Architettura, l'unità di topografia e di rilievo, di restauro architettonico, di geomateriali e di geofisica applicata.
Lo studio integrato delle varie discipline è stato quindi finalizzato alla verifica dello stato di conservazione e di efficienza statica dell'edificio, ed alla definizione di possibili linee guida di intervento per il futuro progetto di restauro.
Il Progetto di ricerca finalizzato allo studio Architettonico e Strutturale del Santuario della B.V. Assunta in Guasila è stato finanziato dal Comune di Guasila, Responsabili Scientifici ProfF. Fausto Mistretta e Paolo

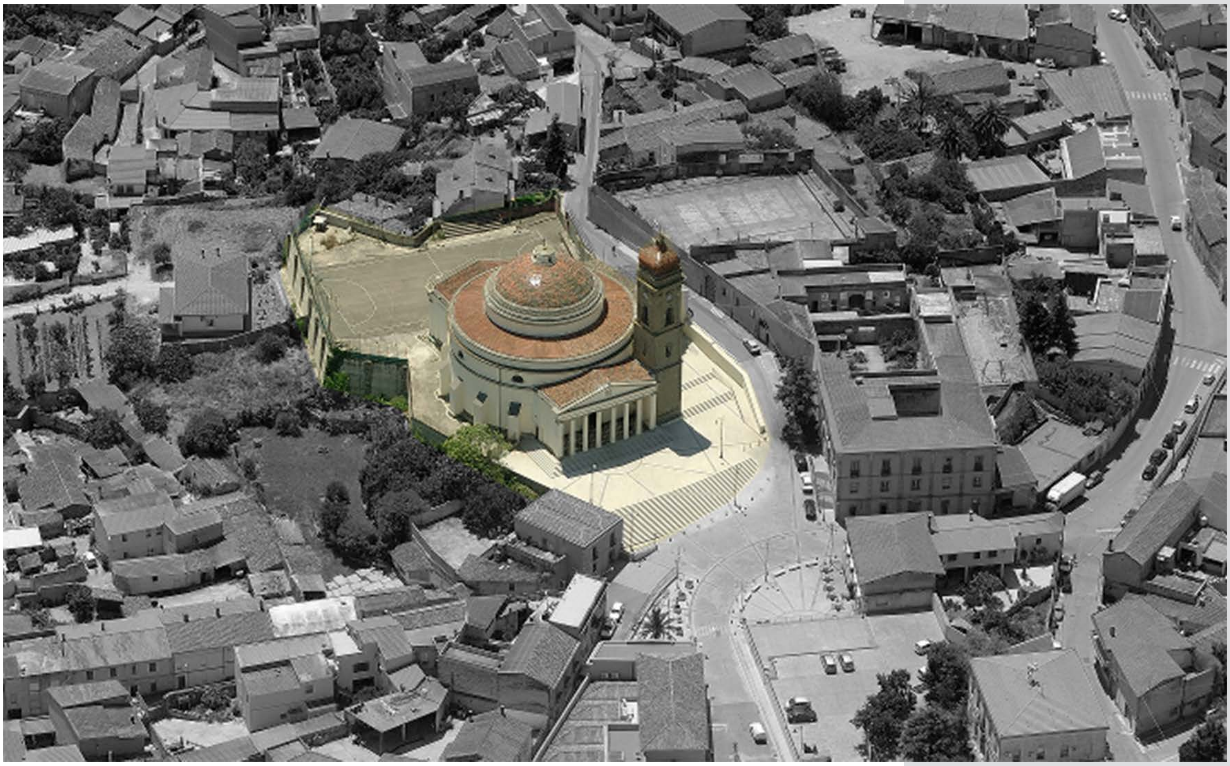

Figure 1. Guasila, aerial view with highlighted of the Sanctuary.

to understand techniques and constructive technologies adopted during the construction site, but also to experimentally evaluate the vulnerability of the structures, enabling the understanding of the structural behavior in relation to the various restoration phases. At the same time, a geometric-structural survey and the mechanical characterization of materials have been carried out in order to understand the geometry, the materials and consequently the building techniques of the fabric. More in detail, architectural surveys (1:50) - conducted by the DICAAR, Unity of Geomatic of the DICAAR; Scientific Coordinator: Prof. G. Vacca - were performed through laser scanning techniques, to assess the overall geometry of the structure and any possible problem of deformations and anomalies. This survey supported the understanding of the cracks pattern, the quality of connections between vertical and horizontal elements, the efficiency of architraves above openings, the inspection of any structural element, the presence of elements, also non-structural, with high vulnerability, the typology of the masonry and its construction characteristics. Then, endoscopic surveys - performed by the DICAAR, Unity of Structure, Scientific Coordinator: Prof. F. Mistretta - on the masonries allowed the detection of cavities and voids, the morphology and typology of the masonry and the state of conservation of materials. The construction materials and their state of conservation have been also analysed with the combination of non-destructive and partially destructive controls - performed by the DICAAR, LabMAST - Mediterranean Laboratory for Historical materials and architectures, Scientific Coordinator: Prof. S.M. Grillo - to characterize the physic-chemical and mechanical properties of mortars, plaster (type of binder, type of aggregate, binder/aggregate ratio) and natural stones. Other investigations concerned the foundations through geognostic and geotechnical surveys for the geotechnical characterization of the site by defining a geological model of the subsoil. These have been carried out by taking core samplings and three excavations for inspections, geophysical surveys, conducted by means of a georadar to verify the possible presence of pre-existing masonry structures under the present building. Finally, based on previous knowledge acquired during the aforementioned phases, an advanced structural analysis with a finite element model was carried out to assess the presence of any structural finding.

3. HISTORY THROUGH THE ARCHIVAL SOURCES (P. S., E. P.)

The Sanctuary, placed at the highest altitude of the historical centre, dominates the village and the countryside of Guasila with its hemispherical dome (Figure 2). It was designed in 1839 by the architect Gaetano Cima, officially opened

Sanjust. Lo studio ha avuto esito nella pubblicazione "Il santuario della Beata Vergine Assunta in Guasila. Storia, analisi e prospettive future per la conservazione", 2017, Guasila, CG Creazioni grafiche.

***2. METODOLOGIA** (P. S., F. M.)*

Nello specifico, il D.M. LL.PP. 17.01.2018 "Norme Tecniche per le Costruzioni" (NTC), definisce alcuni passaggi fondamentali delle procedure per la valutazione della sicurezza di strutture esistenti e la redazione degli eventuali progetti di intervento. Per questo lo studio è partito dall' analisi storico-critica attraverso un'accurata ricerca presso diversi archivi indirizzata alla acquisizione di tutta la documentazione inerente alla storia del Santuario e dei suoi restauri, con l'intento di ricostruire ed interpretare le diverse vicende costruttive. Grazie a tale indagine è stato possibile non solo comprendere le tecniche e le tecnologie costruttive adottate nella costruzione della struttura ma anche di valutare sperimentalmente la vulnerabilità delle stesse, consentendo di comprendere il funzionamento in relazione ai diversi interventi di restauro attuati già a conclusione del cantiere. In contemporanea, è stato condotto il rilievo architettonico (scala 1:50) - a cura dell'Unità di Topografia del DICAAR; Coordinatore Scientifico: Prof. G. Vacca - della configurazione geometrica della volta e delle murature perimetrali, effettuata con ausilio di strumentazione e metodologia Laser Scanner 3D, per valutare gli effetti globali sulla struttura di eventuali fuori piombo e asimmetrie. Tale rilievo geometrico-strutturale ha permesso non solo di comprendere il quadro fessurativo e quello deformativo ma anche di verificare la qualità dei collegamenti tra pareti verticali e tra pareti e orizzontamenti ed all'esistenza di architravi strutturalmente efficienti al di sopra delle aperture, la presenza di elementi, anche non strutturali, ad elevata vulnerabilità e alla tipologia della muratura e delle sue caratteristiche costruttive. Inoltre, indagini endoscopiche sulle murature - svolte dal DICAAR, Unità Strutture; Coordinatore Scientifico: Prof. F. Mistretta - hanno permesso di individuare cavità e vuoti eventualmente presenti, la morfologia e tipologia del paramento murario e lo stato visibile di conservazione dei materiali. Queste sono state condotte in affiancamento alle indagini analisi dei materiali - svolte dal DICAAR, LabMAST - Mediterranean Laboratory for Historical materials and architectures, Coordinatore Scientifico: Prof. S.M. Grillo -, eseguite mediante un insieme combinato di controlli non distruttivi e parzialmente distruttivi, per caratterizzare le proprietà fisico-chimiche e meccaniche delle malte di allettamento e di intonaco (tipo di legante, tipo di aggregato, rapporto legante/aggregato) e dei lapidei naturali valutando infine il loro stato di conservazione.
Altri studi sono stati condotti sulle fondazioni e sul terreno di posa consistite in campagne di indagini geognostiche e geotecniche per la caratterizzazione geotecnica del sito, dei terreni di sedime e della tipologia di fondazioni definendo un modello

in 1852 and built on the ruins of a Baroque church after its demolition. Signs of the previous building can be seen in the bell tower, unique testimony now on the right side of the current building.

The church is considered the first example of neoclassical architecture in the panorama of Sardinian architecture. It has a central plan and it is preceded by a pronaos with tympanum supported by six Doric columns and two lateral pillars. It is also overcome by a large dome decorated with tempera. Its construction site was opened in 1842 and proceeded with many difficulties because of the poor expertise of the craftsman as shown by the archival documents.

Numerous errors were conducted during the building site, especially for realising frames, columns, roofs and masonry structures. In 1849, once the dome was finished and before the paintings were realized, the rector of the church, Dr. Melas wrote to complain about water seepages from the roofs. A year later, the painter started to decorate the dome signalling numerous irregularities in the plastered surface and construction defects. After more than ten years, on February 15, 1852, the church was finally consecrated.

As reported into the archival documents, the first report of "scratches" on the

geologico del sottosuolo; queste sono state effettuate mediante l'esecuzione di sondaggi a carotaggio continuo e tre scavi per l'ispezione fondazioni e indagini geofisiche, effettuate mediante strumentazione georadar per verificare l'eventuale presenza di strutture murarie preesistenti sotto l'edificio attuale. Infine, l'analisi strutturale e di verifica statica è stata eseguita con modellazione di calcolo avanzata, a partire dalle conoscenze pregresse acquisite durante le fasi precedenti, per valutare la caratterizzazione meccanica dei materiali, la definizione dei livelli di conoscenza e dei conseguenti coefficienti di sicurezza, nella definizione delle azioni e nella relativa analisi strutturale.

***3. LA STORIA DELLA FABBRICA ATTRAVERSO LE FONTI** (P. S., E. P.)*

La chiesa della Beata Vergine Assunta è situata sul punto più elevato del centro storico del paese, che sovrasta col suo cupolone emisferico (Figura 2). Fu progettata nel 1839 da Gaetano Cima, aperta ufficialmente al culto nel 1852 e costruita in parziale sovrapposizione ad una precedente chiesa barocca in stato di rovina e per questo demolita; ne resta ancora oggi testimonianza della torre campanaria ad essa annessa ed in seguito accostata al progetto del Cima. La chiesa, primo esempio di architettura neoclassica nel panorama dell'architettura sarda,

Figure 2. Historic photo of the Guasila countryside with the view of the Sanctuary.

building dates back to 1897: the Director of the Regional Office Antiquities and Fine Arts, the arch. Vivanet prepared a report listing all the works related to the reintegration of internal and external plasters, the replacement of embryos in the dome, the construction of framing, recommending the cement instead of ordinary mortar, for filling the lesions.

During the nineteenth century several projects and interventions occurred without interruptions, without being actually able to identify and solve the causes of this decay: lesions to elevation structures and infiltration of water from roofs. Concerning the first structural issues involving bearing walls, arches, vaults and dome, several proposals tried to solve them. In 1948, the arch. Crudeli recognised the need to identify the reasons of these problems, underling the need of subsoil and foundation investigations, in particular on the north-east sector. Successively, in 1954, the public work office of Cagliari designed the consolidation of the masonries and in '70s closed the monument. In 1985, as a result of 'heavy rains', the 'buttress' on the east side collapsed and the church was closed to the public was again closed because lesions took place everywhere: in the masonry of the church and some sectors of the foundation appeared instable due to the leaching of the surrounding land" (Ordinance of the Mayor of 12th April 1985). Only in 1998 a new reinforced concrete retaining wall was built (Zara - 2000). In the early 90's the arch. Spigno presented two further projects rejected by the superintendent arch. Segni that find a conclusion, where necessary, with cases of "cut and sewing" and of armed seams with iron bars. As for the long-standing problem of water infiltration from the roofs, already reported in 1849 with the church still under construction, and then other times during the twentieth century, a sudden worsening occurred in the seventies. In 1978 the project of the arch. Rollo and the eng. Medda and Mameli presented a series of radical interventions that provided a new waterproofing of the dome and new gutters, in addition to the restoration and the redesigning of cornices as well as the reshaping of the steps of the external drum with slate. It is not clear to what extent this intervention was performed; in fact, since 1980 a series of changes in these projects were made. In 1980 the intervention of Ninni Vargiu - apparently disconnected from the Rollo's one – change the replacement of the dome with a easy intervention of "replacement of joints with concrete mortar and subsequently with highly elastic polymeric resins, highly elastic and finishing with transparent varnish based on epoxy resins". This same project involved the whole demolition of the decorated plaster of the dome and its repainting. Such a radical and unusual intervention was considered necessary and urgent to ensure the accessibility of the church, as large pieces of plaster

ha pianta centrale ed è preceduta da un pronao con timpano sorretto da sei colonne doriche più due pilastri laterali. È inoltre sormontata da un'ampia cupola decorata a tempera con lanterna.
Il suo cantiere venne aperto nel 1842 con la consegna dei disegni all'impresario Crobu, e procedette con molte difficoltà tra i continui richiami dell'amministrazione e del progettista nei confronti dell'impresa, come risulta dalle carte d'archivio. Numerosi errori furono rilevati nella realizzazione delle cornici, delle colonne, delle coperture e delle strutture murarie stesse e già nel 1849, una volta terminati i lavori della cupola e prima che dipinti venissero realizzati, il Rettore Melas scriveva per lamentare infiltrazioni d'acqua dalla cupola. Già solo l'anno successivo il pittore Crespi iniziava a dipingere gli interni segnalando numerose irregolarità nella superficie intonacata e difetti di costruzione. Dopo oltre dieci anni, il 15 febbraio 1852, la chiesa venne finalemente consacrata.
Dall'analisi dei documenti di archivio, la prima segnalazione di "lesioni" sull'edificio – non si sa di che tipo, di quale entità, e dove fossero localizzate – risale al 1897: il Vivanet, Direttore dell'Ufficio regionale Antichità e Belle arti, sollecitato dalla Prefettura ad esaminare un progetto redatto da un certo ingegner Loni, predispone una relazione nella quale si elencano lavori relativi a rifacimenti di intonaci, interni ed esterni, sostituzione di embrici nella cupola, realizzazione di cornici, e si raccomanda l'uso del cemento, al posto della malta ordinaria, per la "profilatura delle lesioni". Nel corso del '900 poi i progetti e gli interventi si susseguono quasi senza interruzioni, senza che si riesca effettivamente ad incidere sulle cause del degrado, e forse neanche ad individuarle con esattezza, così che due problemi si ripetono con continuità nel corso dei decenni: le lesioni sulle strutture in elevazione e le infiltrazioni d'acqua dalle coperture. Riguardo alle prime, che interessano di volta in volta le murature portanti, gli archi, le volte e la cupola, si susseguono proposte, progetti e realizzazioni di vario tipo.
Nel 1948 l'architetto Crudeli prevede per la prima volta di individuare le cause del degrado quando segnala la necessità di effettuare delle verifiche sul sottosuolo e sulle fondazioni, in corrispondenza del forte dislivello nel settore nordest. Seguono il progetto del Genio Civile di Cagliari del 1954 interviene con il consolidamento delle murature con l'applicazione di catene di ferro, il risarcimento di lesioni con barre di ferro e boiacca e la ricucitura di murature lesionate. Negli anni '70 la chiesa viene addirittura dichiarata inagibile dal Genio Civile e chiusa al pubblico. Nel 1985 a causa di "piogge torrenziali" crolla un tratto di dieci metri del muro di contenimento sul lato est, e la chiesa viene nuovamente chiusa al pubblico perché "si sono formate delle lesioni sulla muratura della chiesa e alcuni tratti della fondazione non appaiono stabili per il dilavamento del terreno circostante" (Ordinanza del Sindaco del 12 aprile 1985); ma è solo nel 1998 che si provvede a realizzare un nuovo muro di contenimento in calcestruzzo armato (Progetto dell'ing. Zara –

fall continuously with serious prejudice to public safety. In the second half of '80s, a more radical restoration on the roof, signed by the arch. Secci and Morand was designed: the structure of the dome was restored by laying an insulating layer and waterproofing and by replacing the mantle of "squared tiles", in addition to interventions on the system of rainwater disposal and fixtures of the lantern to facilitate the circulation of air in the dome itself. The aforementioned projects, directed by the architect Spigno and realized in 1991-93, still provided the use of special plaster for restoration, and the waterproofing of the roofs and new gutters. Nevertheless, despite this long series of interventions, the monument is still object of the same problems of decay: presence of humidity, water infiltrations from the roofs and widespread lesions on the dome, arches and architraves.

4. TECHNIQUES, MATERIALS AND STRUCTURES

4.1. TECHNIQUES (P. S.)

The geometric knowledge of the church has been made possible through the laser scanner and GPS technique supported by the laser scanner terrestrial Focus 3D and using the photogrammetry. The point cloud obtained from the

variante del 2000). Agli inizi degli anni 90 l'architetto Spigno presenta ulteriori due progetti respinti dalla Soprintendente architetto Segni che si concludono con interventi ove necessario, di "scuci e cuci" e di cuciture armate con barre di ferro.
Riguardo all'annoso problema delle infiltrazioni d'acqua dalle coperture, già segnalato nel 1849 con la chiesa ancora in costruzione, e poi altre volte nel corso del XX secolo, si verifica un improvviso peggioramento negli anni '70.
Nel 1978 il progetto dell'architetto Rollo e degli ingegneri Medda e Mameli propone una serie di interventi radicali che prevedono l'impermeabilizzazione della cupola e nuovi canali di gronda, oltre al restauro e rifacimento di cornicioni, e al rifacimento in ardesia dei gradoni del tamburo esterno: in realtà non è chiaro in quale misura questo intervento sia stato eseguito, dato che nel 1980 risulta una Perizia suplettiva e di variante firmata dall'ing. Ninni Vargiu - apparentemente scollegata dal progetto Rollo - che sostituisce la rimozione della copertura della cupola con un intervento sul manto di "ripresa dei giunti con malta cementizia e successivamente con mastice a base di resine polimeriche altamente elastiche e completamento con una mano di vernice trasparente a base di resine epossidiche." Questo stesso progetto prevede la demolizione completa dell'intonaco decorato della cupola e il rifacimento. Un intervento così radicale, ed inconsueto, è "ritenuto necessario e urgente per garantire la agibilità della chiesa, in quanto grandi pezzi

Figure 3. 3D model of the monument.

scans has been georeferenced in the ETRF2000 reference system (with geoid dimensions), through the use of Ground Control Point placed outside the Church and detected with a GNSS survey in RTK mode, reconstruction a 3D model of the fabric (Figure 3). From this model, detailed graphic drawings and renderings were made to understand the dimensions, forms, anomalies and possible deformations of the structure investigated with particular attention to the vaulted structures, widely affected by the phenomena of decay. From these surveys, it has been possible to verify the regular geometry of all the masonries, except for the roof of the dome, slightly embarked probably as a result of the last restorations.

As concerns the surfaces, these instead appear marked by a series of cracks that have been investigated according to a survey of the crack pattern, with the aim of classifying the typology and the associated mechanism: all the lesions in the masonries are originated by mechanisms of failure of the architraves; in the vault, instead, lesions can be divided into two types: cracks placed in the keystone, which generally occur due to the differential failure of the abutments without causing danger situations; cracks placed at the base of the arch caused by the geometry of the vaults themselves, which are not

di intonaco cadono continuamente con grave pregiudizio per l'incolumità pubblica".
Nella seconda metà degli anni '80 si realizza un intervento di restauro molto radicale sulle coperture, firmato dagli architetti Secci e Morand, che porta a nudo la struttura della cupola che viene risanata con la posa di uno strato coibente e dell'impermeabilizzazione e con la sostituzione integrale del manto di "tegoline a squame", oltre ad interventi sul sistema di smaltimento delle acque piovane e sugli infissi della lanterna per favorire la circolazione d'aria nella cupola stessa. I citati progetti dell'architetto Spigno degli anni 1991-93 prevedono ancora, l'utilizzo di "intonaco speciale per restauro", e l'impermeabilizzazione dei canali di gronda. Ma nonostante questa lunga serie di interventi ci troviamo ancora di fronte agli stessi problemi di degrado: presenza di umidità ed infiltrazioni d'acqua dalle coperture, e lesioni diffuse sulla cupola sugli archi.

4. TECNICHE, MATERIALI E STRUTTURE

***4.1. TECNICHE** (P. S.)*

La conoscenza geometrica della Chiesa della Beata Vergine Assunta di Guasila è stata possibile mediante il rilievo con tecnica laser scanner e GPS supportato dal laser scanner terrestre Focus 3D della Faro e dalla

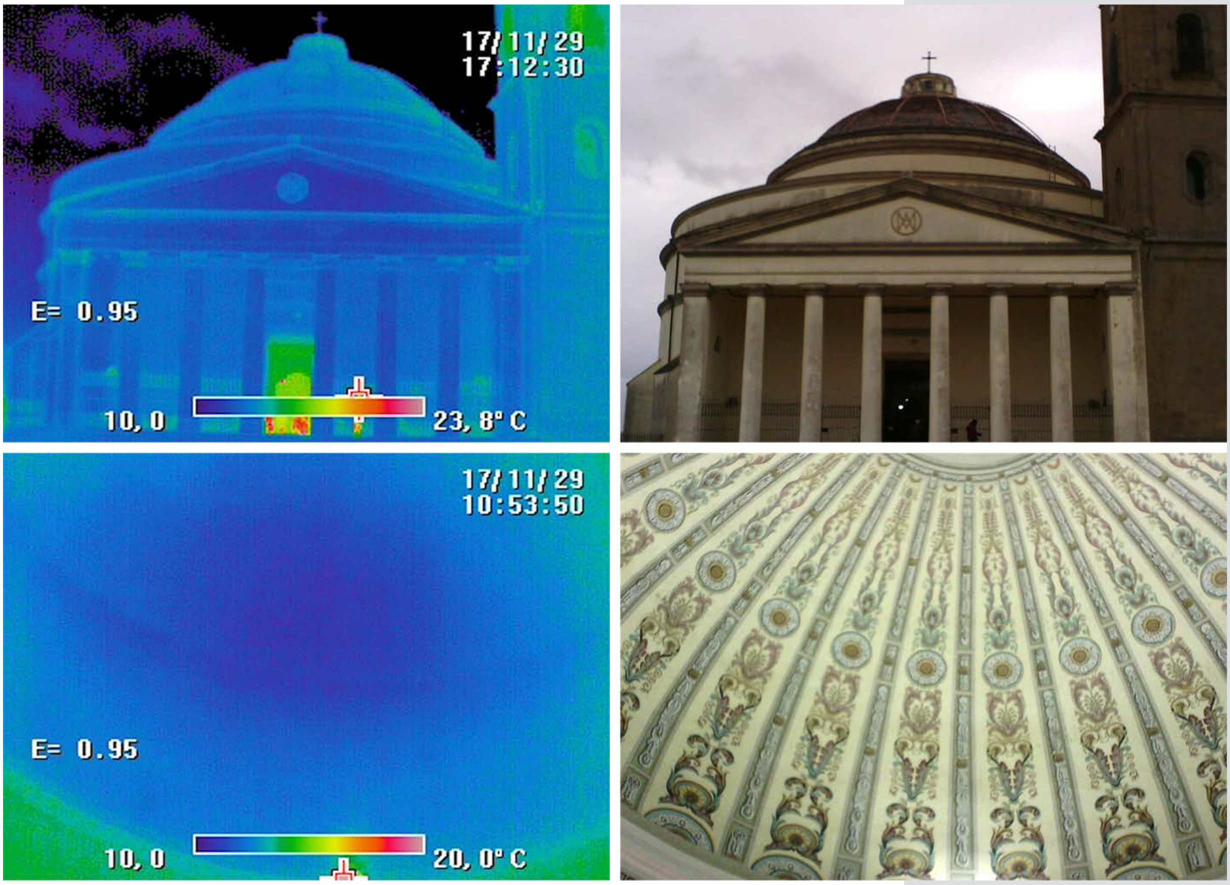

Figure 4. Results of the thermographic investigations.

attributable to a failure of the masonry.

After these findings, a series of diagnostic surveys has been conducted in order to investigate more precisely the security and the conservation of the structures, their materials, techniques and technologies. In particular: the endoscopic investigation which allowed us to explore the core of the masonries, impossible to know only with laser scanners, their morphology and typology as well as the state of conservation of materials; the thermography, conducted in passive conditions and finally geognostic wells, deep around -1.60 meters from floor. From the integration of all these studies, it has been possible to assert that the church is built, as recommended by the arch. Cima, with two building techniques: a first one, used in all the load-bearing structures such as foundations, columns, flats, jambs in large squared blocks; a second one, used into the second level walls (vaulted spaces) in irregular ashlars. Also, the thermographic investigations have allowed us to identify a third construction technique related to the dome, which from the first third of its development is built in bricks, while in the lower part (the remaining two thirds) is made of squared ashlars hypothetically sandstone as the rest of the church (Figure 4). Finally, thanks to the geognostic wells, it has been possible to identify not only the gravel-bearing material on the subsoil of the surrounding square, but also the typology of the buttresses on the east side, built with header bond.

4.2. MATERIALS (E. P.)

At the same time, natural and artificial building materials have been systematically investigated considering both those used for the first construction and those used during the restoration works. This study has allowed us to understand the nature of materials, to hypothesize the origins and the quarry sites and to identify the different typologies of weathering. The characterization of mortars and plasters required particular attention in order to define their minero-petrographic nature: composition, shape, size, grain size of aggregates, type of binder, and to assess the level of decay. The number of samples collected, enough to represent the heterogeneity of the materials, is the result of a preliminary analytical survey carried out in different parts of structure with the support of a crane used during the endoscopic survey. Different types of bedding mortars, plaster and various painting layers made with different techniques at different times were sampled. In general, the mixtures have shown a mediocre accuracy as it can be seen in the low

fotogrammetria.
La nuvola dei punti ottenuta è stata poi georeferenziata nel sistema di riferimento ETRF2000 (con quote geoidiche), attraverso l'utilizzo di Ground Control Point posti all'esterno della Chiesa e rilevati con un rilievo GNSS in modalità RTK, ricostruendi ikl modello 3D della fabbrica (Figura 3). Sono stati quindi prodotte le restituzioni grafiche utili a comprendere le forme, anomalie e possibili deformazioni della struttura investigata con particolare attenzione alla copertura voltata, maggiormente colpita dai fenomeni di dissesto.
Dai rilievi si è evidenziato come le strutture rispondano ad una geometria regolare ad eccezione del manto di copetura della cupola, affetta da numerosi imbarcamenti probabilmente a seguito degli ultimi restauri. Per quanto riguarda le superfici murarie, queste invece appaiono segnate da una serie di fessurazioni che sono state quindi investigate secondo un rilievo del quadro fessurativo, col fine di classificarne la tipologia e il meccanismo associato: le lesioni presenti nelle murature sono riconducibili a meccanismi di lesione di richiamo dovute al cedimento degli architravi; nella volta, invece, le lesioni presenti possono essere divise in due tipologie: lesioni in chiave, che si verificano generalmente per cedimenti differenziali delle spalle e non stanno creano eccessive situazioni di pericolo; lesioni all'imposta causate dalla geometria delle volte stesse, anch'esse non riconducibili ad un mal funzionamento delle murature.
A seguito di tali risultanze, per investigare con maggiore precisione la sicurezza e lo stato di conservazione delle strutture in oggetto, è stato necessatio necessario effettuare una campagna di indagini diagnostiche più dettagliate volte alla comprensione dei materiali, delle tecniche e del funzionamento delle strutture.
Le prime analisi hanno riguardato: l'indagine endoscopica, la quale ha consentito di investigare e conseguire informazioni sulla geometria del nucleo delle strutture non rilevabili con laser scanner e sulla morfologia e tipologia dei paramenti murari e lo stato di conservazione dei materiali; la termografia, condotta in condizioni passive, cioè senza incrementi artificiali di temperatura; pozzetti geognostici a circa -1.60 metri da piano calpestio. Come si è potuto evincere dalle due indagini, l'intera struttura portante della Chiesa è realizzata, così come aveva raccomandato anche il Cima, mediante due tecniche costruttive: una prima impiegata nelle strutture portanti quali fondazioni, colonne, piattabande, stipiti in blocchi squadrati di grandi dimensioni (mettere dimensioni – vedi foto fondazioni); una seconda, per la realizzazione delle murature al secondo livello (ambienti voltati) in conci irregolari.
Le indagini termografiche hanno permesso di individuare una terza tecnica costruttiva con riferimento alla cupola, che a partire da 1/3 del suo sviluppo prevede l'impiego dei laterizi, mentre nella parte inferiore (i restanti 2/3) è realizzata in conci squadrati ipoteticamente di arenaria (Figura 4). Infine, grazie ai pozzetti geognostici non solo si è identificato il materiale di probabile riporto ghiaioso del piazzale ma sono state

presence of fractures, voids and scarce cohesion of the mortars. Moreover, the material analysis has revealed that six of these were samples from restoration works. Only three samples, hypothetically historical mortars have shown a thin aggregate and a lower aggregate/binder ratio. The typology of decay can be summarised in strong decohesion, presence of patinas that are caused by the high presence of water infiltrations from the walls and roofs. Further four geognostic surveys were conducted in four different points of the square outside the church going to investigate the nature of the subsoil. This has resulted from inconsistent to consistent, and increasing in depth, from thickened to hard and compact. It can be considered settled material with eluvial-colluvial and/or terraced alluvial olocenic deposits in place (at about -6.0m) part of the Marmilla Formation essentially marly siltose, alternated to - from rough to fine - arenaceous levels (oligo-myocenic succession of Campidano Sulcis). Moreover, two soil samples were taken during the execution of geognostic surveys for studying the grain size, the classification of land (UNI 10006), the Atterberg limits and the weight of natural volume. From these last investigations, it can be asserted that the materials have a degree of plasticity of the soil I_p = low plasticity. Lastly, within the church, georadar prospections, conducted to verify the presence of pre-existing masonry structures, have not reported significant results.

4.3. STRUCTURES (F. M.)

The aim of the structural surveys has been to establish the degree of efficiency achievable by the elevation structures at the moment of the inspection, with an assessment of the causes of the cracks as well as a prediction of their behaviour in the continuation of the exercise life, reaching, therefore, a judgment on the structural performance state of the building. Known the geometric characteristics and the type of the wall elements, the study has been focused on the understanding of the deformative and tensional state of the structures with the development of a numerical model. Stresses and deformations were calculated using the 'finite element method' (FEM) where the masonry is considered as a continuous discrete isotope with finite elements whose mechanical characteristics are homogenized with respect to the single wall panel. The church has been modelled with 23064 flat elements, with 4 knots and 20 beams with 2 knots. Plates are two-dimensional elements able of simulating both the membrane behaviour (plate) and the bending behaviour (plate), the beams represent the behaviour of the pillars (Figures 5-6). In addition, to the gravitational loads are considered the carried permanent loads, such as the roofs and the lantern at the top, accidental loads as per

messe in evidenzia la fondazione del contrafforte in pietrame di tipo a sacco.

4.2. MATERIALI *(E. P.)*

Parallelamente, si è proceduto all'analisi dei materiali da costruzione, più nello specifico consistita nello studio sistematico dei materiali lapidei naturali e artificiali sia di quelli utilizzati per la realizzazione del manufatto che di quelli impiegati durante i restauri. Tale studio materico ha permesso di definire la natura dei materiali naturali, ipotizzarne la provenienza e i siti estrattivi, e di individuare le diverse tipologie di degrado.
Particolare attenzione è stata data alla caratterizzazione delle malte e degli intonaci al fine di definirne la natura minero-petrografica: composizione, forma, dimensioni, granulometria degli aggregati, il tipo di legante e valutare il livello di degrado. Il numero di campioni prelevati, sufficiente a rappresentare le diverse tipologie presenti, è stato il risultato di una indagine analitica preliminare condotta in diverse parti della struttura portante con l'ausilio di una gru durante la campagna di indagine endoscopica. Sono state, quindi, campionate diverse tipologie di malte di allettamento, di intonaco e vari strati pittorici realizzati con tecniche diverse in tempi diversi. La campagna di campionatura ragionata ha previsto il prelievo dall'intradosso della cupola dell'intonaco con superficie pittorica; dalle modanature alla base del cornicione, in fase di distacco, sono stati prelevati altri intonaci; infine dalla base della volta a botte dell'ingresso ulteriori campioni. Inoltre, un approfondimento materico è stato condotto nell'ambiente voltato sopra la cappella della Madonna d'Itria; qui sono stati prelevati altri quattro campioni. In generale, gli impasti dimostrano una mediocre accuratezza come testimoniato dalla scarsa presenza di fratture, vuoti e poca coesione delle malte stesse. Inoltre, dall'analisi dei campioni materici si evidenzia come sei di questi siano elementi riconducibii ad interventi di restauro. Le malte ipoteticamente storiche, rilevate in 3 campioni, mostrano un aggregato più fine ed un rapporto aggregato/legante più basso. Le forme di degrado quali la forte decoesione e la presenza di patine biologhe, sono attribuibili alla forte di presenza di infiltrazioni di acqua dalle murature e dalle coperture.
Ulteriori 4 sondaggi geognostici sono stati condotti in quattro diversi punti del piazzale esterno alla Chiesa andando ad investigare la natura dei terreni di riporto. Questi sono risultati da incoerenti a coerenti con l'aumento della profondità, da addensati sino a duri e compatti/litoidi. Il materiale è di probabile riporto frammisto a depositi eluvio-colluviali e/o alluvionali terrazzati olocenici poggianti sul substrato in posto (a circa -6.0m) appartenente alla Formazione della Marmilla essenzialmente marnoso siltoso, alternato a livelli più francamente arenacei da grossolani a fini (Successione Oligo-Miocenica del Campidano Sulcis). Durante l'esecuzione dei sondaggi geognostici sono stati prelevati n. 2 campioni di terreno per essere

standard, snow loads, wind loads and seismic loads. The evaluation of seismic action was carried out with a modal analysis with response spectrum (linear dynamic analysis). The stress test has been carried out according to the Mohr-coulomb rupture criterion, which is based on the hypothesis that the material crisis occurs in order to reach a critical value of the tangential tensions. The structural analysis, together with the verification of the type of foundations and the laying ground, has allowed to exclude that the building is affected by structural defects and backdrops that induce excessive reliance on the construction materials. The static and dynamic stresses are inducing to the masonry structures, tensional conditions well below the permissible limits, with the system bottom that is effective for the containment of actions.

sottoposti alle seguenti prove: Analisi granulometrica e classificazione delle terre (UNI 10006), limiti di Atterberg e peso di volume naturale. Dalle prove di classificazione si evince che le caratteristiche del materiale hanno grado di plasticità del terreno I_p = poco plastico ÷ plastico. Infine, all'interno della chiesa, prospezioni georadar , condotto per accertare l'eventuale presenza di strutture murarie preesistenti all'attuale edificio non hanno segnalato risultati significativi.

***4.3. LE STRUTTURE** (F. M.)*

L'obiettivo prefissato delle indagini strutturali è quello di stabilire il grado di efficienza che le strutture in elevazione in esame sono in grado di garantire al momento dell'ispezione, con una valutazione delle cause delle lesioni attualmente presenti, nonché

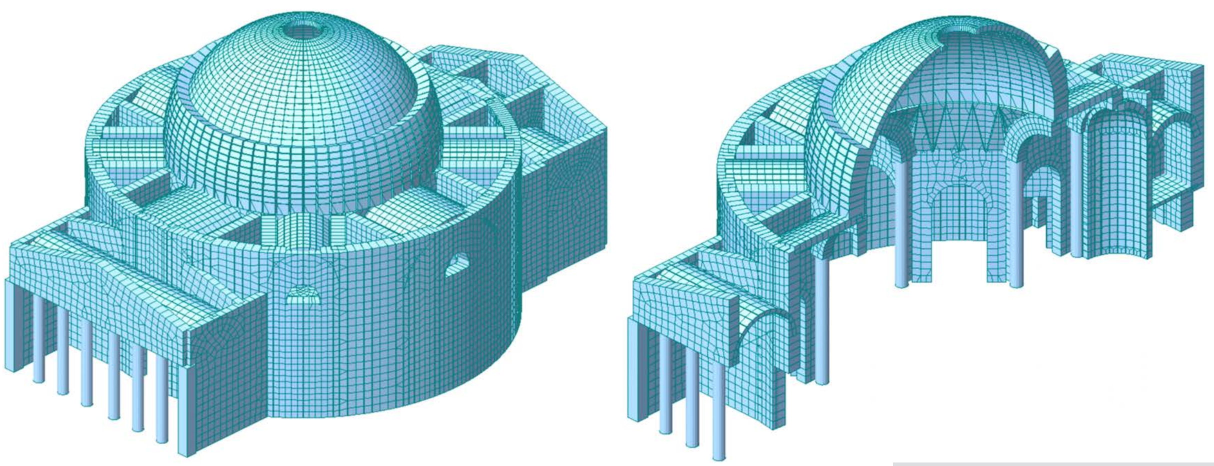

Figure 5. 3D 'finite element model' (FEM).

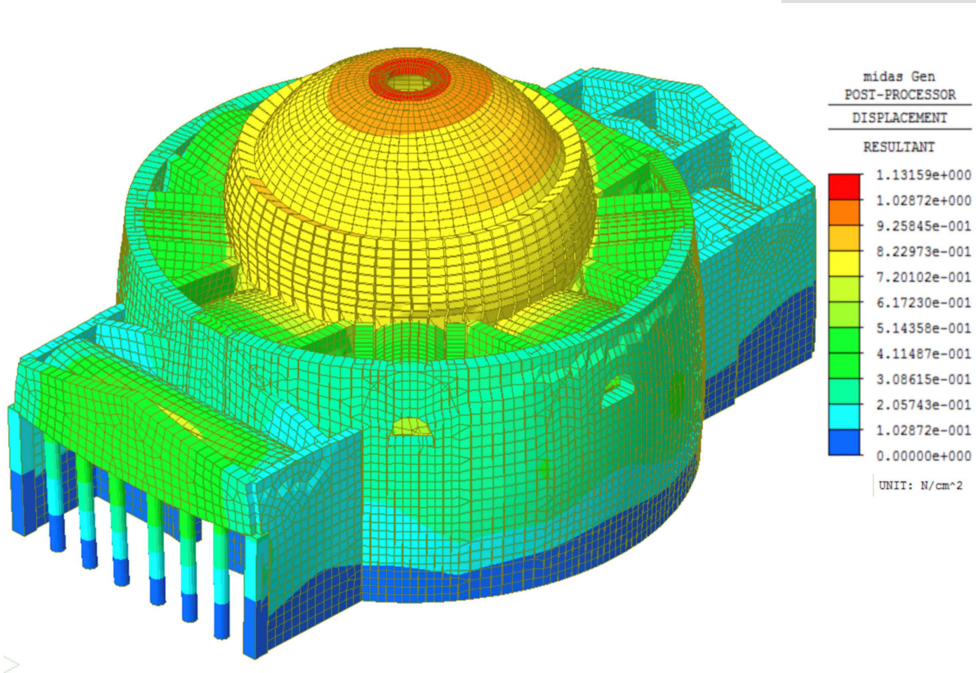

Figure 6. Displacement under live load.

5. CONCLUSIONS

In conclusion, this interdisciplinary and integrated study of the monument has allowed us to outline a clear state of conservation. After the detailed reconstruction of the life of the building, starting from its construction till its last restoration works, geometric, structural and geognostic studies, have permitted us to assert that the monument is not affected by structural faults that could be so dangerous for its safety. The only element of concern is the 'retaining wall' built on the north-east side of the church which has showed clear signs of collapse (again accentuated by faulty rainwater disposal). The diffused cracks, displayed mainly near arches and vaults, can therefore be ascribed to the typical static behaviour of the jack arches, and can be solved with operations of reinforcement to apply to the internal side of arches. All the other lesions are superficial, mainly due to the material decay that is mainly caused by the continuous infiltrations of rainwater, which scourged the Church for over 100 years.

6. REFERENCES

[1] Como. M. 2010. *Statica delle costruzioni storiche in muratura. Archi, volte, cupole, architetture monumentali, edifici sotto carichi verticali e sotto sisma*, Aracne: Roma

[2] Concu, G., De Nicolo, B., Mistretta, F., Pani, L. 2017. "Ultrasonic test methods for assessment of concrete strength during construction", *Proceedings of the 10th International Conference on Inspection, Appraisal, Repairs and Maintenance of Structures*, 83-88.

[3] Deidda M., Dessi A., Marras M., Vacca G. 2012. Laser scanner survey to cultural heritage conservation and restoration

[4] Del Panta, A. 1983. *Un architetto e la sua città. L'opera di Gaetano Cima (1805-1878) nelle carte dell'archivio comunale di Cagliari*, Cagliari: Edizioni della Torre, tavole 141-148

[5] Grazia Scano, M. 1997. Pittura e scultura dell'Ottocento, Nuoro

[6] Grillanda N., Manconi F, Stochino F, Cazzani A, Bondi F, Chiozzi A, Tralli A. 2017. "On the analysis of the stellar vault of Santa Maria del Monte in Cagliari". *AIP Conference Proceedings 1906* (1), 090008

[7] Grillo, S. M., Pilia, E., and Vacca, G. 2019. *Integrated study of the Beata Vergine Assunta dome with structure from motion and diagnostic approaches*, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W11, 579-585, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-579-2019, 2019

[8] Meloni P, Mistretta F., Stochino F., Carcangiu G. 2019. *"Thermal Path Reconstruction for Reinforced Concrete Under Fire", Fire Technology* 55(5), pp. 1451-1475

[9] Naitza, S. 1992. *Architettura del tardo '600 al classicismo purista*, Nuoro

[10] Olivito, R. S. 2009. Statica e Stabilità delle Costruzioni Murarie, Pitagora: Bologna

[11] Piras, M.V., Deias, L., Mistretta, F. 2010. "Vulnerability analysis of a reinforced concrete structure by visual inspection" (2010) *Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization - Proceedings of the 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, 2037-2042

[12] Sanjust, P., Mistretta, F., Vacca, G., Grillo, S.M., Deidda, G.P. e Pilia, E. 2018. "Gaetano cima e il pantheon di Guasila. La diagnostica applicata all'architettura. | Gaetano Cima and his pantheon in guasila. Diagnostics applied to architecture". In *Colloqui.AT.e 2018, Edilizia Circolare, Abstract book, Convegno Ar.tec, Cagliari 12-14 settembre 2018*, a cura di Cuboni, F, Desogus, G, Quaquero, E., 163-172. Montefalcone: Edicom Edizioni

[13] Stochino F., Mistretta F., Meloni P., Carcangiu G. 2017. "Integrated Approach for Post-fire Reinforced Concrete Structures Assessment", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 61(4). 56-71

una previsione del comportamento delle stesse nel prosieguo della vita di esercizio, raggiungendo, così, un giudizio sullo stato contemporaneo e prestazionale dell'edificio.
È stata dunque effetutata una campagna di indagini conoscitive riguardanti in particolare geometria, particolari costruttivi e materiali degli elementi utilizzati allo scopo di individuare i rapporti e i legami fra le varie parti che costituiscono il manufatto.
Note le caratteristiche geometriche e la tipologia degli elementi murari, al fine di studiare lo stato deformativo e tensionale dell'opera, è stato sviluppato un modello numerico ad elementi finiti dell'intera struttura. Le sollecitazioni e le deformazioni sono state calcolate con il metodo agli elementi finiti (FEM) dove la muratura è considerata come un continuo isotropo discretizzato con elementi finiti le cui caratteristiche meccaniche sono omogenizzate rispetto al singolo pannello murario. La chiesa è stata modellata con 23064 elementi piani di tipo plate a 4 nodi e 20 beam a 2 nodi. I plate sono elementi bidimensionali in grado di simulare sia il comportamento membranale (lastra) che flessionale (piastra), i beam rappresentano il comportamento dei pilastri (figure 5-6). Oltre ai carichi gravitazionali si sono considerati i carichi permanenti portati, come le coperture e la lanterna in sommità, i carichi accidentali come da normativa, i carichi da neve, i carichi da vento e sismici. La valutazione dell'azione sismica è stata eseguita con un'analisi modale con spettro di risposta (analisi dinamica lineare). La verifica dello stato di sforzo è stata eseguita secondo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb che si basa sull'ipotesi che la crisi del materiale si verifichi per il raggiungimento di un valore critico delle tensioni tangenziali. L'analisi strutturale, unita alla verifica della tipologia di fondazioni e del terreno di posa, ha consentito di escludere che l'opera sia interessata da difetti strutturali e fondali che inducono cimenti eccessivi sui materiali costruttivi. Le sollecitazioni statiche e dinamiche stanno inducendo quindi nelle strutture murarie, stati tensionali ampiamente al disotto dei limiti ammissibili, con il sistema fondale che risulta efficace per il contenimento delle azioni.

5. CONCLUSIONI

Lo studio interdisciplinare del monumento ha così permesso di delineare un quadro chiaro. L'analisi strutturale, unita alla verifica della tipologia di fondazioni e del terreno di posa, ha consentito di escludere che l'opera sia interessata da difetti strutturali e fondali che inducono cimenti eccessivi sui materiali costruttivi. L'unico elemento che desta preoccupazione è costituito dal muro di contenimento del terrapieno nel lato nord-est della Chiesa, che presenta evidenti segni di cedimento (anche in questo caso accentuato da un difettoso smaltimento delle acque meteoriche). Le diffuse lesioni presenti soprattutto in corrispondenza di archi e volte, sono da imputarsi al tipico cedimento delle piattabande, e possono essere ricostituite con interventi di rinforzo da applicare

[14] Vacca, G., Mistretta, F., Stochino, F., Dessi, A. 2016. Terrestrial laser scanner for monitoring the deformations and the damages of buildings" *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 41, 453-460
[15] Virdis, F., Puddu, T. 2003. *Gaetano Cima. Il tempio della villa di Guasila, documenti di archivio*, Dolianova: Grafica Parteolla

all'intradosso degli archi stessi. Le altre lesioni si configurano come superficiali, dovute in prevalenza al degrado materico causato soprattutto dalle continue infiltrazioni di acqua piovana, che hanno flagellato la Chiesa per oltre 100 anni.