

New analytical and interpretive methods for the structural restoration of historical masonry buildings: the case of the Pietà dei Turchini Church in Naples.

Federica Ribera*, Maurizio Angelillo, Fabio De Guglielmo

Highlights

In-depth fact-finding analyses can offer useful operational tools for the design of culturally conscious interventions.

Local repairs represent the best intervention method on masonry buildings whose box-like behaviour is not guaranteed.

The actual assessment of masonry structures must be translated into appropriate interpretive models. The testing on a real case represents the first verification of a new analysis method.

Structural verifications on well-executed buildings should be focused on their equilibrium.

Abstract

The critical analysis of the possible consolidations, conducted from the perspective of compliance with the principles of restoration and structural safety, arises as a necessary phase of the intervention project on historical masonry structures. The Church of *Santa Maria Incoronatella della Pietà dei Turchini* in Naples is a specific case on which a restoration was conducted: an original structural analysis program, based on an interpretive model in line with the actual static behaviour of masonry, is applied to better understand the crack pattern and verify the efficiency of a structural improvement aimed to mitigate the effects of a foundation settlement.

Keywords

Historical buildings, Masonry structures, Consolidation, Criteria, Intervention

1. INTERVENTION CRITERIA IN THE FIELD OF CONSOLIDATION

The numerous seismic events that happened in our national territory with particular frequency have always shown the particular fragility of the historical architectural heritage but also the over time ability of local craftsmen and cultures to experience new forms and techniques through the adoption of devices and solutions for repairing or preventing damage and collapses due to earthquakes.

This important cultural baggage was abruptly interrupted by the introduction of reinforced concrete, which was widely used in the strengthening of masonry structures with the consequent structural change over and the definitive loss of original material consistency.

Although the technical-scientific debate had long been aware of the made

Federica Ribera

DICIV – Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Salerno, via Giovanni Paolo II, Fisciano (Salerno) 132, 84084, Italia

Maurizio Angelillo

DICIV – Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Salerno, via Giovanni Paolo II, Fisciano (Salerno) 132, 84084, Italia

Fabio De Guglielmo

DICIV – Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Salerno, via Giovanni Paolo II, Fisciano (Salerno) 132, 84084, Italia

* Corresponding author
Tel.: +39-089-963415;
e-mail: fribera@unisa.it

mistakes and had brought the static consolidation in the architectural restoration discipline, in the engineering practice the authenticities of historical buildings, especially if not visible, are still too often sacrificed: hasty and invasive interventions prevail, which are indifferent to the respect of the structural configuration and mechanical properties of materials of buildings even when they are attentive to the preservation of their exterior and formal aspects.

The alteration of the static scheme of buildings is certainly not beneficial: in fact the retrofitting and repairing measures themselves have often caused irreversible damage to historical buildings by greatly disturbing the equilibrium states that structures naturally assumed [1].

Nevertheless our national technical standards were among the first to recognize the specificity of monumental buildings by introducing the notion of structural safety ‘improvement’ rather than ‘retrofitting’ and thus allowing, in these cases, to adopt targeted, localized and certainly less invasive interventions.

The wise principle of minimal intervention, which is also suggested by regulations (unfortunately only for prestigious buildings), is often overlooked, especially because of the lack of tools for correctly interpreting the actual behaviour of the masonry structures. In fact, the inadequacy of the commonly available structural calculation methodologies for understanding the actual load-bearing capacity, response to stress and settlements and often underestimated or misguided adaptation capacity of masonry structures is well known. Thus in the name of safety irreparable debacles are used to be perpetuated by incorporating or saturating masonry structures through reinforced concrete strengthening or using the most modern composite fibres (armed injections, reinforced concrete edge beams, walls and slabs, bondings, etc.), which at the first occasion of resistance to seismic actions end up causing new vulnerabilities in ancient structures, due to the mechanical and physical incompatibility of the used materials and the alteration of the original equilibrium of masses and masonry elements.

Therefore it is necessary to start with a proper approach methodology for the consolidation design of masonry buildings, by providing the inevitable phase of in-depth knowledge of the historical and structural aspects of the construction elements, in order to propose content and targeted interventions only where they are strictly necessary, after having compared the merits and defects of the possible types of consolidation.

In this sense the research and the development of new interpretive models for the structural analysis of masonry buildings, in order to prefigure their actual behaviour and verify the efficiency of the proposed interventions, can offer an important operational tool for the design of culturally conscious interventions

1. CRITERI DI INTERVENTO NELL'AMBITO DEL CONSOLIDAMENTO

I numerosi eventi sismici che si sono succeduti con particolare frequenza nel nostro territorio nazionale evidenziano ogni volta la particolare fragilità del patrimonio architettonico storico, ma anche, d'altra parte, le capacità nel tempo di maestranze e culture locali di sperimentare nuove forme e tecniche attraverso l'adozione di accorgimenti e soluzioni per riparare o prevenire i danni o i crolli da sisma.

Questo importante bagaglio culturale è stato bruscamente interrotto con l'introduzione delle tecniche di consolidamento in calcestruzzo armato, impiegate diffusamente e massicciamente nella campagine muraria degli edifici, con il conseguente stravolgimento del loro comportamento strutturale e la perdita definitiva della consistenza materiale originaria.

Nonostante che il dibattito tecnico-scientifico abbia da tempo preso atto degli errori commessi ed abbia ricondotto il consolidamento statico nell'alveo della disciplina del restauro architettonico, nella prassi la materia degli edifici storici, soprattutto se non visibile, è ancora troppo spesso sacrificata, prevalendo interventi frettolosi e invasivi che, seppure attenti alla conservazione degli aspetti esteriori e formali delle fabbriche, risultano indifferenti al rispetto della loro configurazione strutturale e delle proprietà meccaniche dei materiali. Lo stravolgimento dello schema statico degli edifici non è sicuramente benefico: spesso, infatti, gli stessi interventi volti ad adeguare o a riparare hanno causato danni irreversibili alle costruzioni storiche, turbando in maniera considerevole gli stati di equilibrio naturalmente assunti dagli edifici [1].

Eppure le norme tecniche nazionali sono state tra le prime a riconoscere la specificità degli edifici monumentali, introducendo il noto concetto di ‘miglioramento’ della sicurezza strutturale in alternativa a quello di ‘adeguamento’ e consentendo, quindi, in questi casi di adottare interventi mirati e localizzati e sicuramente meno invasivi.

Il saggio principio del minimo intervento, suggerito anche dalla normativa (purtroppo solo per gli edifici di pregio), viene invece il più delle volte disatteso soprattutto perché non si possiedono gli strumenti per una corretta interpretazione del reale comportamento degli elementi murari. È infatti nota l'inadeguatezza delle metodologie di calcolo strutturale usualmente disponibili per comprendere l'effettiva capacità portante, la risposta alle sollecitazioni e ai sedimenti strutturali e la possibilità di adattamento delle strutture murarie, capacità spesso sottostimate o travisate. In nome della sicurezza si perpetuano, allora, irrimediabili sfaceli, inglobando o saturando gli elementi murari con rinforzi in calcestruzzo armato o con l'impiego delle più moderne fibre in materiali compositi (iniezioni armate, cordoli, pareti e solette, placcaggi, ecc.), che alla prima occasione di prova di resistenza alle azioni sismiche finiscono per indurre nuove

based on careful historical-critical controls and aimed at preserving and protecting the historical-architectural heritage.

2. STRUCTURAL IMPROVEMENT AND LOCAL REPAIRS

Structural improvements may be addressed to individual parts of historical buildings. No coincidence that the Italian Technical Standards for Construction (2008) introduced local repairs, i.e. reinforcements or replacements of individual structural elements or parts of them which are not adequate to the function they should play, providing that the intervention does not significantly change the global behaviour of the structure.

Local repairs are aimed to satisfy equilibrium verifications or increase the resistance of building elements, and represent the best intervention method on buildings, which do not have a box-like behaviour. This is because, after a macroelement structural analysis, it is possible to configure firstly the consolidations for each part and in the next step the eventual connections between a component and the other one. If these measures are to be conducted on well-executed masonry buildings, they are aimed to ensure primarily the equilibrium. Instead as the resistance tests regard (they are essential for frame structures designed with safety factors rather reduced than those ones of massive masonry buildings), many difficulties would be found in the characterization of materials. This latter operation, among other things, usually remains linked to analytical approaches that do not allow to properly assessing the structural behaviour of historical buildings and therefore their results should be correctly interpreted if they should be accomplished.

It is appropriate to point out that masonry structures with few exceptions were mainly built to withstand compressive stresses and the cracks that occur because of the release of tensile stresses can usually be safely accepted as manifestations of new equilibrium alignments that structures attain [2].

Interventions aimed to prevent crack progressions are to be evaluated case by case, by identifying and preliminarily eliminating their cause. The typical traditional connection interventions for masonry structures through ligatures with metal tie rods coupled to interventions of crack compensation have proven over time the more effective and less invasive for the recovery of the structural continuity.

From the point of view of the conservation of morphological and material features of historical buildings, interventions which alter, conceal or erase substantial historical authenticities and can over time produce alterations in the structures such as to cause the disintegration of masonry must be avoided.

vulnerabilità nelle antiche strutture, dovute all'incompatibilità meccanica e fisica dei materiali impiegati nei consolidamenti e dallo stravolgimento dell'equilibrio originario delle masse e degli elementi murari.

Occorre ripartire, quindi, da una corretta metodologia di approccio al progetto di consolidamento degli edifici in muratura che passi per l'ineliminabile fase della conoscenza approfondita degli aspetti storici e strutturali degli elementi costruttivi, per poter proporre interventi contenuti e mirati solo laddove essi risultino strettamente necessari, dopo aver confrontato pregi e difetti delle differenti tipologie di consolidamento possibili.

In questo senso, la ricerca e la messa a punto di nuovi modelli interpretativi per l'analisi strutturale degli edifici in muratura, che consentano di prefigurarne il reale comportamento e di verificare l'efficacia degli interventi proposti, possono offrire un importante strumento operativo per il progetto di interventi culturalmente consapevoli, basati quindi su attenti controlli storico-critici, e finalizzati alla conservazione ed alla tutela del patrimonio storico-architettonico.

2. MIGLIORAMENTO STRUTTURALE E RIPARAZIONI LOCALI

Le operazioni di miglioramento strutturale possono essere, di regola, rivolte a singole parti della costruzione storica. Non a caso le Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008 hanno introdotto le riparazioni locali, intese come rafforzamenti o sostituzioni di singoli elementi strutturali o parti di essi, non adeguati alla funzione che dovrebbero svolgere, a condizione che l'intervento non cambi significativamente il comportamento globale della struttura.

Le riparazioni locali, volte a soddisfare verifiche di equilibrio o a incrementare la resistenza degli elementi costruttivi, rappresentano il miglior metodo di intervento sugli edifici che non presentano un comportamento scatolare, in quanto, a seguito dell'analisi strutturale per macroelementi, è possibile progettare dapprima i consolidamenti per ciascuna parte e, in fase successiva, gli eventuali collegamenti tra una componente e l'altra. Se realizzati su edifici costruiti 'a regola d'arte', tali interventi vanno finalizzati a garantire principalmente l'equilibrio, in quanto, nell'ambito delle verifiche di resistenza (fondamentali per le strutture intelaiate progettate con coefficienti di sicurezza piuttosto ridotti rispetto a quelli dei massicci edifici in muratura) si ritroverebbero molte difficoltà nella caratterizzazione dei materiali. Quest'ultima operazione, tra l'altro, resta solitamente legata ad approcci di analisi che non consentono di valutare correttamente il comportamento strutturale degli edifici storici e, pertanto, qualora dovesse essere compiuta, i suoi risultati andrebbero interpretati in maniera corretta.

È opportuno rimarcare che i compatti murari, salvo alcune eccezioni, sono stati costruiti per resistere principalmente a sforzi di compressione e le lesioni che si manifestano per il rilascio degli sforzi di trazione possono di solito essere

3. STRUCTURAL ASSESSMENT OF MASONRY BUILDINGS: FROM JACQUES HEYMAN'S ASSUMPTIONS TO A NEW ANALYSIS MODEL

While the current technical standards for construction contemplate structural improvements in restorations, the analysis and verification methods they offer are still closely linked to the elastic models for framed structures. Therefore, it is necessary to understand the actual behaviour of masonry constructions and translate it into an appropriate interpretive model.

The resistance due to the form is typical of historical buildings, and it derives from the substantially unilateral behaviour of masonry. Since the latter is a brittle material, with a very low and uncertain tensile strength, the structural elements consisted of it are designed almost exclusively to support compression stresses. These efforts result in local stresses, which are much lower than those that lead to the crushing collapse. Besides masonry is constituted in such a way that sliding is prevented: it is limited by frictional forces produced by compressive stresses on the horizontal joints, and it is impeded by the stagger of bricks or stones along the vertical direction [3].

On this basis, a very simple model for the analysis of masonry structures can be adopted. It is based on three basic assumptions that Jacques Heyman proposed in 1966 in his famous paper *The stone skeleton*: 1) masonry is unilateral, i.e. it is not resistant to traction; 2) it is indefinitely resistant to compression; 3) it does not slip on fracture surfaces [4].

The resolution of the difficulties connected with the mechanical description of brittleness and friction is obviously a necessary step to get a microscale knowledge of masonry: everyone who works with a certain level of detail in Material Engineering knows that the description of brittleness and friction is still one of the most difficult challenges of Modern Mechanics. However, the main strength of the unilateral model of Heyman, which is free of such difficulties, is its ability to make still valid predictions about the behaviour of masonry structures.

The original analysis model proposed for historical buildings allows testing their equilibrium configurations as a result of structural settlements. Masonry elements are schematized as a set of rigid blocks interconnected in the manner of kinematic chains through unilateral hinge joints in correspondence with the fracture lines. The input data are the values of the settlements to which the structure is subjected, the geometry of the construction elements and the specific weight of the materials encountered. The output is the set of the generalized displacements (translations and rotations) of each rigid block.

tranquillamente accettate, in quanto manifestazioni di un nuovo assetto di equilibrio raggiunto dalla struttura [2].

Interventi tesi ad arrestare il progredire delle lesioni sono da valutare caso per caso, individuando ed eliminando preliminarmente la loro causa. I tipici tradizionali interventi di collegamento delle compagine muraria, attraverso legature con catene metalliche accoppiate a interventi di sarcofagi delle lesioni, si sono rivelati nel tempo i più efficaci e i meno invasivi, ai fini della ricostituzione della continuità strutturale.

Da un punto di vista della conservazione dei caratteri formali e materiali degli edifici storici, vanno evitati gli interventi che alterano, nascondono o cancellano consistenti porzioni di materia storica autentica e che possono produrre nel tempo alterazioni delle compagine muraria tali da provocarne la disaggregazione.

3. VALUTAZIONE DELLA RISPOSTA STRUTTURALE DEGLI EDIFICI IN MURATURA: DALLE IPOTESI DI JACQUES HEYMAN AL NUOVO MODELLO DI ANALISI

Se da un lato le norme tecniche vigenti per le costruzioni contemplano per gli interventi di restauro il miglioramento strutturale, dall'altro i metodi di analisi e verifica proposti dalle stesse sono ancora strettamente legati ai modelli elastici per le strutture intelaiate. È necessario, pertanto, comprendere l'effettivo comportamento delle murature e tradurlo in un modello interpretativo appropriato.

La resistenza per forma, tipica delle costruzioni storiche, deriva dal comportamento sostanzialmente unilaterale della muratura. Essendo questa un materiale fragile, dotato di una scarsissima ed aleatoria resistenza a trazione, gli elementi strutturali da essa composti sono progettati quasi esclusivamente per sostenere sforzi di compressione. Tali sforzi determinano tensioni locali molto minori di quelle che portano al collasso per schiacciamento. La muratura, inoltre, è costituita in modo tale che siano impediti gli slittamenti. Sui letti orizzontali sono le forze d'attrito prodotte dalle compressioni a limitarli. Lungo i piani verticali è l'ingranamento tra i blocchi ad impedirli [3].

Partendo da queste premesse, è possibile adottare, per l'analisi delle strutture murarie, un modello molto semplice, basato su tre ipotesi elementari, che Jacques Heyman propose nel 1966 nel suo famoso articolo *The stone skeleton*: 1) la muratura è unilaterale, cioè non resiste a trazione; 2) è indefinitamente resistente alla compressione; 3) non slitta sulle superfici di frattura [4].

Risolvere le difficoltà connesse con la descrizione meccanica della fragilità e dell'attrito è ovviamente un passo necessario per ottenere una conoscenza della muratura alla microscala: tutti coloro che lavorano con un certo grado di approfondimento nell'ingegneria dei materiali sanno che la descrizione della fragilità e dell'attrito è ancora tra le più difficili sfide della meccanica moderna. Tuttavia, il principale punto

In a 2D analysis, it is assumed that the potential fracture lines are the interfaces among the blocks, which are represented by a number of polygons with defined perimeters. The interfaces are fixed, and the external loads, due to the own weights and the contribution of secondary structures, are translatable in conservative forces and moments applied in the centroids of each polygon. In particular, the weight forces are obtained by multiplying the specific weights of the materials per the volumes they occupy. The rigid blocks are ideally connected using unilateral and bilateral constraints, which are set on the interfaces. For each interface, it is possible to provide a bilateral constraint, i.e. a pendulum with its axis that is parallel to the interface, and two unilateral constraints, i.e. pendulums that are not resistant to traction. The bilateral constraint is represented by an equation which translates the no sliding hypothesis, that relates the generalized displacements of the blocks, with defined geometries, and the unilateral constraints, each of which is applied to one end of the interface, translate the hypothesis of no tensile strength, and they are represented by inequalities which involve the generalized displacements and exclude the interpenetration. The repertoire of the displacements, which are compatible with the assigned settlements, is usually very large. In this class, the displacement, which is actually performed by the structure, is that relating to the minimum potential energy.

Such a method allows interpreting the behaviour of masonry according to models that adhere to the original static scheme, and verify the efficiency of the proposing interventions by prefiguring their effects [5].

The testing on a real case, the Church of the *Pietà dei Turchini* in Naples, represents the first verification of the identified method.

4. THE STRUCTURAL RESTORATION INTERVENTION IN THE CHURCH OF THE PIETA' DEI TURCHINI

The Church of *Santa Maria Incoronatella della Pietà dei Turchini* is the current seat of the parish of the same name. It is an aisled building made up in tuff, and it is located in Via Medina in the old town of Naples. It has a Latin cross plan with the main entrance facing west. The interior has a single nave with five chapels on each side. The transept, the dome and the apse were added in the 1630s to the original plant, which dates back to the 1590s. The altar is localized in a forward position with respect to the apse, which rises together with the transept above a basement. This floor, privately owned, has a separate entrance in Via San Bartolomeo, in the east of the church, at a lower level than Via Medina [6].

di forza del modello unilaterale di Heyman, che si libera di tale difficoltà, è proprio la sua capacità di essere comunque in grado di fare previsioni valide sul comportamento della muratura.

L'originale modello di analisi, qui proposto per analizzare l'effetto di cedimenti di fondazione sulle costruzioni storiche, consente di verificare le loro configurazioni di equilibrio a seguito di cedimenti strutturali. I compatti murari sono schematizzati come un insieme di blocchi rigidi interconnessi a guisa di catene cinematiche e collegati da giunti a cerniera unilaterale in corrispondenza delle potenziali linee di frattura. I dati in ingresso sono il valore dei cedimenti a cui la struttura è sottoposta, la geometria degli elementi costruttivi e il peso specifico dei materiali riscontrati. I dati in uscita sono gli spostamenti generalizzati (traslazioni e rotazioni) di ciascun blocco rigido.

In un'analisi in due dimensioni si assume che le potenziali linee di frattura, ovvero le interfacce tra i blocchi, rappresentati da un certo numero di poligoni di perimetro finito, siano fisse e che i carichi esterni, dovuti al peso proprio e al contributo di strutture secondarie, siano traducibili in forze e momenti di tipo conservativo applicati nel baricentro di ciascun poligono. In particolare le forze peso sono ottenute moltiplicando i pesi specifici dei materiali per i volumi da essi occupati. I blocchi rigidi sono idealmente connessi tra loro mediante vincoli unilaterali e vincoli bilaterali fissati sulle interfacce. Per ciascuna interfaccia è possibile prevedere un vincolo bilaterale (assimilabile a un pendolo con asse parallelo all'interfaccia) e due vincoli unilaterali. Mentre il vincolo bilaterale è rappresentato da un'equazione che traduce lo scorrimento impedito, che mette in relazione gli spostamenti generalizzati dei blocchi, sfruttando le loro geometrie, i due vincoli unilaterali (assimilabili a pendoli non resistenti a trazione, ognuno dei quali è applicato a un'estremità dell'interfaccia), traducono l'ipotesi di non resistenza a trazione della muratura e sono rappresentati da disequazioni che coinvolgono gli spostamenti generalizzati, escludendo la compenetrazione tra i blocchi. Il repertorio degli spostamenti che sono compatibili con i cedimenti assegnati è di solito molto ampio. In questa classe lo spostamento effettivamente esibito dalla struttura è quello relativo al minimo dell'energia potenziale [5]. Un metodo siffatto consente di interpretare il comportamento delle murature secondo modelli aderenti allo schema statico originario e di verificare, poi, l'efficacia dell'intervento preposto prefigurandone gli effetti.

La sperimentazione su un caso concreto, la Chiesa della Pietà dei Turchini a Napoli, ha costituito una prima verifica del metodo individuato.

4. L'INTERVENTO DI RESTAURO STRUTTURALE NELLA CHIESA DELLA PIETA' DEI TURCHINI

La Chiesa di Santa Maria Incoronatella della Pietà dei Turchini, attuale sede dell'omonima parrocchia, è un edificio ad aula in muratura

The geometric analysis conducted on the church showed that the size of the architectural elements meets a certain modularity, in which the basic unit, that is repeated several times in order to provide balanced proportions of the building, is the double Neapolitan palm, i.e. about 52 centimetres. Another interesting finding was had by the comparison of the plan of the Church of the *Pietà dei Turchini* with that one of the Church of *Gesù* in Rome. The latter, built between 1568 and 1584, became a role model for all the Counter-Reformation churches. The two plants, appropriately scaled, almost overlap. Even when comparing elevations it is possible to identify a certain similarity, except for the type of coverage of the nave, which is a vault for the Church of *Gesù* and a flat ceiling for the Church of the *Pietà dei Turchini*, but only because the original barrel vault was replaced at a later date by a horizontal soffit [7].

The analysis of the crack pattern (fig. 1) leads back to a collapse mechanism due to a foundation settlement, which is larger in correspondence with the part of the church built in the seventeenth century (namely that one constituted by transept, dome and apse) that brings the northeast pylon of the dome to overturn both in parallel with the central axis of the church and in parallel with the axis of the transept. The kinematism justifies the cracks of the dome, which are due to the removal of the pier, and those on the floor, as well as those found in the vaulted left transept, which has an intrados crack at the crown and a vertical one outcropping on the bottom wall that continues in the basement. In the light of the considerations made because of the crack pattern survey, it seemed appropriate to conduct a structural analysis of the entire left sidewall, including both the arch of the damaged transept, and the northern walls of the nave and apse [7]. Thanks to the recognition of the plan and elevation modularity, the rigid blocks defined for the analysis were dimensioned according to squares with the side equal to the basic unit of 52 centimetres. The assigned foundation settlement were appropriately tailored, so to have a proper qualitative interpretation of the mechanism. It was also possible to insert a horizontal component of the settlements that was permissible because of the sloping foundation ground. Loads were evaluated by considering, in addition to the own weights, those ones due to the contribution of secondary structures (fig. 2). The results obtained from the model identified the hypothesized collapse mechanism, as they highlighted the cracks at the crown of the arch, the vertical cracks in the wall of the nave and a vertical crack in the basement, not perfectly corresponding to that of the real case, for obvious reasons linked to the chosen form of the blocks (fig. 3). The mechanism due to the settlement would have suggested an intervention

di tufo ubicato in via Medina, nel centro storico di Napoli. Presenta una pianta longitudinale a croce latina con ingresso principale rivolto a occidente. L'interno si presenta a navata unica, con cinque cappelle per lato. Il transetto, la cupola e l'abside furono aggiunti all'originario impianto di fine Cinquecento negli anni Trenta del XVII secolo. L'altare maggiore è collocato in posizione avanzata rispetto al fondo dell'abside, che, insieme al transetto, sorge al di sopra di un piano seminterrato. Questo, attualmente di proprietà privata, ha un ingresso indipendente in via San Bartolomeo, a est della chiesa, a quota inferiore rispetto alla via Medina [6].

Dall'analisi geometrica condotta sulla chiesa è emerso che le dimensioni degli elementi architettonici rispettano una certa modularità, in cui l'unità base, che è ripetuta più volte in maniera da dare proporzioni equilibrate all'edificio, è il doppio palmo napoletano, circa 52 centimetri. Altro interessante riscontro si è avuto dal confronto della pianta della Chiesa dei Turchini con quella del Gesù di Roma. Quest'ultima, realizzata tra il 1568 e il 1584, divenne modello esemplare per tutte le chiese della Controriforma. Le due piane, opportunamente scalate, vanno quasi a sovrapporsi. Anche nel confronto tra gli alzati è possibile individuare una certa similitudine, fatta eccezione per la tipologia di copertura della navata, che è a volta per la Chiesa del Gesù e a soffitto piano per la Chiesa dei Turchini, ma solo perché l'originaria copertura a botte fu sostituita in epoca successiva da un orizzontamento piano [7].

L'analisi del quadro fessurativo (fig. 1) riconduce a un meccanismo di danno dovuto a un cedimento fondale di estremità, di entità maggiore in corrispondenza della parte della chiesa realizzata nel XVII secolo, ovvero quella costituita da transetto, cupola e abside, che porta il pilone nord-est della cupola a ribaltare verso l'esterno sia in direzione parallela all'asse centrale della chiesa che in direzione parallela all'asse del transetto. Il kinematismo giustifica le lesioni della cupola, che si fessura a causa dell'allontanamento del piedritto, e quelle a pavimento, nonché quelle riscontrate nel transetto sinistro voltato, che presenta una frattura intradossale in chiave e una verticale affiorante sulla parete di fondo, che prosegue nel piano seminterrato.

Alla luce delle considerazioni fatte a seguito del rilievo del quadro fessurativo, è sembrato opportuno condurre un'analisi strutturale dell'intera parete laterale sinistra, comprendendo sia l'arcone del transetto lesionato, sia le pareti nord dell'aula e dell'abside [7]. Riconosciuta la modularità sia in pianta che negli alzati, i blocchi rigidi definiti per l'analisi sono stati dimensionati secondo quadrati di lato pari all'unità base di 52 centimetri. I sedimenti fondali assegnati sono stati opportunamente calibrati, in modo da poter avere una lettura qualitativa corretta del kinematismo. È stato possibile inserire anche una componente orizzontale dei sedimenti, ammissibile per la presenza di un terreno di fondazione in pendenza. I carichi sono stati stimati considerando, oltre ai pesi propri,

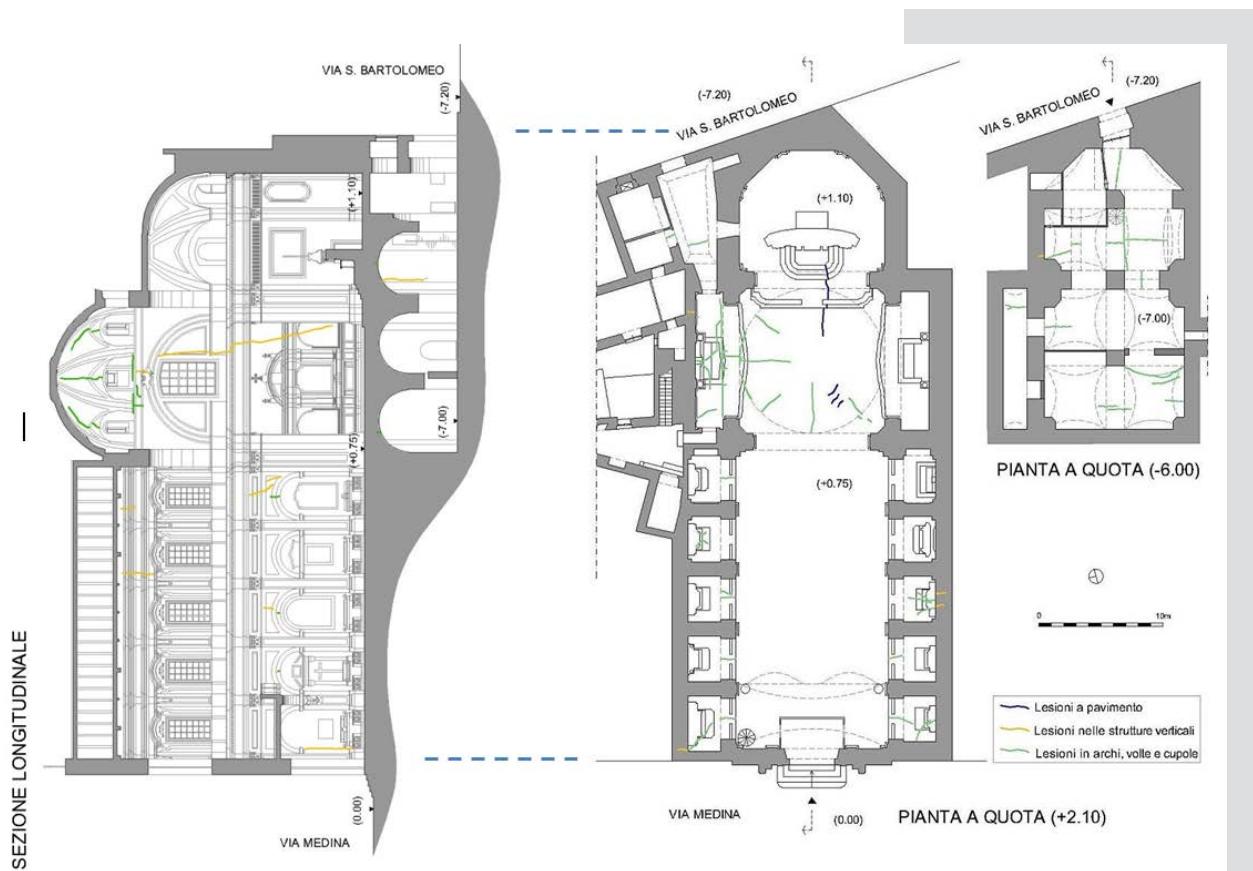


Figure 1: Crack pattern (plans and longitudinal section).

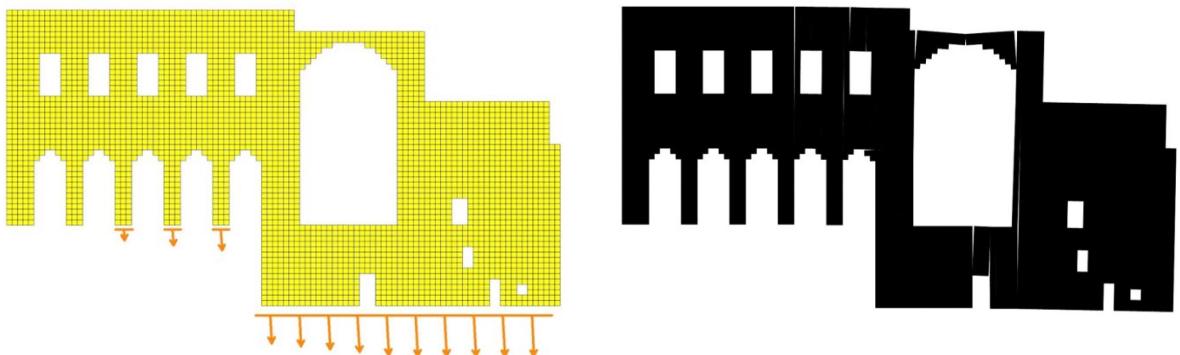


Figure 2 (left): Schematization of the northern wall of the church before the intervention, with localization of the foundation settlement.
 Figure 3 (right): Identification of the cracks as a result of the settlement before the insertion of the tie rod.

aimed at consolidating the foundations of the structure. However whereas the mechanism has evolved very slowly, it was not necessary to resort to such an intervention which among other things would have required rather onerous costs and relatively long times.

The need to suddenly safe the stucco decorations of the transept arch, which risked the collapse because of their closeness to the cracks, suggested to operate in 'emergency' to prevent the evolution of the mechanism linked to mutual removal of the abutments, and to also solve the cracking problem of the dome, to which a more stable support would have been guaranteed [6].

quelli dovuti al contributo delle strutture secondarie (fig. 2). I risultati ottenuti dal modello hanno individuato il meccanismo di danno ipotizzato, in quanto hanno evidenziato l'apertura in chiave dell'arcone, le lesioni verticali delle pareti dell'aula e una lesione verticale nel seminterrato, non perfettamente corrispondente a quella del caso reale, per ovvi motivi legati alla forma dei blocchi scelta (fig. 3). Il meccanismo dovuto al cedimento fondale avrebbe suggerito un intervento mirato al consolidamento delle strutture di fondazioni. Tuttavia, considerando che il cinesimismo si evolve molto lentamente, non è stato necessario ricorrere a un tale intervento, che, tra l'altro, avrebbe richiesto costi piuttosto onerosi e tempi relativamente lunghi.

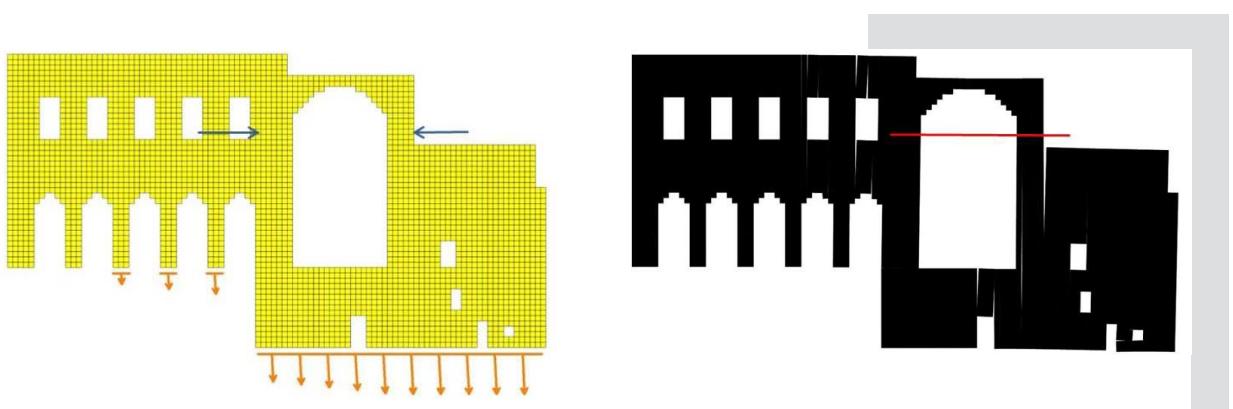


Figure 4 (left): Schematization of the northern wall of the church after the intervention, with localization of the foundation settlement and the forces related to the inserted tie rod.

Figure 5 (right): Identification of the cracks after the insertion of the tie rod.

The insertion of a metal tie rod would have respected the restoration criteria and satisfied the cheapness and timeliness requirements. However, before its realization, a control on its efficiency was operated through a second analysis, conducted with the new model. On the same set of rigid blocks defined above, the effect of the tie rod, arranged at the height of the arch springing, was inserted through the addition of two equal and opposite concentrated forces, which were applied to the prepared location of the anchor plates (fig. 4). The analysis verified the efficiency of the intervention, which was then actually realized, as it demonstrated the absence of cracks at the arch crown at the expense of other cracks, which would have been opened in less 'dangerous' zones of the wall (fig. 5).

5. CONCLUSIONS

Monitoring the evolution of crack patterns remains an essential goal, which can be reached by an analysis methodology that takes into account the actual static behaviour of buildings. Relying on the mere observation of actual cases may not be sufficient and the interpretation of cracks should be checked through a computational procedure.

In order to achieve this objective, the original interpretive model represents an effective basis, on which specific powerful analysis tools for masonry constructions can be found. They would grasp the essential elements of the static behaviour of buildings, and they would shrink from the calculation procedures for framed structures, which involve the use of mechanical parameters whose values are hardly measurable in heterogeneous buildings such as the historical ones: even in the same masonry structure, different construction techniques were used to be employed, and interventions altering the original address of loads were often used to be operated.

La necessità di mettere repentinamente in sicurezza gli apparati decorativi in stucco dell'arcone del transetto, che, posizionati in prossimità delle lesioni, rischiavano il crollo, ha suggerito di operare in maniera 'emergenziale' per impedire l'evoluzione del cinematismo legato all'allontanamento reciproco delle imposte, risolvendo, così, anche il problema legato alla fessurazione della cupola, a cui sarebbe stato garantito un appoggio più stabile [6]. L'inserimento di una catena metallica, oltre a rispettare i criteri del restauro, avrebbe soddisfatto i requisiti di economicità e tempestività. Prima di essere realizzato, tuttavia, è stato operato un controllo sulla sua efficacia attraverso una seconda analisi, condotta con il nuovo modello. Sullo stesso insieme di blocchi rigidi, precedentemente definito, è stato inserito l'effetto della catena, disposta all'altezza delle imposte dell'arco, attraverso l'aggiunta di due forze concentrate, uguali e opposte, applicate nella posizione predisposta dei capichiave (fig. 4). L'analisi ha verificato l'efficacia dell'intervento, effettivamente poi realizzato, dando come risultato l'assenza di lesioni in chiave dell'arco, a scapito di altre lesioni, che si sono trasferite in zone meno 'pericolose' della parete (fig. 5).

5. CONCLUSIONI

Monitorare l'evoluzione dei quadri fessurativi resta un obiettivo essenziale, raggiungibile attraverso una metodologia di analisi che tenga conto dell'effettivo comportamento statico degli edifici. Basarsi sulla mera osservazione di casi concreti potrebbe non essere sufficiente e l'interpretazione dei dissesti andrebbe verificata attraverso una procedura computazionale.

Al fine di perseguire tale obiettivo, l'originale modello interpretativo rappresenta una valida base su cui fondare un nuovo strumento di analisi specifico per le costruzioni in muratura, che sia in grado di cogliere gli elementi essenziali del loro comportamento statico e che si svincoli dalle procedure di calcolo impiegate per le strutture intelaiate. Queste, per giunta, prevedono l'utilizzo di parametri meccanici dai valori difficilmente misurabili in edifici

Besides the verifications that are to be performed on well-executed buildings should not be focused on their strength, which for masonry masses are often unnecessary, but on equilibrium. The theory developing the proposed interpretive model is based on this concept, and it is usable for various purposes.

The first one is to check the cracks in already damaged buildings and hence evaluate the equilibrium configurations also by taking into account the contributions supplied by the proposing structural improvement measures; this allows verifying the efficiency of technical operations according to their location and type.

The second purpose is to provide the possibility of preventing the damage: a careful survey, a verification of the rules of art, and a meticulous load analysis would be sufficient to define the geometry of a series of interconnected and suitably loaded rigid blocks. In this geometric model, a certain structural settlement will be assigned, and an automatic corresponding configuration of adaptation will allow recognizing the sought crack pattern of the structure.

6. REFERENCES

- [1] Carbonara G., *Avvicinamento al restauro. Teoria, storia, monumenti*. Napoli: Liguori, 1997.
- [2] De Guglielmo F., Ribera F., Angelillo M., *Analysis and consolidation of masonry vaults in the restoration of historical constructions*. In: Rehab 2015, 2nd International Conference on Preservation, Maintenance and Rehabilitation of Historical Buildings and Structures, Porto, Portugal, 22-24 July, 2015.
- [3] Angelillo M., Fortunato A., Frernali F., *Structural capacity of masonry walls under horizontal loads*. In: Ingegneria Sismica, 2014, 1, pp. 41-49.
- [4] Heyman J., *The stone skeleton*. In: International Journal of Solids and Structures, 1966, 2/2, pp. 249-279.
- [5] De Guglielmo F., Angelillo M., Ribera F., *Masonry walls between Art and Science: historical building techniques and structural analysis according to Heyman's assumptions*. In: SAHC 2014, 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Mexico City, Mexico, 14-17 October, 2014.
- [6] Ribera Ferraro D., Progetto di restauro della chiesa di Santa Maria della Pietà dei Turchini (detta di Santa Maria dell'Incoronatella), client: Archbishop's Curia of Naples, Historical reports, 2010-2014.
- [7] De Guglielmo F., *Le murature tra arte e scienza: linee guida per il recupero degli edifici ad aula* [doctoral thesis], Fisciano (Salerno): University of Salerno, 2016.

così eterogenei come quelli storici, per i quali sono state impiegate differenti tecniche costruttive, anche nello stesso manufatto, e sono stati operati interventi che spesso hanno alterato l'originario indirizzo dei carichi.

Le verifiche che sono da compiessi sulle costruzioni realizzate 'a regola d'arte', tra l'altro, non vanno focalizzate sulla resistenza, che per le masse murarie risultano il più delle volte superflue, ma sull'equilibrio. Ed è su questo concetto che si basa la teoria su cui è stato messo a punto il modello interpretativo proposto, utilizzabile per varie finalità.

La prima è quella di risalire ai disegni di edifici già danneggiati, per poi valutare le configurazioni di equilibrio tenendo conto anche dei contributi forniti dagli interventi di miglioramento strutturale da proporre, verificandone, quindi, l'efficacia a seconda della localizzazione e della tipologia di consolidamento adottato.

La seconda finalità è quella di fornire la possibilità di prevenire il danno: un attento rilievo, accompagnato a una verifica delle modalità costruttive e ad un'analisi dei carichi meticolosa, è sufficiente per definire la geometria di una serie di blocchi rigidi opportunamente caricati, da interconnettere a guisa di catene cinematiche. A tale modello geometrico verrà assegnato un determinato cedimento strutturale, a cui corrisponderà, in maniera del tutto automatica, una configurazione di assestamento, dalla quale sarà possibile riconoscere il quadro fessurativo della struttura ricercato.