

Instrumental analysis and operational protocols for the evaluation of the quality of construction

Riccardo Gulli^a, Luca Guardigli^a, Giovanni Mochi^{a*}

Highlights

All research paths presented in this paper are focused on the application of new technologies toward the definition of new restoration intervention criteria in building heritage. Laser scanning and digital thermography allow acquiring large amounts of data that can be processed at a later stage after the on-site survey. The precise definition of protocols, which are presented here, allows making operations repeatable and comparable even if applied at different times and in different contexts. The aim is to overcome a deterministic approach linked to sectorial knowledge and define a new qualitative approach, expeditious, but none the less accurate.

Abstract

The paper shows three examples of research carried out at the University of Bologna which have the aim of defining the procedures for adapting the performance levels and using instrumental analysis and operational protocols according to innovative methodological criteria. Their specificity lies mainly in the attention directed toward those aspects of existing buildings that usually can not be investigated exclusively with quantitative methods. The three lines of research relate to: the expeditious assessment of the seismic vulnerability of building aggregates, the study of wide span wooden roofs in some churches of Bologna and the identification of hidden masonry textures through the use of the thermal imager.

Keywords

Qualitative operational protocols, 3d laser scanning, digital thermography, expeditious assessment

1. INTRODUCTION

The definition of operational criteria for existing buildings that are both effective and respectful of the nature of the objects on which it is intended to work requires a thorough knowledge of the characteristics of these buildings. In this field, the contribution provided by the technical culture has great importance, as long as it is considered the heritage of knowledge associated with the construction that consists of expertise, having both theoretical and applied nature, covering a broad spectrum of skills.

For these purposes it is considered necessary to investigate the construction features of existing assets trying to define quality levels and not only the quantitative parameters, or rather investigate the technical and construction solutions in their entirety, not necessarily using the predetermined interpretive

Riccardo Gulli

DA - Dipartimento di Architettura,
Università di Bologna, viale
Risorgimento 2, Bologna, 40100,
Italia

Luca Guardigli

DA - Dipartimento di Architettura,
Università di Bologna, viale
Risorgimento 2, Bologna, 40100,
Italia

Giovanni Mochi*

DA - Dipartimento di Architettura,
Università di Bologna, viale
Risorgimento 2, Bologna, 40100,
Italia

* Corresponding author
Tel.: +39-51-2093182;
Fax: +39-51-2093155;
e-mail: giovanni.mochi@unibo.it

schemes

The term “quality” refers, in addition to a synthetic vision in which blend different properties of the construction, to the definition of a value scale or to a shared interpretive framework that derives from the recognition of the efficacy, or from the compliance with certain requirements that some situations analysed previously showed becoming thus common heritage of a technical-scientific community.

These investigations must be carried out through the application of analytical protocols, often aided by tools able to identify characteristics, forms, detailed solutions useful to represent the analysed objects and to understand their behaviour in certain situations

Through this method, it is possible to envisage solutions and intervention criteria that tend to ensure the achievement of certain performance or the reaching of predetermined targets

Construction, like many social phenomena, is in fact strongly conditioned by contextual elements. A merely classificatory analysis, aimed at identifying significant features based on the recognition of a belonging to a well-defined set of already known elements, could not lead to a proper interpretation of the phenomena to which it is connected. At the same time, for those who must work on ancient buildings, being able to determine the greatest number of possible relationships between their components is an essential goal, since the purpose is to attempt a description as complete and detailed as possible in order to develop subsequently effective intervention hypothesis.

On the other hand, this does not mean that an analytical approach should avoid completely the classification criteria not allowing using the knowledge already acquired. The recognition of the qualities of a building is the activity through which the general scope can be understood or, in other words, the framework in which there are cases already analysed and studied that can provide useful information. Quantitative analysis is therefore required to understand some aspects and performance of buildings, not otherwise describable in qualitative terms only

The giving up to a descriptive vision of reality threatens to eliminate the differences in the characterization of the objects that are usually the evidence of relationships that connect, continuously, every constructive episode to other similar and those to the reference context.

The cases discussed below show how the adherence to the will of describing a reality consisting of objects in relation to each other, although different, can offer interesting insights as long as the research tends to be inclusive of different methodological approaches. In these cases the use of rational operating

1. INTRODUZIONE

La tesi sostenuta nel presente contributo è incentrata sulla necessità di articolare la conoscenza intorno alla costruzione al fine di definire con maggiore completezza l'identificazione dei criteri di intervento efficaci e rispettosi della natura degli oggetti su cui si intende operare. In questo ambito grande rilevanza assume l'apporto fornito dalla cultura tecnica, qui intesa come patrimonio di conoscenze associate alla costruzione che si compone di saperi, di natura teorica ed applicativa, che coprono uno spettro ampio di competenze.

Per queste finalità si ritiene necessario indagare le caratteristiche costruttive del patrimonio esistente cercando di definirne livelli qualitativi e non solo parametri quantitativi, ovvero indagare le soluzioni tecnico-costruttive nella loro completezza, non ricorrendo necessariamente a degli schemi interpretativi predeterminati.

Il termine “qualità” rimanda, oltre che ad una visione sintetica in cui si fondono le diverse proprietà della costruzione, alla definizione di una scala valoriale o ad un quadro interpretativo condiviso che deriva dal riconoscimento della efficacia, o della rispondenza a determinate esigenze di alcune situazioni analizzate in precedenza e divenute patrimonio comune di una comunità tecnico-scientifica.

Tali indagini devono essere condotte attraverso l'applicazione di protocolli analitici, anche coadiuvati da strumentazioni che consentano di individuare caratteristiche, forme, soluzioni di dettaglio utili a rappresentare gli oggetti analizzati e a comprendere i loro comportamenti in determinate situazioni.

Attraverso questa metodologia è possibile ipotizzare soluzioni e criteri d'intervento che tendano a garantire l'ottenimento di determinate prestazioni o il raggiungimento di prefissati obiettivi.

La costruzione, come molti fenomeni sociali, è infatti condizionata fortemente da elementi contestuali. Una sua analisi puramente classificatoria, tesa cioè ad individuare elementi significativi in base al riconoscimento di un'appartenenza ad un ben definito insieme di elementi già noti, rischia di non riuscire a offrire una corretta interpretazione dei fenomeni a cui essa si collega; nel contempo, per coloro che devono intervenire sugli edifici del passato, costituisce un elemento essenziale il riuscire a determinare il maggior numero di relazioni possibili tra le loro componenti, poiché lo scopo è quello di tentare una descrizione il più possibile completa e dettagliata per poter successivamente formulare efficaci ipotesi d'intervento.

D'altra parte ciò non significa che un approccio analitico debba rifuggire totalmente da criteri classificatori in quanto ciò non permetterebbe di far tesoro delle conoscenze già acquisite. Il riconoscimento delle qualità di un manufatto è l'attività attraverso cui si riesce a comprendere l'ambito generale o se si vuole il quadro di riferimento all'interno del quale esistono casi già analizzati e studiati che possono fornire utili indicazioni. Altre analisi di tipo quantitativo

protocols, also based on the innovative use of diagnostic instrumentation and measurement tools, provides a knowledge of qualitative aspects on existing buildings that is essential for the definition of interventions aimed at updating the performance levels.

2. THE THREE RESEARCH PATHS

In the following are presented three lines of research, active inside the research group of Technical Architecture of the University of Bologna, in which the preconditions explained above put into effect through a series of investigations, even of experimental kind, aimed at understanding few important aspects of the historical architectural heritage. The exposition follows a hierarchy dictated by a development at different dimension that goes from the urban scale to that of the building ending up to the construction elements.

2.1. THE SEISMIC VULNERABILITY OF HISTORICAL BUILDING AGGREGATES

The interest in building restoration in seismic area constitutes a specific research topic in the Department of Architecture into the University of Bologna [2] [3] [4]. Within this theme, the problem of building aggregates constitutes one of the issue of greater complexity.

For some years now this topic is a necessary reference for studies involving the mitigation of seismic risk of our historic built heritage; the current national regulations in the field of construction requires that interventions on the individual structural units should be anticipated from a careful analysis of the entire construction aggregate. A shared methodology, capable to be applied effectively, does not yet exist nowadays.

There is another critical element regarding these methods of behavioural analysis of an entire aggregate; it concerns the ineffectiveness of an engineering approach, which resolves itself into a numerical modelling of the entire complex. A concrete contribution to overcoming this impasse can be represented by the development of an operational methodology towards the recognition that the possible damage modes depend on the geometrical shape, on the constructive characterization and on the historical evolution process of an aggregate.

According to Giuffrè studies, through the analysis of this data is possible to obtain useful information on probable damage scenarios because it has been recognized that the dependence of the breaking mechanisms in the wall

sono necessarie a comprendere alcuni aspetti e prestazioni degli edifici non altrimenti descrivibili in soli termini qualitativi.

La rinuncia ad una visione descrittiva della realtà rischia di eliminare le differenze nella caratterizzazione degli oggetti che solitamente sono i segni delle relazioni che collegano,

Nei casi che vengono di seguito discussi si mostra come l'adesione alla volontà di descrivere una realtà costituita da oggetti in relazione tra loro, seppur diversi, può offrire spunti di riflessione interessanti quando l'attività di ricerca tende ad essere inclusiva anche di approcci metodologici diversi. In essi l'utilizzazione di protocolli operativi razionali, basati anche sull'utilizzo innovativo di strumentazioni diagnostiche e di misura, fornisce una conoscenza di aspetti qualitativi dell'edificato esistente che si ritengono essenziali per la definizione di interventi tesi ad aggiornare i livelli prestazionali.

2. I TRE INDIRIZZI DI RICERCA

Vengono di seguito esposte alcune linee di ricerca, attive all'interno del gruppo di ricerca di Architettura Tecnica dell'Università di Bologna, in cui le premesse svolte sopra si concretizzano in una serie di indagini, anche sperimentali, tese alla comprensione di alcuni aspetti rilevanti del patrimonio edilizio storico. L'esposizione segue una gerarchia dettata da un'articolazione multiscalare, che passa dalla scala urbana, a quella dell'edificio, fino agli elementi costruttivi.

2.1. LA VULNERABILITÀ SISMICA DEGLI AGGREGATI EDILIZI STORICI

L'interesse verso il recupero edilizio in ambito sismico costituisce da anni uno specifico argomento di ricerca nella sede bolognese [2] [3] [4]. Esso trova nella problematica degli aggregati edilizi uno dei punti di maggiore complessità.

Oramai da alcuni anni questo argomento costituisce un necessario riferimento per gli studi intorno alla mitigazione del rischio sismico del nostro patrimonio edilizio storico; l'attuale quadro normativo nazionale nel settore delle costruzioni impone che gli interventi nelle singole unità strutturali vengano anticipati da un'attenta analisi dell'intero organismo edilizio in aggregato che le contiene. Ma a fronte di ciò, ad oggi non esiste una metodologia condivisa da applicare in maniera efficace.

Oltre a ciò esiste un ulteriore elemento critico riguardante le modalità di analisi del comportamento dell'intero aggregato, vista l'impossibilità e l'inefficacia di un approccio ingegneristico spinto verso la modellazione numerica dell'intero complesso. Un concreto contributo al superamento di tale impasse può essere rappresentato dalla messa a punto di una metodologia operativa tesa al riconoscimento delle possibili modalità di danneggiamento in virtù della conformazione geometrica, della caratterizzazione costruttiva e del processo di evoluzione storica dell'edificato.

Secondo la lezione di Giuffrè,

structure is linked to the overall quality of construction aggregate [2] [3] [4] [5] [6].

The proposal, on which we are working through further refinements, is based on the definition of quantitative indexes that tend to estimate higher or lower propensity to damage. These indexes are therefore useful to draw up rankings to be extended to entire agglomerations, in order to define vulnerability levels and allow the management and monitoring of the interventions on the individual units.



Figure 1. Ortophoto extracted from point clouds related to certain aggregates of the historic centre of San Giovanni in Persiceto (by Davide Prati).

It is thus essential to achieve, in a quite short time, the definition of all geometric and constructive characteristics of building blocks that need to be analysed. As things stand, only a few municipalities have systematic surveys of the existing historic building aggregates in their territory. To bypass this problem, in the developed methodology, in addition to advancing a solution in terms of determination of vulnerability indexes, it has been inserted a protocol aimed at obtaining necessary information for the establishment of the basic geometry of studied buildings.

This is based on the on-site survey of facades of aggregates with 3D laser scanner and the acquisition of documents in the municipal archives and territorial agencies offices, in order to obtain geometric data of each aggregate. Through a series of experiments conducted on real cases, it was possible to establish a level of definition of the obtained representation by the laser instrumentation capable to combine the accuracy with the speed of acquisition. Through the study of archival material and the reading of bibliographies on the historical events that took place in the analysed contexts, some hypotheses could be made on the series of transformations that led from the initial built systems to the current situation. On this basis, it is then possible to estimate building transformations, in plan and elevation, which allow enriching the

analizzando questi dati è possibile ricavare utili informazioni sugli scenari di danno probabili poiché è stata riconosciuta la dipendenza dei meccanismi di rottura della compagine muraria dalla qualità edilizia complessiva dell'aggregato [2] [3] [4] [5] [6].

La proposta avanzata, su cui si sta lavorando per affinamenti successivi, si basa sulla definizione di indici quantitativi che tendono a stimare la maggiore o minore propensione al danno e quindi utili a stilare graduatorie da estendere ad interi agglomerati, al fine di definire livelli

di proprietà e consentire la gestione ed il monitoraggio degli interventi sulle singole unità.

Risulta, a tal proposito, di fondamentale importanza giungere in tempi sufficientemente ristretti alla definizione delle caratteristiche geometriche e costruttive degli edificati da sottoporre ad indagine. Allo stato attuale solo alcune amministrazioni comunali possiedono rilievi sistematici degli aggregati edilizi storici presenti nel loro territorio; per tentare di risolvere questo problema, nella metodologia studiata, oltre ad avanzare una soluzione in termini di determinazione di indici di vulnerabilità, è inserito un protocollo operativo mirato ad ottenere le informazioni necessarie alla costituzione della base geometrica di lavoro.

Questo si basa sul rilievo dei prospetti degli aggregati attraverso l'utilizzo del laser scanner 3D e sull'acquisizione di documentazione presso gli archivi degli uffici comunali e delle agenzie del territorio locali, per giungere all'ottenimento dei dati geometrici di ogni aggregato. Attraverso una serie di sperimentazioni condotte su casi reali si è potuto definire un livello di definizione della rappresentazione ottenuta tramite la strumentazione laser tale che si riesca a coniugare la precisione con la rapidità di acquisizione.

Attraverso lo studio di materiale archivistico e dalle bibliografie sulle vicende storiche dei contesti analizzati, si può giungere a ipotizzare la serie delle trasformazioni che, dagli impianti iniziali, porta alla situazione

analysis with the assessments on the disconnections of the walls and on the superelevation underwent by these buildings.

The constructive characterization is obtained through inspections in situ, and bibliographic researches. In the third path of research presented in this contribution a testing launched will be illustrated that aims, through instrumental analyses, to obtain additional information for the determination of masonry solutions used in historical walls covered with plaster.

attuale. Su tale base si vanno quindi a stimare le trasformazioni edilizie, in pianta ed in alzato, che permettono di arricchire l'analisi con le valutazioni sulle disconnessioni murarie e sulle sopraelevazioni subite dagli edifici. La caratterizzazione costruttiva dell'edificio è ottenuta attraverso sopralluoghi in situ e ricerche bibliografiche. Nella terza linea di ricerca esposta nel presente contributo si illustrerà una sperimentazione avviata che mira, attraverso analisi strumentali, ad ottenere delle informazioni ulteriori

Isolati	Indice globale analitico di vulnerabilità
Pergola 3	55,2
Pergola 2	52,9
Carpi 19	41,2
Carpi 49	36,7
Carpi 36	35,9
Crevalcore XVIII	35,0
San Felice sul Panaro	34,5
San Giovanni in Persiceto 7	32,3
Castelfranco Emilia 3	31,6
Castelfranco Emilia 14	31,1
San Giovanni in Persiceto XI	30,5
Mirandola 27	29,9
Castelfranco Emilia 12	29,9
Lanciano C16	28,7
San Giovanni in Persiceto XIII	28,1
Lanciano C17	26,4
Castelfranco Emilia 15	26,3
Castelfranco Emilia 5-6	26,0
San Giovanni in Persiceto XII	25,2
San Giovanni in Persiceto 18	24,0
San Giovanni in Persiceto XIV	21,4
San Giovanni in Persiceto X	20,4

San Giovanni in Persiceto	
Isolati	Indice globale analitico di vulnerabilità
Isolato 7	32,3
Isolato XI	30,5
Isolato XIII	28,1
Isolato XII	25,2
Isolato 18	24,0
Isolato XIV	21,4
Isolato X	20,4



Figure 2. Classification of vulnerability of some building aggregates highlighting the position of the blocks 7 and 18 of the historic centre of San Giovanni in Persiceto (by Giulia Rastelli).

At present research has allowed to analyse various aggregates in different Italian regional contexts; the study of the vulnerability of the entire historic centre of Mirandola is already complete (MO) and the analysis on all the historical aggregates of Castelfranco Emilia (MO) and San Giovanni in Persiceto are about to be finished (BO).

The study on the historical centre of Mirandola, in particular, has shown how this methodology for estimating the vulnerability finds the concrete results in a real damage scenario: in fact, after the earthquake of 2012, the damage suffered by buildings of the historic centre has been measured. Subsequently these surveys were compared with the damage scenarios obtained through the application of the proposed methodology. From this comparison

circa la determinazione delle soluzioni d'apparecchio utilizzate nelle murature ricoperte da intonaci. Allo stato attuale la ricerca ha portato ad analizzare numerosi aggregati di diversi contesti regionali italiani; inoltre è stato completato lo studio della vulnerabilità dell'intero centro storico di Mirandola (MO) e sono in via di completamento le analisi sulla totalità degli aggregati storici di Castelfranco Emilia (MO) e San Giovanni in Persiceto (BO). Lo studio su Mirandola, nello specifico, ha mostrato come questa metodologia di stima della vulnerabilità trovi dei riscontri concreti nello scenario di danno reale: infatti, a valle del sisma del 2012, sono stati rilevati i danneggiamenti degli edifici del centro storico per poi confrontarli con gli scenari di danno ottenuto dall'applicazione della metodologia proposta. Da questo confronto emerge come sia effettivamente possibile

clearly emerges that it is effectively possible to forecast assessments on the vulnerability in order to plan and manage the security of the ancient built heritage.

2.2. THE INVESTIGATION ON WOODEN ROOFING IN SOME IMPORTANT CHURCHES IN BOLOGNA

Starting from the observation that some original constructive solutions of considerable extent are still present in some religious buildings of the sixteenth and seventeenth centuries, two years ago began a research that aims to understand what the technical characteristics of these construction systems are and test their state of conservation through time. The first problem to which find an answer was the complexity of a survey to be carried out in difficult conditions, working in the roofing and then having only curved surfaces to stand on (the extrados of the vaults covering interior spaces) and having to acquire a considerable amount of data because of the large dimensions of these constructions. It was thus decided to use a 3D laser scanner that allows, in a limited working time, to acquire a considerable amount of documentation, both quantitative and qualitative, retaining, at the same time, the complete traceability of the measured data, also for uses delayed in time.

The first example studied was the roofing of St. Peter's cathedral in Bologna, an exceptional space that, excluding the presbytery, measures 25 m wide and 60 m long. All 18 wooden trusses appear to be the wider in span, if not the widest, among those existing nowadays in Italian religious buildings. The use of 3D laser scanning made it possible to capture all the data in just two working days, during which it was also conducted a photographic campaign additional to the one obtainable by default with laser instrumentation. The next post-production phase has allowed obtaining a model consisting of a point cloud of the entire roof, including, in addition to the space above the aisle, also the one above the apse. Through this data, it was possible to get a complete and detailed representation of all the wooden structures and the hardware used in the connections between all the rods of the trusses. On this basis, it was then made the interpretation of survey data that showed that the solution used has no counterpart in literature, thus constituting a case in itself, unique in its kind. It is an unusual variant of Sangallo's truss where counter-rod, interrupted by the central king post, is transformed into two struts with minimum slope. This unique solution seems to be derived from an intuition of the manufacturer in order to allow on-site assembly of the wood tension members of this truss of unusual width.

ottenere preventivamente delle valutazioni sulla vulnerabilità in modo da pianificare e gestire la sicurezza dell'edificato diffuso.

2.2. LO STUDIO DELLE COPERTURE DELLE GRANDI CHIESE BOLOGNESI

A partire dalla constatazione della presenza di soluzioni costruttive originali di considerevole ampiezza in alcuni edifici di culto del Cinquecento e Seicento, da due anni è iniziata una ricerca che ha, quale obiettivo, quello di comprendere quali siano le caratteristiche tecniche di queste realizzazioni e saggiare il loro stato di conservazione nel tempo. Il primo problema a cui si è dovuta trovare una risposta è stato la complessità di un rilievo da condursi in condizioni non agevoli, operando nei sottotetti e quindi avendo solo superfici curve su cui muoversi (gli estrados delle volte che coprono gli spazi interni) e dovendo acquisire una mole di dati considerevole in ragione delle grandi dimensioni di queste costruzioni. La scelta è ricaduta nell'utilizzazione di un laser scanner 3D che permette, in un tempo limitato di operatività, di acquisire una notevole mole di documentazione, sia quantitativa, sia qualitativa, conservando la completa tracciabilità dei dati rilevati, anche per utilizzazioni differite nel tempo.

Il primo esempio studiato è stata la copertura della cattedrale felsinea di San Pietro, un eccezionale spazio che, escludendo la zona presbiteriale, misura 25 m in larghezza per 60 m in lunghezza. Le 18 capriate lignee risultano essere tra quelle di maggior luce, se non le più grandi, esistenti oggi in Italia nell'architettura religiosa. L'utilizzazione del laser scanner 3D ha permesso di acquisire tutti i dati in soli due giorni di lavoro, durante i quali è stata realizzata anche una campagna fotografica supplementare oltre a quella ottenuta con la strumentazione laser. La successiva fase di post-produzione ha permesso di ottenere un modello costituito da una nuvola di punti dell'intera copertura, comprendente, oltre allo spazio sopra la navata, anche quello sopra l'abside. Attraverso questi dati è stato possibile ottenere una rappresentazione completa e dettagliata di tutte le strutture lignee e della ferramenta utilizzata nei collegamenti tra le aste delle capriate. Su questa base si è poi operata l'interpretazione dei dati di rilievo da cui è emerso che la soluzione utilizzata non ha nessun riscontro in letteratura, costituendo quindi un caso a sé, unico nel suo genere; una variante singolare della capriata sangallescica in cui la controcatena, interrotta dal monaco centrale, viene trasformata in due puntoni a bassa inclinazione. Questa particolarissima soluzione sembra essere derivata da un'intuizione del costruttore per permettere il montaggio in loco dei legni di una capriata dall'ampiezza inusitata.

La puntuale registrazione della geometria di queste strutture ha permesso di comprendere i movimenti (traslazioni, rotazioni e deformazioni) che ne hanno interessato le varie componenti, oltre che consentire sia la comprensione del processo di montaggio sia delle operazioni



Figure 3. Roofing of St. Peter's Cathedral (shot by Stefano Lamborghini).

The precise recording of the geometry of this kind of structure has allowed to understand the movements (translations, rotations and deformations) that have affected its various tension members, as well as allowing the understanding both of the assembling process of the truss and of the operations for tightening and stringing of its various parts through the stirrups. The main movements showed by all members of each truss involved the lowering of the central king post, the rotations out of and in the plane of the lateral ones, and the inflection of the tie rod. In order to be able to identify these movements it was necessary to adopt reverse engineering methods carried out through software that can compare virtual models with real objects.

Without an operating protocol already defined and without a literature that would allow to compare these hypotheses with other similar cases, the qualitative analysis was in this case a necessary first step. For this kind of approach, each case stands on its own and should be related firstly to its context before forwarding a hypothesis that has to be verified later by means of numerical procedures. In this case, the quantitative analyses were divided into two groups: local and global ones. From the first group it was obtained detailed information on the movements of each element of a single truss, while from the second one it was defined the movements of every single

per il serraggio e la tesatura delle varie parti attraverso le staffature. I principali spostamenti accusati dagli elementi costituenti ciascuna capriata hanno riguardato la discesa del monaco centrale, le rotazioni fuori piano e nel piano di quelli laterali e l'inflessione della catena. Per riuscire a individuare tali movimenti si è ricorso ad una analisi con i metodi della reverse engineering attraverso l'utilizzo di software che consentono di confrontare modelli virtuali con gli oggetti reali.

In assenza di un protocollo operativo definito e anche di una letteratura che permettesse di confrontare le ipotesi avanzate con altri casi simili, l'analisi qualitativa è stata in questo caso un primo passo necessario. In un approccio di questo tipo, ogni caso è a sé stante e va relazionato prima di tutto al contesto per poi avanzare ipotesi da verificare successivamente attraverso procedimenti numerici. Nel caso in esame le analisi quantitative sono state suddivise in due gruppi: quelle locali e quelle globali. Dalle prime si sono ottenute informazioni dettagliate sui movimenti di ogni elemento di una singola capriata, mentre da quelle globali sono stati definiti gli spostamenti di ogni singola capriata rispetto alla componente muraria che costituisce il contorno dello spazio analizzato. Gli interventi proposti sono stati quindi quelli che, oltre a rispettare i criteri legati alla reversibilità ed alla compatibilità degli stessi, tendono a risolvere problemi e carenze mostrate da quella particolare soluzione costruttiva. Difficilmente con altre modalità

truss compared to the wall portion that constitutes the contour of the space analysed. Proposed interventions were therefore those that, in addition to meeting the criteria related to their reversibility and their compatibility, were able to solve problems and deficiencies shown by this particular construction solution. Hardly, the same information could have been obtained with other operating methods, and above all could have been recognized the uniqueness of this original solution.

operative si sarebbero potute ottenere le medesime informazioni e soprattutto riconoscere le particolarità di questa soluzione originale.

Altre tre coperture di altrettante chiese dello stesso periodo sono oggetto di studio in questo momento: San Salvatore Maggiore, San Giovanni in Monte e San Petronio. In questi casi viene utilizzato il medesimo protocollo operativo: ognuna di queste chiese presenta soluzioni di copertura particolari con diversi gradi di complessità. In nessuna sembrano essere applicabili gli

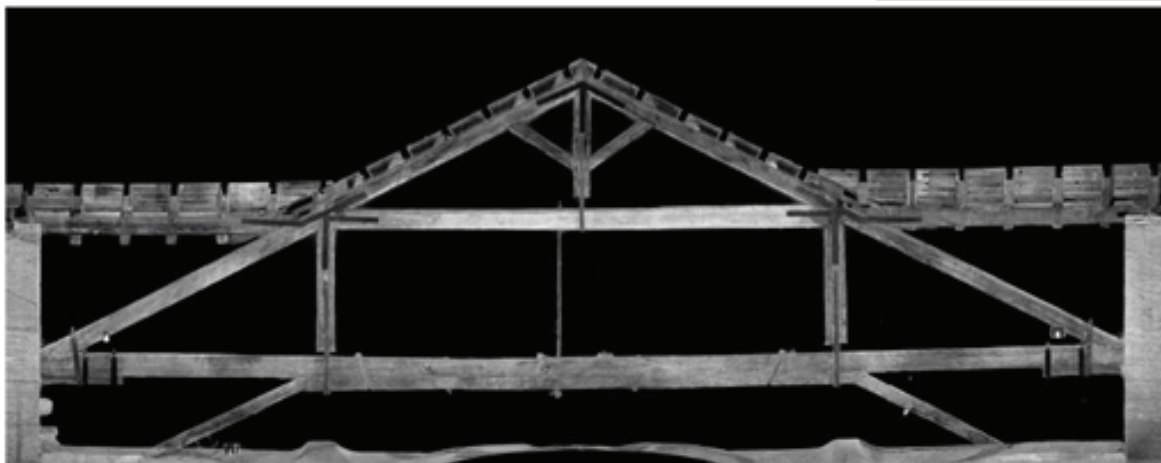


Figure 4. Orthophoto extracted from the point cloud of a truss in the church of San Salvatore Maggiore in Bologna (by Claudio Demattia).

Three more roofing of three churches built in the same period are being studied now: San Salvatore Maggiore, San Giovanni in Monte and San Petronio. Even in these cases, the same operating protocol is used: each of these churches presents particular roofing solutions with different degrees of complexity. In no one, the patterns deriving from manuals or literature seem to be applicable. The so-called Sangallo truss can establish at most a generic term of reference while the differences between real trusses and this model, and those between each truss with each other, make each identified solution unique. In particular San Salvatore Maggiore appears to be contemporary with the cathedral of St. Peter as edification (first half of the seventeenth century), as well as unique appears to have been the architect who designed them (Giovanni Ambrogio Mazenta). The solutions implemented appear, however, significantly different for at least two reasons: the type of truss used and the presence of brick columns that hold in some cases the trusses while, in other cases, directly the false-rafters. This truss differs from contemporary solution in St. Peter for the choice of using main rafters interrupted by lateral king posts. This reduces the hyperstatic degree of the structure, transforming the structural scheme into a pseudo-hypostatic one, with the consequent greater capacity of

schemi derivanti dalla manualistica o dalla letteratura. La cosiddetta capriata sangallescica può costituire al più un termine generico di riferimento mentre le differenze delle capriate reali con questo modello, e di quelle realizzate tra loro, rendono uniche ciascuna delle soluzioni riscontrate. In particolare San Salvatore Maggiore risulta essere coeva alla cattedrale di San Pietro come edificazione (prima metà del XVII secolo), così come unico sembra essere stato l'architetto che le ha progettate (Giovanni Ambrogio Mazenta). Le soluzioni poste in atto appaiono, però, significativamente diverse almeno per due ragioni: la tipologia di capriata utilizzata e la presenza di colonne in laterizio che in alcuni casi reggono le capriate, in altri casi direttamente dei falsi puntoni. La capriata differisce dalla coeva soluzione di San Pietro per la scelta di utilizzare puntoni interrotti dai monaci laterali. Così facendo si riduce il grado di iperstaticità della struttura, trasformando lo schema strutturale in uno pseudo-labile, con la conseguente maggiore capacità dei vari elementi di muoversi; ciò è da porre in relazione al fatto che questa chiesa è posizionata in una zona di Bologna in cui il consolidamento del terreno sotto i carichi provoca cospicui cedimenti fondali. Anche in questo caso, come in quello precedente, le soluzioni di intervento proposte sono derivate dalla puntuale analisi di ogni capriata e di ogni suo elemento costituente e sono calibrate anche in funzione delle relazioni esistenti tra le strutture ed il

the various members to move; this is to be related to the fact that this church is located in an area of Bologna in which the consolidation of the ground under loads causes significant foundation settlements. Even in this case, as well as in the previous one, the solutions of intervention proposed are derived from the precise analysis of each truss and of each of its constituent member and are calibrated depending on the relationship between the structures and the context that contains them.

2.3. THE USE OF THE CAMERA FOR THE DEFINITION OF THE MASONRY EQUIPMENT

The great importance ascribed to masonry quality in order to achieve significant levels of performance in terms of structural safety, even against seismic actions, requires the definition of analysis criteria for its careful identification and evaluation.

This becomes even more urgent in those cases in which, by this assessment, essential considerations are made in terms of estimation of seismic vulnerability of built heritage such as the method explained in the previous chapter.

As further proof of the importance of the masonry quality parameter, it is emphasized how the possibility to compare and evaluate situations related to aggregates coming from different geographical contexts is found precisely in a relationship established between the different observed masonry qualities that determine, through some algorithms under improvement, specific correction factors that allow standardizing assessments.

In many cases, the presence of external faces plastered hinders a proper assessment of the masonry quality; in addition to this it is believed that a significantly valid definition of this quality parameter cannot be isolated from the analysis, as well as of external walls, of those located in the inner parts of the historic building aggregates.

From this need, it has arisen the will to verify the possibility of using diagnostic tools already used in the measurement of different performance parameters: mechanical strength, thermal conductivity or the presence of moisture. At first, during the bibliographic research, the use of ultrasound and the GPR has been taken into account, but both were deemed unsuitable for the intended purposes because their use requires highly specialized staff in the execution of the survey and in the interpretation of results.

It was decided, therefore, to experiment the use of thermal imaging cameras inasmuch in literature there are many examples of investigations in which the use of this equipment has allowed to obtain information about the definition

contesto che le contiene.

2.3. L'UTILIZZO DELLA TERMOCAMERA PER LA DEFINIZIONE DELLE APPARECCHIATURE MURARIE

La grande importanza che viene data alla qualità della muratura ai fini del raggiungimento di livelli prestazionali significativi in termini di sicurezza strutturale, anche nei confronti di azioni sismiche, rende quanto mai utile la messa a punto di criteri di analisi tesi alla sua attenta individuazione e valutazione.

Ciò diviene ancor più urgente in quei casi dove, da questa valutazione, discendono essenziali considerazioni in termini di stima della vulnerabilità sismica del patrimonio costruito come nel caso della metodologia illustrata al punto precedente.

A ulteriore riprova di quanto si ritenga importante il parametro della qualità muraria, si sottolinea come la possibilità di confrontare e valutare situazioni relative ad aggregati provenienti da contesti geografici differenti viene individuata proprio in una relazione istituita tra le diverse qualità murarie riscontrate che determinano, attraverso degli algoritmi in via di precisazione, specifici coefficienti correttivi che permettono di uniformare le valutazioni.

La presenza in molti casi di paramenti esterni intonacati rende quanto mai difficile una valutazione cosciente della qualità muraria; oltre a ciò si ritiene che una definizione significativamente valida di questa componente non possa prescindere dall'analizzare, oltre che le murature esterne, anche quelle presenti nelle parti interne degli aggregati edilizi storici.

Da questa esigenza è nata la volontà di verificare la possibilità di utilizzare strumentazioni diagnostiche già impiegate nella misurazione di diversi parametri prestazionali: resistenze meccaniche, conducibilità termica o presenza di umidità. In un primo momento, in fase di ricerca bibliografica, sono stati presi in considerazione l'utilizzo degli ultrasuoni ed il georadar, ma entrambi sono stati ritenuti non idonei per gli scopi prefissati in quanto la loro utilizzazione richiede personale altamente specializzato nella esecuzione delle indagini e nella interpretazione dei risultati.

Si è deciso quindi di sperimentare l'utilizzazione di termocamere in quanto, in letteratura, sono presenti esempi di indagini in cui l'uso di questa strumentazione ha permesso di ottenere informazioni in merito alla definizione delle tessiture murarie storiche al di sotto di strati di intonaco.

Si è deciso, quindi, di avviare una sperimentazione specifica sulla possibilità di ricavare informazioni sulla conformazione delle cortine più esterne dei paramenti ricoperti da intonaci previo riscaldamento delle superfici. Il gradiente termico è apparso essere il parametro fondamentale per innescare un trasferimento di calore che può essere letto dalla strumentazione e quindi l'obiettivo da ottenere è stato individuato, in primo luogo, nella definizione della energia da apportare

of historical masonry textures beneath layers of plaster.

That is why, a specific experiment has started regarding the possibility of obtaining information about the shape of the outer face of walls covered with plaster after providing heating to its surface. The thermal gradient appeared to be the key parameter to trigger a heat transfer that can be read by the instrumentation. The first goal was then the minimum energy to be provided for appreciating the visualization of differences in the surface temperature that could be put in relation with the position of the mortar joints in the brickwork below the layer of plaster.

It was designed a specimen on which carry out experimentations, constituted by a portion of two header bond, built with solid bricks, plastered only on one side with a hydraulic lime mortars. This choice was taken willing to remain strictly faithful to building solutions most frequently found in Emilia Romagna.

In constructing the specimen, a few number of constructive singularities were placed on purpose inside it trying to represent those situations that may have an influence in the behaviour of masonry walls or, in some way, may tend to lower masonry quality. A full-depth interruption simulates the typical masonry disconnection observed during the expansion processes of ancient buildings; a closed chase for implant passage; a vertical stripe made of one header bond to simulate a chimney; a partial localized discontinuity to test the ability to read even small-contained lesions that were fixed.

per poter giungere alla visualizzazione delle piccole differenze nella temperatura superficiale.

E' stato progettato un campione da sottoporre alla sperimentazione, costituito da una porzione di muratura a due teste costituita da mattoni pieni, intonacata solo da un lato con una malte a base di calce idraulica. Tale scelta si spiega con la volontà di rimanere fedeli alle soluzioni edilizie più frequentemente riscontrabili nelle aree emiliane.

Nell'ideare il campione di prova si è avuto cura di inserire una serie di singolarità costruttive atte a rappresentare quelle situazioni che possono avere un'influenza nel comportamento dei setti murari o, comunque, tendono ad abbassare la qualità muraria: una soluzione di continuità a tutto spessore simula la disconnessione muraria tipica dei processi di ampliamento in pianta; una traccia per passaggio di impianti richiusa; una striscia verticale realizzata con una sola testa ad esemplificare una canna fumaria; una discontinuità parziale localizzata per testare la possibilità di leggere anche piccole lesioni localizzate e successivamente ricoperte.

Il campione viene intonacato, nella fascia bassa, con uno strato di spessore pari a 2 cm mentre nella porzione superiore tale ricopertura è pari ad 1 cm; ciò in ragione della volontà di comprendere come influisce l'entità dello strato di intonaco nella lettura delle temperature superficiali.

La sperimentazione, condotta in collaborazione con il prof. Massimo Garai e l'ing. Giovanni Semprini del Dipartimento di Ingegneria Industriale, è nella fase iniziale di costruzione del campione. Sono stati individuati due principali modalità di riscaldamento di una delle due pareti:

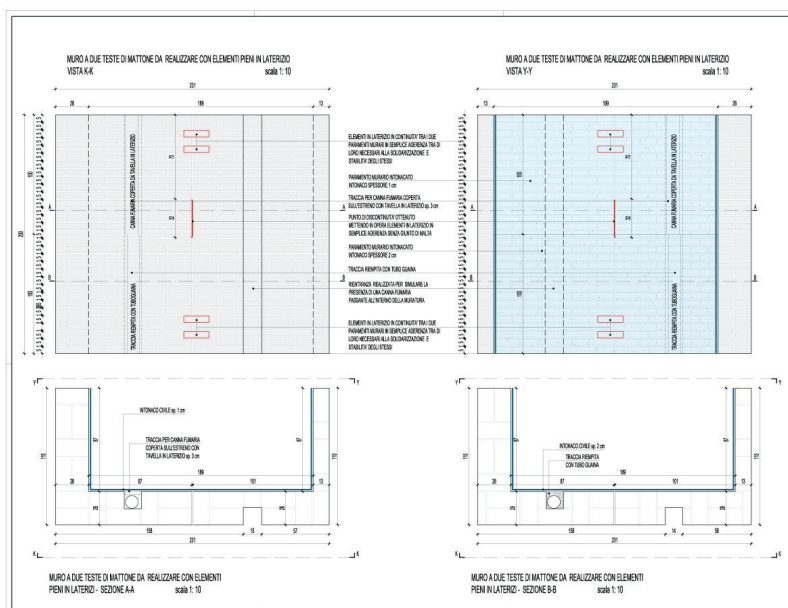


Figure 5. Layout of masonry specimen to be tested with thermal imager (sketched by Alice Catalini).

The specimen has been plastered, in its low part, with a layer 2 cm in thickness while in its upper portion this overcoating is equal to 1 cm; this is due to the will to understand how the size of the plaster layer affects in the reading of surface temperature.

The experiment, conducted in collaboration with prof. Massimo Garai and prof. Giovanni Semprini of the Department of Industrial Engineering, is in its initial stage of construction of the specimen. Two main ways to heating the plastered walls have been identified: the first through infrared lamps and the second through an oil cooler, only after the realization of a partial shielding in order to concentrate the heat precisely in tested areas.

3. CONCLUSIONS

Defined areas of interest, the research wants to conduct a careful assessment of compatibility in order to better address the design choices. However, this does not mean The reuse of existing assets needs to update its performance requirements. It is therefore necessary to put in place intervention solutions that are, at the same time, efficient and respectful of the architectural value.

To achieve this dual goal, it is necessary to reach a level of understanding that considers various aspects that describe both the complexity of the building heritage and the different constitutive properties of its single components.

In the study of the various issues raised by the assessment of structural safety, it should be emphasized that, in the past, excessively reductionist approaches have been used. The ability of the ancient structures was exclusively condensed in a few numeric-only data, merely used to implement verification procedures that were not able to describe the material reality of the analysed buildings (2).

A sharp change of course has now taken place and, even if timidly, existing regulatory frameworks have a greater articulation and attention to aspects neglected until today (3).

This paper reports, through the presentation of some research topics that are being carried out, how the richness of the wide variety of design solutions present in the existing buildings should be investigated by referring to quantitative and qualitative approaches when they are efficiently combined.

Specifically, the contribution that can be provided by the use of today available instruments can be very profitable if such use is combined with suitable operational protocols aimed to understand and to interpret the typological and original character. This method allows therefore to stem dogmatic or excessively generalist approaches.

attraverso lampade ad infrarosso e tramite un radiatore ad olio, previa realizzazione di una schermatura parziale per concentrare il calore nelle zone da testare.

3. CONCLUSIONI

Il riuso del patrimonio esistente richiede l'aggiornamento dei suoi requisiti prestazionali ed è compito di chi governa questo processo mettere in campo soluzioni d'intervento che siano, al contempo, efficaci e rispettose del valore testimoniale della genesi originaria. Per ottenere tale duplice obiettivo è necessario giungere ad un livello di comprensione che consideri i molteplici aspetti che descrivono la complessità e l'eterogeneità del costruito e le diverse proprietà costitutive dei suoi componenti.

Volendo rimanere nel campo dello studio delle diverse problematiche inerenti alla valutazione della sicurezza strutturale, va sottolineato come, in passato, siano stati utilizzati approcci eccessivamente riduzionisti in cui la capacità delle antiche strutture era tradotta esclusivamente in pochi dati esclusivamente di tipo numerico, utilizzati per essere implementati in procedure di verifica non calate nella realtà materiale delle costruzioni analizzate. Un deciso cambio di rotta è oramai avvenuto e, anche se timidamente, gli attuali quadri normativi presentano una maggiore articolazione ed attenzione verso aspetti prima trascurati.

Il presente contributo riferisce, attraverso delle esemplificazioni su alcuni temi di ricerca che si stanno portando avanti, come la ricchezza costituita dalla grande varietà di soluzioni costruttive presente nel patrimonio edilizio esistente vada indagata facendo riferimento ad approcci qualitativi e quantitativi efficacemente combinati.

Nello specifico il contributo che può essere fornito dall'utilizzazione delle strumentazioni oggi a disposizione può essere molto proficuo se tale utilizzo viene abbinato a idonei protocolli operativi mirati alla comprensione ed alla interpretazione delle caratteristiche tipologiche e costruttive originarie della fabbrica consentendo di conseguenza di arginare approcci dogmatici o eccessivamente generalisti.

6. REFERENCES

- [1] Giuffrè A. [a cura di], *Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso Ortigia*. Bari: Laterza, 1993.
- [2] Gulli R., *Recupero edilizio in ambito sismico*, Monfalcone: EdicomEdizioni, 2010.
- [3] Gulli R., *Recupero sostenibile del patrimonio costruito in ambito sismico*, Monfalcone: EdicomEdizioni, 2014.
- [4] Mochi G., *Processo tipologico e sicurezza sismica #2. Dall'analisi al progetto*, in Fiandaca O, Lione R. (a cura di), *Il sisma: ricordare, prevenire, progettare*, Alinea, Firenze, p. 539-552.
- [5] Guardigli L. [et al.], *Historic timber trusses in Europe. The case of St. Peter in Bologna*. In: Proceedings of Fifth International Congress on Construction History, Chicago, 3-7 June 2014, Edited by Brian Bowen, Donald Friedman, Thomas Leslie and Jhon Ochsendorf. Construction History Society of America, Vol. II, p. 449-456.
- [6] Gulli R. [et al.], *Historic construction in the '30: the case study of the faculty of engineering in Bologna, Italy*. In: Proceedings of Fifth International Congress on Construction History, Chicago, 3-7 June 2014, Edited by Brian Bowen, Donald Friedman, Thomas Leslie and Jhon Ochsendorf. Construction History Society of America, Vol. III, p. 137-144.
- [7] Formisano A. [et al.], *Analisi comparativa tra metodi di valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici murari di Arsita (TE)*, in Atti del XV Convegno ANIDIS, L'Ingegneria Sismica in Italia (2013), a cura di Braga F., Modena C., Padova University Press, Padova.
- [8] Lagomarsino S., Ugolini P., (2005), *Rischio sismico, territorio e centri storici*, Milano: Franco Angeli, 2005.
- [9] Barbisan U., Laner F., *Capriate e tetti in legno. Progetto e recupero*. Milano: Franco Angeli, 2000.
- [10] Munafò P., *Le capriate lignee antiche per i tetti a bassa pendenza: evoluzione, dissesti, tecniche di intervento*. Firenze: Alinea, 2002.
- [11] Valeriani S., *Kirchendächer in Rom. Capriate ecclesiae*. Petersberg: Verlag, 2006.
- [12] Yeomans D. [a cura di], *The development of timber as a structural material*. Farnham: Ashgate, 1999.
- [13] Bianco A. [et al.], *Le indagini non distruttive come strumento investigativo per la conoscenza delle tecniche costruttive dell'edilizia storica del '900: il caso di studio di Reggio Calabria*. In Atti della X Conferenza nazionale sulle prove non distruttive, monitoraggio e diagnostica, Milano 11-13 ottobre 2007. Roma: Dei, p 185-193.
- [14] Grinzato E. [et al.], *Sull'intonaco e oltre: diagnostica non distruttiva per il monitoraggio del patrimonio storico-monumentale. Misura in situ dell'effusività termica*. In Atti del 13° Congresso dell'Associazione Italiana sulle Prove non Distruttive, Roma 15-17 Ottobre 2009.