

An expeditious methodology for the seismic vulnerability assessment of building aggregates

Riccardo Gulli, Giovanni Mochi*, Giorgia Predari

Highlights

An in-depth knowledge of the historical buildings allows us to predict the damage mechanisms that can be generated by an earthquake on a built fabric, thanks to the study of historical documents and to surveys carried out on site.

An expeditious assessment procedure based on indicators related to the masonry behaviour of building aggregates has been developed.

The method has a preventive purpose, as it allows to classify the building aggregates of a historical center before a seismic event occurs.

Abstract

The objective of this research is the development of a protocol for the expeditious evaluation of seismic vulnerability of building aggregates in Italian historical centres, which is based on the determination of synthetic indicators to provide a preliminary assessment of their potential damage under the earthquake. The 2012 earthquake in Emilia-Romagna allowed to test the effectiveness of this method. Its application to the building aggregates of the historic center of Mirandola (MO) allowed to verify how it would have been possible to identify in advance the damage scenario recorded after the earthquakes.

Keywords

Building aggregates, Seismic vulnerability, Historical centres, 2012 Earthquake

1. INTRODUCTION

The concept of seismic vulnerability referred to building aggregates has a different meaning when compared to the same words in the case of isolated buildings. For the latter, this concept can be expressed in the capacity of the building to absorb the seismic acceleration without producing negative effects on its usability, on the protection of users or on the loss of the asset. For historical building aggregates, which derive from multiple phases of transformation and which are characterized by constructive solutions linked to local traditions, the most appropriate meaning of seismic vulnerability is the evaluation of their behaviour under an earthquake not in absolute terms,

Riccardo Gulli

DA - Dipartimento di
Architettura, Università di
Bologna, viale Risorgimento 2,
Bologna, 40136, Italia

Giovanni Mochi

DA - Dipartimento di
Architettura, Università di
Bologna, viale Risorgimento 2,
Bologna, 40136, Italia

Giorgia Predari

DA - Dipartimento di
Architettura, Università di
Bologna, viale Risorgimento 2,
Bologna, 40136, Italia

* Corresponding author
Tel.: +39-0512093182;
Fax: +39-0512093156;
e-mail: giovanni.mochi@unibo.it

but relatively to urban heritage.

Moreover, in the study of the seismic vulnerability of building aggregates, one of the objectives is the need to provide a valid aid to the technicians who must express a judgment on the behaviour of individual property units belonging to a building complex, to propose the best intervention solutions. Often, they don't have the possibility to reach an effective knowledge because they don't know the phases of construction and transformation of the building complex in its entirety [1]. In this case, the concept of vulnerability of a building aggregate includes the possibility of obtaining useful information to reach a greater awareness in building interventions.

A research -mainly focusing on the historical centres of the area affected by the 2012 Emilia earthquake- was begun to define significant and effective levels of vulnerability and to validate hypotheses and proposals on the definition of a methodology to identify in advance the situations of greater fragility and the potential damage to parts of the buildings. The post-event scenario provided an important database to understand how the proposed methodology can be efficient for the described objectives through its application to the building aggregates of the historical centre of Mirandola. The ancient centre of this city is an excellent sample, as it is representative of the historical architecture in Emilia-Romagna both for the formation and transformation processes of the town, and for what concerns the construction characteristics deriving from local building traditions.

The studies of Antonino Giuffrè, and in particular the case of Ortigia, are the starting point of this research [2]. From that moment on, the focus has been shifted from the single building to the building aggregate as the minimal unit of the historical urban fabric [3], [4].

As Giuffrè had already pointed out, *“the earthquake does not disintegrate houses, but it selects the structural parts and the weakest technological solutions, causing damage and collapse through mechanisms that can be defined in advance”*. In fact, recent Italian earthquakes have highlighted how the primary seismic vulnerabilities of historical buildings can be found in the connection systems between the construction elements and in the stratifications and transformations experienced over time. In these terms, the vulnerability of building aggregates can be identified as the propensity to damage that is generated due to the constructive lacks of the building [5].

The original proposal on the possibility of measuring the vulnerability of the building aggregates in terms of damage propensity and constructive criticality is based on historical and archival research, which allows to identify the phases of construction and transformation of the built-up area. This plays a role of

1. INTRODUZIONE

Il concetto di vulnerabilità sismica riferito agli aggregati edilizi assume un significato differente rispetto all'analogo termine utilizzato per edifici isolati. Se per questi ultimi tale concetto si lega alla capacità che un fabbricato possiede di assorbire un'accelerazione sismica senza che si producano determinati effetti negativi in termini di utilizzabilità, di salvaguardia della vita degli utenti o di perdita del bene, per gli organismi edilizi storici, derivanti da molteplici fasi di trasformazione e caratterizzati da soluzioni costruttive legate alle tradizioni locali, il significato che sembra più appropriato è quello di valutazione del comportamento in caso di sisma in termini relativi rispetto ad un patrimonio urbano costituito da numerosi aggregati.

Oltre a ciò non deve essere dimenticata la necessità di fornire un valido ausilio a coloro i quali, dovendo studiare soluzioni di intervento su singole unità immobiliari facenti parte di un complesso edilizio unico, si trovano a doversi esprimere sul comportamento di un aggregato di cui, in pratica, non ha la possibilità di giungere ad una conoscenza concretamente efficace [1]. In tal caso parlare di definizione della vulnerabilità di un aggregato edilizio evoca la possibilità che attraverso queste analisi si ottengano informazioni di grande utilità ai fini di una maggiore consapevolezza negli interventi edilizi.

Per poter definire livelli di vulnerabilità significativi ed efficaci ai fini di quanto esposto, è stata avviata una ricerca che, successivamente al sisma emiliano del 2012, si è particolarmente incentrata sui centri storici dell'area colpita dall'evento al fine di riuscire a validare ipotesi e proposte sulla definizione di una metodologia che consenta di individuare preventivamente le situazioni di maggiore fragilità e di potenziale danneggiamento degli organismi edilizi.

Lo scenario post-evento ha messo a disposizione una base di dati di notevole interesse ai fini di una comprensione di come la metodologia proposta possa o meno essere considerata efficace per gli obiettivi descritti attraverso una sua applicazione agli aggregati del centro storico di Mirandola. Il nucleo antico di questa città costituisce un ottimo campione, rappresentativo dell'architettura storica emiliana sia per i processi di formazione e trasformazione dell'abitato, sia per ciò che concerne la caratterizzazione costruttiva derivante dalle tradizioni edilizie locali.

Il riferimento principale di questa ricerca sono gli studi di Antonino Giuffrè, ed in particolare quello su Ortigia, [2] momento a partire dal quale l'oggetto dell'indagine è stato spostato dall'edificio all'aggregato edilizio, quale unità minima di articolazione del tessuto urbano storico [3], [4].

Come già Giuffrè aveva evidenziato, “il sisma non disintegra in modo disordinato le case, ma seleziona le parti strutturali e le soluzioni tecnologiche più deboli provocando danni e collassi mediante meccanismi definibili in anticipo”. Ed infatti, i recenti sismi che si sono susseguiti

primary importance together with the careful reading of the construction data both for what concerns the materials and for what concerns the realization techniques [6].

2. DESCRIPTION OF THE METHODOLOGY

The method requires different phases of study, first on the historical fabric, then on the building aggregates. The seismic vulnerability assessment derives from the calculation of indicators which are defined through the analysis of the typical evolutionary processes that have affected the aggregates, both in plan and in elevation and through the investigation of techniques and historical building solutions used in the local area. In fact, these factors are directly related to the methods of damage [7]. The final result of the evaluation is an overall index, which is basically the sum of partial indices, each multiplied by its own weight, which was initially determined on an experiential basis and subsequently refined on a statistical basis.

First of all, the methodology is based on the observation that the seismic damage of the historical building derives from the loss of stability of individual components, which are seen as rigid blocks moving due to the ground acceleration. Then, from the insufficient shear strength of the walls [8].

This second problem originates from issues related to the building materials; on the other hand, the first derives essentially from the processes of formation and modification of building fabrics, so that the comprehension of the transformation phases becomes the key-point for the behaviour prevision [9]. Understanding the first phase of the fabric construction is the starting point of this process; different phases of plan expansions, elevations, refusions, unifications, occupations of previous empty areas, demolitions and reconstructions lead to the current situation. This initial phase can only be hypothesized when there is no specific, historical or archaeological documentation, although some indirect sources may constitute an interesting reference base [10].

The study of the vulnerability of building aggregates followed the collection of data. The vulnerability has been defined through indicators which are considered significant due to their causal relationship with the damage: out-of-plane collapse of the façades and of the tympanums, cracks due to the rafters, hammering due to constructive irregularities (as the presence of concrete buildings in the aggregate), weak shear strength due to insufficient width of the masonry walls.

In addition to these, there is another essential indicator to include the global

in Italia hanno messo in luce come primarie vulnerabilità sismiche dell'edilizia storica siano da ricercarsi nei sistemi di connessione fra gli elementi costruttivi e nelle stratificazioni e trasformazioni subite nel tempo. In questi termini, la vulnerabilità degli aggregati edilizi può essere intesa come propensione al danneggiamento che si genera a causa delle carenze costruttive dell'edificato [5].

A ciò si è aggiunta un'originale proposta circa la possibilità di misurare la vulnerabilità degli aggregati edilizi in termini di propensione al danno e di carenze costruttive in cui la ricerca storica e archivistica, mirata alla individuazione delle fasi di impianto e trasformazione dell'abitato, svolge un ruolo di primaria importanza insieme all'attenta lettura dei dati costruttivi sia per ciò che concerne i materiali utilizzati, sia per quanto attiene alle tecniche realizzative [6].

2. DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA

Il metodo prevede quindi diverse fasi di studio sul tessuto storico, prima, e sui singoli aggregati, poi.

La valutazione della vulnerabilità sismica deriva dal calcolo di indicatori che sono definiti attraverso l'analisi dei processi evolutivi tipici che hanno interessato gli aggregati sia in pianta, sia in alzato e mediante l'indagine sulle tecniche e sulle soluzioni costruttive storiche utilizzate in ambito locale poiché tali fattori sono direttamente correlati alle modalità di danneggiamento [7]. Il risultato finale delle valutazioni è un indice complessivo che costituisce sostanzialmente la somma degli indici parziali moltiplicati ciascuno per un proprio peso, determinato inizialmente su base esperienziale e successivamente perfezionato su base statistica.

La metodologia si fonda innanzitutto sulla constatazione che il danneggiamento sismico dell'edificato storico derivi, in primo luogo, dalla perdita di stabilità di singole componenti intese come corpi rigidi posti in oscillazione dall'accelerazione del terreno e, solo in seconda battuta, dall'insufficiente resistenza a taglio delle murature [8]. Se il secondo problema è originato da questioni legate ai materiali impiegati, il primo deriva essenzialmente dai processi di formazione e modificazione dei tessuti edilizi per cui la ricostruzione delle fasi di trasformazione diviene la chiave fondamentale per la previsione del comportamento [9].

Il riconoscimento della prima fase di costruzione delle abitazioni costituisce il punto iniziale di questo processo che, passando per le diverse fasi caratterizzate da ampliamenti in pianta, sopraelevazioni, rifusioni, accorpamenti, intasamenti di precedenti aree vuote, demolizioni e ricostruzioni porta fino alla situazione attuale. Questa fase iniziale può essere solo ipotizzata, quando non esiste una documentazione specifica, storica o archeologica, sebbene alcune fonti indirette possono costituire un'interessante base di riferimento [10].

Dalla raccolta dei dati si è passati poi allo studio della

aggregate behaviour; this refers to the entire construction, not only to the façades. This indicator, the wall disconnection index, allows to understand the possible damage to the internal parts of the serial building. The wall disconnection index is also essential since it allows to define the portions of façades that can be subjected to out-of-plane collapse, and the width of the fronts to be considered effective for the shear mechanism.

vulnerabilità dei singoli aggregati. Tale vulnerabilità è stata definita attraverso alcuni indicatori i quali sono ritenuti significativi in ragione della loro relazione causale con il danneggiamento: ribaltamento delle facciate, ribaltamento dei timpani, lesioni per spinta da falsi puntoni, martellamento per irregolarità costruttive (presenza nell'aggregato di edifici in c.a., solai sfalsati tra due edifici adiacenti), debole resistenza a



Figure 1. Example of graphical representation of the façades transformation phases.

3. THE HISTORICAL CENTER OF MIRANDOLA

Through the collection of information on the above issues, it was possible to define seismic damage scenarios that were compared with the real manifestations of what the 2012 earthquake produced on the building aggregates of the historical center. The surveys and bibliographic research have been carried out since September 2012; this allowed to establish the database to start the experimentation.

Initially, 31 blocks of the historic center were identified, which were then subdivided into further building aggregates characterized by compactness and continuity of the wall fabrics.

taglio per larghezza insufficiente dei maschi murari.

Oltre a questi è stato inserito un altro indicatore ritenuto fondamentale per ricomprendere, nel dato ricercato, un comportamento globale dell'aggregato, non solo riferito alle facciate che pur sempre costituiscono le parti maggiormente sensibili alle azioni sismiche, ma che si riferisce all'intera compagine edilizia.

Tale indicatore, definito indice di disconnessione muraria, viene ritenuto molto importante al fine di comprendere i possibili danneggiamenti delle parti interne dell'edificato seriale.

L'indice di disconnessione muraria è altresì essenziale poiché consente di definire sia le porzioni di facciate che possono essere soggette a ribaltamento, sia l'ampiezza dei fronti da considerare efficaci per il meccanismo a taglio.

The blocks involved in the study are those mainly for residential use, excluding portions having a specialized use and those with a predominant presence of isolated buildings or belonging to individual phases of construction (ie areas characterized by religious institutions or complexes coinciding with single-use destinations).

The historical research has initially allowed to identify the phases of evolution of the centre. The construction of the fabric began with a first nucleus identifiable with an early medieval curtis, followed by a series of extensions that proceeded through successive construction phases until it reached the domain of the castrum by the Pico family in the fourteenth century. The fortunes of the family were linked to the progress of the city. Mirandola came to the modern period with a fortification of bastions and an extension of the town that made it one of the major cities between Modena and Ferrara.

At this point, the consultation of archival documents was combined with historical research, reaching the most precise definition of the transformations undergone by the different building aggregates. These documents referred to the post-unitary cadastral plans and estimated appraisals between the eighteenth and nineteenth centuries, where the buildings were also described through schematic graphical representations.

The survey activity allowed to understand the constructive characterization of the building aggregates, and this was then represented in specific drawings. Together with the definition of the building component, the survey allowed to identify the damages suffered by the buildings along the public streets. This provided the framework for carrying out the evaluations on the expected efficiency of the methodology.

The conformation of the first construction of Mirandola was based on a hypothesis now generally shared; this consisted in the adoption of rectangular blocks and rectangular-shaped lots on which the houses were built, with the smaller side along the main roads, coinciding with the long sides of the blocks. This layout of the buildings -defined as “gothic lot”- is confirmed by the historical iconography, which shows a subdivision of the center into blocks with the described characteristics.

The buildings were concentrated along the streets and they left wide open spaces inside; over the centuries, these spaces have been affected by enlargements with a constant increase in building density. This density was further increased with the raising of buildings, from the original two levels to the height of four floors. In addition to the transformation processes already mentioned, these modifications were characterized by constructive solutions not designed to guarantee safety during seismic events.

3. IL CENTRO STORICO DI MIRANDOLA

Attraverso la raccolta di informazioni sulle tematiche sopra esposte si giunge alla definizione di scenari di danneggiamento sismico che, alla luce di quanto avvenuto nel maggio del 2012, possono essere confrontati con le manifestazioni concrete di ciò che il sisma ha prodotto sull'edificato storico. Sopralluoghi, rilievi sul campo e ricerche bibliografiche sull'edificato del centro storico sono stati eseguiti a partire dal settembre 2012; ciò ha consentito la costituzione della base dati necessaria alla conduzione della sperimentazione.

Inizialmente sono stati identificati 31 isolati del centro storico, i quali sono stati successivamente suddivisi in ulteriori aggregati edilizi caratterizzati dalla compattezza e continuità dei tessuti murari.

Le aree studiate rappresentano quelle significativamente interessate da una destinazione prevalentemente residenziale, rimanendo escluse quelle porzioni di centro aventi destinazione specialistica e per le quali risulta preponderante la presenza di edilizia isolata o appartenente a singole fasi di edificazione, ossia aree caratterizzate da istituzioni religiose o complessi coincidenti con destinazioni monofunzionali.

La ricerca storica ha inizialmente permesso di individuare le fasi di evoluzione del centro: l'edificazione prende avvio da un primitivo nucleo identificabile con una curtis altomedievale, a cui segue una serie di ampliamenti che procedono per successive fasi di costruzioni di fossati di difesa fino a giungere, nel XIV secolo al periodo in cui la famiglia Pico assunse il controllo del castrum. Le fortune della famiglia si legano al progresso della città che, con alterne vicende, giunge alle soglie della modernità con un circuito di bastioni ed un'estensione dell'abitato che ne fanno una delle maggiori città tra Modena e Ferrara.

A questo punto alla ricerca storica è stata abbinata la consultazione del materiale archivistico, giungendo alla definizione più precisa delle trasformazioni che hanno subito i diversi aggregati edilizi. Tali documenti si riferiscono alle planimetrie catastali post-unitarie ed a perizie estimative redatte tra Settecento e Ottocento, in cui i singoli edifici venivano descritti anche attraverso schematiche rappresentazioni grafiche.

L'attività di sopralluogo ha permesso poi di comprendere con sufficiente dettaglio quale fosse la caratterizzazione costruttiva degli aggregati indagati che si è tradotta in appositi elaborati. Parallelamente alla definizione della componente costruttiva, i sopralluoghi hanno permesso il rilievo visivo dei danneggiamenti subiti dagli edifici sulle vie pubbliche. Ciò ha fornito il riferimento su cui, successivamente, sono state effettuate le valutazioni sulla efficienza previsionale della metodologia proposta.

A Mirandola la conformazione di prima edificazione si è basata su un'ipotesi oramai generalmente condivisa e che consiste nell'adozione di isolati di forma rettangolare allungata e lotti di pertinenza

For the transformations in the last two or three centuries, the archival research has allowed to record the processes of modification of the historical building with great reliability, thanks to the reports of the appraisers. These documents provide information of great interest on the previous building phases, as well as that of the first construction, such as the precise cataloging of some of the typical transformations described by the building typology texts [11].

delle singole abitazioni anch'essi rettangolari, ma con il lato minore lungo le strade principali, coincidenti con i lati lunghi degli isolati. Questa disposizione degli edifici, definita a "lotto gotico", appare confermata dall'iconografia storica che per Mirandola ci restituisce una suddivisione del centro in isolati aventi le caratteristiche descritte. L'edificato concentrato lungo le strade che delimitavano i lotti, lasciava

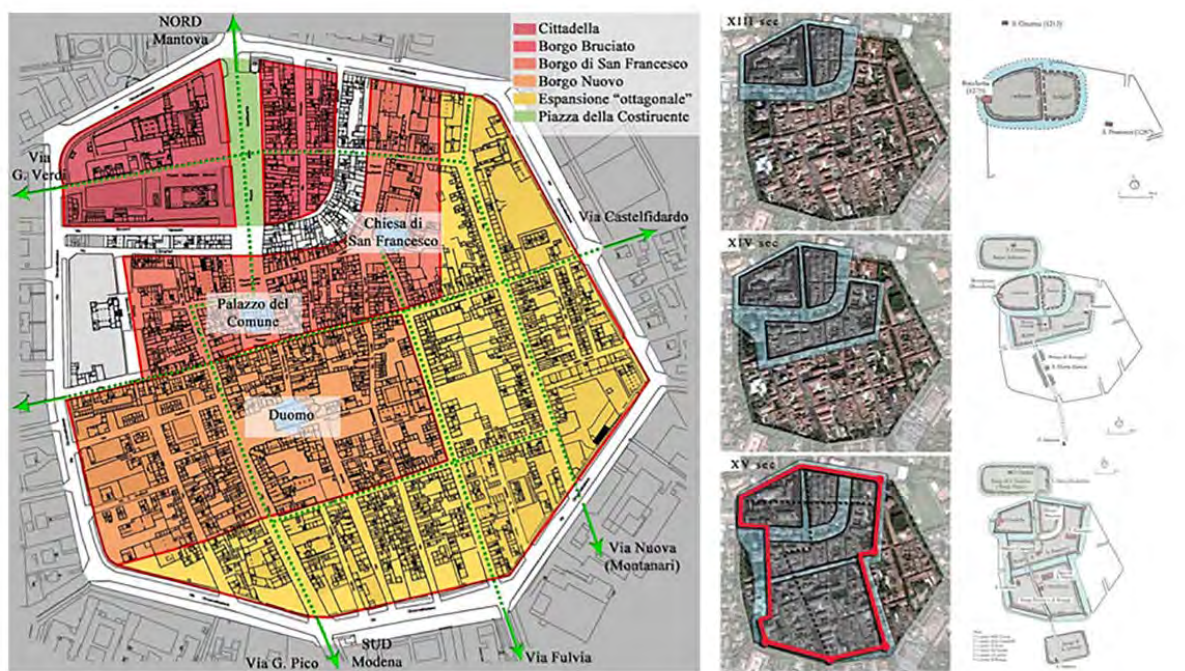


Figure 2. Expansion phases of the historical center of Mirandola.

4. RESULTS

For each of the identified building aggregates, a damage scenario was obtained thanks to the methodology based on the described indicators. The reconstruction of this scenario on the façades allowed to do a comparison with the damage which was detected after the 2012 earthquake and to do some considerations.

The effectiveness of the methodological path is evidenced by the lack of unexpected damages. These are mainly referred to shear mechanism; therefore, it is necessary to clarify the hypothesis of evaluation of such damage indicator, as it is based on an empirical datum. In fact, it is estimated by a ratio between the sum of the width of the bearing masonries and the width of the whole façade between two masonry discontinuities.

The façade was defined as weak for shear stresses when this ratio was less than 45%. The presence of shear cracks in some façades where this ratio was

ampi spazi scoperti all'interno; tali spazi sono stati, nel corso dei secoli, interessati da ampliamenti che hanno portato ad un aumento costante della densità edilizia.

Ulteriormente tale densità andava aumentando con la sopraelevazione degli edifici che, dagli originari due livelli, li hanno portati ad avere altezze fino a quattro piani. Queste modificazioni, oltre agli altri processi di trasformazione già citati, sono state contraddistinte da soluzioni costruttive non pensate per garantire la sicurezza in occasione di eventi sismici.

La ricerca archivistica ha permesso, per le trasformazioni riguardanti gli ultimi due o tre secoli, di registrare con grande attendibilità i processi di modificazione dell'edilizia storica grazie alle relazioni dei periti estimatori per alcuni casi analizzati. Da questi materiali possono desumersi informazioni di grande interesse sulle precedenti fasi edilizie, come anche per quella di prima edificazione, quali la catalogazione puntuale di alcune delle trasformazioni tipiche che i testi di tipologia edilizia avevano già descritto [11].

high enough highlighted the need for greater attention in defining a different relationship. Perhaps the limit of 45% can be raised or special situations can be considered when the prevision has not received the evidence of the experience.

Regarding the prevision of out-of-plane mechanisms, the methodology proved to be very effective, managing to predict all such behaviour. The comparison between the prevision and the damage survey shows how the protocol indicates a potential damage higher than the real one. This can be interpreted as a margin of safety regarding the real situation, and we believe that this cautionary prevision should be related to an implicit characteristic of the method.

In fact, the protocol does not consider the actual energy generated by the earthquake; it cannot be related to the peak ground acceleration during the seismic sequence as it is linked to the construction processes, the structural deficiencies and the building features.

Accelerations could be considered later, with statistical data to record how the energy generated by the earthquake systematically damages an asset in a specific area, which is characterized by the use of typical materials and construction techniques.

4. RISULTATI

Per ciascun aggregato identificato, si è ottenuto uno scenario di danno basato sugli indicatori descritti. La ricostruzione sui prospetti di tale scenario ha permesso il confronto con il danneggiamento rilevato dopo le scosse di maggio 2012 e di trarre alcune considerazioni.

L'efficacia del percorso ricostruttivo è testimoniata dalla relativamente scarsa presenza di danneggiamenti non previsti. Questi danneggiamenti sono principalmente quelli riferiti al meccanismo di rottura nel piano. In tal caso si ravvisa la necessità di precisare meglio le ipotesi alla base della stima di tale danneggiamento in quanto esso si è basato su un dato empirico consistente nella definizione del rapporto tra somma dell'ampiezza dei maschi murari e larghezza del fronte tra due discontinuità murarie. La facciata è stata definita come vulnerabile al taglio quando tale rapporto è risultato inferiore al 45%. La presenza di lesioni a taglio in alcune facciate ove questo rapporto soddisfaceva il requisito descritto ha segnalato la necessità di una maggiore attenzione nella definizione di un rapporto diverso (lavorando sull'innalzamento del limite del 45%) o considerando, nei casi ove la previsione non ha ricevuto la prova dell'esperienza, situazioni particolari che vanno studiate meglio in sede di caratterizzazione costruttiva.

In merito invece ai cosiddetti cinematici di primo modo, e cioè nella previsione del comportamento per



Figure 3. Survey of the real damage on the façades.

The application of the protocol on the 31 aggregates of the historical center of Mirandola allowed to identify three classes of aggregate vulnerabilities; we highlight how the most vulnerable are some of the oldest building aggregates and others that have undergone more extensive transformational processes.

At the end of the evaluation, the damage map of the «reconstruction plan» was found. It was designed by the city administration on the basis of the Aedes cards which have been compiled by private technicians for each building.

We remember how these cards are prepared for each housing unit by different technicians, each of them with his own objectivity, and how the classes identified are in a greater number than those under evaluation. But if we standardize the classes of the cards to our vulnerability classes, by compacting usable, partially uninhabitable and unusable buildings, we notice a good correspondence between the prevision and the survey of the damage.

azioni fuori dal piano, la metodologia proposta si è rivelata di confortante efficacia, riuscendo a prevedere tutti i comportamenti di questo tipo. Considerando a fondo il confronto tra previsione e rilievo del danno si vede come per questi meccanismi di primo modo il protocollo applicato indica una possibilità di danneggiamento superiore a quella reale. Ciò si ritiene confortante in quanto ciò può essere letto come margine di sicurezza rispetto alla situazione reale, ma questa previsione letta come cautelativa crediamo sia da porre in relazione con una caratteristica implicita nel metodo. Questo infatti non tiene conto dell'effettiva energia liberata da un sisma; essendo basata su considerazioni legate ai processi costruttivi, alle carenze strutturali e alle caratteristiche edilizie dei manufatti, la procedura non può essere posta in relazione con le accelerazioni in gioco durante la sequenza sismica. Queste potrebbero essere considerate in un momento successivo utilizzando

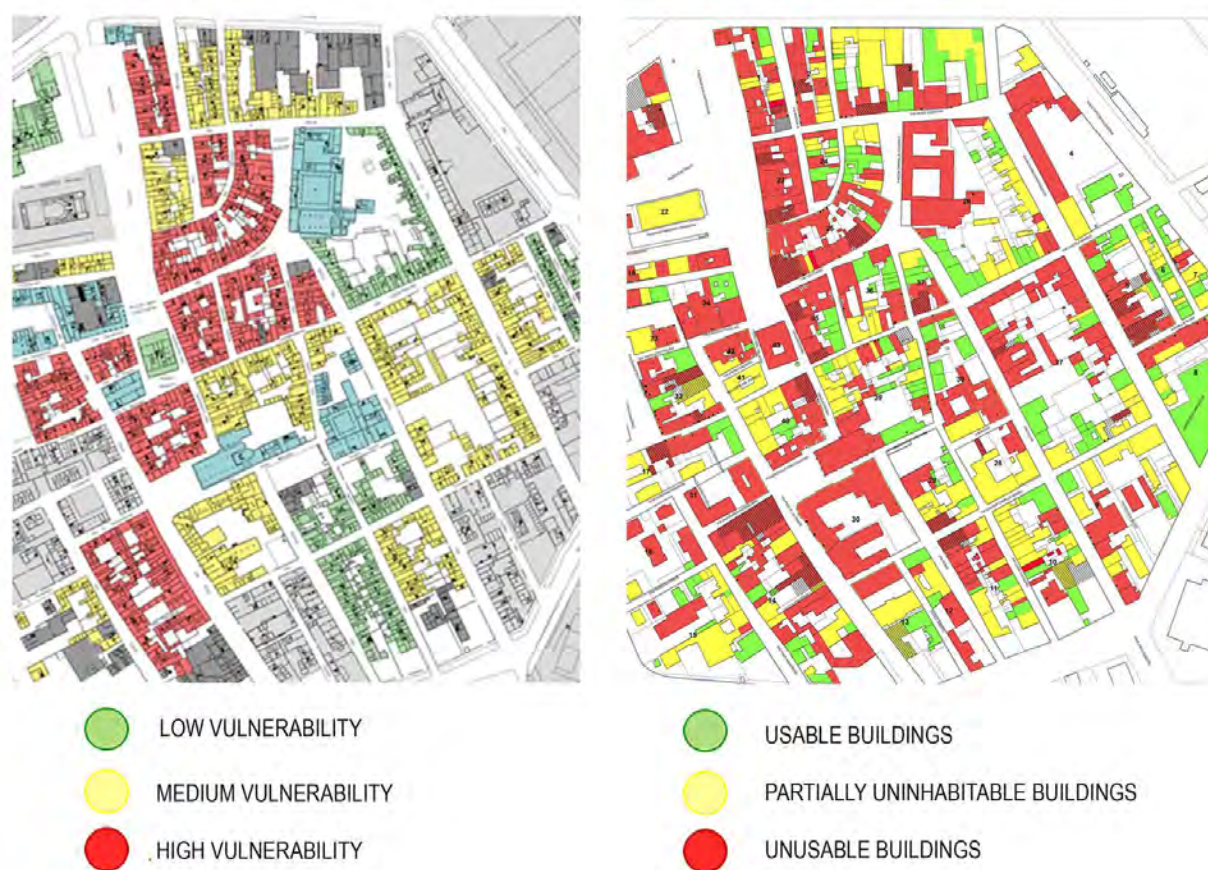


Figure 4. Comparison between the results of the protocol and the survey of the “reconstruction plan”.

5. FURTHER DEVELOPMENT OF THE RESEARCH

The first result was the verification of the consistency and effectiveness of the analysis procedure for the vulnerability of building aggregates.

For the studies that have been carried out so far, the protocol shows a stability

dati statistici che registrino come, in un determinato aereale caratterizzato dall'utilizzo di determinati materiali a da tecniche realizzative sedimentate nella tradizione costruttiva, una determinata energia liberata dal sisma danneggia in maniera sistematica un patrimonio immobiliare. L'applicazione del metodo sui 31 aggregati del centro storico

of the results, due to the analysis of a context that is characterized by a wide historical and technical-constructive homogeneity.

Therefore, if the procedure appears to be effective, it is still necessary to clarify which variations can make it more precise with regard to the prevision of certain damages. The underestimation obtained in some aggregates provided cues for further adjustments of the methodology, with a revision of the calculating method of partial indicators. A further partial indicator was introduced too, to estimate the presence and extension of false walls, which increase internal vulnerability.

In the meantime, the research has produced further outcomes regarding the definition of the protocol. Further analyzes are carried out for building aggregates in contexts similar to the historical center of Mirandola, such as Castelfranco Emilia, whose historical center has similar characteristics. The study is about to be completed on the aggregates of San Giovanni in Persiceto where the original circular urban layout offers interesting reasoning for morphological analyzes.

As in Mirandola, the analyzes concern the whole building aggregates of each historical center also in Castelfranco and San Giovanni in Persiceto, which are in a similar material context.

In the meantime, single building aggregates have been analyzed in other historical centers, with the aim of understanding the role of local building traditions. Carpi, Fermo, Lanciano and Lucera are linked to the three mentioned centers because they are entirely built with brick walls, but the different geographical contexts could clarify the role of the peculiarities of traditional constructions. These comparisons can be made only through the introduction of a corrective parameter to allow an effective comparability of the results. This can be an index of the masonry quality, which considers the great importance of the nature and shape of the bricks as well as their meshing and connection in the transversal direction.

5. REFERENCES

- [1] Cangi G.; *Manuale del recupero strutturale e antisismico*. Roma: Dei, 2012.
- [2] Giuffrè A.; *Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso Ortigia*. Bari: Laterza, 1993.
- [3] Giuffrè A.; Carocci C.; *Codice di pratica per la sicurezza e conservazione dei Sassi di Matera*. Matera: La Bauta, 1997.
- [4] Giuffrè A.; Carocci C.; *Codice di pratica per la sicurezza e conservazione del centro storico di Palermo*. Bari: Laterza, 1999.
- [5] Carocci C.F.; *La lettura critica del costruito dei centri storici*. In: *Rischio sismico, territorio e centri storici*. Atti del Convegno Nazionale, Sanremo (IM) 2-3 luglio 2004, Lagomarsino S., Ugolini P. (ed). Milano: FrancoAngeli, 2005.
- [6] Beolchini G.C.; Milano L.; Antonacci E. (ed.); *Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura. Definizione di modelli per l'analisi strutturale degli edifici in muratura*, Volume II, Parte Ia. Convenzione di

di Mirandola ha consentito di individuare 3 classi di vulnerabilità degli aggregati, potendo rilevare che i più vulnerabili sono alcuni dei più antichi, ed altri che hanno subito più estesi processi trasformativi.

Al termine della valutazione, è stato possibile reperire la mappa del danno messa a punto per il «piano di ricostruzione», ricostruita dall'amministrazione sulla base delle schede Aedes compilate dai tecnici incaricati per ciascun edificio.

Sottolineiamo come tali schede, appunto, siano predisposte per ciascuna unità immobiliare, da tecnici distinti ciascuno con la propria oggettività, e come le classi individuate siano in un numero maggiore rispetto a quelle da noi valutate, ma se uniformiamo le classi derivate dalla schede alle nostre classi di vulnerabilità, compattando edifici agibili, parzialmente inagibili ed inagibili, notiamo una buona corrispondenza tra la previsione ed il rilievo del danno, con una sottostima, in alcuni casi, del nostro metodo.

5. AVANZAMENTI DELLA RICERCA

Il primo esito ottenuto è stato quello di verificare la consistenza ed efficacia della procedura di analisi della vulnerabilità degli aggregati edilizi.

Per le analisi fin qui svolte, il protocollo operativo mostra una stabilità dei risultati come ci si aspetterebbe in un contesto che si caratterizza per un'ampia omogeneità tecnico-costruttiva e di storia edilizia. Se quindi la procedura risulta essere consistente ed efficace, rimane da chiarire attraverso quali variazioni si può rendere essa maggiormente precisa per ciò che concerne la previsione di alcuni danneggiamenti. La sottostima ricavata per alcuni meccanismi ha fornito spunti per ulteriori aggiustamenti del metodo, con la revisione del metodo di calcolo degli indici parziali, e l'introduzione di un ulteriore indice parziale che stima la presenza e l'estensione di muri in falso, che incrementano la vulnerabilità interna.

La ricerca ha prodotto, nel frattempo, ulteriori esiti in merito alla definizione del protocollo. Ulteriori analisi sono in corso per aggregati edilizi provenienti da contesti ulteriori rispetto al centro storico di Mirandola, quali Castelfranco Emilia, il cui nucleo storico possiede caratteristiche simili, ma non identiche a quelle proprie di Mirandola. Un altro centro di cui si sta completando l'analisi sugli aggregati è quello di San Giovanni in Persiceto in cui l'originale impianto urbano circolare offre interessanti spunti per analisi morfologiche originali.

Come a Mirandola anche a Castelfranco e a San Giovanni in Persiceto le analisi riguardano la totalità degli aggregati di ciascun centro storico, rimanendo in un contesto geomateriale simile tra i tre centri. Sono stati nel frattempo analizzati singoli aggregati che provengono da ulteriori centri storici con la finalità di iniziare a comprendere il ruolo giocato dalle tradizioni costruttive locali: Carpi, Fermo, Lanciano, Lucera sono accomunati ai tre centri già citati per essere interamente costruiti con murature in laterizio, ma i diversi

Ricerca con la Regione Marche; Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per la Tecnologia delle Costruzioni – Sede di L'Aquila; Dipartimento di Ingegneria delle strutture, delle Acque e del Terreno (DISAT) – Università degli Studi de L'Aquila, 2005.

- [7] Cremonini I. (ed); *Rischio sismico e pianificazione dei centri storici*. Firenze: Alinea, 1994.
- [8] Mochi G.; Predari G., *La vulnerabilità sismica degli aggregati edilizi. Un contributo per il costruito storico*. Monfalcone: Edicom edizioni, 2016.
- [9] Lagomarsino S.; Ugolini P.; *Rischio sismico, territorio e centri storici*. Milano: FrancoAngeli, 2005.
- [10] Mochi G.; *Processo tipologico e sicurezza sismica #2*. In: *Il sisma. Ricordare, prevenire, progettare*, AA.VV, Firenze: Alinea, 2009, p. 539-551
- [11] Caniggia G.; Maffei G.L.; *Lettura dell'edilizia di base*. Venezia: Marsilio, 1995.

contesti di provenienza potrebbero permettere di chiarire il ruolo giocato dalle peculiarità della costruzione delle architetture tradizionali. Tali confronti possono essere operati solo a partire dalla presenza di un parametro correttivo che permetta una effettiva confrontabilità dei risultati ottenuti e tale, crediamo, possa essere un indice della qualità muraria che tenga conto della grande importanza rivestita dalla natura e dalla forma dei conci costituenti oltre che dal loro ingranamento e connessione in direzione trasversale.