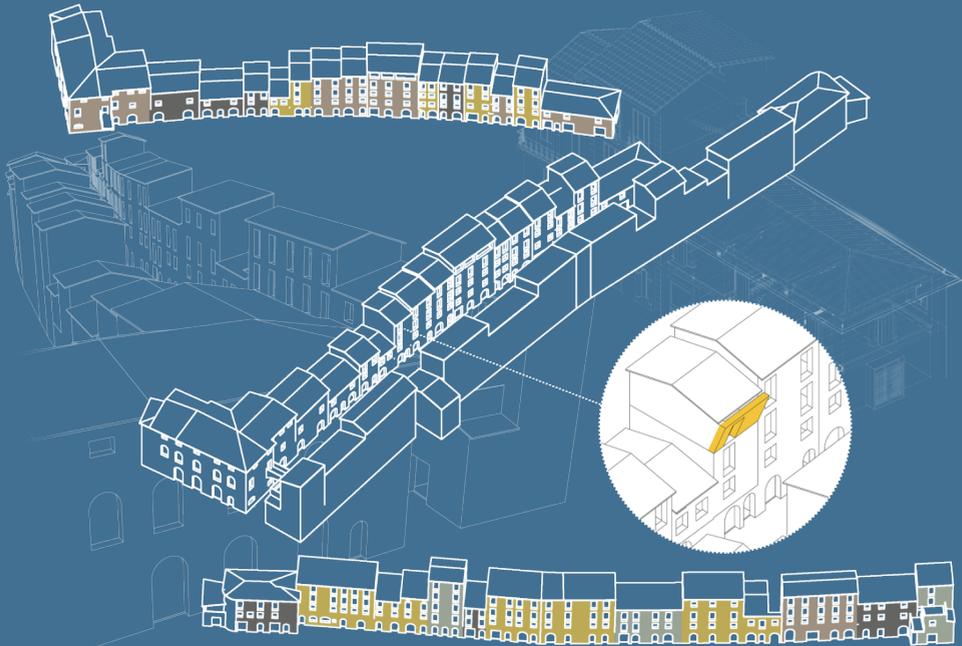


MARCO SACCUCCI

BIM PER LA VULNERABILITÀ SISMICA DEI CENTRI STORICI MINORI

BIM FOR THE SEISMIC VULNERABILITY OF MINOR HISTORIC CENTERS



BIM per la vulnerabilità sismica dei centri storici minori è un volume che unisce tecnologia e consapevolezza per affrontare una delle sfide più urgenti della contemporaneità: proteggere l'identità fragile ma profonda dei piccoli borghi italiani esposti al rischio sismico. In un Paese disseminato di centri storici ricchi di memoria, ma spesso dimenticati dalla pianificazione, il BIM si trasforma da strumento operativo a dispositivo culturale. Il volume propone un approccio multilivello che integra rappresentazione e disegno, rilievo digitale, modellazione avanzata BIM, GIS e analisi predittiva. Al cuore della ricerca si trova il metodo MASON, un algoritmo capace di tradurre la complessità dell'esistente in mappe di vulnerabilità e scenari di intervento consapevoli. Il caso studio del borgo di San Rocco a Sora diventa così laboratorio sperimentale per un nuovo modo di leggere, interpretare e proteggere il costruito storico. Questo volume è un invito a coniugare sapere tecnico e responsabilità civile, affinché la digitalizzazione non sia fine a sé stessa, ma strumento per la gestione consapevole e la conservazione attiva del patrimonio costruito.

BIM for the seismic vulnerability of minor historic centers is a volume that combines technology and awareness to address one of the most pressing challenges of our time: protecting the fragile yet profound identity of Italy's small historic villages exposed to seismic risk. In a country scattered with memory-rich historic centers, often neglected by urban planning, BIM transforms from an operational tool into a cultural device. The volume proposes a multilevel approach that integrates representation and drawing, digital surveying, advanced BIM modeling, GIS, and predictive analysis. At the heart of the research lies the MASON method, an algorithm capable of translating the complexity of the existing built environment into vulnerability maps and informed intervention scenarios. The case study of the village of San Rocco in Sora thus becomes an experimental laboratory for a new way of reading, interpreting, and safeguarding historic architecture. This volume is an invitation to merge technical expertise with civic responsibility, ensuring that digitalization is not an end in itself, but a tool for the conscious management and active conservation of the built heritage.



Copyright © EUC
EDIZIONI UNIVERSITÀ DI CASSINO

CENTRO EDITORIALE DI ATENEO
Università degli Studi di Cassino e del Lazio meridionale
Campus universitario – Palazzo degli Studi – Località Folcara,
03043 Cassino (FR), Italia

ISBN **978-88-8317-138-3**

I contenuti della pubblicazione possono essere utilizzati purché se ne citi la fonte e non vengano modificati il senso e il significato dei testi in esso contenuti. Il CEA, Centro Editoriale di Ateneo, e l'Università degli Studi di Cassino e del Lazio meridionale non sono in alcun modo responsabili dell'uso che viene effettuato dei testi presenti nel volume, di eventuali modifiche ad essi apportate e delle conseguenze derivanti dal loro utilizzo.

Questo volume è stato sottoposto a previa e positiva valutazione nella modalità di referaggio *double-blind peer review*.



EBOOK

Gli e-book di EUC – Edizioni Università di Cassino sono pubblicati con licenza Creative Commons Attribution 4.0 International:
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pubblicato in versione digitale su archivi online in *open access* nel luglio 2025.

COLLANA SCIENTIFICA – EBOOK

MARCO SACCUCCI

BIM PER LA VULNERABILITÀ SISMICA
DEI CENTRI STORICI MINORI

BIM FOR THE SEISMIC VULNERABILITY
OF MINOR HISTORIC CENTERS



EDIZIONI UNIVERSITÀ DI CASSINO

Centro Editoriale di Ateneo – Università degli Studi di Cassino e del Lazio meridionale | 2025

INDICE

INDEX

Prefazione

Foreword

Andrea Giordano

Introduzione

Introduction

Parte 1 | Part 1

La “questione” dei centri storici e il rischio sismico in Italia The “issue” of historic centers and seismic risk in Italy

Centri storici minori: una vulnerabilità da comprendere e affrontare	33
Minor historic centers: a vulnerability to understand and address	83
Evoluzione del concetto di centro storico: dalla tutela alla valorizzazione	39
Evolution of the concept of historic center: from preservation to enhancement	89
Normative e strumenti per la gestione dei centri storici	47
Regulatory frameworks and tools for the management of historic centers	95
Urbanistica e architettura dei centri storici: elementi di vulnerabilità	57
Urban planning and architecture of historic centers: elements of vulnerability	105
Rischio sismico nei centri storici: vulnerabilità e impatto sul patrimonio	65
Seismic risk in historic centers: vulnerability and impact on built heritage	111
Geografia della vulnerabilità: mappatura GIS dei centri storici minori	75
Geography of vulnerability: GIS mapping of minor historic centers	117

Parte 2 | Part 2

Digitalizzare i centri storici:
dal rilievo alla modellazione avanzata
Digitizing historic centers:
from surveying to advanced modeling

Dall'analogico al digitale: l'evoluzione del rilievo nei centri storici	123
From analogue to digital: the evolution of surveying in historic centers	155
Le nuove frontiere del rilievo	127
The new frontiers of surveying	159
Oltre la carta: nuovi strumenti per disegnare e comprendere la vulnerabilità	139
Beyond paper: new tools for mapping and understanding seismic vulnerability	169
Dati integrati per la "gestione smart" del rischio sismico	147
Integrated data for smart seismic risk management	175

Parte 3 | Part 3

MASON. Un nuovo approccio BIM per l'analisi multilivello della vulnerabilità sismica MASON. A new BIM-based approach for multilevel seismic vulnerability assessment

Meccanismi di collasso sismico negli edifici storici in muratura	181
Seismic collapse mechanisms in historic masonry buildings	239
Metodi e approcci per l'analisi della vulnerabilità sismica	209
Methods and approaches for seismic vulnerability assessment	255
L'algoritmo MASON: metodologia e struttura	215
The MASON algorithm: methodology and structure	259
Il livello qualitativo di MASON: rapidità e affidabilità	221
The qualitative level of MASON: speed and reliability	261
Il livello quantitativo di MASON: precisione e simulazione avanzata	229
The quantitative level of MASON: precision and advanced simulation	265
Il ruolo di MASON tra i metodi esistenti	233
The role of MASON among existing methods	269

Parte 4 | Part 4

Anatomia sismica di un borgo storico italiano con MASON Seismic anatomy of an Italian village with MASON

Tra monte e fiume: Borgo San Rocco a Sora (FR)	275
Between the mountains and river: Borgo San Rocco in Sora (FR)	319
Livello I – La diagnosi preliminare	285
Level I – Preliminary diagnosis	325
Livello II – Precisione digitale	297
Level II – Digital precision	331
Dalla diagnosi alla pianificazione	313
From diagnosis to planning	337

Elenco iconografico List of illustrations

Bibliografia References

Sitografia Webliography

È possibile che tutto possa essere descritto scientificamente, ma non avrebbe senso; sarebbe come se descrivessimo una sinfonia di Beethoven come una variazione nelle pressioni di onde.

Albert Einstein

It may be possible to describe everything scientifically, yet such a description would be meaningless; it would be akin to describing a Beethoven symphony as a mere variation in wave pressure.

Albert Einstein

PREFAZIONE

Nella riflessione contemporanea sul patrimonio architettonico e urbano, i centri storici minori si configurano come realtà apparentemente marginali nella geografia economica e politica del territorio, ma si rivelano fondamentali per la stratificazione culturale e identitaria del nostro paese.

Come osservato da Marco Saccucci, autore del volume, tali contesti urbani rappresentano il vero e proprio “codice genetico” della cultura nazionale, incarnando un’urbanità peculiare e distintiva. Questi borghi, spesso caratterizzati da uno stato di trascuratezza e vulnerabilità strutturale, custodiscono una relazione profonda e vitale tra spazio, memoria e comunità, integrando in maniera sinergica il valore culturale materiale e immateriale. La loro fragilità apparente non va intesa come segno di debolezza, bensì come manifestazione di una ricchezza intrinseca di significato, radicamento e identità. Le architetture che li costituiscono riflettono un’intelligenza del luogo maturata nel tempo e una sapienza artigiana sedimentata attraverso le generazioni. Richiamando il pensiero di Martin Heidegger, tali nuclei urbani possono essere interpretati come “luoghi” (*Ort*), ovvero spazi in cui gli elementi si raccolgono e dove le relazioni tra il mondo e l’uomo acquistano senso. Sono luoghi in cui l’uomo “fa spazio” (*Einräumen*), predisponendo ambiti aperti nei quali le cose possono coesistere e rivelarsi nella loro essenza.

Gli insediamenti storici, intrinsecamente caratterizzati da una complessa stratificazione di un *modus vivendi* consolidato, architetture vernacolari e trame spaziali non seriali manifestano pertanto una densità simbolica che supera le riduzioni funzionalistiche proprie del modernismo architettonico. Nonostante il loro inestimabile valore storico-culturale, tali contesti sono afflitti da problematiche critiche che ne compromettono seriamente la conservazione e ne minacciano la sopravvivenza a lungo termine. Tra queste si annoverano la fragilità strutturale, sovente accentuata dalla loro ubicazione in zone ad elevata pericolosità sismica, l’obsolescenza infrastrutturale e le difficoltà nell’accesso agli strumenti di pianificazione e gestione territoriale.

Il presente volume, intitolato *BIM per la vulnerabilità sismica dei centri storici minori*, si inserisce in questo quadro problematico con l’obiettivo di affrontare le criticità evidenziate. Esso persegue la fusione tra conoscenza scientifica, tecnologia avanzata e consapevolezza critica mediante

l'applicazione innovativa e culturalmente orientata del *Building Information Modeling* (BIM). L'adozione del BIM, in questa prospettiva, trascende la mera finalità strumentale per configurarsi come un catalizzatore per la promozione di una comprensione olistica e di una gestione sostenibile del patrimonio edilizio storico, contribuendo in tal modo alla sua resilienza e valorizzazione.

Con una profonda padronanza delle tematiche, l'autore offre in quest'opera una riflessione metodologica e applicativa sul ruolo delle tecnologie digitali nella valutazione e mitigazione del rischio sismico. A tal fine, è stato selezionato come caso studio il borgo di San Rocco a Sora (FR). Tale insediamento si inserisce in un sistema urbano complesso, sia per la sua stratificazione storico-ubicazionale lungo le rive del fiume Liri, sia per la sua collocazione in una zona ad elevata sismicità. Si configura, pertanto, come un contesto paradigmatico anche grazie al suo intrinseco e marcato *genius loci*.

Dal punto di vista operativo, questa pubblicazione introduce MASON, un algoritmo multilivello sviluppato dallo stesso autore, Marco Saccucci. Questo algoritmo è stato progettato per operare in un'ottica di interoperabilità e modellazione parametrica, consentendo la rappresentazione, la simulazione e l'interpretazione della vulnerabilità sismica in contesti caratterizzati da aggregati edilizi complessi, materiali eterogenei e geometrie irregolari. L'adozione di un approccio HBIM (*Heritage Building Information Modeling*), in combinazione con l'impiego di rilievi digitali ad alta precisione e di sistemi GIS per l'analisi territoriale, facilita il superamento della tradizionale dicotomia tra scala architettonica e scala urbana. Questo approccio integrato consente di fornire una visione sistematica del rischio sismico e delle sue potenziali implicazioni sulle comunità locali.

La ricerca presentata si colloca quindi in un più ampio quadro teorico e applicativo che, negli ultimi due decenni, ha radicalmente ridefinito il ruolo del disegno e della rappresentazione nell'ambito della tutela, gestione e valorizzazione del patrimonio costruito. Le tecnologie digitali hanno significativamente potenziato il processo di rilievo, trasformandolo in un dispositivo conoscitivo e predittivo altamente affidabile. L'applicazione di tecniche avanzate quali la fotogrammetria digitale, il laser scanning 3D e l'elaborazione multisensoriale dei dati spaziali ha, da un lato, elevato l'accuratezza geometrica e, dall'altro, reso possibile una lettura integrata di materia, tempo e trasformazione. In tale contesto, il disegno si configura come una forma di

mediazione tra i saperi, capace di articolare la rappresentazione metrica, l'interpretazione storica e la modellazione informativa. In particolare, il BIM ha acquisito una crescente centralità nelle strategie di gestione del patrimonio. Questa rilevanza è attribuibile non solo alle sue intrinseche potenzialità operative in termini di progettazione e manutenzione, ma anche alla sua capacità di strutturare modelli digitali come archivi dinamici, caratterizzati da elevata interoperabilità e aggiornamento continuo. L'applicazione del BIM all'ambito storico, nota come HBIM, comporta una revisione critica dei modelli operativi tradizionali. La modellazione parametrica, ad esempio, si rivela particolarmente idonea a gestire la complessità geometrica e materica dell'edilizia storica.

Contemporaneamente, l'integrazione di dati eterogenei, che spaziano dalle fonti archivistiche ai rilievi tridimensionali, consente un approccio più coerente alla gestione integrata del rischio. Come evidenziato dall'autore, il BIM, originariamente concepito per l'ottimizzazione dei processi edilizi, assume in questi contesti una funzione radicalmente trasformata: da strumento per il "costruire" a strumento essenziale per il "comprendere" la complessità dell'esistente. Parallelamente, l'impiego dei Sistemi Informativi Geografici (GIS) ha reso possibile una nuova forma di rappresentazione territoriale, che connette la scala dell'edificio a quella del paesaggio, includendo variabili geologiche, ambientali, demografiche e storiche. I GIS, se integrati con dati HBIM, ampliano le possibilità di simulazione e pianificazione, permettendo una gestione del patrimonio non più frammentata, bensì sistemica. Essi offrono strumenti fondamentali per la valutazione del rischio sismico diffuso, l'elaborazione di scenari di impatto, la localizzazione delle criticità e la definizione di priorità negli interventi. In tale quadro, il disegno non è più solamente rappresentazione del visibile, ma costruzione di modelli cognitivi multilivello, nei quali l'analisi spaziale diviene prerequisito per la gestione resiliente del territorio.

Il valore scientifico del lavoro di Marco Saccucci risiede non solo nell'accuratezza dei modelli proposti o nella solidità dell'impianto tecnologico adottato, ma primariamente nella sua capacità di interrogare criticamente la dimensione culturale e politica del rischio. In tale ottica, il BIM più che una piattaforma chiusa e prescrittiva, è inteso come un dispositivo cognitivo e progettuale capace di sostenere scenari di intervento basati sulla conoscenza storica, sulla lettura morfologica e sulla compatibilità strutturale. La

vulnerabilità, lungi dall'essere una categoria puramente tecnica, è qui interpretata nella sua dimensione sistemica, concernendo non solo le strutture, ma anche i significati, le pratiche e le relazioni spaziali e sociali che informano l'abitare storico. L'autore affronta l'intera ricerca con la consapevolezza che, quando un terremoto colpisce questi luoghi, non è solo una catastrofe materiale, ma una frattura simbolica che minaccia la memoria incarnata nello spazio e l'identità collettiva. La salvaguardia di questi borghi è fondamentale per proteggere soprattutto la visione futura del mondo.

Uno degli aspetti più rilevanti di quest'opera è la capacità di articolare teoria e prassi in un *continuum* operativo. La riflessione sul disegno e sulla rappresentazione non è mai fine a sé stessa, ma funzionale a una modellazione informata che tiene conto delle specificità materiche, costruttive e tipologiche degli edifici storici. Il rilievo, in quanto atto di conoscenza, è concepito come fondamento del progetto di prevenzione, ma anche come strumento per visualizzare le trasformazioni potenziali, per valutare l'impatto degli scenari simulati e per orientare le decisioni in chiave strategica e sostenibile.

L'innovazione proposta risiede altresì nell'impostazione transdisciplinare della ricerca che genera un campo di interazione in cui le tecnologie digitali divengono catalizzatori di conoscenza, superando la mera funzione di strumenti di controllo. Il risultato è un impianto metodologico robusto, suscettibile di estensione e replicazione in altri contesti, contribuendo così alla costruzione di una cultura della prevenzione fondata sull'integrazione tra sapere tecnico e responsabilità civile.

In definitiva, questo volume si configura come un contributo significativo alla riflessione contemporanea sul futuro dei piccoli centri storici italiani. La sfida che esso affronta è duplice: da un lato, fornire strumenti efficaci per la gestione del rischio sismico in contesti complessi; dall'altro, ribadire che ogni tecnologia applicata al patrimonio non è mai neutra, ma implica una visione del mondo, un'etica del progetto e una postura critica nei confronti del tempo. La digitalizzazione, in questa prospettiva, non è riducibile a una semplice replica geometrica del costruito, ma diventa strumento per riattivare la continuità storica, per dare voce alla materia silenziosa dell'architettura e per costruire ponti tra passato e futuro, tra memoria e trasformazione.

Marco Saccucci, sposando la visione ermeneutica di Hans-Georg Gadamer, concepisce l'opera del processo di digitalizzazione proprio come un evento

di disvelamento che si realizza nel percorso della comprensione, facilitando l'emergere di significati e relazioni intrinseche al patrimonio costruito.

Andrea Giordano

FOREWORD

In contemporary discourse on architectural and urban heritage, minor historic centers may appear marginal within the economic and political geography of the territory, yet they prove to be fundamental for the cultural and identity stratification of Italy.

As noted by Marco Saccucci, author of this volume, these urban contexts represent the true “genetic code” of national culture, embodying a distinctive and peculiar form of urbanity. These small towns, often marked by neglect and structural vulnerability, preserve a deep and vital relationship between space, memory, and community, integrating both tangible and intangible cultural values in a synergistic manner.

Their apparent fragility should not be interpreted as a sign of weakness but rather as an expression of intrinsic richness in meaning, rootedness, and identity. The architectures that define them reflect a place-based intelligence developed over time and a vernacular craftsmanship accumulated across generations. Recalling Martin Heidegger’s thought, these urban nuclei may be interpreted as *Orte*, places where elements gather and where relationships between the world and humankind acquire meaning. They are spaces in which human beings “make room” (*Einräumen*), creating open environments where things can coexist and reveal their essence.

Historic settlements, characterized by a complex stratification of lifestyles, vernacular architecture, and non-serial spatial patterns, thus express a symbolic density that transcends the functionalist reductions typical of architectural modernism. Despite their invaluable historical and cultural significance, these contexts face critical issues that severely compromise their preservation and threaten their long-term survival. Among the most pressing challenges are structural fragility – often exacerbated by their location in seismically active areas – infrastructural obsolescence, and difficulties in accessing planning and territorial management tools.

This volume, titled *BIM for the seismic vulnerability of minor historic centers*, engages with this problematic framework with the aim of addressing the criticalities mentioned. It seeks to merge scientific knowledge, advanced technology, and critical awareness through the innovative and culturally oriented application of Building Information Modeling (BIM). In this

perspective, the adoption of BIM transcends mere instrumental function, emerging as a catalyst for promoting a holistic understanding and sustainable management of historic building heritage thus contributing to its resilience and valorization.

With deep expertise on the subject, the author offers a methodological and applied reflection on the role of digital technologies in the assessment and mitigation of seismic risk. For this purpose, the historic center of Borgo San Rocco in Sora (FR) has been selected as a case study. This settlement is situated in a complex urban system, both in terms of its historical stratification along the banks of the Liri River and its location in a high seismic risk zone. It thus serves as a paradigmatic context, further enriched by a strong and intrinsic *genius loci*.

Operationally, this publication introduces MASON, a multilevel algorithm developed by the author himself, Marco Saccucci. Designed for interoperability and parametric modeling, MASON allows for the representation, simulation, and interpretation of seismic vulnerability in contexts characterized by complex building aggregates, heterogeneous materials, and irregular geometries. The adoption of an HBIM (Heritage Building Information Modeling) approach – combined with high-precision digital surveying and GIS systems for territorial analysis – facilitates the overcoming of the traditional dichotomy between architectural and urban scales. This integrated approach enables a systematic view of seismic risk and its potential implications for local communities.

The research presented fits within a broader theoretical and practical framework that, over the past two decades, has radically redefined the role of drawing and representation in the protection, management, and enhancement of built heritage. Digital technologies have significantly enhanced the surveying process, transforming it into a highly reliable cognitive and predictive tool.

The application of advanced techniques, such as digital photogrammetry, 3D laser scanning, and multi-sensor spatial data processing, has increased geometric accuracy and enabled an integrated reading of materiality, temporality, and transformation. In this context, drawing becomes a form of mediation among different bodies of knowledge, capable of articulating metric representation, historical interpretation, and information modeling.

In particular, BIM has gained increasing importance in heritage management strategies. This relevance is due not only to its operational potential in

design and maintenance but also to its ability to structure digital models as dynamic archives, characterized by high interoperability and continuous updating. Applying BIM to historic contexts, referred to as HBIM, entails a critical revision of traditional operational models. Parametric modeling, for example, proves particularly suitable for managing the geometric and material complexity of historic buildings.

At the same time, the integration of heterogeneous data, from archival sources to 3D surveys, supports a more coherent approach to integrated risk management. As the author highlights, BIM, originally designed to optimize construction processes, takes on a radically transformed role in these contexts: from a tool for building to an essential instrument for understanding the complexity of the existing built environment.

Simultaneously, the use of Geographic Information Systems (GIS) enables a new form of territorial representation, connecting the scale of the building to that of the landscape, incorporating geological, environmental, demographic, and historical variables. When integrated with HBIM data, GIS expands the potential for simulation and planning, allowing for a systemic rather than fragmented approach to heritage management. GIS offers essential tools for assessing widespread seismic risk, generating impact scenarios, identifying critical points, and setting intervention priorities.

In this framework, drawing is no longer merely the representation of the visible, but a means of constructing multilevel cognitive models, where spatial analysis becomes a prerequisite for resilient territorial management.

The scientific value of Marco Saccucci's work lies not only in the precision of the proposed models, or the robustness of the technological framework adopted, but above all in his ability to critically interrogate the cultural and political dimensions of risk. In this light, BIM is conceived not as a closed, prescriptive platform but as a cognitive and design device capable of supporting intervention scenarios rooted in historical understanding, morphological interpretation, and structural compatibility. Vulnerability, far from being a purely technical category, is interpreted here in its systemic dimension, encompassing not only structural issues but also the meanings, practices, and spatial and social relations that shape historical inhabitation.

The author approaches the entire research with the awareness that when an earthquake strikes these places, it is not merely a material disaster: it is a symbolic fracture that threatens the memory embedded in space and the collective

identity of the community. Preserving these towns is essential for safeguarding, above all, our future vision of the world.

One of the most significant aspects of this work is its ability to interweave theory and practice into an operational continuum. The reflection on drawing and representation is never an end in itself but is functional to informed modeling that accounts for the material, constructive, and typological specificities of historic buildings. Surveying, as an act of knowledge, is conceived both as the foundation of preventive design and as a tool to visualize potential transformations, assess the impact of simulated scenarios, and guide strategic, sustainable decision-making.

The innovation proposed also lies in the research's transdisciplinary orientation, which creates a space of interaction in which digital technologies act as catalysts of knowledge, surpassing their role as mere control tools. The result is a robust methodological framework that is scalable and replicable in other contexts, contributing to the development of a culture of prevention based on the integration of technical expertise and civic responsibility.

Ultimately, this volume constitutes a significant contribution to contemporary reflections on the future of Italy's small historic centers. The challenge it addresses is twofold: on one hand, to provide effective tools for managing seismic risk in complex contexts; on the other, to reaffirm that every technology applied to heritage is never neutral, but implies a worldview, an ethics of design, and a critical stance toward time.

Digitalization, in this perspective, is not reducible to a geometric replica of the built environment, but becomes a tool for reactivating historical continuity, giving voice to the silent matter of architecture and building bridges between past and future, memory and transformation. Embracing the hermeneutic vision of Hans-Georg Gadamer, Marco Saccucci conceives digitalization in this work as a revelatory event that unfolds through the process of understanding, allowing intrinsic meanings and relationships embedded in built heritage to emerge.

Andrea Giordano

Nota al testo

Questo volume comprende quattro tipi distinti di riferimenti, ciascuno organizzato e numerato separatamente:

- a) le *note a piè di pagina*, che vengono visualizzate nella parte inferiore della pagina, forniscono chiarimenti, commenti o fonti aggiuntive direttamente correlate al testo e sono numerate consecutivamente in tutto il libro;
- b) le immagini si presentano senza didascalie, pertanto un *elenco iconografico*, disponibile alla fine del libro, fornisce una didascalia per ciascuna di esse. Salvo ove diversamente indicato, tutte le immagini, fotografie, disegni ed elaborazioni grafiche sono opera dell'autore. Le didascalie sono numerate consecutivamente e separatamente, secondo l'ordine di apparizione di ciascuna immagine nel libro;
- c) la *bibliografia* elenca tutte le fonti cartacee consultate o citate nel testo. Appare alla fine del libro, subito dopo l'elenco iconografico, è in ordine alfabetico, ma sempre accompagnata da una numerazione consecutiva e separata;
- d) la *sitografia* (elenco delle fonti *online*) raccoglie ed elenca tutti gli indirizzi dei siti internet ai quali il testo fa riferimento. Anche questa sezione è posta alla fine del libro, segue la bibliografia e adotta un numero consecutivo per ciascun indirizzo internet.

Note to the text

This volume comprises four distinct types of references, each organized and numbered separately:

- a) *footnotes*, which appear at the bottom of the page, provide clarifications, commentary, or additional sources directly related to the text and are numbered consecutively throughout the book;
- b) the images are presented without captions, therefore an *iconographic list*, which can be found at the end of the book, provides a caption for each of them. Unless otherwise indicated, all images, photographs, drawings and graphic elaborations are the work of the author. The captions are numbered consecutively and separately, according to the order of appearance of each image in the book;
- c) the *bibliography* lists all printed sources consulted or cited in the text. It appears at the end of the book, immediately after the list of illustrations, it is in alphabetical order but always accompanied by a consecutive and separate numbering;
- d) the *webliography* (list of online sources) collects and lists all the addresses of the websites to which the text refers. This section, which is also placed at the end of the book, follows the bibliography and adopts a consecutive number for each internet address.

INTRODUZIONE

Nel cuore dell'Italia si diramano centinaia di centri storici minori, insediamenti che raramente occupano le prime pagine della storia, ma ne custodiscono le trame più profonde. Questi borghi, spesso assenti dalle cartografie del potere e marginali rispetto agli assi dello sviluppo economico, rappresentano invece un autentico codice genetico della cultura italiana: testimonianze sopravvissute alla dimenticanza, alla modernizzazione accelerata e ai traumi sismici. Nonostante le loro ridotte dimensioni, essi custodiscono una forma di urbanità che sfugge alle metriche convenzionali, definendosi piuttosto nella relazione profonda tra spazio, memoria e comunità. La loro resilienza non è segno di inerzia, ma espressione di una lunga e silenziosa adattabilità.

La loro vulnerabilità, prima ancora che strutturale, è ontologica: sono fragili non perché deboli, ma perché colmi di significato; preziosi nella loro delicatezza, esposti perché ricchi di identità. Le architetture che li compongono non derivano da logiche speculative né da esigenze di efficienza, ma rispondono a un'intelligenza del luogo: una conoscenza sedimentata nel tempo, costruita sull'esperienza e sulla necessità. Sono forme generate dalla continuità dell'abitare, più che dal progetto astratto; nate per durare nel paesaggio, per adattarsi alle sue irregolarità e per restituire proporzioni umane. Riflettono una sapienza artigiana e vernacolare, trasmessa attraverso la pratica quotidiana, in cui ogni scelta costruttiva rappresenta l'equilibrio tra risorse disponibili, clima, geografia e coesione sociale.

Sono, per usare le parole di Christian Norberg-Schulz, "luoghi esistenziali", dove l'abitare non è solo funzione, ma atto di appartenenza. "Essere nel mondo", in questi contesti, significa essere nel proprio paesaggio: riconoscersi nei materiali, accettarne le imperfezioni, vivere secondo un tempo non seriale, ma sedimentato¹.

Quando un sisma scuote queste strutture, non trema soltanto il suolo: si incrina anche la memoria incarnata nello spazio, quel tessuto invisibile che tiene insieme generazioni, abitudini, significati. Il terremoto, in questi luoghi, non è un semplice evento naturale, ma una frattura simbolica: interrompe la continuità storica e culturale, trasformando il crollo materiale in una perdita

¹ NORBERG-SCHULZ C. (1979), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 73.

di senso. Come osserva Pierre Nora, i *lieux de mémoire* non sono meri contenitori del passato, ma focolai simbolici di identità collettiva². Quando questi luoghi si dissolvono, non si perde solo un edificio: svanisce una narrazione, un equilibrio tra architettura, paesaggio e vissuto che nessuna ricostruzione standardizzata potrà restituire nella sua interezza.

Salvaguardare un centro storico minore, dunque, non significa soltanto preservare il costruito. Significa proteggere una visione del mondo, custodire forme di conoscenza incarnata, relazioni simboliche, pratiche abitative. Ogni pietra, ogni dislivello, ogni discontinuità urbana è una traccia eloquente di un'epoca, l'impronta di una funzione collettiva, il risultato di un adattamento significativo. Eppure, proprio questi luoghi sono oggi tra i più esposti alla marginalizzazione. Mancanza di risorse, rarefazione dei servizi, spopolamento ed eventi calamitosi (terremoti, frane, dissesto idrogeologico) ne minacciano ogni giorno la sopravvivenza. In un'epoca dominata da logiche di efficienza e accelerazione, la lentezza e la complessità che li caratterizzano rischiano di essere percepite non come valore, ma come intralcio.

È in questo contesto che si inserisce la sfida del *Building Information Modeling* (BIM). Nato come strumento per l'ottimizzazione dei processi edilizi, il BIM assume – nei centri storici minori – una funzione radicalmente diversa: non più legato alla produttività del nuovo, ma alla traduzione della complessità dell'esistente. Il passaggio è sostanziale: dal costruire al comprendere. In questo senso, il BIM si configura non solo come mezzo operativo, ma come dispositivo conoscitivo, capace di integrare rilievo, analisi materica, vulnerabilità strutturale e genealogia del contesto in una visione sistemica e stratificata.

Applicarlo a questi contesti implica piegare la tecnologia a un fine culturale: non congelare il patrimonio, ma accompagnarlo criticamente nel futuro. Come ricorda Massimo Cacciari, «ciò che rende un luogo degno di essere abitato è ciò che vi sopravvive»³. Il BIM, allora, può diventare uno strumento per far sopravvivere, per restituire voce a ciò che rischia l'oblio, per dare forma all'invisibile con un linguaggio digitale capace di ascolto.

La digitalizzazione, se intesa non come mera replica geometrica, ma come processo integrato di conoscenza e gestione, apre a nuove possibilità nella lettura e mitigazione della vulnerabilità sismica. Il modello informativo

² NORA P. (1984), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 72.

³ CACCIARI M. (2004), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 21.

diventa così una piattaforma cognitiva, in grado di raccogliere e connettere dati eterogenei – geometrici, materici, strutturali, storici – e di restituirli in una logica multilivello, aperta all’interoperabilità e all’aggiornamento continuo. Attraverso questa prospettiva, è possibile simulare le interazioni tra edifici aggregati, valutare scenari di rischio e proporre interventi consapevoli, che coniughino sicurezza e rispetto per l’identità materiale dei luoghi.

Questa monografia non si limita a descrivere un metodo. Si propone come una dichiarazione di responsabilità tecnica, culturale e civica, un’indagine sulle possibilità di abitare la complessità: tra vincoli normativi e visioni digitali, tra modelli parametrici e muri in pietra, tra il linguaggio dell’algoritmo e quello del *genius loci*. La posta in gioco è duplice: da un lato, la resilienza strutturale di contesti fragili; dall’altro, la tenuta simbolica e culturale di interi microcosmi urbani.

Nel dialogo tra rilievo e modello, simulazione e interpretazione, ogni dato raccolto, ogni rilievo eseguito, ogni scenario simulato diventa parte di un gesto più ampio: quello di trattenere ciò che potrebbe sparire per restituirgli continuità e voce. In questo senso, la modellazione non è solo rappresentazione: è una forma di impegno critico nei confronti della memoria e del futuro.

Il caso studio del borgo di San Rocco a Sora (FR) rappresenta un laboratorio applicativo in cui il metodo MASON, concepito per l’analisi e rappresentazione multilivello della vulnerabilità sismica, si integra con l’approccio HBIM e con i dati territoriali GIS. L’obiettivo non è soltanto descrittivo, ma anche propositivo: tracciare una direzione possibile per la messa in sicurezza del patrimonio diffuso, fondata su conoscenza, interoperabilità e consapevolezza critica.

Infine, questo lavoro intende mostrare che le tecnologie avanzate come intelligenza artificiale, rilievo digitale e simulazione numerica avanzata possono essere alleate della memoria, se orientate da un pensiero vigile. Come scriveva Martin Heidegger, «l’abitare autentico nasce quando si ha cura del mondo e dei luoghi»⁴. È in questa alleanza tra sapere e responsabilità che si colloca il presente contributo: non come soluzione definitiva, ma come tentativo critico di tenere aperta la possibilità di un futuro per il passato.

Marco Saccucci

⁴ HEIDEGGER M. (1951), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 51.

INTRODUCTION

In the heart of Italy, hundreds of minor historic centers branch out settlements that rarely occupy the front pages of history yet safeguard its deepest threads. These villages, often absent from the cartographies of power and marginal in relation to the axes of economic development, instead represent an authentic genetic code of Italian culture: testimonies that have survived oblivion, accelerated modernization, and seismic trauma. Despite their small size, they preserve a form of urbanity that escapes conventional metrics, defining itself instead in the profound relationship between space, memory, and community. Their resilience is not a sign of inertia, but an expression of long and silent adaptability.

Their vulnerability, even before being structural, is ontological: they are fragile not because they are weak, but because they are full of meaning; precious in their delicacy, exposed because they are loaded with identity. The architectures that compose them do not derive from speculative logics nor from efficiency needs but respond to an intelligence of place: some knowledge sedimented over time, built on experience and necessity. They are forms generated by the continuity of inhabiting, rather than by abstract design; born to endure in the landscape, to adapt to its irregularities, and to return human proportions. They reflect artisanal and vernacular wisdom, transmitted through daily practice, in which every construction choice represents the balance between available resources, climate, geography, and social cohesion.

They are, to use the words of Christian Norberg-Schulz, “existential places”, where dwelling is not only function, but an act of belonging. “Being in the world,” in these contexts, means being in one’s own landscape: recognizing oneself in the materials, accepting their imperfections, living according to a non-serial but sedimented time⁵.

When an earthquake shakes these structures, it is not only the ground that trembles: the memory embodied in space is also fractured by the invisible fabric that holds together generations, habits, meanings. Earthquakes, in these places, are not a mere natural event, but a symbolic fracture: they interrupt

⁵ NORBERG-SCHULZ C. (1979), *op. cit.* in bibliographic reference no. 73.

historical and cultural continuity, transforming material collapse into a loss of meaning. As Pierre Nora observes, *lieux de mémoire* are not mere containers of the past, but symbolic hearths of collective identity⁶. When these places dissolve, it is not just a building that is lost: a narrative vanishes, a balance between architecture, landscape, and lived experience that no standardized reconstruction can fully restore.

Safeguarding a minor historic center, therefore, does not only mean preserving the built heritage. It means protecting a worldview, safeguarding embodied forms of knowledge, symbolic relationships and dwelling practices. Every stone, every difference in level, every urban discontinuity is an eloquent trace of an era, the imprint of a collective function, the result of a meaningful adaptation. And yet, these very places are today among the most exposed to marginalization. Lack of resources, the thinning of services, depopulation, and calamitous events (earthquakes, landslides, hydrogeological instability) threaten their survival every day. In an era dominated by logic of efficiency and acceleration, the slowness and complexity that characterize them risk being perceived not as value, but as hindrance.

It is in this context that the challenge of *Building Information Modeling* (BIM) arises. Born as a tool for the optimization of construction processes, BIM assumes – in minor historic centers – a radically different function: no longer linked to the productivity of the new, but to the translation of the complexity of the existing. The shift is substantial: from building to understanding. In this sense, BIM is configured not only as an operational tool, but as a cognitive device, capable of integrating survey, material analysis, structural vulnerability, and genealogy of the context into a systemic and stratified vision.

Applying it to these contexts implies bending technology to a cultural aim: not freezing heritage but critically accompanying it into the future. As Massimo Cacciari reminds us, «what makes a place worthy of being inhabited is what survives within it»⁷. BIM, then, can become a tool for survival, to give voice to what risks oblivion, to give form to the invisible with a digital language capable of listening. Digitalization, if understood not as mere geometric replication but as an integrated process of knowledge and management, opens new possibilities in the reading and mitigation of seismic vulnerability.

⁶ NORA P. (1984), *op. cit.* in bibliographic reference no. 72.

⁷ CACCIARI M. (2004), *op. cit.* in bibliographic reference no. 21.

The information model thus becomes a cognitive platform, capable of gathering and connecting heterogeneous data – geometric, material, structural, historical – and returning them in a multi-level logic, open to interoperability and continuous updating. Through this perspective, it becomes possible to simulate the interactions between aggregated buildings, to evaluate risk scenarios, and to propose informed interventions, which combine safety and respect for the material identity of places.

This monograph does not merely describe a method. It proposes itself as a declaration of technical, cultural, and civic responsibility an investigation into the possibilities of inhabiting complexity: between regulatory constraints and digital visions, between parametric models and stone walls, between the language of the algorithm and that of the *genius loci*. What is at stake is twofold: on the one hand, the structural resilience of fragile contexts; on the other, the symbolic and cultural endurance of entire urban microcosms. In the dialogue between survey and model, simulation and interpretation, every data point collected, every survey performed, every simulated scenario becomes part of a broader gesture: that of holding on to what could disappear, in order to return to it continuity and voice. In this sense, modeling is not only representation: it is a form of critical commitment to memory and to the future.

The case study of the village of San Rocco in Sora (FR) represents an applicative laboratory in which the MASON method – conceived for the multi-level analysis and representation of seismic vulnerability – is integrated with the HBIM approach and GIS territorial data. The objective is not only descriptive, but also propositional: to trace a possible direction for the safeguarding of widespread heritage, founded on knowledge, interoperability, and critical awareness.

Finally, this work intends to show that advanced technologies such as artificial intelligence, digital surveying, and advanced numerical simulation can be allies of memory, if guided by a vigilant thought. As Martin Heidegger wrote, «authentic dwelling is born when one cares for the world and its places»⁸. It is in this alliance between knowledge and responsibility that the present contribution is placed: not as a definitive solution, but as a critical attempt to keep open the possibility of a future for the past.

Marco Saccucci

⁸ HEIDEGGER M., *op. cit.* in bibliographic reference no. 52.

PARTE 1



PARTE 1

LA "QUESTIONE" DEI CENTRI STORICI
E IL RISCHIO SISMICO IN ITALIA



Noi amiamo l'arte, ma riteniamo che essa non vada sottratta al contesto sociale in cui si è manifestata. Crediamo non abbia senso restaurare e conservare un centro storico, trasformandolo da agglomerato naturale di vita collettiva in residenza di lusso per esteti e maniaci dell'antico.

Giorgio Bassani

Centri storici minori: una vulnerabilità da comprendere e affrontare

I centri storici costituiscono un ragguardevole patrimonio culturale per il territorio italiano. L'incisivo rapporto empatico con l'ambiente naturale, con le caratteristiche morfologiche e materiche del luogo su cui insistono, contraddistingue l'identità estetica dei centri storici, caratterizzati da un'elevata qualità della vita sociale e aggregativa. La bellezza di questi luoghi è data dalla loro composizione urbana che, seguendo l'orografia del territorio, si inserisce rispettosa nell'ambiente circostante con semplici architetture, realizzate con materiali locali, che oggi definiremmo "sostenibili"⁹.

La pianificazione e la gestione delle trasformazioni agenti sui nuclei antichi delle nostre città è una questione complessa e governare tale complessità è la sfida più impegnativa. Le politiche urbane tese a riqualificare il patrimonio storico e, contemporaneamente, ad avviare un rilancio dell'immagine della città, rendono gli equilibri tra la conservazione dell'identità dei luoghi e l'uso distorto degli stessi sempre più delicati. Le interpretazioni e le soluzioni proposte per la loro preservazione, di volta in volta, mostrano i cambiamenti che hanno riguardato l'idea di città nel corso degli anni, e di tutte le relazioni sociali e storiche ad essa connesse, condizionando le teorie e pratiche urbanistiche di intervento e trasformazione della città stessa. La materia legislativa si è evoluta di conseguenza, insieme agli strumenti urbanistici relativi ai centri storici. Per troppo tempo la politica del "vincolismo" e dell' "incommensurabile" valore, ha determinato lo stato di abbandono e di degrado in cui versano i nostri centri storici. Ora il centro storico non è più un "monumento"

⁹ PELLICCIO A. *ET AL.* (2017), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 81.

intoccabile. Il tema del riuso, della tutela e del ripristino delle funzioni è oggi questione fondamentale nei processi urbani.

In quest'ottica, il dibattito sulla salvaguardia dei centri storici minori è tornato ad essere preponderante negli ultimi anni, soprattutto a seguito dei terremoti che hanno interessato le regioni del centro Italia. Per l'originalità della loro composizione urbana sono considerati "monumenti d'ambiente"¹⁰ da tutelare e preservare: la perdita del *genius loci*, espressione di quelle piccole comunità, significherebbe la perdita dell'identità culturale dell'intera nazione.

In letteratura, soprattutto dal punto di vista urbanistico, il tema dei centri storici è stato ampiamente studiato. Si intende qui introdurre la "questione" identificando le principali tendenze degli ultimi anni in Italia. Risulta interessante considerare gli ultimi quarant'anni, in quanto fortemente eterogenei da un punto di vista dei profili di intervento nei centri storici.

Gli anni Settanta segnarono un punto di svolta nella gestione dei centri storici. In questo periodo, a causa della crisi economica, che ha colpito in particolare il settore delle costruzioni, e della pressione sociale sul tema della casa, si cominciò a rivalutare il patrimonio edilizio esistente. Si passò dalla costruzione indiscriminata di nuove abitazioni alla consapevolezza della necessità di recuperare e riutilizzare l'esistente, evitando così uno "spreco edilizio" che minacciava di compromettere ulteriormente il tessuto urbano storico. Questo periodo vide anche l'introduzione del concetto di "riuso" come risposta alle esigenze abitative e come approccio integrato alla pianificazione urbanistica¹¹.

Negli anni Ottanta, il tema del riuso fu ulteriormente approfondito attraverso strumenti di pianificazione più articolati. Un esempio significativo fu l'introduzione delle *Varianti di approfondimento* ai Piani Regolatori Generali (PRG)¹², che consentivano di affrontare le specificità dei centri storici con

¹⁰ L'espressione "monumenti d'ambiente" riferita ai centri storici è stata utilizzata dall'architetto e urbanista Gustavo Giovannoni (1873-1947). Giovannoni è stato uno dei primi a concepire il centro storico non solo come un insieme di edifici monumentali, ma come un contesto urbano unitario da tutelare nel suo complesso, considerando l'integrazione tra architettura, urbanistica e vita sociale.

¹¹ CIARDINI F. *ET AL.* (1978), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 23.

¹² La *variante di approfondimento* ai piani regolatori è una modifica mirata al Piano Regolatore Generale (PRG) di un comune, con lo scopo di adeguarlo a nuove esigenze urbanistiche, normative o di sviluppo territoriale. Serve a rendere il piano regolatore più dettagliato,

strumenti operativi dedicati. Parallelamente, il recupero del patrimonio edilizio fu associato a politiche di riqualificazione urbana che puntavano non solo alla conservazione architettonica, ma anche al miglioramento della qualità della vita nelle città esistenti.

Gli anni Novanta rappresentarono un ulteriore cambio di paradigma. L'attenzione si spostò dalla conservazione della città storica come "monumento" al recupero dell'intera città, promuovendo una maggiore integrazione tra le parti storiche e quelle moderne. In questo contesto, venne avviato il primo inventario dei centri storici italiani, strumento fondamentale per comprendere la loro distribuzione e rilevanza¹³.

Negli ultimi anni, l'approccio alla gestione e alla tutela dei centri storici ha subito un'evoluzione significativa, ponendo un'enfasi crescente sulla necessità di preservare e valorizzare questi piccoli centri. Il tema è divenuto centrale nelle politiche nazionali, grazie anche a interventi legislativi e a programmi specifici volti a contrastare l'abbandono e il degrado di queste realtà. Per affrontare le criticità più rilevanti, sono state identificate alcune misure strategiche che mirano a garantire la vitalità e la sostenibilità dei piccoli centri storici:

- Incentivi fiscali ed economici: favorire la residenzialità nei piccoli comuni attraverso agevolazioni per i residenti e per chi intende trasferirvisi, con l'obiettivo di contrastare lo spopolamento e attrarre fasce di popolazione più giovane.
- Riconoscimento delle esigenze specifiche: considerare le particolari necessità di chi vive e lavora in comuni di dimensioni ridotte, adottando politiche mirate per supportare queste comunità.
- Promozione delle peculiarità territoriali: valorizzare il patrimonio culturale, paesaggistico e identitario di ciascun territorio, rafforzandone l'attrattiva turistica e il potenziale economico.
- Affermazione del concetto di rete: incentivare la cooperazione tra piccoli centri storici, promuovendo sinergie che permettano di superare le limitazioni dovute al ridotto grado di autonomia.
- Garanzia di servizi adeguati: assicurare un livello minimo di infrastrutture e servizi essenziali per rendere non solo possibile, ma anche

aggiornato ed efficace nella gestione del territorio, mantenendo una coerenza con la pianificazione urbanistica generale.

¹³ GASPARRINI C. (1994), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 47.

desiderabile vivere in questi centri, valorizzandone i vantaggi ambientali, sociali e culturali.

Gli orientamenti generali individuati contribuiscono alla valorizzazione dei centri storici minori, un processo che si realizza principalmente attraverso lo sviluppo turistico. Tuttavia, tale sviluppo non si basa esclusivamente sulla tutela del patrimonio storico, ma si estende anche alla valorizzazione dei contesti ambientali e paesaggistici in cui questi centri, o gruppi di essi, sono inseriti. L'integrazione tra patrimonio culturale, paesaggio e risorse naturali rappresenta un elemento chiave per promuovere un turismo sostenibile e consapevole, capace di generare benefici economici e sociali senza compromettere l'autenticità e l'identità dei luoghi.

Le trasformazioni in atto nel settore agricolo, in seguito alla riforma della Politica Agricola Comune (PAC) dell'Unione Europea¹⁴, hanno introdotto significative novità nella gestione del territorio rurale e nelle strategie di sviluppo locale. In questo contesto, la sfida principale per i centri storici minori non ancora strutturati in un sistema di valorizzazione è quella di contrastare lo spopolamento. Questo obiettivo non può essere raggiunto unicamente attraverso la promozione turistica, ma richiede un approccio più ampio che includa il potenziamento dei servizi essenziali per la popolazione, la creazione di nuove opportunità di lavoro e la promozione di una "moderna vivibilità", strettamente legata al miglioramento della mobilità e dell'accessibilità. L'attuazione di strategie efficaci di valorizzazione si configura come un processo articolato, in cui la chiave di successo risiede nell'integrazione tra politiche settoriali, attori locali e risorse finanziarie disponibili. Tuttavia, raggiungere questa sinergia non è sempre agevole, data la complessità degli interessi in gioco e la frammentazione delle competenze tra i diversi livelli istituzionali. Un approccio metodologicamente corretto alla valorizzazione dovrebbe partire da una fase preliminare di conoscenza e interpretazione del territorio, che costituisce la base su cui sviluppare interventi mirati e sostenibili. Molte esperienze di valorizzazione già avviate si basano su iniziative apparentemente semplici ma efficaci, come la creazione di reti di sentieri, itinerari enogastronomici o progetti di borgo-museo. Tuttavia, affinché queste iniziative abbiano un impatto duraturo e significativo, è fondamentale che siano concepite in stretta relazione con l'unicità del contesto territoriale. Ogni intervento deve essere pensato in funzione delle peculiarità locali, evitando approcci

¹⁴ Vedi nota sitografica n. 1.

standardizzati che rischiano di snaturare l'identità dei luoghi. In questo senso, il coinvolgimento delle risorse locali – sia in termini di materiali, sia in termini di competenze professionali già presenti sul territorio – rappresenta un punto di partenza essenziale per sviluppare percorsi progettuali realmente aderenti alle specificità del contesto di intervento.

Una delle principali sfide legate alla valorizzazione dei centri storici minori riguarda la necessità di contrastare il fenomeno dello spopolamento, promuovendo condizioni favorevoli allo sviluppo economico e sociale. L'obiettivo è quello di incentivare la nascita e il rafforzamento di attività economiche, sia nuove che preesistenti, garantendo al contempo un'adeguata dotazione di infrastrutture e servizi essenziali per la comunità. La disponibilità e l'efficienza dei servizi rappresentano, infatti, un elemento cruciale con cui le amministrazioni locali devono confrontarsi, affinché la permanenza nei piccoli centri storici risulti non solo possibile, ma anche attrattiva.

Oltre alla qualità dei servizi, un altro aspetto fondamentale nei processi di valorizzazione è la tutela dell'identità del luogo. L'identità di un centro storico, indipendentemente dalle sue dimensioni, è il risultato dell'interazione tra il patrimonio fisico, la memoria storica, la cultura locale e le tradizioni. Questo legame indissolubile tra il territorio e i suoi abitanti rappresenta una componente essenziale della vitalità di questi luoghi. Di conseguenza, qualsiasi intervento di trasformazione urbana o di valorizzazione deve essere attentamente calibrato per evitare impatti invasivi o di rottura rispetto all'assetto preesistente.

La chiave per un intervento efficace risiede nella capacità di utilizzare e valorizzare le risorse locali, coinvolgendo attivamente la comunità nei processi di riqualificazione. Il rischio principale di strategie orientate esclusivamente a politiche settoriali, come lo sviluppo turistico e commerciale, è quello di generare una progressiva perdita dell'identità originaria del luogo. Se non bilanciata da una pianificazione attenta, la promozione economica può portare a una trasformazione artificiale dei centri storici, rendendoli più simili a scenari turistici che a spazi vissuti dalla comunità locale. Per evitare tale deriva, è essenziale adottare un approccio integrato che mantenga un equilibrio tra tutela, innovazione e sostenibilità, garantendo così la continuità della vita urbana senza snaturare l'anima del territorio.



Arpino



Isola del Liri



Alvito



Vicalvi



Broccostella



Evoluzione del concetto di centro storico: dalla tutela alla valorizzazione

Cercare di proporre una definizione di centro storico è oggi un'operazione estremamente difficile per la struttura sintetica che dovrebbe avere la proposizione riuscendo, nonostante la sua brevità, a racchiudere in sé almeno dei riferimenti a molteplici fenomeni complessi, e per l'abbondanza di varietà tipologica, strutturale, storica, dimensionale, geografica e geologica degli stessi. La necessità ed al tempo stesso la difficoltà di una definizione è spesso generata dalla consapevolezza che non si può «identificare e comporre una categoria concettuale unitaria in cui far rientrare i vari tipi di agglomerati urbani di antica edificazione e/o di elementi interni di essi, dei quali il nostro paese presenta una fenomenologia particolarmente ricca [...]»¹⁵.

Il concetto di centro storico si è evoluto nel tempo, adattandosi ai cambiamenti culturali, sociali ed economici che hanno interessato le città e i territori. Se in passato il valore dei centri storici era prevalentemente ricondotto alla loro dimensione monumentale, oggi essi sono riconosciuti come organismi urbani complessi, la cui tutela non può limitarsi alla conservazione fisica degli edifici, ma deve comprendere la valorizzazione delle dinamiche sociali ed economiche che li caratterizzano. Si intende allora analizzare alcune definizioni per porre in luce da un lato la complessità del tema, e dall'altro tutti gli elementi, le discipline e le problematiche di cui è fondamentale tener conto nel momento in cui si vuole affrontare un discorso sui centri storici.

La storia dell'urbanistica colloca tradizionalmente l'inizio dello studio dei centri storici nella seconda metà dell'Ottocento, un periodo di svolta segnato dagli interventi di Georges-Eugène Haussmann a Parigi¹⁶. In questo ambito

¹⁵ D'ALESSIO G. (1983), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 29.

¹⁶ Georges-Eugène Haussmann (1809-1891) fu un urbanista e funzionario francese, celebre per la radicale trasformazione di Parigi durante il Secondo Impero sotto Napoleone III. Nominato Prefetto della Senna nel 1853, guidò un vasto piano di modernizzazione urbana che rivoluzionò la capitale francese, rendendola più funzionale, igienica e monumentale. I suoi interventi includevano l'apertura di grandi boulevard, la demolizione di quartieri medievali insalubri, la creazione di fognature moderne, l'armonizzazione dell'architettura cittadina e l'espansione di parchi e spazi verdi. Il suo lavoro rese Parigi un modello di città moderna, influenzando l'urbanistica di molte altre metropoli nel mondo.

disciplinare emergono due principali orientamenti interpretativi: il primo considera i centri storici parte integrante del patrimonio culturale, enfatizzandone il valore storico e artistico; il secondo, invece, li inquadra all'interno della gestione complessiva del territorio, ponendo l'accento sugli aspetti urbanistici, funzionali e socioeconomici della loro evoluzione. Già con la Carta di Atene¹⁷ del 1931 si afferma l'importanza di proteggere i monumenti all'interno del loro contesto urbano, superando la concezione isolata della tutela del singolo edificio. Un ulteriore passo in avanti si compie con la Carta di Venezia¹⁸ del 1964, che introduce il concetto di restauro integrato, sottolineando la necessità di preservare il carattere autentico dei centri storici, compresi i materiali e le tecniche costruttive tradizionali.

In Italia, in ritardo rispetto ad altri paesi europei, inizia a nascere una nuova attenzione verso i centri storici soltanto nel 1960, in occasione del Convegno di Gubbio organizzato dall'I.N.U. (Istituto Nazionale di Urbanistica) sul tema *Salvaguardia e risanamento dei centri storico-artistici*. Pur non essendo presente nella Carta di Gubbio¹⁹ una definizione ufficiale di centro storico, si afferma sin dalla relazione introduttiva tenuta da Antonio Cederna e Mario

¹⁷ La Carta di Atene del 1931 è un documento elaborato durante il Congresso Internazionale di Architettura Moderna (CIAM), che segna uno dei primi tentativi di definire dei principi per la tutela del patrimonio monumentale e dei centri storici. La carta sottolinea l'importanza della protezione dei monumenti nel loro contesto urbano, promuovendo il restauro scientifico e scoraggiando interventi arbitrari o ricostruzioni stilistiche. Essa pone le basi per una visione più organica della conservazione, anticipando il concetto di tutela integrata che sarà poi sviluppato nella Carta di Venezia del 1964.

¹⁸ La Carta di Venezia del 1964 è un documento fondamentale per la tutela e il restauro dei beni architettonici, adottato dal II Congresso Internazionale degli Architetti e Tecnici dei Monumenti. Essa introduce il concetto di restauro integrato, sottolineando l'importanza di preservare l'autenticità storica, materiale e culturale degli edifici, evitando ricostruzioni arbitrarie o stilizzazioni. La carta amplia la tutela dai singoli monumenti all'intero contesto urbano, riconoscendo i centri storici come organismi vivi da conservare nel loro equilibrio architettonico, ambientale e funzionale.

¹⁹ La Carta di Gubbio del 1960 è un documento fondamentale per la tutela dei centri storici italiani, elaborato in occasione del I Convegno Nazionale per la Salvaguardia e il Risanamento dei Centri Storici. Essa segna un cambiamento cruciale nell'approccio alla conservazione, riconoscendo che non solo i singoli monumenti, ma l'intero tessuto urbano storico deve essere preservato nella sua integrità architettonica, ambientale e sociale. La carta introduce il concetto di restauro urbano, affermando che i centri storici non devono essere trattati come musei statici, ma come organismi vivi, dove la tutela deve conciliarsi con le esigenze della comunità e dello sviluppo contemporaneo.

Manieri Elia, che «la tutela e la salvaguardia debbano essere estese a tutta la città storica, tutto l'insieme della sua struttura urbanistica, quale si è venuta lentamente componendo nei secoli». Il Convegno genera senza dubbio una svolta culturale, come testimoniato dal successivo proliferare di leggi speciali, proposte di legge, dibattiti e progetti inerenti ai centri storici. Particolare attenzione e interesse vanno dati all'ottica di interventi generalizzati di salvaguardia dei centri storici, intesi come un *unicum* e non come insieme di monumenti.

È in questo clima culturale che viene fornita la prima definizione ufficiale di centro storico: nel 1964, la Commissione d'indagine per la tutela e la valorizzazione del patrimonio storico, artistico e del paesaggio²⁰, dopo aver dato per la prima volta la definizione di “Beni culturali ambientali” nella dichiarazione XXXIX, definisce i centri storici urbani come «[...] quelle strutture insediative urbane che costituiscono unità culturale o la parte originaria e autentica di insediamenti, e testimoniano i caratteri di una viva cultura urbana [...]». Il centro storico viene dunque inquadrato e classificato fra i beni culturali, anche se non si deve confondere il bene centro storico con altri inseriti nella stessa categoria, quali opere figurative, archivi e manoscritti²¹.

Nel 1969 la definizione di centro storico viene inserita nel Dizionario Enciclopedico di Architettura e Urbanistica²². In essa si apprezza in particolare, oltre il rispetto per le diverse stratificazioni ed il breve riferimento all'estrema

²⁰ Detta Commissione Franceschini dal nome del suo presidente.

²¹ Nella dichiarazione del '64 sono definite delle indicazioni sulla loro tutela che si dovrà attuare mediante misure cautelari ed attraverso i piani regolatori che «dovranno avere riguardo ai centri medesimi nella loro interezza» ed allo stesso tempo rivitalizzarli «garantendo loro ragioni di vita economica e sociale, che consentano lo svolgimento di una vita associata non depressa» da D'ALESSIO G. (1983), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 29.

²² «Nucleo di una città che costituisca per caratteristiche formali, tipologiche e urbanistiche un complesso legato a particolari momenti storici. A volte il concetto di centro storico è esteso all'intera città, quando esso rappresenta una testimonianza viva di altre epoche. Il termine è stato diffuso dalla più recente legislazione urbanistica, la quale si è occupata del problema della conservazione, risanamento e valorizzazione del centro storico». I centri storici «possono essere unitari o frammentari, completamente o parzialmente frammentari, completamente o parzialmente conservati nella loro originaria strutturazione; la loro delimitazione topografica [...] dovrà comprendere l'intera struttura urbana, quando si tratti di insediamenti in cui la struttura storica sia prevalente, anche quando questa abbia subito nel tempo palesi deformazioni che hanno rotto la continuità del territorio storico [...] possono rientrare nella tutela dei centri storici anche costruzioni relativamente recenti (sec. XIX) o addirittura moderne, se ritenute documenti decisivi ed unici nella storia dell'architettura».

varietà tipologica, l'ipotesi di estensibilità del centro storico all'intera città riprendendo la definizione introdotta nel 1965 da Roberto Pane il quale, distinguendo tra centro antico e centro storico scrive: «[...] il centro antico corrisponde all'ambito della stratificazione archeologica, mentre il centro storico è la città stessa nel suo insieme, ivi compresi i suoi agglomerati moderni. In altre parole, ciò che è antico è storico ma non tutto ciò che è storico è antico. Il concetto di antico esclude il nuovo ed il moderno e definisce il nucleo primitivo, dalle origini [...] incluse, ovviamente, le strutture e le forme medievali, rinascimentali, barocche e ottocentesche che sono state configurate dalle successive stratificazioni»²³.

Le definizioni, sempre più elaborate, iniziano a contenere riferimenti a vari parametri: Vincenzo Di Gioia afferma che può essere qualificato come centro storico «un luogo più o meno configurabile entro un perimetro, nel quale tradizionalmente la cittadinanza ha svolto (e continua a svolgere) le attività principali, e si sono quindi consolidate da tempo le sedi più rappresentative per tali funzioni [...]» e soprattutto precisa che «la nozione di centro storico tende oggi ad allargarsi ulteriormente, per applicarsi a tutti i contesti insediativi aventi valore di testimonianza storica, a qualunque epoca appartengano [...]. Centro storico non è soltanto il centro antico di una città [...] l'espressione di centro storico è assunta a significare tutti quei valori urbanistici, di ambiente architettonico e d'arte, che si intendono oggi tutelare: ivi compreso perciò ogni valore che, nella loro storia, critica e recente, la città, il piccolo centro, od anche l'insediamento più isolato e modesto, abbiano saputo esprimere»²⁴. Inoltre, viene notato che, nell'accezione più diffusa, il "centro" non sia riferito alla sua posizione rispetto al resto dell'insediamento e che l'aggettivo "storico" non sia quasi mai condizionato da una veneranda età dell'insediamento²⁵. Potrebbe essere infatti considerata un difetto la parola "centro" che allude ad una raffigurazione geometrica o geografica di una parte del territorio dove dovrebbe vivere un gruppo di individui, distinguendosi allora ad esempio dal "nucleo edilizio". È difettosa inoltre la parola "storico", estremamente generica se consideriamo che tutto il nostro territorio è stato conformato da millenni dalla mano dell'uomo.

²³ PANE R. (1965), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 75.

²⁴ DI GIOIA V. (1975), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 35.

²⁵ MANIERI Elia M. (1978), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 62.

Nel 1979, Roberto Di Stefano evidenzia la persistente confusione, sia negli atti ufficiali che nel linguaggio comune, nell'uso e nel significato dei termini legati ai centri storici, riscontrando frequenti inversioni di significato. Egli definisce il centro storico come «la parte vecchia (e, a volte, moderna ma non nuova e contemporanea) la quale comprende in sé i documenti dell'evoluzione civile della comunità umana che ha creato la città stessa, così come noi la vediamo». Inoltre, sottolinea che l'individuazione di un centro storico non può basarsi esclusivamente su criteri cronologici prestabiliti, ma deve derivare da un'analisi storico-critica di tipo qualitativo, capace di riconoscerne il valore identitario e culturale²⁶.

Dello stesso parere è Gaetano Miarelli Mariani²⁷, il quale esclude l'adozione di criteri puramente legislativi o di classificazioni generiche basate su epoche storiche, stili, maniere e scuole artistiche, ritenendole inapplicabili alla definizione dei centri storici. Egli sottolinea, da un lato, la necessità di individuare una periodizzazione alternativa più flessibile e aderente alle specificità del contesto urbano, e dall'altro evidenzia le criticità e gli equivoci che possono derivare dall'adozione di una definizione eccessivamente rigida, la quale rischierebbe di ridurre la complessità e la dinamicità del patrimonio storico-urbano a schemi semplificati e poco efficaci.

Volendo approcciarsi ad una distinzione delle tipologie di centri storici, le ipotesi di classificazioni possibili sono chiaramente molteplici, in funzione dei diversi parametri considerabili, come la localizzazione geografica, le dimensioni demografiche, le caratteristiche morfologiche o il valore storico-artistico. Lo stesso Roberto Di Stefano propone una suddivisione basata sulla variabile geografica e sull'entità del nucleo urbano, distinguendo quattro categorie principali: (a) insiemi architettonici indipendenti, (b) piccoli centri urbanizzati, (c) città storiche e (d) quartieri storici di grandi città. Gli insiemi architettonici indipendenti comprendono strutture come castelli e monasteri, che possono essere considerati centri storici a condizione che siano ancora abitati e vitali, e non ridotti a semplici ruderi. I piccoli centri urbanizzati, generalmente di poche migliaia di abitanti, si sviluppano in contesti rurali, marittimi o montani e, pur avendo un rilevante valore culturale, risultano meno significativi dal punto di vista economico e amministrativo. Le città storiche, a loro volta, possono presentare un carattere omogeneo o misto e si

²⁶ DI STEFANO R. (1979), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 36.

²⁷ MIARELLI MILANI G. (1979), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 65.

distinguono per aver subito un impatto limitato dai processi di urbanizzazione e crescita demografica, conservando in larga parte la loro struttura originaria. Infine, i quartieri storici delle grandi città vengono ulteriormente suddivisi in quattro tipologie specifiche:

- Quartieri storici sviluppati lungo corsi d'acqua o situati sulla costa, caratterizzati da una stretta relazione con l'elemento marittimo o fluviale.
- Quartieri storici adiacenti a complessi monumentali o archeologici di particolare rilevanza, che spesso ne condizionano l'evoluzione e il valore identitario.
- Quartieri storici situati in prossimità di grandi spazi verdi, che mantengono un legame significativo con il paesaggio naturale.
- Quartieri storici isolati, circondati da aree urbane moderne, che si trovano a confrontarsi con fenomeni di alterazione o frammentazione del tessuto originario.

Ulteriori classificazioni dei centri storici possono basarsi su criteri dimensionali o demografico-sociali, evidenziando le dinamiche insediative e le condizioni socioeconomiche che caratterizzano questi contesti urbani. Tra le categorie individuabili, si distinguono:

- Centri storici a carattere direzionale all'interno di aree metropolitane, in cui le funzioni residenziali sono progressivamente sostituite da attività amministrative, commerciali e terziarie, trasformando il tessuto urbano in un polo strategico per i servizi e le istituzioni.
- Centri storici soggetti a degrado nei quartieri per immigrati situati in aree metropolitane, dove il fenomeno dell'immigrazione, unito alla mancanza di adeguate politiche di riqualificazione, porta a condizioni di sovraffollamento e precarietà abitativa.
- Centri storici in fase di equilibrio e assestamento, in cui le dinamiche di popolazione e le attività economiche si mantengono relativamente stabili, consentendo una gestione sostenibile del patrimonio edilizio e urbano.
- Centri storici in fase di esodo, ma con attività edilizia ancora presente, nei quali, nonostante un progressivo spopolamento, si registrano interventi di recupero e ristrutturazione, spesso legati a iniziative di rilancio turistico o di riqualificazione urbana.
- Centri storici in fase di esodo e abbandono, caratterizzati da un progressivo svuotamento demografico e dal degrado del patrimonio edilizio,

con un rischio crescente di perdita della funzione urbana e identitaria del luogo.

Un'ulteriore modalità di classificazione dei centri storici si basa su categorie tipologiche, alle quali è possibile associare diversi approcci progettuali in funzione delle specificità morfologiche e insediative. Dino Vianello²⁸ propone una suddivisione fondata sulle caratteristiche strutturali e ambientali dei centri storici, individuando quattro principali tipologie:

- Centri storici in aree collinari con edilizia seriale (contrade), caratterizzati da uno sviluppo insediativo frammentato e diffuso lungo le alture, con edifici disposti secondo criteri di adattamento morfologico al territorio.
- Centri storici in pianura con edilizia a maglie larghe, allineata lungo strade o corsi d'acqua, in cui la struttura urbanistica è più regolare e l'organizzazione degli spazi risulta meno compatta rispetto agli insediamenti collinari.
- Centri storici in aree lagunari o litorali con tessuti a pettine paralleli alla linea di costa, tipici delle zone marittime e fluviali, dove l'orientamento urbano segue logiche di accessibilità e sfruttamento delle risorse acquatiche.
- Centri storici, anche di estensione significativa, con andamenti planimetrici e tessuti edilizi semplici e seriali, caratterizzati da una configurazione urbana regolare e facilmente riconoscibile, spesso legata a modelli insediativi razionali o di origine medievale.

Le numerose definizioni e classificazioni elaborate nel tempo evidenziano la necessità di adottare un approccio multidimensionale nella concezione di centro storico. È fondamentale riconoscerlo non solo come bene culturale, da preservare per il suo valore storico e architettonico, ma anche come bene economico, il cui sviluppo può generare opportunità di crescita sostenibile, e come bene sociale, essenziale per la qualità della vita e per il mantenimento delle dinamiche comunitarie. La concezione del centro storico come bene culturale, sostenuta da Roberto Pane e Renato Bonelli²⁹, sebbene appaia a prima vista la più appropriata, rischia di assumere un carattere eccessivamente teorico quando viene interpretata in modo tale da relegare in secondo piano le componenti economiche e sociali. Tale visione può condurre a posizioni

²⁸ VIANELLO D. (1988), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 95.

²⁹ BONELLI R. (1976), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 14.

estreme, come quella espressa da Alberto Samonà³⁰, secondo cui i centri storici dovrebbero essere destinati esclusivamente alla contemplazione, poiché ritenuti inadeguati a rispondere alle esigenze della vita contemporanea a causa della rigidità dei loro tessuti e delle loro architetture. Allo stesso modo, la concezione del centro storico come bene sociale, pur avendo una forte valenza operativa, può generare distorsioni quando trascura la sua dimensione culturale. Ciò si verifica, ad esempio, quando si interviene con adattamenti forzati di strutture antiche per funzioni collettive, compromettendone l'integrità storica e confondendo il restauro con il semplice riuso. Un'altra criticità risiede nell'interpretazione acritica della conservazione sociale, che si traduce talvolta in un meccanico mantenimento della popolazione residente, senza una reale strategia di inclusione e sviluppo. Questo approccio può accentuare fenomeni di ghettizzazione spontanea, contribuendo al degrado piuttosto che alla rigenerazione equilibrata del tessuto urbano storico.

³⁰ SAMONÀ A. (1969), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 90.

Normative e strumenti per la gestione dei centri storici

L'evoluzione del concetto di centro storico è strettamente legata allo sviluppo della legislazione nazionale e regionale in materia di tutela e pianificazione urbana. La prima definizione legislativa ufficiale di centro storico in Italia risale al 1967, quasi trent'anni dopo le fondamentali leggi di tutela del 1939³¹. Rispetto ad altri Paesi europei, l'Italia si è mostrata inizialmente in ritardo nell'affrontare in modo organico la questione dei centri storici. Già nel secondo dopoguerra, nazioni come Francia, Olanda, Polonia, ex Cecoslovacchia ed ex Jugoslavia avevano maturato una chiara consapevolezza della necessità di strumenti specifici per l'analisi, la pianificazione e l'intervento nei contesti urbani storici. Questi Paesi avevano infatti sviluppato normative che riconoscevano la peculiarità dei centri storici all'interno del tessuto cittadino, in virtù della loro antichità e del loro valore artistico e monumentale. In Italia, invece, la regolamentazione del settore ha avuto un'evoluzione più graduale, con un iniziale approccio frammentario che, solo negli anni successivi, si è consolidato in strumenti di gestione più strutturati e integrati.

Al riguardo è noto che le leggi di tutela del 1939 furono promulgate in un periodo in cui la cultura urbanistica non contemplava ancora il concetto di centro storico come un'entità unitaria, dotata di valore indipendente dai singoli monumenti. In particolare, la Legge n. 1089 del 1° giugno 1939³², pur rappresentando una pietra miliare nella protezione del patrimonio culturale, non conteneva disposizioni specifiche per la salvaguardia dei centri storici nel loro complesso. L'attenzione era rivolta esclusivamente ai singoli edifici di interesse storico-artistico, mentre il contesto urbano circostante veniva considerato solo in funzione della cornice paesaggistica del monumento. Questo approccio portò persino a teorizzare la demolizione di parti del tessuto connettivo per isolare e valorizzare i monumenti nella loro individualità.

³¹ Legge n. 1089 del 1939 sulla protezione dei beni culturali e Legge n. 1497 del 1939 sulla tutela del paesaggio.

³² La Legge n. 1089 del 1° giugno 1939, intitolata *Tutela delle cose d'interesse artistico e storico*, fu una delle prime normative organiche in Italia per la protezione del patrimonio culturale. Promossa durante il governo fascista, consolidò e ampliò disposizioni precedenti, regolamentando la dichiarazione d'interesse culturale, i vincoli di tutela e le restrizioni sulla circolazione di beni artistici e storici.

La Legge n. 1497 del 20 giugno 1939³³, invece, si avvicina maggiormente alla moderna nozione di centro storico, soprattutto nell'articolo 1, in cui si fa riferimento ai «complessi di cose immobili che compongono un caratteristico aspetto avente valore estetico e tradizionale». Tuttavia, nel Regolamento di attuazione della legge, approvato con R.D. n. 1357 del 3 giugno 1940³⁴, emergono elementi che sollevano dubbi sull'effettiva possibilità di applicare tale normativa alla tutela dei centri storici nel loro insieme. Il concetto di tutela, infatti, rimane ancora parziale e frammentario, limitandosi a singoli edifici di pregio senza riconoscere il valore storico e identitario dell'intero contesto urbano.

Anche la Legge Urbanistica n. 1150 del 17 agosto 1942³⁵ non contempla alcun riferimento ai centri storici, confermando come, all'epoca, il concetto non fosse ancora stato formalmente elaborato. L'espressione "centro storico" non può infatti essere semplicemente assimilato a quella di "centro abitato", menzionata nell'articolo 1 della legge, che si riferisce in modo generico agli insediamenti urbani senza considerare il valore storico o artistico del tessuto edilizio.

Un primo riferimento esplicito ai centri storici compare soltanto nella Legge n. 765 del 6 agosto 1967, nota come "Legge Ponte"³⁶, il cui articolo

³³ La Legge n. 1497 del 20 giugno 1939, intitolata *Protezione delle bellezze naturali*, fu una delle prime normative italiane a tutelare il paesaggio come bene di interesse pubblico. Integrata con la Legge n. 1089 del 1939 sulla tutela del patrimonio artistico e storico, questa legge introdusse il concetto di vincolo paesaggistico, imponendo limiti alle trasformazioni del territorio in aree di particolare pregio naturale, storico o ambientale.

³⁴ Il Regio Decreto n. 1357 del 3 giugno 1940 fu emanato per dare attuazione alla Legge n. 1089 del 1939 sulla tutela dei beni di interesse artistico e storico in Italia. Questo regolamento definiva in dettaglio le modalità per l'applicazione della legge, stabilendo le procedure per la dichiarazione di interesse culturale, i vincoli di tutela, le restrizioni sulla vendita e l'esportazione dei beni e il ruolo delle Soprintendenze nella conservazione del patrimonio.

³⁵ La Legge Urbanistica n. 1150 del 17 agosto 1942 fu la prima normativa organica in Italia a regolamentare la pianificazione urbanistica a livello nazionale. Promulgata durante il periodo fascista, stabilì principi fondamentali come l'obbligo dei piani regolatori generali per le città, la suddivisione del territorio in zone con diverse destinazioni d'uso e il controllo sulle lottizzazioni private. Nonostante le sue origini, la legge rimase a lungo il riferimento principale per l'urbanistica italiana, subendo modifiche e integrazioni nel corso del tempo.

³⁶ La Legge n. 765 del 6 agosto 1967, conosciuta come "Legge Ponte", introdusse importanti riforme alla Legge Urbanistica n. 1150 del 1942, per adeguarla alle nuove esigenze di sviluppo urbano e tutela del territorio. Nata in un periodo di forte espansione edilizia e speculazione, impose norme più rigide sulla pianificazione, rendendo obbligatori i piani regolatori

17, comma 5, stabilisce che «qualora l'agglomerato urbano rivesta carattere storico, artistico o di particolare pregio ambientale, sono consentite esclusivamente opere di consolidamento e restauro, senza alterazioni di volumi». Tuttavia, nonostante questa prima presa di posizione normativa, la legge non fornisce ancora una chiara definizione né un metodo di individuazione dei centri storici.

Un tentativo più concreto di delineare i criteri per identificare i centri storici si trova nella Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n. 3210 del 28 ottobre 1967³⁷, che distingue tre tipologie di strutture urbane riconducibili a questa categoria:

- Strutture urbane in cui la maggioranza degli isolati è composta da edifici costruiti prima del 1860, anche in assenza di monumenti o edifici di particolare pregio artistico.
- Strutture urbane racchiuse da antiche mura, conservate in tutto o in parte, incluse le eventuali espansioni esterne che rientrino nella tipologia precedente.
- Strutture urbane realizzate anche dopo il 1860, che nel loro complesso rappresentano un'espressione significativa di un modello edilizio di elevata qualità.

Questo tentativo di definizione, seppur innovativo per l'epoca, rimase isolato e non trovò un effettivo consolidamento normativo. Già negli anni successivi, infatti, fu considerato superato³⁸, poiché non teneva conto della complessità morfologica e funzionale dei centri storici, limitandosi a criteri cronologici e strutturali che non risultavano adeguati alla loro gestione e tutela.

generali per tutti i comuni, introducendo limiti alle lottizzazioni private e regolamentando gli standard urbanistici, come verde pubblico e servizi. Questa legge rappresentò un passo fondamentale nella modernizzazione dell'urbanistica italiana.

³⁷ La Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n. 3210 del 28 ottobre 1967 fu emanata per chiarire e fornire istruzioni operative sull'applicazione della Legge n. 765 del 6 agosto 1967 (Legge Ponte). Questo documento specificava le modalità di attuazione delle nuove norme urbanistiche, in particolare riguardo all'obbligo dei piani regolatori generali per tutti i comuni, ai limiti delle lottizzazioni private e agli standard urbanistici minimi per servizi pubblici e spazi verdi. La circolare aveva lo scopo di uniformare l'interpretazione della legge e garantire una corretta pianificazione urbanistica su tutto il territorio nazionale.

³⁸ DELFINO F. (1976), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 33.

Nel 1968, il D.M. n. 1444 del 1° aprile³⁹, integrativo della “Legge Ponte”, segna un passo significativo nella regolamentazione urbanistica, introducendo il concetto di zone territoriali omogenee e stabilendo standard edilizi relativi a densità, altezza e dotazioni urbanistiche. Un’attenzione particolare viene riservata ai centri storici, definiti nell’articolo 2 come «le parti del territorio interessate da agglomerati urbani che rivestono carattere storico, artistico o di particolare pregio ambientale, comprese le aree circostanti che possono considerarsi parte integrante degli agglomerati stessi». Inoltre, l’articolo 4 dimostra una certa sensibilità nell’applicazione degli standard urbanistici (art. 3) ai centri storici, riconoscendo la necessità di una gestione più attenta e specifica per queste realtà.

Tuttavia, nonostante il riconoscimento normativo, questo decreto adotta una visione ristretta di centro storico, considerandolo essenzialmente come una zona da sottoporre a vincoli conservativi, spesso limitata alla parte più antica dell’agglomerato urbano⁴⁰.

Sempre nel 1968, il progetto di legge elaborato dalla Commissione Papaldo⁴¹, seguendo l’impostazione già delineata dalla Commissione Franceschini, inserisce i centri storici tra i beni ambientali. All’articolo 59, viene introdotto il concetto di “beni ambientali presunti”, stabilendo che «i centri storici e i nuclei insediativi di carattere storico o artistico sono da considerarsi beni ambientali presunti sino a quando non siano stati stabiliti i perimetri indicati nell’articolo seguente e sono sottoposti alla disciplina di questa legge

³⁹ Il Decreto Ministeriale n. 1444 del 1° aprile 1968 fu emanato in attuazione della “Legge Ponte” (n. 765/1967) per definire gli standard urbanistici obbligatori nei piani regolatori generali e nei piani di lottizzazione. Questo decreto stabilì parametri fondamentali per l’urbanistica italiana, tra cui la suddivisione del territorio in zone omogenee (A, B, C, D, E, F) e i limiti di densità edilizia, altezze e distanze tra edifici. Inoltre, fissò i minimi di spazi pubblici per abitante destinati a verde, scuole e servizi. Rimane tuttora un riferimento essenziale nella pianificazione urbanistica in Italia.

⁴⁰ COPPOLA A. *ET AL.* (2004), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 26.

⁴¹ La Commissione Papaldo fu un gruppo di lavoro con l’obiettivo di studiare e proporre riforme in materia di pianificazione urbanistica e edilizia. Prende il nome da Giacomo Papaldo, funzionario del Ministero dei Lavori Pubblici, che coordinò i lavori. La Commissione fu incaricata di esaminare gli effetti della “Legge Ponte” (n. 765/1967) e di proporre soluzioni per migliorare la regolamentazione del settore. Tra i temi affrontati vi erano la gestione delle espansioni urbane, la tutela del territorio e la necessità di un controllo più efficace sulle lottizzazioni. Le sue analisi e raccomandazioni influenzarono successivi interventi normativi, contribuendo alla formulazione di nuove politiche urbanistiche in Italia.

nei loro limiti naturali». Questa disposizione anticipa un importante principio: la tutela automatica dei centri storici, indipendentemente dalla loro esplicita perimetrazione, garantendo così una protezione preventiva in attesa di una loro definizione normativa più precisa.

Un ulteriore riferimento ai centri storici si trova nella Legge n. 865 del 22 ottobre 1971⁴², in cui compare per la prima volta una distinzione tra “centri edificati” e “centri storici”. L’articolo 16 utilizza questa distinzione ai fini della determinazione dell’indennità di espropriazione, riconoscendo implicitamente una diversa natura giuridica tra insediamenti storici e altre aree urbanizzate.

Queste evoluzioni normative testimoniano il progressivo affinamento del concetto di centro storico nella legislazione italiana, passando da una tutela frammentaria e indiretta a una graduale presa di coscienza della necessità di strumenti specifici per la loro gestione e valorizzazione.

La Legge n. 10 del 1977⁴³, nota come “Legge Bucalossi”, riveste particolare interesse per il comma 8 dell’articolo 4, che amplia il campo di applicazione delle prescrizioni già previste per i centri storici nell’articolo 17, comma 5 della “Legge Ponte”, estendendole all’intero tessuto urbano dei centri abitati. Questo provvedimento rappresenta un passo avanti nel riconoscimento

⁴² La Legge n. 865 del 22 ottobre 1971, nota come “Legge per la casa”, introdusse una riforma significativa in materia di edilizia residenziale pubblica (ERP) e di espropriazione per pubblica utilità. Fu emanata per affrontare il problema della casa in Italia, regolamentando la realizzazione di piani per l’edilizia economica e popolare (PEEP) e favorendo l’accesso all’abitazione per le fasce meno abbienti. La legge ridefinì le modalità di espropriazione dei terreni destinati a edilizia pubblica, introducendo il principio del “prezzo politico” per il loro acquisto da parte dei comuni, al fine di contrastare la speculazione edilizia. Inoltre, promosse la creazione di aree per servizi pubblici, spazi verdi e infrastrutture nei nuovi quartieri residenziali. La norma ebbe un impatto duraturo sulla pianificazione urbanistica e sull’edilizia sociale in Italia.

⁴³ La Legge n. 10 del 28 gennaio 1977, nota come “Legge Bucalossi”, introdusse una riforma fondamentale in materia di disciplina dell’attività edilizia in Italia. Il suo principale obiettivo fu l’abolizione della proprietà edificatoria automatica, stabilendo che il diritto di costruire non derivava più semplicemente dalla proprietà del suolo, ma doveva essere concesso dall’amministrazione comunale tramite un’apposita concessione edilizia. La legge introdusse il principio del “contributo di urbanizzazione”, obbligando i privati a versare una quota per finanziare le opere pubbliche necessarie (strade, fognature, illuminazione) nei nuovi insediamenti. Inoltre, rafforzò il controllo pubblico sulle trasformazioni del territorio, ponendo le basi per una pianificazione urbanistica più equilibrata.

della necessità di tutela e regolamentazione degli insediamenti storici nel contesto più ampio delle città.

Diversamente, nella Legge n. 457 del 5 agosto 1978⁴⁴, non viene mai fatto esplicito riferimento né al patrimonio architettonico né ai centri storici. Essi non vengono trattati come entità distinte, ma rientrano all'interno della più ampia categoria delle aree soggette a necessità di recupero urbano. Questa impostazione suggerisce un cambio di prospettiva: i centri storici non sono più considerati esclusivamente come beni da conservare, ma come parti del tessuto urbano in cui il degrado e l'obsolescenza richiedono interventi di riqualificazione e rigenerazione, segnando un'evoluzione nelle politiche di gestione del patrimonio costruito.

L'evoluzione normativa avviene con la Legge n. 431 del 1985⁴⁵, nota come "Legge Galasso", che ha introdotto il vincolo paesaggistico su ampie porzioni del territorio nazionale, riconoscendo l'interdipendenza tra tutela del paesaggio e salvaguardia dei beni storici. Questo provvedimento ha imposto alle Regioni l'obbligo di redigere piani paesistici e ha rappresentato un primo passo concreto verso una pianificazione territoriale che includesse i centri storici in un'ottica di protezione e valorizzazione. Successivamente, il Decreto Legislativo n. 490 del 1999⁴⁶, noto come *Testo Unico dei beni culturali e*

⁴⁴ La Legge n. 457 del 5 agosto 1978, intitolata *Norme per l'edilizia residenziale*, rappresentò una svolta nella politica abitativa italiana, poiché introdusse un quadro normativo organico per il settore dell'edilizia residenziale pubblica (ERP) e per il recupero del patrimonio edilizio esistente. La legge definì i programmi pluriennali di edilizia residenziale, prevedendo finanziamenti per la costruzione di nuove abitazioni destinate alle fasce più deboli e incentivando il recupero e la manutenzione degli edifici esistenti, anziché puntare esclusivamente su nuove costruzioni. Inoltre, stabilì criteri per l'assegnazione degli alloggi popolari e promosse strumenti di programmazione per gli enti locali.

⁴⁵ La Legge n. 431 dell'8 agosto 1985, conosciuta come "Legge Galasso", rappresentò una svolta nella tutela del paesaggio e del territorio in Italia. Fu introdotta per rafforzare la protezione ambientale e vincolare aree di particolare interesse paesaggistico e naturale, in risposta all'urbanizzazione incontrollata e al degrado ambientale. La legge stabilì vincoli paesaggistici automatici su determinate categorie di aree, come coste, fiumi, laghi, boschi e montagne sopra i 1.200 metri di altitudine, imponendo l'obbligo di autorizzazione paesaggistica per qualsiasi intervento edilizio in queste zone.

⁴⁶ Il Decreto Legislativo n. 490 del 29 ottobre 1999, noto come *Testo Unico delle disposizioni legislative in materia di beni culturali e ambientali*, rappresentò un'importante riforma nella normativa italiana sulla tutela del patrimonio culturale e paesaggistico. Questo decreto unificò e sistematizzò le principali leggi precedenti, tra cui la Legge n. 1089 del 1939 sulla tutela dei beni culturali e la Legge n. 1497 del 1939 sulla protezione del paesaggio, fornendo un

ambientali, ha sistematizzato le precedenti disposizioni, fornendo un quadro normativo più organico, sebbene senza introdurre innovazioni sostanziali. Un cambiamento significativo si è avuto con il D.Lgs. n. 42 del 2004, *Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio*⁴⁷, che ha rafforzato il concetto di tutela integrata, considerando il patrimonio culturale non solo come insieme di edifici monumentali, ma anche come elemento chiave per la qualità della vita e per lo sviluppo sostenibile. Il Codice ha stabilito criteri più rigorosi per la salvaguardia dei centri storici, enfatizzando il ruolo della pianificazione paesaggistica e introducendo strumenti di gestione volti a garantire una conservazione compatibile con le esigenze delle comunità locali. In linea con questa visione, il Decreto Legislativo n. 63 del 2008⁴⁸ ha apportato ulteriori perfezionamenti, rafforzando la tutela dei beni culturali e ampliando le disposizioni sul loro utilizzo e valorizzazione. Parallelamente alla normativa nazionale, un ruolo determinante è stato svolto dalla Convenzione Europea del Paesaggio⁴⁹,

quadro normativo più chiaro e coerente. Il suo obiettivo era semplificare la gestione della tutela, migliorare la conservazione dei beni culturali e rafforzare la protezione del paesaggio.

⁴⁷ Il Decreto Legislativo n. 42 del 22 gennaio 2004, noto come *Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio*, rappresenta la principale normativa italiana sulla tutela e valorizzazione del patrimonio culturale e paesaggistico. Questo codice unificò e sostituì il precedente D.Lgs. 490 del 1999, integrando in un unico testo le disposizioni relative alla protezione dei beni culturali e dei beni paesaggistici, in linea con le direttive europee e con la Convenzione Europea del Paesaggio. Tra le principali innovazioni vi furono il potenziamento della tutela preventiva, la maggiore responsabilizzazione delle amministrazioni locali e l'introduzione di strumenti per la valorizzazione del patrimonio storico-artistico e naturale. Il *Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio* è tuttora in vigore ed è stato aggiornato nel tempo per rispondere alle nuove esigenze di conservazione e sviluppo sostenibile del territorio.

⁴⁸ Il Decreto Legislativo n. 63 del 26 marzo 2008 introdusse modifiche e integrazioni al *Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio* (D.Lgs. 42/2004), con l'obiettivo di migliorare la tutela, la valorizzazione e la gestione del patrimonio culturale italiano. Tra le principali novità vi furono una maggiore chiarezza nelle definizioni dei beni culturali e paesaggistici, l'introduzione di strumenti per semplificare le procedure di tutela e la promozione di forme di partenariato pubblico-privato per la valorizzazione dei beni. Il decreto rafforzò anche il ruolo delle Regioni e degli enti locali nella gestione del patrimonio, in linea con il principio di decentramento amministrativo.

⁴⁹ La *Convenzione Europea del Paesaggio* è un trattato internazionale adottato dal Consiglio d'Europa a Firenze il 20 ottobre 2000 e successivamente ratificato dall'Italia con la Legge n. 14 del 9 gennaio 2006. La Convenzione rappresenta un passaggio fondamentale nella tutela del paesaggio in quanto introduce un approccio innovativo che non si limita alla protezione dei soli paesaggi di eccezionale valore, ma riconosce che tutti i paesaggi, compresi quelli urbani e rurali di uso quotidiano, hanno un'importanza culturale, ecologica e sociale. Gli

entrata in vigore nel 2006, che ha influenzato la legislazione italiana promuovendo un approccio più ampio e interdisciplinare, in cui il paesaggio e i centri storici sono considerati elementi essenziali della qualità ambientale e identitaria dei territori. Questa evoluzione ha portato le Regioni italiane a elaborare specifici Piani Paesaggistici Regionali, strumenti che coniugano conservazione e sviluppo, prevedendo criteri dettagliati per la gestione dei centri storici nel rispetto delle peculiarità locali. L'attuale quadro normativo si configura quindi come un sistema articolato e multilivello, che riconosce ai centri storici un ruolo strategico nella pianificazione territoriale e che, attraverso un bilanciamento tra vincoli di tutela e strategie di valorizzazione, mira a garantire la loro conservazione senza comprometterne la vitalità sociale ed economica.

La gestione dei centri storici richiede strumenti urbanistici specifici che permettano di bilanciare la tutela del patrimonio con la necessità di garantire il loro sviluppo sostenibile e la loro fruibilità contemporanea. Il *Piano Regolatore Generale* (PRG) rappresenta il principale strumento di pianificazione comunale e, nel tempo, ha integrato sezioni dedicate alla salvaguardia dei tessuti storici, introducendo vincoli e criteri per gli interventi di trasformazione. Tuttavia, la rigidità dei PRG ha reso necessario il ricorso a strumenti più flessibili, come i *Piani di Recupero*, introdotti con la Legge n. 457 del 1978⁵⁰, che consentono di intervenire su porzioni del centro storico con strategie mirate, combinando conservazione e adeguamenti funzionali. La stessa esigenza ha portato all'elaborazione delle *Varianti per i Centri Storici*, che permettono di adattare le regole urbanistiche generali alle specificità dei tessuti antichi, favorendo una gestione più calibrata e coerente con la morfologia urbana esistente.

Parallelamente, la necessità di preservare l'identità estetica e materiale degli insediamenti storici ha portato all'adozione dei *Piani del Colore e dei Materiali*⁵¹, strumenti volti a regolamentare l'uso delle cromie e dei materiali da

obiettivi principali del trattato sono la tutela, la gestione e la pianificazione sostenibile del paesaggio, coinvolgendo non solo le istituzioni ma anche i cittadini nei processi decisionali. Questa Convenzione ha influenzato la normativa italiana, in particolare il *Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio* (D.Lgs. 42/2004), rafforzando la consapevolezza dell'importanza del paesaggio come elemento chiave per la qualità della vita e lo sviluppo sostenibile.

⁵⁰ Vedi nota a piè di pagina n. 36.

⁵¹ Il loro obiettivo è regolamentare l'uso di colori, materiali e finiture nelle facciate degli edifici, soprattutto nei contesti storici e nei borghi, per garantire armonia visiva e rispettare

costruzione negli interventi di restauro, assicurando la coerenza stilistica con il contesto originario. Sul versante della mobilità, i *Piani della Mobilità per i Centri Storici*⁵² hanno introdotto regolamentazioni specifiche per ridurre il traffico veicolare e migliorare l'accessibilità, con misure quali le *Zone a Traffico Limitato* (ZTL) e l'incentivazione di soluzioni di trasporto sostenibile.

La disamina dell'evoluzione normativa e urbanistica che ha interessato i centri storici italiani evidenzia un progressivo affinamento degli strumenti di tutela e gestione, con un passaggio graduale da un approccio rigidamente conservativo a una visione più integrata e dinamica. Se inizialmente la legislazione si concentrava sulla protezione dei singoli monumenti, trascurando il contesto urbano in cui erano inseriti, nel tempo è emersa una maggiore consapevolezza della necessità di adottare strumenti specifici che considerassero i centri storici nella loro complessità. Le politiche di tutela si sono così evolute, includendo aspetti legati alla pianificazione territoriale, alla sostenibilità, alla rigenerazione urbana e alla qualità della vita. Nonostante i significativi passi avanti compiuti a livello normativo, la gestione dei centri storici rimane una sfida aperta, soprattutto per quanto riguarda la conciliazione tra conservazione e sviluppo. L'eccessiva rigidità dei vincoli, in alcuni casi, ha ostacolato processi di riqualificazione e innovazione, mentre, in altri, l'assenza di adeguati strumenti finanziari ha portato a situazioni di degrado e abbandono. È fondamentale, quindi, un approccio equilibrato, che sappia coniugare la protezione del patrimonio con la sua fruizione contemporanea, evitando sia la musealizzazione che la perdita di identità dovuta a fenomeni di turistificazione incontrollata o speculazione edilizia. Il futuro della gestione dei centri storici passa attraverso l'integrazione di tecnologie innovative per la conoscenza, il monitoraggio e la manutenzione degli edifici, e l'adozione di strategie di governance partecipata, che coinvolgano attivamente la comunità locale nei processi decisionali. La sostenibilità, intesa sia in termini ambientali che socioeconomici, dovrà essere il principio guida delle politiche di gestione, affinché i centri storici possano continuare a rappresentare non solo un'eredità del passato, ma anche una risorsa vitale per il futuro.

le tradizioni locali. Vengono adottati dai Comuni come strumenti di pianificazione complementari ai piani regolatori e alle norme di tutela paesaggistica.

⁵² I *Piani della Mobilità per i Centri Storici* sono strumenti urbanistici sviluppati per regolare il traffico e migliorare l'accessibilità nelle aree storiche delle città, preservandone il patrimonio culturale e migliorando la qualità della vita.

Urbanistica e architettura dei centri storici: elementi di vulnerabilità

È ormai evidente come la trattazione dei centri storici sia un tema complesso ed eterogeneo, in cui si intrecciano aspetti culturali, normativi e gestionali. L'analisi delle definizioni e della normativa di riferimento ha permesso di comprendere la delicatezza e la fragilità di questi contesti, rendendo chiara la necessità di uno studio approfondito volto a individuare le criticità a cui sono soggetti. In questa prospettiva, risulta fondamentale esaminare la loro composizione urbana e architettonica, così da comprendere le ragioni della loro vulnerabilità e della loro esposizione al rischio sismico.

I centri storici italiani sono il risultato di un lungo processo evolutivo che ha visto la stratificazione di assetti urbanistici e tipologie edilizie differenti nel corso dei secoli. Questa continua trasformazione ha dato origine a un patrimonio architettonico di grande valore storico e culturale, ma allo stesso tempo caratterizzato da una serie di criticità strutturali che ne aumentano la vulnerabilità, soprattutto in relazione agli eventi sismici. Per comprendere le ragioni di tale fragilità, è necessario analizzare la morfologia urbana e le caratteristiche costruttive di questi insediamenti, individuando gli elementi che contribuiscono ad accrescerne il rischio strutturale.

I centri storici italiani si caratterizzano per una struttura urbanistica, frutto di un'evoluzione secolare, in cui fattori geografici, economici e culturali hanno influenzato la morfologia dell'insediamento. La loro conformazione è il risultato di processi di crescita spontanei o pianificati, legati all'epoca di fondazione e ai successivi sviluppi. Se da un lato questa eterogeneità rappresenta un patrimonio di inestimabile valore storico e architettonico, dall'altro determina una grande varietà di assetti spaziali, che rendono ogni centro storico unico nelle sue peculiarità. Uno degli aspetti più significativi dei centri storici è la trama viaria. Nei nuclei urbani di origine medievale, si riscontra una rete di strade irregolari e tortuose, spesso adattate alla morfologia naturale del territorio e alle esigenze difensive dell'epoca. Vicoli stretti, percorsi articolati e spazi contenuti definiscono un tessuto urbano compatto, nel quale gli edifici si dispongono lungo assi viari spesso derivati da antichi tracciati o da percorsi pedonali sviluppati nel tempo. Nei centri di fondazione più recente, come quelli di epoca rinascimentale o barocca, si osservano invece impianti

più ordinati, con assi viari principali ortogonali e spazi pubblici ben definiti, pensati per facilitare la circolazione e la vita sociale della città. L'organizzazione degli isolati edilizi segue dinamiche diverse a seconda della fase storica di sviluppo dell'insediamento. Nelle città di fondazione medievale, gli edifici si sviluppano in modo discontinuo, aggregandosi attorno ai percorsi principali e lasciando spazi aperti di dimensioni ridotte, spesso destinati a cortili interni o piccole piazze. In questi contesti, le costruzioni si dispongono lungo le vie in maniera irregolare, con affacci differenziati e volumi spesso sovrapposti. Nei centri di impianto rinascimentale e barocco, invece, si assiste a una maggiore regolarità nella disposizione degli isolati, con edifici allineati lungo assi viari prestabiliti e una suddivisione più razionale degli spazi. La dimensione e la forma degli isolati variano notevolmente a seconda della città e della sua storia evolutiva, ma in generale nei centri più antichi prevalgono comparti edilizi stretti e allungati, mentre nelle città più recenti si trovano isolati di dimensioni più ampie e regolari. Un altro elemento distintivo dei centri storici è la gerarchia degli spazi pubblici, che rispecchia le funzioni sociali, economiche e politiche della città. Le piazze, in particolare, rappresentano il fulcro della vita urbana, configurandosi come spazi di aggregazione attorno ai quali si sviluppano le principali attività civiche, religiose e commerciali. Nei centri medievali, le piazze sono spesso di dimensioni contenute e distribuite in modo irregolare, mentre nei centri di epoca rinascimentale e barocca assumono proporzioni monumentali, con una chiara volontà di organizzare la città secondo criteri estetici e funzionali ben definiti. Le strade principali, che connettono le piazze e i luoghi di maggiore importanza, assumono un ruolo centrale nella definizione dell'assetto urbano, spesso mantenendo la loro funzione primaria nel tempo, mentre le strade secondarie e i vicoli svolgono un ruolo di connessione interna, adattandosi alla conformazione degli isolati e alle esigenze insediative della popolazione.

Il rapporto tra tessuto edificato e spazio aperto nei centri storici è un aspetto di particolare rilievo, poiché influenza l'equilibrio tra costruito e non costruito e contribuisce a definire la qualità della vita urbana. Nelle città più antiche, la densità edilizia è generalmente elevata, con una ridotta presenza di spazi aperti privati e una netta distinzione tra le aree pubbliche e quelle private. In alcuni casi, questa configurazione ha portato allo sviluppo di soluzioni architettoniche peculiari, come i cortili interni, spesso utilizzati per scopi residenziali o produttivi, e i passaggi coperti, che collegano tra loro diversi edifici

permettendo il passaggio attraverso gli isolati. Al contrario, nei centri pianificati secondo criteri rinascimentali e barocchi, gli spazi aperti assumono un ruolo più strutturato, con assi prospettici studiati per valorizzare edifici pubblici e monumenti.

Un ulteriore aspetto fondamentale della struttura urbanistica dei centri storici è la loro relazione con il territorio circostante. Molte città storiche si sono sviluppate in funzione della morfologia naturale, adattandosi a pendii, crinali o conche vallive. Le modalità con cui le città si sono sviluppate nel tempo hanno determinato impianti urbani diversi, ciascuno con caratteristiche peculiari che riflettono le esigenze della società e del contesto territoriale in cui si sono formati. Tra i principali schemi planimetrici si possono individuare alcune configurazioni ricorrenti. L'impianto *a fuso*, tipico di insediamenti sorti lungo un asse viario principale o su un crinale, è caratterizzato dalla presenza di edifici allineati lungo una strada senza la presenza di slarghi o piazze significative, con le architetture di maggiore rilievo situate alle estremità. L'impianto *avvolgente*, invece, si sviluppa intorno a un centro di autorità, spesso un castello, un monastero o un palazzo, e segue le curve di livello del terreno in maniera concentrica, espandendosi lungo i crinali per adattarsi alla conformazione morfologica. L'impianto *ortogonale*, di derivazione romana, è basato su una griglia regolare di assi viari principali e secondari tra loro perpendicolari, generando una maglia urbana ordinata e ben strutturata, spesso racchiusa da un perimetro murario. Un'altra tipologia significativa è l'impianto *entro i margini*, che si sviluppa all'interno di limiti naturali o artificiali, come fiumi, lagune, scarpate o infrastrutture preesistenti, adattandosi alle condizioni imposte dal territorio e modellando la crescita urbana in base agli spazi disponibili. L'impianto *a pettine* si distingue per la particolare conformazione degli assi stradali, orientati ortogonalmente rispetto alla linea di costa o a un corso d'acqua, favorendo l'accessibilità alle attività marittime e fluviali, con edifici disposti in maniera regolare lungo le strade principali. L'impianto *a ventaglio* si sviluppa invece su un crinale, con il tracciato viario che segue le curve di livello e con un punto focale situato nella parte più elevata dell'abitato, spesso occupato da edifici di particolare importanza politica, religiosa o militare. Infine, l'impianto *radiale*, tipico delle città di epoca rinascimentale, è caratterizzato da una struttura a raggiera in cui le strade convergono verso un punto centrale, generalmente una piazza, e sono distribuite in modo simmetrico, per garantire una gestione spaziale funzionale ed equilibrata. Nel

tempo, la struttura urbanistica dei centri storici ha subito modifiche significative, legate sia all'evoluzione delle esigenze abitative e produttive, sia agli interventi di ristrutturazione urbana. La progressiva espansione delle città ha portato alla trasformazione di alcune aree, con l'apertura di nuove strade, la demolizione di vecchi edifici e la riconversione di spazi pubblici in funzione delle nuove necessità. In epoca moderna, gli interventi di riqualificazione hanno spesso cercato di coniugare la tutela del patrimonio storico con le esigenze di accessibilità e mobilità, introducendo soluzioni per migliorare la connessione tra i centri storici e le aree urbane più recenti.

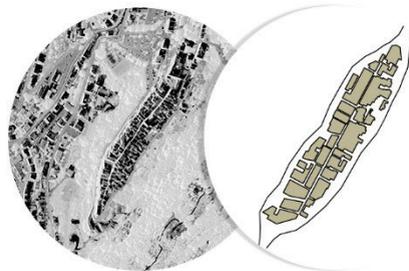
Tutti questi elementi concorrono a definire la struttura urbanistica dei centri storici come un sistema complesso e stratificato, in cui si intrecciano esigenze funzionali, estetiche e storiche. Lo studio approfondito di questa conformazione è essenziale per comprendere l'evoluzione dell'insediamento urbano e per pianificare interventi di conservazione e valorizzazione che rispettino le specificità di ciascun contesto.

La struttura urbanistica di un centro storico non può essere considerata separatamente dalle sue caratteristiche architettoniche e costruttive, poiché l'organizzazione degli spazi urbani e la morfologia degli edifici sono strettamente interconnesse. Le modalità con cui si sono sviluppati i tessuti edilizi hanno influenzato le tecniche costruttive, la scelta dei materiali e la distribuzione degli elementi architettonici, determinando un patrimonio edilizio stratificato nel tempo e modellato dalle condizioni ambientali, dalle disponibilità locali e dalle esigenze funzionali delle varie epoche. Gli edifici storici si contraddistinguono per l'uso prevalente di strutture in muratura portante, realizzate con materiali locali come pietra, laterizio o un misto di entrambi, spesso con una forte eterogeneità costruttiva dovuta alle modifiche e agli interventi successivi. Le murature, a seconda delle aree geografiche e delle epoche di costruzione, possono presentare tessiture regolari in conci ben squadriati oppure murature miste con inserti di materiali diversi, spesso legati con malta di calce di qualità variabile. Anche le aperture nelle murature rispondono a logiche funzionali ed estetiche consolidate nel tempo, con finestre di dimensioni ridotte nei livelli inferiori per motivi difensivi e maggiore ampiezza nei piani superiori in epoche più recenti, quando le esigenze di illuminazione e rappresentatività hanno iniziato a influenzare maggiormente le scelte architettoniche.

IMPIANTO A FUSO

Si sviluppa su crinale, lungo un unico asse viario di penetrazione. L'impianto urbano è privo di slarghi o piazze e si compone di un'edilizia povera. Alle estremità del fuso sono solitamente ubicate delle architetture di pregio.

POLI (RM)



IMPIANTO AVVOLGENTE

Si sviluppa attorno ad un centro di autorità (laica, ecclesiastica o monastica), e seguendole le curve di livello si espande lungo i crinali in modo concentrico.

PALOMBARA SABINA (RM)

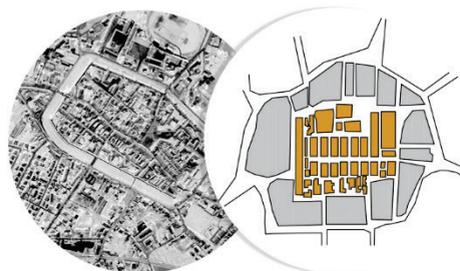


IMPIANTO ORTOGONALE

Di derivazione romana (impianto ippodameo), si sviluppa generalmente all'interno di un perimetro murario.

L'impianto è strutturato su isolati individuati da assi viari principali (decumani) e secondari (cardi) tra loro ortogonali.

MONTAGNANA (PD)



IMPIANTO ENTRO I MARGINI

Seguendo l'orografia del territorio si estende entro il limite naturale (fiume, scarpata, vallone) o antropico (strada, ferrovia) e adattandosi allo spazio disponibile.

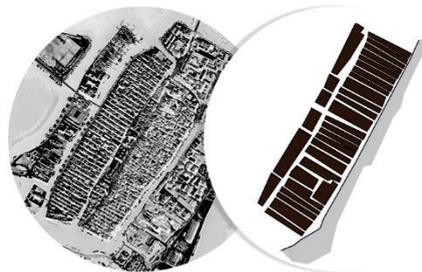
CEPRANO (FR)



IMPIANTO A "PETTINE"

Definito a "pettine" per la particolare conformazione degli assi stradali, direzionati ortogonalmente alla linea della costa marina o fluviale. Si tratta di nuclei nati in risposta alla principale attività economica: la pesca.

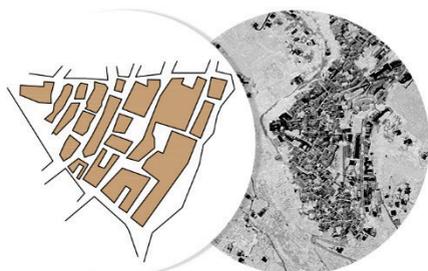
CHIOGGIA (VE)



IMPIANTO A VENTAGLIO

Occupa generalmente il crinale dell'altura e il tracciato viario segue in genere le isoipse. Nella zona apicale è ubicato un edificio significativo laico, politico o religioso.

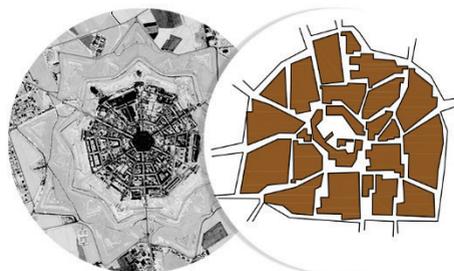
VEROLI (FR)



IMPIANTO RADIALE

Sorto nel periodo rinascimentale, è caratterizzato da un tracciato viario radiale il cui centro corrisponde generalmente ad una piazza.

PALMANOVA (UD)



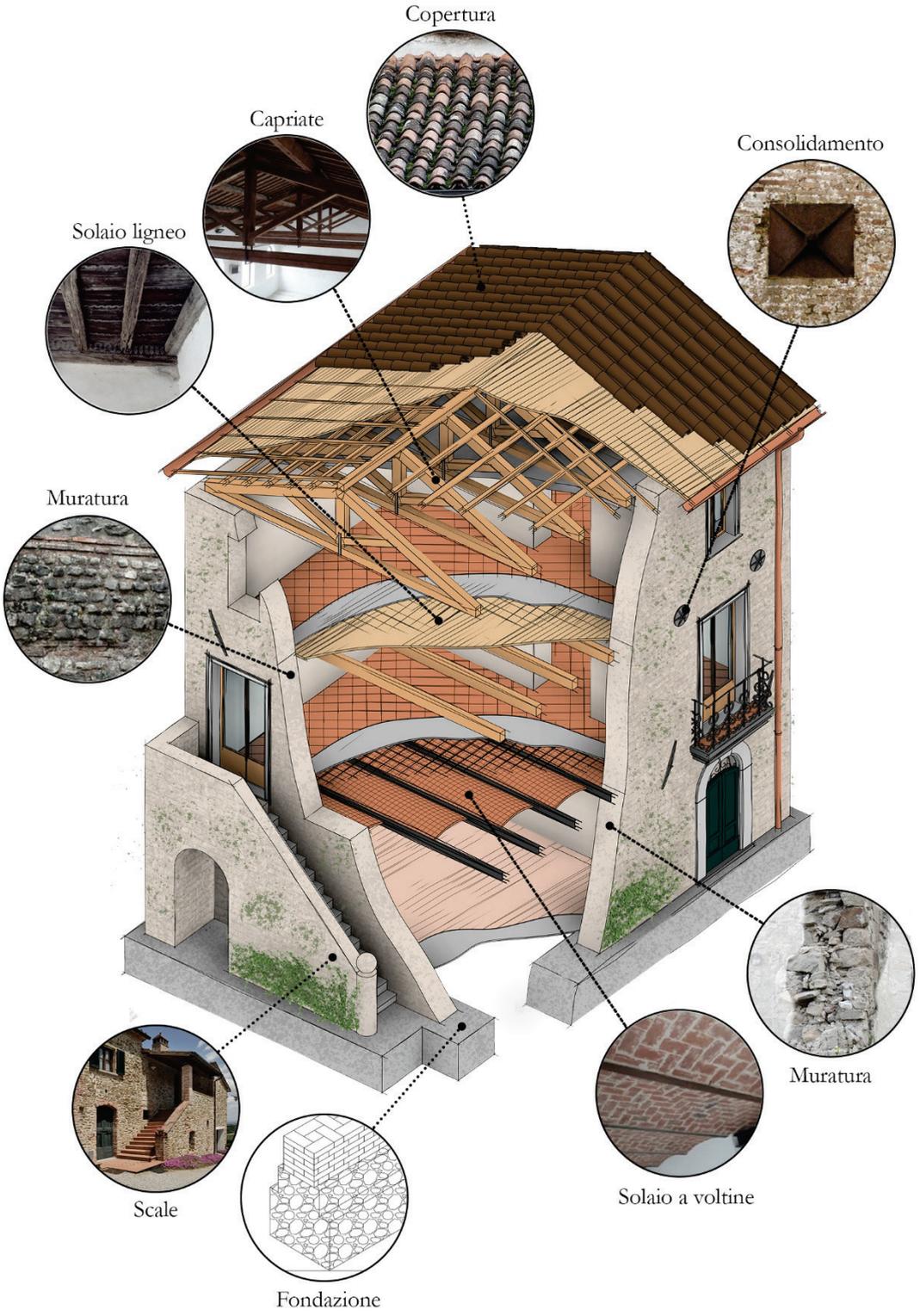
I solai degli edifici storici sono generalmente realizzati in legno o con strutture voltate in laterizio o pietra. I solai lignei, molto diffusi nelle costruzioni di epoca medievale e rinascimentale, sono composti da travi principali su cui poggiano travetti secondari e assito, con uno strato di finitura superiore spesso costituito da laterizi per aumentare la resistenza al fuoco e migliorare l'isolamento. Le volte, invece, rappresentano una soluzione particolarmente adottata negli edifici di maggior pregio o in quelli destinati a funzioni pubbliche e religiose, con una varietà tipologica che spazia dalle semplici volte a botte alle più complesse volte a crociera o a padiglione, spesso decorate con affreschi o stucchi.

Anche le coperture seguono schemi costruttivi consolidati, con una prevalenza di strutture lignee su cui poggiano manti in coppi o tegole, variabili a seconda delle tradizioni locali. Il sistema di copertura, oltre alla funzione di protezione dagli agenti atmosferici, ha spesso un valore estetico significativo, con articolazioni formali che caratterizzano il paesaggio urbano, come nel caso dei tetti a falde inclinate tipici dei centri storici dell'Italia centrale o delle coperture più piatte diffuse nelle regioni meridionali. Un elemento ricorrente nelle costruzioni storiche è la presenza di cornicioni e sporti, spesso decorati con elementi in cotto o pietra, che conferiscono carattere alle facciate e contribuiscono alla protezione delle murature dagli agenti atmosferici.

La distribuzione interna degli edifici storici riflette l'evoluzione delle esigenze abitative e funzionali nel corso dei secoli. Nelle costruzioni più antiche, gli spazi interni sono generalmente articolati in ambienti di dimensioni contenute, spesso organizzati intorno a un cortile centrale nei palazzi nobiliari o con una disposizione più semplice nelle abitazioni popolari. Le scale, frequentemente realizzate in pietra o laterizio, rappresentano un elemento distintivo, soprattutto nei palazzi di maggiore prestigio, dove assumono un valore scenografico con rampe monumentali, volte a crociera e balaustre decorate. Nei contesti più modesti, invece, le scale sono spesso ricavate all'interno delle murature o addossate alle pareti per ridurre l'ingombro e ottimizzare gli spazi.

Infine, le facciate degli edifici storici rispecchiano le diverse epoche costruttive e i linguaggi architettonici adottati nel tempo. Nei borghi medievali prevalgono fronti edilizi sobri, con murature a vista e aperture di dimensioni ridotte, mentre nei centri rinascimentali e barocchi le facciate assumono un ruolo più rappresentativo, con intonaci decorati, cornici in pietra, balconi e portali monumentali. Le tecniche di finitura variano notevolmente, spaziando

dall'intonaco semplice alle superfici lavorate con motivi ornamentali, fino all'uso di materiali pregiati nei palazzi di maggiore rilievo. Questo insieme di elementi architettonici e costruttivi contribuisce a definire l'identità visiva dei centri storici italiani, rendendoli un patrimonio unico da tutelare e valorizzare, ma anche da preservare dal rischio sismico.



Rischio sismico nei centri storici: vulnerabilità e impatto sul patrimonio edilizio

La conformazione urbanistica e le caratteristiche architettonico-costruttive dei centri storici analizzate fin ora rappresentano fattori determinanti nella valutazione della loro risposta agli eventi sismici. La disposizione densa degli edifici, l'eterogeneità delle tecniche costruttive, la stratificazione storica degli interventi e la morfologia del territorio influenzano in modo significativo il comportamento strutturale di questi insediamenti in caso di terremoto. Tuttavia, per comprendere a fondo il problema del rischio sismico nei centri storici, è necessario definirne i concetti fondamentali e le sue componenti.

Il rischio sismico può essere definito come la misura del danno atteso su un territorio o su un determinato patrimonio edilizio a seguito di un evento sismico. Esso è funzione di tre fattori principali: pericolosità, esposizione e vulnerabilità.

La pericolosità sismica è un parametro fondamentale nella valutazione del rischio sismico ed è strettamente legata alle caratteristiche geodinamiche di un territorio. Essa rappresenta la probabilità che un terremoto di una determinata intensità si verifichi in un'area specifica entro un determinato periodo di tempo. Questo concetto si basa su analisi geologiche, geofisiche e sismologiche che studiano l'attività delle faglie, la distribuzione storica ed empirica dei terremoti e la propagazione delle onde sismiche attraverso il sottosuolo.

In Italia, la pericolosità sismica è particolarmente elevata a causa della sua posizione al confine tra la placca euroasiatica e quella africana, con un sistema complesso di faglie attive che attraversano la penisola. L'interazione tra queste placche genera un'intensa attività sismica, concentrata soprattutto lungo la dorsale appenninica, nell'arco alpino e in alcune aree della Sicilia e della Calabria. A livello normativo, la pericolosità sismica viene definita attraverso studi di zonazione sismica, che suddividono il territorio nazionale in zone a diversa intensità di scuotimento atteso. L'attuale classificazione sismica italiana (aggiornata sulla base dell'Ordinanza PCM 3274/2003 e successivi aggiornamenti⁵³) suddivide il territorio in quattro zone:

⁵³ L'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei ministri (OPCM) n. 3274 del 20 marzo 2003 rappresenta un punto di svolta nella normativa italiana sulla prevenzione del rischio sismico.

- Zona 1: aree a massima pericolosità, dove si possono verificare terremoti di forte intensità.
- Zona 2: aree con pericolosità elevata, in cui sono possibili terremoti di intensità significativa.
- Zona 3: aree a pericolosità media, soggette a eventi sismici moderati ma non rari.
- Zona 4: aree a bassa pericolosità, dove i terremoti sono rari e di intensità limitata.

Questa classificazione è fondamentale per determinare le prescrizioni normative relative alla progettazione antisismica degli edifici e alla gestione del rischio sismico, anche nei centri storici. Tuttavia, la sola zonazione sismica non è sufficiente a prevedere il comportamento di un'area in caso di terremoto, poiché gli effetti di un evento sismico dipendono anche da fattori locali, come la risposta sismica del suolo. Infatti, la natura geologica e geomorfologica di un'area può influenzare in modo significativo l'amplificazione delle onde sismiche, determinando variazioni anche significative negli effetti del terremoto su edifici e infrastrutture.

Le formazioni geologiche più rigide, come le rocce compatte, tendono a trasmettere le onde sismiche senza amplificarle in modo significativo, mentre i terreni più sciolti e incoerenti, come quelli alluvionali o artificiali, possono amplificare le oscillazioni, aumentando il livello di danno sugli edifici. Questo fenomeno, noto come amplificazione locale, è particolarmente rilevante nei centri storici, molti dei quali sorgono su colline, versanti o terreni alluvionali che possono amplificare le sollecitazioni sismiche, rendendo gli edifici più vulnerabili al sisma. Un altro aspetto strettamente correlato alla pericolosità sismica è il rischio di instabilità del suolo, che può manifestarsi sotto

Emanata in seguito ai devastanti terremoti che colpirono l'Italia negli anni precedenti, questa ordinanza introdusse una nuova classificazione sismica del territorio nazionale, obbligando tutti i comuni italiani a dotarsi di specifiche normative di prevenzione. Prima della sua emanazione, solo alcune zone del Paese erano ufficialmente considerate a rischio, mentre con la nuova classificazione tutto il territorio nazionale venne suddiviso in quattro zone sismiche in base al livello di pericolosità. L'OPCM 3274 del 2003 introdusse anche l'obbligo della verifica sismica degli edifici strategici e rilevanti, come scuole, ospedali e infrastrutture critiche, e stabili criteri aggiornati per la progettazione antisismica, basati sulle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC). Questa ordinanza rappresentò un passaggio fondamentale nella modernizzazione della normativa sismica italiana, anticipando le *Norme Tecniche per le Costruzioni* del 2008 e promuovendo un approccio più rigoroso alla sicurezza strutturale.

forma di fenomeni di liquefazione, frane indotte dal sisma o cedimenti delle fondazioni. In aree caratterizzate da suoli saturi d'acqua, le scosse sismiche possono causare la perdita di coesione tra le particelle del terreno, trasformandolo temporaneamente in una sorta di fluido incapace di sostenere i carichi sovrastanti. Questo fenomeno, noto come liquefazione del suolo, può avere effetti devastanti sugli edifici, determinando cedimenti differenziali e crolli improvvisi. Nei centri storici situati in aree collinari o montuose, il rischio sismico può essere ulteriormente aggravato da fenomeni di frane e smottamenti indotti dal sisma, soprattutto in presenza di versanti instabili o di terreni già soggetti a fenomeni erosivi. La presenza di mura di contenimento e di terrazzamenti, spesso costruiti con tecniche tradizionali e non sempre adeguatamente consolidate, può rappresentare un ulteriore elemento di criticità in caso di eventi sismici, aumentando il rischio di crolli generalizzati. La pericolosità sismica, quindi, non è un valore assoluto, ma una grandezza che deve essere sempre analizzata in relazione alle caratteristiche locali del territorio e alla risposta degli edifici e delle infrastrutture alle sollecitazioni indotte da un terremoto. Nei centri storici, questa complessa interazione tra fenomeni geologici, urbanistici e costruttivi rende ancora più cruciale un approccio multidisciplinare per la valutazione del rischio e l'individuazione di strategie efficaci di mitigazione.

L'esposizione sismica invece è definita come l'insieme degli elementi presenti in un'area potenzialmente soggetta a un evento sismico che potrebbero subire danni o perdite a seguito del terremoto. L'esposizione non si limita ai soli edifici, ma comprende l'intera rete infrastrutturale, la popolazione residente e tutte le attività economiche e sociali presenti nel contesto urbano. Nei centri storici, il concetto di esposizione assume una particolare rilevanza a causa dell'elevata concentrazione di edifici di valore storico-artistico, della densità abitativa e della presenza di funzioni pubbliche e strategiche.

Dal punto di vista edilizio, i centri storici presentano un patrimonio costruito che si distingue per la sua densità e continuità, con edifici aggregati e interconnessi lungo un tessuto urbano compatto. Questa caratteristica, se da un lato ha garantito nei secoli un'organizzazione efficiente dello spazio urbano, dall'altro aumenta significativamente l'esposizione al rischio sismico, poiché un evento tellurico può coinvolgere simultaneamente un gran numero di edifici, causando crolli concatenati e danni estesi su larga scala. Inoltre, la distribuzione delle funzioni urbane all'interno dei centri storici amplifica

l'esposizione: edifici pubblici, sedi istituzionali, scuole, chiese e strutture culturali sono spesso localizzati nei nuclei più antichi della città, rendendo elevato il potenziale impatto sociale ed economico in caso di terremoto.

Un altro elemento che incide sull'esposizione nei centri storici è la presenza di beni culturali di rilevanza storica e artistica. Gli edifici monumentali, come chiese, palazzi nobiliari e torri medievali rappresentano un patrimonio irripetibile, la cui perdita non è solo materiale ma anche culturale e identitaria. La distruzione parziale o totale di questi edifici a seguito di un sisma comporta danni incalcolabili alla memoria storica della comunità e alla sua identità territoriale. Questo aspetto rende la gestione del rischio sismico nei centri storici ancora più complessa, poiché non si tratta solo di preservare la funzionalità degli edifici, ma anche di garantire la salvaguardia di un'eredità culturale che spesso non è riproducibile.

L'esposizione riguarda anche la popolazione residente e la sicurezza degli abitanti. Nei centri storici, gli edifici destinati a uso residenziale sono spesso privi di adeguamenti antisismici, sia per vincoli architettonici e normativi, sia per la difficoltà economica di eseguire interventi di consolidamento su strutture antiche. In molti casi, gli abitanti dei centri storici sono anziani o appartenenti a fasce di popolazione con minori possibilità economiche, il che può ostacolare ulteriormente la realizzazione di opere di messa in sicurezza. Inoltre, la conformazione urbanistica dei centri storici, con strade strette e percorsi tortuosi, può rendere difficoltosa l'evacuazione in caso di emergenza, aumentando il rischio per la popolazione in caso di terremoto.

Anche il sistema infrastrutturale presente nei centri storici gioca un ruolo chiave nell'esposizione al rischio sismico. La viabilità interna, spesso limitata e inadeguata a gestire flussi elevati di persone e mezzi di soccorso, rappresenta un problema critico in situazioni di emergenza. Strade strette e irregolari possono diventare inaccessibili a seguito di crolli o accumuli di macerie, ostacolando le operazioni di soccorso e rendendo difficoltoso l'accesso alle zone colpite dal sisma. Inoltre, la rete di servizi essenziali, come acquedotti, fognature e impianti elettrici, è spesso obsoleta e non progettata per resistere a sollecitazioni sismiche, con il rischio di interruzioni prolungate nell'erogazione di acqua, energia e servizi di comunicazione a seguito di un terremoto. Infine, l'esposizione dei centri storici al rischio sismico è strettamente legata alla loro importanza strategica e amministrativa. In molte città, le sedi comunali, gli edifici governativi e le infrastrutture critiche, come ospedali e scuole, si

trovano nei nuclei più antichi, aumentando il rischio di disfunzioni nel coordinamento dei soccorsi e nella gestione dell'emergenza post-sisma. La compromissione di queste strutture può aggravare ulteriormente la situazione, rallentando le operazioni di risposta e recupero.

Infine, la vulnerabilità sismica rappresenta un aspetto cruciale nella valutazione del rischio sismico, poiché determina il grado di danno che un edificio o un insieme di strutture può subire in seguito a un terremoto. Nei centri storici, la vulnerabilità è influenzata da una molteplicità di fattori, tra cui le caratteristiche costruttive degli edifici, la loro configurazione urbanistica, gli interventi subiti nel tempo e le condizioni di degrado o manutenzione. Uno degli elementi più rilevanti che determinano la vulnerabilità sismica nei centri storici è il sistema costruttivo tradizionale, basato principalmente su murature portanti realizzate in pietra o laterizio. Questi materiali, pur garantendo una buona resistenza ai carichi verticali, risultano particolarmente fragili nei confronti delle sollecitazioni orizzontali indotte da un terremoto. Inoltre, la qualità della muratura può essere estremamente variabile: in alcuni casi si tratta di strutture ben apparecchiate con conci squadrati e malte resistenti, mentre in altri si riscontrano murature miste o a sacco, con riempimenti interni costituiti da materiale incoerente e malte deboli, che compromettono la capacità di assorbire le vibrazioni sismiche.

Un aspetto particolarmente critico è la scarsa connessione tra gli elementi strutturali, che caratterizza molti edifici storici. In assenza di adeguati ancoraggi tra le pareti portanti, i solai e la copertura, gli edifici tendono a comportarsi come elementi indipendenti, con il rischio di ribaltamento fuori piano delle pareti durante un terremoto. Questo fenomeno è particolarmente evidente nei palazzi storici con facciate alte e sottili, spesso dotate di ampie aperture ai piani inferiori, che riducono ulteriormente la capacità della struttura di resistere alle sollecitazioni sismiche. Anche gli edifici con volte e coperture pesanti possono risultare particolarmente vulnerabili, poiché il loro collasso può innescare effetti di progressivo cedimento dell'intera struttura.

La vulnerabilità sismica dei centri storici è aggravata anche dalle modifiche e trasformazioni subite nel tempo, che spesso hanno alterato l'equilibrio statico originario degli edifici. Sopraelevazioni, ampliamenti e ristrutturazioni non sempre eseguite con criteri strutturali adeguati hanno generato situazioni di discontinuità e indebolimento delle strutture. Un caso emblematico è la sostituzione di solai lignei con strutture in cemento armato, un intervento

frequente negli ultimi decenni che, se non adeguatamente eseguito, può introdurre carichi aggiuntivi e alterare la distribuzione delle forze all'interno dell'edificio. Anche l'apertura di nuove finestre o varchi commerciali ai piani terra, spesso realizzata senza adeguati rinforzi, può ridurre la capacità portante delle murature e aumentare il rischio di collasso.

Un ulteriore fattore di vulnerabilità è rappresentato dalla disposizione urbanistica degli edifici nei centri storici, che può amplificare gli effetti di un sisma. L'aggregazione compatta delle costruzioni, tipica di molti borghi medievali e centri storici italiani, favorisce il fenomeno del martellamento tra edifici adiacenti, in cui le strutture oscillano con fasi diverse e si urtano reciprocamente, causando danni localizzati o il crollo di intere porzioni di edificato. Inoltre, la presenza di strade strette e tortuose può limitare la dissipazione dell'energia sismica, concentrando le sollecitazioni su specifici punti dell'insediamento e aumentando il rischio di cedimenti strutturali localizzati.

Anche le condizioni di degrado e scarsa manutenzione influiscono sulla vulnerabilità sismica dei centri storici. Molti edifici storici presentano problemi legati all'umidità, alla perdita di coesione delle malte e alla presenza di materiali deteriorati che riducono la capacità portante delle strutture. La mancata manutenzione degli elementi strutturali, come le connessioni tra le murature e i solai, può accelerare il processo di degrado e rendere gli edifici ancora più suscettibili ai danni in caso di terremoto. In alcuni casi, la presenza di impianti tecnologici inseriti senza criteri strutturali adeguati può introdurre ulteriori vulnerabilità, ad esempio attraverso la creazione di cavità o indebolimenti nelle murature portanti.

Infine, la vulnerabilità sismica dei centri storici è strettamente legata alla difficoltà di intervento e di adeguamento strutturale, a causa dei vincoli normativi e delle specifiche esigenze di tutela del patrimonio storico. Le operazioni di consolidamento e miglioramento sismico devono infatti essere compatibili con la conservazione dell'identità architettonica degli edifici, il che limita l'adozione di soluzioni invasive come l'inserimento di telai in cemento armato o la sostituzione di elementi strutturali originali. Questo aspetto rappresenta una sfida importante nella gestione del rischio sismico nei centri storici, poiché richiede un equilibrio tra la necessità di garantire la sicurezza degli edifici e quella di preservarne il valore storico e culturale.

Le conseguenze di un sisma sui centri storici possono essere devastanti, non solo in termini di danni strutturali, ma anche per la perdita di valore

storico, artistico e identitario che caratterizza questi insediamenti. Gli effetti di un terremoto su un centro storico dipendono dalla combinazione di vulnerabilità strutturale, esposizione e intensità dell'evento sismico, e la loro portata può variare da danni localizzati a crolli diffusi, con ripercussioni sulla sicurezza della popolazione e sul tessuto socioeconomico della comunità. L'Italia, per la sua elevata sismicità, ha visto numerosi eventi tellurici che hanno colpito duramente il patrimonio storico e artistico, rendendo evidente l'estrema fragilità di questi contesti.

Uno degli esempi più significativi è il terremoto dell'Aquila del 6 aprile 2009, di magnitudo 6.3 Mw⁵⁴, che ha provocato danni ingenti al centro storico della città e ai borghi circostanti. Il sisma ha causato il collasso di numerosi edifici storici, tra cui la Casa dello Studente e diversi palazzi storici della città. Tra i danni più emblematici si ricordano il crollo parziale della Basilica di San Bernardino, il cedimento della cupola della Chiesa delle Anime Sante e le gravi lesioni alla Fortezza Spagnola. Gli edifici monumentali hanno subito danni a causa di vulnerabilità strutturali preesistenti, come la mancanza di collegamenti tra le pareti e le coperture, il degrado dei materiali e la presenza di interventi di restauro non compatibili con la risposta sismica della struttura. Il centro storico dell'Aquila, che rappresentava un *unicum* dal punto di vista architettonico e urbanistico, ha subito una profonda trasformazione, con intere aree rese inagibili e la necessità di una lunga e complessa opera di ricostruzione⁵⁵.

Un altro evento significativo è stato il terremoto dell'Emilia del maggio 2012, di magnitudo 5.8 Mw⁵⁶, che, pur avendo colpito principalmente aree a sviluppo industriale, ha causato danni ingenti al patrimonio storico. Le città di Ferrara, Mirandola e Finale Emilia hanno subito la perdita di importanti edifici storici, tra i quali la Torre dei Modenesi, crollata quasi completamente, e il Duomo di Mirandola, gravemente lesionato. Anche in questo caso, la vulnerabilità degli edifici storici si è manifestata con il collasso di elementi architettonici decorativi, il distacco di volte e il crollo di torri e campanili, strutture particolarmente esposte alle sollecitazioni sismiche. Il terremoto

⁵⁴ Vedi nota sitografica n. 2.

⁵⁵ Il sisma causò 309 vittime, oltre 1.600 feriti e lasciò circa 80.000 sfollati. I danni furono ingenti, colpendo edifici storici, abitazioni e infrastrutture. Il terremoto portò a un'intensificazione delle politiche di prevenzione sismica in Italia e a una revisione delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) per migliorare la sicurezza degli edifici.

⁵⁶ Vedi nota sitografica n. 3.

emiliano ha messo in evidenza la fragilità delle costruzioni storiche in muratura, dimostrando che anche eventi sismici di intensità moderata possono causare danni significativi se il patrimonio edilizio non è adeguatamente consolidato⁵⁷.

Un disastro ancora più grave si è verificato con il terremoto del Centro Italia del 2016, che ha colpito duramente borghi storici come Amatrice, Accumoli e Norcia. Il sisma, di magnitudo 6.5 Mw⁵⁸, ha causato la distruzione quasi totale del centro di Amatrice, dove gran parte degli edifici storici è crollata o è stata gravemente danneggiata. Tra le perdite più significative si segnalano il crollo della Chiesa di San Francesco, il danneggiamento della Basilica di San Benedetto a Norcia e la distruzione di numerose abitazioni in pietra, molte delle quali già compromesse da precedenti terremoti. Questo evento ha messo in evidenza come la mancata prevenzione e l'assenza di interventi strutturali mirati possano portare alla perdita irreparabile di interi centri storici, compromettendo non solo il patrimonio edilizio, ma anche il tessuto sociale ed economico delle comunità colpite⁵⁹.

Le conseguenze di un sisma sui centri storici non si limitano ai danni fisici agli edifici, ma si estendono anche alla perdita di valore culturale e identitario. Molti dei borghi e delle città storiche italiane sono il risultato di secoli di stratificazioni architettoniche, artistiche e sociali, e la distruzione di questi insediamenti rappresenta una perdita irreversibile di memoria collettiva. La ricostruzione di un centro storico non può essere affrontata con la stessa logica di una città moderna, poiché la sostituzione degli edifici crollati con nuove costruzioni può alterare irrimediabilmente il contesto urbano originale, compromettendone l'autenticità.

⁵⁷ Il sisma causò 27 vittime, centinaia di feriti e circa 45.000 sfollati. Provocò ingenti danni a edifici storici, industrie e infrastrutture, colpendo duramente il settore produttivo della regione.

⁵⁸ Vedi nota sitografica n. 4.

⁵⁹ Il terremoto del Centro Italia del 2016 si articolò in una serie di forti scosse sismiche, le principali delle quali furono: (1) il 24 agosto 2016 alle 03:36 (ora italiana), con una magnitudo di 6.0 Mw, epicentro nei pressi di Accumoli (RI), a una profondità di 8 km, questa scossa devastò soprattutto Amatrice, Accumoli e Arquata del Tronto, causando 299 vittime, centinaia di feriti e migliaia di sfollati; (2) il 26 ottobre 2016, alle 19:10 e alle 21:18, con magnitudo 5.4 Mw e 5.9 Mw, epicentro tra Visso, Ussita e Castelsantangelo sul Nera (MC); (3) il 30 ottobre 2016 alle 07:40, con una magnitudo di 6.5 Mw, epicentro vicino a Norcia (PG), a una profondità di 10 km. Quest'ultima fu la scossa più forte in Italia dal terremoto dell'Irpinia del 1980, fortunatamente senza vittime dirette, grazie all'evacuazione delle aree già colpite.

Dal punto di vista economico, i terremoti generano danni ingenti non solo agli edifici residenziali e pubblici, ma anche alle attività commerciali e turistiche che spesso rappresentano la principale risorsa per i centri storici. La chiusura di negozi, ristoranti, alberghi e uffici può avere effetti devastanti sulla ripresa economica delle comunità colpite, rallentando il ritorno alla normalità e incentivando lo spopolamento di intere aree. Il terremoto del Centro Italia, ad esempio, ha portato alla delocalizzazione forzata di molte attività economiche, rendendo ancora più difficile il ripristino della vita quotidiana nei borghi colpiti.

Un'altra grave conseguenza riguarda la difficoltà della ricostruzione, che nei centri storici deve tenere conto non solo della sicurezza strutturale, ma anche della compatibilità con il contesto architettonico e urbanistico originale. Dopo un terremoto, i tempi per la ricostruzione possono essere estremamente lunghi, a causa delle complesse procedure burocratiche legate alla tutela del patrimonio culturale, della necessità di studi approfonditi sulle tecniche di restauro e delle difficoltà economiche nel reperire fondi adeguati. In molti casi, la mancanza di un piano di ricostruzione chiaro e condiviso porta a un progressivo abbandono dei centri storici, con la perdita definitiva della loro funzione abitativa e sociale.

L'analisi delle conseguenze dei terremoti che hanno colpito l'Italia negli ultimi decenni evidenzia l'estrema fragilità dei centri storici di fronte agli eventi sismici e la necessità di strategie di prevenzione più efficaci. La vulnerabilità strutturale del patrimonio edilizio storico, unita alla complessità degli interventi di restauro e consolidamento, rende indispensabile un approccio integrato che combini ricerca scientifica, tecnologie avanzate e politiche di pianificazione territoriale mirate. Solo attraverso un'attenta valutazione del rischio sismico e un programma di interventi di mitigazione adeguato sarà possibile preservare l'identità e il valore dei centri storici italiani, evitando che eventi futuri possano cancellare secoli di storia in pochi istanti.



Geografia della vulnerabilità: mappatura GIS dei centri storici minori

L'analisi della distribuzione geografica dei centri storici minori è fondamentale per comprendere la loro vulnerabilità sismica e sviluppare strategie efficaci di mitigazione del rischio. L'Italia possiede un vasto patrimonio storico-architettonico, con una moltitudine di borghi e piccoli centri che, per la loro conformazione urbanistica, localizzazione geografica e tecniche costruttive tradizionali, risultano particolarmente esposti agli eventi sismici. Tuttavia, l'assenza di un inventario strutturato e georeferenziato rende difficile una gestione efficace e una protezione adeguata di queste realtà. In questo contesto, HT_GIS (*Historical Town GIS*) rappresenta uno strumento innovativo basato sulle tecnologie GIS, con l'obiettivo di localizzare, analizzare e confrontare i centri storici minori italiani, mettendo in relazione la loro distribuzione con le zone a maggiore pericolosità sismica. La sua implementazione permette di ottenere una mappatura dettagliata, utile sia per la ricerca che come supporto alla pianificazione territoriale e alla prevenzione del rischio.

Per la costruzione del database spaziale, la prima fase riguarda l'acquisizione e l'elaborazione dei dati. Il dataset di riferimento proviene dall'ultimo Censimento ISTAT⁶⁰, che fornisce informazioni demografiche e territoriali dettagliate a livello comunale. I dati estratti includono la popolazione residente nei centri storici, con il criterio di selezione che considera "centri storici minori" quei centri storici con meno di 5.000 abitanti nel nucleo storico, al fine di distinguere i piccoli centri con caratteristiche omogenee in termini di urbanistica, architettura e vulnerabilità strutturale.

Dei 7.914 comuni italiani⁶¹, 5.836 hanno una popolazione inferiore ai 5.000 abitanti di cui 3.651 inferiore ai 2.000, di cui 1.971 inferiore ai 1.000 e di cui infine 845 inferiore ai 500. Dai dati si evince come la maggior parte dei comuni italiani siano dei piccoli centri, anche se ospitano poco meno del 20% della popolazione complessiva, su di un territorio corrispondente a circa il 54% del territorio nazionale.

⁶⁰ Vedi nota sitografica n. 5.

⁶¹ Dato ISTAT aggiornato al 01/01/2024.

Fascia Demografica	Comuni		Popolazione	
	numero	%	residenti	%
da 500.000 ab. e oltre	6	0.08	7.129.402	12.04
da 250.000 ab. a 499.999 ab.	6	0.08	1.891.780	3.19
da 100.000 ab. a 249.999 ab.	32	0.40	4.751.414	8.02
da 60.000 ab. a 99.999 ab.	56	0.71	4.327.338	7.31
da 20.000 ab. a 59.999 ab.	410	5.19	13.482.027	22.76
da 10.000 ab. a 19.999 ab.	696	8.81	9.612.033	16.23
da 5.000 ab. a 9.999 ab.	1.165	14.74	8.247.557	13.92
da 3.000 ab. a 4.999 ab.	1.087	13.75	4.233.354	7.15
da 2.000 ab. a 2.999 ab.	918	11.61	2.253.799	3.80
da 1.000 ab. a 1.999 ab.	1.529	19.34	2.224.266	3.76
da 500 ab. a 999 ab.	1.109	14.03	821.517	1.39
meno di 500 ab.	890	11.26	258.226	0.44
Totale	7.904	100.00	59.232.713	100.00

Fascia Demografica	Comuni		Popolazione	
	numero	%	residenti	%
meno di 5000 ab.	5.532	69.99	9.794.662	16.54
meno di 4000 ab.	5.068	64.12	7.715.289	13.03
meno di 3000 ab.	4.444	56.22	5.558.308	9.38
meno di 2000 ab.	3.526	44.61	3.305.509	5.58
meno di 1000 ab.	1.996	25.25	1.081.243	1.83

L'elaborazione e progettazione di HT_GIS segue gli standard tecnici per i progetti GIS ISO 19115⁶², con l'adozione di standard cartografici internazionali per garantire uniformità, interoperabilità e precisione nella georeferenziazione. Il sistema di riferimento WGS84 EPSG:4326 consente una localizzazione accurata e compatibile con i principali database territoriali e catastali. Il processo di analisi si articola in tre fasi principali. La georeferenziazione

⁶² La norma ISO 19115 è uno standard internazionale definito dall'International Organization for Standardization (ISO) per la metadocumentazione dei dati geografici (GIS - Geographic Information System). Adottata per la prima volta nel 2003 e successivamente aggiornata, la ISO 19115 stabilisce una struttura comune per la descrizione dei metadati geospaziali, consentendo una documentazione standardizzata delle informazioni geografiche, facilitando la condivisione, l'interoperabilità e il riutilizzo dei dati tra diversi sistemi e organizzazioni.

dei comuni permette di individuare con precisione la posizione geografica di ogni centro storico minore, utilizzando le coordinate ufficiali e le basi cartografiche nazionali. Successivamente, la mappatura GIS classifica e tematizza i centri storici sulla base di parametri quali popolazione, estensione territoriale, morfologia urbana e presenza di vincoli paesaggistici e architettonici. Infine, la sovrapposizione con la mappa di pericolosità sismica nazionale, elaborata dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), consente di valutare il livello di rischio sismico per ogni centro storico, suddividendo l'Italia in quattro zone di pericolosità (da 1 = massima pericolosità a 4 = minima pericolosità).

I risultati di HT_GIS delineano uno scenario preoccupante, con una percentuale significativa di centri storici minori situata in aree ad alta pericolosità sismica, in particolare lungo la dorsale appenninica e nelle regioni meridionali. Le regioni con la maggiore densità di centri storici minori in *Zona Sismica 1*, comprendono Abruzzo, Marche, Umbria e Calabria, caratterizzate da borghi arroccati su rilievi collinari e montuosi, con tessuti edilizi densi e costruzioni in muratura portante prive di adeguate misure di rinforzo strutturale. In *Zona Sismica 2*, che interessa vaste aree della Toscana, del Lazio e della Sicilia orientale, numerosi centri storici minori si trovano in contesti caratterizzati da edifici costruiti con tecniche tradizionali, spesso soggetti a degrado e privi di adeguate strategie di consolidamento antisismico. La sovrapposizione cartografica evidenzia che molti comuni vulnerabili hanno già subito terremoti distruttivi in passato, senza però essere stati oggetto di interventi strutturali adeguati a prevenire nuovi danni.

L'utilizzo delle tecnologie GIS dimostra come una mappatura accurata del territorio rappresenti uno strumento essenziale per la gestione del rischio sismico nei centri storici minori. HT_GIS non si limita a fornire un'analisi descrittiva, ma costituisce una base operativa per la pianificazione e la tutela del patrimonio storico, mettendo a disposizione informazioni dettagliate per decisori politici, urbanisti e professionisti del restauro. La possibilità di incrociare i dati sulla pericolosità sismica con quelli sulla vulnerabilità edilizia apre nuove prospettive per definire priorità di intervento, consentendo di ottimizzare le risorse disponibili e migliorare l'efficacia delle politiche di prevenzione.

LEGENDA

n° abitanti

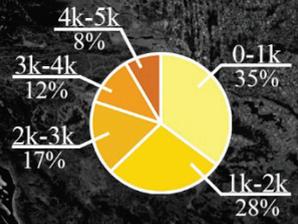
0-1000

1000-2000

2000-3000

3000-4000

4000-5000



LEGENDA

Zone pericolosità sismica

OPCM 28/04/2006 n. 3519, All. 1b

< 0.025 g □ zona 4

0.025 - 0.050 □ zona 4

0.050 - 0.075 □ zona 3

0.075 - 0.100 □ zona 3

0.100 - 0.125 □ zona 3

0.125 - 0.150 □ zona 3

0.150 - 0.175 □ zona 2

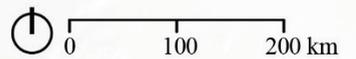
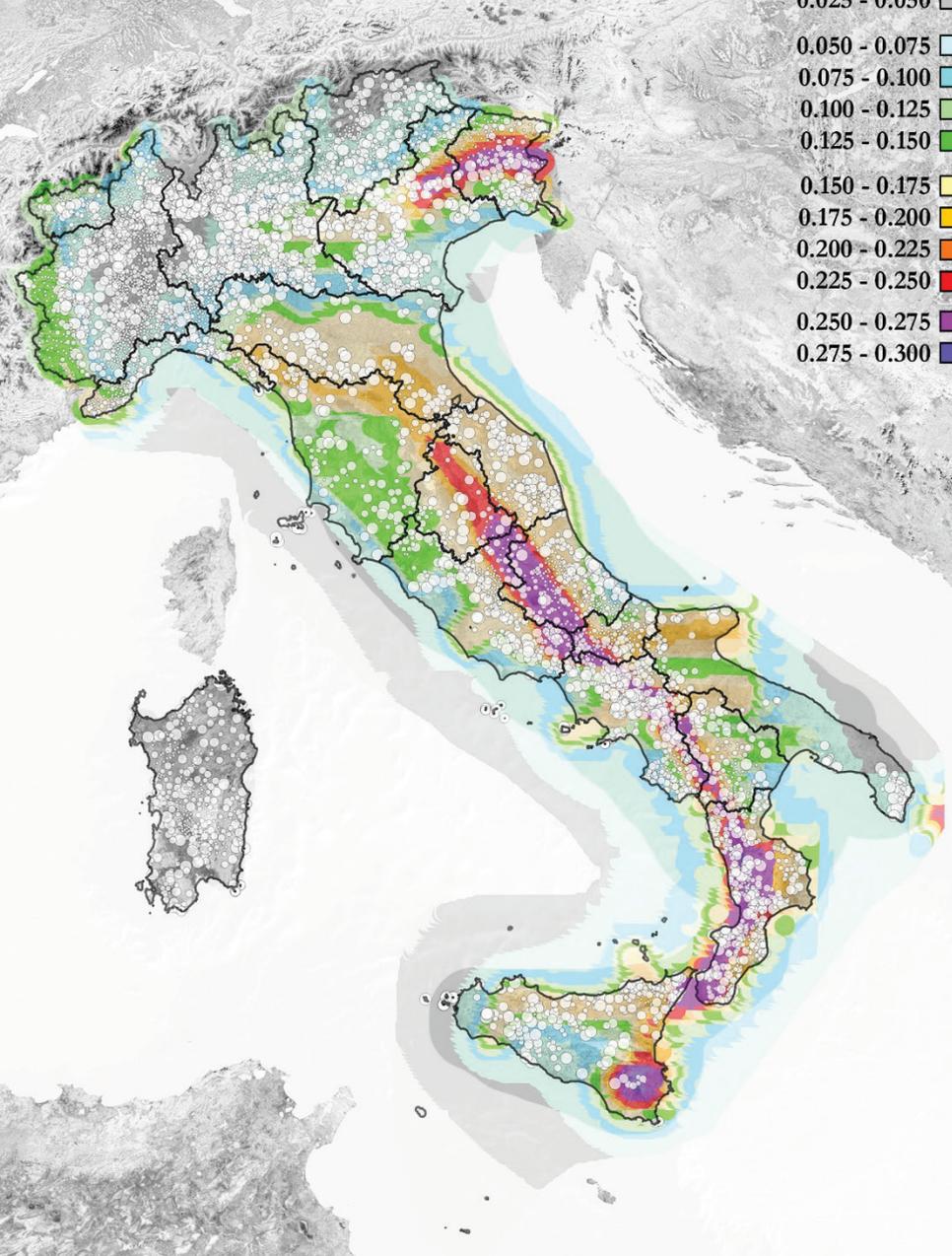
0.175 - 0.200 □ zona 2

0.200 - 0.225 □ zona 2

0.225 - 0.250 □ zona 1

0.250 - 0.275 □ zona 1

0.275 - 0.300 □ zona 1



PART 1

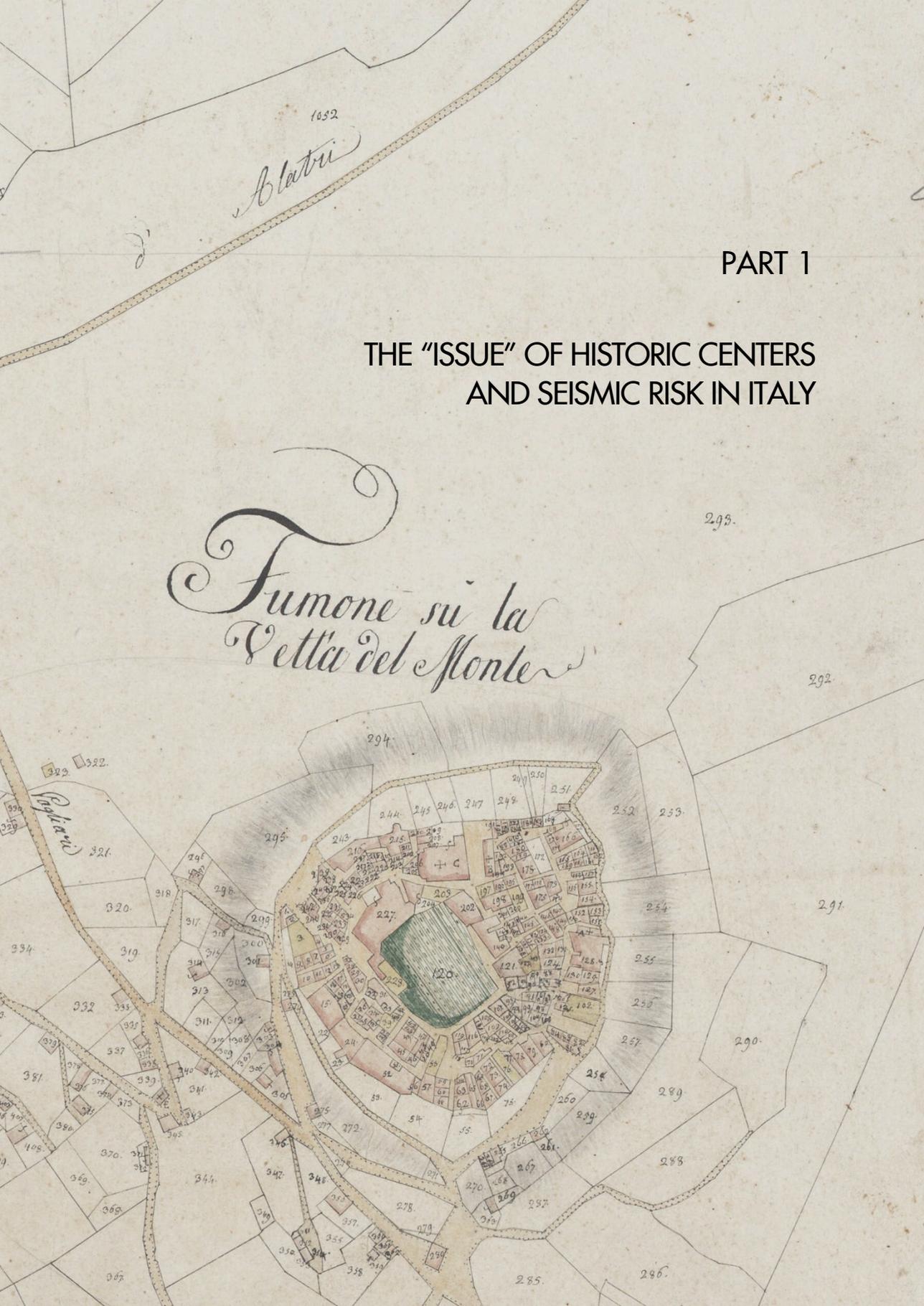


1092
Blatri

PART 1

THE "ISSUE" OF HISTORIC CENTERS
AND SEISMIC RISK IN ITALY

*Fumone su la
Vetta del Monte*



We love art, but we believe that it should not be detached from the social context in which it emerged. We find it meaningless to restore and preserve a historic center by transforming it from a natural hub of collective life into a luxury residence for aesthetes and enthusiasts of antiquity.

Giorgio Bassani

Minor historic centers: a vulnerability to understand and address

Historic centers represent a significant cultural asset for the Italian territory. Their strong empathic relationship with the natural environment, as well as with the morphological and material characteristics of the places they inhabit, defines the aesthetic identity of historic centers. These places are marked by a high quality of social and communal life. Their beauty lies in their urban fabric, which respectfully follows the natural topography through simple architectural forms constructed with local materials what today would be termed “sustainable”⁶³.

Planning and managing transformations affecting the ancient cores of Italian cities is a complex task, and navigating this complexity constitutes one of the greatest contemporary challenges. Urban policies aimed at regenerating historic heritage while simultaneously promoting a new image of the city make the balance between preserving the identity of places and preventing their commodification increasingly delicate. The shifting interpretations and proposed solutions for their preservation reflect broader changes in the idea of the city itself over time, and in the social and historical relationships connected to it. These evolutions have had a clear impact on the theories and practices of urban transformation. Correspondingly, legislative frameworks and urban planning tools related to historic centers have also evolved.

For too long, the dominance of preservationist policies, grounded in the rhetoric of the “invaluable”, has contributed to the abandonment and decay of many historic centers. Today, the historic center is no longer perceived as

⁶³ PELLICCIO A. *ET AL.* (2017), *op. cit.* in bibliographic reference no. 78.

an untouchable “monument”. Instead, themes such as reuse, protection, and functional restoration have become central to contemporary urban processes.

In this context, the debate on the preservation of minor historic centers has regained prominence in recent years, particularly following the seismic events that struck central Italy. Due to the originality of their urban composition, these settlements are increasingly recognized as “environmental monuments”⁶⁴ to be safeguarded. The loss of the *genius loci*, as the expression of local communities, would signify the loss of the cultural identity of the nation.

From an urbanistic standpoint, the issue of historic centers has been extensively addressed in the literature. This section aims to introduce the “question” by identifying the main trends that have emerged in Italy over the past decades. The last forty years are especially significant, as they have seen highly heterogeneous approaches to the management of historic centers.

The 1970s marked a turning point. Amid an economic crisis that particularly affected the construction sector and growing social pressure regarding housing, attention shifted from indiscriminate new construction to the revaluation of existing building stock. The concept of “reuse” emerged as both a housing strategy and an integrated approach to urban planning, encouraging the recovery and adaptive reuse of historic buildings in order to avoid further disruption of historical urban fabrics⁶⁵.

In the 1980s, the reuse paradigm was expanded through more detailed planning instruments. Notably, “detailed amendments” (*varianti di approfondimento*) to the General Master Plans (*Piani Regolatori Generali*, PRG)⁶⁶ were introduced, allowing municipalities to address the specificities of historic centers with targeted tools. This period also saw a closer connection between building recovery and urban regeneration policies, aiming not only to

⁶⁴ The expression *monumenti d'ambiente* (environmental monuments) referring to historic centers was used by the architect and urban planner Gustavo Giovannoni (1873-1947). Giovannoni was one of the first to conceive of the historic center not merely as a collection of monumental buildings, but as a unified urban context to be preserved as a whole, taking into account the integration of architecture, urban planning, and social life.

⁶⁵ CIARDINI F., FALINI P. (1978), *op. cit.* in bibliographic reference no. 23.

⁶⁶ The in-depth variant to zoning plans is a targeted modification of a municipality's General Regulatory Plan (PRG), aimed at adapting it to new urban planning, regulatory, or territorial development needs. Its purpose is to make the zoning plan more detailed, up-to-date, and effective in land management, while maintaining coherence with the overall urban planning framework.

preserve architectural heritage but also to improve the quality of life in existing urban areas.

The 1990s brought a further paradigm shift. The focus moved from conserving the historic city as a “monument” to recovering the city, fostering greater integration between historic and modern parts of the urban fabric. It was in this decade that the first inventory of Italian historic centers was undertaken a crucial step in understanding their distribution and relevance nationwide⁶⁷.

In recent years, the approach to managing and protecting historic centers has undergone a significant transformation, with increasing emphasis placed on preserving and enhancing small centers. This shift has found expression in national policies, supported by legislative reforms and targeted programs aimed at countering the abandonment and degradation of these areas.

To address the most pressing challenges, several strategic measures have been identified to ensure the vitality and long-term sustainability of small historic centers:

- Fiscal and economic incentives: Promoting residential settlement in small towns through tax relief and financial support, particularly aimed at attracting younger populations and reversing depopulation trends.
- Recognition of specific needs: Tailoring policies to the distinct conditions of those who live and work in small municipalities.
- Promotion of local distinctiveness: Enhancing cultural, landscape, and identity-based assets to increase tourism appeal and economic potential.
- Networking strategies: Encouraging collaboration among small historic centers to foster shared development models and overcome the limitations of low autonomy.
- Provision of adequate services: Ensuring essential infrastructure and services, making life in small historic centers not only viable but genuinely attractive, highlighting environmental, social, and cultural benefits.

These general orientations contribute to the valorization of minor historic centers, primarily through sustainable tourism development. However, this must not be limited to the protection of architectural heritage alone. The

⁶⁷ GASPARRINI C. (1994), *op. cit.* in bibliographic reference no. 47.

environmental and landscape contexts in which these centers are situated – individually or as part of broader systems – must also be central to any enhancement strategy. The integration of cultural heritage, landscape, and natural resources is essential for promoting a form of tourism that is both economically viable and respectful of the authenticity and identity of place.

Meanwhile, changes in the agricultural sector – driven in part by reforms to the European Union’s Common Agricultural Policy (CAP)⁶⁸ – have reshaped rural territorial management and local development strategies. In this context, the most pressing challenge for small historic centers not yet engaged in structured enhancement processes is that of depopulation. Tourism alone is insufficient to reverse this trend; rather, a broader, more integrated approach is needed. This includes improving basic services, generating employment opportunities, and fostering what could be called “modern livability”, closely linked to enhanced mobility and accessibility.

Implementing effective enhancement strategies requires a coordinated effort across sectors, institutions, and financial channels. Yet achieving this synergy is often difficult due to competing interests and fragmented responsibilities across administrative levels. A methodologically sound approach must begin with in-depth knowledge and interpretation of the territory this constitutes the foundation for informed and sustainable intervention.

Numerous successful examples of valorization initiatives are built upon seemingly simple but effective actions, such as the creation of walking trails, food and wine itineraries, or “village-museum” projects. However, to ensure lasting and meaningful results, such initiatives must be deeply rooted in the unique characteristics of their territorial context. Standardized approaches risk diluting local identity. Thus, local resources – both in terms of materials and existing professional skills – should be actively engaged to ensure that projects respond authentically to the specific context in which they are implemented.

One of the main challenges in enhancing minor historic centers is addressing demographic decline by creating favorable conditions for economic and social development. This entails fostering both new and existing enterprises while ensuring an adequate supply of infrastructure and essential services. The availability and efficiency of services are crucial factors that local

⁶⁸ See [webliography](#), entry no. 1.

administrations must manage to make living in small historic centers not only feasible but genuinely desirable.

In addition to service provision, safeguarding local identity remains fundamental to any enhancement process. The identity of a historic center – regardless of size – emerges from the interaction between its built environment, historical memory, local culture, and traditions. This deep connection between territory and inhabitants is essential to the vitality of these places. Accordingly, any urban transformation or revitalization initiative must be carefully calibrated to avoid invasive interventions that would disrupt the existing equilibrium.

The key to effective intervention lies in leveraging local resources and involving communities in regeneration processes. Policies overly focused on sector-specific goals – such as tourism or commercial development – run the risk of eroding the original identity of historic centers. Without careful planning, economic promotion can lead to an artificial transformation of these places, turning them into staged environments rather than lived-in spaces. To avoid this, it is essential to adopt an integrated approach that balances preservation, innovation, and sustainability ensuring continuity of urban life without compromising the soul of the territory.

Evolution of the concept of historic center: from preservation to enhancement

Proposing a definition of the historic center today is a highly complex task. Any such definition must, despite its brevity, encapsulate a wide range of interrelated and intricate phenomena typological, structural, historical, geographical, and even geological. The difficulty lies not only in the conceptual synthesis required, but also in the inherent diversity of historic settlements, which defy uniform categorization. As has often been noted, it is not possible to construct a single conceptual framework capable of encompassing the full variety of ancient urban forms and components that Italy offers in such abundance⁶⁹.

The concept of the historic center has evolved over time, shaped by the shifting cultural, social, and economic dynamics that have influenced cities and territories. Where once their value was primarily linked to their monumental and artistic character, historic centers are now recognized as complex urban ecosystems. Their preservation must therefore go beyond the physical protection of buildings to embrace the economic and social processes that give them life. In this regard, it is useful to review key definitions that highlight both the conceptual complexity of the term and the interdisciplinary dimensions that any serious discourse on historic centers must engage with.

Urban studies typically trace the origins of systematic interest in historic centers to the second half of the 19th century, particularly in the wake of Baron Georges-Eugène Haussmann's interventions in Paris⁷⁰. Within this disciplinary evolution, two principal interpretive approaches have emerged. The first frames historic centers as essential components of cultural heritage,

⁶⁹ D'ALESSIO G. (1983), *op. cit.* in bibliographic reference no. 29.

⁷⁰ Georges-Eugène Haussmann (1809-1891) was a French urban planner and administrator, renowned for the radical transformation of Paris during the Second Empire under Napoleon III. Appointed Prefect of the Seine in 1853, he led an extensive urban modernization plan that revolutionized the French capital, making it more functional, sanitary, and monumental. His interventions included the creation of wide boulevards, the demolition of unhealthy medieval neighborhoods, the development of a modern sewer system, the harmonization of city architecture, and the expansion of parks and green spaces. His work turned Paris into a model of the modern city, influencing urban planning in many other metropolises around the world.

emphasizing their historical, artistic, and architectural significance. The second situates them within broader strategies of territorial governance, focusing on their functional, urbanistic, and socio-economic roles.

The 1931 Athens Charter⁷¹ marked an early turning point, asserting the need to protect monuments within their broader urban contexts, thereby moving beyond the isolated preservation of individual buildings. The 1964 Venice Charter⁷² further advanced this principle by introducing the notion of “integrated restoration,” emphasizing the preservation of the authentic character of historic centers including their materials and traditional construction techniques.

In Italy, awareness of the value of historic centers emerged relatively late. A cultural and institutional shift began with the 1960 Gubbio Conference, organized by the National Institute of Urban Planning (INU) on the theme of safeguarding and rehabilitating historic-artistic centers. Although no formal definition of a historic center was included in the resulting Gubbio Charter⁷³, the opening remarks by Antonio Cederna and Mario Manieri Elia made clear

⁷¹ The Athens Charter of 1931 is a document developed during the International Congress of Modern Architecture (CIAM), representing one of the first attempts to define principles for the protection of monumental heritage and historic centers. The charter emphasizes the importance of preserving monuments within their urban context, promoting scientific restoration and discouraging arbitrary interventions or stylistic reconstructions. It laid the groundwork for a more holistic vision of conservation, anticipating the concept of integrated protection that would later be developed in the Venice Charter of 1964.

⁷² The Venice Charter of 1964 is a foundational document for the protection and restoration of architectural heritage, adopted by the Second International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments. It introduces the concept of integrated restoration, emphasizing the importance of preserving the historical, material, and cultural authenticity of buildings, and discouraging arbitrary reconstructions or stylistic reinterpretations. The charter extends protection beyond individual monuments to the entire urban context, recognizing historic centers as living entities to be preserved in their architectural, environmental, and functional balance.

⁷³ The Gubbio Charter of 1960 is a key document for the protection of historic centers in Italy, developed during the First National Conference for the Safeguarding and Renewal of Historic Centers. It marks a crucial shift in the approach to conservation, recognizing that not only individual monuments, but the entire historic urban fabric must be preserved in its architectural, environmental, and social integrity. The charter introduces the concept of urban restoration, asserting that historic centers should not be treated as static museums, but as living organisms, where preservation must be reconciled with the needs of the community and contemporary development.

that preservation must concern the historic city including the entire urban structure as it has evolved over the centuries. This conference marked a pivotal cultural moment, leading to the proliferation of special legislation, proposals, debates, and projects dedicated to historic centers. A key outcome was the growing recognition of the historic center as an integrated urban organism rather than a mere collection of monuments.

In this cultural context, the first official Italian definition of “historic center” was formulated in 1964 by the Commission for the Protection and Enhancement of Historical, Artistic and Landscape Heritage⁷⁴. Following the introduction of the concept of “environmental cultural assets” (*beni culturali ambientali*), the commission defined historic urban centers as «urban settlement structures that constitute a cultural unit or the original and authentic core of settlements, bearing witness to the traits of a living urban culture». From that point onward, the historic center has been understood and classified as part of the national cultural heritage although it must be clearly distinguished from other types of heritage such as artworks, manuscripts, and archives⁷⁵.

In 1969, the term entered the *Dizionario Enciclopedico di Architettura e Urbanistica*⁷⁶, which acknowledged the layered historical character of such spaces, and echoed Roberto Pane’s 1965 distinction between “ancient center” and “historic center”. Roberto Pane defined the ancient center as the archaeological core, while the historic center encompassed the entire city including

⁷⁴ Named the Franceschini Commission after its chairman.

⁷⁵ In the 1964 declaration, guidelines are set out for their protection, which should be implemented through precautionary measures and zoning plans that «must take into account the centers themselves in their entirety» while also revitalizing them by «ensuring them reasons for economic and social life, allowing for the development of an undepressed communal life» (D’ALESSIO G. (1983), *op. cit.* in bibliographic reference no. 29).

⁷⁶ «The core of a city which, due to its formal, typological, and urban characteristics, constitutes a complex linked to specific historical periods. Sometimes, the concept of a historic center is extended to the entire city when it represents a living testimony of past eras. The term has been popularized by more recent urban planning legislation, which has addressed the issues of preservation, rehabilitation, and enhancement of historic centers». Historic centers «may be unified or fragmented, completely or partially fragmented, completely or partially preserved in their original structure; their topographical delimitation...should include the entire urban structure when dealing with settlements where the historical structure is predominant, even when it has undergone clear deformations over time that have broken the continuity of the historic fabric...the protection of historic centers may also include relatively recent (19th century) or even modern constructions, if considered decisive and unique records in the history of architecture».

its modern components. As he wrote: «What is ancient is historical, but not all that is historical is ancient». The historic center, thus, includes medieval, Renaissance, Baroque, and 19th-century structures formed through successive stratifications⁷⁷.

Later definitions have grown more nuanced, incorporating criteria such as function, symbolism, and community practices. According to Vincenzo Di Gioia, a historic center can be defined as «a place that may be geographically delineated, where the citizenry has traditionally carried out – and often continues to carry out – its primary activities, consolidating the representative functions of the city»⁷⁸. He adds that the term now applies broadly to all settlement contexts of historical significance, regardless of their age. The term “historic center”, in common usage, is often not strictly geographic or chronological⁷⁹. Indeed, the word *center* may misleadingly suggest a spatial centrality, while *historic* is overly generic in a country where human activity has shaped the territory for millennia.

By 1979, Roberto Di Stefano noted the persistent ambiguity in both institutional and popular terms related to historic centers, often resulting in reversed meanings or misunderstandings. He defined the historic center as «the old (and sometimes modern, though not contemporary) part of the city, which embodies the civil evolution of the community that created it». He emphasized that identifying a historic center cannot rely solely on pre-established chronological criteria, but must emerge from a qualitative, critical-historical analysis capable of recognizing its cultural and identity value⁸⁰.

A similar position is held by Gaetano Miarelli Mariani⁸¹, who rejects purely legal or generic typological classifications based on historical periods or artistic schools. He advocates for a more context-specific approach, warning that overly rigid definitions risk reducing the complexity and dynamism of historic urban heritage to simplistic and ineffective frameworks.

Various classification systems have since been proposed, depending on parameters such as geographical location, demographic scale, morphological characteristics, or historical-artistic value. Roberto Di Stefano himself

⁷⁷ PANE R. (1965), *op. cit.* in bibliographic reference no. 75.

⁷⁸ DI GIOIA V. (1975), *op. cit.* in bibliographic reference no. 35.

⁷⁹ DI GIOIA V. (1975), *op. cit.* in bibliographic reference no. 35.

⁸⁰ DI STEFANO R. (1979), *op. cit.* in bibliographic reference no. 36.

⁸¹ MIARELLI M. (1979), *op. cit.* in bibliographic reference no. 65.

proposed a classification based on geography and urban size, distinguishing four main categories:

- Independent architectural ensembles (e.g., castles, monasteries).
- Small urban centers in rural, maritime, or mountainous areas.
- Historic towns with homogeneous or mixed characteristics.
- Historic districts within large cities.

Each of these types presents specific challenges and values. Independent ensembles are viable as historic centers only if they remain inhabited and vital. Small towns, often of high cultural value, are less significant in economic or administrative terms. Historic towns tend to retain their original urban fabric, having experienced limited impact from modernization. Historic districts in larger cities can vary widely and include:

- Areas near waterways or coastlines with strong maritime identities.
- Districts adjacent to major monuments or archaeological sites.
- Neighborhoods near large green spaces, maintaining a bond with the natural landscape.
- Isolated historic areas surrounded by modern development, often vulnerable to fragmentation.

Other classifications adopt demographic or socio-economic criteria, highlighting various states of vitality or decline. These include:

- Historic centers functioning as administrative or service hubs.
- Centers facing degradation due to overcrowding and neglect, often in immigrant neighborhoods.
- Centers in relative equilibrium, with stable populations and sustainable practices.
- Centers undergoing depopulation but still subject to investment and renovation, often tourism driven.
- Centers in advanced decline, with empty buildings and loss of urban identity.

A final method of classification focuses on typology and morphology. Dino Vianello⁸² identifies four main structural-environmental types:

- Hilltop centers with serial housing (*contrade*), spread along ridges.
- Plains settlements with loosely gridded structures along roads or rivers.

⁸² VIANELLO D. (1988), *op. cit.* in bibliographic reference no. 95.

- Lagoon or coastal settlements with comb-like layouts parallel to the shoreline.
- Larger centers with simple, rationalized, often medieval layouts.

These numerous definitions and typologies underline the importance of a multidimensional approach to the concept of the historic center. It must be recognized not only as a cultural asset, valued for its heritage, but also as an economic resource capable of driving sustainable development, and a social asset, vital to community cohesion and quality of life.

Roberto Pane and Renato Bonelli's⁸³ view of the historic center as primarily a cultural asset, while theoretically sound, risks becoming detached from operational realities if it neglects economic and social dimensions. At the opposite extreme, Alberto Samonà⁸⁴ argued that historic centers should be reserved for contemplation alone, as their rigid forms are unsuited to contemporary life. Similarly, the view of the historic center as primarily a social asset can lead to distortion if it disregards its cultural substance for instance, when historical buildings are repurposed inappropriately, confusing restoration with mere reuse. An uncritical notion of "social preservation" can even worsen conditions, maintaining populations without adequate support or vision, and thus reinforcing spontaneous ghettoization rather than enabling true regeneration.

⁸³ BONELLI R. (1976), *op. cit.* in bibliographic reference no. 14.

⁸⁴ SAMONÀ A. (1969), *op. cit.* in bibliographic reference no. 90.

Regulatory frameworks and tools for the management of historic centers

The evolution of the concept of the historic center is closely intertwined with the development of national and regional legislation concerning urban planning and heritage protection. The first official legislative definition of a *centro storico* (historic center) in Italy dates to 1967, nearly thirty years after the foundational heritage laws of 1939⁸⁵. Compared to other European countries, Italy was initially slow to address the issue of historic centers in a systematic way. In the immediate post-war period, countries such as France, the Netherlands, Poland, the former Czechoslovakia, and the former Yugoslavia had already developed a clear understanding of the need for specific tools for the analysis, planning, and intervention in historic urban areas. These nations introduced legal frameworks recognizing the distinct nature of historic centers within the broader urban fabric, due to their antiquity and artistic or monumental value. In contrast, Italy's approach evolved more gradually, beginning with fragmented regulatory measures that only later matured into more structured and integrated management instruments.

It is well known that the heritage laws of 1939⁸⁶ were enacted during a period in which urban planning culture did not yet conceive of the historic center as a unified entity, with intrinsic value independent from individual monuments. Law No. 1089 of June 1, 1939 – while a milestone in the protection of cultural heritage – contained no specific provisions for safeguarding historic centers in their entirety. Its focus was limited to individual buildings of historical or artistic interest, while the surrounding urban context was considered solely as a scenic backdrop to monuments. This approach even led to theoretical proposals for demolishing parts of the urban fabric to isolate and emphasize monumental structures.

⁸⁵ Law No. 1089 of 1939 on the protection of cultural heritage, and Law No. 1497 of 1939 on the protection of the landscape.

⁸⁶ Law No. 1089 of June 1, 1939, titled *Protection of items of artistic and historical interest*, was one of the first comprehensive pieces of legislation in Italy aimed at safeguarding cultural heritage. Enacted during the Fascist regime, it consolidated and expanded previous regulations by formalizing the declaration of cultural interest, establishing protective restrictions, and regulating the circulation of artistic and historical assets.

Law No. 1497 of June 20, 1939⁸⁷, came closer to a modern notion of the historic center, particularly in Article 1, which referred to «complexes of immovable property that constitute a characteristic ensemble of aesthetic and traditional value». However, the implementing regulation (R.D. No. 1357 of June 3, 1940⁸⁸) revealed significant limitations in its applicability to historic centers as comprehensive urban entities. The concept of protection remained fragmented and partial, focusing on individual high-value buildings without recognizing the cultural and historical coherence of the broader urban setting.

Similarly, the Urban Planning Law No. 1150 of August 17, 1942⁸⁹, made no mention of historic centers, confirming that the concept had yet to enter legal or disciplinary discourse. The expression “historic center” cannot be conflated with the term “inhabited center” used in Article 1 of that law, which referred generically to urban settlements without consideration of their historical or artistic character.

A first explicit reference to historic centers appeared only in Law No. 765 of August 6, 1967 – known as the “Bridge Law” (*Legge Ponte*)⁹⁰ – whose

⁸⁷ Law No. 1497 of June 20, 1939, titled *Protection of Natural Beauties*, was one of the first Italian laws to protect the landscape as an asset of public interest. Complementing Law No. 1089/1939 on the protection of artistic and historical heritage, this law introduced the concept of *landscape restriction*, setting limits on land transformations in areas of particular natural, historical, or environmental value.

⁸⁸ Royal Decree No. 1357 of June 3, 1940, was issued to implement Law No. 1089 of 1939 concerning the protection of items of artistic and historical interest in Italy. This regulation detailed the procedures for applying the law, establishing the processes for declaring cultural interest, the imposition of protective restrictions, limitations on the sale and export of such items, and the role of the Superintendencies in the conservation of heritage

⁸⁹ Urban Planning Law No. 1150 of August 17, 1942, was the first comprehensive piece of legislation in Italy to regulate urban planning at the national level. Enacted during the Fascist period, it established key principles such as the requirement for General Regulatory Plans (*piani regolatori generali*) in cities, the division of territory into zones with different land uses, and oversight of private land subdivisions. Despite its origins, the law remained the main reference point for Italian urban planning for decades, undergoing various amendments and integrations over time.

⁹⁰ Law No. 765 of August 6, 1967, known as the *Legge Ponte* (Bridge Law), introduced significant reforms to the 1942 Urban Planning Law (No. 1150) to adapt it to new urban development and land protection needs. Enacted during a period of rapid building expansion and speculation, it imposed stricter planning regulations, made general regulatory plans mandatory for all municipalities, introduced limits on private subdivisions, and established urban standards such as public green spaces and services. This law marked a fundamental step in the modernization of Italian urban planning.

Article 17, paragraph 5 states that «where an urban agglomeration has historic, artistic, or notable environmental value, only consolidation and restoration works are permitted, without alterations to volume». Nevertheless, the law offered neither a clear definition of historic centers nor specific criteria for their identification.

A more concrete attempt to define historic centers can be found in Circular No. 3210 of the Ministry of Public Works, issued on October 28, 1967⁹¹, which identified three typologies of urban structures falling within this category:

- Urban structures where most buildings were constructed before 1860, even in the absence of monuments or high artistic value.
- Urban structures enclosed by ancient city walls, preserved in whole or in part, including external expansions that meet the previous criteria.
- Urban structures built after 1860 represent a significant example of high-quality building models.

While innovative at the time, this classification remained isolated and was soon deemed outdated⁹², as it failed to account for the morphological and functional complexity of historic centers, relying instead on limited chronological and structural parameters.

In 1968, Ministerial Decree No. 1444 of April 1⁹³ – issued to implement the *Legge Ponte* – marked an important step by introducing the concept of “homogeneous territorial zones” and establishing regulatory standards for building density, height, and urban services. Historic centers were explicitly

⁹¹ Circular No. 3210 of October 28, 1967, issued by the Ministry of Public Works, was enacted to clarify and provide operational guidelines for the implementation of Law No. 765 of August 6, 1967 (Bridge Law). This document outlined the procedures for applying the new urban planning regulations, particularly regarding the mandatory adoption of general regulatory plans by all municipalities, the limitations on private subdivisions, and the minimum urban standards for public services and green spaces. The circular aimed to standardize the interpretation of the law and ensure proper urban planning throughout the national territory.

⁹² DELFINO F. (1976), *op. cit.* in bibliographic reference no. 33.

⁹³ Ministerial Decree of April 1, 1968, No. 1444 was issued in implementation of the Bridge Law (Law No. 765/1967) to define the mandatory urban planning standards for general regulatory plans and subdivision plans. This decree established fundamental parameters for Italian urban planning, including the division of the territory into homogeneous zones (A, B, C, D, E, F) and the limits on building density, height, and distances between structures. It also set minimum public space requirements per inhabitant for green areas, schools, and public services. The decree remains a key reference in Italian urban planning to this day.

addressed in Article 2 as «those areas of the territory occupied by urban agglomerations of historical, artistic, or particular environmental value, including the surrounding areas considered integral to these agglomerations». Article 4 also showed sensitivity toward adapting general urban standards (Article 3) to the specific needs of historic centers.

However, despite this formal recognition, the decree still viewed historic centers narrowly, essentially treating them as conservation zones usually limited to the oldest parts of the urban settlement⁹⁴.

Also in 1968, the draft law prepared by the Papaldo Commission⁹⁵, following the orientation of the earlier Franceschini Commission, included historic centers among “environmental assets”. Article 59 introduced the notion of «presumed environmental assets», stating that «historic centers and settlement cores of historical or artistic character are to be considered presumed environmental assets until their boundaries are formally established, and are subject to the provisions of this law within their natural limits». This provision introduced a key principle: automatic protection of historic centers, pending formal designation, thereby ensuring preventive conservation.

Another significant step came with Law No. 865 of October 22, 1971⁹⁶, which for the first time distinguished between “built-up centers” and “historic centers”. Article 16 used this distinction to determine compensation in cases

⁹⁴ COPPOLA A. *ET AL.* (2004), *op. cit.* in bibliographic reference no. 26.

⁹⁵ The Papaldo Commission was a working group established to study and propose reforms in the field of urban and building planning. It was named after Giacomo Papaldo, an official of the Ministry of Public Works, who coordinated its activities. The commission was tasked with analyzing the effects of the “Bridge Law” (Law No. 765/1967) and proposing solutions to improve regulatory frameworks in the sector. Topics addressed included the management of urban expansion, the protection of the territory, and the need for more effective control over land subdivisions. Its analyses and recommendations influenced subsequent legislative measures and contributed to the development of new urban planning policies in Italy.

⁹⁶ Law No. 865 of October 22, 1971, known as the “Housing Law”, introduced a significant reform in the field of public residential housing (ERP) and expropriation for public use. It was enacted to address the housing shortage in Italy, regulating the development of plans for affordable and public housing (PEEP – *Piani di Edilizia Economica e Popolare*) and promoting access to housing for lower-income groups. The law redefined procedures for the expropriation of land designated for public housing, introducing the principle of a “political price” for land acquisition by municipalities, in order to combat real estate speculation. It also encouraged the creation of areas for public services, green spaces, and infrastructure in new residential neighborhoods. The legislation had a lasting impact on urban planning and social housing policy in Italy.

of expropriation, implicitly acknowledging the different legal nature of historic settlements compared to other urbanized areas.

These legal milestones reflect the gradual refinement of the concept of the historic center within Italian legislation shifting from fragmented, indirect protection to an increasing awareness of the need for specific tools for their management and enhancement.

Law No. 10 of 1977⁹⁷ – known as the *Bucalossi Law* – is particularly relevant for Article 4, paragraph 8, which broadened the application of the restrictions previously set forth in Article 17, paragraph 5 of the *Legge Ponte*, extending them to the entire urban fabric of inhabited centers. This marked a further step toward recognizing the necessity of protecting historic settlements within the broader context of the city.

In contrast, Law No. 457 of August 5, 1978⁹⁸, made no explicit reference to architectural heritage or historic centers. These were not treated as distinct entities but were instead included in the broader category of areas requiring urban renewal. This reflected a shift in perspective: historic centers were no longer seen solely as assets to be preserved but as parts of the urban system in need of rehabilitation and regeneration signaling an evolution in urban management policies.

A significant development came with Law No. 431 of 1985⁹⁹ – known as the *Galasso Law* – which extended landscape protection to vast areas of the

⁹⁷ Law No. 10 of January 28, 1977, known as the “Bucalossi Law”, introduced a fundamental reform in the regulation of building activity in Italy. Its main objective was the abolition of automatic building rights, establishing that the right to build no longer stemmed solely from land ownership, but had to be granted by the municipal administration through a specific building permit (*concessione edilizia*). The law introduced the principle of the *urbanization contribution*, requiring private developers to pay a fee to fund necessary public works (such as roads, sewers, and lighting) in new developments. It also strengthened public control over land transformation, laying the foundation for more balanced urban planning.

⁹⁸ Law No. 457 of August 5, 1978, titled *Provisions for Residential Housing*, marked a turning point in Italian housing policy, as it introduced a comprehensive regulatory framework for the public residential housing sector (ERP) and for the rehabilitation of the existing building stock. The law defined multi-year residential housing programs, providing funding for the construction of new homes intended for low-income groups, while also encouraging the renovation and maintenance of existing buildings rather than focusing solely on new construction. It also established criteria for the allocation of public housing and promoted planning tools for local authorities.

⁹⁹ Law No. 431 of August 8, 1985, known as the *Galasso Law*, marked a turning point in the protection of the landscape and territory in Italy. It was introduced to strengthen

national territory and emphasized the interconnection between landscape and historic heritage preservation. The law required regional governments to prepare landscape plans, laying the groundwork for integrated territorial planning that included historic centers. This trajectory was further reinforced by Legislative Decree No. 490 of 1999¹⁰⁰, the *Consolidated Code of Cultural and Environmental Heritage*, which systematized prior laws but without introducing substantial innovations.

A true turning point arrived with Legislative Decree No. 42 of 2004, the *Code of Cultural Heritage and Landscape*¹⁰¹, which deepened the notion of integrated protection. It redefined cultural heritage not merely as monumental buildings but as a critical element of quality of life and sustainable development. The Code sets stricter criteria for the protection of historic centers, highlighting the role of landscape planning and introducing management tools to ensure compatibility with the needs of local communities. In this

environmental safeguards and to impose restrictions on areas of particular scenic and natural interest, in response to uncontrolled urbanization and environmental degradation. The law established automatic landscape restrictions on specific categories of areas - such as coastlines, rivers, lakes, forests, and mountains above 1,200 meters - requiring landscape authorization (*autorizzazione paesaggistica*) for any construction or development activity in these zones.

¹⁰⁰ Legislative Decree No. 490 of October 29, 1999, known as the *Consolidated law on legislative provisions regarding cultural and environmental heritage*, marked a significant reform of Italy's legal framework for the protection of cultural and landscape heritage. This decree unified and systematized key previous laws, including Law No. 1089/1939 on the protection of cultural heritage and Law No. 1497/1939 on landscape protection, providing a clearer and more coherent regulatory framework. Its aim was to simplify the management of protection measures, improve the conservation of cultural assets, and strengthen the safeguarding of the landscape.

¹⁰¹ Legislative Decree No. 42 of January 22, 2004, known as the *Code of cultural and landscape heritage*, is the main piece of legislation in Italy governing the protection and enhancement of cultural and landscape heritage. This code unified and replaced the previous Legislative Decree No. 490/1999, consolidating into a single text the provisions concerning the safeguarding of both cultural and landscape assets, in line with European directives and the European Landscape Convention. Among its key innovations were the strengthening of preventive protection, increased responsibility for local administrations, and the introduction of tools for the enhancement of historical, artistic, and natural heritage. The *Code of cultural and landscape heritage* is still in force and has been updated over time to meet new needs related to conservation and the sustainable development of the territory.

direction, Legislative Decree No. 63 of 2008¹⁰² further strengthened cultural heritage protection, expanding provisions for its use and enhancement.

In parallel, the European Landscape Convention¹⁰³, which came into force in 2006, had a major influence on Italian legislation by promoting a broader, interdisciplinary approach. It established landscape and historic centers as fundamental components of environmental and cultural identity. As a result, Italian regions began developing Regional Landscape Plans (*Piani Paesaggistici Regionali*) instruments that balance conservation and development, establishing detailed criteria for managing historic centers in line with local specificities.

Today, the legal framework is structured as a complex, multi-level system in which historic centers are recognized as strategic components of territorial planning. This system, by balancing protective constraints with enhancement strategies, seeks to ensure their preservation without compromising their social and economic vitality.

Managing historic centers requires specific urban planning tools capable of balancing heritage protection with the need to ensure sustainable development and contemporary usability. The General Urban Plan (*Piano Regolatore Generale, PRG*) remains the primary municipal planning instrument and has progressively integrated sections dedicated to safeguarding historic fabrics,

¹⁰² Legislative Decree No. 63 of March 26, 2008, introduced amendments and additions to the *Code of cultural and landscape heritage* (Legislative Decree No. 42/2004), with the aim of improving the protection, enhancement, and management of Italy's cultural heritage. Key innovations included clearer definitions of cultural and landscape assets, the introduction of tools to simplify protection procedures, and the promotion of public-private partnerships for the enhancement of heritage sites. The decree also strengthened the role of Regions and local authorities in heritage management, in line with the principle of administrative decentralization.

¹⁰³ The European Landscape Convention is an international treaty adopted by the Council of Europe in Florence on October 20, 2000, and subsequently ratified by Italy through Law No. 14 of January 9, 2006. The convention represents a fundamental step forward in landscape protection, introducing an innovative approach that goes beyond safeguarding only landscapes of exceptional value. It acknowledges that all landscapes – including urban and rural everyday environments – hold cultural, ecological, and social importance. The main goals of the treaty are the protection, management, and sustainable planning of landscapes, encouraging the involvement not only of institutions but also of citizens in decision-making processes. This convention has significantly influenced Italian legislation, particularly the *Code of cultural and landscape heritage* (Legislative Decree No. 42/2004), by strengthening awareness of the landscape as a key element for quality of life and sustainable development.

introducing constraints and criteria for transformation. However, due to its rigidity, the PRG has often been supplemented by more flexible instruments, such as Recovery Plans (*Piani di Recupero*), introduced by Law No. 457/1978¹⁰⁴, which enable targeted interventions in historic areas, combining conservation with functional adaptation. Similarly, *Varianti per i Centri Storici* (Master Plan Amendments for Historic Centers) have allowed the tailoring of planning regulations to the specific morphology of historic settlements.

To preserve the aesthetic and material identity of these sites, *Color and materials plans*¹⁰⁵ (*Piani del colore e dei materiali*) have been introduced, setting guidelines for the chromatic and material consistency of restoration work. In terms of mobility, *Mobility plans for historic centers*¹⁰⁶ have addressed the reduction of vehicular traffic and improved accessibility through measures such as *Limited Traffic Zones* (ZTL) and the promotion of sustainable transport.

The legislative and planning trajectory of Italy's historic centers reveals a gradual shift from rigid conservationist approaches toward more integrated and dynamic management models. Initially, legislation focused solely on protecting individual monuments, neglecting their urban context. Over time, however, greater awareness emerged of the need for specific tools that consider the complexity of historic centers as living systems. Thus, protection policies have evolved to incorporate aspects of territorial planning, sustainability, urban regeneration, and quality of life.

Despite the progress made, the management of historic centers remains a pressing challenge, especially in balancing conservation with development. In some cases, overly rigid constraints have hindered rehabilitation and innovation, while in others, the lack of adequate financial instruments has resulted in neglect and decay. A balanced approach is therefore an essential one that integrates heritage protection with contemporary needs, avoiding both

¹⁰⁴ See footnote no. 36.

¹⁰⁵ Their purpose is to regulate the use of colors, materials, and finishes on building façades, especially in historic contexts and villages, in order to ensure visual harmony and respect local traditions. They are adopted by municipalities as planning tools complementary to zoning plans and landscape protection regulations.

¹⁰⁶ Mobility plans for Historic Centers are urban planning tools developed to regulate traffic and improve accessibility in historic areas of cities, while preserving their cultural heritage and enhancing quality of life.

museification and the loss of identity due to uncontrolled tourism or speculative development.

The future of historic center management lies in the integration of innovative technologies for documentation, monitoring, and maintenance, as well as the adoption of participatory governance models that actively involve local communities in decision-making. Sustainability – in both environmental and socio-economic terms – must be the guiding principle of future policies, ensuring that historic centers remain not only legacies of the past but also vital assets for the future.

Urban planning and architecture of historic centers: elements of vulnerability

It is now widely acknowledged that the study of historic centers presents a complex and multifaceted challenge, where cultural, regulatory, and management dimensions intersect. The analysis of definitions and reference legislation has highlighted the delicate and fragile nature of these contexts, underscoring the need for in-depth investigation aimed at identifying the vulnerabilities to which they are exposed. In this perspective, it becomes essential to examine their urban and architectural composition in order to understand the factors contributing to their fragility, particularly in relation to seismic risk.

Italian historic centers are the product of a long evolutionary process, shaped by successive layers of urban layouts and building typologies accumulated over centuries. This continuous transformation has given rise to an architectural heritage of immense historical and cultural value, yet also one marked by structural deficiencies that heighten its vulnerability especially to seismic events. Understanding this fragility requires a close analysis of the urban morphology and construction techniques that define these settlements, identifying the specific elements that contribute to their structural risk.

The urban fabric of Italian historic centers reflects centuries of development, influenced by geographical, economic, and cultural factors. Their layout is the result of either spontaneous growth or planned expansion, depending on their founding period and subsequent transformations. While such heterogeneity constitutes a valuable historic and architectural asset, it also results in a wide variety of spatial configurations, rendering each historic center unique in its characteristics.

One of the most distinctive features of historic centers is the layout of the street network. In medieval urban cores, streets are often narrow and winding, adapted to the natural topography and defensive needs of the time. Narrow alleys, complex pathways, and confined spaces define a compact urban fabric, where buildings are aligned along axes that often originate from ancient routes or pedestrian paths developed over time. In contrast, centers founded during the Renaissance or Baroque periods exhibit more ordered layouts, with orthogonal main axes and well-defined public spaces designed to facilitate circulation and social life.

The organization of building blocks varies according to the historical development phase of the settlement. In medieval cities, buildings tend to be irregularly clustered around main routes, with small open spaces used for courtyards or modest squares. These structures often line the streets in an uncoordinated fashion, with irregular facades and overlapping volumes. Renaissance and Baroque towns, by contrast, display more regular arrangements: buildings are aligned along planned axes, and spatial subdivision is generally more rational. The size and shape of blocks differ from city to city, but in older settlements narrow and elongated lots prevail, whereas more recent cities exhibit larger and more regular blocks.

Another key feature is the hierarchy of public spaces, which reflects the social, economic, and political functions of the city. Squares act as focal points of urban life, serving as hubs around which civic, religious, and commercial activities revolve. In medieval centers, squares tend to be small and irregularly distributed, while Renaissance and Baroque cities present monumental spaces, clearly conceived to articulate the city according to aesthetic and functional principles.

Main streets connecting key squares and institutions play a crucial role in defining urban structure, often retaining their central function through time. Secondary roads and alleys serve internal circulation, adapting to the configuration of building blocks and the settlement needs of the population.

The relationship between built and open space is another fundamental aspect, influencing both spatial equilibrium and urban livability. In older towns, building density is typically high, with limited private open spaces and a clear separation between public and private domains. This condition has led to the development of specific architectural solutions such as inner courtyards – used for residential or productive purposes – and covered passages connecting buildings through the blocks. In contrast, Renaissance and Baroque urban plans gave greater prominence to open spaces, integrating perspective axes and visual alignments that highlight public buildings and monuments.

Equally significant is the relationship between the historic center and its surrounding landscape. Many cities developed a direct response to natural topography, adapting to slopes, ridges, or valleys. Over time, these relationships gave rise to diverse urban forms, each reflecting the needs of the society and territory in which they were shaped.

Several recurrent spatial patterns can be identified:

- The spindle-shaped layout, common in settlements along a main route or ridge, with buildings aligned along a central street and prominent structures located at either end, often lacking major squares.
- The concentric or enclosing layout, organized around a central authority structure (such as a castle or monastery), following topographic contours concentrically and expanding along ridgelines.
- The orthogonal layout, of Roman origin, is based on a grid of perpendicular streets creating a regular urban mesh, often enclosed by defensive walls.
- The boundary-based layout, which develops within natural or artificial limits (rivers, lagoons, cliffs, infrastructure), shaping urban growth according to the constraints of the terrain.
- The comb-like layout, where streets are oriented perpendicularly to a coastline or river, facilitating access to maritime or fluvial activities, with regularly distributed buildings along main routes.
- The fan-shaped layout, spreading across a ridge with streets following contour lines and converging at a high point often marked by significant civic, religious, or military buildings.
- The radial layout, typical of Renaissance cities, with streets radiating from a central square in a symmetrical pattern designed for spatial clarity and administrative efficiency.

Over time, these urban structures have undergone considerable change both in response to evolving residential and economic demands and through urban restructuring interventions. The gradual expansion of cities has brought new roads, the demolition of outdated buildings, and the redefinition of public spaces to meet contemporary needs. Modern redevelopment projects often seek to reconcile historical preservation with contemporary requirements of mobility and accessibility, aiming to improve connections between historic centers and newer urban areas.

Together, these elements define the historic center as a complex and layered system, where functional, aesthetic, and historical factors converge. A detailed study of their configuration is essential to understand the evolution of urban settlements and to inform planning strategies that respect the specific identity and vulnerabilities of each context.

The urban structure of a historic center cannot be considered in isolation from its architectural and construction characteristics, as the organization of urban space and the morphology of buildings are deeply interdependent. The ways in which the built environment developed over time directly influenced construction techniques, the choice of materials, and the distribution of architectural elements. The result is a stratified heritage building, shaped by environmental conditions, locally available resources, and the functional needs of different historical periods.

Historic buildings are typically characterized by load-bearing masonry structures, constructed with locally sourced materials such as stone, brick, or a combination of both. These constructions often display significant heterogeneity due to successive modifications and adaptations over time. Depending on the geographic area and period of construction, masonry walls may feature regular ashlar stonework or mixed compositions with inserted materials, commonly bound with lime mortar of variable quality. Openings in the walls – windows and doors – reflect long-established functional and aesthetic principles: lower levels often have smaller openings for defensive purposes, while upper floors, particularly from later periods, feature larger windows to accommodate changing needs for light and spatial representation.

Floor structures in historic buildings are generally made of timber or vaulted masonry. Timber floors, widespread in medieval and Renaissance architecture, typically consist of primary beams supporting secondary joists and planking, with a finishing layer – often of terracotta tiles – added to enhance fire resistance and insulation. Vaulted systems are common in more prestigious buildings or in those serving public or religious functions. These include barrel vaults, cross vaults, and pavilion vaults, often adorned with frescoes or decorative plasterwork, reflecting the stylistic richness of the period.

Roof structures follow traditional construction methods, with wooden frameworks supporting coverings of clay tiles or pantiles, varying according to local traditions. Besides their protective function against weather, roofs often play a key aesthetic role, contributing to the visual identity of the urban landscape. Sloped gable roofs, typical of central Italian historic towns, contrast with the flatter roofs more common in southern regions. Eaves and cornices – frequently crafted in terracotta or stone – are a recurring feature in historic buildings, adding ornamental character to façades while also protecting walls from rainwater runoff.

The internal layout of historic buildings reflects the evolution of domestic and functional needs over the centuries. Early structures often consist of compact rooms organized around a central courtyard in noble residences or arranged more simply in vernacular dwellings. Staircases, commonly made of stone or brick, are defining features especially in more refined contexts, where they take on a scenographic function, featuring monumental ramps, vaulted ceilings, and decorative balustrades. In more modest buildings, staircases are often built into walls or placed against them to minimize their footprint and optimize space.

Façades, likewise, express the architectural languages and construction periods from which they derive. In medieval towns, façades are typically austere, with exposed masonry and small, unadorned openings. In Renaissance and Baroque contexts, façades become more expressive and ornamental, with decorative plasterwork, stone moldings, balconies, and monumental portals. Finishing techniques range from plain plaster to elaborately textured surfaces and the use of high-quality materials in buildings of particular importance.

This ensemble of architectural and construction features defines the visual identity of Italian historic centers. It constitutes a unique and irreplaceable cultural heritage one that must not only be protected and enhanced, but also safeguarded from seismic risk through informed, context-sensitive conservation strategies.

Seismic risk in historic centers: vulnerability and impact on built heritage

The urban structure and architectural-construction characteristics of historic centers, as previously analyzed, are crucial factors in assessing their response to seismic events. The dense arrangement of buildings, the heterogeneity of construction techniques, historical layering of interventions, and the morphology of the terrain all significantly influence the structural behavior of these settlements during an earthquake. To fully understand seismic risk in historic centers, it is essential to define its core concepts and components.

Seismic risk is defined as the measure of expected damage to a territory or a specific building stock following an earthquake. It is a function of three main factors: hazard, exposure, and vulnerability.

Seismic hazard is a fundamental parameter, closely linked to the geodynamic characteristics of a region. It refers to the probability that an earthquake of a given intensity will occur in a specific area within a given timeframe. This concept is based on geological, geophysical, and seismological analyses that study fault activity, historical seismic records, and the propagation of seismic waves through the subsoil.

In Italy, seismic hazard is particularly high due to its position at the boundary between the Eurasian and African tectonic plates, with a complex system of active faults running along the peninsula. This tectonic interaction results in intense seismic activity, particularly concentrated along the Apennine belt, the Alpine arc, and certain areas of Sicily and Calabria. National legislation defines seismic hazards through seismic zones, which classifies the territory into four zones based on expected ground shaking:

- Zone 1: highest hazard – strong earthquakes are likely.
- Zone 2: high hazard – significant earthquakes are possible.
- Zone 3: moderate hazard – earthquakes may occur with moderate intensity.
- Zone 4: low hazard – earthquakes are rare and of limited strength.

This classification, defined by Ordinance PCM 3274/2003¹⁰⁷ and subsequent updates, is fundamental in determining building design codes and seismic risk mitigation strategies. However, seismic zoning alone cannot predict the actual behavior of a given area during an earthquake, as local conditions – especially site effects – can significantly influence seismic wave amplification and damage patterns.

Geological formations with high stiffness, such as compact rock, tend to transmit seismic waves with minimal amplification, whereas softer, unconsolidated soils – like alluvial deposits or anthropogenic fills – can amplify seismic oscillations, increasing damage levels. This phenomenon, known as local amplification, is particularly relevant in historic centers often situated on slopes, hillsides, or floodplains. Additionally, the instability of the ground, including phenomena such as liquefaction, landslides, and foundation failure, further exacerbates seismic risk. Liquefaction, where saturated soils temporarily lose strength under seismic loading, can lead to differential settlement or collapse. Hillside towns are also vulnerable to earthquake-induced landslides, particularly in which retaining walls and terraces – often built using traditional, unconsolidated methods – fail under seismic loading.

Hence, seismic hazard must always be assessed in relation to local terrain characteristics and the built environment's response to seismic inputs. In historic centers, the interaction between geological, urban, and structural conditions necessitates a multidisciplinary approach for accurate risk assessment and effective mitigation planning.

Seismic exposure refers to the collection of elements within a potentially affected area that may suffer damage or losses due to an earthquake. This

¹⁰⁷ The Ordinance of the Prime Minister (OPCM) No. 3274 of March 20, 2003, marked a turning point in Italian legislation on seismic risk prevention. Issued in response to the devastating earthquakes that struck Italy in the preceding years, this ordinance introduced a new seismic classification of the national territory, requiring all Italian municipalities to adopt specific prevention regulations. Prior to its issuance, only certain areas of the country were officially considered at risk; with the new classification, the entire national territory was divided into four seismic zones based on hazard levels. OPCM 3274/2003 also introduced the requirement for seismic assessment of strategic and critical buildings, such as schools, hospitals, and key infrastructure, and established updated criteria for seismic design, based on the new *Technical Standards for Construction (Norme Tecniche per le Costruzioni, or NTC)*. This ordinance represented a fundamental step in the modernization of Italy's seismic regulations, anticipating the 2008 NTC and promoting a more rigorous approach to structural safety.

includes not only buildings, but also infrastructure, the resident population, and all economic and social activities. In historic centers, exposure is particularly critical due to the concentration of heritage buildings, dense population, and the presence of key public functions.

From a building perspective, historic centers are characterized by tightly packed and continuous built fabric. While this configuration allowed for efficient urban organization over centuries, it now increases seismic exposure, as a single event can impact numerous interconnected buildings, leading to progressive collapses and extensive damage. Furthermore, the concentration of urban functions – such as schools, churches, administrative buildings, and cultural institutions – within historic cores magnifies the social and economic consequences of seismic events.

Another component of exposure in historic centers is the presence of cultural heritage assets. Monumental buildings – such as churches, noble residences, and medieval towers – represent irreplaceable legacies. Their loss is not only material but also cultural and symbolic, undermining the historical identity of entire communities. This raises the complexity of seismic risk management, as it involves not just preserving functionality but safeguarding a non-reproducible cultural heritage.

Residential exposure is also a concern. Many historic buildings lack seismic upgrades, due both to conservation restrictions and to financial constraints. Residents are often elderly or economically disadvantaged, further limiting the feasibility of structural retrofitting. Moreover, the urban morphology – with narrow, winding streets – can hinder emergency evacuation, increasing risks to human life.

Infrastructure within historic centers is equally critical. Limited road access and obsolete networks – water, sewage, electricity – are vulnerable to failure during seismic events. Collapse debris can block streets, impeding rescue operations. Historic infrastructure, often not designed for seismic loads, is prone to damage, leading to prolonged service interruptions.

Additionally, the strategic and administrative roles of historic centers must be considered. Government offices, schools, and hospitals are often located in these areas, and their loss can severely compromise emergency management and recovery operations.

Seismic vulnerability, finally, refers to the likelihood that a building or set of structures will suffer damage during an earthquake. In historic centers,

vulnerability is influenced by construction materials, structural configuration, past interventions, and the current state of repair. Load-bearing masonry – typically in stone or brick – is inherently weak against lateral forces. Its performance varies widely depending on workmanship: while some buildings have well-laid stones and strong mortars, others show heterogeneous masonry (e.g. “*a sacco*”) with weak binders and incoherent infill, severely reducing seismic resistance.

A major vulnerability factor is the lack of structural connections between walls, floors, and roofs. Many historic buildings behave as isolated elements during seismic shaking, making them prone to out-of-plane wall failure. High, slender façades with large openings at ground level are especially at risk. Similarly, vaulted and heavy roof systems pose a threat if not adequately restrained, often leading to progressive collapse.

Vulnerability is worsened by past alterations. Elevations, renovations, and material substitutions – especially unengineered replacements of timber floors with reinforced concrete slabs – can introduce additional loads and disrupt the building’s structural balance. New openings at ground level, if unreinforced, weaken load-bearing capacity.

Urban density further amplifies risk through pounding effects – adjacent buildings oscillating asynchronously and colliding with each other – common in tightly aggregated historic fabrics. Narrow streets concentrate seismic energy, potentially leading to localized collapse.

Degradation also plays a central role: moisture infiltration, mortar decay, and deteriorated materials compromise structural integrity. The introduction of unregulated service systems – pipes, conduits – can weaken masonry. Moreover, regulatory constraints often hinder structural interventions, as conservation priorities limit invasive techniques (e.g., RC frames or replacements), making it challenging to reconcile safety with preservation.

The consequences of earthquakes in historic centers are not merely structural but profoundly cultural and socio-economic. Damage to built heritage undermines centuries of identity. Reconstruction cannot follow standard urban logic, as replacing collapsed buildings with modern one’s risks erasing historical authenticity.

From an economic standpoint, earthquakes disrupt not only housing but also commercial and tourist activity often the economic backbone of historic

centers. Business closures and forced relocations delay recovery and encourage depopulation.

Post-earthquake reconstruction is further hampered by bureaucratic complexity, conservation requirements, and funding difficulties. The lack of clear, shared recovery plans often results in abandonment, threatening the residential and communal function of historic centers.

Case studies demonstrate this fragility:

- The 2009 L'Aquila earthquake (Mw 6.3)¹⁰⁸ caused widespread damage in the historic core, including partial collapse of the Basilica of San Bernardino and the dome of the Church of the Anime Sante¹⁰⁹.
- The 2012 Emilia earthquake (Mw 5.8)¹¹⁰ damaged cities like Ferrara and Mirandola, including the near-total collapse of the Torre dei Modenesi¹¹¹.
- The 2016 Central Italy earthquake (Mw 6.5)¹¹² destroyed Amatrice's historic center and severely damaged Norcia and Accumoli, exposing the consequences of neglected prevention and insufficient structural reinforcement¹¹³.

¹⁰⁸ See [webliography, entry no. 2](#).

¹⁰⁹ The earthquake caused 309 deaths, over 1,600 injuries, and left around 80,000 people displaced. The damage was extensive, affecting historic buildings, homes, and infrastructure. The event led to a strengthening of seismic prevention policies in Italy and to a revision of the *Technical Standards for Construction* (NTC) aimed at improving building safety.

¹¹⁰ See [webliography, entry no. 3](#).

¹¹¹ The earthquake caused 27 deaths, hundreds of injuries, and approximately 45,000 displaced people. It inflicted severe damage on historic buildings, industrial facilities, and infrastructure, severely impacting the region's productive sector.

¹¹² See [webliography entry no. 4](#).

¹¹³ The 2016 Central Italy earthquake consisted of a series of powerful seismic shocks, the most significant of which occurred on August 24, 2016, at 03:36 AM (local time), with a magnitude of 6.0 Mw and an epicenter near Accumoli (RI), at a depth of 8 km. This quake devastated the towns of Amatrice, Accumoli, and Arquata del Tronto, causing 299 deaths, hundreds of injuries, and thousands of displaced people. On October 26, 2016, two additional shocks struck at 7:10 PM and 9:18 PM, with magnitudes of 5.4 Mw and 5.9 Mw respectively, and epicenters between Visso, Ussita, and Castelsantangelo sul Nera (MC). The strongest shock occurred on October 30, 2016, at 07:40 AM, with a magnitude of 6.5 Mw and an epicenter near Norcia (PG), at a depth of 10 km. It was the most powerful earthquake in Italy since the 1980 Irpinia event. Fortunately, due to prior evacuations in already affected areas, it caused no direct fatalities.

The destruction of such centers entails irreversible losses of collective memory, undermining community cohesion and long-term economic resilience. Rebuilding must address not only structural safety but also compatibility with historical and urban fabric, requiring time, expertise, and funding, often in short supply.

In conclusion, the vulnerability of Italy's historic centers to seismic events calls for preventive, interdisciplinary strategies. Combining scientific research, advanced technologies, and tailored planning policies is essential to mitigate risk. Only through careful seismic assessment and sustained mitigation programs can the identity and cultural value of historic centers be preserved, ensuring that future earthquakes do not erase centuries of heritage in a matter of seconds.

Geography of vulnerability: GIS mapping of minor historic centers

The analysis of the geographical distribution of minor historic centers is essential for understanding their seismic vulnerability and for developing effective risk mitigation strategies. Italy possesses an extensive historical-architectural heritage, comprising a multitude of villages and small towns which – due to their urban morphology, geographic location, and traditional construction techniques – are particularly exposed to seismic hazards. However, the lack of a structured and georeferenced inventory makes effective management and adequate protection of these settlements difficult.

In this context, HT_GIS (Historical Town_GIS) represents an innovative tool based on Geographic Information Systems (GIS), designed to locate, analyze, and compare minor historic centers across Italy. Its purpose is to correlate their spatial distribution with areas of high seismic hazard. The implementation of HT_GIS allows for the creation of a detailed map, serving both academic research and operational planning for territorial management and risk prevention.

The development of the spatial database begins with data acquisition and processing. The reference dataset is derived from the most recent ISTAT Census¹¹⁴, which provides detailed demographic and territorial information at the municipal level. The extracted data includes the resident population in historic centers, with the selection criterion defining “minor historic centers” as those with fewer than 5,000 inhabitants within the historic core. This threshold enables the identification of small-scale urban contexts with homogeneous characteristics in terms of urban planning, architecture, and structural vulnerability.

Among Italy’s 7,904 municipalities¹¹⁵, 5,836 have fewer than 5,000 residents of which 3,651 have fewer than 2,000, 1,971 fewer than 1,000, and 845 fewer than 500. These figures highlight that most Italian municipalities are small towns, even though they account for less than 20% of the total population, while covering approximately 54% of the national territory.

¹¹⁴ See [webliography, entry no. 5](#).

¹¹⁵ ISTAT data updated as of January 1, 2024.

The design and implementation of HT_GIS follows the ISO 19115¹¹⁶ standards for GIS projects, adopting international cartographic protocols to ensure consistency, interoperability, and georeferencing accuracy. The reference coordinate system WGS84 EPSG:4326 allows for precise localization compatible with major cadastral and territorial databases.

The analytical process is structured in three main phases:

1. Georeferencing of municipalities to accurately identify the geographical position of each minor historic center, using official coordinates and national cartographic bases.
2. GIS mapping, with classification and thematization based on parameters such as population, territorial extent, urban morphology, and the presence of landscape and architectural constraints.
3. Overlay analysis with the national seismic hazard map produced by the National Institute of Geophysics and Volcanology (INGV), enabling the assessment of seismic risk levels for each historic center, using the four-zone classification (Zone 1 = highest hazard; Zone 4 = lowest hazard).

The results from HT_GIS reveal a concerning scenario: a significant proportion of minor historic centers are located in high seismic hazard areas, particularly along the Apennine ridge and in southern regions. The regions with the highest density of historic centers in Zone 1 include Abruzzo, Marche, Umbria, and Calabria that are areas characterized by hilltop towns with dense building fabrics and load-bearing masonry structures lacking adequate seismic reinforcement. In Zone 2, covering large parts of Tuscany, Lazio, and eastern Sicily, many minor centers are marked by traditional construction techniques, often affected by deterioration and lacking proper retrofitting strategies.

The spatial overlap between historic centers and seismic zones also reveals that many vulnerable municipalities have already experienced destructive earthquakes, without having undergone sufficient structural interventions to mitigate future damage.

¹¹⁶ ISO 19115 is an international standard defined by the *International Organization for Standardization* (ISO) for the metadata documentation of geographic data (GIS – Geographic Information System). First adopted in 2003 and subsequently updated, ISO 19115 establishes a common framework for describing geospatial metadata, enabling standardized documentation of geographic information and facilitating the sharing, interoperability, and reuse of data across different systems and organizations.

The application of GIS technologies demonstrates that accurate territorial mapping is an essential tool for seismic risk management in minor historic centers. HT_GIS goes beyond descriptive analysis, offering an operational foundation for planning and heritage conservation. By providing detailed, georeferenced information, it supports decision-making by policymakers, urban planners, and restoration professionals.

Furthermore, the ability to integrate seismic hazard data with building vulnerability indicators opens new perspectives for prioritizing interventions. This facilitates more efficient resource allocation and improves the effectiveness of prevention policies aimed at safeguarding Italy's widespread but fragile historical heritage.



PARTE 2

PARTE 2

DIGITALIZZARE I CENTRI STORICI: DAL RILIEVO ALLA MODELLAZIONE AVANZATA



Lascia parlare il tuo cuore, interroga i volti, non ascoltare le lingue.

Umberto Eco

Dall'analogico al digitale: l'evoluzione del rilievo nei centri storici

La comprensione della vulnerabilità sismica dei centri storici minori in Italia non può prescindere da un'analisi accurata del loro patrimonio edilizio. La loro distribuzione sul territorio nazionale, spesso in aree morfologicamente complesse e ad alto rischio sismico, è stata studiata attraverso strumenti GIS, che hanno permesso di mappare e classificare il rischio su scala territoriale. Tuttavia, la localizzazione geografica e la catalogazione del costruito sono solo il primo passo: per affrontare in modo efficace la questione della sicurezza sismica nei centri storici, è necessario un livello di conoscenza ancora più approfondito, capace di descrivere in dettaglio la morfologia degli edifici, la loro struttura, i materiali impiegati e le vulnerabilità specifiche di ciascuna unità architettonica. È qui che il rilievo architettonico e strutturale gioca un ruolo cruciale, passando da una semplice documentazione del costruito a un processo di analisi avanzata e predittiva¹¹⁷.

Per secoli, il rilievo nei centri storici si è basato su metodologie tradizionali, fondate sull'osservazione diretta, la misurazione manuale e la restituzione grafica su supporto cartaceo. Queste tecniche hanno costruito un immenso archivio di conoscenze, fondamentale per comprendere le trasformazioni del patrimonio edilizio e le sue fragilità. Tuttavia, con l'aumento della necessità di precisione¹¹⁸, velocità e interoperabilità tra i dati, questi approcci mostrano

¹¹⁷ L'analisi predittiva della vulnerabilità utilizza dati storici, modelli matematici e intelligenza artificiale per prevedere il comportamento strutturale degli edifici in caso di sisma. Integrando rilievi 3D, BIM, GIS e monitoraggi in tempo reale, identifica i punti critici prima che si manifestino danni evidenti, permettendo interventi preventivi mirati e riducendo il rischio di crolli.

¹¹⁸ Grado di accuratezza e affidabilità delle misurazioni effettuate su un edificio o un'area. Dipende dalla qualità degli strumenti utilizzati, dalla risoluzione dei dati acquisiti e dalla capacità di ridurre errori nelle rappresentazioni geometriche e metriche del costruito.

limiti evidenti. La laboriosità del processo, la possibilità di errori nelle misurazioni¹¹⁹, la difficoltà di aggiornare e integrare le informazioni con strumenti analitici avanzati rendono necessaria un'evoluzione metodologica che sfrutti appieno il potenziale offerto dalla digitalizzazione.

L'avvento delle tecnologie digitali ha rappresentato una svolta epocale nel rilievo e nell'analisi del patrimonio storico, non solo migliorando l'efficienza della raccolta dati, ma trasformando radicalmente il modo in cui interpretiamo e gestiamo le informazioni. Il passaggio dall'analogico al digitale non è una semplice sostituzione di strumenti: è una rivoluzione metodologica che introduce una dimensione nuova e multidisciplinare, in cui il rilievo non è più solo una fase di misurazione, ma un processo integrato di conoscenza, modellazione e simulazione. Laser scanner 3D, fotogrammetria terrestre e aerea, GIS (Geographic Information System) e BIM (Building Information Modeling) non sono solo strumenti più avanzati, ma veri e propri paradigmi che consentono di visualizzare, analizzare e comprendere il costruito con una fedeltà e una completezza impensabili fino a pochi decenni fa.

La digitalizzazione gioca un ruolo chiave nell'analisi della vulnerabilità sismica, offrendo vantaggi determinanti. In primo luogo, la precisione millimetrica delle tecnologie digitali elimina le incertezze tipiche del rilievo tradizionale, restituendo modelli dettagliati delle caratteristiche strutturali di un edificio o di un intero tessuto urbano. In secondo luogo, i modelli tridimensionali generati attraverso queste tecnologie permettono di condurre simulazioni numeriche della risposta sismica, individuando in maniera predittiva punti critici e vulnerabilità, facilitando così la pianificazione di interventi mirati di consolidamento e protezione.

Un altro aspetto cruciale è l'integrazione dei dati. La modellazione informativa basata su BIM non si limita a una rappresentazione geometrica dettagliata, ma incorpora informazioni sui materiali, sulle condizioni strutturali e sugli interventi pregressi e futuri, trasformando un semplice modello in un vero e proprio database dinamico¹²⁰. Il GIS, invece, amplia la scala dell'analisi, consentendo di valutare la vulnerabilità non solo di singoli edifici, ma dell'intero contesto urbano, individuando aree a rischio e supportando

¹¹⁹ Si classificano in errori sistematici (costanti e prevedibili, es. calibrazione errata dello strumento), errori casuali (variazioni imprevedibili dovute a fattori esterni) ed errori grossolani (dovuti a distrazioni o malfunzionamenti).

¹²⁰ PELLICCIO A. *ET AL.* (2017), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 78.

strategie di mitigazione a livello territoriale. L'integrazione tra rilievi digitali, modellazione BIM e analisi GIS consente di passare da un'analisi statica a un approccio dinamico e multidimensionale, grazie alla quale ogni edificio viene studiato nel contesto della sua rete urbana e territoriale¹²¹.

Tuttavia, la transizione digitale non è priva di sfide. Se da un lato le nuove tecnologie offrono strumenti straordinari, dall'altro la loro adozione richiede investimenti in formazione, infrastrutture e software specializzati. Nei piccoli centri storici, dove le risorse economiche e professionali sono spesso limitate, l'implementazione di sistemi avanzati di rilievo e modellazione può risultare complessa. Inoltre, la digitalizzazione porta con sé una serie di problematiche operative: la necessità di gestire e aggiornare continuamente i modelli, l'interoperabilità tra diversi sistemi e l'integrazione tra dati provenienti da fonti differenti sono aspetti che devono essere affrontati con una visione strategica e interdisciplinare¹²².

Il futuro dell'analisi della vulnerabilità sismica nei centri storici, quindi, non risiede semplicemente nella sostituzione del rilievo tradizionale con strumenti digitali, ma nella creazione di un approccio ibrido e integrato. La combinazione tra l'affidabilità delle metodologie classiche e la versatilità delle tecnologie emergenti può garantire una conoscenza più approfondita del patrimonio edilizio storico, migliorando la capacità di prevenzione e mitigazione del rischio sismico. Il GIS continuerà a fornire informazioni territoriali su larga scala, mentre il BIM rappresenterà la chiave per comprendere e gestire il singolo edificio. Allo stesso tempo, strumenti come l'intelligenza artificiale e il *machine learning* apriranno nuove prospettive per l'analisi predittiva della vulnerabilità, trasformando la gestione del rischio sismico da una pratica reattiva a una strategia preventiva.

Solo unendo esperienza, innovazione e un approccio multidisciplinare sarà possibile proteggere i nostri centri storici, preservandone l'identità e rendendoli più sicuri per il futuro. La digitalizzazione non è solo una questione tecnologica, ma una necessità metodologica per affrontare in modo più efficace le sfide della sicurezza sismica e della conservazione del patrimonio culturale.

¹²¹ SACCUCCI M. ET AL. (2018, ottobre), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 84.

¹²² Si stanno attuando politiche di finanziamento e sviluppando piattaforme open-source per rendere le tecnologie digitali più accessibili. Inoltre, collaborazioni tra università, ANCE, ENEA, CNR ed enti di ricerca favoriscono la formazione di personale specializzato e l'adozione di soluzioni innovative per il rilievo e la gestione del rischio sismico nei centri storici.

Il futuro della protezione dei centri storici non si costruisce solo con mattoni e restauri, ma anche con dati, modelli e simulazioni intelligenti, capaci di anticipare i rischi e guidare le decisioni con una precisione mai raggiunta prima.

Le nuove frontiere del rilievo

L'evoluzione del rilievo nei centri storici non è solo un passaggio da strumenti analogici a digitali, ma un cambiamento profondo nel modo in cui il patrimonio edilizio viene osservato, misurato e interpretato. Come discusso, il rilievo è un passaggio cruciale per la valutazione della vulnerabilità sismica: senza una conoscenza precisa della morfologia degli edifici, della loro struttura e dei materiali che li compongono, qualsiasi analisi del rischio risulta incompleta e approssimativa. Se nel passato la documentazione del costruito si affidava a tecniche tradizionali, oggi le nuove tecnologie offrono strumenti più sofisticati che migliorano sensibilmente la precisione e l'efficacia del processo. Tuttavia, per cogliere appieno il valore della transizione digitale, è fondamentale analizzare le metodologie tradizionali e i loro limiti, così da comprendere come le nuove tecnologie abbiano saputo integrarli, superarli e trasformare il processo di rilievo e analisi del costruito.

Tecniche tradizionali: l'eredità del passato

Il rilievo architettonico è sempre stato un'attività essenziale per la comprensione, la conservazione e la gestione del patrimonio costruito. Nei secoli, le tecniche di rilievo si sono evolute in risposta alle esigenze dei progettisti, degli storici e dei restauratori, pur mantenendo una forte componente manuale e interpretativa. L'approccio tradizionale al rilievo si basa su strumenti di misurazione diretta, metodi topografici e rappresentazioni grafiche manuali, che hanno costituito per lungo tempo l'unica modalità di documentazione dell'edificato storico.

Uno dei metodi più antichi e diffusi è il rilievo diretto, che consiste nella misurazione manuale degli elementi architettonici tramite strumenti semplici ma efficaci, come metro a nastro, stadia, livella a bolla, filo a piombo e calibro. Questi strumenti permettono di rilevare dimensioni, angoli e allineamenti degli edifici, fornendo informazioni di base sulla loro configurazione geometrica. Le misure raccolte vengono successivamente riportate su schizzi preliminari, che servono come base per la realizzazione di piante, sezioni e prospetti. Il rilievo diretto è stato per secoli il metodo principale di

documentazione architettonica, utilizzato da architetti e studiosi per descrivere con precisione edifici e complessi monumentali. Tuttavia, questa metodologia presenta una serie di criticità: l'elevato margine di errore dovuto alla soggettività dell'operatore, la necessità di un lungo tempo di acquisizione dei dati e la difficoltà di misurare con precisione elementi complessi come superfici curve, decorazioni e dettagli scolpiti¹²³.

Accanto al rilievo diretto, il rilievo topografico ha rappresentato un importante strumento di misurazione per la rappresentazione su larga scala degli edifici e del tessuto urbano. Utilizzando strumenti più avanzati, come il teodolite, la livella ottica e la stazione totale, il rilievo topografico permette di ottenere dati più precisi attraverso il calcolo di angoli, distanze e quote. Questo metodo ha trovato particolare applicazione nello studio di complessi architettonici estesi, come centri storici e aggregati urbani, consentendo la realizzazione di mappe e modelli planimetrici dettagliati. Tuttavia, anche il rilievo topografico presenta limiti significativi: sebbene garantisce maggiore precisione rispetto al rilievo diretto, la raccolta dei dati rimane dispendiosa in termini di tempo e richiede competenze tecniche avanzate per l'uso degli strumenti di misurazione. Inoltre, il rilievo topografico classico è essenzialmente bidimensionale¹²⁴, il che lo rende meno efficace per lo studio delle volumetrie complesse e delle stratificazioni architettoniche tipiche dei centri storici.

Un altro aspetto fondamentale del rilievo tradizionale è la restituzione grafica manuale, che comprende il disegno a mano libera, la rappresentazione in scala su supporti cartacei e la realizzazione di schizzi interpretativi. Il disegno manuale è sempre stato uno strumento di analisi essenziale per il rilevatore, poiché consente di cogliere dettagli che non emergono attraverso la semplice misurazione numerica. Architetti e storici dell'architettura hanno utilizzato per secoli questa tecnica per documentare edifici, dettagli costruttivi e stratigrafie murarie, contribuendo alla creazione di un vasto repertorio iconografico del patrimonio edilizio¹²⁵. Tuttavia, anche il disegno manuale presenta

¹²³ DOCCI M. *ET AL.* (2009), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 38.

¹²⁴ L'uso combinato di stazioni totali robotizzate e sistemi di posizionamento satellitare, come il GNSS (*Global Navigation Satellite System*) o il laser scanner 3D, consente oggi di superare i limiti bidimensionali, restituendo modelli tridimensionali georeferenziati utili per l'analisi strutturale e la conservazione dei centri storici.

¹²⁵ Nonostante l'avvento delle tecnologie digitali, il disegno manuale continua a essere utilizzato in ambito accademico e professionale, soprattutto nelle prime fasi del rilievo, per cogliere rapidamente proporzioni, dettagli materici e stratificazioni architettoniche. Un esempio

notevoli limitazioni: la sua qualità dipende fortemente dall'abilità dell'operatore, ed è difficile da aggiornare o integrare con altri dati senza dover rifare completamente la documentazione. Inoltre, la gestione e l'archiviazione di rilievi cartacei su larga scala è problematica, poiché richiede spazi adeguati alla conservazione e risulta poco pratica nell'ottica di una condivisione rapida delle informazioni.

Un altro metodo di grande rilevanza per il rilievo tradizionale è il rilievo stratigrafico delle murature¹²⁶, utilizzato per studiare la composizione e l'evoluzione dei paramenti murari. Attraverso l'analisi diretta delle tecniche costruttive, dei materiali e delle tracce di trasformazioni, questo metodo consente di ricostruire la storia degli edifici e di individuare le fasi di intervento nel tempo. Il rilievo stratigrafico è stato un pilastro della ricerca storico-architettonica, permettendo di identificare le tecniche costruttive utilizzate nei diversi periodi storici e di comprendere la vulnerabilità degli edifici rispetto agli eventi sismici. Tuttavia, anche in questo caso, la soggettività del rilevatore e la difficoltà di standardizzare le informazioni rendono questa metodologia meno efficace rispetto ai moderni strumenti digitali.

L'insieme di queste tecniche, pur avendo rappresentato per secoli il fondamento della documentazione architettonica, oggi risulta insufficiente per rispondere alle nuove esigenze di precisione, velocità e interoperabilità richieste dall'analisi della vulnerabilità sismica. La complessità strutturale dei centri storici minori e la necessità di valutazioni dettagliate sugli elementi costruttivi richiedono un salto tecnologico verso strumenti più avanzati, in grado di fornire modelli tridimensionali accurati e di integrare dati di varia natura in un unico sistema informativo. Per questi motivi, la ricerca nel settore del rilievo architettonico e urbano ha visto un'evoluzione significativa, portando all'adozione di strumenti digitali in grado di superare i limiti delle tecniche tradizionali. Il passaggio dal rilievo manuale alla digitalizzazione non

celebre è rappresentato dai taccuini di Le Corbusier, nei quali l'architetto documentava edifici storici con schizzi dettagliati, affiancando disegni tecnici a impressioni artistiche e annotazioni personali, dimostrando come il rilievo a mano libera non fosse solo uno strumento di misura, ma anche di interpretazione critica dell'architettura.

¹²⁶ Il rilievo stratigrafico ha radici nella metodologia archeologica e si è evoluto nel tempo come strumento fondamentale per l'analisi dell'edilizia storica. Un esempio significativo è rappresentato dagli studi condotti su edifici medievali in Italia, dove l'osservazione delle murature ha permesso di identificare fasi costruttive successive e di riconoscere materiali di reimpiego.

rappresenta solo un progresso tecnologico, ma una rivoluzione nel modo in cui il patrimonio edilizio viene documentato, analizzato e conservato. Se da un lato le tecniche tradizionali conservano un valore inestimabile per la loro capacità di cogliere aspetti storico-interpretativi del costruito, dall'altro è evidente che la loro integrazione con strumenti avanzati, come il laser scanner 3D, la fotogrammetria o i sistemi informativi geografici, rappresenta la chiave per un'analisi più efficace della vulnerabilità sismica. La combinazione tra esperienza manuale e precisione digitale rappresenta oggi la strada maestra per la comprensione e la salvaguardia del patrimonio costruito, aprendo nuove prospettive per la prevenzione del rischio sismico nei centri storici minori.

Tecnologie avanzate: il futuro del rilievo

Come detto, l'introduzione delle tecnologie digitali nel rilievo dei centri storici ha segnato una svolta radicale nel modo in cui il patrimonio edilizio viene documentato e analizzato. Se i metodi tradizionali, pur validi, risultano spesso limitati in termini di precisione e rapidità, il rilievo digitale permette oggi di ottenere modelli tridimensionali estremamente dettagliati e integrabili con sistemi di gestione delle informazioni, ottimizzando così le fasi di analisi e conservazione. Questa evoluzione ha avuto un impatto profondo non solo sulla qualità dei dati raccolti, ma anche sulla capacità di prevedere il comportamento strutturale degli edifici storici, supportando strategie di prevenzione del rischio sismico più efficaci.

Tra le tecnologie più diffuse negli ultimi anni, la fotogrammetria terrestre e aerea ha trasformato il modo in cui si acquisiscono e analizzano i dati geometrici degli edifici storici, permettendo di ottenere modelli tridimensionali estremamente dettagliati a partire da immagini fotografiche scattate da diverse angolazioni. Basata sul principio della triangolazione stereoscopica, questa tecnologia sfrutta algoritmi avanzati di *Structure from Motion* (SfM)¹²⁷ per ricostruire automaticamente la posizione del punto di presa

¹²⁷ Si articola in diverse fasi: (1) *feature detection e matching*, dove algoritmi come SIFT o SURF identificano punti caratteristici comuni tra più immagini; (2) stima della posizione della fotocamera, calcolata tramite *bundle adjustment* per ottimizzare la geometria della scena; (3) triangolazione, che genera una nuvola di punti sparsa basata sulle corrispondenze

fotografica e la geometria degli oggetti rilevati. Il processo inizia con l'identificazione di punti caratteristici comuni tra più immagini e l'allineamento automatico delle fotografie in uno spazio tridimensionale, generando una nuvola di punti sparsa (*Sparse Point Cloud*). Successivamente, grazie all'impiego di algoritmi di *Multi-View Stereo* (MVS), la nuvola di punti viene densificata, creando una rappresentazione più dettagliata e fedele alla realtà. La fotogrammetria terrestre viene eseguita con fotocamere ad alta risoluzione montate su treppiedi o stabilizzatori per garantire la massima precisione nella documentazione delle superfici murarie, degli elementi decorativi e delle caratteristiche materiche delle strutture. Uno dei principali vantaggi di questa tecnica è la possibilità di generare ortofoto rettificate, immagini prive di distorsioni prospettiche che permettono di analizzare con estrema precisione dettagli costruttivi e fenomeni di degrado, come fessurazioni e disgregazioni materiche. L'acquisizione di dati fotogrammetrici attraverso camere multispettrali¹²⁸ consente inoltre di individuare fenomeni non visibili a occhio nudo, come variazioni di umidità o distacchi di intonaco, fornendo informazioni cruciali per la conservazione del patrimonio storico. L'impiego di droni¹²⁹ ha ampliato ulteriormente le potenzialità della fotogrammetria, rendendo possibile il rilievo di interi centri storici con rapidità ed elevata risoluzione. I droni, equipaggiati con sensori di ultima generazione, permettono di acquisire immagini da prospettive difficilmente raggiungibili con i metodi tradizionali, consentendo il rilievo di coperture, elementi architettonici in quota e facciate di edifici all'interno di contesti urbani densamente costruiti. Le immagini acquisite vengono processate per generare modelli tridimensionali georeferenziati, utilizzati per analisi comparative nel tempo e per la valutazione delle condizioni strutturali di edifici storici. Nonostante i numerosi vantaggi, la fotogrammetria presenta alcune limitazioni che influenzano la qualità del modello tridimensionale ottenuto. Le condizioni di illuminazione e la qualità ottica delle immagini giocano un ruolo determinante nella precisione della ricostruzione, poiché la presenza di ombre, riflessi o superfici trasparenti può compromettere il processo di *matching* tra le immagini. Inoltre,

individuate; (4) densificazione (MVS – *Multi-View Stereo*), che raffina il modello con una nuvola di punti ad alta risoluzione; (5) generazione della *mesh* e *texture mapping*, che trasformano i dati in superfici 3D dettagliate.

¹²⁸ Le camere multispettrali sono sensori avanzati che acquisiscono immagini in diverse bande dello spettro elettromagnetico (visibile, infrarosso, ultravioletto).

¹²⁹ UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*.

per ottenere risultati accurati è spesso necessario disporre di punti di controllo a terra (GCP – *Ground Control Points*)¹³⁰, che permettono di migliorare la precisione metrica e la georeferenziazione del modello. Un altro aspetto critico è il costo computazionale della fotogrammetria: l'elaborazione delle immagini richiede software avanzati e hardware con elevate capacità di calcolo, poiché la generazione di nuvole di punti dense e modelli 3D dettagliati comporta l'elaborazione di grandi volumi di dati¹³¹. Nonostante queste sfide, la fotogrammetria ha dimostrato di essere uno strumento indispensabile per la documentazione e l'analisi del patrimonio edilizio storico, garantendo un livello di dettaglio e accuratezza che supera di gran lunga le tecniche di rilievo tradizionali. La sua capacità di restituire modelli tridimensionali dettagliati, associata alla rapidità di acquisizione e alla versatilità nell'adattarsi a diversi contesti, ne fa una delle tecnologie più efficaci per la conservazione, il restauro e lo studio delle vulnerabilità strutturali nei centri storici.

Parallelamente, il laser scanning 3D rappresenta una delle tecnologie più avanzate e precise per la documentazione del costruito, grazie alla sua capacità di acquisire rapidamente dati geometrici dettagliati con un'accuratezza millimetrica. Basato sul principio della misurazione attiva della distanza tramite impulsi laser, questo sistema utilizza tecnologie *Time-of-Flight* (ToF)¹³², *Phase Shift* o triangolazione laser per determinare con estrema precisione le coordinate spaziali degli oggetti rilevati. L'emissione di fasci laser ad alta frequenza consente di acquisire milioni di punti al secondo, generando nuvole

¹³⁰ Si utilizzano strumenti topografici ad alta precisione, come stazioni totali o GNSS RTK (*Real-Time Kinematic*), per determinare le coordinate precise dei GCP in un sistema di riferimento geodetico.

¹³¹ L'onere computazionale della fotogrammetria indica la quantità di risorse di calcolo, memoria e tempo di elaborazione necessarie per processare grandi set di immagini e generare modelli tridimensionali dettagliati. L'elevata complessità degli algoritmi coinvolti richiede hardware ad alte prestazioni, con GPU potenti, CPU multicore e RAM ad alta capacità. I principali fattori che influenzano il carico computazionale includono numero e risoluzione delle immagini, grado di sovrapposizione tra scatti, densità della nuvola di punti e precisione del modello finale. Per ridurre i tempi di elaborazione e migliorare l'efficienza, vengono adottate tecniche di parallelizzazione dei processi, utilizzo di *cloud computing* e ottimizzazione dei parametri di ricostruzione.

¹³² Il *Time-of-Flight* (ToF) è una tecnologia di misurazione della distanza basata sul tempo di percorrenza di un impulso laser o di un'onda elettromagnetica tra il sensore e un oggetto. Il principio di funzionamento si basa sul calcolo del tempo impiegato dal segnale per raggiungere la superficie target e tornare al sensore dopo essere stato riflesso.

di punti ad altissima densità, che restituiscono una rappresentazione tridimensionale fedele della superficie scansionata. Rispetto alla fotogrammetria, il laser scanning 3D presenta il vantaggio di essere indipendente dalle condizioni di illuminazione, garantendo la stessa precisione sia in ambienti interni privi di luce naturale, sia su superfici omogenee o prive di *texture*, che risultano più difficili da rilevare con metodi basati sull'elaborazione di immagini¹³³. Questo lo rende particolarmente efficace nel rilievo di strutture complesse, edifici storici con elementi architettonici decorati e siti in avanzato stato di degrado, in cui la necessità di documentare dettagli minimi risulta essenziale per la conservazione e l'analisi strutturale. Dal punto di vista operativo, i dati acquisiti dal laser scanner vengono organizzati anch'essi in una nuvola di punti tridimensionale. Grazie alla densità e alla precisione delle informazioni raccolte, questa tecnologia è ampiamente utilizzata in rilievi architettonici, ingegneristici e archeologici, fornendo una base solida per analisi strutturali, studi di degrado materico e simulazioni di vulnerabilità sismica. Nonostante le sue straordinarie potenzialità, il laser scanning 3D presenta alcune criticità che ne limitano l'adozione su larga scala. Il costo elevato delle apparecchiature e la necessità di software altamente specializzati per la gestione e l'elaborazione delle enormi quantità di dati rappresentano i principali ostacoli, rendendo questa tecnologia più accessibile a enti di ricerca, università e grandi studi di progettazione piuttosto che a singoli professionisti¹³⁴. Inoltre, la gestione delle nuvole di punti richiede competenze avanzate nella modellazione e nella manipolazione dei dati digitali, affinché le informazioni acquisite possano essere tradotte in modelli utilizzabili per analisi e progettazioni.

Negli ultimi anni, l'impiego delle camere a 360° si è affermato come uno strumento innovativo nella documentazione architettonica, grazie alla loro capacità di acquisire immagini panoramiche ad alta risoluzione e di restituire una visualizzazione immersiva degli ambienti rilevati. Questi dispositivi sfruttano sistemi di lenti grandangolari¹³⁵ contrapposte, che catturano l'intero

¹³³ Superando dunque alcuni limiti della fotogrammetria digitale.

¹³⁴ Il costo dei laser *scanner* 3D varia notevolmente in base a caratteristiche come precisione, portata e velocità di acquisizione. Per dispositivi professionali i prezzi possono oscillare tra € 30.000 e € 100.000.

¹³⁵ Una lente grandangolare è un obiettivo fotografico, con una lunghezza focale ridotta (generalmente inferiore ai 35 mm nel formato *full-frame*), progettato per catturare un ampio

campo visivo circostante in un'unica acquisizione, eliminando la necessità di riprese multiple e riducendo i tempi di elaborazione. L'utilizzo delle immagini a 360° si rivela particolarmente efficace per il monitoraggio dello stato di conservazione degli edifici storici, consentendo di confrontare nel tempo le condizioni materiche e strutturali con un approccio intuitivo e immediato. L'integrazione con modelli tridimensionali ottenuti da fotogrammetria e laser scanning amplifica ulteriormente il valore dell'analisi, fornendo una documentazione visuale ad alta fedeltà che completa i dati metrici e spaziali con informazioni immersive. Questa sinergia non solo agevola la lettura dei fenomeni di degrado, ma rappresenta anche un'opportunità per migliorare la comunicazione dei risultati a specialisti e non addetti ai lavori. Oltre alla loro valenza tecnica, le camere a 360° trovano applicazione anche nella divulgazione scientifica e nella didattica, rendendo possibile la creazione di tour virtuali e ambienti interattivi, in cui è possibile esplorare edifici e siti di interesse storico senza la necessità di una presenza fisica¹³⁶.

Una delle innovazioni più recenti e rivoluzionarie nel campo del rilievo digitale è il *Neural Radiance Fields* (NeRF)¹³⁷, un metodo avanzato di rendering neurale capace di generare modelli tridimensionali altamente fotorealistici a partire da semplici immagini bidimensionali basate sull'utilizzo di AI. A differenza di tecniche consolidate come la fotogrammetria e il laser scanning, che si concentrano sulla ricostruzione geometrica attraverso nuvole di punti e mesh, il NeRF sfrutta una rete neurale¹³⁸ per apprendere e sintetizzare non solo la forma degli oggetti nello spazio, ma anche le loro proprietà luminose, *texture* e variazioni cromatiche, restituendo così rappresentazioni estremamente realistiche e immersive. Il principio alla base di NeRF è profondamente diverso da quello delle metodologie tradizionali: invece di generare direttamente punti tridimensionali nello spazio, la rete neurale apprende una funzione continua che descrive la distribuzione della luce e dei colori in ogni direzione. Utilizzando un modello volumetrico basato su *ray tracing*

campo visivo. Grazie alla sua configurazione ottica, questa lente permette di includere una porzione maggiore della scena rispetto a un obiettivo standard.

¹³⁶ Vedi nota sitografica n. 6.

¹³⁷ MILDENHALL B. ET AL. (2021), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 67.

¹³⁸ Modello matematico composto da neuroni artificiali organizzati in strati. Attraverso processi di apprendimento automatico, la rete elabora dati in ingresso, riconosce pattern e genera previsioni.

differenziabile¹³⁹, il NeRF è in grado di calcolare, per ciascun raggio di luce proveniente dalla fotocamera, la densità e il colore lungo il percorso ottico, ricostruendo un campo radiativo continuo che definisce la scena in tre dimensioni. Questo approccio consente di ottenere modelli 3D di una qualità visiva senza precedenti, con dettagli fotorealistici che superano quelli dei modelli derivati da nuvole di punti o mesh poligonali tradizionali. Uno dei principali punti di forza del NeRF rispetto alle metodologie classiche è la sua capacità di catturare in modo estremamente realistico le interazioni tra luce e materia. Nei rilievi architettonici e nella documentazione del patrimonio storico, questa caratteristica si traduce nella possibilità di rappresentare non solo la geometria degli edifici, ma anche gli effetti di riflessioni, trasparenze e variazioni luminose in modo dinamico, migliorando significativamente la leggibilità e la percezione degli spazi. Questa tecnologia, inoltre, consente di ottenere risultati anche con dataset di immagini relativamente ridotti, riducendo la necessità di un'elevata sovrapposizione di scatti, richiesta invece dalla fotogrammetria tradizionale. Nonostante il suo enorme potenziale, l'applicazione del NeRF su larga scala nel rilievo digitale e nella conservazione architettonica è ancora agli inizi e presenta alcune criticità. Uno dei principali ostacoli è l'elevato onere computazionale, poiché la generazione di un modello 3D con NeRF richiede potenti GPU e grandi capacità di elaborazione, limitando per ora il suo utilizzo in ambito accademico e sperimentale. Inoltre, la mancanza di standardizzazione nella sua applicazione rende ancora complessa l'integrazione con sistemi di gestione delle informazioni architettoniche, che si basano su modelli geometrici espliciti piuttosto che su rappresentazioni radiometriche continue. Nonostante queste sfide, l'interesse della comunità scientifica verso il NeRF è in forte crescita e gli sviluppi recenti stanno portando a ottimizzazioni che ne riducono i tempi di elaborazione e migliorano la qualità della ricostruzione. Nuove implementazioni, come Mip-NeRF, *Instant-NGP* e NeRF++¹⁴⁰, stanno consentendo di accelerare drasticamente i

¹³⁹ Tecnica avanzata di *rendering* che calcola il percorso della luce in una scena 3D, permettendo di ottimizzare il processo tramite derivate matematiche.

¹⁴⁰ Evoluzioni di NeRF progettate per migliorarne l'efficienza e la qualità della ricostruzione 3D. Mip-NeRF ottimizza la gestione dei dettagli riducendo artefatti e migliorando la resa a diverse scale. *Instant-NGP* accelera drasticamente i tempi di elaborazione grazie a un'architettura neurale ottimizzata, rendendo la ricostruzione quasi in tempo reale. NeRF++ estende il modello originale per gestire scene più complesse, migliorando la qualità della rappresentazione sia per oggetti vicini che lontani.

tempi di calcolo, aprendo nuove prospettive per la sua applicazione pratica. Se questa tecnologia continuerà ad evolversi con i ritmi attuali, potrebbe presto affiancare o addirittura superare le metodologie tradizionali nel rilievo e nella conservazione del patrimonio architettonico, offrendo strumenti di documentazione visiva senza precedenti e ridefinendo il modo in cui percepiamo e analizziamo gli ambienti costruiti.

L'integrazione di queste tecnologie rappresenta il futuro del rilievo nei centri storici, aprendo scenari inediti nella documentazione, nell'analisi e nella conservazione del patrimonio edilizio. La fotogrammetria, con la sua rapidità e versatilità, consente acquisizioni dettagliate in tempi ridotti, mentre il laser scanning 3D garantisce una precisione millimetrica indispensabile per le analisi strutturali più complesse. Le camere a 360° offrono una visualizzazione immersiva che arricchisce la percezione dello spazio, mentre il NeRF, con il suo approccio innovativo basato sull'intelligenza artificiale, apre nuove prospettive per la creazione di ambienti virtuali fotorealistici, superando i limiti delle tecniche tradizionali. Questa evoluzione dimostra che il rilievo digitale non è solo una questione di precisione, ma un nuovo paradigma di conoscenza del costruito.

La possibilità di combinare strumenti diversi in un unico workflow integrato consente di ottenere una visione multidimensionale degli edifici storici, migliorando la capacità di prevenzione del rischio sismico, monitoraggio del degrado e pianificazione degli interventi di conservazione. L'adozione di queste tecnologie non rappresenta semplicemente un'innovazione tecnica, ma una rivoluzione metodologica, che ridefinisce il rapporto tra documentazione, analisi e tutela del patrimonio culturale. Il vero potenziale del rilievo digitale risiede nella sua capacità di unificare dati eterogenei in modelli dinamici e interattivi, capaci di evolversi nel tempo e adattarsi alle esigenze di monitoraggio continuo e manutenzione programmata. Questo approccio apre la strada a una gestione più intelligente e predittiva del patrimonio storico, in cui l'acquisizione digitale si fonde con la simulazione avanzata e l'intelligenza artificiale, permettendo di anticipare criticità strutturali e sviluppare strategie di protezione efficaci.

Il futuro del rilievo nei centri storici sarà sempre più orientato verso una convergenza tra digitalizzazione, simulazione predittiva e gestione intelligente delle informazioni, con l'obiettivo di rendere il patrimonio edilizio più resiliente agli eventi sismici, ai cambiamenti ambientali e alle trasformazioni

urbane. La sfida non è solo documentare, ma comprendere, preservare e innovare, affinché la memoria storica dei nostri centri urbani possa essere protetta e valorizzata per le generazioni future.



Rilievo manuale



Topografia



Fotogrammetria



Camere 360°

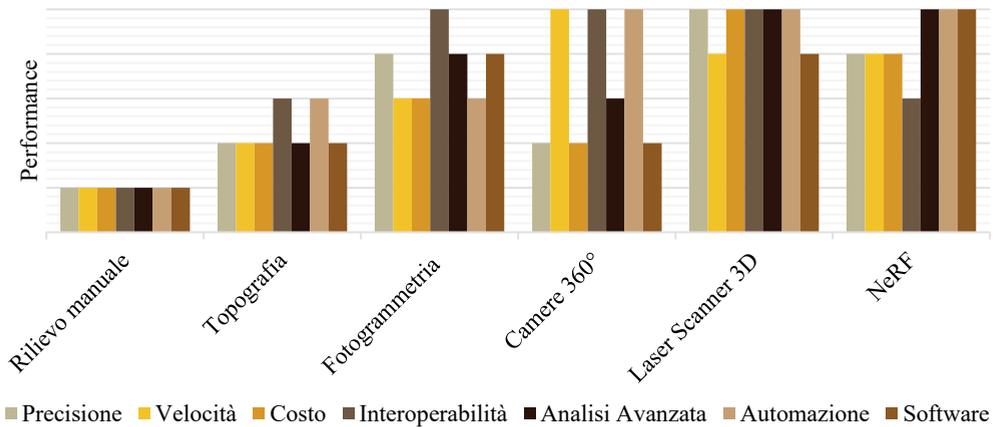


Laser Scanner 3D



NeRF (AI-based)

Precisione	Bassa	Media	Alta	Media	Molto alta	Alta
Velocità	Lenta	Media	Alta	Molto alta	Alta	Alta
Costo	Basso	Medio	Medio-alto	Medio	Alto	Alto
Interoperabilità	Bassa	Media	Alta	Alta	Alta	Media
Analisi avanzata	Limitata	Moderata	Elevata	Moderata	Molto elevata	Molto elevata
Automazione	Manuale	Semi-automatico	Semi-automatico	Automatico	Automatico	Automatico
Software	No	Minima	Avanzato	Minima	Avanzato	Molto avanzato
Output	Disegni su carta	Planimetrie sezioni	Nuvole di punti Mesh	Immagini sferiche	Nuvole di punti	Modelli AI



Oltre la carta: nuovi strumenti per disegnare e comprendere la vulnerabilità

L'evoluzione del rilievo digitale ha rivoluzionato il modo in cui analizziamo e rappresentiamo la vulnerabilità sismica nei centri storici. Tuttavia, il processo non si esaurisce nella sola acquisizione dei dati: la vera innovazione sta nella loro trasformazione in strumenti intelligenti di analisi, previsione e gestione del rischio. Non si tratta più solo di documentare lo stato di fatto, ma di sviluppare modelli capaci di anticipare il comportamento strutturale degli edifici, supportando decisioni informate per la protezione e il restauro del patrimonio storico. L'integrazione tra GIS, BIM, Realtà Virtuale, Realtà Aumentata e Intelligenza Artificiale sta aprendo nuove possibilità, cambiando profondamente il modo in cui i tecnici, gli urbanisti e i restauratori affrontano il problema della vulnerabilità sismica.

Il GIS (Geographic Information System) è uno degli strumenti più avanzati per la rappresentazione e l'analisi del rischio sismico su scala urbana, poiché offre un sistema dinamico per la gestione e l'elaborazione di dati geospaziali. A differenza delle mappe tradizionali, statiche e bidimensionali, il GIS utilizza una struttura basata su *layer*¹⁴¹, che consente di organizzare e analizzare diverse tipologie di dati spaziali e attributivi, combinando informazioni geologiche, topografiche, architettoniche e storiche. Il funzionamento del GIS si basa sulla capacità di gestire dati *raster* e vettoriali. I dati *raster*, derivati ad esempio da immagini satellitari, rappresentano informazioni continue come l'elevazione del terreno o la densità urbana. I dati vettoriali, invece, modellano la geometria di edifici, strade e infrastrutture tramite punti, linee e poligoni, associando a ciascun elemento una serie di attributi descrittivi. Questo approccio consente di interrogare e visualizzare la distribuzione delle vulnerabilità sismiche attraverso mappe tematiche, in cui ogni *layer* rappresenta un'informazione specifica, come la tipologia costruttiva degli edifici, l'età del costruito, le faglie sismiche attive o le zone di amplificazione locale del suolo. L'analisi spaziale condotta all'interno del GIS permette di individuare pattern di vulnerabilità, elaborando scenari di rischio basati su indicatori quantitativi.

¹⁴¹ Strati informativi omogenei.

Attraverso operazioni di *overlay* (sovrapposizione), *buffering* e interpolazione spaziale, il sistema è in grado di incrociare variabili diverse e generare modelli previsionali, supportando la pianificazione degli interventi di mitigazione del rischio. Un aspetto innovativo del GIS è la sua capacità di integrare dati provenienti dai rilievi digitali avanzati, come quelli ottenuti da laser scanner 3D e fotogrammetria, che arricchiscono le analisi con modelli ad alta precisione. Questa sinergia consente di valutare con maggiore accuratezza la geometria degli edifici, lo stato di conservazione e le criticità strutturali, fornendo un supporto essenziale per la pianificazione di interventi di consolidamento e conservazione. L'adozione del GIS nella gestione del rischio sismico rappresenta un passaggio cruciale verso un approccio predittivo e multidisciplinare, in cui la conoscenza del territorio e del costruito si basa su dati scientifici accurati e metodologie analitiche avanzate. Oltre a fornire un quadro dettagliato delle vulnerabilità urbane, il GIS si afferma come strumento di modellazione del costruito, consentendo di rappresentare la morfologia degli edifici e la distribuzione delle criticità strutturali. Grazie alla sua capacità di sovrapporre e analizzare dati geospaziali da fonti diverse, non si limita alla descrizione del costruito, ma permette di disegnare e rappresentare con precisione le vulnerabilità dei centri storici, evidenziando le aree a rischio e supportando la definizione di strategie di mitigazione. Questa trasformazione della cartografia tradizionale in un sistema informativo avanzato rende il GIS uno strumento essenziale non solo per la tutela del patrimonio storico, ma anche per la pianificazione di interventi di protezione sismica basati su analisi spaziali dettagliate e modelli previsionali.

Se il GIS è essenziale per analizzare la distribuzione del rischio sismico su vasta scala, il BIM (Building Information Modeling) rappresenta lo strumento chiave per approfondire la vulnerabilità di ogni singolo edificio con un approccio integrato e multidisciplinare. Non si tratta di una semplice rappresentazione tridimensionale della geometria dell'edificio, ma di un modello informativo avanzato, nel quale ogni elemento architettonico e strutturale è arricchito da attributi materici, costruttivi e prestazionali, consentendo di eseguire simulazioni avanzate e valutazioni predittive. Questa metodologia permette di correlare diversi livelli di informazioni, fornendo una visione chiara e dettagliata dello stato di conservazione e delle criticità strutturali degli edifici storici, trasformando la fase di analisi in uno strumento di supporto decisionale per la conservazione e il miglioramento sismico. All'interno di questo

processo, un ruolo fondamentale è svolto dall'HBIM (Historic Building Information Modeling), un'estensione del BIM sviluppata specificamente per il patrimonio storico. A differenza del BIM tradizionale, che si basa su componenti standardizzati, l'HBIM consente di modellare elementi architettonici complessi e irregolari, caratteristici dell'edilizia storica, attraverso dati derivanti da rilievi laser scanner 3D e fotogrammetrici. Questa tecnologia non solo permette di rappresentare con elevata fedeltà la morfologia dell'edificio, ma è in grado di integrare informazioni sulle stratificazioni murarie, sulle tecniche costruttive e sul degrado materico, rendendo il modello non solo un documento grafico, ma un database informativo dinamico. Grazie all'HBIM è possibile disegnare e rappresentare in maniera accurata le vulnerabilità strutturali, individuando punti critici come fessurazioni, discontinuità, degrado dei materiali e dissesti, fornendo un quadro estremamente dettagliato e aggiornabile nel tempo. Uno degli aspetti più innovativi di questa metodologia è la possibilità di condurre simulazioni numeriche avanzate, attraverso modelli basati su analisi agli elementi finiti¹⁴² e metodi cinematici semplificati, per valutare la risposta strutturale dell'edificio a diverse sollecitazioni sismiche. Le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018)¹⁴³ e le Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale (DPCM 09/02/2011)¹⁴⁴ sottolineano l'importanza di questi strumenti per una valutazione scientificamente fondata della vulnerabilità degli edifici esistenti, offrendo un approccio che non si basa più esclusivamente su rilievi visivi e analisi empiriche, ma su dati quantitativi e modelli previsionali estremamente accurati. Grazie alla possibilità di integrare il BIM con software di

¹⁴² FEM – Finite Element Method.

¹⁴³ Le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018), emanate con il D.M. 17 gennaio 2018, forniscono i criteri normativi per la progettazione, esecuzione e collaudo delle costruzioni in Italia, con particolare attenzione alla sicurezza strutturale e alla resistenza sismica. Per gli edifici esistenti, incluse le costruzioni di interesse storico, le NTC 2018 introducono specifiche disposizioni per la valutazione della vulnerabilità sismica, distinguendo tra interventi di adeguamento, miglioramento e riparazione locale, in conformità con le moderne metodologie di analisi strutturale.

¹⁴⁴ Le Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale (DPCM 09/02/2011) forniscono criteri metodologici per l'analisi della vulnerabilità sismica degli edifici storici, distinguendoli dalle costruzioni ordinarie. Definiscono procedure specifiche per la diagnosi strutturale, l'identificazione dei meccanismi di collasso, e la progettazione di interventi compatibili e reversibili, nel rispetto dei principi di conservazione e tutela del patrimonio culturale, in linea con le NTC 2018.

analisi strutturale è possibile testare virtualmente diverse strategie di consolidamento prima di applicarle in cantiere, ottimizzando così le risorse e riducendo l'incertezza degli interventi. L'efficacia dell'HBIM non si limita alla fase di analisi e progettazione, ma si estende alla gestione e manutenzione del patrimonio edilizio nel lungo termine. Creare un modello BIM di un edificio storico significa dotarsi di un gemello digitale (*digital twin*) in cui ogni informazione è tracciabile e aggiornabile, permettendo di monitorare nel tempo le condizioni dell'edificio, registrare gli interventi effettuati e analizzare l'evoluzione del degrado strutturale. Questo approccio segna un cambiamento radicale nel modo in cui si affronta la sicurezza degli edifici storici, passando da una logica reattiva, basata su interventi di emergenza post-sisma, a una strategia preventiva, in cui il monitoraggio costante consente di intervenire prima che i danni diventino irreversibili. La digitalizzazione del costruito è ormai una priorità a livello normativo, come dimostrano le direttive europee per la gestione del patrimonio edilizio con metodologia BIM e la normativa UNI 11337¹⁴⁵, che disciplina l'uso del BIM in Italia. L'introduzione del BIM e dell'HBIM, nel rilievo e nella gestione del rischio sismico, rappresenta quindi un punto di svolta metodologico, poiché trasforma la modellazione tridimensionale da un semplice strumento di rappresentazione a una vera e propria piattaforma di analisi, simulazione e gestione intelligente delle informazioni. La possibilità di integrare dati di rilievo, analisi strutturali e informazioni storiche in un unico sistema consente di ottimizzare le strategie di conservazione e miglioramento sismico, contribuendo alla resilienza dei centri storici. Questo approccio non solo migliora la capacità di risposta agli eventi sismici, ma valorizza il patrimonio costruito attraverso una conoscenza più profonda e un controllo più efficace, garantendo che la memoria storica dei nostri edifici possa essere preservata e protetta.

¹⁴⁵ La UNI 11337 è la norma italiana che disciplina la gestione digitale dei processi informativi nel settore delle costruzioni, con particolare attenzione all'adozione del Building Information Modeling (BIM). Le specifiche relative al rilievo e alla modellazione dell'esistente sono dettagliate principalmente nella Parte 4 della norma, che tratta dei *Livelli di sviluppo degli oggetti digitali*. Questa sezione introduce i concetti di LOD (Level of Development), LOG (Level of Geometry) e LOI (Level of Information), definendo i gradi di approfondimento necessari per la rappresentazione e la gestione informativa degli elementi costruttivi, inclusi quelli relativi agli edifici esistenti. Inoltre, la Parte 6 della UNI 11337 affronta le linee guida per la redazione di capitolati informativi e specifiche tecniche, fornendo indicazioni utili per l'integrazione dei dati derivanti da rilievi sul costruito all'interno dei modelli HBIM.

L'adozione della Realtà Virtuale (VR) e della Realtà Aumentata (AR) sta ridefinendo il modo in cui analizziamo, rappresentiamo e comunichiamo la vulnerabilità sismica degli edifici storici, offrendo strumenti avanzati per la simulazione, la formazione e la gestione degli interventi di conservazione. La VR consente di immergersi in un ambiente digitale tridimensionale interattivo, esplorando edifici e contesti urbani storici con un livello di realismo senza precedenti. Questo approccio non solo migliora la comprensione delle criticità strutturali, ma si rivela essenziale per la valutazione predittiva del comportamento sismico degli edifici, permettendo di simulare scenari di danno e di testare virtualmente strategie di consolidamento prima della loro applicazione reale. In ambito tecnico e accademico, la VR rappresenta uno strumento innovativo per la formazione di ingegneri e restauratori, offrendo la possibilità di interagire con modelli ad alta fedeltà e di sperimentare diverse soluzioni progettuali in un ambiente sicuro e controllato. L'uso della VR si estende anche alla sensibilizzazione pubblica e alla divulgazione scientifica, consentendo a cittadini e amministratori locali di visualizzare in maniera immersiva gli effetti di un sisma sugli edifici storici e favorendo una maggiore consapevolezza sulla necessità di interventi di prevenzione e di consolidamento. Parallelamente, la Realtà Aumentata (AR) sta rivoluzionando la gestione del rischio sismico grazie alla sua capacità di sovrapporre informazioni digitali all'ambiente reale, creando una perfetta integrazione tra dati virtuali e costruito esistente. A differenza della VR, che crea un ambiente totalmente digitale, l'AR consente di visualizzare in tempo reale dati strutturali direttamente sugli edifici fisici, attraverso dispositivi come visori, tablet o smart glasses¹⁴⁶. Questa tecnologia sta già trovando applicazione nei cantieri di restauro e consolidamento, permettendo ai tecnici di confrontare lo stato attuale dell'edificio con il modello digitale, sovrapponendo analisi strutturali, simulazioni di rischio e indicazioni progettuali direttamente sulla struttura reale. L'uso combinato di VR e AR non solo accelera e migliora l'accuratezza delle valutazioni, ma permette di superare i limiti delle metodologie tradizionali di rappresentazione e analisi, introducendo un livello di interazione diretta con il costruito che semplifica la comprensione e la comunicazione dei fenomeni di rischio. Queste tecnologie, grazie alla loro capacità di trasformare i dati in esperienze immersive e accessibili, stanno delineando un nuovo paradigma nella tutela e gestione del patrimonio storico, favorendo un approccio più

¹⁴⁶ MARRA A. *ET AL.* (2024), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 63.

efficace alla prevenzione del rischio sismico e alla pianificazione degli interventi di conservazione.

La vera rivoluzione nella rappresentazione e nell'analisi della vulnerabilità strutturale è guidata dall'Intelligenza Artificiale (AI) e dal *machine learning*¹⁴⁷, tecnologie che stanno trasformando radicalmente il modo in cui i dati vengono elaborati, interpretati e utilizzati per la gestione del rischio sismico. L'AI offre la capacità di analizzare enormi quantità di dati in tempi ridotti, individuando correlazioni, pattern di vulnerabilità e tendenze evolutive che sarebbero difficili da rilevare con metodi tradizionali. Gli algoritmi di *deep learning*, addestrati su database contenenti informazioni relative a edifici storici, tipologie costruttive ed eventi sismici passati, permettono di prevedere con grande accuratezza il comportamento strutturale di un edificio in caso di terremoto, restituendo simulazioni realistiche degli effetti di un evento sismico su strutture con diverse condizioni di degrado e differenti configurazioni costruttive. Uno degli impieghi più avanzati dell'AI nel rilievo digitale riguarda l'analisi automatizzata delle immagini fotogrammetriche e delle scansioni da laser scanner 3D. Attraverso l'uso di reti neurali convoluzionali (CNN), l'AI è in grado di rilevare automaticamente anomalie strutturali, fessurazioni, deformazioni murarie e fenomeni di degrado, con una precisione superiore rispetto all'analisi visiva tradizionale. Questa tecnologia non solo accelera il processo di valutazione, ma riduce il margine di errore soggettivo, permettendo di generare mappe tematiche dettagliate dello stato di conservazione degli edifici storici. Un ulteriore sviluppo dell'AI nel campo del rischio sismico riguarda il monitoraggio continuo delle strutture. Grazie all'uso combinato di sensori IoT (Internet of Things), accelerometri e algoritmi di analisi predittiva, è possibile rilevare in tempo reale variazioni nella risposta dinamica degli edifici, segnalando potenziali criticità strutturali prima che queste diventino irreversibili. Questo approccio consente di passare da una gestione reattiva a una gestione proattiva, basata su un sistema di *early warning* strutturale, in grado di identificare segnali precoci di degrado e suggerire interventi mirati prima che il danno si manifesti in modo significativo. In prospettiva futura, l'AI potrebbe diventare uno strumento imprescindibile nella gestione predittiva del patrimonio edilizio, permettendo di anticipare i danni e

¹⁴⁷ Algoritmi capaci di apprendere dai dati e migliorare le proprie prestazioni senza essere esplicitamente programmati attraverso tecniche come *supervised learning*, *unsupervised learning* e *reinforcement learning*.

di pianificare strategie di manutenzione basate su dati oggettivi, elaborati con metodi scientificamente fondati. Con l'evoluzione degli algoritmi di apprendimento automatico, sarà possibile sviluppare modelli di rischio adattivi, capaci di aggiornarsi continuamente in base ai nuovi dati acquisiti, migliorando progressivamente la capacità di previsione e ottimizzando le strategie di conservazione.

L'integrazione tra GIS, BIM, VR, AR e AI sta ridefinendo il modo in cui affrontiamo il rischio sismico nei centri storici, trasformando la semplice analisi della vulnerabilità in un processo interattivo, predittivo e dinamico. Queste tecnologie, se utilizzate in sinergia, non solo migliorano la comprensione del costruito, ma permettono di anticipare scenari di rischio, ottimizzare gli interventi di consolidamento e garantire una conservazione più efficace del patrimonio edilizio. La tutela degli edifici storici non può più essere concepita come un intervento reattivo post-sisma, ma deve diventare un sistema integrato di prevenzione e gestione, basato su strumenti in grado di leggere contemporaneamente il passato e il futuro degli edifici con una precisione senza precedenti.

La digitalizzazione, dunque, non è solo un mezzo per documentare, ma una risorsa strategica che permette di trasformare i dati in conoscenza e la conoscenza in azione, fornendo ai tecnici e ai decisori strumenti concreti per migliorare la resilienza dei centri storici. Tuttavia, il vero salto di qualità risiede nella capacità di integrare e gestire in modo intelligente le informazioni provenienti da queste tecnologie, creando un flusso di dati interoperabile e aggiornabile, capace di supportare decisioni in tempo reale. È in questa direzione che si muove il futuro della gestione del rischio sismico: un approccio in cui i dati, opportunamente raccolti, elaborati e interconnessi, diventano la chiave per una protezione più efficace e consapevole del nostro patrimonio storico.

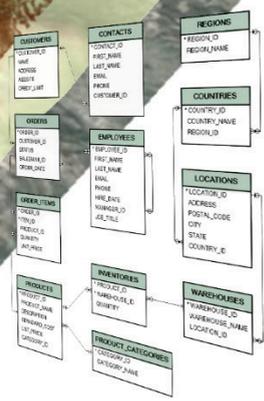
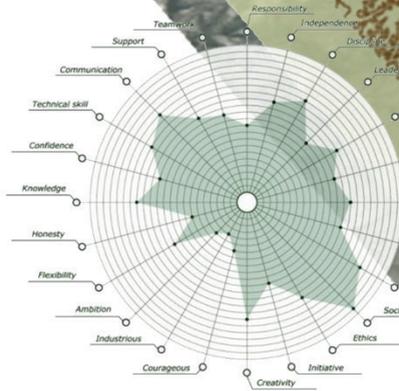
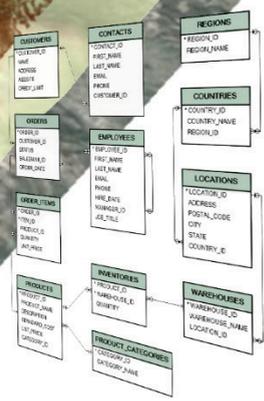
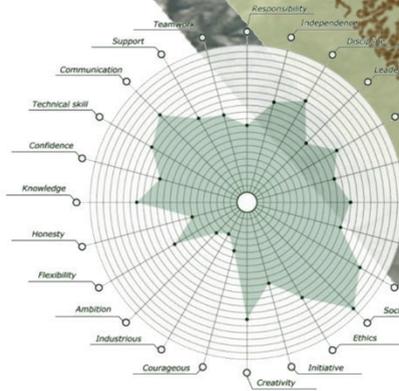
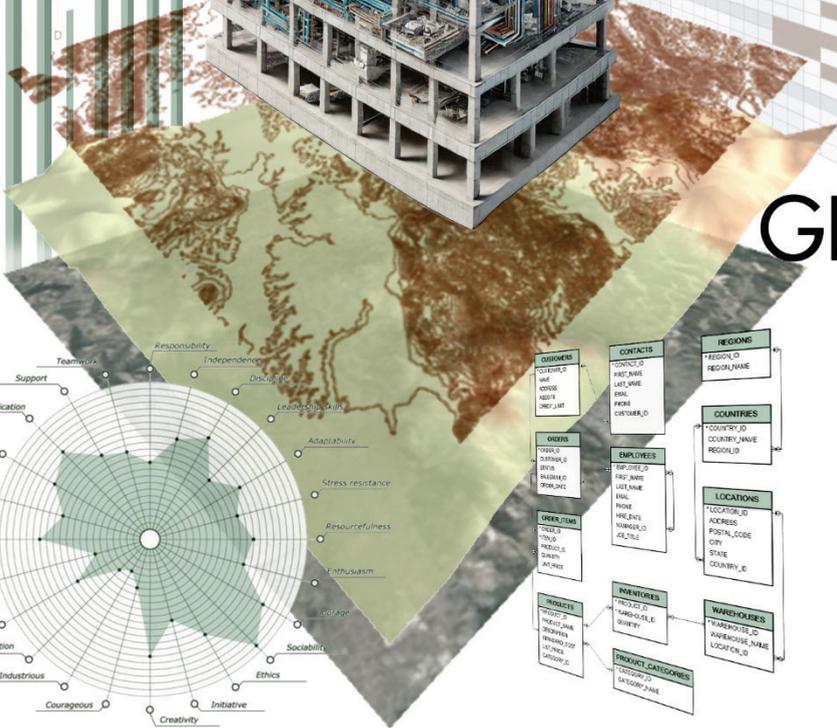
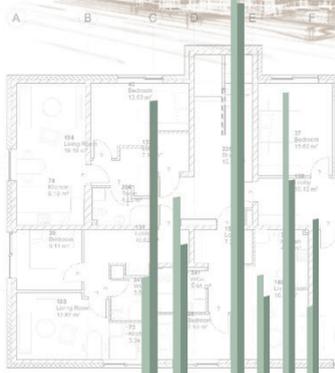
AI



AR/VR

BIM

GIS



Dati integrati per la “gestione smart” del rischio sismico

L'analisi della vulnerabilità sismica nei centri storici non può più essere affrontata con un approccio frammentario. Se le tecnologie digitali hanno permesso di migliorare la precisione del rilievo, della modellazione e della simulazione del rischio, il vero salto di qualità si realizza quando questi strumenti vengono integrati in un sistema unico e interoperabile. La digitalizzazione ha aperto nuove opportunità, ma il patrimonio informativo raccolto rischia di essere disperso se non viene organizzato in modo efficace. Unire GIS, BIM, intelligenza artificiale e strumenti di monitoraggio in un'unica piattaforma permette di trasformare la conoscenza del rischio sismico da un'operazione di analisi statica a un sistema dinamico e predittivo, in grado di rispondere in tempo reale alle esigenze della protezione del costruito.

L'interoperabilità tra questi strumenti è il cuore di questa rivoluzione. Il GIS, come già discusso, è in grado di mappare il rischio sismico su scala territoriale, evidenziando le zone più fragili grazie all'integrazione di dati geologici, storici e urbanistici. Tuttavia, queste informazioni, per quanto dettagliate, devono essere collegate alla scala dell'edificio, ed è qui che entra in gioco il BIM. Collegare GIS e BIM significa passare da una visione generalizzata della vulnerabilità a una conoscenza specifica di ogni singolo edificio, tenendo conto delle sue caratteristiche costruttive, materiche e strutturali. Questo consente di individuare non solo le aree urbane più esposte al rischio, ma anche i singoli edifici che potrebbero subire danni più gravi in caso di sisma, permettendo di pianificare strategie di intervento mirate.

L'integrazione tra GIS e BIM è già stata sperimentata con successo in diversi progetti di conservazione del patrimonio storico. In alcuni centri storici italiani, come ad esempio L'Aquila, questa combinazione ha permesso di creare *digital twin* che possono essere utilizzati per simulare scenari di rischio e valutare l'efficacia di interventi preventivi. Ma il vero cambiamento arriva con l'integrazione dell'intelligenza artificiale e del *machine learning*, che permettono di rendere questi modelli non solo informativi, ma anche predittivi. Se finora la valutazione della vulnerabilità sismica si basava su simulazioni statiche, l'AI consente di analizzare in tempo reale un'enorme quantità di dati, identificando schemi di rischio e fornendo previsioni basate su eventi passati

e simulazioni numeriche avanzate. Gli algoritmi di *deep learning* possono essere addestrati per riconoscere le caratteristiche degli edifici più vulnerabili e prevedere il loro comportamento in caso di terremoto, consentendo di sviluppare piani di prevenzione più efficaci. Un aspetto fondamentale dell'intelligenza artificiale applicata alla gestione del rischio sismico è la capacità di analizzare dati in tempo reale provenienti da sensori IoT (Internet of Things). La sensoristica avanzata, installata negli edifici storici, permette di monitorare parametri come le oscillazioni strutturali, le variazioni di temperatura e umidità, o addirittura i micromovimenti delle murature, fornendo segnali di allerta in caso di anomalie. Collegando questi dati ai modelli BIM e GIS, è possibile sviluppare un sistema di *early warning*, capace di segnalare potenziali situazioni di rischio prima che si verifichi un collasso strutturale.

L'integrazione di questi strumenti sta portando alla nascita di piattaforme di gestione intelligente del rischio sismico, in cui tutte le informazioni raccolte convergono in un unico ambiente digitale. Queste piattaforme consentono non solo di archiviare e visualizzare i dati, ma anche di condurre simulazioni avanzate e fornire supporto decisionale per la pianificazione di interventi di consolidamento. Immaginiamo un sistema in cui gli amministratori di un centro storico possano consultare in tempo reale una mappa interattiva che evidenzia gli edifici più a rischio, con la possibilità di accedere ai modelli BIM dettagliati di ogni struttura, visualizzare il suo stato di conservazione, monitorare le condizioni strutturali tramite sensori e ricevere suggerimenti generati dall'AI sulle strategie di intervento più efficaci. Questo tipo di gestione rappresenta il futuro della protezione del patrimonio costruito e della prevenzione del rischio sismico.

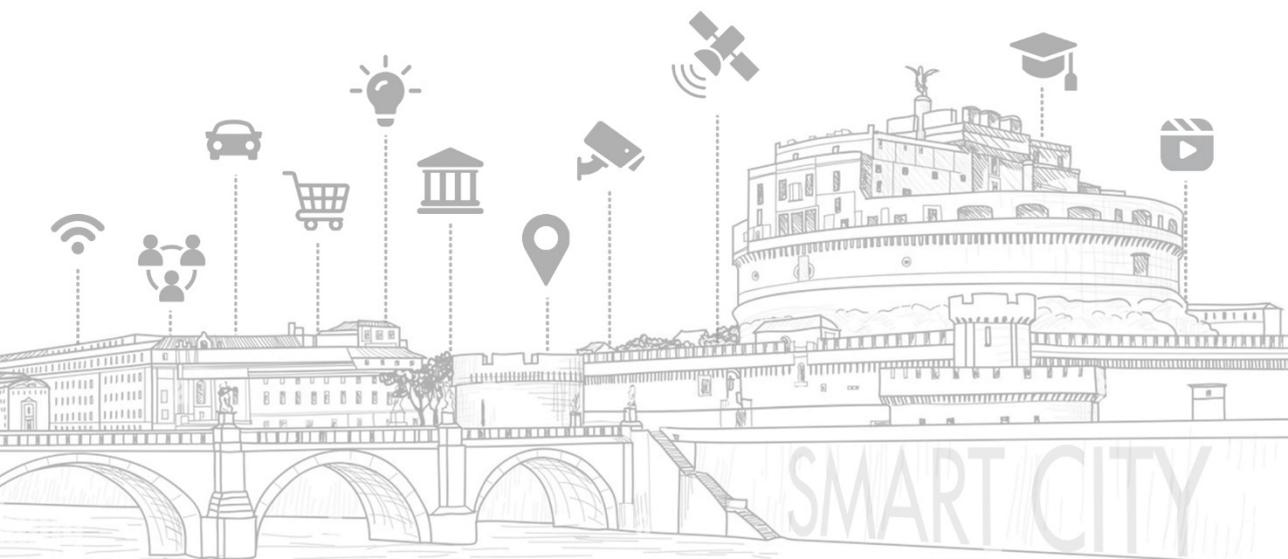
Tuttavia, l'implementazione di questi sistemi non è priva di sfide. Uno dei principali ostacoli è la necessità di standardizzare i dati e garantire l'interoperabilità tra diversi software e piattaforme. Molti modelli BIM e GIS utilizzano formati proprietari che non sempre sono compatibili tra loro, rendendo difficile l'integrazione delle informazioni. Inoltre, l'adozione su larga scala di sistemi di intelligenza artificiale richiede infrastrutture di calcolo avanzate e un'elevata capacità di gestione dei dati, aspetti che possono rappresentare una barriera per le amministrazioni locali e per i centri storici minori con risorse limitate.

Nonostante queste difficoltà, il futuro della gestione del rischio sismico nei centri storici passa inevitabilmente attraverso l'integrazione intelligente dei

dati. Il modello tradizionale di intervento, basato su valutazioni statiche e azioni correttive post-evento, sta lasciando spazio a un approccio più avanzato, in cui la conoscenza del rischio è dinamica, aggiornata in tempo reale e supportata da strumenti predittivi. Questo cambiamento non è solo una questione tecnologica, ma anche metodologica e culturale: significa passare da una logica di emergenza a una strategia di prevenzione basata su dati oggettivi e verificabili.

L'evoluzione verso una gestione intelligente del rischio sismico segna una svolta nel modo in cui pensiamo alla sicurezza del patrimonio storico. Se fino a pochi anni fa il restauro e il consolidamento erano operazioni isolate, oggi l'obiettivo è costruire un ecosistema digitale interconnesso, in cui ogni edificio non è solo un monumento da preservare, ma un nodo di una rete intelligente che comunica, si aggiorna e fornisce informazioni per garantire la sua conservazione nel tempo. I centri storici non sono semplici scenari da proteggere, ma sistemi complessi da gestire con strumenti all'avanguardia, in cui il passato e il futuro si intrecciano in una visione innovativa della tutela e della sicurezza del costruito.

L'integrazione dei dati, quindi, non è solo una questione tecnica, ma una nuova filosofia di intervento. Il futuro della protezione del nostro patrimonio non si costruisce solo con mattoni e malta, ma anche con dati, algoritmi e modelli intelligenti. La sfida è aperta, e la tecnologia è già pronta a rispondere. Spetta ora ai ricercatori, agli urbanisti, agli amministratori e ai tecnici trovare il modo migliore per sfruttare queste innovazioni, trasformando la conoscenza in azione e la prevenzione in una strategia concreta per garantire la sicurezza e la resilienza dei centri storici di domani.







PART 2

PART 2

DIGITIZING HISTORIC CENTERS:
FROM SURVEYING TO ADVANCED MODELING

Let your heart speak, question faces, do not listen to tongues.

Umberto Eco

From analogue to digital: the evolution of surveying in historic centers

Understanding the seismic vulnerability of minor historic centers in Italy requires more than a general assessment of their built heritage. While their territorial distribution – often in morphologically complex and high-risk seismic zones – has been effectively mapped using GIS tools, geographic localization and cataloguing of buildings are merely preliminary steps. Addressing seismic safety in historic centers demands a much deeper level of knowledge, capable of capturing the detailed morphology, structural configuration, material composition, and specific vulnerabilities of each architectural unit. It is in this context that architectural and structural surveying assumes a critical role, evolving from simple documentation into a tool for advanced and predictive analysis¹⁴⁸.

For centuries, surveys of historic centers relied on traditional methods based on direct observation, manual measurement, and graphic representation on paper. These techniques have built an extensive archive of knowledge that remains essential for understanding transformations and weaknesses in the built fabric. However, as the need for precision¹⁴⁹, speed, and data interoperability has grown, the limitations of these traditional approaches have become evident. The labor-intensive nature of manual surveys, the potential for

¹⁴⁸ Predictive vulnerability analysis uses historical data, mathematical models, and artificial intelligence to forecast the structural behavior of buildings in the event of an earthquake. By integrating 3D surveys, BIM, GIS, and real-time monitoring, it identifies critical points before visible damage occurs, enabling targeted preventive interventions and reducing the risk of collapse.

¹⁴⁹ Degree of accuracy and reliability of measurements carried out on a building or area. It depends on the quality of the instruments used, the resolution of the acquired data, and the ability to minimize errors in the geometric and metric representations of the built environment.

measurement errors¹⁵⁰, and the difficulty of updating and integrating data with advanced analytical tools necessitate a methodological shift that fully embraces the potential of digital technologies.

The advent of digital surveying technologies has marked a paradigm shift in the documentation and analysis of historic heritage. It has not only improved the efficiency of data collection but also radically transformed how built environments are interpreted and managed. The transition from analogue to digital is not merely a substitution for tools, it is a methodological revolution that introduces a new, multidisciplinary dimension in which surveying becomes an integrated process of knowledge acquisition, modelling, and simulation. Technologies such as 3D laser scanning, terrestrial and aerial photogrammetry, Geographic Information Systems (GIS), and Building Information Modelling (BIM) are not just more advanced instruments; they represent new epistemological frameworks that allow for highly accurate, comprehensive, and dynamic representations of the built environment, something unimaginable only a few decades ago.

Digital technologies play a key role in seismic vulnerability assessment by offering critical advantages. First, the millimetric precision of digital techniques eliminates the uncertainties inherent in manual surveys, generating highly detailed models of the structural characteristics of individual buildings and entire urban fabrics. Second, the three-dimensional models generated enable numerical simulations of seismic responses, allowing for the predictive identification of critical points and vulnerabilities, thus supporting the design of targeted reinforcement and protection strategies.

Another fundamental aspect is the integration of data. BIM-based modelling goes beyond geometric representation, incorporating information about materials, structural conditions, and past or planned interventions transforming the model into a dynamic and information-rich database¹⁵¹. GIS, in turn, expands the scale of analysis by assessing vulnerability at the urban and territorial levels, identifying risk-prone areas and supporting mitigation strategies across broader spatial contexts. The integration of digital surveys, BIM modelling, and GIS analysis enables a transition from static assessment to a

¹⁵⁰ They are classified into systematic errors (constant and predictable, *e.g.*, incorrect instrument calibration), random errors (unpredictable variations due to external factors), and gross errors (caused by oversight or equipment malfunction).

¹⁵¹ PELLICCIO A. *ET AL.* (2017), *op. cit.* in bibliographic reference no. 78.

dynamic and multi-scalar approach, in which each building is examined within the framework of its urban and territorial network¹⁵².

However, the digital transition is not without challenges. While these new technologies offer extraordinary capabilities, their implementation requires investment in training, infrastructure, and specialized software. In small historic towns, where economic and professional resources are often limited, adopting advanced surveying and modelling systems can prove difficult. Moreover, digitalization introduces operational complexities: the continuous management and updating of models, ensuring interoperability among platforms, and integrating heterogeneous data sources all demand a strategic and interdisciplinary vision¹⁵³.

Therefore, the future of seismic vulnerability analysis in historic centers does not lie in simply replacing traditional survey methods with digital tools, but rather in the creation of a hybrid and integrated approach. The synergy between the reliability of classical methodologies and the versatility of emerging technologies can yield a deeper understanding of historic building stock and significantly improve risk mitigation strategies. GIS will continue to provide territorial insights on a macro scale, while BIM will serve as the primary tool for managing individual buildings. At the same time, technologies such as artificial intelligence and machine learning are opening new frontiers for predictive vulnerability analysis, shifting seismic risk management from reactive response to proactive planning.

Only by combining experience, innovation, and a multidisciplinary approach can we effectively protect our historic centers, preserving their identity and making them safer for future generations. Digitalization is not merely a technological upgrade, but a methodological necessity for tackling the challenges of seismic safety and heritage conservation more effectively. The future of protecting historic centers will not be built solely with bricks and restorations, but also with data, models, and intelligent simulations, capable of anticipating risks and guiding decisions with unprecedented precision.

¹⁵² SACCUCCI M., PELLICCIO A. (2018), *op. cit.* in bibliographic reference no. 84.

¹⁵³ Funding policies are being implemented, and open-source platforms are being developed to make digital technologies more accessible. Moreover, collaborations among universities, ANCE, ENEA, CNR, and research institutions are promoting the training of specialized personnel and the adoption of innovative solutions for surveying and managing seismic risk in historic centers.

The new frontiers of surveying

The evolution of surveying in historic centers is not merely a transition from analog to digital tools, but a profound transformation in the way the built heritage is observed, measured, and interpreted. As previously discussed, surveying constitutes a crucial phase in the assessment of seismic vulnerability: without an accurate understanding of the morphology, structure, and materials of buildings, any risk analysis remains incomplete and approximate. While traditional documentation methods have historically supported built heritage recording, new technologies now provide more sophisticated tools that significantly enhance the accuracy and effectiveness of the process. However, to fully appreciate the value of the digital transition, it is essential to critically examine traditional methodologies and their limitations, thereby understanding how emerging technologies have integrated, surpassed, and ultimately re-defined the processes of surveying and analyzing the built environment.

Traditional techniques: the legacy of the past

Architectural surveying has long been a fundamental activity for the understanding, conservation, and management of the built heritage. Over the centuries, surveying techniques have evolved in response to the needs of designers, historians, and conservators, while retaining a strong manual and interpretative component. Traditional surveying relies on direct measurement instruments, topographic methods, and manual graphic representations, which for a long time were the only means available for documenting historic architecture.

One of the oldest and most widespread methods is direct surveying, which involves the manual measurement of architectural elements using simple yet effective instruments such as measuring tapes, stadia rods, spirit levels, plumb lines, and calipers. These tools allow for the measurement of dimensions, angles, and alignments, providing basic geometric information about buildings. The collected measurements are then transferred onto preliminary sketches, serving as a foundation to produce plans, sections, and elevations. Direct surveying has for centuries constituted the principal method for architectural

documentation, used by architects and scholars to precisely describe buildings and monumental complexes. Nevertheless, this method has significant drawbacks: it is subject to operator error, requires considerable time for data acquisition, and is poorly suited for complex elements such as curved surfaces, decorative features, and sculpted details¹⁵⁴.

Alongside direct methods, topographic surveying has served as a vital measurement tool for large-scale representations of buildings and urban fabrics. Employing more advanced instruments such as theodolites, optical levels, and total stations, topographic surveying allows for greater precision through the calculation of angles, distances, and elevations. This approach has proven particularly useful in studying extended architectural complexes – such as historic city centers and urban aggregates – enabling the creation of detailed maps and planimetric models. However, topographic surveying also has notable limitations: despite its improved precision over direct methods, data collection remains time-intensive and demands advanced technical skills. Furthermore, conventional topographic surveys are essentially two-dimensional¹⁵⁵, rendering them less effective for studying complex volumes and architectural stratifications characteristic of historic centers.

Another fundamental aspect of traditional surveying is manual graphic representation, which includes freehand drawing, scaled representations on paper, and interpretative sketches. Manual drawing has always been a crucial analytical tool for the surveyor, capable of capturing details not evident through mere numerical measurement. For centuries, architects and historians have used this technique to document buildings, construction details, and masonry stratigraphy, contributing to the development of a vast iconographic repertoire of the built heritage¹⁵⁶. However, manual drawing also presents

¹⁵⁴ DOCCI M., MAESTRI D. (2009), *op. cit.* in bibliographic reference no. 38.

¹⁵⁵ The combined use of robotic total stations and satellite positioning systems, such as GNSS (Global Navigation Satellite System) or 3D laser scanners, now makes it possible to overcome two-dimensional limitations, producing georeferenced three-dimensional models that are valuable for structural analysis and the conservation of historic centers.

¹⁵⁶ Despite the advent of digital technologies, hand drawing continues to be used in both academic and professional contexts, especially in the early stages of surveying, to quickly capture proportions, material details, and architectural stratifications. A famous example is found in Le Corbusier's sketchbooks, in which the architect documented historic buildings through detailed sketches, combining technical drawings with artistic impressions and personal notes demonstrating that freehand drawing was not only a tool for measurement but also for critical interpretation of architecture.

considerable limitations: its quality is highly dependent on the skill of the operator, and updating or integrating the drawings with other data often requires complete redrawing. Furthermore, the management and achieving of large-scale paper-based surveys is problematic, requiring suitable storage conditions and proving inefficient for rapid information sharing.

Stratigraphic surveying of masonry¹⁵⁷ is another method of significant importance within traditional approaches, used to study the composition and historical evolution of wall facings. Through direct analysis of construction techniques, materials, and transformation traces, this method enables the reconstruction of a building's history and identification of intervention phases over time. Stratigraphic analysis has been a cornerstone of historical-architectural research, allowing scholars to identify construction methods from various historical periods and assess buildings' vulnerability to seismic events. However, even in this case, subjectivity and the difficulty of standardizing information make this approach less effective compared to modern digital tools.

Although these traditional techniques have formed the bedrock of architectural documentation for centuries, they are increasingly inadequate in meeting the contemporary demands for precision, speed, and interoperability required for seismic vulnerability analysis. The structural complexity of minor historic centers and the need for detailed evaluations of construction elements necessitate a technological leap towards more advanced tools capable of providing accurate three-dimensional models and integrating heterogeneous data within a unified information system. For these reasons, research in architectural and urban surveying has undergone a significant transformation, leading to the adoption of digital tools that overcome the limitations of traditional methods. The shift from manual surveying to digitalization is not merely a technological advance but represents a paradigm shift in how the built heritage is documented, analyzed, and preserved. While traditional techniques still hold inestimable value for capturing the historical and interpretive aspects of buildings, their integration with advanced tools – such as 3D laser scanning, photogrammetry, and Geographic Information Systems – offers a more effective

¹⁵⁷ Stratigraphic surveying has its roots in archaeological methodology and has evolved over time into a fundamental tool for the analysis of historic buildings. A significant example can be found in studies conducted on medieval structures in Italy, where the observation of masonry has made it possible to identify successive construction phases and to recognize reused materials.

framework for seismic vulnerability assessment. The combination of manual expertise and digital precision now constitutes the primary path for understanding and safeguarding the built heritage, opening new perspectives in the prevention of seismic risk in minor historic centers.

Advanced technologies: the future of surveying

The introduction of digital technologies into the surveying of historic centers has marked a radical shift in the way the built environment is documented and analyzed. While traditional methods, though valid, are often limited in terms of precision and efficiency, digital surveying today enables the production of highly detailed three-dimensional models that can be integrated into information management systems, thereby optimizing the phases of analysis and conservation. This evolution has profoundly impacted not only the quality of the collected data but also the ability to predict the structural behavior of historic buildings, supporting more effective strategies for seismic risk prevention.

Among the most widely adopted technologies in recent years, terrestrial and aerial photogrammetry has revolutionized the acquisition and analysis of geometric data from historic buildings, allowing the generation of highly detailed 3D models from photographic images captured from multiple angles. Based on the principle of stereoscopic triangulation, this technique employs advanced Structure from Motion (SfM) algorithms¹⁵⁸ to automatically reconstruct the position of the camera and the geometry of the surveyed objects. The process begins with the identification of shared key points across images and their automatic alignment within a 3D space, resulting in a sparse point cloud. Subsequently, Multi-View Stereo (MVS) algorithms densify the point cloud, producing a more accurate and realistic representation. Terrestrial photogrammetry is conducted using high-resolution cameras mounted on tripods

¹⁵⁸ It is structured in several phases: (1) feature detection and matching, where algorithms such as SIFT or SURF identify key points common to multiple images; (2) camera pose estimation, calculated using *Bundle Adjustment* to optimize the scene geometry; (3) triangulation, which generates a sparse point cloud based on the identified correspondences; (4) densification (MVS – *Multi-View Stereo*), which refines the model with a high-resolution point cloud; (5) mesh generation and texture mapping, which convert the data into detailed 3D surfaces.

or stabilizers to ensure the utmost precision in documenting wall surfaces, decorative elements, and material characteristics. One major advantage of this technique is the ability to generate orthophotos-perspective-free images that allow for precise analysis of construction details and material degradation phenomena such as cracking and surface erosion. Moreover, the use of multispectral cameras¹⁵⁹ enables the detection of invisible phenomena, such as moisture variation or plaster detachment, providing crucial data for the conservation of historic buildings.

The use of drones¹⁶⁰ has further expanded the potential of photogrammetry, making it possible to survey entire historic centers with high speed and resolution. Drones equipped with state-of-the-art sensors capture images from otherwise inaccessible perspectives, allowing for the documentation of roofs, elevated architectural elements, and facades within densely built urban contexts. The processed images yield georeferenced 3D models used for longitudinal comparative analyses and structural assessments. Despite its many advantages, photogrammetry does present limitations affecting the quality of the resulting 3D models. Lighting conditions and image quality are critical to reconstruction accuracy, as shadows, reflections, or transparent surfaces can disrupt image matching. Ground Control Points (GCPs)¹⁶¹ are often required to improve metric accuracy and georeferencing. Additionally, photogrammetry is computationally intensive: generating dense point clouds and detailed 3D models require advanced software and high-performance hardware capable of processing large data volumes¹⁶².

¹⁵⁹ Multispectral cameras are advanced sensors that capture images in different bands of the electromagnetic spectrum (visible, infrared, ultraviolet).

¹⁶⁰ UAV – Unmanned Aerial Vehicle.

¹⁶¹ High-precision surveying instruments, such as total stations or RTK GNSS (Real-Time Kinematic), are used to determine the exact coordinates of GCPs within a geodetic reference system.

¹⁶² The computational load of photogrammetry refers to the amount of processing power, memory, and time required to handle large image datasets and generate detailed 3D models. The high complexity of the algorithms involved demands high-performance hardware, including powerful GPUs, multicore CPUs, and high-capacity RAM. The main factors affecting computational load include the number and resolution of images, the degree of overlap between shots, the density of the point cloud, and the accuracy of the final model. To reduce processing times and improve efficiency, techniques such as process parallelization, cloud computing, and optimization of reconstruction parameters are employed.

Parallel to photogrammetry, 3D laser scanning stands out as one of the most advanced and accurate technologies for documenting the built environment, thanks to its ability to rapidly acquire detailed geometric data with millimetric precision. Based on active distance measurement through laser pulses, this technology employs Time-of-Flight (ToF)¹⁶³, Phase Shift, or laser triangulation systems to precisely determine the spatial coordinates of surveyed objects. The emission of high-frequency laser beams allows the acquisition of millions of points per second, producing ultra-dense point clouds that render highly accurate 3D representations of scanned surfaces. Unlike photogrammetry, laser scanning is independent of lighting conditions and performs consistently in indoor environments or on textureless surfaces¹⁶⁴. This makes it particularly effective for surveying complex structures, decorated historic buildings, and sites in advanced states of degradation, where detailed documentation is essential for conservation and structural analysis.

From an operational standpoint, laser-scanned data are also structured as 3D point clouds. Owing to their density and precision, these data are extensively used in architectural, engineering, and archaeological surveys, providing a robust basis for structural analyses, material degradation studies, and seismic vulnerability simulations. However, technology is not without challenges: the high cost of equipment and the need for specialized software and expertise for data processing limit its widespread adoption, particularly among individual practitioners¹⁶⁵. Managing point clouds also demands advanced skills in digital modeling and data manipulation to ensure that acquired information can be effectively converted into usable models for design and analysis purposes.

In recent years, 360° cameras have emerged as an innovative tool in architectural documentation, offering the ability to capture high-resolution panoramic images and provide immersive visualizations of surveyed

¹⁶³ Time-of-Flight (ToF) is a distance measurement technology based on the travel time of a laser pulse or electromagnetic wave between the sensor and an object. The operating principle relies on calculating the time it takes for the signal to reach the target surface and return to the sensor after being reflected.

¹⁶⁴ Thus, overcoming some of the limitations of digital photogrammetry.

¹⁶⁵ The cost of 3D laser scanners varies significantly depending on features such as accuracy, range, and acquisition speed. For professional-grade devices, prices can range from € 30,000 to € 100,000.

environments. These devices employ opposing wide-angle lenses¹⁶⁶ that capture the entire surrounding field of view in a single shot, eliminating the need for multiple acquisitions and reducing processing time. 360° imagery is particularly effective for monitoring the conservation status of historic buildings, enabling intuitive and immediate comparisons of material and structural conditions over time. When integrated with 3D models derived from photogrammetry and laser scanning, the immersive documentation adds high-fidelity visual information to metric and spatial data. This synergy enhances the interpretation of deterioration phenomena and improves communication with both experts and lay audiences. Beyond their technical applications, 360° cameras are valuable in scientific dissemination and education, allowing for the creation of virtual tours and interactive environments for the exploration of historic sites without requiring physical presence¹⁶⁷.

One of the most recent and groundbreaking innovations in digital surveying is Neural Radiance Fields (NeRF)¹⁶⁸, an advanced neural rendering technique capable of generating highly photorealistic 3D models from standard 2D images through AI. Unlike established methods such as photogrammetry and laser scanning – which reconstruct geometry via point clouds or mesh – NeRF uses a neural network¹⁶⁹ to learn and synthesize not only the shape of objects in space, but also their lighting properties, textures, and color variations, yielding extremely realistic and immersive representations. Rather than directly producing 3D points, NeRF models a continuous function that defines light and color distribution in all directions. Using a differentiable ray tracing framework¹⁷⁰, NeRF estimates the density and color along each camera ray to reconstruct a continuous radiance field that defines the scene volumetrically.

¹⁶⁶ A wide-angle lens is a photographic lens with a short focal length (generally less than 35 mm in full-frame format), designed to capture a wide field of view. Thanks to its optical configuration, this type of lens allows a larger portion of the scene to be included compared to a standard lens.

¹⁶⁷ See [webliography](#), entry no. 6.

¹⁶⁸ MILDENHALL B. *ET AL* (2021), *op. cit.* in bibliographic reference no. 67.

¹⁶⁹ A mathematical model composed of artificial neurons organized in layers. Through machine learning processes, the network processes input data, recognizes patterns, and generates predictions.

¹⁷⁰ Advanced rendering technique that calculates the path of light in a 3D scene, allowing the process to be optimized through mathematical derivatives.

This enables the creation of 3D models with unprecedented visual fidelity, accurately capturing light-material interactions. In architectural and heritage documentation, this translates into the ability to render not only geometry but also dynamic reflections, transparency, and lighting effects, greatly enhancing spatial comprehension. Furthermore, NeRF can achieve remarkable results with relatively sparse image datasets, reducing the high image redundancy typically required in traditional photogrammetry. Despite its potential, NeRF's large-scale application in digital surveying and heritage conservation remains in its early stages, facing obstacles such as significant computational demands and limited interoperability with current architectural information systems that rely on explicit geometric models. Nonetheless, scientific interest in NeRF is growing rapidly, with recent developments such as Mip-NeRF, Instant-NGP, and NeRF++¹⁷¹ significantly reducing processing times and improving reconstruction quality. If this technological trajectory continues, NeRF may soon complement – or even surpass – traditional methods in heritage documentation, offering unparalleled visual representation tools and reshaping how we perceive and analyze built environments.

The integration of these technologies represents the future of surveying in historic centers, unlocking new scenarios for documentation, analysis, and conservation. Photogrammetry offers rapid, flexible data acquisition; 3D laser scanning ensures millimetric precision for complex structural analysis; 360° cameras enrich spatial perception through immersive visualization; and NeRF, with its AI-based innovation, enables the creation of photorealistic virtual environments that go beyond the limits of conventional methods.

This evolution demonstrates that digital surveying is not merely a matter of precision, it signifies a new epistemological approach to understanding the built environment. The ability to combine diverse tools within a unified workflow allows for a multidimensional understanding of historic buildings, enhancing risk prevention, degradation monitoring, and conservation planning. The adoption of these technologies constitutes not just a technical innovation,

¹⁷¹ Evolutions of NeRF designed to improve 3D reconstruction efficiency and quality. Mip-NeRF optimizes detail handling by reducing artifacts and enhancing performance at multiple scales. Instant-NGP drastically speeds up processing times through an optimized neural architecture, enabling near real-time reconstruction. NeRF++ extends the original model to handle more complex scenes, improving representation quality for both nearby and distant objects.

but a methodological revolution, redefining the relationship between documentation, analysis, and the safeguarding of cultural heritage.

The true potential of digital surveying lies in its capacity to unify heterogeneous data into dynamic, interactive models capable of evolving over time and adapting to the needs of continuous monitoring and scheduled maintenance. This approach paves the way for smarter and more predictive management of historic heritage, where digital acquisition is seamlessly integrated with advanced simulation and artificial intelligence to anticipate structural issues and develop effective protection strategies. The future of surveying in historic centers is increasingly oriented toward the convergence of digitalization, predictive simulation, and intelligent information management, with the goal of making built heritage more resilient to seismic events, environmental changes, and urban transformations. The challenge is not merely to document, but to understand, preserve, and innovate so that the historical memory embedded in our urban centers can be protected and enhanced for future generations.

Beyond paper: new tools for mapping and understanding seismic vulnerability

The evolution of digital surveying has profoundly transformed the way seismic vulnerability is analyzed and represented in historic centers. However, the process extends far beyond data acquisition alone: the true innovation lies in the transformation of raw data into intelligent tools for analysis, prediction, and risk management. It is no longer a matter of documenting the existing condition, but of developing models capable of anticipating the structural behavior of buildings, thereby supporting informed decisions for the protection and restoration of historical heritage. The integration of GIS, BIM, Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR), and Artificial Intelligence (AI) is opening new possibilities, fundamentally reshaping how engineers, urban planners, and conservationists address seismic vulnerability.

The Geographic Information System (GIS) is among the most advanced tools for representing and analyzing seismic risk at the urban scale, offering a dynamic system for the management and processing of geospatial data. Unlike traditional, static, two-dimensional maps, GIS operates on a multilayer¹⁷² structure that enables the organization and analysis of different types of spatial and attribute data, combining geological, topographical, architectural, and historical information. GIS processes both raster data – such as satellite imagery, representing continuous information like terrain elevation or urban density – and vector data, which model the geometry of buildings, roads, and infrastructures using points, lines, and polygons, each linked to descriptive attributes.

This structure allows the spatial distribution of seismic vulnerabilities to be queried and visualized through thematic maps, where each layer represents a specific piece of information, such as building typologies, construction age, active fault lines, or areas subject to local soil amplification. Spatial analysis within GIS enables the identification of vulnerability patterns and the development of risk scenarios based on quantitative indicators. Using overlay operations, buffering, and spatial interpolation, GIS can combine multiple

¹⁷² Homogeneous information layers.

variables to generate predictive models, thereby supporting the planning of risk mitigation interventions.

One of GIS's most innovative features is its ability to integrate high-precision data derived from advanced digital surveying techniques, such as 3D laser scanning and photogrammetry. This synergy allows for a more accurate assessment of building geometries, conservation status, and structural weaknesses, providing essential support for consolidation and conservation planning. The use of GIS in seismic risk management marks a critical shift toward a predictive, multidisciplinary approach, where knowledge of the built environment is grounded in accurate scientific data and advanced analytical methodologies. Beyond mapping vulnerabilities, GIS functions as a modelling tool that depicts building morphology and structural weaknesses, highlighting at-risk areas and supporting mitigation strategies.

If GIS is essential for analyzing the spatial distribution of seismic risk, Building Information Modeling (BIM) is the key tool for investigating the vulnerability of individual buildings through an integrated, multidisciplinary approach. BIM is not merely a three-dimensional representation of geometry, but an advanced information model in which each architectural and structural element is enriched with material, constructional, and performance attributes, allowing for advanced simulations and predictive evaluations.

This methodology correlates various levels of information, providing a clear and detailed view of the conservation status and structural issues of historic buildings, thus transforming the analysis phase into a decision-support system for conservation and seismic upgrading. Within this process, Historic Building Information Modeling (HBIM) plays a fundamental role. Unlike traditional BIM, which is based on standardized components, HBIM allows the modeling of complex, irregular architectural elements typical of historic buildings, using data derived from 3D laser scans and photogrammetry.

This technology not only allows for highly accurate representation of building morphology, but also integrates data on masonry stratigraphy, construction techniques, and material degradation. The resulting model serves not just as a graphical document, but as a dynamic informational database. HBIM enables the accurate depiction of structural vulnerabilities, identifying critical points such as cracks, discontinuities, material decay, and deformations, yielding a highly detailed and up-to-date framework.

A key innovation of HBIM is its capacity to perform advanced numerical simulations – such as finite element analysis¹⁷³ and simplified kinematic methods – to evaluate a building’s structural response to various seismic forces. Both the *Technical Building Standards* (NTC 2018)¹⁷⁴ and the *Guidelines for the Evaluation and Mitigation of Seismic Risk in Cultural Heritage* (DPCM 09/02/2011)¹⁷⁵ emphasize the importance of these tools for scientifically grounded assessments of existing buildings’ vulnerabilities, shifting away from purely visual and empirical assessments toward quantitative, predictive models.

Integration between BIM and structural analysis software allows for virtual testing of various consolidation strategies before they are implemented on-site, optimizing resources and reducing uncertainty. HBIM’s effectiveness extends beyond analysis and design to long-term heritage management and maintenance. Creating a BIM model of a historic building means creating a digital twin in which every piece of information is traceable and updateable, allowing for long-term monitoring of building conditions, documentation of interventions, and analysis of structural degradation over time. This represents a paradigm shift in managing the safety of historic buildings from a reactive, post-earthquake logic to a preventive strategy, where continuous monitoring enables early intervention before damage becomes irreversible.

The digitalization of built heritage is now a regulatory priority, as reflected in European directives on BIM-based building management and the Italian

¹⁷³ FEM – Finite Element Method.

¹⁷⁴ The Technical Standards for Construction (NTC 2018), issued by Ministerial Decree of January 17, 2018, provide regulatory criteria for the design, execution, and testing of constructions in Italy, with particular focus on structural safety and seismic resistance. For existing buildings, including those of historical significance, the NTC 2018 introduce specific provisions for the assessment of seismic vulnerability, distinguishing between retrofitting, improvement, and local repair interventions, in accordance with modern structural analysis methodologies.

¹⁷⁵ The Guidelines for the Assessment and Reduction of Seismic Risk of Cultural Heritage (DPCM 09/02/2011) provide methodological criteria for analyzing the seismic vulnerability of historic buildings, distinguishing them from ordinary constructions. They define specific procedures for structural diagnosis, identification of collapse mechanisms, and the design of compatible and reversible interventions, in accordance with the principles of conservation and protection of cultural heritage, and in line with the NTC 2018.

standard UNI 11337¹⁷⁶. The introduction of BIM and HBIM in seismic risk assessment and management represents a methodological turning point, transforming 3D modeling from a representational tool into a comprehensive platform for analysis, simulation, and intelligent information management. Integrating survey data, structural analyses, and historical information within a single system optimizes conservation and seismic upgrading strategies, strengthening the resilience of historic centers.

The adoption of Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) is redefining how seismic vulnerability is analyzed, represented, and communicated for historic buildings, offering advanced tools for simulation, training, and conservation management. VR enables immersive exploration of interactive, three-dimensional digital environments, allowing for unprecedented realism in the analysis of historic urban contexts. This enhances the understanding of structural issues and supports predictive assessment of seismic behavior, enabling the simulation of damage scenarios and virtual testing of consolidation strategies.

In technical and academic contexts, VR is an innovative training tool for engineers and conservators, allowing interaction with high-fidelity models and experimentation with design alternatives in a controlled, risk-free environment. VR also serves public outreach and education, enabling citizens and policymakers to experience the potential impacts of seismic events on historic buildings, raising awareness of the importance of preventive interventions.

In parallel, AR is revolutionizing seismic risk management through its capacity to overlay digital information onto the physical environment, seamlessly merging virtual data with the existing built fabric. Unlike VR, which generates fully digital environments, AR allows the real-time visualization of

¹⁷⁶ UNI 11337 is the Italian standard that regulates the digital management of information processes in the construction sector, with particular emphasis on the adoption of Building Information Modeling (BIM). The specifications related to surveying and modeling of existing structures are mainly detailed in Part 4 of the standard, which addresses the “Levels of Development of Digital Objects”. This section introduces the concepts of LOD (Level of Development), LOG (Level of Geometry), and LOI (Level of Information), defining the levels of detail required for the representation and information management of construction elements, including those pertaining to existing buildings. Furthermore, Part 6 of UNI 11337 outlines the guidelines for drafting information specifications and technical requirements, providing useful indications for integrating survey data from existing structures into HBIM models.

structural data directly on physical buildings using devices such as headsets, tablets, or smart glasses¹⁷⁷. Already applied in restoration and retrofitting worksites, AR enables practitioners to compare the current state of a building with its digital model, superimposing structural analyses, risk simulations, and design instructions directly onto the real structure.

The combined use of VR and AR not only accelerates and enhances assessment accuracy but also overcomes the limitations of traditional representation and analysis methods, introducing a new level of interaction with the built environment. These technologies transform data into immersive, accessible experiences, marking a paradigm shift in the preservation and management of historic heritage and enabling more effective planning for seismic risk prevention and conservation strategies.

The true revolution in representing and analyzing structural vulnerability is being driven by Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning¹⁷⁸, which are radically transforming how data is processed, interpreted, and applied in seismic risk management. AI enables the rapid analysis of vast datasets, identifying correlations, vulnerability patterns, and evolving trends that would be difficult to detect through traditional methods. Deep learning algorithms trained on databases of historic buildings, construction types, and past seismic events can accurately predict a building's structural behavior during an earthquake, producing realistic simulations of seismic effects on structures with varying conditions and construction characteristics.

One of the most advanced applications of AI in digital surveying involves the automated analysis of photogrammetric images and 3D laser scans. Using Convolutional Neural Networks (CNNs), AI can automatically detect structural anomalies, cracks, wall deformations, and material decay with greater precision than traditional visual inspection. This accelerates the assessment process and reduces subjective error, allowing for the generation of detailed thematic maps of building conservation status.

Another emerging AI application in seismic risk involves continuous structural monitoring. By integrating IoT sensors, accelerometers, and predictive analytics, real-time variations in a building's dynamic response can be

¹⁷⁷ MARRA A. *ET AL.* (2024), *op. cit.* in bibliographic reference no. 63.

¹⁷⁸ Algorithms capable of learning from data and improving their performance without being explicitly programmed, using techniques such as supervised learning, unsupervised learning, and reinforcement learning.

detected, identifying potential structural issues before they become critical. This marks a transition from reactive to proactive risk management, through early warning systems capable of detecting degradation signals and recommending targeted interventions before significant damage occurs.

Soon, AI may become an indispensable tool in predictive heritage management, enabling damage forecasting and data-driven maintenance planning. As machine learning algorithms evolve, adaptive risk models will emerge, capable of continuously updating with new data, enhancing predictive capabilities, and optimizing conservation strategies.

The integration of GIS, BIM, VR, AR, and AI is redefining how seismic risk is addressed in historic centers, transforming vulnerability analysis into an interactive, predictive, and dynamic process. When used synergistically, these technologies not only enhance understanding of the built environment but also allow for scenario forecasting, optimization of consolidation efforts, and more effective heritage preservation.

The protection of historic buildings can no longer be conceived as a reactive, post-earthquake intervention. Instead, it must evolve into an integrated prevention and management system, equipped with tools that simultaneously interpret the past and predict the future of buildings with unprecedented precision. Digitalization is thus not merely a means of documentation, but a strategic resource that transforms data into knowledge and knowledge into action, providing practitioners and decision-makers with concrete tools to enhance the resilience of historic centers.

Ultimately, the real qualitative leap lies in the intelligent integration and management of data derived from these technologies, creating an interoperable and updatable data stream capable of supporting real-time decision-making. This is the future of seismic risk management: a data-driven approach where well-curated, interconnected information becomes the key to more effective and informed protection of our historic heritage.

Integrated data for smart seismic risk management

The analysis of seismic vulnerability in historic centers can no longer be approached through fragmented strategies. While digital technologies have enhanced the accuracy of surveying, modeling, and risk simulation, a true qualitative leap is achieved only when these tools are integrated into a unified, interoperable system. Digitalization has opened new opportunities, but the wealth of information collected risks becoming scattered and underutilized if not organized effectively. The integration of GIS, BIM, artificial intelligence, and monitoring technologies into a single platform transforms seismic risk knowledge from a static analytical task into a dynamic, predictive system capable of responding in real time to the needs of built heritage protection.

Interoperability is at the heart of this transformation. As previously discussed, GIS enables the mapping of seismic risk at territorial scales by integrating geological, historical, and urban planning data to highlight areas of greatest vulnerability. However, this spatial information must also be linked to the building scale this is where BIM comes into play. Connecting GIS with BIM allows for the transition from a generalized view of vulnerability to a specific understanding of each individual building, accounting for its construction, material, and structural characteristics. This linkage makes it possible not only to identify the urban areas most at risk, but also to pinpoint individual structures that may suffer the most severe damage in the event of an earthquake, thereby facilitating the planning of targeted mitigation strategies.

This integration between GIS and BIM has already been successfully implemented in various historic preservation projects. In several Italian historic centers – such as L’Aquila – this combination has enabled the creation of digital twins used to simulate risk scenarios and evaluate the effectiveness of preventive interventions. Yet, the true shift occurs with the integration of artificial intelligence (AI) and machine learning, which elevate these models from being merely informative to becoming predictive tools. While seismic vulnerability assessments have traditionally relied on static simulations, AI enables real-time processing of vast quantities of data, identifying risk patterns and producing forecasts based on past events and advanced numerical simulations. Deep learning algorithms can be trained to recognize features of

the most vulnerable buildings and predict their behavior during seismic events, facilitating the development of more effective prevention strategies.

A key innovation brought by AI in seismic risk management lies in its ability to analyze real-time data from IoT (Internet of Things) sensors. Advanced sensors installed in historic buildings can monitor structural oscillations, variations in temperature and humidity, or even micro-movements within masonry, issuing early warnings in the presence of anomalies. When this data is connected to BIM and GIS models, it becomes possible to implement early warning systems capable of signaling potential risk scenarios before structural collapse occurs.

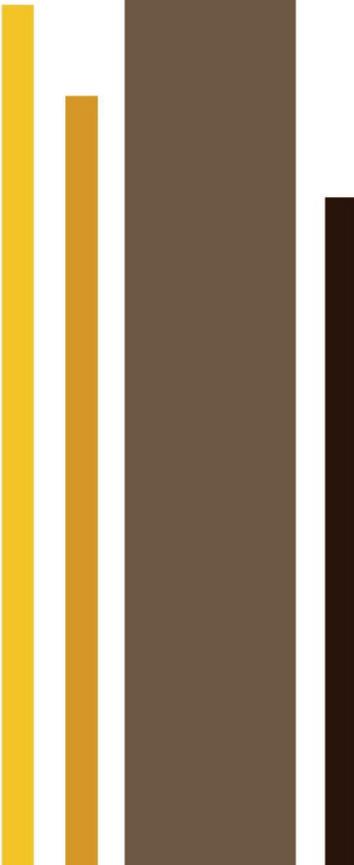
The integration of these technologies is giving rise to smart seismic risk management platforms where all collected data converge into a single digital environment. These platforms do not merely archive and visualize information; they enable advanced simulations and offer decision-support tools for planning consolidation interventions. Imagine a system where administrators of a historic center can access a real-time interactive map highlighting the most at-risk buildings, with direct access to detailed BIM models, up-to-date conservation status, live monitoring via sensors, and AI-generated suggestions for the most appropriate intervention strategies. This approach represents the future of built heritage protection and seismic risk prevention.

However, implementing such systems is not without challenges. One of the main obstacles is the need to standardize data and ensure interoperability among various software platforms. Many BIM and GIS models rely on proprietary formats that are not always mutually compatible, making integration complex. Furthermore, the large-scale adoption of AI systems requires robust computational infrastructure and extensive data management capacity factors that may pose barriers for local administrations and small historic centers with limited resources.

Despite these challenges, the future of seismic risk management in historic areas lies inevitably in the intelligent integration of data. The traditional model – based on static evaluations and post-event corrective actions – is being replaced by a more advanced approach, where risk knowledge is dynamic, continuously updated, and supported by predictive tools. This shift is not only technological but also methodological and cultural: it entails moving from a reactive emergency mindset to a preventive strategy based on objective, verifiable data.

This evolution toward smart seismic risk management represents a turning point in how we conceptualize the safety of historic heritage. While in the past, restoration and strengthening were isolated interventions, the current goal is to build an interconnected digital ecosystem where each building is not just a monument to preserve, but a node in an intelligent network that communicates, updates, and provides information to ensure its long-term conservation. Historic centers are no longer simply scenarios to be protected; they are complex systems to be managed with cutting-edge tools, where past and future converge within an innovative vision of heritage safeguarding.

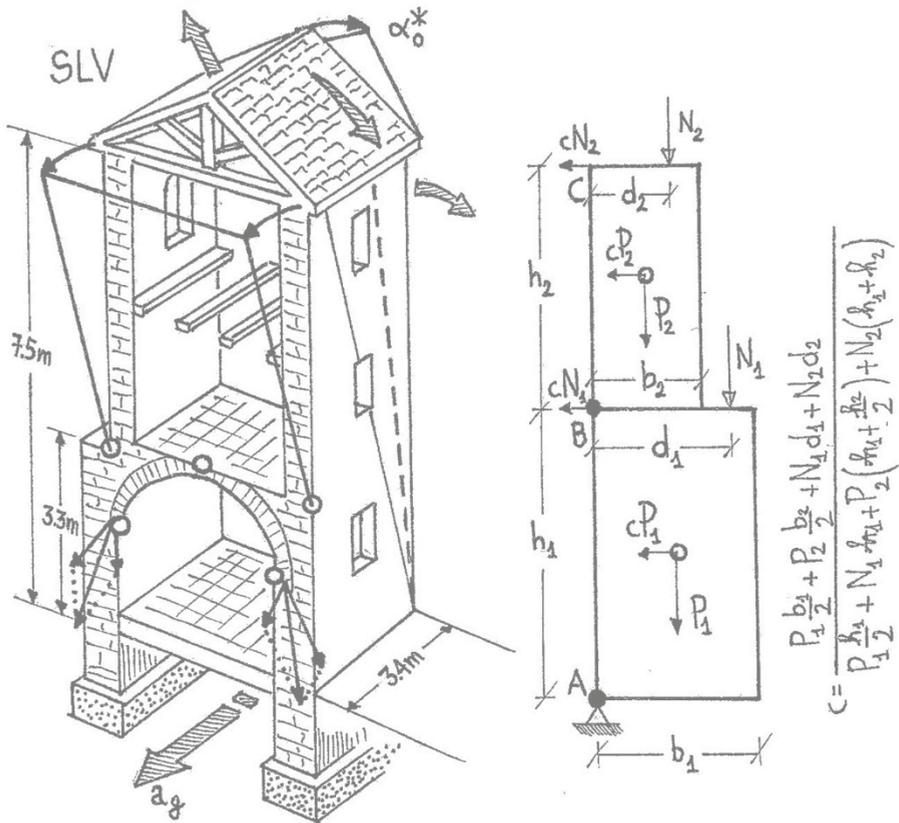
Thus, data integration is not merely a technical issue, but a new philosophy of intervention. The future of heritage protection will not be built solely with bricks and mortar, but also through data, algorithms, and intelligent models. The challenge has been launched, and technology is already prepared to meet it. It is now up to researchers, urban planners, administrators, and technical professionals to determine the best ways to leverage these innovations, turning knowledge into action, and prevention into a concrete strategy for ensuring the safety and resilience of the historic centers of tomorrow.



PARTE 3

PARTE 3

MASON UN NUOVO APPROCCIO BIM PER L'ANALISI MULTILIVELLO DELLA VULNERABILITÀ SISMICA



L'occhio non vede cose ma figure di cose che significano altre cose.

Italo Calvino

Meccanismi di collasso sismico negli edifici storici in muratura

L'analisi della vulnerabilità sismica degli edifici storici in muratura rappresenta un tema di fondamentale importanza per la gestione del rischio sismico, specialmente nei centri storici minori, dove il tessuto edilizio è costituito prevalentemente da edifici realizzati in epoche prive di criteri antisismici codificati. Come discusso nella Prima Parte, la fragilità di questi centri non è solo una questione strutturale, ma coinvolge anche aspetti urbanistici, normativi e socioeconomici. Gli eventi sismici che hanno colpito l'Italia negli ultimi decenni hanno evidenziato, con drammatica chiarezza, la vulnerabilità diffusa di questi contesti, in cui il crollo di edifici ha avuto ripercussioni non solo sulla sicurezza delle persone, ma anche sulla perdita di un patrimonio architettonico e culturale di inestimabile valore.

Uno degli aspetti più critici della valutazione della vulnerabilità è rappresentato dalla difficoltà di ricostruire la storia costruttiva di questi edifici, spesso soggetti a stratificazioni, trasformazioni e interventi successivi che hanno modificato il loro assetto originario. La coesistenza di materiali e tecniche costruttive differenti, la presenza di elementi strutturali con livelli di degrado variabili e la scarsità di informazioni documentali rendono complessa la definizione di modelli affidabili per la previsione della risposta sismica. In questo contesto, la digitalizzazione dei centri storici, trattata nella Seconda Parte, rappresenta un'opportunità innovativa per la gestione delle informazioni, poiché permette di integrare dati geometrici, materici e strutturali all'interno di modelli informativi avanzati.

Tuttavia, affinché questi strumenti possano essere realmente efficaci, è necessario partire da una conoscenza approfondita delle modalità di collasso che caratterizzano gli edifici storici in muratura. L'esperienza ha dimostrato che, nella maggior parte dei casi, il crollo di edifici storici non avviene per il

cedimento simultaneo dell'intera struttura, ma piuttosto attraverso l'attivazione di meccanismi locali di collasso. In particolare, i cinematismi fuori piano rappresentano una delle principali cause di dissesto, poiché si innescano in porzioni murarie scarsamente collegate al resto dell'edificio, come facciate, timpani e cantonali. Questi meccanismi possono svilupparsi in diverse modalità, a seconda delle caratteristiche geometriche e costruttive dell'edificio, e spesso si verificano prima ancora che la struttura possa manifestare una risposta globale alle azioni sismiche.

Per comprendere la vulnerabilità degli edifici che caratterizzano i centri storici e sviluppare strategie di mitigazione efficaci, è dunque essenziale analizzare nel dettaglio i fattori che favoriscono l'attivazione dei cinematismi fuori piano e le loro modalità di sviluppo. La capacità di prevedere questi meccanismi e di integrarli nei modelli digitali avanzati rappresenta un passaggio chiave per migliorare le metodologie di valutazione del rischio e per progettare interventi mirati alla salvaguardia del patrimonio costruito.

Fragilità nascoste: vulnerabilità strutturali degli edifici in muratura

Comprendere i meccanismi di collasso è il primo passo per analizzare in profondità le vulnerabilità degli edifici dei centri storici. Dietro l'apparente solidità di queste costruzioni, si celano fragilità strutturali spesso difficili da individuare, ma determinanti nel comportamento sismico dell'edificio. È quindi essenziale esaminare nel dettaglio gli elementi critici che ne influenzano la risposta alle sollecitazioni, approfondendo le debolezze intrinseche dei materiali, delle connessioni e delle configurazioni costruttive. Nei centri storici, la configurazione aggregata degli edifici¹⁷⁹ è una condizione estremamente diffusa, ma rappresenta una delle principali criticità in caso di evento sismico. Uno dei fenomeni più critici in questo contesto è il martellamento sismico, che si verifica quando edifici adiacenti con differenti periodi propri di

¹⁷⁹ Un aggregato strutturale è un insieme di edifici adiacenti, realizzati in epoche diverse e con tecniche costruttive non coordinate, che condividono elementi strutturali come muri portanti, solai e coperture. Questi edifici, tipici dei centri storici, non sono stati progettati come un'unica entità strutturale, il che genera disomogeneità nelle risposte meccaniche e dinamiche, rendendoli particolarmente vulnerabili agli eventi sismici.

vibrazione oscillano fuori fase uno rispetto all'altro. Se lo spazio tra le strutture è insufficiente o nullo, si generano impatti reciproci che possono provocare il collasso di porzioni murarie, il danneggiamento delle coperture e il cedimento locale di elementi strutturali. Gli urti ripetuti possono inoltre causare fenomeni di degrado progressivo, con la formazione di lesioni nei punti di contatto che riducono ulteriormente la capacità strutturale dell'edificio nel tempo. Questo fenomeno è particolarmente pericoloso quando gli edifici presentano differenze marcate in termini di altezza e rigidità laterale, poiché le forze di impatto si concentrano su porzioni limitate delle pareti, creando tensioni elevate e localizzate. L'intensità degli effetti di martellamento dipende non solo dalle caratteristiche geometriche e strutturali degli edifici, ma anche dalla direzione del sisma, dal contenuto in frequenza del moto del suolo e dalle condizioni al contorno dell'aggregato edilizio. Oltre al martellamento, un altro aspetto fondamentale della vulnerabilità degli edifici aggregati è la distribuzione disomogenea delle rigidità. La presenza di edifici con schemi strutturali differenti, murature di varia qualità e spessori eterogenei crea discontinuità nel trasferimento delle forze sismiche, con il rischio di accumuli di tensione in specifiche zone critiche. Ad esempio, se un edificio con pareti rigide è affiancato a una costruzione più deformabile, l'interazione tra i due può causare instabilità, favorendo il distacco delle pareti meno resistenti o il sovraccarico degli elementi più rigidi. L'asimmetria nella distribuzione della rigidità può inoltre provocare effetti torsionali indesiderati, aumentando la sollecitazione sulle pareti ortogonali e rendendo più probabili i collassi fuori piano. Un ulteriore fattore di criticità è rappresentato dall'assenza di giunti strutturali, che impedisce un comportamento indipendente degli edifici aggregati e ne altera il modo di risposta dinamica. In un sistema in cui le costruzioni sono connesse senza dettagli strutturali progettati per trasferire correttamente le forze, i carichi sismici possono essere ridistribuiti in modo imprevedibile, sovraccaricando alcune porzioni dell'aggregato. Questo effetto è amplificato dalla varietà dei materiali impiegati nelle diverse fasi costruttive: edifici realizzati con murature di diversa qualità e composizione possono avere risposte sismiche differenti, generando scompensi nelle tensioni interne e comportamenti di collasso non uniformi. Ad esempio, una costruzione con murature in pietra non legata a un edificio in laterizio potrebbe subire un collasso precoce, inducendo il crollo progressivo dell'intero aggregato.

L'alterazione della trasmissione delle vibrazioni all'interno dell'aggregato edilizio rappresenta un ulteriore meccanismo di vulnerabilità. Gli edifici con caratteristiche meccaniche differenti assorbono e trasmettono l'energia sismica in modi non uniformi, creando accumuli di energia cinetica in punti specifici. Quando le onde sismiche attraversano materiali con densità e moduli elastici differenti, possono verificarsi fenomeni di amplificazione locale che incrementano il rischio di danno strutturale. L'assenza di connessioni efficaci tra i materiali incrementa inoltre il rischio di distacchi progressivi, specialmente in presenza di pareti non perfettamente ortogonali o con stratificazioni costruttive successive. L'identificazione di queste problematiche richiede strumenti di indagine avanzati, in grado di analizzare la risposta dinamica delle strutture e individuare le criticità più rilevanti. I rilievi laser scanner e la fotogrammetria ad alta risoluzione permettono di ottenere modelli tridimensionali dettagliati delle strutture, evidenziando le discontinuità geometriche e le possibili aree di interazione tra edifici. L'uso di accelerometri e sensori sismici consente di registrare la risposta dinamica degli edifici, determinando i periodi propri di vibrazione e identificando eventuali anomalie nella trasmissione delle onde sismiche.

Le vulnerabilità specifiche delle murature rappresentano un aspetto determinante nella valutazione della resistenza sismica degli edifici storici, poiché influiscono direttamente sulla capacità della struttura di assorbire e dissipare l'energia sismica. La muratura è un materiale non omogeneo e anisotropo, la cui risposta meccanica dipende da molteplici fattori, tra cui la qualità dei materiali impiegati, le modalità costruttive e le condizioni di degrado. Un primo elemento di criticità è la qualità eterogenea dei materiali, che è spesso legata all'impiego di tecniche costruttive empiriche e alla disponibilità locale di risorse. Le murature in pietrame irregolare, tipiche di molte aree storiche italiane, presentano una tessitura discontinua, con elementi lapidei di forma variabile assemblati con malte spesso incoerenti. Questo tipo di muratura ha una capacità di resistenza a taglio e compressione significativamente inferiore rispetto a murature in laterizio ben regolarizzate. Inoltre, la forma e la disposizione disordinata degli elementi favoriscono la formazione di vuoti e discontinuità interne, che riducono la capacità portante della struttura e aumentano la probabilità di collasso locale sotto sollecitazioni orizzontali. Diversamente, le murature in laterizio pieno presentano generalmente una maggiore regolarità strutturale e una migliore distribuzione degli sforzi, ma possono risultare

particolarmente vulnerabili in presenza di malte deteriorate o giunti deboli. Quando il rapporto tra altezza e spessore delle pareti è sfavorevole, queste possono essere soggette a fenomeni di instabilità fuori piano, aumentando il rischio di crolli parziali o totali durante un sisma. Un altro fattore di estrema rilevanza è il degrado delle malte, che influisce direttamente sulla coesione tra i blocchi e sulla capacità della muratura di mantenere un comportamento monolitico sotto sollecitazione. Le malte storiche erano generalmente a base di calce, il cui processo di indurimento avveniva lentamente attraverso la carbonatazione, un processo chimico che può essere compromesso da fattori ambientali. Con il passare del tempo, il legante tende a perdere la sua capacità adesiva a causa di fenomeni di dissoluzione, erosione e cristallizzazione dei sali, specialmente in presenza di umidità ascendente o infiltrazioni d'acqua. Questo degrado progressivo porta alla riduzione della resistenza a taglio della muratura, aumentando la probabilità di perdita di coesione tra i blocchi e innescando fenomeni di fessurazione o distacco degli strati superficiali. Un fenomeno particolarmente insidioso è rappresentato dalla cristallizzazione dei sali, che si verifica attraverso cicli di dissoluzione e precipitazione. In presenza di umidità, i sali solubili contenuti nei materiali da costruzione o trasportati dall'acqua possono penetrare nei pori della muratura e cristallizzarsi a seguito dell'evaporazione dell'acqua. Questo processo genera pressioni interne che provocano la disgregazione progressiva della muratura, con distacchi di intonaci e perdita di materiale superficiale. I cicli di imbibizione e asciugatura accelerano questo fenomeno, rendendo le murature particolarmente vulnerabili agli effetti meccanici delle sollecitazioni sismiche. L'assenza di ammorsamenti efficaci tra le pareti ortogonali rappresenta una delle principali cause di collasso fuori piano negli edifici storici. Le murature, in molti casi, sono semplicemente accostate senza una connessione strutturale adeguata, e questo comporta un comportamento indipendente delle pareti sotto azione sismica. In particolare, le pareti di facciata e quelle di testa sono soggette a ribaltamento fuori piano, un meccanismo di collasso molto frequente nei centri storici colpiti da eventi sismici¹⁸⁰. In alcuni casi, il distacco progressivo delle pareti può verificarsi anche a causa della presenza di solai debolmente connessi, che non garantiscono un'adeguata distribuzione delle

¹⁸⁰ Studi sperimentali su tavola vibrante hanno dimostrato che in assenza di un adeguato ammorsamento, la resistenza della muratura alle sollecitazioni fuori piano può essere ridotta fino al 70%.

forze orizzontali. Un ulteriore aspetto di vulnerabilità è rappresentato dalla presenza di stratificazioni successive nei materiali, dovute a interventi di modifica nel tempo. Negli edifici storici, le tecniche costruttive spesso prevedevano aggiunte, sopraelevazioni o sostituzioni di parti strutturali con materiali diversi da quelli originari. Questo porta alla formazione di murature miste, con differenti livelli di rigidità e resistenza meccanica, che possono generare concentrazioni di tensioni e fenomeni di dissesto localizzato. Le analisi con termografia evidenziano spesso la presenza di stratificazioni costruttive non visibili esternamente, che possono influenzare la risposta sismica della struttura¹⁸¹. Dal punto di vista della valutazione della vulnerabilità, le murature devono essere analizzate attraverso una combinazione di metodi diretti e indiretti. Le prove non distruttive, come la termografia a infrarossi e le indagini soniche e ultrasoniche, consentono di individuare le discontinuità interne e le eventuali zone di degrado. Le prove meccaniche su campioni prelevati *in situ* permettono di determinare la resistenza a compressione e a taglio della muratura, fornendo dati utili per la modellazione strutturale.

Un altro elemento determinante nella risposta sismica degli edifici storici in muratura è la geometria delle aperture nelle murature portanti. La disposizione, le dimensioni e la distribuzione delle aperture influenzano direttamente il comportamento strutturale delle pareti, determinando la capacità della muratura di resistere alle sollecitazioni orizzontali e verticali. In particolare, il disallineamento delle aperture tra i diversi piani rappresenta una delle cause più frequenti di concentrazione delle tensioni e di formazione di meccanismi di collasso locale. Quando le finestre e le porte non sono allineate lungo l'altezza dell'edificio, la trasmissione dei carichi verticali viene alterata, generando punti di discontinuità strutturale in cui si accumulano sforzi elevati. Questo fenomeno è particolarmente evidente nei maschi murari residui¹⁸², che risultano notevolmente indeboliti. I maschi murari snelli, caratterizzati da un rapporto sfavorevole tra altezza e larghezza, sono soggetti a instabilità e presentano una ridotta capacità di resistenza alle sollecitazioni orizzontali, aumentando il rischio di espulsione fuori piano sotto azioni sismiche¹⁸³. La

¹⁸¹ In alcuni casi, la presenza di giunti deboli tra murature di diversa epoca costruttiva facilita il distacco e il collasso parziale delle pareti, soprattutto in presenza di sollecitazioni orizzontali di elevata intensità.

¹⁸² Ossia le porzioni di muratura comprese tra due aperture successive.

¹⁸³ Gli studi sperimentali condotti su modelli di muratura con aperture disallineate hanno evidenziato che la presenza di interruzioni nella continuità strutturale induce significative

mancata trasmissione dei carichi in modo uniforme lungo le pareti porta, inoltre, alla formazione di cinematismi di collasso fuori piano, per cui le porzioni murarie si distaccano progressivamente dalla struttura principale e tendono a ribaltarsi. Un ulteriore aspetto di vulnerabilità è rappresentato dalla presenza di grandi aperture. Le pareti portanti svolgono un ruolo fondamentale nella stabilità dell'edificio, contribuendo alla resistenza alle sollecitazioni orizzontali e alla distribuzione dei carichi verticali. Quando la superficie muraria viene ridotta in modo significativo dall'inserimento di ampie aperture, la capacità della parete di assorbire le forze sismiche diminuisce drasticamente. Se le aperture non sono adeguatamente controventate, si verificano concentrazioni di sforzi ai bordi delle aperture stesse, con un aumento del rischio di fessurazioni e cedimenti localizzati. In particolare, nei casi in cui le aperture occupano una porzione rilevante della parete, la rigidità della muratura si riduce sensibilmente, portando a un incremento degli spostamenti laterali sotto l'azione del sisma¹⁸⁴. Un altro fattore critico è rappresentato dagli interventi successivi di modifica delle aperture, come l'ampliamento di finestre esistenti o la creazione di nuovi accessi. Spesso, questi interventi vengono realizzati senza una progettazione strutturale adeguata, compromettendo la stabilità della parete e alterando la distribuzione delle sollecitazioni. L'eliminazione di porzioni murarie senza un adeguato rinforzo strutturale può portare a una drastica riduzione della capacità resistente della muratura. Inoltre, in assenza di un adeguato trasferimento dei carichi, le nuove aperture possono innescare fenomeni di cedimento progressivo, con il rischio di collasso dell'intera parete¹⁸⁵. Per la valutazione della vulnerabilità legata alla

variazioni negli stati tensionali. Le analisi agli elementi finiti (FEM) mostrano che, nei punti di discontinuità, si concentrano elevate tensioni di trazione e taglio, che possono superare la resistenza a trazione della muratura stessa, causando la formazione di fessure verticali e la successiva espulsione dei maschi murari.

¹⁸⁴ Le simulazioni numeriche dimostrano che le pareti con una percentuale di aperture superiore al 30% della superficie totale presentano una riduzione significativa della capacità portante e un aumento della vulnerabilità ai meccanismi di collasso fuori piano. La stabilità di queste pareti dipende fortemente dalla presenza di elementi di irrigidimento, come architravi efficaci, cerchiate in acciaio o controventi in muratura armata.

¹⁸⁵ Le indagini sperimentali hanno evidenziato che la realizzazione di aperture in murature portanti senza adeguati accorgimenti strutturali può ridurre fino al 50% la capacità di resistenza a taglio della parete. In particolare, nei casi in cui le aperture sono realizzate in murature già degradate o caratterizzate da una scarsa qualità del legante, il rischio di fessurazioni e distacchi localizzati aumenta in modo significativo.

geometria delle aperture, si utilizzano diversi metodi di indagine. I rilievi laser scanner e la fotogrammetria permettono di ottenere modelli tridimensionali dettagliati delle pareti, evidenziando la distribuzione e le dimensioni delle aperture. Le analisi termografiche e le indagini soniche consentono di individuare eventuali discontinuità strutturali e di verificare la presenza di punti critici nella trasmissione dei carichi. Mentre le prove meccaniche *in situ* forniscono informazioni sulla capacità portante residua della muratura.

I solai rivestono un ruolo fondamentale nella risposta sismica degli edifici storici in muratura, poiché contribuiscono alla distribuzione delle forze orizzontali e al comportamento solidale delle pareti portanti. Tuttavia, negli edifici storici i solai presentano spesso una serie di criticità strutturali che ne riducono l'efficacia, rendendoli vulnerabili agli effetti delle azioni sismiche. La loro conformazione, la qualità dei materiali impiegati e la modalità di connessione con le murature influiscono direttamente sulla capacità globale dell'edificio di resistere alle sollecitazioni dinamiche. Uno dei problemi più comuni nei solai storici riguarda l'assenza di collegamenti efficaci con le murature portanti. In molti edifici in muratura tradizionale, i solai in legno sono semplicemente appoggiati su nicchie ricavate all'interno delle pareti, senza essere adeguatamente ammortati o ancorati con sistemi di incastro o connessioni rigide. Questa configurazione limita la capacità del solaio di funzionare come un diaframma rigido, fondamentale per trasferire le forze sismiche tra le pareti perimetrali e garantire un comportamento solidale dell'intero edificio. In assenza di un'adeguata connessione, il sisma può generare spostamenti indipendenti tra i diversi elementi della struttura, favorendo l'innescò di cinematismi di collasso fuori piano delle pareti e riducendo drasticamente la stabilità globale della costruzione. Le indagini sperimentali hanno dimostrato che i solai in legno, se non adeguatamente collegati alle murature, possono subire scorrimenti differenziali rispetto alle pareti portanti, compromettendo la capacità di trasferire le forze orizzontali¹⁸⁶. Un altro aspetto critico è rappresentato dal disallineamento tra i solai ai diversi piani, una caratteristica molto diffusa negli edifici storici a causa di modifiche e sopraelevazioni effettuate nel tempo. La presenza di solai a quote differenti crea discontinuità

¹⁸⁶ Gli studi condotti su tavole vibranti e modellazioni numeriche agli elementi finiti (FEM) evidenziano che l'assenza di collegamenti rigidi tra solai e murature comporta un aumento significativo degli spostamenti laterali, con una conseguente amplificazione degli effetti sismici locali.

strutturali che alterano la trasmissione delle forze sismiche lungo l'altezza dell'edificio. Questo fenomeno è particolarmente evidente nelle configurazioni in cui i solai sono disposti a livelli sfalsati tra pareti ortogonali, generando una trasmissione irregolare degli sforzi e favorendo l'innescò di cedimenti localizzati. L'asimmetria introdotta dal disallineamento tra solai può inoltre determinare effetti torsionali indesiderati, con un aumento delle sollecitazioni su specifiche pareti o porzioni di edificio¹⁸⁷. La conseguenza più evidente è la formazione di crepe verticali lungo le murature portanti e il rischio di separazione tra porzioni di edificio che rispondono in modo differente alle sollecitazioni sismiche. Un ulteriore elemento di vulnerabilità è rappresentato dalle volte in laterizio, spesso impiegate nei solai storici, specialmente negli edifici di pregio architettonico. Le volte, sebbene possano offrire una maggiore rigidità rispetto ai solai lignei, sono soggette a fenomeni di instabilità, se non adeguatamente contrastate da sistemi di contenimento come catene metalliche o tiranti. L'assenza di questi elementi porta a un incremento delle spinte orizzontali sulle pareti d'appoggio, favorendo fenomeni di espulsione e ribaltamento fuori piano. Le volte a botte o a crociera, in particolare, presentano un elevato rischio di collasso per instabilità quando i vincoli laterali non sono sufficientemente resistenti a contrastare le spinte generate dal proprio peso e dalle azioni sismiche. Per la valutazione della vulnerabilità dei solai negli edifici storici, vengono utilizzati diversi strumenti di indagine. Le indagini endoscopiche consentono di analizzare le connessioni tra solai e murature, mentre le analisi dinamiche mediante accelerometri permettono di determinare la risposta vibratoria dell'edificio e di individuare eventuali fenomeni di disaccoppiamento strutturale.

Le coperture, influenzando direttamente la loro risposta sismica, rappresentano un elemento strutturale di primaria importanza negli edifici storici. Esse svolgono un ruolo fondamentale nella distribuzione dei carichi verticali e, in condizioni ottimali, possono contribuire al controvento dell'intero edificio, irrigidendo la struttura e riducendo il rischio di meccanismi di collasso locale. Tuttavia, negli edifici storici, le coperture presentano spesso una serie di vulnerabilità che ne compromettono la capacità di resistere agli effetti dinamici del sisma, aumentando il rischio di collasso o danneggiamento grave delle

¹⁸⁷ Le prove sperimentali hanno dimostrato che negli edifici con solai disallineati si verifica una riduzione della capacità globale della struttura fino al 30% rispetto a edifici con solai ben distribuiti e correttamente collegati alle pareti portanti.

strutture sottostanti. Uno degli aspetti più critici riguarda le spinte orizzontali esercitate dalle coperture sulle pareti di sommità. Le coperture a falde in legno, tipiche degli edifici storici, sono costituite da un sistema di travi principali e secondarie che reggono un tavolato o un sistema di arcarecci, spesso privi di collegamenti adeguati con le murature perimetrali. In assenza di sistemi di contrasto adeguati, come catene metalliche, tiranti o cordoli in muratura armata, il peso della copertura e le sollecitazioni trasmesse dal sisma generano forze orizzontali che possono provocare l'espulsione o il ribaltamento delle pareti di sommità, in particolare dei timpani¹⁸⁸. Un altro aspetto di grande rilevanza è il degrado degli elementi lignei della copertura, che può compromettere la resistenza strutturale dell'intero sistema. Il legno, essendo un materiale igroscopico, è soggetto a fenomeni di degrado biologico, tra cui attacchi di funghi, insetti xilofagi e marcescenza, che riducono progressivamente la capacità meccanica delle travi portanti. La presenza di nodi, fessurazioni o degrado localizzato nei punti di appoggio delle travi accentua ulteriormente la vulnerabilità, specialmente in condizioni dinamiche imposte da un sisma. Un ulteriore fattore di criticità è legato alla assenza di sistemi di controvento efficaci all'interno della copertura stessa. Le coperture tradizionali spesso non prevedevano elementi di irrigidimento trasversale, affidandosi unicamente alla resistenza delle connessioni tra le travi principali e secondarie. In caso di evento sismico, l'assenza di controventi diagonali nel piano della copertura e di un'efficace connessione tra i diversi elementi strutturali può portare a deformazioni e spostamenti incontrollati che compromettono la stabilità globale del tetto. Inoltre, se le travi non sono adeguatamente collegate tra loro e alle murature perimetrali, il tetto può subire rotazioni e movimenti differenziali che generano accumuli di tensione nelle pareti sottostanti, amplificando il rischio di dissesti. Le coperture voltate, presenti in molti edifici storici monumentali, presentano ulteriori vulnerabilità, legate principalmente alle spinte laterali esercitate dalle volte sulle pareti d'appoggio. In assenza di catene metalliche o tiranti, le volte possono innescare un progressivo allontanamento delle murature portanti, causando l'innescare di fessurazioni e il successivo collasso della copertura. Per la valutazione della vulnerabilità delle coperture è necessario ricorrere a tecniche di rilievo avanzate. L'utilizzo di rilievi laser scanner e termografia ad infrarossi permette di

¹⁸⁸ Questo fenomeno è stato ampiamente documentato in edifici colpiti da eventi sismici, dove il collasso dei timpani è spesso uno dei primi meccanismi di dissesto osservabili.

individuare eventuali deformazioni o discontinuità nelle strutture lignee, mentre le prove soniche e ultrasoniche consentono di valutare la qualità del materiale e la presenza di degrado non visibile ad occhio nudo.

Gli elementi di collegamento verticale, come le scale interne ed esterne, rappresentano uno dei punti critici nella risposta sismica degli edifici storici. Le scale svolgono un ruolo fondamentale nella distribuzione dei carichi verticali e, se ben integrate nel sistema strutturale, possono contribuire a migliorare la rigidità dell'edificio. Tuttavia, nelle costruzioni storiche, la loro progettazione non ha tenuto conto delle sollecitazioni orizzontali indotte dal sisma, rendendole particolarmente vulnerabili. La mancanza di adeguati collegamenti con le pareti portanti, la discontinuità strutturale che introducono nel sistema edificio e la loro configurazione geometrica sono tra i principali fattori che ne determinano la debolezza. Uno degli aspetti più critici riguarda le scale in muratura, che, se non adeguatamente ammorsate alle pareti portanti, possono crollare indipendentemente dal resto della struttura. Questo avviene perché, in assenza di un efficace ancoraggio, la scala non riesce a trasmettere le forze orizzontali alle pareti adiacenti, comportandosi come un elemento isolato. Il sisma genera oscillazioni che amplificano il rischio di distacco della scala dalla struttura principale, con conseguente crollo improvviso. Le scale a rampa unica e le scale a due rampe con pianerottolo intermedio sono tra le più vulnerabili, soprattutto quando il pianerottolo non è adeguatamente vincolato. Durante un sisma, le oscillazioni del pianerottolo possono generare rotture nei punti di contatto tra la scala e la parete, portando a instabilità e possibili crolli. Inoltre, il peso proprio della muratura, combinato con l'assenza di giunti strutturali progettati per assorbire le deformazioni sismiche, può contribuire alla propagazione delle lesioni lungo la struttura della scala, fino al suo completo collasso. Le scale a sbalzo, frequentemente impiegate negli edifici storici con gradini in pietra o in laterizio ancorati direttamente alle pareti, presentano una vulnerabilità ancora maggiore. Il loro funzionamento strutturale si basa sulla resistenza a compressione della muratura e sull'ammorsamento dei gradini nelle pareti portanti. Tuttavia, se la muratura presenta degrado o se il sisma induce spostamenti relativi tra le pareti a cui i gradini sono ancorati, si può verificare la perdita di appoggio, con conseguente collasso progressivo della scala. L'assenza di un ancoraggio efficace tra i gradini e la muratura limita inoltre la capacità della scala di dissipare l'energia sismica, esponendola a un elevato rischio di distacco locale. Le scale

a chiocciola, pur presentando una maggiore continuità strutturale rispetto alle scale a sbalzo, sono particolarmente vulnerabili quando la colonna centrale è realizzata in muratura o in materiali lapidei senza un adeguato rinforzo. La trasmissione delle forze sismiche lungo la struttura elicoidale può generare tensioni anomale nei punti di connessione tra i gradini e il nucleo centrale, portando alla rottura e al successivo crollo della scala. Inoltre, in edifici con più livelli, la presenza di una scala a chiocciola non controventata può amplificare gli effetti torsionali dell'edificio, aumentando il rischio di danni strutturali generalizzati. Un altro aspetto rilevante è il ruolo delle scale nella propagazione dei danni all'interno dell'edificio. Durante un sisma, le scale possono diventare punti di concentrazione delle sollecitazioni, favorendo il trasferimento delle forze orizzontali dalle pareti alle strutture circostanti. In particolare, se la scala è rigida ma non ben integrata nel comportamento globale dell'edificio, può generare effetti di contrasto che aumentano le sollecitazioni su pareti e solai, causando fessurazioni e collassi locali. Al contrario, scale particolarmente deformabili, come quelle in legno, possono subire elevati spostamenti relativi, compromettendo la sicurezza degli occupanti e la stabilità dell'edificio nel suo complesso.

Per valutare la vulnerabilità delle scale negli edifici storici, è necessario ricorrere a tecniche di indagine avanzate.

Gli edifici storici hanno spesso subito trasformazioni e modifiche nel corso dei secoli, adattandosi alle esigenze funzionali e abitative delle diverse epoche. Tali modifiche, che includono sopraelevazioni, ampliamenti e l'inserimento di nuovi elementi strutturali, costituiscono un fattore di vulnerabilità sismica significativo, in quanto alterano il comportamento globale dell'edificio senza essere necessariamente accompagnate da interventi strutturali adeguati. Uno dei principali problemi legati a queste trasformazioni è l'incremento delle masse in movimento durante un evento sismico. L'aggiunta di piani superiori, senza un adeguato rinforzo strutturale delle murature esistenti, aumenta le sollecitazioni sulle pareti portanti e sulle fondazioni, rendendole più suscettibili a cedimenti o collassi parziali. La massa aggiuntiva, infatti, incrementa l'accelerazione sismica indotta sull'edificio, generando forze d'inerzia più elevate che si trasmettono ai piani inferiori, sovraccaricando murature già potenzialmente indebolite da fenomeni di degrado o da carenze costruttive. Un altro aspetto critico riguarda l'uso di materiali moderni e non compatibili con le tecnologie costruttive originarie, che può generare

discontinuità strutturali con effetti deleteri sulla risposta sismica dell'edificio. Ad esempio, sopraelevazioni realizzate in cemento armato su murature portanti in pietra o laterizio introducono forti variazioni di rigidità tra i diversi livelli, creando punti critici in cui si concentrano le sollecitazioni. La rigidità molto maggiore del calcestruzzo rispetto alla muratura storica provoca un'alterazione della distribuzione delle forze sismiche, con il rischio di sollecitare eccessivamente il piano di interfaccia tra la nuova costruzione e l'esistente¹⁸⁹. Inoltre, le trasformazioni successive possono causare effetti torsionali indesiderati, specialmente quando le sopraelevazioni non sono simmetriche rispetto al baricentro dell'edificio. L'aggiunta di volumi su un solo lato della struttura, alterando il comportamento dinamico dell'edificio e inducendo movimenti torsionali durante il sisma, porta a una distribuzione asimmetrica delle masse e delle rigidità. Questo fenomeno è particolarmente pericoloso negli edifici con pianta allungata o irregolare, dove il momento torcente generato dallo sbilanciamento delle masse può accentuare gli spostamenti differenziali tra le pareti. Oltre alle sopraelevazioni, anche l'inserimento di superfetazioni – come terrazze, tettoie, corpi scala esterni o nuove aperture – rappresenta un ulteriore fattore di vulnerabilità. Questi interventi, se non progettati correttamente, modificano i percorsi di trasmissione dei carichi all'interno dell'edificio, introducendo discontinuità e zone di concentrazione degli sforzi.

In ultimo, le fondazioni rappresentano uno degli elementi più critici negli edifici storici, in quanto costituiscono il collegamento tra la struttura e il terreno e influenzano direttamente la risposta sismica dell'edificio. Tuttavia, le tecniche costruttive storiche non prevedevano soluzioni progettuali specifiche per garantire una resistenza adeguata alle sollecitazioni sismiche. La tipologia di fondazione, la sua qualità costruttiva e le condizioni geotecniche del sottosuolo sono fattori che possono determinare cedimenti differenziali, instabilità locali e, nei casi più gravi, il collasso dell'intera struttura. Nella maggior parte dei casi, gli edifici storici presentano fondazioni in muratura a sacco o in pietrame irregolare, spesso prive di elementi di connessione efficaci con la muratura soprastante. Le murature a sacco sono costituite da due paramenti

¹⁸⁹ Questo effetto è stato osservato in numerose simulazioni numeriche FEM (*Finite Element Method*), in cui l'aggiunta di elementi rigidi ai livelli superiori ha generato concentrazioni di tensione nei piani inferiori, portando alla formazione di fessurazioni e meccanismi di collasso locali.

esterni in pietra o laterizio con un nucleo interno riempito con materiale sciolto e malta di scarsa qualità. Questa configurazione, pur garantendo una certa capacità portante in condizioni statiche, risulta particolarmente vulnerabile agli effetti dinamici del sisma, poiché il materiale interno può subire perdita di coesione e disgregazione sotto l'azione delle vibrazioni sismiche. Un'altra problematica riguarda la scarsa profondità delle fondazioni storiche, che in molti casi si trovano direttamente appoggiate sul terreno senza un adeguato ancoraggio o senza strati di consolidamento del sottosuolo. Questo rende la struttura sensibile alle variazioni del contenuto d'acqua nel terreno, che possono generare fenomeni di ritiro e rigonfiamento del suolo, causando deformazioni e cedimenti differenziali. Questi cedimenti si manifestano con fessurazioni nelle murature portanti, distacchi tra le pareti e i solai, e inclinazioni progressive dell'edificio, compromettendo la stabilità globale della struttura. Nei terreni argillosi, la variazione stagionale dell'umidità può determinare movimenti del suolo che, nel lungo periodo, indeboliscono la capacità portante delle fondazioni, favorendo la formazione di crepe e il degrado delle murature. Un altro fattore critico è la mancanza di collegamenti efficaci tra le fondazioni e la struttura in elevazione. Negli edifici moderni, le fondazioni sono progettate per trasferire in modo uniforme i carichi e distribuire le forze orizzontali generate da un sisma. Negli edifici storici, invece, le fondazioni erano spesso realizzate con tecniche empiriche, senza una connessione rigida con le murature soprastanti. In caso di evento sismico, questa discontinuità strutturale può causare il distacco delle pareti portanti dalle fondazioni, portando a collassi localizzati o all'innescò di cinematismi fuori piano. La vulnerabilità delle fondazioni può essere aggravata dalla presenza di cavità sotterranee o fenomeni di erosione del terreno. In molti centri storici, il sottosuolo è caratterizzato dalla presenza di cripte, cunicoli, cisterne o cavità antropiche, che possono influenzare la capacità portante del terreno e creare zone di instabilità. L'azione dell'acqua, attraverso processi di erosione o filtrazione, può ridurre ulteriormente la coesione del suolo, generando sprofondamenti localizzati o cedimenti progressivi. Nei casi più gravi, questi fenomeni possono portare al collasso delle fondazioni e all'improvviso crollo dell'edificio. Per analizzare le condizioni delle fondazioni e il loro comportamento sotto carico sismico, si utilizzano diverse tecniche di indagine avanzate

come indagini geofisiche¹⁹⁰, prove penetrometriche e sondaggi geotecnici, monitoraggi con inclinometri e livelli topografici.

Queste problematiche, se considerate nel loro insieme, delineano un quadro di elevata vulnerabilità sismica per gli edifici storici nei centri minori, rendendo imprescindibile un'analisi dettagliata delle loro debolezze strutturali. L'approccio tradizionale di valutazione empirica, basato sull'osservazione visiva dei dissesti, deve oggi essere integrato con strumenti avanzati di modellazione numerica, in grado di prevedere la risposta sismica dell'edificio attraverso simulazioni dinamiche e analisi cinematiche. La corretta identificazione delle vulnerabilità è il primo passo per la costruzione di modelli previsionali affidabili e per lo sviluppo di strategie di intervento in grado di coniugare la sicurezza con la conservazione del patrimonio edilizio.

¹⁹⁰ *Ground Penetrating Radar* – GPR, tomografia sismica e geoelettrica.

Vulnerabilità	Descrizione	Peso
Vulnerabilità legate alla configurazione urbana e agli aggregati edilizi		
Interazione tra edifici aggregati	Condivisione di pareti senza un progetto unitario, alterando la risposta sismica.	● ● ● ● ○
Effetto martellamento	Urti tra edifici adiacenti con altezze e rigidzze differenti, causando danni alle pareti e coperture.	● ● ● ● ●
Distribuzione disomogenea delle rigidzze	Aggregati edilizi con caratteristiche strutturali diverse creano concentrazioni di tensioni e instabilità locali.	● ● ● ● ○
Muri in comune con edifici adiacenti	Connessioni inefficaci che possono portare a cedimenti asimmetrici e crolli parziali.	● ● ● ○ ○
Trasmissione delle vibrazioni attraverso materiali disomogenei	Materiali con diversa densità e rigidità alterano la propagazione delle onde sismiche, creando accumuli di energia.	● ● ● ○ ○
Vulnerabilità delle murature		
Qualità eterogenea della muratura	Murature in pietrame irregolare, laterizio pieno o miste con variazioni nei moduli di elasticità e resistenza meccanica.	● ● ● ○ ○
Degrado delle malte	Perdita di coesione tra i blocchi murari dovuta alla carbonatazione e al deterioramento dei leganti.	● ● ● ● ●
Cristallizzazione dei sali e degrado superficiale	Formazione di efflorescenze saline che provocano distacchi di intonaci e perdita di materiale murario.	● ● ○ ○ ○
Assenza di ammassamenti tra pareti ortogonali	Pareti accostate senza connessioni efficaci, con rischio di distacco e ribaltamento fuori piano.	● ● ● ● ●
Espulsione fuori piano dei maschi murari	Porzioni murarie tra due aperture ravvicinate particolarmente vulnerabili al collasso.	● ● ● ● ●
Discontinuità nei materiali	Stratificazioni successive con materiali non compatibili causano concentrazione di tensioni e fessurazioni.	● ● ● ○ ○

Vulnerabilità	Descrizione	Peso
Vulnerabilità legate alla geometria delle aperture e delle pareti		
Disallineamento tra le aperture in facciata	Finestre e porte non allineate tra i vari livelli generano distribuzioni irregolari dei carichi verticali.	● ● ● ○ ○
Presenza di grandi aperture	Riduzione della sezione resistente della muratura, con concentrazione di sforzi e maggiore vulnerabilità ai cinematismi locali.	● ● ● ● ○
Modifiche successive delle aperture	Ampliamenti o nuove aperture realizzate senza interventi di rinforzo strutturale, alterando la stabilità.	● ● ○ ○ ○
Vulnerabilità dei solai e della loro connessione con le murature		
Deformabilità dei solai in legno	Solai privi di collegamenti rigidi con le murature che non garantiscono un comportamento strutturale solidale.	● ● ● ○ ○
Disallineamento tra i solai ai diversi piani	Solai posti a quote differenti generano discontinuità strutturali e riducono l'efficienza della trasmissione delle forze sismiche.	● ● ○ ○ ○
Solai voltati senza sistemi di contrasto	Volte in laterizio prive di catene metalliche o elementi di contenimento, con rischio di cedimento per instabilità.	● ● ● ● ●
Vulnerabilità delle fondazioni		
Fondazioni in muratura a sacco o in pietrame	Materiali con bassa capacità portante, spesso appoggiati direttamente sul terreno senza rinforzi.	● ● ● ○ ○
Cedimenti differenziali delle fondazioni	Fondazioni non omogenee, che subiscono assestamenti irregolari nel tempo, compromettendo la stabilità dell'edificio.	● ● ● ● ●
Mancanza di collegamenti tra le fondazioni e la muratura sovrastante	Discontinuità strutturale che può portare al distacco delle pareti in caso di sisma.	● ● ● ● ○
Sensibilità delle fondazioni alle variazioni del contenuto d'acqua nel terreno	Fenomeni di ritiro e rigonfiamento del suolo che generano tensioni nelle strutture in elevazione.	● ● ● ○ ○

Cinematismi di collasso

L'insieme delle vulnerabilità strutturali analizzate evidenzia come la risposta sismica degli edifici storici in muratura sia influenzata da molteplici fattori, spesso intrecciati tra loro. Tuttavia, comprendere le debolezze costruttive non è sufficiente se non si analizzano nel dettaglio i meccanismi con cui queste fragilità si traducono in veri e propri collassi strutturali. I cinematismi di collasso rappresentano l'espressione diretta delle criticità individuate e il punto di partenza per sviluppare strategie di mitigazione del rischio sismico. Come già detto, il comportamento sismico degli edifici storici in muratura è fortemente influenzato dall'attivazione di meccanismi di collasso prevalentemente locali, che compromettono la stabilità dell'edificio prima ancora che la struttura nel suo complesso manifesti una risposta globale al sisma. A differenza degli edifici moderni, progettati per avere un comportamento scatolare in cui tutti gli elementi collaborano nel resistere alle sollecitazioni orizzontali, gli edifici storici presentano murature portanti scollegate tra loro, solai deformabili e connessioni inefficaci tra gli elementi strutturali. L'eterogeneità dei materiali e delle tecniche costruttive impiegate, unita al degrado progressivo delle malte e alla stratificazione di interventi successivi, favorisce l'innescò di cinematismi fuori piano, ovvero meccanismi di collasso che si attivano quando una parete perde il suo equilibrio e si muove indipendentemente rispetto al resto della struttura. La mancanza di ammorsamenti tra le pareti ortogonali è una delle principali cause di questo fenomeno: se i muri non sono efficacemente collegati tra loro, possono comportarsi come elementi isolati e ribaltarsi sotto l'azione delle accelerazioni sismiche. In molti edifici storici, inoltre, i solai non sono in grado di assorbire e distribuire le forze orizzontali, aggravando la vulnerabilità complessiva e favorendo il distacco delle pareti perimetrali.

Uno dei meccanismi più diffusi è il ribaltamento semplice, che si verifica quando una parete, priva di adeguati vincoli trasversali, ruota attorno alla base fino al collasso¹⁹¹. Questo fenomeno è particolarmente frequente nei prospetti principali degli edifici con configurazione a schiera, dove le facciate non beneficiano di un efficace vincolo laterale e risultano esposte all'azione sismica. In condizioni più critiche, si osserva il ribaltamento flessionale, caratterizzato dalla formazione di una cerniera plastica che può situarsi alla base o a

¹⁹¹ Il cinematismo porta alla formazione di una cerniera orizzontale plastica.

un'altezza intermedia della parete. In presenza di aperture, giunti deboli o malte deteriorate, la parete tende a suddividersi in più porzioni, aumentando il rischio di crollo parziale o totale. Il meccanismo del ribaltamento non si limita alle pareti di facciata, ma può coinvolgere anche gli spigoli dell'edificio, come avviene nel ribaltamento di cantonale, in cui la mancanza di ammortamento tra due pareti ortogonali porta al distacco e alla perdita di stabilità della muratura d'angolo. Questo tipo di collasso è particolarmente pericoloso perché può propagarsi lungo l'edificio e innescare effetti a cascata sulla struttura adiacente.

Altrettanto frequente è l'espulsione fuori piano dei maschi murari, fenomeno che interessa le porzioni di muratura comprese tra due aperture. Se il rapporto tra altezza e larghezza di questi elementi è sfavorevole, la loro capacità di resistere alle forze sismiche trasversali si riduce drasticamente, portando al loro distacco e al successivo crollo. Questo fenomeno è spesso aggravato dal disallineamento delle aperture lungo i diversi piani dell'edificio, che interrompe la continuità strutturale e crea punti di concentrazione delle tensioni. Anche le murature di sommità, in particolare i timpani delle coperture a falde, sono soggette a un elevato rischio di collasso fuori piano. Il crollo del timpano avviene quando la copertura non fornisce un adeguato contrasto alle spinte orizzontali e in assenza di tiranti o catene metalliche che ne limitino il movimento. Questo tipo di dissesto è particolarmente pericoloso, poiché il crollo del timpano può trascinare con sé porzioni di tetto e generare danni diffusi anche agli elementi sottostanti.

Le caratteristiche costruttive delle murature influenzano anche altri meccanismi di collasso, come lo scorrimento lungo i letti di malta, che si verifica quando la resistenza della malta non è sufficiente a contrastare le forze di taglio. In questi casi, gli elementi murari tendono a scivolare lungo i giunti orizzontali, portando a un progressivo indebolimento della parete e, nei casi più gravi, al crollo completo. Questo fenomeno è particolarmente diffuso nelle murature in pietrame irregolare, dove la coesione tra i blocchi è affidata quasi esclusivamente alla qualità della malta, spesso degradata nel tempo. Un altro meccanismo di collasso legato alla configurazione dell'edificio è la perdita di connessione tra le pareti ortogonali: quando le murature sono

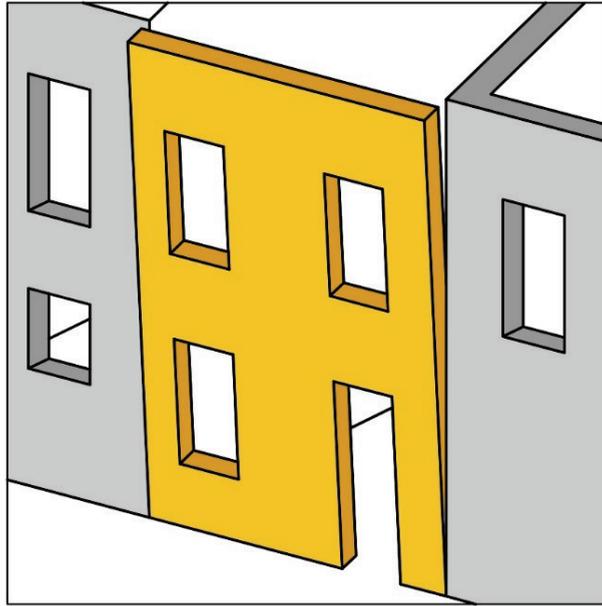
semplicemente accostate senza un efficace ammorsamento, l'azione sismica può causare il loro distacco reciproco, rendendo instabile l'intero edificio¹⁹².

Negli edifici voltati, il collasso di archi e volte rappresenta una delle vulnerabilità più rilevanti. Questi elementi, sebbene dotati di una propria capacità resistente, richiedono vincoli laterali efficaci per garantire la loro stabilità. In assenza di contrafforti adeguati o di catene metalliche in grado di contrastare le spinte orizzontali, le volte possono aprire cerniere nei punti critici, portando al collasso dell'intera struttura. Il crollo di una volta può generare effetti a catena sugli elementi strutturali adiacenti, con conseguenze particolarmente gravi per l'integrità dell'edificio. Un altro problema significativo negli edifici storici aggregati è il collasso per effetto martellamento, che si verifica quando edifici adiacenti con differenti periodi di vibrazione oscillano fuori fase durante il sisma. Se lo spazio tra le strutture è insufficiente, gli impatti reciproci possono causare il distacco di porzioni murarie, il danneggiamento delle coperture e il crollo locale di elementi strutturali.

L'analisi dei meccanismi di collasso ha permesso di identificare le vulnerabilità strutturali che ne favoriscono l'attivazione, evidenziando i punti critici che rendono gli edifici storici particolarmente esposti al rischio sismico. Su questi principi si basano numerose metodologie sviluppate per individuare le criticità e definire strategie di mitigazione efficaci.

¹⁹² Questo problema è stato osservato in molti edifici storici colpiti da terremoti, dove il distacco tra le pareti ha portato al collasso progressivo della struttura.

RIBALTAMENTO SEMPLICE DI PARETE



Il meccanismo si manifesta attraverso la rotazione rigida di intere facciate o di porzioni di pareti rispetto ad assi orizzontali alla base di esse.

Condizioni di vincolo:

- assenza di vincolo in sommità;
- assenza di collegamento alle pareti ortogonali.

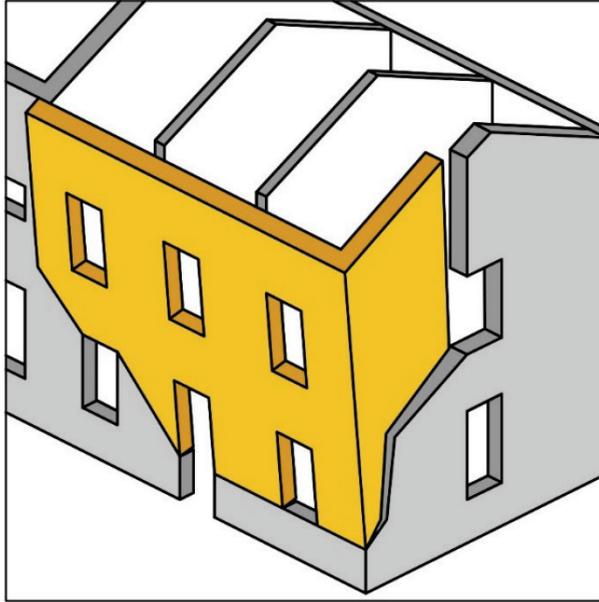
Carenze e vulnerabilità:

- assenza di cordoli o catene ai piani;
- orizzontamenti deformabili e/o mal collegati;
- intersezioni murarie di cattiva qualità;
- presenza di spinte non contrastate;
- muratura a sacco o paramenti mal collegati.

Varianti del meccanismo:

- a un livello o a più livelli;
- intero spessore murario o paramenti separati.

RIBALTAMENTO COMPOSTO DI PARETE



Il meccanismo si manifesta attraverso la rotazione rigida di intere facciate o di porzioni di pareti rispetto ad assi orizzontali, accompagnata dal trascinarsi di parti delle strutture murarie appartenenti alle pareti di controvento.

Condizioni di vincolo:

- assenza di vincolo in sommità;
- efficace connessione con le pareti ortogonali.

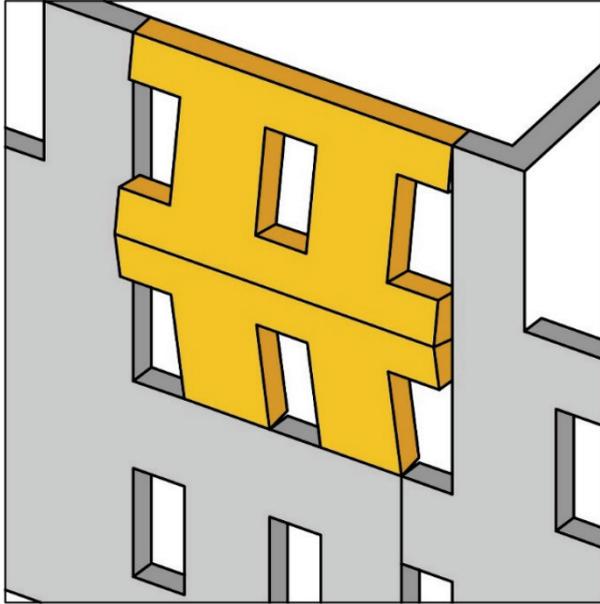
Carenze e vulnerabilità:

- assenza di cordoli o catene ai piani;
- orizzontamenti deformabili e/o mal collegati;
- presenza di spinte non contrastate;
- bucatore localizzate in prossimità delle intersezioni;
- muratura con ridotte proprietà meccaniche.

Varianti del meccanismo:

- a un livello o a più livelli;
- cuneo a singola diagonale;
- cuneo a doppia diagonale;
- ribaltamento del cantonale.

FLESSIONE VERTICALE DI PARETE



Il meccanismo si manifesta con la formazione di una cerniera cilindrica orizzontale che divide la parete in due blocchi ed è descritto dalla rotazione reciproca degli stessi attorno a tale asse per azioni fuori dal piano.

Condizioni di vincolo:

- trattenimento efficace in testa alla parete;
- carenza di collegamento alle pareti ortogonali.

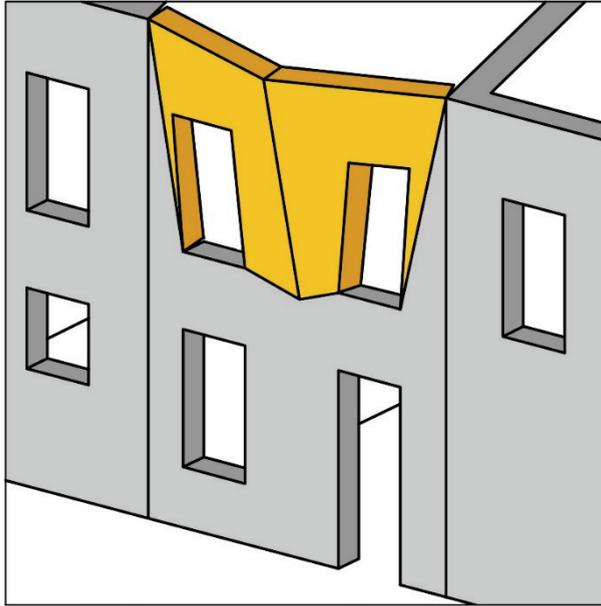
Carenze e vulnerabilità:

- snellezza eccessiva delle pareti;
- muratura a sacco o paramenti mal collegati;
- spinte orizzontali localizzate (archi, volte);
- orizzontamenti intermedi mal collegati.

Varianti del meccanismo:

- a un livello o a più livelli;
- intero spessore murario o paramenti separati;
- in presenza di discontinuità o di aperture e spinte localizzate.

FLESSIONE ORIZZONTALE DI PARETE



Il meccanismo si manifesta con l'espulsione di materiale dalla zona sommitale della parete e col distacco di corpi cuneiformi accompagnato dalla formazione di cerniere cilindriche oblique e verticali.

Condizioni di vincolo:

- efficace collegamento alle pareti ortogonali;
- assenza di vincolo in sommità.

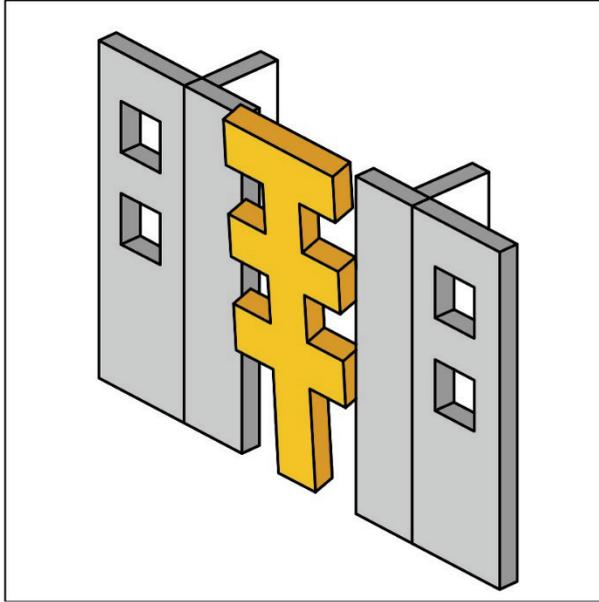
Carenze e vulnerabilità:

- solaio di copertura mal collegato alla muratura;
- presenza di coperture spingenti;
- presenza di nicchie, canne fumarie e aperture;
- muratura a sacco o paramenti mal collegati;
- muri di spina distanti (parete snella).

Varianti del meccanismo:

- intero spessore murario o paramenti separati;
- diverse geometrie della parete;
- instabilità orizzontale per distanza delle pareti di controvento.

ESPULSIONE DEI MASCHI MURARI



Il meccanismo si manifesta con l'espulsione fuori piano della porzione verticale di muratura tra le aperture (maschi) per azioni sismiche trasversali, con formazione di cerniere plastiche alle estremità del maschio murario.

Condizioni di vincolo:

- collegamento insufficiente con le pareti ortogonali;
- mancanza di elementi di cordoli o tiranti in sommità;
- solaio non adeguatamente collegato alla muratura.

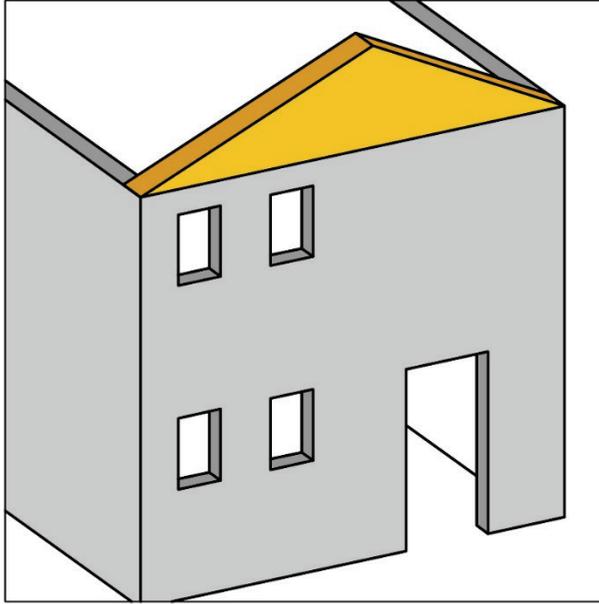
Carenze e vulnerabilità:

- maschi murari snelli (altezza \gg larghezza);
- malte di scarsa qualità;
- aperture disallineate;
- assenza di fasce di piano efficaci.

Varianti del meccanismo:

- espulsione singola o multipla;
- meccanismi combinati con porzioni adiacenti.

RIBALTAMENTO DEL TIMPANO



Il meccanismo si manifesta con l'espulsione di materiale dalla zona sommitale della parete del timpano e col distacco di corpi cuneiformi definiti da sezioni di frattura oblique e verticali per azioni fuori dal piano.

Condizioni di vincolo:

- assenza di contrasto in sommità (tiranti, catene o cordoli);
- collegamento insufficiente con le pareti ortogonali.

Carenze e vulnerabilità:

- coperture spingenti;
- timpano non ammorsato alle murature longitudinali;
- discontinuità muraria in sommità;
- presenza di aperture o camini nel timpano;
- trave di colmo spingente.

Varianti del meccanismo:

- ribaltamento semplice dell'intera parte triangolare;
- distacco a settori;
- ribaltamento indotto da martellamenti laterali.

Metodi e approcci per l'analisi della vulnerabilità sismica

L'analisi della vulnerabilità sismica degli edifici in muratura ha attraversato un lungo processo di evoluzione, caratterizzato da un progressivo affinamento delle metodologie di valutazione. Se inizialmente la conoscenza della risposta sismica degli edifici si basava esclusivamente sull'osservazione empirica degli effetti prodotti dai terremoti, nel tempo l'approccio si è arricchito di strumenti quantitativi e modelli previsionali più sofisticati, che consentono di interpretare e anticipare il comportamento strutturale delle costruzioni. Oggi, la valutazione della vulnerabilità sismica si articola attraverso un sistema integrato di metodologie, che combina analisi statistiche, modelli probabilistici e simulazioni numeriche, con l'obiettivo di ottenere una rappresentazione il più possibile accurata delle condizioni di rischio. Questo processo, reso sempre più necessario dalla vulnerabilità diffusa degli edifici nei centri storici, si avvale sia di strumenti semplificati per la classificazione rapida del patrimonio edilizio, sia di approcci avanzati che permettono di valutare nel dettaglio i possibili meccanismi di collasso.

Il punto di partenza per la valutazione della vulnerabilità è rappresentato dai metodi empirici, che derivano dalle osservazioni dei danni prodotti dai terremoti del passato. Questi metodi, sviluppati nel corso del XX secolo, si basano sulla classificazione degli edifici in funzione delle loro caratteristiche costruttive e sull'associazione di un livello di danno atteso per ciascun grado di intensità sismica. Uno degli strumenti più consolidati in questo ambito è costituito dalle scale di intensità macrosismica, elaborate con l'obiettivo di descrivere gli effetti di un terremoto sull'ambiente costruito. La Mercalli-Cancani-Sieberg¹⁹³, la Modified Mercalli Intensity¹⁹⁴ e la Mendeleev-Sponheuer-Kárník¹⁹⁵ rappresentano esempi storici di queste scale, che hanno trovato un'evoluzione più strutturata nella *European Macroseismic Scale*¹⁹⁶. Quest'ultima introduce un criterio di classificazione degli edifici che non si

¹⁹³ MCS, 1930.

¹⁹⁴ MMI, 1930.

¹⁹⁵ MSK, 1964, 1976, 1981.

¹⁹⁶ EMS-98. GRÜNTAL G. (1998), *European Macroseismic Scale 1998*, European Seismological Commission (ESC).

limita alla sola osservazione del danno, ma distingue le costruzioni in diverse classi di vulnerabilità in base alle loro caratteristiche tipologiche e costruttive. La EMS-98, oltre a costituire una sintesi delle esperienze precedenti, ha aperto la strada a un'interpretazione più strutturata del rischio sismico, permettendo di correlare la tipologia edilizia con la probabilità di danno per diverse intensità sismiche.

Tuttavia, per quanto utili in una prima fase di classificazione, le scale di intensità macrosismica presentano dei limiti intrinseci, legati alla loro natura descrittiva e alla difficoltà di applicarle in modo rigoroso a scenari complessi. Per superare questi limiti, negli ultimi decenni sono state sviluppate metodologie più avanzate, in grado di stimare la risposta strutturale di un edificio in maniera più dettagliata. Un passo significativo in questa direzione è rappresentato dalle curve di fragilità, che consentono di esprimere la probabilità che una struttura raggiunga un determinato stato limite in funzione dell'intensità sismica. Queste curve, ottenute mediante analisi statistiche su dati di danneggiamento osservati o attraverso modelli numerici, permettono di valutare il comportamento sismico delle costruzioni con maggiore precisione, rendendo possibile la previsione del danno atteso per diverse categorie di edifici. L'applicazione delle curve di fragilità ha trovato ampio utilizzo nella pianificazione del rischio sismico, poiché consente di quantificare la vulnerabilità di un patrimonio edilizio su vasta scala, fornendo dati essenziali per la definizione di strategie di mitigazione.

Parallelamente, si sono diffusi altri strumenti di valutazione probabilistica, come le matrici di probabilità di danno (DPM), che esprimono la probabilità che un edificio subisca un determinato livello di danno per ogni classe di intensità sismica. Queste matrici, sviluppate attraverso l'analisi statistica dei danni osservati nei terremoti passati, hanno trovato una loro prima applicazione sistematica in Italia a seguito del terremoto dell'Irpinia del 1980 e ancora oggi vengono utilizzate. Successivamente, il progetto europeo Risk-UE ha contribuito a raffinare questo approccio, introducendo metodologie standardizzate per la valutazione della vulnerabilità a scala urbana. Un aspetto rilevante di questi modelli è la possibilità di integrare informazioni specifiche sulle caratteristiche strutturali e costruttive degli edifici, migliorando la capacità predittiva delle valutazioni.

Con l'evoluzione delle metodologie di rilievo, anche l'analisi della vulnerabilità sismica ha acquisito strumenti più dettagliati e quantitativi. In Italia,

il Gruppo Nazionale Difesa dai Terremoti (GNDT)¹⁹⁷ ha sviluppato schede di rilievo strutturale che consentono di classificare gli edifici in base a parametri geometrici, tipologici e costruttivi. Queste schede, come la GNDT di primo e secondo livello, permettono di attribuire un indice di vulnerabilità pesato sulla base di caratteristiche strutturali e costruttive, fornendo uno strumento di valutazione speditivo ed efficace. L'approccio è stato ulteriormente affinato con la scheda AeDES¹⁹⁸, utilizzata per la valutazione dell'agibilità post-sisma, e con metodi specifici per edifici aggregati, come il modello proposto da Antonio Formisano¹⁹⁹, che introduce parametri correttivi per la condizione di aggregato edilizio.

Tra gli strumenti più recenti, le schede CARTIS²⁰⁰ hanno introdotto una classificazione sistematica del patrimonio edilizio italiano, basata su un inventario strutturale dettagliato. Questo strumento permette di raccogliere informazioni sulle tipologie costruttive, la qualità dei materiali, le caratteristiche geometriche e gli elementi di vulnerabilità, contribuendo a una valutazione più standardizzata della vulnerabilità sismica a livello nazionale.

Parallelamente, il metodo SAVE²⁰¹ ha permesso di informatizzare l'analisi della vulnerabilità attraverso l'integrazione di dati tipologico-strutturali con informazioni sulle caratteristiche geometriche e di sito degli edifici. Questo metodo consente di generare mappe di vulnerabilità su larga scala e di supportare la pianificazione degli interventi di mitigazione del rischio sismico.

Un altro approccio innovativo è rappresentato dal metodo RESISTO²⁰², sviluppato per la valutazione speditiva della vulnerabilità sismica degli edifici esistenti. Basato sulla determinazione dell'accelerazione al suolo di collasso dell'edificio, RESISTO permette di stimare la resistenza sismica delle strutture, integrando i dati di rilievo con coefficienti riduttivi basati su parametri qualitativi. Questo metodo è particolarmente utile nella definizione di priorità d'intervento, poiché consente di classificare gli edifici in base alla loro vulnerabilità, facilitando la gestione del rischio a scala urbana.

¹⁹⁷ Vedi nota sitografica n. 7.

¹⁹⁸ BERNARDINI A. (2000), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 8.

¹⁹⁹ FORMISANO A. ET AL. (2013), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 43.

²⁰⁰ CARatterizzazione Tipologico - Strutturale dei comparti urbani.

²⁰¹ Strumenti Aggiornati per la Vulnerabilità sismica del patrimonio Edilizio e dei sistemi urbani.

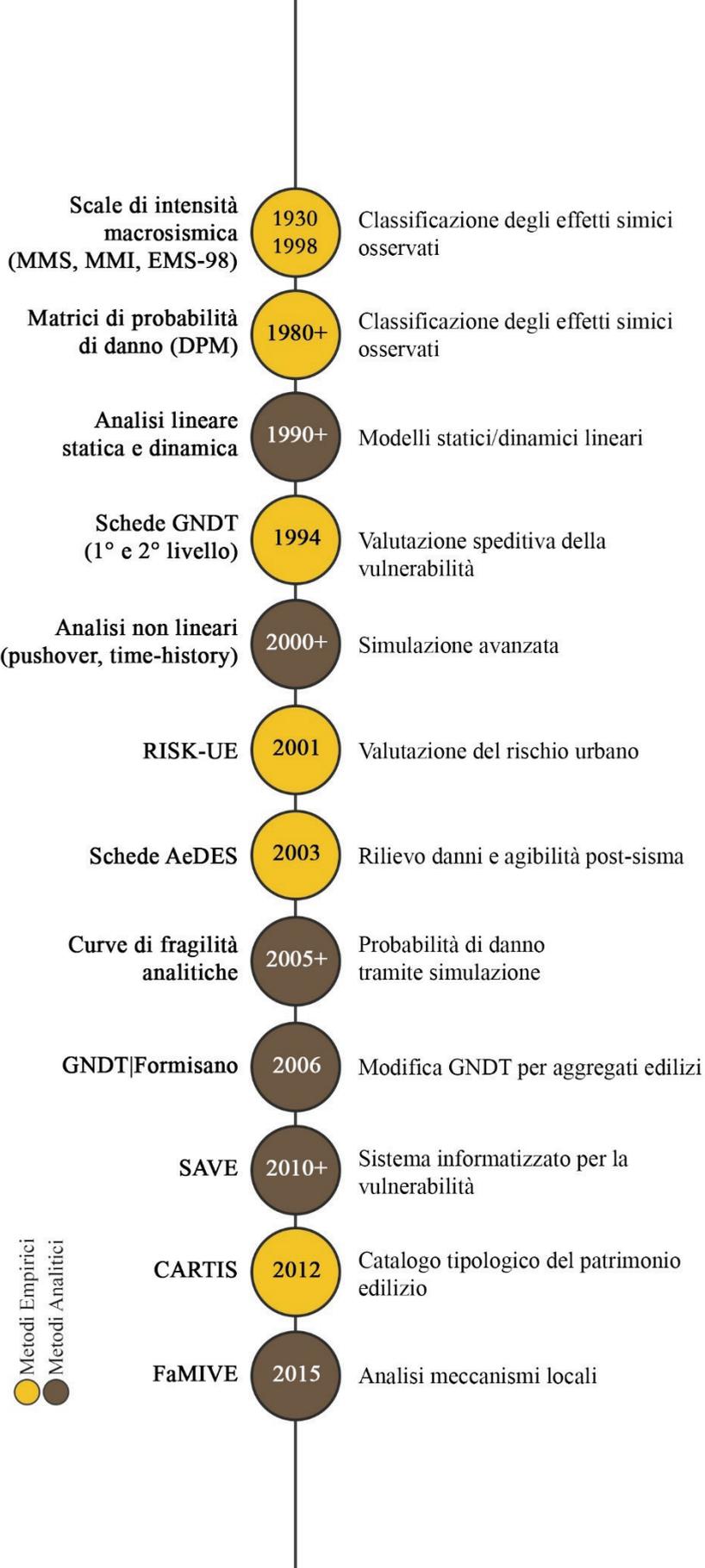
²⁰² Resistenza Sismica Totale, vedi nota sitografica n. 8.

Negli ultimi anni, l'attenzione si è spostata verso approcci che consentano di valutare la vulnerabilità in modo più dettagliato, anche a livello locale. Un esempio significativo è rappresentato dal metodo FaMIVE²⁰³, che si basa sull'identificazione dei possibili meccanismi di collasso e sulla valutazione della capacità strutturale degli edifici attraverso l'analisi limite. Questo metodo consente di correlare la configurazione geometrica e i dettagli costruttivi con la probabilità di attivazione di cinematismi fuori piano, fornendo una stima più dettagliata della vulnerabilità locale degli edifici.

Infine, le analisi cinematiche, sia lineari che non lineari, costituiscono strumenti essenziali per la valutazione della sicurezza sismica delle costruzioni in muratura. Basate sui principi dell'analisi limite dell'equilibrio, queste tecniche permettono di determinare i moltiplicatori di collasso per diversi cinematismi locali, considerando le condizioni al contorno e la geometria dell'edificio. L'analisi cinematica lineare permette di calcolare il moltiplicatore di attivazione dei meccanismi locali mediante il Principio dei Lavori Virtuali, mentre l'analisi cinematica non lineare consente di stimare la capacità di spostamento della struttura fino al raggiungimento della condizione di collasso. Le normative italiane, dall'OPCM 3274/2003 fino alle NTC 2018 e alla relativa Circolare Applicativa del 2019, hanno progressivamente integrato questi strumenti all'interno delle procedure di valutazione della sicurezza strutturale, prescrivendo l'uso di modelli cinematici per l'identificazione delle vulnerabilità locali degli edifici in muratura.

L'evoluzione delle metodologie di analisi della vulnerabilità sismica ha portato a un miglioramento significativo della capacità di valutazione del rischio. Se in passato le analisi si basavano su osservazioni empiriche e metodi semplificati, oggi la combinazione di rilievi avanzati, modelli numerici e analisi cinematiche consente di ottenere risultati sempre più precisi e affidabili. Questo progresso rappresenta un passaggio fondamentale per la definizione di strategie di mitigazione del rischio, permettendo di individuare le criticità strutturali con maggiore accuratezza e di progettare interventi di consolidamento più efficaci.

²⁰³ *Failure Mechanisms Identification and Vulnerability Evaluation.*



L'algoritmo MASON: metodologia e struttura

La metodologia MASON – *Multilevel Assessment for Structural Overturning and Notation* – nasce come risposta operativa alle criticità evidenziate dai metodi tradizionali di analisi della vulnerabilità sismica, specialmente nei contesti urbani complessi come i centri storici minori, caratterizzati da edifici aggregati in muratura. L'obiettivo della metodologia è quello di strutturare un processo multilivello, scalabile e interoperabile, in grado di adattarsi al livello di conoscenza disponibile e alle risorse tecniche ed economiche impiegabili, integrando rilievo, modellazione, analisi e restituzione digitale.

Come emerge dallo studio della letteratura scientifica e dalle esperienze pregresse nel campo della valutazione del rischio, il comportamento sismico delle costruzioni in muratura può essere analizzato su più scale di dettaglio: dall'intero aggregato urbano, al singolo edificio, fino alla parete o componente strutturale. La definizione dell'approccio di analisi più adatto è inevitabilmente vincolata alla quantità e qualità delle informazioni disponibili, le quali possono essere acquisite attraverso differenti strumenti – rilievi storici, architettonici e strutturali, analisi dei materiali, indagini diagnostiche e prove *in situ* – come suggerito anche dalle NTC 2018.

In questa prospettiva, MASON si articola in due livelli operativi principali, ciascuno dei quali risponde a specifiche esigenze conoscitive e fornisce un differente livello di approfondimento nella valutazione della vulnerabilità.

Livello 1 – Analisi qualitativa (screening speditivo e predittivo)

Il primo livello della metodologia ha un'impostazione speditiva e qualitativa, ed è concepito per una prima mappatura a larga scala delle criticità locali. Si basa su dati rilevati attraverso indagini a vista, senza strumenti avanzati, ma con protocolli codificati in grado di descrivere con sufficiente attendibilità le caratteristiche geometriche e materiche delle facciate in muratura. Gli edifici sono descritti secondo un insieme minimo di parametri – tra cui forma, tessitura muraria, configurazione delle aperture, presenza di vincoli trasversali – che costituiscono l'input per un algoritmo di riconoscimento automatico del meccanismo di collasso fuori piano più probabile. Questo algoritmo si fonda

su una logica booleano-decisionale e permette di classificare ciascuna parete in base al meccanismo locale di collasso potenzialmente attivabile. L'esito dell'analisi viene visualizzato attraverso un modello tridimensionale statico, a basso LOD²⁰⁴, realizzato in ambiente BIM e in una visualizzazione semplificata e georeferenziata in ambiente GIS. La rappresentazione consente una lettura immediata delle vulnerabilità presenti nel tessuto urbano e costituisce la base per l'attivazione di strategie di approfondimento selettivo.

Livello 2 – Analisi quantitativa (modellazione numerica e verifica normativa)

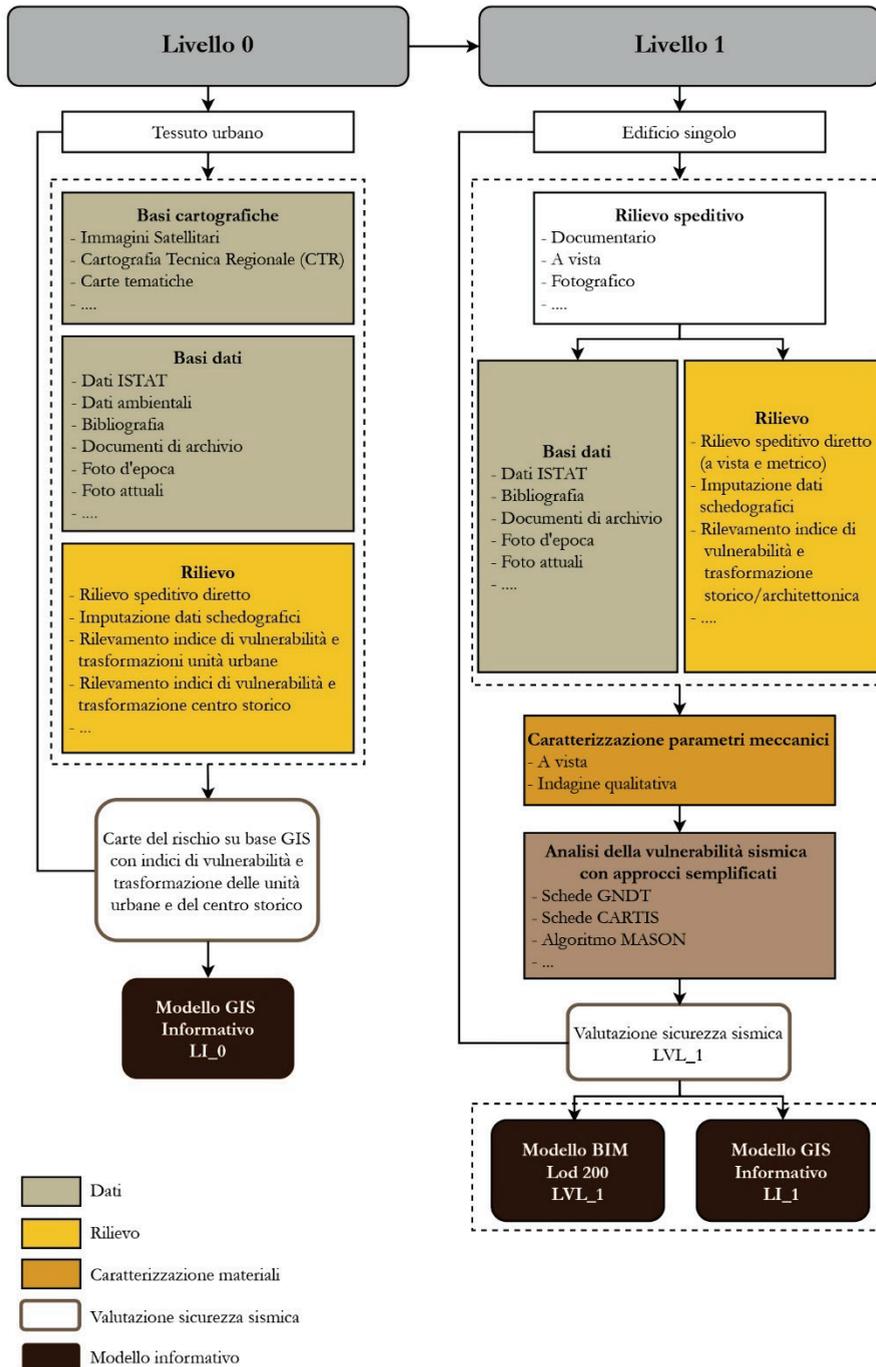
Il secondo livello rappresenta l'evoluzione analitica della metodologia, basata su rilievi strumentali e modellazione numerica avanzata. In questa fase, il grado di conoscenza dell'edificio è sostanzialmente più elevato e comprende dati geometrici tridimensionali ad alta precisione ottenuti con rilievi avanzati digitali, informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali, dettagli costruttivi e storico-strutturali. Il fulcro dell'analisi è costituito dall'applicazione di analisi cinematiche, orientate alla valutazione del moltiplicatore di collasso per ciascun meccanismo individuato nella fase precedente. Questo permette di quantificare l'accelerazione sismica che attiverrebbe il collasso della parete e di confrontarla con i valori richiesti dalla normativa vigente²⁰⁵. La verifica è condotta secondo le indicazioni della Circolare 2019²⁰⁶, con riferimento allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV), e restituisce una misura oggettiva della sicurezza sismica. Il modello BIM impiegato in questa fase è informativo e dinamico, con un LOD elevato, e consente di integrare direttamente i risultati dell'analisi (valori di α , accelerazione di attivazione, esito della verifica) nel modello 3D, associando a ciascuna facciata una rappresentazione che evidenzia il livello di vulnerabilità. In parallelo, in ambiente GIS vengono aggiornati i dati topologici e spaziali con i risultati delle

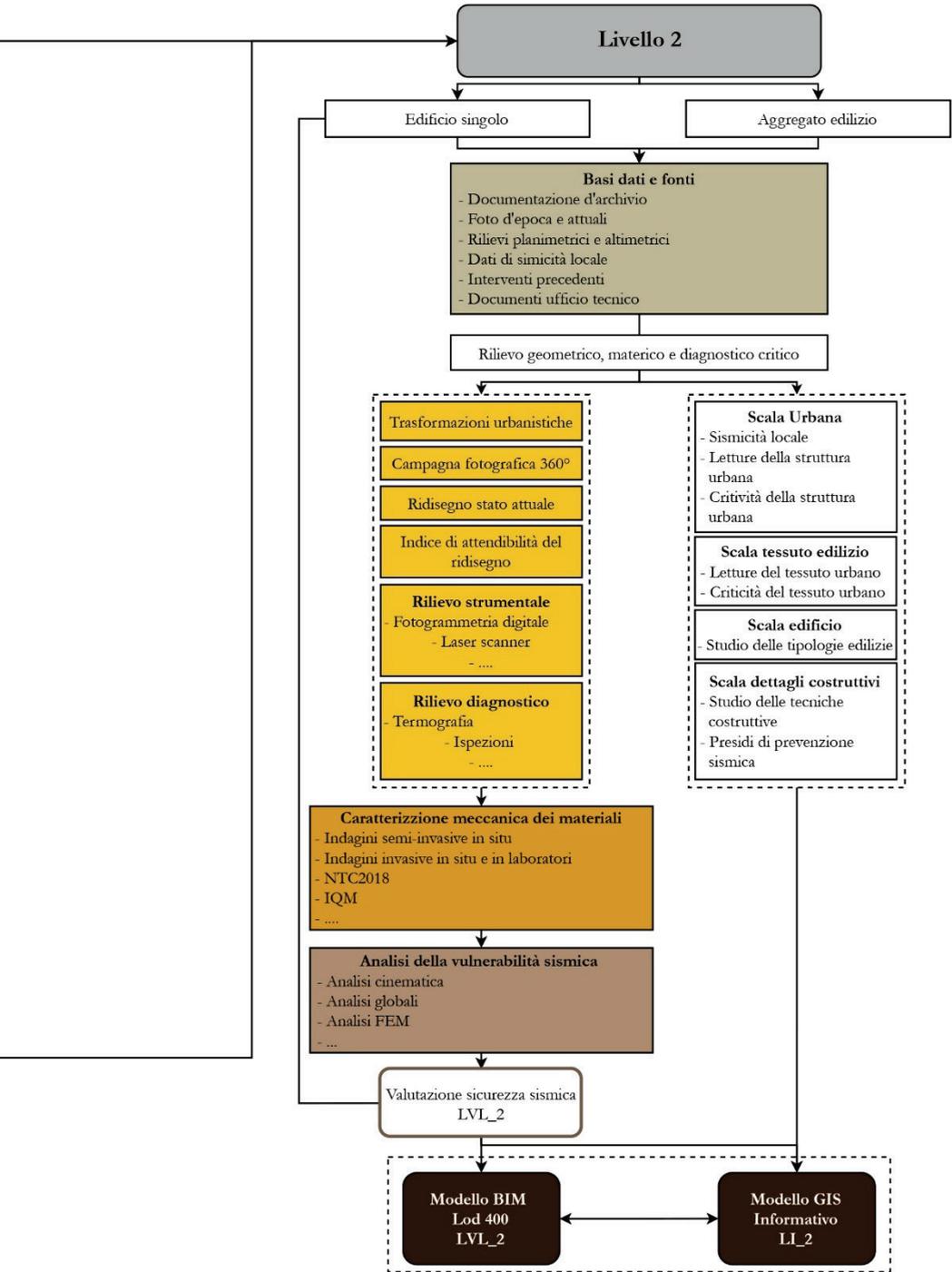
²⁰⁴ *Level of Development / Level of Detail.*

²⁰⁵ Norme Tecniche per le Costruzioni (2018), *Aggiornamento delle «Norme Tecniche per le Costruzioni»*, D. M. 17 gennaio 2018.

²⁰⁶ Circolare NTC 2018, circolare n. 7 del 21 gennaio 2019, *Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni»* di cui al D.M. 17 gennaio 2018. C.S.LL.PP., 2019.

verifiche, generando mappe di rischio stratificate e pronte per essere utilizzate in ottica decisionale, anche con strumenti di pianificazione urbanistica o protezione civile.





Il livello qualitativo di MASON: rapidità e affidabilità

L'approccio qualitativo di primo livello della metodologia MASON si configura come una procedura semplificata e operativamente efficiente per la valutazione preliminare della vulnerabilità sismica degli edifici in muratura. Tale metodologia si basa sull'acquisizione di informazioni derivanti da rilievi speditivi, osservazioni a vista e analisi documentarie, ed è finalizzata a individuare i meccanismi locali di collasso con maggiore probabilità di attivazione in caso di evento sismico. Il rilievo rappresenta il punto di partenza imprescindibile per l'intero processo analitico. Esso deve essere in grado di ricostruire l'evoluzione storica dell'edificio, individuare le caratteristiche architettoniche e strutturali originarie e successive, riconoscere eventuali stratificazioni tipologiche e la presenza di superfetazioni. L'analisi documentaria, basata sull'esame di archivi pubblici e privati, sulle cartografie tecniche di base (CTR, catastali, PTPR, etc.) e sui sistemi di visualizzazione satellitare (Google Earth, Bing Maps, etc.), supporta e integra il rilievo diretto. L'osservazione *in situ* mira a raccogliere dati fondamentali in termini geometrici e strutturali: numero di piani, altezze interpiano, sviluppo planimetrico ed in elevazione, tipologia architettonica (in linea, a ballatoio, a corte), tipologia strutturale prevalente (muratura portante, struttura a telaio, sistemi misti), tipo di copertura (a falde, piana, a padiglione), presenza di *pilotis* o di ambienti voltati, nonché indicatori di vulnerabilità come disallineamenti tra le bucaure, mancanza di elementi di collegamento (cordoli, catene, tiranti), discontinuità murarie e condizioni di degrado superficiale. La valutazione dello stato di conservazione segue le Raccomandazioni NorMal 1/88²⁰⁷, mentre l'analisi del quadro fessurativo avviene mediante simbologia tecnica standard. Inoltre, nei casi in cui l'intonaco consenta una lettura diretta, si procede all'identificazione dell'apparecchio murario, valutando tessitura, qualità della malta, regolarità e dimensioni dei blocchi. Dove possibile, si eseguono saggi locali per esaminare l'efficacia dell'ammorsamento tra le pareti ortogonali, le modalità di appoggio dei solai, la presenza di dispositivi di contrasto alle spinte (cordoli lignei o in c.a., catene), e la composizione muraria a tutto spessore.

²⁰⁷ Vedi nota sitografica n. 9.

Tutti i dati raccolti vengono sistematizzati all'interno di una scheda di rilievo digitale, strutturata in sezioni logiche:

- Informazioni generali, che comprendono la localizzazione (Regione, Provincia, Comune, indirizzo), identificazione dell'aggregato strutturale e dell'unità strutturale, nonché la destinazione d'uso dell'edificio, selezionabile tramite menù a tendina precompilati secondo le categorie catastali ufficiali;
- Dati sul tessuto urbano, dove si annotano il numero di unità strutturali nell'aggregato, la posizione relativa dell'unità (centrale, angolare, di testata) e il tipo di connessione tra la facciata analizzata e le pareti delle unità adiacenti;
- Caratteristiche geometriche della facciata, comprendenti l'orientamento cardinale, numero di piani, altezza e lunghezza della facciata, presenza e dimensioni del timpano e calcolo della snellezza muraria (rapporto altezza/spessore);
- Caratteristiche geometriche delle bucatore, che includono la disposizione e la quantità delle aperture per piano, le dimensioni medie, l'altezza della fascia sommitale e l'eventuale disallineamento verticale;
- Caratteristiche geometriche della pianta, con indicazione dello spessore murario alla base, variazioni in elevazione, numero e distanza delle pareti ortogonali alla facciata e presenza o meno di ammorsamento tra le stesse;
- Caratteristiche strutturali, in cui si registrano il numero di impalcati voltati, le tipologie strutturali dei solai e delle coperture, l'orditura rispetto alla facciata, la tipologia di muratura (scelta da elenco strutturato), nonché la presenza di elementi di connessione come catene, tiranti, cordoli e l'ammorsamento tra solai e muratura portante.

Questa scheda costituisce l'input per un algoritmo predittivo, il quale elabora le informazioni raccolte verificando la presenza o assenza di specifiche peculiarità strutturali ritenute determinanti per l'attivazione di meccanismi locali di collasso. In particolare, vengono valutate nove condizioni chiave: snellezza muraria critica, assenza di ammorsamento tra piani, mancanza di cordoli sommitali, debole connessione tra pareti ortogonali e facciata, assenza di catene/tiranti, disallineamento delle bucatore, discontinuità murarie, eccessiva luce tra pareti trasversali e presenza del timpano. A ciascuna di queste condizioni viene associato un valore booleano (vero/falso) e l'algoritmo

esegue un confronto con matrici critiche codificate per ciascun tipo di meccanismo fuori piano. Il risultato dell'elaborazione restituisce il meccanismo di collasso locale più probabile tra quelli previsti: ribaltamento semplice (globale o parziale), ribaltamento del cantonale, ribaltamento lungo le aperture, flessione verticale, flessione orizzontale, ribaltamento del timpano. Ciascun output è corredato da una sintesi delle criticità rilevate, fornendo così una diagnosi strutturale sintetica ma tecnicamente fondata.

Nell'ambito del primo livello della metodologia MASON, la modellazione digitale riveste un ruolo essenziale nella sistematizzazione e nella comunicazione dei risultati analitici. In particolare, prevede lo sviluppo di un modello tridimensionale in ambiente BIM a basso livello di dettaglio – LOD 200²⁰⁸ – in cui prevale l'aspetto geometrico e volumetrico rispetto a quello informativo e strutturale. Questo modello, costruito a partire dai dati raccolti in fase di rilievo speditivo, non si configura come un *digital twin* completo dell'edificio, ma come uno strumento di rappresentazione sintetica, capace di visualizzare con chiarezza i principali elementi morfologici e architettonici dell'immobile. Uno degli aspetti più innovativi del processo è la possibilità di associare direttamente a ciascun oggetto BIM – e in particolare alla facciata esposta – l'esito dell'algorithmo predittivo che identifica il meccanismo di collasso più probabile. Tali risultati vengono codificati attraverso l'uso di parametri condivisi e famiglie personalizzate, che consentono di integrare informazioni qualitative come la tipologia del meccanismo atteso, le condizioni di degrado e gli indicatori di vulnerabilità rilevati all'interno del modello. Attraverso una rappresentazione cromatica tematica, è possibile quindi visualizzare in tempo reale il rischio locale associato a ciascuna facciata, offrendo una lettura sintetica ma tecnicamente significativa del comportamento sismico atteso.

Parallelamente, la metodologia prevede la georeferenziazione puntuale e vettoriale degli edifici analizzati all'interno di un GIS, in modo da rappresentare i risultati in una logica di contesto urbano. A ciascun edificio viene associato un set di attributi descrittivi e analitici derivanti dalla scheda di rilievo e dall'output dell'algorithmo, tra cui un identificativo univoco dell'edificio e

²⁰⁸ Secondo la norma UNI 11337 il LOD 200 è definito come «Geometria Approssimativa: L'elemento modellato è geometricamente riconoscibile, in modo da poter essere utilizzato come riferimento indicativo per il coordinamento tra le diverse discipline progettuali». Si evince che la geometria è generica e le informazioni sono approssimative, utili per studi preliminari.

del relativo aggregato strutturale, la tipologia strutturale e materica prevalente, il cinematismo di collasso fuori piano atteso e il relativo indicatore di vulnerabilità rilevata. Attraverso simbologie tematiche e livelli informativi è possibile rappresentare con immediatezza la distribuzione spaziale dei meccanismi di collasso nei centri urbani, facilitando l'individuazione di pattern ricorrenti e di situazioni ad elevata criticità.



SCHEDA PER LA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA'

Definizione del cinematismo di collasso probabile

ID

A. INFORMAZIONI GENERALI

A1. Regione		▼
A2. Provincia		▼
A3. Comune		▼
A4. Indirizzo		📍
A5. ID Aggregato Strutturale (AS)		#
A6. ID Unità Strutturale (US)		#
A7. Destinazione d'uso		▼
A8. Data di rilievo		📅
A9. Operatore		▼

B. CONTESTO URBANO

B1. Posizione della US nell'AS	<input type="radio"/> Centrale	<input type="radio"/> Angolare	<input type="radio"/> Testata
B2. Connessioni con edifici adiacenti	<input type="radio"/> Nessuna	<input type="radio"/> Parziale	<input type="radio"/> Completa
B3. Muri in comune			#
B4. Altezza relativa rispetto agli edifici adiacenti	<input type="radio"/> Maggiore	<input type="radio"/> Uguale	<input type="radio"/> Minore

C. MORFOLOGIA DELLA FACCIATA

C1. Orientamento della facciata		▼	
C2. Numero di piani visibili		#	
C3. Lunghezza della facciata [m]		📏	
C4. Altezza della facciata [m]		📏	
C5. Spessore medio della muratura di facciata		📏	
C6. Snellezza della parete (C4/C5)		📏	
C7. Presenza del timpano	<input type="radio"/> Si	<input type="radio"/> No	
C8. Altezza del timpano [m]		📏	
C9. Geometria del timpano	<input type="radio"/> Triangolare	<input type="radio"/> Trapezoidale	<input type="radio"/> Irregolare

D. GEOMETRIA DELLE APERTURE IN FACCIATA

D1. Numero di bucatore medie per piano		#	
D2. Disposizione verticale	<input type="radio"/> Allineate	<input type="radio"/> Sfalsate	<input type="radio"/> Asimmetriche
D3. Altezza della fascia orizzontale superiore [m]		📏	
D4. Bucature di grandi dimensioni (>40% parete)	<input type="radio"/> Si	<input type="radio"/> No	
D5. Presenza di aperture recenti o modificate	<input type="radio"/> Si	<input type="radio"/> No	

E. STRUTTURA IN PIANTA

E1. Spessore parete alla base [m]		📏	
E2. Spessore parete in sommità [m]		📏	
E3. Variazione dello spessore [%]		#	
E4. Numero di pareti ortogonali alla facciata		#	
E5. Distanza media tra pareti ortogonali [m]		📏	
E6. Discontinuità nelle sezioni murarie	<input type="radio"/> Si	<input type="radio"/> No	<input type="radio"/> Parziale
E7. Ammortamento tra pareti ortogonali	<input type="radio"/> Si	<input type="radio"/> No	<input type="radio"/> Parziale
E8. Presenza di giunti strutturali o separazioni	<input type="radio"/> Si	<input type="radio"/> No	

note



SCHEDA PER LA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA'
Definizione del cinematismo di collasso probabile

ID

F. ELEMENTI STRUTTURALI

F1. Tipo di muratura				▼
F2. Muratura a sacco / paramenti multipli				▼
F3. Qualità della tessitura muraria	<input type="radio"/> Regolare	<input type="radio"/> Discontinua	<input type="radio"/> Degradata	
F4. Presenza di nicchie, canne fumarie, cavità	<input type="radio"/> Sì	<input type="radio"/> No		
F5. Degrado di malte	<input type="radio"/> Visibile	<input type="radio"/> Probabile	<input type="radio"/> Assente	
F6. Natura della malta				▼
F7. Presenza di sali o disgregazione superficiale	<input type="radio"/> Sì	<input type="radio"/> No		

G. SOLAI E COPERTURE

G1. Numero di impalcati				#
G2. Tipologia di solaio per ogni impalcato				☰
G3. Collegamento solaio-muratura	<input type="radio"/> Ammorsato	<input type="radio"/> Appoggiato	<input type="radio"/> Sconosciuto	☰
G4. Orditura del solaio rispetto alla facciata	<input type="radio"/> Parallela	<input type="radio"/> Ortogonale	<input type="radio"/> Inclinata	☰
G5. Presenza di controventi o diaframmi rigidi	<input type="radio"/> Sì	<input type="radio"/> No		
G6. Presenza di copertura spingente	<input type="radio"/> Sì	<input type="radio"/> No		

H. VINCOLI E DISPOSITIVI STRUTTURALI

H1. Presenza di cordolo in sommità	<input type="radio"/> Assente	<input type="radio"/> Ligneo	<input type="radio"/> Cementizio
H2. Cordolo continuo su più facciate adiacenti	<input type="radio"/> Sì	<input type="radio"/> No	
H3. Collegamento efficace tra piani	<input type="radio"/> Sì	<input type="radio"/> No	<input type="radio"/> Parziale
H4. Presenza di dispositivi antiribaltamento	<input type="radio"/> Catene	<input type="radio"/> Cravatte	<input type="radio"/> Nessuno

I. OUTPUT ALGORITMO MASON

I1. Meccanismo di collasso locale più probabile		⚙️
---	--	----

J. INTERFERENZE E RISCHIO

J1. Lunghezza stimata dell'ingombro al suoto [m]				✎
J2. Rischio per viabilità o spazi pubblici	<input type="radio"/> Alto	<input type="radio"/> Medio	<input type="radio"/> Basso	
J3. Presenza di ostacoli che limitano il ribaltamento				▼

note

Il livello quantitativo di MASON: precisione e simulazione avanzata

L'approccio quantitativo di secondo livello della metodologia MASON rappresenta una procedura avanzata e articolata per la valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici in muratura, basata su una conoscenza *as built* del manufatto. Questa metodologia si fonda su rilievi strumentali di elevato dettaglio, integrati in un modello informativo tridimensionale secondo logiche BIM, e consente di associare ai potenziali meccanismi locali di collasso anche il valore dell'accelerazione sismica necessaria alla loro attivazione.

Il processo ha inizio con una fase di acquisizione dati estremamente accurata, mediante l'impiego di tecniche di rilievo avanzate in grado di restituire fedelmente le caratteristiche geometriche, materiche e strutturali dell'edificio. Tra le tecniche utilizzabili, la fotogrammetria digitale, sia terrestre che da drone, consente la creazione di modelli *reality-based* ad alta risoluzione, capaci di rappresentare lo stato di conservazione e le eventuali deformazioni strutturali mediante l'analisi di fuori piombo e scostamenti. In parallelo, l'impiego di tecnologie geomatiche, come stazioni totali, interferometri radar e laser scanner 3D, permette una discretizzazione fine della geometria e la mappatura dettagliata di superfici, materiali e difetti costruttivi. La nuvola di punti generata restituisce inoltre valori RGB, utili all'interpretazione dei materiali e degli stati di degrado.

Accanto alla documentazione geometrica, il secondo livello richiede la caratterizzazione meccanica della muratura, ottenibile tramite due approcci principali: l'impiego delle tabelle della Circolare n. 7/2019, che forniscono valori medi di riferimento per tipologie murarie note, e l'applicazione dell'Indice di Qualità Muraria (IQM)²⁰⁹, una metodologia osservazionale che permette di stimare le proprietà meccaniche sulla base del rispetto delle regole d'arte.

Quando necessario, è possibile integrare con analogie a murature simili o con prove non distruttive²¹⁰ per valutare l'omogeneità e la presenza di difetti nascosti. L'affidabilità della caratterizzazione è espressa attraverso il Fattore

²⁰⁹ BORRI A. *ET AL.* (2019), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 16.

²¹⁰ Soniche, sclerometriche.

di Confidenza (FC), che incide direttamente sulla valutazione della capacità strutturale.

Il modello BIM generato in questa fase costituisce un contenitore informativo avanzato, in grado di includere dati geometrici, tecnologici, materici e strutturali, e consente di sviluppare un'analisi integrata del comportamento sismico dell'edificio. Il livello di dettaglio del modello viene definito in funzione degli obiettivi di analisi, con possibilità di spingersi fino a LOD 300-400²¹¹ per una rappresentazione approfondita. In contesti storici e aggregati urbani complessi, il processo BIM può essere esteso al paradigma HBIM (*Historical Building Information Modelling*²¹²), o al suo sviluppo HT_BIM (*Historical Town BIM*²¹³), finalizzato alla modellazione di ambiti urbani composti da più unità edilizie, come nel caso oggetto di studio.

Grazie alla centralità del modello informativo, il BIM diventa la piattaforma su cui convergono tutte le informazioni acquisite: rilievi geometrici e materici, parametri meccanici, informazioni storiche, analisi di vulnerabilità. Il sistema consente la consultazione e la condivisione interattiva dei dati da parte di più operatori, abilitando il *work-sharing* e favorendo l'adozione di un approccio multidisciplinare alla gestione del patrimonio costruito.

Una volta completata la modellazione, l'analisi della vulnerabilità prosegue con approcci cinematici avanzati. In particolare, per i meccanismi di collasso fuori piano, si ricorre all'analisi cinematica lineare, che consente di calcolare il moltiplicatore orizzontale α_0 dei carichi associato all'attivazione del meccanismo considerato e l'accelerazione spettrale di attivazione a_0 . Quest'ultima viene confrontata con l'accelerazione di riferimento a_g prevista per lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV). Il superamento della verifica implica una potenziale attivazione del meccanismo di collasso. Tale analisi si

²¹¹ Secondo la norma UNI 11337 il LOD 300 è definito come «Geometria precisa: L'oggetto rappresentato nel modello è preciso nella sua conformazione geometrica in termini di quantità, dimensioni, forma, posizione, orientamento e interfacce con gli altri sistemi dell'edificio». Il LOD 350 è definito come «Documentazione costruttiva: L'elemento geometricamente preciso è accompagnato da dettagli e informazioni che permettono di comprendere come l'oggetto interagisce con altri oggetti e sistemi presenti nel modello». Il LOD 400 è definito come «Produzione: L'elemento incluso nel modello si riferisce a un sistema specifico in termini di forma, dimensione, posizionamento e quantità, ed è corredato da informazioni dettagliate per la fabbricazione e l'assemblaggio/installazione».

²¹² MURPHY M. *ET AL.* (2013), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 71.

²¹³ PELLICCIO A. *ET AL.* (2017), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 78.

basa sul *Principio dei Lavori Virtuali* (PLV), applicato a cinematismi elementari rappresentanti le potenziali modalità di collasso (ribaltamento semplice, cantonale, lungo le aperture, flessione verticale e orizzontale, collasso del timpano).

I dati necessari per questa analisi includono: caratteristiche geometriche delle pareti (altezza, spessore, posizione e dimensione delle aperture), condizioni di vincolo (ammorsamenti, presenza di catene), tipologia e orditura degli orizzontamenti e delle coperture, stato di conservazione e proprietà meccaniche dei materiali. Tali informazioni, derivate dal rilievo e dalla caratterizzazione precedentemente eseguiti, permettono di definire in modo rigoroso le condizioni limite di attivazione del meccanismo. L'algoritmo utilizzato per l'identificazione del meccanismo di collasso rimane lo stesso del *Livello 1* nella sua struttura logica, ma si arricchisce di parametri quantitativi che ne affinano la predittività. I risultati delle analisi vengono poi visualizzati direttamente all'interno del modello BIM: ogni facciata è associata a valori numerici di accelerazione di attivazione e a esiti di verifica normativa, rappresentati mediante simulazione virtuale dei meccanismi e gradienti/scale cromatiche intuitive per la rappresentazione degli esiti. Questa rappresentazione consente non solo una lettura immediata delle criticità, ma anche l'integrazione con sistemi GIS e web-GIS per la visualizzazione in ambito urbano, con possibilità di realizzare mappe di rischio tematiche e di supportare le decisioni in merito alla pianificazione degli interventi.

Il ruolo di MASON tra i metodi esistenti

Nel panorama degli strumenti di valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici in muratura, la metodologia MASON rappresenta un'evoluzione concettuale e operativa che integra in maniera coerente rilievo, modellazione, analisi e rappresentazione dei dati. L'elemento distintivo della metodologia risiede nella sua struttura multilivello e nell'interoperabilità tra diversi ambienti digitali (BIM, GIS, algoritmi predittivi), che la rendono adatta tanto a studi di dettaglio su edifici isolati quanto ad applicazioni su scala urbana.

Uno dei principali vantaggi della metodologia MASON è la sua scalabilità. Essa consente infatti di adottare un primo livello di analisi qualitativa, basato su rilievo speditivo, per identificare rapidamente i meccanismi di collasso più probabili. In questo livello, l'algoritmo predittivo sviluppato elabora le informazioni raccolte tramite schede di rilievo digitali per restituire, sulla base di regole *boolean logic*, il meccanismo locale più critico. Questa procedura offre un grado superiore di specificità, in quanto non si limita a classificare genericamente la vulnerabilità ma associa in modo mirato a ciascun edificio un tipo di cinematismo. A ciò si aggiunge il vantaggio della modellazione tridimensionale BIM anche nel primo livello: pur essendo a basso livello di dettaglio (LOD 200), essa consente una comprensione più immediata delle vulnerabilità anche per utenti non tecnici, facilitando la comunicazione e la condivisione con enti locali e cittadini. L'integrazione con sistemi GIS, inoltre, permette di mappare geograficamente le vulnerabilità, creando scenari di rischio distribuiti spazialmente che rappresentano un valido supporto per la pianificazione urbana e le azioni di mitigazione. Tuttavia, il livello qualitativo presenta anche alcune limitazioni. L'algoritmo si basa su un set di parametri strutturali osservabili o desumibili da rilievi a vista: pertanto, la sua accuratezza dipende fortemente dalla qualità e completezza del rilievo. In mancanza di informazioni dettagliate su elementi nascosti (ad esempio gli ammorsamenti murari o lo stato di conservazione interno), la valutazione rischia di semplificare eccessivamente situazioni complesse, generando risultati da considerare come indicazioni preliminari, e non definitive.

È a questo punto che interviene il secondo livello della metodologia MASON, ovvero l'analisi quantitativa, che rappresenta il cuore innovativo del sistema. Questo livello si fonda su rilievi strumentali ad alta risoluzione e

sulla modellazione informativa avanzata HBIM o HT_BIM, realizzata secondo standard normativi UNI 11337. Il passaggio a un modello BIM ad alto LOD (300-400) consente di rappresentare in modo estremamente dettagliato la geometria, i materiali, le connessioni strutturali e i dati diagnostici, costituendo una banca dati tridimensionale interattiva e interrogabile. In questo contesto, l'algoritmo MASON si evolve, trasformandosi in un sistema integrato di analisi, in grado non solo di individuare i meccanismi di collasso, ma anche di quantificarne l'accelerazione di attivazione (α_0) attraverso analisi cinematiche lineari e, laddove possibile, non lineari. Questo consente di superare l'approccio puramente descrittivo per accedere a valutazioni prestazionali coerenti con le indicazioni normative (NTC 2018, Circolare 7/2019), arrivando a una verifica semplificata allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV). I vantaggi principali del secondo livello risiedono quindi nella possibilità di:

- effettuare analisi accurate su edifici singoli o aggregati;
- ottenere risultati numerici confrontabili con le soglie normative;
- visualizzare in ambiente BIM i risultati per l'accelerazione di attivazione e indicatori per l'esito delle verifiche;
- aggiornare dinamicamente il modello con nuove informazioni, creando un archivio vivo per il monitoraggio e la manutenzione del patrimonio edilizio.

Accanto a questi benefici, vi sono però criticità da considerare. Il *Livello 2* richiede maggiori risorse economiche, tempi più lunghi e personale altamente specializzato, sia per l'esecuzione dei rilievi che per la modellazione e le analisi. L'adozione del BIM in contesti diffusi e in piccoli comuni, nonostante l'entrata in vigore del Decreto BIM²¹⁴, risulta ancora oggi ostacolata dalla carenza di competenze tecniche e dalla scarsa digitalizzazione delle pubbliche amministrazioni.

Rispetto ad altri metodi in uso, MASON si distingue inoltre per la capacità di correlare la vulnerabilità locale alle effettive condizioni fisiche e geometriche dell'edificio, superando la logica delle classi predefinite.

In sintesi, MASON non si configura come una mera evoluzione dei metodi esistenti, ma come una piattaforma metodologica completa, modulare e

²¹⁴ Decreto del Ministro delle Infrastrutture e dei Trasporti n. 560 del 1° dicembre 2017, *Criteri per la digitalizzazione delle procedure di affidamento degli appalti pubblici*, Gazzetta Ufficiale n. 32 del 8 febbraio 2018.

adattabile. Il suo vero punto di forza sta nella connessione dinamica tra rilievo, algoritmo, modellazione e visualizzazione. Tale connessione non solo migliora l'accuratezza delle valutazioni, ma rende possibile la loro comunicazione in ambienti integrati e aggiornabili. È una metodologia progettata per crescere insieme al grado di conoscenza dell'edificio, passando da un primo screening qualitativo a un'analisi quantitativa completa, mantenendo la coerenza informativa tra i due livelli.

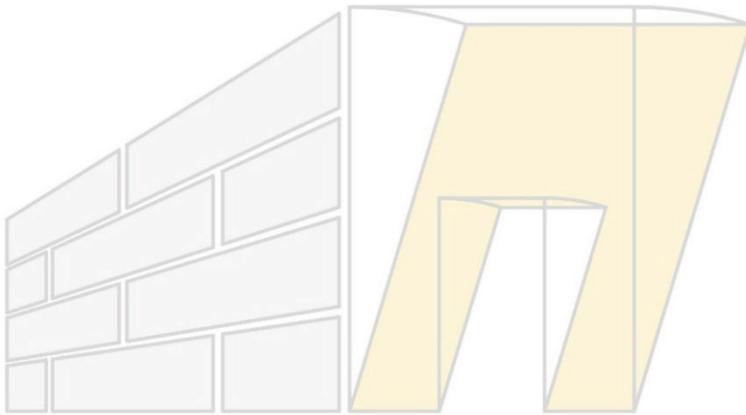


PART 3



PART 3

MASON
A NEW BIM-BASED APPROACH
FOR MULTILEVEL
SEISMIC VULNERABILITY ASSESSMENT



MASON

Multilevel Assessment for Structural Overturning and Notation

The eye does not see things, but figures of things that mean other things.

Italo Calvino

Seismic collapse mechanisms in historic masonry buildings

The analysis of seismic vulnerability in historic masonry buildings is a matter of fundamental importance for seismic risk management, particularly in small historic centers, where the built fabric is predominantly composed of structures constructed in eras devoid of codified seismic design criteria. As discussed in Part One, the fragility of these urban contexts is not solely a structural issue it also involves urban planning, regulatory, and socio-economic dimensions. Earthquake events that have affected Italy in recent decades have dramatically revealed the widespread vulnerability of these settings, where building collapses have had consequences not only for human safety but also for the irreversible loss of architectural and cultural heritage of inestimable value.

One of the most critical aspects in the assessment of vulnerability lies in the difficulty of reconstructing the construction history of these buildings, which have often undergone stratifications, transformations, and subsequent modifications that have altered their original configuration. The coexistence of different materials and construction techniques, the presence of structural elements with varying levels of degradation, and the general scarcity of documentary information make it challenging to define reliable models for predicting seismic response. In this context, the digitalization of historic centers – explored in Part Two – represents an innovative opportunity for information management, enabling the integration of geometric, material, and structural data into advanced informational models.

However, for these tools to be truly effective, a deep understanding of the collapse mechanisms typical of historic masonry buildings is essential. Experience has shown that, in most cases, collapse does not result from the simultaneous failure of the entire structure, but rather from the activation of local

collapse mechanisms. Out-of-plane failure modes are among the primary causes of structural damage, as they affect wall sections that are weakly connected to the rest of the building such as facades, gable walls, and corner segments. These mechanisms may develop in different forms depending on the geometric and construction characteristics of the building and often occur before the structure can exhibit a global response to seismic actions.

To understand the vulnerability of buildings typical of historic centers and to develop effective mitigation strategies, it is therefore essential to analyze in detail the factors that trigger out-of-plane mechanisms and the ways in which they evolve. The ability to predict such mechanisms and integrate them into advanced digital models is a key step in improving risk assessment methodologies and designing targeted interventions for the protection of built heritage.

Hidden fragilities: structural vulnerabilities of masonry buildings

Understanding collapse mechanisms is the first step toward a comprehensive analysis of the vulnerabilities affecting buildings in historic centers. Beneath the apparent solidity of these constructions lie structural weaknesses that are often difficult to detect but play a critical role in seismic performance. It is therefore essential to examine in detail the critical elements influencing their response to seismic forces, with a focus on inherent weaknesses in materials, connections, and construction configurations.

In historic centers, the aggregated configuration²¹⁵ of buildings is extremely common and represents one of the primary vulnerabilities during seismic events. One of the most critical phenomena in this context is seismic pounding, which occurs when adjacent buildings with different natural vibration periods oscillate out of phase. If the space between structures is insufficient or nonexistent, mutual impacts can result in potentially causing wall

²¹⁵ A structural aggregate is a group of adjacent buildings constructed in different periods and with uncoordinated building techniques, sharing structural elements such as load-bearing walls, floors, and roofs. These buildings, typical of historic centers, were not designed as a single structural entity, resulting in heterogeneity in their mechanical and dynamic responses, which makes them particularly vulnerable to seismic events.

collapses, roof damage, and localized failures of structural elements. Repeated impacts can also lead to progressive deterioration, as cracks form at contact points, further reducing the building's structural capacity over time. This issue is particularly hazardous when buildings exhibit significant differences in height or lateral stiffness, since impact forces tend to concentrate on small portions of the walls, generating high localized stress.

The intensity of pounding effects depends not only on the geometrical and structural characteristics of the buildings but also on the direction of the seismic motion, the frequency content of ground shaking, and the surrounding conditions of the urban aggregate. In addition to pounding, another key vulnerability in aggregated buildings is the uneven distribution of stiffness. The presence of buildings with different structural layouts, masonry qualities, and wall thicknesses introduces discontinuities in the transmission of seismic forces, creating stress concentrations in critical zones. For instance, if a stiff-walled building is connected to a more flexible one, their interaction may cause instability, leading to detachment of weaker walls or overloading of stiffer elements. Asymmetrical stiffness distribution can also produce undesirable torsional effects, increasing loads on orthogonal walls and exacerbating out-of-plane failure risks.

Another significant concern is the absence of structural joints, which prevents independent dynamic behavior among connected buildings and alters their seismic response. In systems where structures are joined without properly designed structural links, seismic loads may be redistributed unpredictably, overloading portions of the aggregate. This problem is amplified by the variety of materials used over different construction phases: buildings composed of mixed masonry qualities and compositions can respond inconsistently to seismic events, resulting in internal stress imbalances and irregular collapse mechanisms. For example, a stone masonry structure not properly tied to an adjacent brick building may collapse prematurely, triggering a progressive failure of the entire aggregate.

Disturbances in vibration transmission within the aggregate represent yet another vulnerability mechanism. Buildings with differing mechanical characteristics absorb and transmit seismic energy in uneven ways, generating kinetic energy concentration in specific areas. When seismic waves travel through materials with different densities and elastic moduli, local amplification effects may arise, increasing the risk of structural damage. The absence

of effective connections between materials further raises the likelihood of progressive detachment, particularly when walls are not perfectly orthogonal or have undergone successive construction stratifications.

Identifying these issues requires advanced diagnostic tools capable of analyzing dynamic structural responses and locating the most critical vulnerabilities. High-resolution laser scanning and photogrammetry provide detailed three-dimensional models that highlight geometric discontinuities and potential interaction zones between buildings. The use of accelerometers and seismic sensors enables the recording of buildings' dynamic responses, the identification of their natural vibration periods, and the detection of anomalies in seismic wave transmission.

The specific vulnerabilities of masonry represent a decisive factor in evaluating the seismic resistance of historic buildings, as they directly influence the structure's capacity to absorb and dissipate seismic energy. Masonry is a non-homogeneous and anisotropic material, whose mechanical response depends on several factors, including material quality, construction techniques, and the extent of deterioration.

A primary source of concern is the heterogeneous quality of materials, often resulting from empirical construction methods and the reliance on locally available resources. Rubble stone masonry, typical of many Italian historic areas, features a discontinuous texture composed of irregularly shaped stones bonded with often weak and inconsistent mortar. This type of masonry exhibits significantly lower shear and compressive strength compared to well-ordered solid brick masonry. Furthermore, the irregular shape and arrangement of the components promote voids and internal discontinuities, reducing the load-bearing capacity and increasing the likelihood of localized collapse under horizontal stress.

By contrast, solid brick masonry generally offers greater structural regularity and better stress distribution. However, it may also be particularly vulnerable when weakened by degraded mortar or poor joint integrity. When wall height-to-thickness ratios are unfavorable, these walls may experience out-of-plane instability, heightening the risk of partial or total collapse during an earthquake.

Another crucial factor is mortar deterioration, which directly affects block cohesion and the ability of masonry to behave monolithically under seismic loading. Historic mortars were typically lime-based, with a slow hardening

process relying on carbonation, a chemical process susceptible to environmental disruption. Over time, the binder loses its adhesive capacity due to dissolution, erosion, and salt crystallization, particularly in the presence of rising damp or water infiltration. This progressive deterioration weakens the masonry's shear resistance, increasing the risk of block detachment, cracking, or surface layer spalling.

A particularly insidious phenomenon is salt crystallization, which occurs through cycles of dissolution and precipitation. When moisture is present, soluble salts within construction materials or transported by water infiltrate the masonry pores and crystallize as the water evaporates. This process generates internal pressures that gradually disintegrate masonry, leading to plaster detachment and loss of surface material. Repeated wetting and drying cycles accelerate this effect, rendering masonry especially vulnerable to mechanical damage from seismic actions.

A critical contributor to out-of-plane failure in historic buildings is the absence of effective interlocking between orthogonal walls. In many cases, masonry walls were merely juxtaposed without any structural connection, resulting in independent behavior of each wall under seismic forces. Façade and end walls are particularly prone to out-of-plane overturning a collapse mechanism frequently observed in historic centers affected by earthquakes²¹⁶. Progressive wall detachment may also occur due to weakly connected floor structures that fail to adequately distribute horizontal forces.

Another key vulnerability stems from successive stratifications in construction materials due to modifications over time. Historic buildings were often expanded, vertically extended, or structurally altered with different materials than those originally used. This leads to mixed masonry types with varied stiffness and mechanical strength, causing stress concentrations and localized damage. Infrared thermography often reveals hidden stratifications that are not externally visible but may significantly influence seismic behavior²¹⁷.

From a vulnerability assessment perspective, masonry must be analyzed using a combination of direct and indirect methods. Non-destructive

²¹⁶ Experimental studies on a shaking table have shown that, in the absence of proper interlocking, the out-of-plane strength of masonry can be reduced by up to 70%.

²¹⁷ In some cases, the presence of weak joints between masonry built in different historical periods facilitates the detachment and partial collapse of walls, especially under high-intensity horizontal loads.

techniques such as infrared thermography, sonic testing, and ultrasonic inspections can detect internal discontinuities and areas of material degradation. Mechanical tests on samples extracted *in situ* help determine compressive and shear strength, providing critical data for structural modeling.

The geometry of openings in load-bearing masonry walls is a crucial determinant of seismic behavior, directly influencing a wall's ability to resist horizontal and vertical loads. In particular, the misalignment of openings across different floors is one of the most frequent causes of stress concentration and the formation of local collapse mechanisms. When windows and doors are not vertically aligned, the vertical load path is interrupted, generating structural discontinuities where significant stress concentrations develop.

This phenomenon is particularly evident in residual wall piers²¹⁸, which are notably weakened when slender. Slender piers, characterized by an unfavorable height-to-width ratio, are prone to instability and exhibit reduced capacity to resist horizontal actions, thereby increasing the risk of out-of-plane ejections during an earthquake²¹⁹. The uneven transmission of loads along the wall's height can also initiate out-of-plane collapse mechanisms, whereby sections of masonry progressively detach from the main structural body and overturn.

Another critical vulnerability is the presence of large openings. Load-bearing walls are essential for both vertical load support and resistance to lateral forces. When the wall surface is substantially reduced by large openings, the ability of the structure to absorb seismic forces is significantly compromised. If such openings are not properly braced, stress concentrations tend to develop around their edges, increasing the likelihood of cracking and localized failure. In cases where openings occupy a large portion of the wall, masonry stiffness is drastically reduced, leading to greater lateral displacements under seismic excitation²²⁰.

²¹⁸ The portions of masonry located between two successive openings.

²¹⁹ Experimental studies conducted on masonry models with misaligned openings have shown that interruptions in structural continuity led to significant variations in stress distribution. Finite Element Method (FEM) analyses reveal that high tensile and shear stresses concentrate at discontinuity points, potentially exceeding the tensile strength of the masonry and causing the formation of vertical cracks and the subsequent expulsion of wall piers.

²²⁰ Numerical simulations show that walls with an opening ratio greater than 30% of the total surface area exhibit a significant reduction in load-bearing capacity and an increased vulnerability to out-of-plane collapse mechanisms. The stability of such walls depends heavily on

Further concern arises from the unregulated modification of existing openings, such as the enlargement of windows or the creation of new access points. These interventions are often carried out without proper structural design, compromising the stability of the wall and altering load distribution paths. The removal of masonry sections without appropriate reinforcement can lead to a significant reduction in the wall's load-bearing capacity. In the absence of adequate load transfer mechanisms, newly introduced openings may trigger progressive failure phenomena, with the potential collapse of the entire wall segment²²¹.

To assess the vulnerability associated with the geometry of openings, a variety of investigative methods are employed. Laser scanning and high-resolution photogrammetry allow for the creation of detailed three-dimensional wall models, highlighting the distribution and dimensions of openings. Thermographic analysis and sonic testing can detect structural discontinuities and verify critical points in load transfer. *In situ* mechanical testing provides essential data on the residual load-bearing capacity of the masonry.

Floor systems play a fundamental role in the seismic performance of historic masonry buildings, as they contribute to the distribution of horizontal forces and to the overall box-like behavior of load-bearing walls. However, in many heritage structures, floors exhibit several structural deficiencies that compromise their effectiveness, rendering them vulnerable to seismic actions. The configuration, material quality, and method of connection to the surrounding masonry are all critical factors affecting the building's dynamic response.

One of the most common issues in historic floors is the lack of effective anchorage to the load-bearing walls. In traditional masonry buildings, timber floors are often simply seated in wall niches, without any interlocking mechanisms or rigid connections. This configuration severely limits the floor's ability to act as a rigid diaphragm, a key requirement for transferring seismic forces across perimeter walls and ensuring unified structural behavior. In the absence of sufficient anchorage, seismic events may cause independent

the presence of stiffening elements, such as effective lintels, steel frames, or reinforced masonry bracing.

²²¹ Experimental investigations have shown that creating openings in load-bearing masonry walls without adequate structural measures can reduce the wall's shear strength by up to 50%. In particular, when openings are made in already deteriorated masonry or in walls with poor-quality mortar, the risk of cracking and localized detachment increases significantly.

movements between structural elements, promoting out-of-plane failure mechanisms in walls and significantly reducing the building's overall stability.

Experimental investigations have demonstrated that inadequately connected timber floors may undergo differential displacements related to the walls, severely compromising their ability to transmit horizontal forces²²². Another critical issue is the misalignment of floors across different levels, a common condition in historic buildings due to alterations and vertical extensions over time. When floors are staggered across orthogonal walls, they create structural discontinuities that disrupt force transmission along the building height. This phenomenon is particularly problematic when floors are not aligned, leading to irregular stress distribution and increasing the likelihood of localized failures.

The asymmetry introduced by floor misalignment can also induce undesirable torsional effects, with increased stress on certain walls or building segments²²³. The most visible consequence of this is the formation of vertical cracks in load-bearing walls and the potential separation of building portions that respond differently to seismic excitation.

An additional vulnerability lies in the use of brick vaults, often employed in historic floor systems, especially in architecturally significant buildings. Although vaults can provide greater rigidity than timber floors, they are prone to instability if not properly restrained by containment systems such as metal ties or tension rods. In their absence, the horizontal thrust generated by the vaults increases pressure on the supporting walls, promoting out-of-plane ejection or overturning. Barrel and groin vaults face a high risk of collapse due to instability when lateral restraints are insufficient to counteract their own weight and the imposed seismic forces.

The assessment of floor system vulnerability in historic buildings requires the use of advanced diagnostic tools. Endoscopic inspections are employed to examine floor-to-wall connections, while dynamic analyses using

²²² Studies conducted using shaking tables and finite element (FEM) numerical modeling show that the absence of rigid connections between floors and masonry walls leads to a significant increase in lateral displacements, resulting in an amplification of local seismic effects.

²²³ Experimental tests have shown that buildings with misaligned floor slabs experience a reduction in overall structural capacity of up to 30% compared to buildings with well-distributed slabs properly connected to the load-bearing walls.

accelerometers help determine the building's vibrational response and identify possible decoupling phenomena between structural components.

Roof structures represent a primary structural element in historic masonry buildings, directly influencing their seismic response. In optimal conditions, roofs not only distribute vertical loads but also contribute to the overall bracing of the structure, enhancing stiffness and reducing the likelihood of local collapse mechanisms. However, in many heritage buildings, roofs display multiple vulnerabilities that compromise their ability to withstand dynamic seismic forces, increasing the risk of partial or total collapse of the underlying structures.

One of the most critical issues involves the horizontal thrust exerted by pitched roofs on the top sections of perimeter walls. Traditional timber roofs, typical of historic constructions, are composed of main and secondary beams supporting wooden planks or purlin systems, which are often inadequately connected to masonry walls. In the absence of sufficient restraining systems – such as metal ties, tension rods, or reinforced masonry ring beams – the dead load of the roof, coupled with seismic action, produces lateral forces that can lead to the out-of-plane expulsion or overturning of upper wall segments, particularly gables and parapets²²⁴.

Another significant concern is the degradation of timber roof elements, which may undermine the structural integrity of the entire system. As a hygroscopic material, wood is highly susceptible to biological decay, including fungal attacks, wood-boring insects, and rot, all of which progressively reduce the mechanical strength of load-bearing beams. The presence of knots, cracks, or localized deterioration at bearing points further amplifies vulnerability, especially under dynamic loads such as those induced by seismic events.

An additional critical factor is the absence of effective bracing systems within the roof itself. Traditional roofs often lack transverse stiffening elements, relying solely on the resistance of beam-to-beam connections. During an earthquake, the absence of diagonal bracing and the lack of effective connections among structural components can result in uncontrolled deformations and displacements, compromising the roof's overall stability. Furthermore, if beams are not adequately interconnected or anchored to the

²²⁴ This phenomenon has been widely documented in buildings affected by seismic events, where the collapse of gable walls is often one of the first observable failure mechanisms.

surrounding masonry, the roof may rotate or experience differential movements that generate stress concentrations in the supporting walls, exacerbating structural distress.

Vaulted roofs, present in many monumental historic buildings, exhibit further seismic vulnerabilities, primarily due to the lateral thrust they impose on supporting walls. Without the presence of tie rods or metal chains, vaults may induce a progressive outward displacement of load-bearing walls, trigger the formation of cracks and lead to eventual collapse. Barrel and groin vaults are highly susceptible to instability when lateral restraints are insufficient to counter the thrust generated by their self-weight and external dynamic forces.

The assessment of roof structure vulnerability requires the application of advanced survey techniques. Laser scanning and infrared thermography are employed to detect deformations or discontinuities in timber frameworks, while sonic and ultrasonic testing can evaluate material quality and identify hidden decay not visible to the naked eye.

Vertical connection elements, such as internal and external staircases, represent one of the most critical points in the seismic response of historic buildings. Stairs play a key role in the distribution of vertical loads and, when properly integrated into the structural system, can improve the overall stiffness of the building. However, in heritage constructions, staircases were rarely designed with lateral seismic forces in mind, making them particularly vulnerable.

A primary issue is the lack of adequate anchorage between staircases and load-bearing walls. In many cases, masonry staircases are not properly bonded to adjacent walls, leading to independent movement during seismic events. Without effective mechanical connection, the stair acts as an isolated element, unable to transfer horizontal forces, and becomes susceptible to collapse. Single-flight staircases and those with intermediate landings are especially vulnerable, particularly when the landings are not adequately restrained. Seismic motion can generate differential displacements at connection points, triggering instability and potential failure.

Furthermore, the self-weight of masonry stairs, combined with the absence of structural joints capable of accommodating seismic deformations, may cause progressive cracking and collapse along the stair structure. Cantilevered stairs – commonly built in stone or brick, with treads anchored directly into the wall – present even greater vulnerability. Their performance relies heavily

on the compressive strength of the masonry and the embedment of the steps. If the walls suffer degradation or experience relative displacement during seismic action, the loss of support can lead to progressive failure of the staircase. The absence of proper anchorage limits the stair's ability to dissipate seismic energy, increasing the likelihood of localized detachment.

Spiral staircases, though structurally more continuous than cantilevered types, can also be at risk, particularly when the central core is constructed of unreinforced masonry or stone. The transfer of seismic forces along the helical structure can produce abnormal stress concentrations at the points of connection between steps and the central shaft, potentially leading to failure. In multi-story buildings, unbraced spiral staircases can amplify torsional effects, increasing the overall seismic demand on the structure.

Another important aspect is the role of staircases in the propagation of damage within the building. During an earthquake, stairs can become focal points for stress accumulation, transmitting horizontal forces from walls to adjacent structural elements. If the staircase is rigid but poorly integrated into global structural behavior, it may generate incompatible movements, increasing stress on walls and floors and resulting in local cracking or collapse. Conversely, deformable stairs – such as those made of wood – may undergo large relative displacements, compromising occupant safety and structural integrity.

The evaluation of staircase vulnerability in historic buildings requires advanced diagnostic techniques, including endoscopy, vibration monitoring, and finite element modeling, to accurately assess their integration and behavior under seismic loads.

Historic buildings have often undergone transformations over centuries, adapting to changing functional and residential needs. These changes – which include vertical extensions, enlargements, and the insertion of new structural elements – constitute a major source of seismic vulnerability, as they frequently alter the building's global behavior without appropriate structural compensation.

One key issue is the increase in seismic mass due to the addition of upper stories. When new floors are added without reinforcing the existing masonry, seismic forces acting on the load-bearing walls and foundations increase, leading to higher stresses and potential collapse. The added mass increases the inertial forces generated during an earthquake, which are transmitted to

the lower levels often weakened by material degradation or original construction deficiencies²²⁵.

Another critical factor is the use of modern materials incompatible with traditional construction techniques. For example, adding reinforced concrete structures atop masonry buildings introduces abrupt stiffness discontinuities between floors. The substantially higher stiffness of concrete causes irregular force distribution, concentrating seismic stresses at the interface between old and new construction. Furthermore, such modifications can induce torsional effects, especially when additions are asymmetric relative to the building's center of mass. In elongated or irregular floor plans, the resulting torsional moments can exacerbate differential displacements and stress concentrations.

In addition to vertical extensions, other alterations – such as terraces, overhangs, external stair towers, and new openings – further compromise the structural performance. These interventions, if not carefully designed, modify load paths, introduce discontinuities, and create stress concentration zones, ultimately reducing the building's seismic resilience.

Foundations are one of the most critical components in historic buildings, as they form the interface between the structure and the ground, directly influencing seismic performance. Historical construction techniques did not include specific design strategies for seismic loads. The foundation type, construction quality, and geotechnical conditions of the soil can lead to differential settlements, localized instability, and – under severe conditions – the collapse of the entire structure.

Most historic buildings are supported by rubble masonry or unreinforced stone foundations, often lacking effective mechanical connection to the overlying masonry walls. Rubble core masonry typically consists of two external stone or brick wythes filled with loosely bound rubble and weak mortar. While this configuration can provide sufficient static bearing capacity, it performs poorly under seismic loading, as the infill may lose cohesion and disintegrate under vibratory stress.

Another frequent issue is the shallow depth of historic foundations, often placed directly on natural soil without proper anchorage or subsoil preparation. This makes the structure susceptible to soil moisture fluctuations, which

²²⁵ This effect has been observed in numerous FEM (Finite Element Method) simulations, where the addition of rigid elements on upper levels generated stress concentrations in the lower floors, leading to the formation of cracks and local collapse mechanisms.

can cause swelling, shrinkage, and differential settlement. Such movements manifest as cracking in load-bearing walls, separation between walls and floors, and progressive tilting, all of which severely compromise the building's stability. Clayey soils are particularly problematic, as seasonal moisture variations induce long-term ground movements that weaken the bearing capacity and accelerate masonry degradation.

An additional concern is the lack of mechanical continuity between the foundation and the superstructure. Modern buildings are typically designed with rigid connections that uniformly distribute seismic loads to the ground. Historic buildings, by contrast, often exhibit empirical foundation systems that lack such integration, increasing the risk of wall-foundation detachment and out-of-plane collapse during earthquakes.

Foundation vulnerability is further exacerbated by the presence of underground voids or erosion phenomena. Many historic centers are underlain by crypts, tunnels, cisterns, or anthropogenic cavities, which undermine soil stability and create zones of weakness. Water infiltration, through erosion or filtration, can further reduce soil cohesion, triggering sinkholes or progressive settlement. In the most severe cases, these phenomena may result in foundation collapse and sudden structural failure.

Advanced investigation techniques, such as geophysical surveys²²⁶, penetrometric tests, geotechnical borings, and monitoring with inclinometers and topographic leveling are essential to assess the condition and seismic behavior of historic foundations.

Taking together, these issues delineate a high level of seismic vulnerability in historic buildings, particularly in small historic centers. A thorough understanding of their structural weaknesses is essential. Traditional empirical assessment, based solely on visual inspection, must now be integrated with advanced numerical modeling capable of simulating dynamic responses and collapse mechanisms.

Accurate identification of vulnerabilities is the first step toward the development of predictive models and the implementation of effective mitigation strategies that ensure both seismic safety and the preservation of architectural heritage.

²²⁶ Ground Penetrating Radar (GPR), seismic tomography, and electrical resistivity tomography (ERT).

Collapse mechanisms

The set of structural vulnerabilities analyzed highlights how the seismic response of historic masonry buildings is influenced by multiple, often interrelated factors. However, understanding construction weaknesses is not sufficient unless the specific mechanisms by which these weaknesses lead to actual structural failures are thoroughly examined. Collapse mechanisms represent the direct manifestation of the identified criticalities and serve as the foundation for developing effective seismic risk mitigation strategies.

As previously discussed, the seismic behavior of historic masonry buildings is strongly influenced by the activation of predominantly local collapse mechanisms, which compromise the stability of the structure even before a global response to seismic forces can occur. Unlike modern buildings – designed to behave as a box-like system, where all elements collaborate to resist horizontal loads – historic constructions often feature unconnected load-bearing walls, flexible diaphragms, and ineffective structural connections. The heterogeneity of materials and construction techniques, combined with progressive mortar degradation and the stratification of successive interventions, favors the onset of out-of-plane mechanisms that are collapse modes in which walls lose stability and move independently from the rest of the structure.

A primary cause of such mechanisms is the absence of effective interlocking between orthogonal walls. If walls are not structurally tied to one another, they can behave as isolated elements and overturn under seismic acceleration. In many historic buildings, floor diaphragms are incapable of absorbing and redistributing horizontal forces, exacerbating overall vulnerability and contributing to the detachment of perimeter walls.

One of the most common mechanisms is simple overturning, which occurs when a wall, lacking adequate lateral restraint, rotates about its base until it collapses²²⁷. This phenomenon is especially frequent in the main façades of row buildings, where front elevations lack lateral confinement and are fully exposed to seismic forces. In more critical conditions, flexural overturning may be observed, characterized by the formation of a plastic hinge, either at the base or at an intermediate height of the wall. In the presence of openings, weak joints, or deteriorated mortar, the wall may fragment into multiple sections, increasing the likelihood of partial or total collapse.

²²⁷ The kinematic mechanism leads to the formation of a horizontal plastic hinge.

Overturning mechanisms are not limited to façades but may also affect building corners. In so-called corner overturning, the lack of proper connection between orthogonal walls leads to the detachment and loss of stability of the corner masonry. This type of failure is particularly dangerous, as it may propagate along the structure and trigger cascading effects on adjacent buildings.

Out-of-plane expulsion of wall panels – typically those located between two openings – is also a frequent collapse mode. When the height-to-width ratio of these panels is unfavorable, their capacity to resist transverse seismic loads is significantly reduced, leading to detachment and collapse. This issue is often worsened by the misalignment of openings across floors, which disrupts structural continuity and creates stress concentration points.

The upper sections of masonry walls, especially the gables of pitched roofs, are also highly susceptible to out-of-plane collapse. Gable failure occurs when the roof structure does not provide adequate lateral restraint, and in the absence of tie rods or metal chains to limit displacement. This type of failure is particularly dangerous, as gable collapse can drag along roof sections and cause widespread damage to underlying structural components.

Construction characteristics of masonry also influence other collapse mechanisms, such as sliding along mortar joints. This occurs when the mortar lacks the shear strength to counteract seismic forces, causing masonry units to slip along horizontal joints, leading to a progressive weakening of the wall and, in severe cases, complete collapse. This phenomenon is especially common in irregular rubble masonry, where cohesion between blocks depends almost entirely on mortar quality often significantly degraded over time.

Another collapse mechanism linked to building configuration is the loss of connection between orthogonal walls. When masonry walls are merely abuted without proper interlocking, seismic action can cause them to detach from one another, rendering the entire structure unstable²²⁸.

In vaulted buildings, the collapse of arches and vaults represents a particularly critical vulnerability. Although these elements possess intrinsic load-bearing capacity, they require effective lateral restraints to ensure stability. In the absence of proper buttresses or metal tie rods to counteract horizontal thrusts, vaults may develop plastic hinges at critical points, leading to

²²⁸ This issue has been observed in many historic buildings affected by earthquakes, where the separation between walls led to the progressive collapse of the structure.

structural collapse. Vault failure can have cascading effects on adjacent structural elements, with especially severe consequences for the building's overall integrity.

Another significant issue in historic building aggregates is collapse due to seismic pounding, which occurs when adjacent buildings with different vibration periods oscillate out of phase during an earthquake. When separation between structures is inadequate, mutual impacts can lead to the detachment of wall portions, roof damage, and local collapse of structural components.

The analysis of collapse mechanisms enables the identification of structural vulnerabilities that trigger failure, highlighting the critical points that make historic buildings particularly susceptible to seismic risk. Numerous methodologies have been developed based on these principles to detect weaknesses and define effective mitigation strategies.

Methods and approaches for seismic vulnerability assessment

The field of seismic vulnerability assessment has undergone progressive refinement of its methodologies. Initially, understanding the seismic response of buildings relied solely on empirical observation of earthquake-induced damage. Over time, however, this approach has evolved, incorporating quantitative tools and more sophisticated predictive models capable of interpreting and anticipating structural behavior. Today, seismic vulnerability assessment is carried out through an integrated system of methodologies that combines statistical analyses, probabilistic models, and numerical simulations, with the aim of obtaining the most accurate possible representation of risk conditions. This process – made increasingly necessary by the widespread vulnerability of buildings in historic centers – employs both simplified tools for rapid classification of the built environment and advanced approaches that allow for detailed evaluation of potential collapse mechanisms.

The starting point for vulnerability assessment is represented by empirical methods, which derive from the observation of damage caused by past earthquakes. Developed during the 20th century, these methods classify buildings based on construction characteristics and associate them with an expected damage level for each seismic intensity grade. Among the most consolidated tools in this context are macroseismic intensity scales, developed to describe the effects of earthquakes on the built environment. Historical examples include the Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS)²²⁹, the Modified Mercalli Intensity (MMI)²³⁰, and the Medvedev-Sponheuer-Kárník (MSK)²³¹ scales. These have evolved into the more structured European Macroseismic Scale (EMS-98)²³², which not only describes observed damage but also classifies buildings into different vulnerability classes based on their typological and constructional features. The EMS-98 represents a synthesis of previous scales and marks a shift toward a more structured interpretation of seismic risk,

²²⁹ MCS, 1930.

²³⁰ MMI, 1930.

²³¹ MSK, 1964, 1976, 1981.

²³² GRÜNTAL G. (2021), *op. cit.* in bibliographic reference no. 48.

enabling correlations between building typologies and damage probability across various seismic intensities.

While valuable for initial classification, macroseismic scales have inherent limitations due to their descriptive nature and challenges in rigorously applying them to complex scenarios. To overcome these, more advanced methodologies have been developed in recent decades, capable of providing more detailed estimates of structural response. A significant advancement in this regard is represented by fragility curves, which express the probability that a structure will reach a specific limit state as a function of seismic intensity. Derived from statistical analysis of observed damage or numerical modeling, these curves allow for more precise evaluation of seismic behavior, making it possible to predict expected damage across different building categories. Fragility curves are widely used in seismic risk planning, as they enable the quantification of vulnerability across large building stocks and provide essential data for defining mitigation strategies.

In parallel, damage probability matrices (DPM) have emerged as probabilistic tools expressing the likelihood that a building will suffer a specific damage level for each seismic intensity class. Developed through statistical analysis of damage data from past earthquakes, DPMs were first systematically applied in Italy following the 1980 Irpinian earthquake and are still in use today. The European Risk-UE project subsequently refined this approach by introducing standardized methodologies for urban-scale vulnerability assessment. A key aspect of these models is the integration of structural and constructional information, enhancing the predictive capabilities of the assessments.

With the evolution of survey techniques, seismic vulnerability assessment has gained access to more detailed and quantitative tools. In Italy, the National Group for Earthquake Defense (GNDT)²³³ developed structural survey forms for classifying buildings based on geometric, typological, and construction parameters. The GNDT *Level 1* and *Level 2* forms allow for the assignment of a weighted vulnerability index based on structural and constructional features, offering an efficient and effective evaluation tool. This approach has been further refined with the AeDES²³⁴ form for post-earthquake usability assessment, and methods tailored to building aggregates, such as the model

²³³ See [webliography](#), entry no. 7.

²³⁴ BERNARDINI A. (2000), *op. cit.* in bibliographic reference no. 8.

proposed by Antonio Formisano²³⁵, which introduces correction parameters for aggregated building conditions.

Among the most recent tools, CARTIS²³⁶ forms have introduced a systematic classification of the Italian building stock based on a detailed structural inventory. This tool enables the collection of information on construction typologies, material quality, geometric features, and vulnerability elements, contributing to a more standardized assessment of seismic vulnerability on a national scale.

In parallel, the SAVE method²³⁷ has digitized vulnerability analysis by integrating typological-structural data with geometric and site-specific information of buildings. This method facilitates the creation of large-scale vulnerability maps and supports the planning of seismic risk mitigation interventions.

An innovative approach is represented by the RESISTO method²³⁸, developed for rapid seismic vulnerability assessment of existing buildings. Based on the estimation of the collapse ground acceleration (PGA) of the building, RESISTO allows for the evaluation of seismic capacity by integrating survey data with reduction coefficients derived from qualitative parameters. This method is particularly useful for prioritizing interventions, as it enables classification of buildings according to their vulnerability, thus aiding urban-scale risk management.

In recent years, the focus has shifted toward approaches that allow for more detailed, localized assessments. A significant example is the FaMIVE method²³⁹, which identifies potential collapse mechanisms and evaluates structural capacity using limit analysis. This method correlates geometric configuration and construction details with the likelihood of out-of-plane mechanisms, offering a more granular estimate of local building vulnerability.

Finally, kinematic analyses, both linear and nonlinear, are essential tools for assessing the seismic safety of masonry buildings. Based on the principles of limit equilibrium analysis, these techniques determine collapse multipliers

²³⁵ FORMISANO A. *ET AL.* (2013), *op. cit.* in bibliographic reference no. 43.

²³⁶ Typological-structural characterization of urban districts.

²³⁷ Updated Tools for Seismic Vulnerability Assessment of Building Heritage and Urban Systems.

²³⁸ Total Seismic Resistance, [see webliography, entry no. 8.](#)

²³⁹ Failure Mechanisms Identification and Vulnerability Evaluation.

for various local mechanisms, considering boundary conditions and building geometry. Linear kinematic analysis computes the activation multiplier for local mechanisms using the Principle of Virtual Work, while nonlinear kinematic analysis estimates the structure's displacement capacity up to the collapse threshold. Italian standards – from OPCM 3274/2003 to NTC 2018 and its 2019 Application Circular – have progressively integrated these tools into structural safety evaluation procedures, prescribing the use of kinematic models for identifying local vulnerabilities in masonry buildings.

The evolution of seismic vulnerability analysis methods has significantly improved risk assessment capabilities. While earlier analyses relied on empirical observations and simplified methods, today the combination of advanced surveys, numerical models, and kinematic analyses yields increasingly precise and reliable results. This progress marks a fundamental step in defining risk mitigation strategies, enabling more accurate identification of structural weaknesses and the design of more effective strengthening interventions.

The MASON algorithm: methodology and structure

The MASON methodology – *Multilevel Assessment for Structural Overturning and Notation* – was developed as an operational response to the limitations of traditional seismic vulnerability assessment methods, particularly in complex urban contexts such as minor historic centers characterized by aggregated masonry buildings. The objective of the methodology is to structure a multilevel, scalable, and interoperable process, capable of adapting to the available level of knowledge and the technical and economic resources at hand, by integrating survey, modeling, analysis, and digital representation.

As highlighted by scientific literature and past experiences in risk assessment, the seismic behavior of masonry structures can be analyzed across multiple scales of detail: from the entire urban aggregate to the individual building, down to the wall or structural component. The choice of the most appropriate analytical approach is inevitably constrained by the quantity and quality of available data, which may be acquired through various tools – historical, architectural, and structural surveys, material analyses, diagnostic investigations, and *in situ* testing – as also recommended by the Italian Building Code (NTC 2018).

Within this framework, MASON is structured into two main operational levels, each responding to specific informational needs and providing a different level of detail in the vulnerability assessment.

The first level adopts a rapid and qualitative approach, designed for large-scale preliminary mapping of local vulnerabilities. It is based on data collected through visual inspections, without advanced instrumentation, but with standardized protocols capable of reliably describing the geometric and material characteristics of masonry façades. Buildings are described using a minimal set of parameters – such as shape, masonry texture, opening configuration, and presence of transverse restraints – which serve as input for an automatic recognition algorithm designed to identify the most likely out-of-plane collapse mechanism.

This algorithm operates on a Boolean-decision logic, classifying each wall based on the potential activation of a local collapse mechanism. The outcome

is displayed in a static 3D model with low LOD²⁴⁰ (Level of Detail), created within a BIM environment and accompanied by a simplified and georeferenced visualization in GIS. This representation enables an immediate understanding of the vulnerabilities within urban fabric and serves as the basis for launching more targeted and detailed investigations.

The second level represents the analytical advancement of methodology, relying on instrumental surveys and advanced numerical modeling. At this stage, the knowledge of the building is significantly more detailed and includes high-precision 3D geometric data obtained through digital surveys, along with information about material mechanical properties, construction details, and historical-structural documentation.

The core of this phase is the application of kinematic analyses, aimed at evaluating the collapse multiplier for each mechanism previously identified. This enables the quantification of the seismic acceleration that would trigger wall collapse, which is then compared against the thresholds specified by current building codes²⁴¹. The verification is conducted in accordance with the 2019 Application Circular to the NTC 2018²⁴², referencing the Life Safety Limit State (SLV), and yields an objective measure of seismic safety.

The BIM model used at this stage is informative and dynamic, with a high LOD, and allows for the direct integration of analytical results (α values, activation acceleration, verification outcomes) into the 3D model. Each façade is associated with a visual representation indicating its level of vulnerability. Simultaneously, within the GIS environment, topological and spatial data are updated with the verification results, generating layered risk maps ready for use in decision-making processes, including urban planning and civil protection strategies.

²⁴⁰ Level of Development/Level of Detail.

²⁴¹ Technical Standards for Construction (2018), *Update of the “Technical Standards for Construction”*, Ministerial Decree of January 17, 2018.

²⁴² NTC 2018 Circular. Circular No. 7 of January 21, 2019, *Instructions for the application of the “Update of the Technical Standards for Construction” referred to in Ministerial Decree of January 17, 2018*. C.S.LL.PP., 2019.

The qualitative level of MASON: speed and reliability

The first-level qualitative approach of the MASON methodology is designed as a simplified and operationally efficient procedure for the preliminary assessment of seismic vulnerability in masonry buildings. This methodology relies on information gathered through expedited surveys, visual inspections, and documentary analysis, and aims to identify the local collapse mechanisms most likely to be activated in the event of an earthquake.

The survey is the essential starting point for the entire analytical process. It must reconstruct the historical evolution of the building, identify both the original and modified architectural and structural features, and detect any typological stratifications or additions. Documentary analysis – based on the examination of public and private archives, technical base maps (*e.g.*, CTR, cadastral, PTPR), and satellite visualization systems (*e.g.*, Google Earth, Bing Maps) – supports and complements the direct inspection.

On-site observation aims to gather fundamental data on the geometric and structural configuration: number of stories, inter-floor heights, floor plan and elevation development, architectural typology (*e.g.*, row, gallery, courtyard), prevailing structural system (*e.g.*, load-bearing masonry, frame structure, mixed systems), roof type (*e.g.*, pitched, flat, pavilion), presence of *pilotis* or vaulted spaces, as well as vulnerability indicators such as misalignment of openings, absence of connecting elements (*e.g.*, ring beams, ties), wall discontinuities, and visible surface deterioration.

The conservation state is assessed following the NorMal 1/88²⁴³ recommendations, while the crack pattern is analyzed using standard technical symbology. Where plaster conditions allow, masonry texture is identified, evaluating bond pattern, mortar quality, block regularity, and dimensions. Localized probes may be carried out to evaluate wall-to-wall connections, floor anchorage, the presence of thrust-resisting devices (*e.g.*, wooden or reinforced concrete tie beams), and the full-thickness masonry composition.

All collected data is systematized within a digital survey form, organized into logical sections:

²⁴³ See [webliography](#), entry no. 9.

- General Information, including location (region, province, municipality, address), structural aggregate and structural unit ID, and building use category (selected via predefined dropdown menus based on official cadastral classifications).
- Urban Fabric Data, recording the number of structural units within the aggregate, the relative position of the unit (central, corner, end), and the type of connection between the surveyed façade and the adjacent structural units.
- Façade Geometry, including cardinal orientation, number of floors, façade height and length, presence and dimensions of the gable, and the slenderness ratio (height/thickness).
- Opening Geometry, documenting the number and layout of openings per floor, average size, the height of the top band, and possible vertical misalignments.
- Plan Geometry, indicating wall thickness at the base, variations in elevation, number and spacing of perpendicular walls, and presence or absence of proper interlocking.
- Structural Features, including number of vaulted floors, structural types of floors and roofs, layout orientation relative to the façade, masonry typology (from a structured list), and presence of connecting elements (ties, anchors, ring beams) and wall-to-floor anchorage.

This survey form serves as an input for a predictive algorithm, which processes the collected information by verifying the presence or absence of specific structural conditions deemed critical for triggering local out-of-plane collapse mechanisms. Nine key conditions are evaluated: critical wall slenderness, lack of inter-story anchorage, absence of top ring beams, weak orthogonal wall connections, absence of ties/anchors, misalignment of openings, wall discontinuities, excessive distance between transverse walls, and presence of a gable.

Each condition is assigned a Boolean value (true/false), and the algorithm compares these against predefined critical matrices corresponding to different out-of-plane mechanisms. The result indicates the most likely local collapse mechanism, selected from: simple overturning (global or partial), corner overturning, overturning along openings, vertical bending, horizontal bending, and gable overturning. Each output includes a summary of the identified vulnerabilities, offering a technically sound diagnostic overview.

Within this first-level MASON methodology, digital modeling plays a crucial role in the systematization and communication of analytical results. A low-detail 3D BIM model (LOD 200)²⁴⁴ is developed, focusing on geometric and volumetric aspects rather than detailed structural information. This model, based on rapid survey data, is not a full digital twin but rather a synthetic representation that visually conveys key morphological and architectural features of the building.

One of the most innovative aspects of this process is the ability to link each BIM object – especially the exposed façade – to the output of the predictive algorithm, which identifies the most probable collapse mechanism. These results are encoded using shared parameters and customized families, allowing the integration of qualitative data such as mechanism type, degradation conditions, and detected vulnerability indicators directly into the model.

A thematic color scheme enables real-time visualization of local seismic risk associated with each façade, offering a concise yet technically meaningful reading of expected seismic performance.

In parallel, the methodology provides for precise georeferencing of analyzed buildings within a GIS environment, allowing results to be represented in the context of the urban fabric. Each building is associated with a set of descriptive and analytical attributes from the survey form and algorithm output, including a unique building ID, structural aggregate ID, prevalent structural and material type, expected out-of-plane collapse mechanism, and a vulnerability index.

Through thematic symbology and layered data, it becomes possible to immediately visualize the spatial distribution of collapse mechanisms across urban centers, facilitating the identification of recurring patterns and high-risk situations.

²⁴⁴ According to UNI 11337, LOD 200 is defined as: «Approximate Geometry: The modeled element is geometrically recognizable, so that it can be used as a reference for coordination among the various design disciplines». It follows that the geometry is generic, and the information is approximate, making it suitable for preliminary studies.

The quantitative level of MASON: precision and advanced simulation

The second-level quantitative approach of the MASON methodology represents an advanced and structured procedure for assessing the seismic vulnerability of masonry buildings, grounded in an “as-built” knowledge of the structure. This methodology is based on high-detail instrumental surveys integrated into a three-dimensional information model according to BIM logic, enabling the association of each potential local collapse mechanism with the corresponding seismic acceleration required to activate it.

The process begins with a highly accurate data acquisition phase, employing advanced surveying techniques capable of faithfully capturing the building’s geometric, material, and structural characteristics. Among the tools used, digital photogrammetry – both terrestrial and drone-based – enables the creation of high-resolution reality-based models that depict the conservation state and structural deformations, such as out-of-plumbness and misalignments. Simultaneously, geomatic technologies, such as total stations, radar interferometry, and 3D laser scanning, allow for the fine discretization of geometry and detailed mapping of surfaces, materials, and construction defects. The resulting point cloud also includes RGB values, useful for interpreting material types and degradation patterns.

Alongside geometric documentation, this second level requires the mechanical characterization of the masonry, which can be achieved using two main approaches: the use of reference tables from the Italian Circular No. 7/2019, which provide average values for known masonry types, and the application of the Masonry Quality Index (IQM)²⁴⁵, an observational method that estimates mechanical properties based on compliance with traditional construction rules. When necessary, these methods can be supplemented with analogy-based estimations or non-destructive²⁴⁶ testing to assess material homogeneity and detect hidden defects. The reliability of the characterization is expressed through the Confidence Factor (FC), which directly influences structural capacity assessment.

²⁴⁵ BORRI A., DE MARIA A. (2019), *op. cit.* in bibliographic reference no. 16.

²⁴⁶ Sonic and sclerometric tests.

The BIM model developed in this phase serves as an advanced information container, capable of integrating geometric, technological, material, and structural data, and supports an integrated analysis of the building's seismic behavior. The model's Level of Detail (LOD) is defined according to the analysis objectives and can reach LOD 300-400²⁴⁷ for in-depth representations. In historic and complex urban contexts, the BIM process can evolve into HBIM (Historic Building Information Modelling)²⁴⁸ or HT_BIM (Historic Town_BIM)²⁴⁹, tailored for modeling urban environments composed of multiple building units as is the case in the present study.

Thanks to the central role of the information model, BIM becomes the platform where all collected data converge geometric and material surveys, mechanical parameters, historical records, and vulnerability assessments. The system enables interactive consultation and data sharing among multiple stakeholders, facilitating work-sharing and promoting a multidisciplinary approach to the management of built heritage.

Once the modeling phase is complete, vulnerability analysis continues through advanced kinematic methods. For out-of-plane collapse mechanisms, linear kinematic analysis is used to calculate the horizontal load multiplier α associated with the activation of a given mechanism, along with the spectral acceleration a_0 required to trigger collapse. This is compared to the reference ground acceleration a_g for the Life Safety Limit State (SLV). If the spectral acceleration a_0 is lower than a_g , the verification fails, indicating a high risk of mechanism activation. The analysis is based on the Virtual Work Principle, applied to elementary kinematic mechanisms such as simple overturning, corner overturning, overturning along openings, vertical bending, horizontal bending, and gable collapse.

²⁴⁷ According to UNI 11337, LOD 300 is defined as: «Precise geometry: the object represented in the model is accurate in its geometric configuration in terms of quantity, dimensions, shape, position, orientation, and interfaces with other building systems». LOD 350 is defined as: «Construction documentation: the geometrically accurate element is accompanied by details and information that allow one to understand how the object interacts with other objects and systems present in the model». LOD 400 is defined as: «Fabrication: the element included in the model refers to a specific system in terms of shape, size, placement, and quantity, and is accompanied by detailed information for manufacturing and assembly/installation».

²⁴⁸ MURPHY M. *ET AL.* (2013), *op. cit.* in bibliographic reference no. 70.

²⁴⁹ PELLICCIO A. *ET AL.* (2017), *op. cit.* in bibliographic reference no. 78.

The required input data include wall geometry (height, thickness, size and location of openings), boundary conditions (interlocking, presence of ties), typology and layout of floors and roofs, material properties, and conservation state. These parameters, derived from previous surveys and characterizations, allow for a rigorous definition of activation limit conditions. The core algorithm for identifying the collapse mechanism retains the logical structure used in *Level 1*, but is enhanced with quantitative parameters, improving its predictive capability.

Analysis results are visualized directly within the BIM model: each façade is linked to numeric values for activation acceleration and to regulatory verification outcomes, represented through virtual simulations of collapse mechanisms and intuitive gradient color scales. This visualization enables not only immediate interpretation of criticalities, but also integration with GIS and web-GIS systems, facilitating urban-scale visualization, the creation of thematic risk maps, and the support of decision-making processes in seismic risk mitigation and intervention planning.

The role of MASON among existing methods

Within the landscape of seismic vulnerability assessment tools for masonry buildings, the MASON methodology – *Multilevel Assessment for Structural Overturning and Notation* – represents both a conceptual and operational advancement, coherently integrating surveying, modeling, analysis, and data representation. Its defining feature lies in its multi-level structure and interoperability across digital environments (BIM, GIS, predictive algorithms), making it suitable for both detailed studies on individual buildings and broader urban-scale applications.

One of MASON's primary strengths is its scalability. The first level adopts a qualitative approach, based on rapid surveys, to quickly identify the most likely local collapse mechanisms. In this phase, a custom predictive algorithm processes the information collected via digital survey forms and, based on boolean logic rules, determines the most critical local mechanism. This procedure offers a higher level of specificity, as it does not merely classify vulnerability in general terms but instead associates a specific collapse kinematic with each building. Furthermore, the use of 3D BIM modeling, even at low detail level (LOD 200), enhances the readability of vulnerabilities – even for non-technical users – thus improving communication and engagement with local authorities and the public. Integration with GIS systems allows for the spatial mapping of vulnerabilities, generating geographically distributed risk scenarios that serve as valuable tools for urban planning and risk mitigation strategies.

Nevertheless, the qualitative level also presents certain limitations. The algorithm relies on a set of observables or inferred structural parameters: its accuracy is therefore heavily dependent on the quality and completeness of the visual survey. In the absence of detailed data on hidden structural elements (such as wall interlocking or internal conservation conditions), the evaluation risks oversimplifying complex situations, and thus should be interpreted as preliminary guidance rather than definitive assessment.

It is at this point that the second level of the MASON methodology – quantitative analysis – comes into play, representing the innovative core of the system. This level is grounded in high-resolution instrumental surveys and in advanced information modeling (HBIM or HT_BIM), carried out according

to UNI 11337 standards. Transitioning to a high-LOD BIM model (LOD 300-400) allows for the detailed representation of building geometry, materials, structural connections, and diagnostic data, forming an interactive and queryable 3D database. In this context, the MASON algorithm evolves into an integrated analysis system, capable not only of identifying collapse mechanisms but also of quantifying their activation acceleration (α_0) through linear and, where applicable, nonlinear kinematic analyses. This makes it possible to move beyond a purely descriptive approach, enabling performance-based assessments aligned with technical regulations (NTC 2018, Circular 7/2019), and supporting simplified verifications at the Life Safety Limit State (SLV).

The key advantages of *Level 2* include the ability to:

- Conduct high-precision analyses on both individual buildings and structural aggregates.
- Generate numerical results that are directly comparable to regulatory thresholds.
- Visualize activation acceleration results and verification outcomes within the BIM environment.
- Dynamically update the model with new information, creating a living database for the monitoring and maintenance of the built heritage.

However, certain challenges must be acknowledged. *Level 2* demands greater financial investment, longer implementation timelines, and highly specialized personnel for survey execution, modeling, and analysis. The widespread adoption of BIM in smaller municipalities is still hindered by limited technical expertise and low levels of digital infrastructure within local administrations, despite the requirements introduced by the Italian BIM Decree²⁵⁰.

Compared to other methods currently in use, MASON stands out for its ability to correlate local vulnerability with the actual physical and geometric characteristics of the building, thus transcending the constraints of predefined classification schemes.

In summary, MASON should not be viewed merely as an evolution of existing methods, but rather as a comprehensive, modular, and adaptable methodological platform. Its real strength lies in the dynamic connection between

²⁵⁰ Decree of the Minister of Infrastructure and Transport No. 560 of December 1, 2017, *Criteria for the digitalization of public procurement procedures*, Official Gazette No. 32 of February 8, 2018.

survey, algorithm, modeling, and visualization. This integration not only enhances the accuracy of the assessments but also enables their communication within integrated, updateable environments. Designed to evolve with the increasing knowledge of the structure, MASON enables a seamless transition from a qualitative screening to a fully quantitative analysis, while preserving data consistency between the two levels.



PARTE 4

PARTE 4

ANATOMIA SISMICA
DI UN BORGO ITALIANO
CON MASON



Il problema che entra in gioco è che nessuna civiltà [...] può sussistere e sopravvivere senza una memoria collettiva. Le società hanno sempre fatto affidamento sulla memoria per preservare la loro identità.

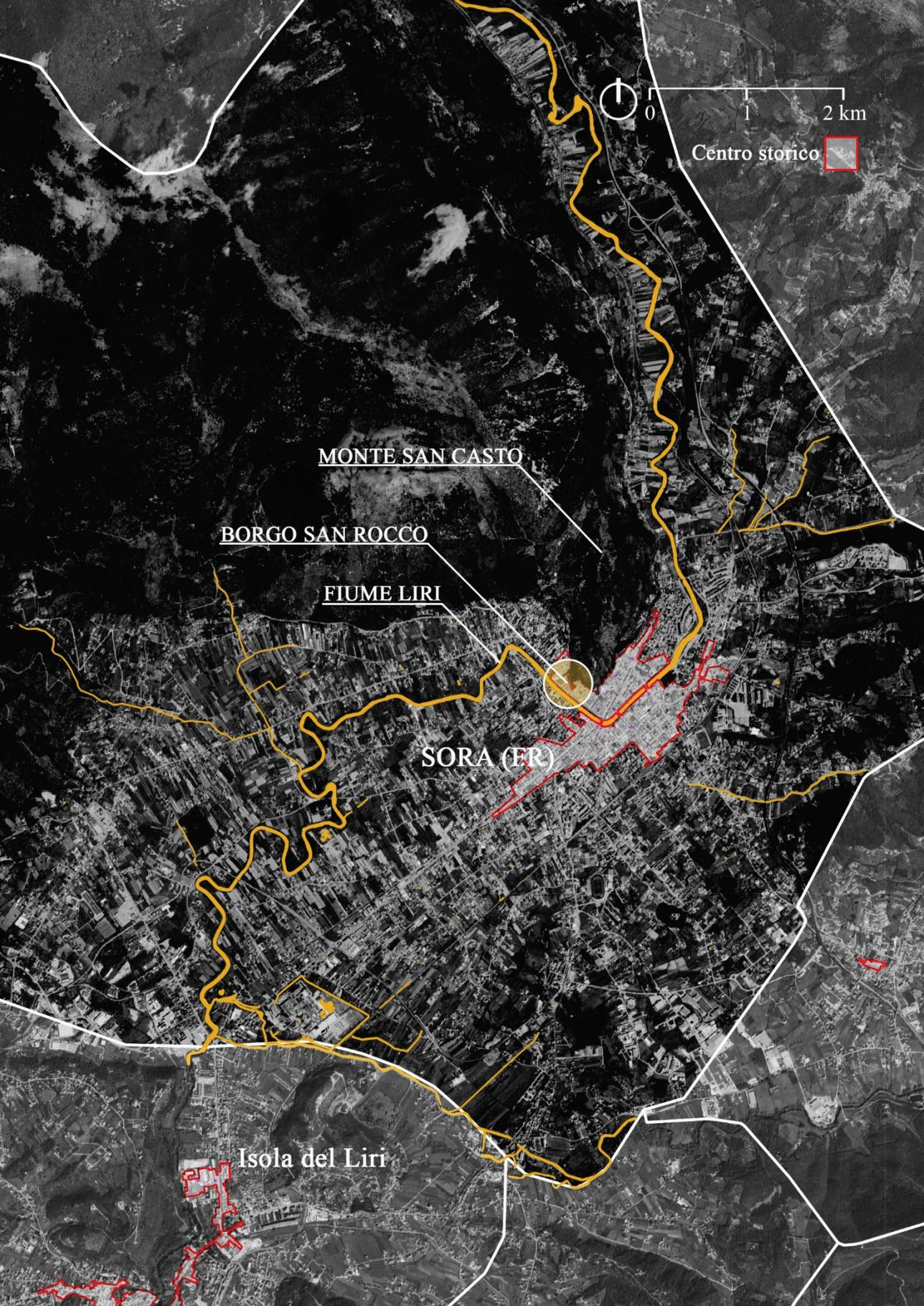
Umberto Eco

Tra monte e fiume: Borgo San Rocco a Sora (FR)

Tra i tanti centri storici minori dell'Italia centrale, Sora si distingue per la sua posizione geografica complessa, la lunga storia insediativa e una vulnerabilità sismica intrinseca, emersa con forza nel corso dei secoli. Nonostante non rientri tra i grandi centri urbani del Lazio, il suo patrimonio architettonico e la struttura urbana compatta rendono il territorio un esempio paradigmatico di centro storico a rischio sismico. In questo scenario si inserisce Borgo San Rocco, una porzione densa e coesa del tessuto storico sorano che, per conformazione, datazione e funzione urbana, rappresenta un banco di prova ideale per sperimentare l'approccio innovativo alla valutazione del rischio.

Il metodo MASON, elaborato per affrontare la complessità degli aggregati edilizi storici attraverso un'analisi multilivello, trova in Borgo San Rocco un contesto operativo perfetto: un aggregato di edifici storici in muratura, caratterizzati da disomogeneità tipologiche, interconnessioni fisiche complesse, vincoli morfologici naturali e una posizione urbana strategica. La scelta di questo sito nasce dalla volontà di verificare l'affidabilità del metodo in un caso reale, ma soprattutto dalla necessità di individuare strumenti accessibili, scalabili e replicabili per la mitigazione del rischio sismico nei centri storici minori.

Il comune di Sora si trova nella parte meridionale del Lazio, in provincia di Frosinone, e si estende per circa 72 km², all'interno di una conca fluviale chiusa a est dall'Appennino abruzzese e aperta a ovest verso la pianura del Liri.



MONTE SAN CASTO

BORGO SAN ROCCO

FIUME LIRI

SORA (FR)

Isola del Liri

Il centro urbano sorge a circa 300 metri sul livello del mare, in una posizione strategica ma geologicamente articolata, all'incrocio tra la valle Roveto, la val Comino e la valle del Liri. Il territorio comunale è attraversato in senso longitudinale dal fiume Liri, che rappresenta un elemento paesaggistico e funzionale centrale: oltre ad aver favorito l'insediamento urbano e le attività artigianali e protoindustriali – soprattutto cartiere e lanifici – ha anche costituito una barriera fisica allo sviluppo edilizio, influenzando la direzione e la densità dell'espansione urbana. A nord della città si eleva il monte San Casto (546 m), rilievo calcareo che domina il centro storico. A ovest e a sud si apre invece la piana fluviale del Liri, un'area più favorevole all'edificazione, dove si è concentrata gran parte dell'espansione urbana moderna. L'orografia, fortemente irregolare, e l'assetto geologico fragile, rendono l'intero territorio particolarmente esposto alla sismicità tipica dell'Appennino centrale. Infatti, il territorio del comune di Sora è situato all'interno di una delle aree a maggiore pericolosità sismica dell'Italia centrale. Secondo la classificazione ufficiale vigente²⁵¹, Sora rientra nella zona sismica 1, ovvero quella in cui è attesa la massima accelerazione di picco al suolo (PGA), compatibile con eventi sismici forti e ricorrenti. Tale collocazione è coerente con il quadro geodinamico della regione, posta a ridosso del sistema di faglie attive dell'Appennino centro-meridionale, che interessa un vasto settore compreso tra la Marsica, la Valle Roveto e la Val di Comino. La storia sismica di Sora è documentata da numerose fonti, sia storiche che scientifiche. Secondo il Database Macrosismico Italiano (DBMI15)²⁵², l'area ha risentito di diversi terremoti significativi nel corso dei secoli, con effetti macrosismici intensi, in alcuni casi distruttivi. I principali eventi includono:

- Il terremoto del 9 settembre 1349²⁵³, associato alla faglia del basso Lazio, che devastò vaste aree del Regno di Napoli e causò danni anche nella conca del Liri;
- Il sisma del 5 dicembre 1456²⁵⁴, uno dei più violenti dell'Italia meridionale, che interessò una vasta porzione del Mezzogiorno con effetti disastrosi anche a Sora;

²⁵¹ Ordinanza PCM n. 3274/2003 e aggiornamenti regionali.

²⁵² Curato dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).

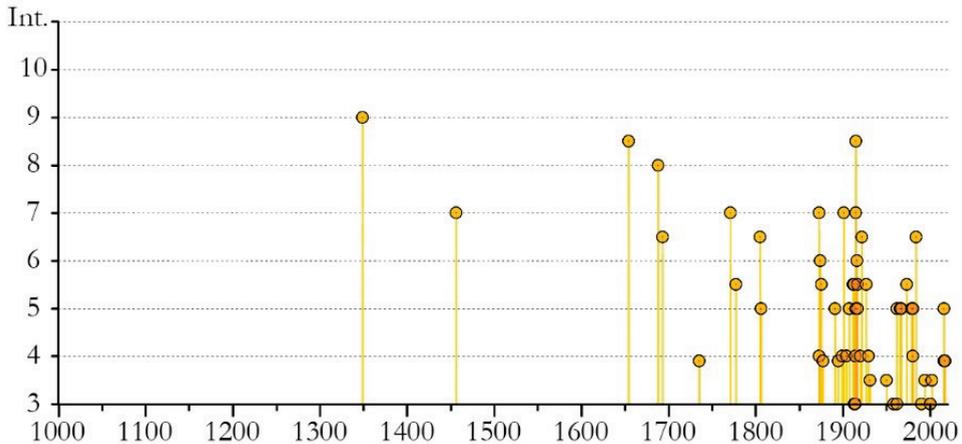
²⁵³ Vedi nota sitografica n. 10.

²⁵⁴ Vedi nota sitografica n. 11.

- Eventi sismici minori registrati tra il XVI e il XVIII secolo, spesso associati a crolli parziali e danni.

Tuttavia, l'evento più drammatico per la città fu senza dubbio il terremoto del 13 gennaio 1915²⁵⁵, noto come terremoto della Marsica. Con magnitudo stimata di Mw 7.0, il sisma colpì duramente l'area compresa tra Avezzano, Sora e la valle del Liri, provocando oltre 30.000 vittime in totale²⁵⁶. A Sora si registrarono oltre 400 morti e la distruzione di circa il 50% del patrimonio edilizio. Le cronache dell'epoca descrivono un centro urbano fortemente compromesso, con il crollo di edifici, soprattutto negli isolati prospicienti il corso del Liri, e lesioni gravi in quelli non caduti. L'evento ebbe un impatto duraturo anche sulla struttura urbana della città, determinando l'attuazione di piani di ricostruzione e la modifica di alcune configurazioni del centro storico.

A questi si aggiungono ulteriori eventi nel corso del Novecento, come i terremoti del 7 e 11 maggio 1984²⁵⁷, che interessarono nuovamente la zona con intensità moderata causando comunque danni diffusi a edifici già vulnerabili.



A rendere di particolare interesse la scelta del caso reale è la storia insediativa millenaria della città, che affonda le sue radici nella preistoria. Scavi

²⁵⁵ Vedi nota sitografica n. 12.

²⁵⁶ I terremoti del '900: il terremoto del 13 gennaio 1915 nella Piana del Fucino, vedi nota sitografica n. 13.

²⁵⁷ Vedi nota sitografica n. 14 e n. 15.

archeologici condotti in località limitrofe, come Valleradice e Carnello, hanno portato alla luce reperti riferibili al Paleolitico medio, confermando una presenza antropica stabile sin dalle fasi più antiche della frequentazione umana nell'Italia centrale²⁵⁸. Tracce di insediamenti più strutturati sono emerse in particolare nella zona del monte San Casto, dove si ritrovano resti ceramici e strutture murarie riconducibili all'età del bronzo e del ferro. Nel corso dell'VIII-VII secolo a.C., la regione fu interessata dal passaggio e dall'insediamento di popolazioni protosabine e volschi, che avrebbero dato origine a una prima forma di urbanizzazione documentata dalla realizzazione della cinta muraria in opera poligonale ancora oggi parzialmente visibile²⁵⁹. Con la progressiva espansione romana verso sud, Sora fu conquistata nel 306 a.C. durante le guerre sannitiche e trasformata nel 303 a.C. in colonia latina. Durante l'epoca romana, Sora visse una fase di intensa strutturazione urbana. Alla città furono attribuite importanti funzioni militari, logistiche e commerciali. Con la crisi dell'Impero e l'arrivo dei Longobardi nel VII secolo, Sora divenne gastaldato e fu a lungo contesa tra il Ducato di Benevento, il Monastero di Montecassino e lo Stato Pontificio. Durante tutto il medioevo, la città fu teatro di incursioni, incendi (nel 1113 e nel 1156), saccheggi e periodi di abbandono, ma non fu mai completamente rasa al suolo. Nel tardo medioevo e nella prima età moderna, Sora divenne sede di un importante ducato indipendente, il Ducato di Sora, governato prima dai Cantelmo e poi dai Della Rovere e dai Boncompagni. Tra il XVI e il XVIII secolo, la città visse una fase di riorganizzazione istituzionale, religiosa e urbana, con la costruzione di edifici civili e religiosi di rilievo e il rafforzamento della sua funzione di centro amministrativo e commerciale²⁶⁰. Nel corso dell'Ottocento, con l'annessione al Regno di Napoli e poi al Regno d'Italia, Sora entrò in una nuova fase di sviluppo, segnato da un'intensa attività industriale. Durante il secondo conflitto mondiale, Sora fu duramente colpita dai bombardamenti ma seppe risollevarsi nuovamente nel secondo dopoguerra, rafforzando il proprio ruolo territoriale come centro commerciale, scolastico e sanitario di riferimento per la valle del Liri. Oggi, Sora si presenta come una città che unisce la profondità storica del suo centro antico alla vitalità economica delle aree più recenti, ma

²⁵⁸ MEZZAZAPPA S. (2003), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 64.

²⁵⁹ BERANGER E. M. (1981), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 7.

²⁶⁰ LOFFREDO L. (1985), *op. cit.* nel riferimento bibliografico n. 60.

che, al tempo stesso, conserva nel suo tessuto edilizio segni tangibili di fragilità strutturale.

Come già evidenziato, lo sviluppo urbanistico di Sora riflette la complessità storica, morfologica e funzionale che ha caratterizzato la città nel corso dei secoli. Fin dalle prime fasi insediative, il rapporto tra la città e il suo contesto fisico ha svolto un ruolo determinante nel modellarne la forma urbana: la presenza del monte e del fiume ha inciso profondamente sulla scelta della localizzazione, sulla configurazione dell'abitato e sulle sue trasformazioni nel tempo. In epoca romana, Sora venne riorganizzata secondo un impianto ortogonale di tipo ippodameo, basato su assi viari regolari (decumani e cardì) che delimitavano *insulae* edilizie rettangolari. Ancora oggi, tracce di questa struttura sono visibili nel tracciato di corso Volsci e nelle strade trasversali ad esso perpendicolari. Il ponte romano e alcune vestigia infrastrutturali testimoniano la piena integrazione dell'impianto urbano nella rete stradale e commerciale romana. Durante il medioevo, con l'edificazione della cinta muraria, la città si contrasse in un assetto più compatto e difensivo. Il tessuto urbano assunse progressivamente una morfologia a fuso, generata dalla necessità di contenere l'espansione entro le mura e dalla conformazione naturale dell'area edificabile. A questa si affiancarono, nel tempo, porzioni a pettine, visibili lungo l'asse del fiume, dove edifici disposti perpendicolarmente alla strada si orientavano verso l'acqua, secondo logiche economico-produttive legate alla pesca. Il passaggio all'età moderna non comportò grandi trasformazioni planimetriche, ma comportò l'inserimento di edifici isolati di carattere pubblico e religioso – chiese, conventi, residenze signorili – che si sovrapposero al tessuto compatto senza alterarne significativamente la morfologia. Solo tra la fine del Settecento e l'Ottocento la città cominciò ad affacciarsi in modo più stabile oltre il fiume, avviando un processo di espansione extracittadina che si intensificò nel secondo dopoguerra. Il terremoto del 1915 diede impulso a una prima riorganizzazione urbana. Sebbene la ricostruzione inizialmente mantenne gran parte del tracciato originario, negli anni Trenta furono introdotti nuovi assi stradali e allineamenti edilizi, con l'obiettivo di migliorare l'accessibilità e l'igiene urbana. In alcuni casi, per ottenere maggiore regolarità, si operarono anche demolizioni puntuali di edifici per realizzare piccole piazze o arretramenti di facciata. La seconda metà del Novecento vide l'esplosione del tessuto edilizio moderno, favorito dalla crescita demografica e dall'introduzione di nuove infrastrutture (strade, ferrovia, acquedotto). La

città si espanse verso la pianura, con quartieri a maglia più larga, funzioni miste e tipologie edilizie isolate. Tuttavia, il centro storico ha mantenuto fino ad oggi una morfologia aggregata e continua: unità edilizie affiancate, con muri in comune, altezze variabili e accessi diretti su strada, spesso realizzate in più fasi con tecniche costruttive differenti.

EPOCA ROMANA - III-X sec. d.C.



- tessuto romano
- ◆◆ muro in opera poligonale ipotesi
- muro in opera poligonale
- ponte
- foro
- percorso preromano principale di riuso romano
- percorso preromano secondario di riuso romano
- ◆◆ viabilità romana principale
- viabilità romana secondaria

EPOCA MEDIEVALE - X-XV sec. d.C.



- tessuto medievale
- tessuto romano di riuso medievale
- torri di avvistamento ipotesi
- torri di avvistamento
- torrioni
- torrioni ipotesi
- mura IX - XI sec.
- mura XIII sec.
- viabilità medievale
- viabilità romana di riuso medievale

EPOCA RINASCIMENTALE - XV-XVIII sec. d.C.



- tessuto rinascimentale
- tessuto medievale di riuso rinascimentale
- tessuto romano di riuso rinascimentale
- viabilità rinascimentale principale di riuso
- viabilità rinascimentale secondaria di riuso
- viabilità rinascimentale secondaria

EPOCA OTTOCENTESCA - XVIII-XIX sec. d.C.



- tessuto ottocentesco
- tessuto rinascimentale di riuso nel '800
- tessuto romano di riuso nel '800
- tessuto medievale di riuso nel '800
- viabilità ottocentesca
- viabilità ottocentesca principale di riuso
- viabilità ottocentesca secondaria di riuso

All'interno di questo quadro, Borgo San Rocco si colloca immediatamente all'esterno dell'antico perimetro murario di Sora, in posizione di margine rispetto al centro storico consolidato, ma connesso ad esso sia morfologicamente che funzionalmente. Si sviluppa lungo un asse viario stretto e fortemente definito, che connette la parte più antica della città con la zona sud-orientale, configurandosi come una delle principali vie di attraversamento urbano. Il borgo si estende proprio tra i due elementi naturali distintivi: da un lato, le sponde del fiume Liri; dall'altro, il pendio roccioso del monte San Casto. Questa collocazione geografica – “tra monte e fiume” – ha influito sulla forma urbana dell'aggregato, generando un impianto compresso, lineare e fortemente aggregato, riconducibile alla tipologia cosiddetta di *street canyon*. L'ambiente urbano è connotato da due cortine edilizie continue e parallele, composte da edifici in muratura portante di altezza variabile (da due a cinque piani), interconnessi da archi passanti e strutture voltate. Il punto focale del sistema è rappresentato dall'arco di San Rocco, che funge da varco urbano e simbolico di accesso al borgo. Le origini storiche dell'insediamento risalgono con ogni probabilità alla prima metà del XVIII secolo, periodo in cui venne edificata la prima chiesa di San Rocco, dedicata al santo protettore contro la peste. Proprio questa funzione marginale e protettiva spiega la posizione esterna rispetto al nucleo murato: in epoca premoderna, infatti, era prassi collocare le strutture destinate all'accoglienza e alla quarantena dei malati fuori dalle mura cittadine. Solo tra la fine del XVIII e l'inizio del XIX secolo il borgo assunse una configurazione compiuta, sviluppandosi lungo l'asse viario principale, con l'inserimento di attività artigianali e residenze compatte.

Le caratteristiche costruttive, la varietà degli orizzontamenti, la scarsa regolarità in elevazione e la forte disomogeneità tra le facciate rendono l'aggregato particolarmente vulnerabile ai meccanismi di collasso tipici degli edifici in muratura. Inoltre, la presenza di numerose criticità geometriche-strutturali lo configura come caso ideale per l'applicazione del metodo MASON, volto a testare l'affidabilità dell'approccio multilivello alla vulnerabilità sismica in contesti storici aggregati, con l'obiettivo di trasferire il metodo anche ad altri contesti urbani analoghi.



Livello I – La diagnosi preliminare

L'approccio qualitativo previsto dal metodo MASON si fonda su un processo strutturato, pensato per consentire una valutazione rapida ma sistematica della vulnerabilità sismica di aggregati edilizi storici. In questa fase del metodo, il focus è posto sulla capacità di interpretare in modo efficace le caratteristiche geometriche, costruttive e distributive dell'aggregato, anche in assenza di rilievi strumentali di alta precisione. Il punto di forza di questa metodologia sta nella possibilità di operare su larga scala, con tempi e risorse contenute, ottenendo comunque una lettura tecnica attendibile del rischio locale, utile come base decisionale per eventuali interventi o approfondimenti successivi.

Dai documenti al rilievo: ricostruire la forma urbana

Il primo passaggio dell'analisi qualitativa MASON si articola nella definizione di una base conoscitiva solida, costruita attraverso il reperimento e la rielaborazione critica di fonti storiche, archivistiche e tecniche, ritenute essenziali per comprendere la morfologia e lo sviluppo dell'aggregato edilizio. In tale contesto, la documentazione storica assume un ruolo centrale nella ricostruzione della genesi urbana del sito e nella definizione della sua identità costruttiva. Per quanto riguarda il borgo San Rocco, l'indagine è stata condotta a partire da fonti eterogenee, comprendenti testi e cronache locali, materiali iconografici quali litografie, incisioni e dipinti d'epoca – tra cui la celebre veduta seicentesca di Sora ad opera di Francesco Vanni²⁶¹ – nonché rilievi plastici, come gli altorilievi conservati presso il Palazzo Ducale di Isola

²⁶¹ La veduta di Sora dipinta da Francesco Vanni (1563-1610), conservata presso la chiesa di Santa Maria degli Angeli dei Padri Passionisti di Sora, rappresenta una delle più antiche raffigurazioni urbane della città. Realizzata all'inizio del XVII secolo, durante il periodo del governo dei Boncompagni, l'opera mostra in proiezione verticale il centro storico cinto da mura e circondato dal fiume Liri, evidenziando la collocazione periferica di Borgo San Rocco, ancora in via di formazione. La scena, di forte valore documentario, è integrata nella parte inferiore del dipinto, al di sotto delle figure di San Francesco e Santa Restituta.

del Liri²⁶². L'analisi congiunta di tali fonti ha consentito di ricostruire le principali fasi di trasformazione dell'aggregato, dalle origini, riconducibili al XVI secolo, fino al consolidamento urbano del XVIII secolo, evidenziando la logica insediativa, la funzione attribuita al borgo e la sua posizione strategica rispetto al centro consolidato.

A questo *corpus* storico si è affiancato lo studio della documentazione tecnica disponibile presso l'Ufficio Tecnico del Comune di Sora, con particolare attenzione ai rilievi redatti in seguito agli eventi sismici del maggio 1984²⁶³. Tale materiale, prodotto in scala 1:100, comprende piante, sezioni e prospetti riferiti alle due cortine edilizie che compongono l'aggregato e si è rivelato determinante per la lettura della struttura tipologica, delle connessioni fisiche tra le unità e dei processi di stratificazione edilizia. Ulteriori elementi conoscitivi sono stati integrati attraverso il confronto con la cartografia catastale storica, in particolare quella settecentesca e la mappa del 1876, utile a ricostruire la continuità e le trasformazioni dell'impianto urbano nel tempo, nonché le più recenti mappe catastali.

La base documentaria è stata completata mediante un rilievo speditivo diretto, finalizzato alla verifica dello stato di fatto e alla lettura morfologica dell'aggregato edilizio. L'osservazione visiva ha permesso di distinguere chiaramente i due comparti principali – rivolti rispettivamente verso il fiume Liri e verso il monte San Casto – e di identificare le singole unità strutturali, riconoscibili per differenze planimetriche, variazioni nei sistemi di bucatore, materiali costruttivi impiegati e presenza di elementi architettonici distintivi. Contestualmente, sono stati individuati elementi strutturali rilevanti, quali archi di collegamento, solai, sistemi di copertura e catene metalliche, nonché segni di degrado o alterazioni morfologiche riconducibili a interventi successivi.

²⁶² Un'altra importante rappresentazione storica della città di Sora è offerta da un altorilievo in stucco risalente alla prima metà del XVII secolo, conservato presso il Palazzo Boncompagni di Isola del Liri, anticamente residenza ducale. Il rilievo mostra una veduta prospettica della città, corredata dall'iscrizione *Sorae Civitas Romana Colonia*, a testimonianza del prestigio attribuito alla città in epoca barocca. L'opera, di chiara funzione celebrativa, documenta la struttura urbana premoderna e include elementi fortificati, il tracciato del fiume Liri e la morfologia collinare circostante.

²⁶³ La documentazione tecnica è tratta dal progetto di *Rilievo e interventi di riattazione e adeguamento igienico-funzionale degli edifici danneggiati dai terremoti del 7 e 11 maggio 1984 in Borgo San Rocco*, redatto dal Comune di Sora.

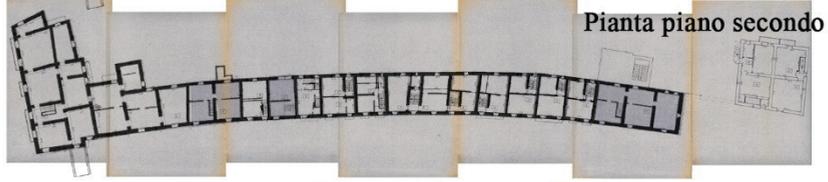
Il confronto incrociato tra le fonti documentarie, i dati d'archivio e le osservazioni dirette ha reso possibile una ricostruzione coerente dell'impianto edilizio del borgo, mettendo in evidenza la logica insediativa originaria, le principali trasformazioni morfologiche e le criticità strutturali riscontrabili, a supporto delle successive fasi di analisi della vulnerabilità.



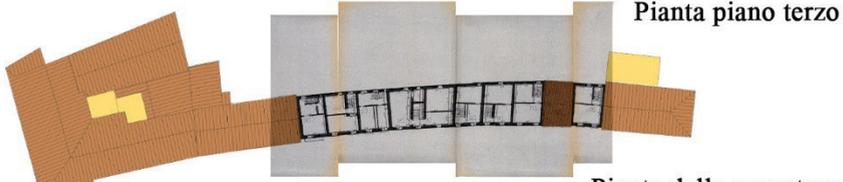
Pianta piano terra



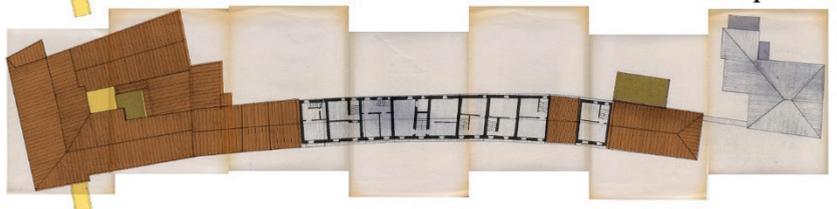
Pianta piano primo



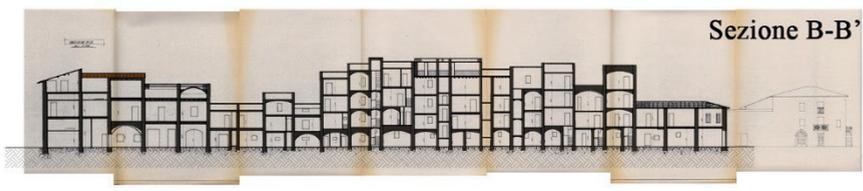
Pianta piano secondo



Pianta piano terzo



Pianta delle coperture



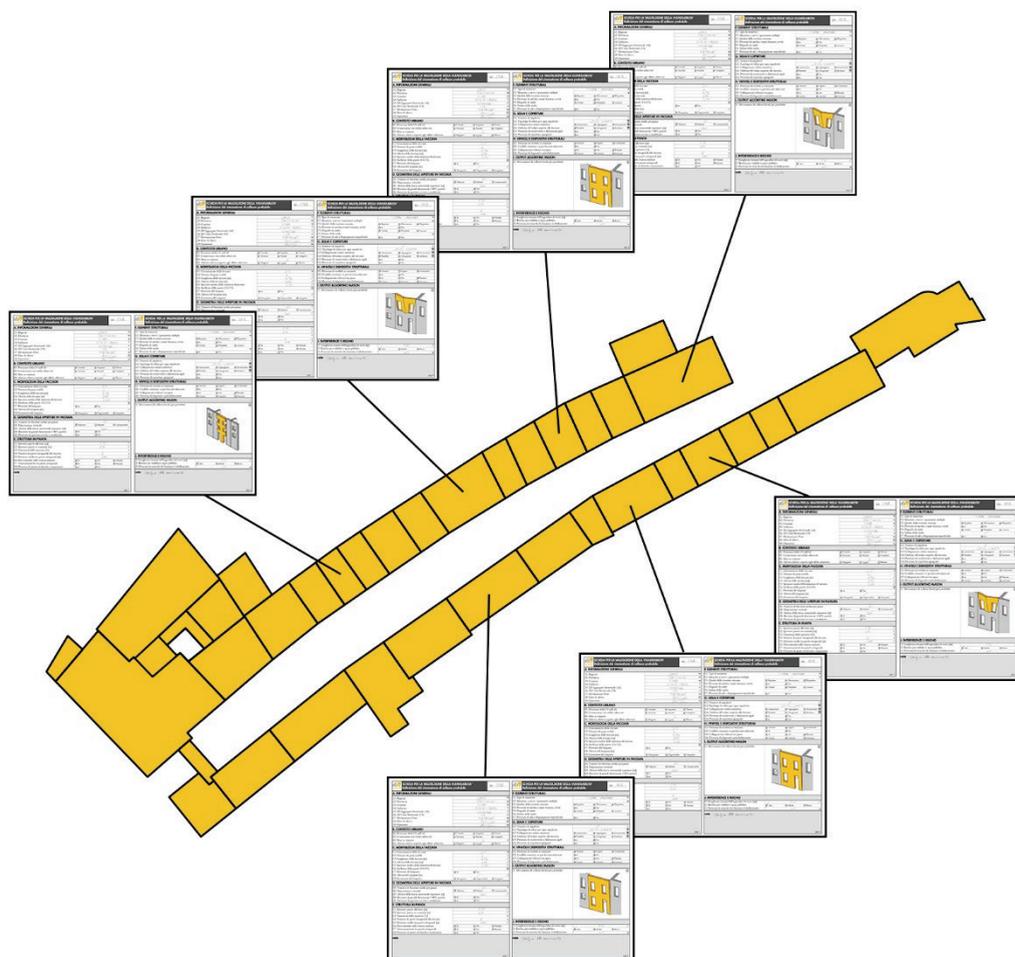
Sezione B-B'



Prospetto

Criticità nascoste: leggere il rischio nei dettagli costruttivi

Una volta definita e organizzata la base conoscitiva dell'aggregato edilizio, l'analisi qualitativa prevista dal metodo MASON procede con la compilazione della relativa scheda di valutazione, strumento centrale per la traduzione delle osservazioni in dati strutturati. La scheda rappresenta il punto di connessione tra la fase di rilievo visivo e l'elaborazione automatizzata, in quanto consente di sistematizzare le informazioni raccolte secondo un insieme di parametri valutabili, utilizzati successivamente come input per l'algoritmo di calcolo.



L'attività di compilazione richiede una lettura critica dell'edificato, condotta mediante l'attribuzione di valori qualitativi e quantitativi a ciascuna unità strutturale (US) identificata in precedenza. L'analisi prende in considerazione aspetti geometrici, costruttivi e morfologici, con particolare attenzione alle condizioni strutturali visibili. I parametri selezionati sono definiti in relazione alla loro rilevanza per la risposta sismica locale.

Le informazioni da inserire nella scheda MASON coprono più ambiti. Vengono riportate, innanzitutto, le caratteristiche dimensionali dell'unità quali altezza, numero di livelli fuori terra e presenza di discontinuità o irregolarità nell'allineamento tra interpiani o coperture. Viene inoltre valutata la qualità della muratura, considerando la tessitura, la regolarità degli elementi, il tipo di materiale impiegato e l'efficacia dell'ammorsamento. Particolare attenzione è riservata alla distribuzione delle bucatore: le loro dimensioni, la posizione e l'eventuale disallineamento in senso verticale o orizzontale sono fattori riconosciuti come potenziali punti di debolezza nelle murature portanti. Vengono inoltre rilevati elementi strutturali e costruttivi che possono condizionare il comportamento sismico dell'edificio, come la presenza di catene, tiranti o cordoli di piano, nonché anomalie quali nicchie, cavedi, canne fumarie o sopraelevazioni. Ciascuna osservazione è registrata attraverso criteri predefiniti, secondo codifiche binarie (presenza/assenza) o mediante punteggi semplificati, al fine di restituire un quadro sintetico, coerente e confrontabile, delle condizioni dell'unità esaminata.

La scheda così compilata per ogni US costituisce la base dati per l'attivazione dell'algoritmo MASON, nucleo elaborativo della metodologia. L'algoritmo processa le informazioni secondo una logica basata sulla ricorrenza tra configurazioni strutturali e cinematismi di collasso documentati. Le condizioni rilevate vengono confrontate con una matrice di casi strutturali codificati in letteratura, al fine di associare ciascuna combinazione a un meccanismo di collasso potenzialmente attivabile. L'elaborazione avviene attraverso un sistema logico binario, che attribuisce valori booleani (vero/falso) ai singoli parametri della scheda. Le configurazioni generate vengono ricondotte a uno specifico meccanismo, tra quelli previsti dal modello, tra cui: ribaltamento semplice (parziale o globale), ribaltamento lungo le aperture, flessione fuori piano (orizzontale o verticale), ribaltamento del timpano e distacco del cantonale.

L'output ottenuto è di tipo qualitativo: per ogni unità strutturale viene indicato il meccanismo di collasso più probabile, non in termini probabilistici, ma come esito diagnostico fondato su criteri tecnici oggettivi. In tal modo, è possibile delineare una mappa sintetica delle criticità all'interno dell'aggregato edilizio, evidenziando le configurazioni più suscettibili all'attivazione di meccanismi locali in caso di evento sismico.

Il disegno dei meccanismi

Completata l'elaborazione dei dati mediante l'algoritmo MASON, la fase finale dell'approccio qualitativo prevede la restituzione visiva e tematica dei risultati, con l'obiettivo di tradurre le informazioni tecniche in forme rappresentative chiare, consultabili e funzionali alla valutazione del rischio e alla pianificazione degli interventi. L'output prodotto non rappresenta una semplice illustrazione, ma costituisce uno strumento operativo in grado di supportare la lettura comparativa delle criticità e l'interpretazione spaziale dei meccanismi di collasso attesi.

La rappresentazione dei risultati si struttura attraverso un modello tridimensionale informativo semplificato dell'aggregato edilizio, in cui ogni unità strutturale viene associata al meccanismo di collasso individuato, codificato tramite un sistema cromatico differenziato. Questo approccio consente una distinzione visiva immediata tra le diverse tipologie di risposta sismica e l'identificazione delle unità con maggiore vulnerabilità.

La restituzione in ambiente HBIM, sviluppato a un livello di dettaglio corrispondente al LOD 100/200²⁶⁴, deve essere coerente con le esigenze della fase analitica preliminare. Il modello tridimensionale parametrico, completo di informazioni e dati derivanti dal rilievo speditivo, permette di associare a ciascun elemento architettonico un set informativo comprensivo dei dati geometrici essenziali, delle principali caratteristiche costruttive, degli esiti dell'analisi qualitativa e del meccanismo di collasso previsto. Queste informazioni risultano interrogabili direttamente nel modello e possono essere aggiornate nel tempo secondo un approccio progressivo e integrabile. Nel caso di Borgo San Rocco, il modello HBIM consente di localizzare i meccanismi

²⁶⁴ Definisce un livello di dettaglio approssimativo degli elementi del modello, rappresentati come sistemi o oggetti generici.

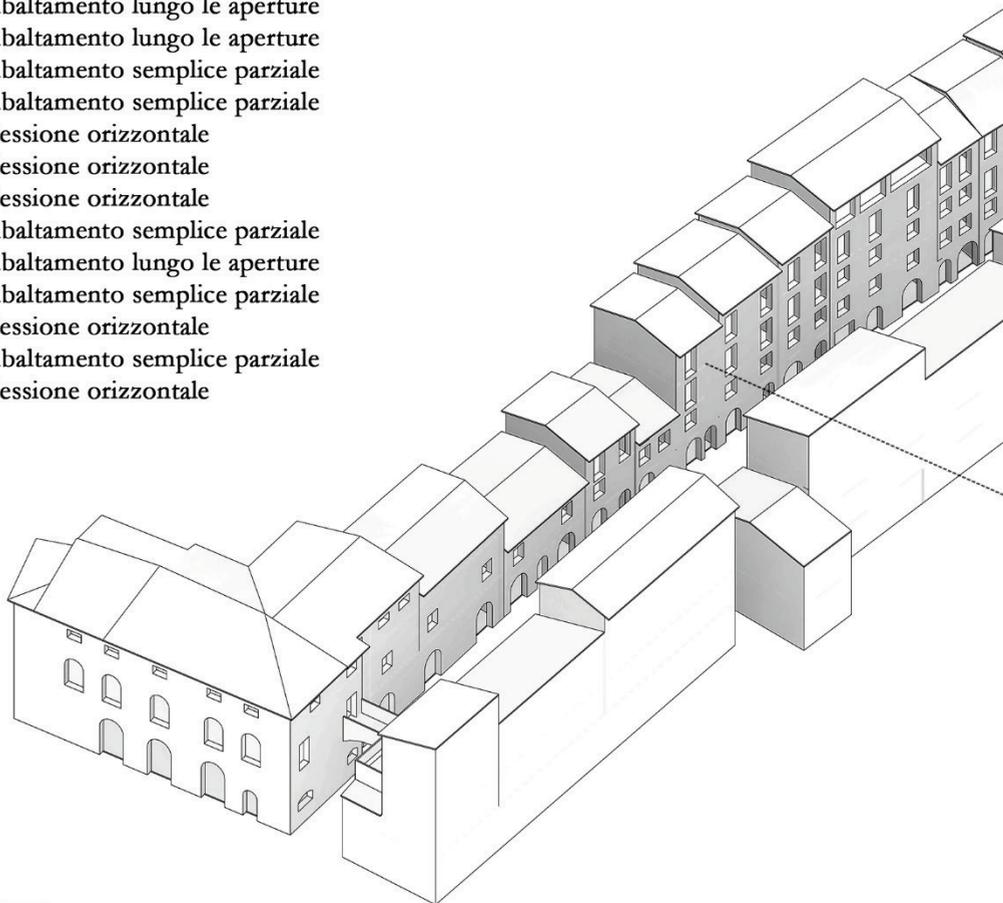
attesi e restituire una visualizzazione chiara e immediata del rischio lungo le due cortine edilizie, con particolare evidenza per il comparto rivolto verso Monte San Casto e per il fronte urbano principale. L'integrazione tra contenuto informativo e rappresentazione geometrica supporta una lettura sintetica del quadro di rischio, utile sia per la diagnosi sia per eventuali sviluppi operativi.

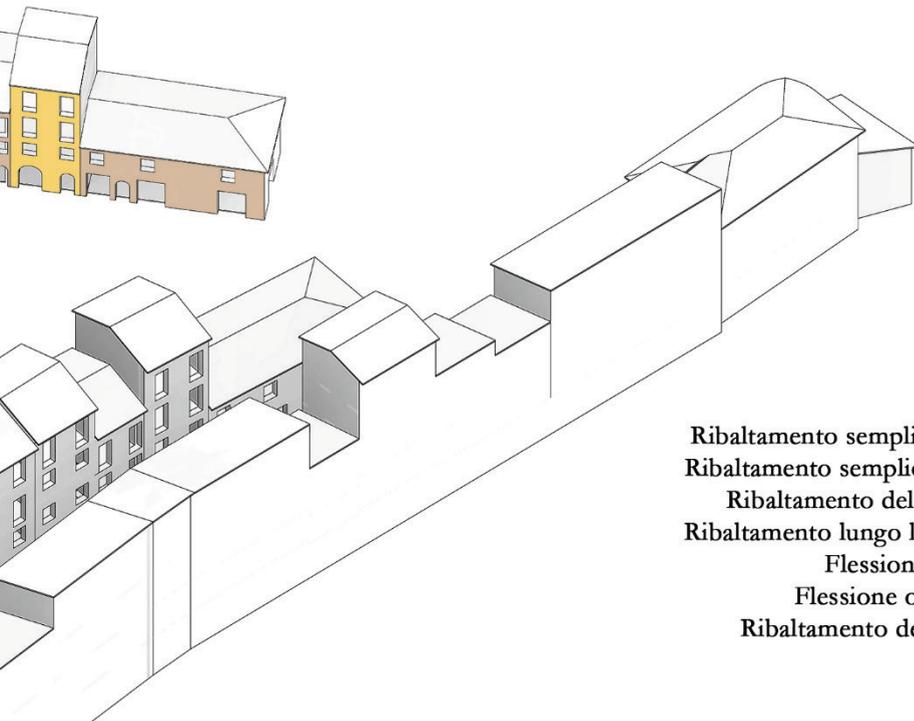
Parallelamente, i risultati dell'analisi vengono importati in ambiente GIS, dove le unità strutturali vengono posizionate nel contesto urbano di appartenenza. Questo consente un'estensione dell'analisi su scala urbana e territoriale, facilitando l'individuazione di relazioni spaziali, criticità distribuite e priorità di intervento.

Questa modalità di restituzione, dinamica e scalabile sia in ambiente GIS che in ambiente HBIM, non si configura come fase conclusiva, ma assume il ruolo di strumento operativo a supporto della prevenzione, della pianificazione e della gestione del rischio sismico. Nel contesto del caso studio, la mappatura dei meccanismi rende evidente la distribuzione irregolare delle criticità, confermando la maggiore vulnerabilità delle porzioni orientate verso il pendio e del fronte strada, frequentemente interessate da meccanismi di ribaltamento parziale e flessione orizzontale. La possibilità di interrogare il modello in maniera selettiva facilita la sintesi analitica e agevola la comunicazione dei dati tra operatori e amministratori. La restituzione visiva e il disegno dei risultati dell'analisi qualitativa rappresenta un passaggio centrale della metodologia MASON, poiché consente di tradurre un insieme articolato di osservazioni in un quadro coerente a sostegno sia della conoscenza tecnica che delle strategie di mitigazione del rischio sismico nei contesti storici.

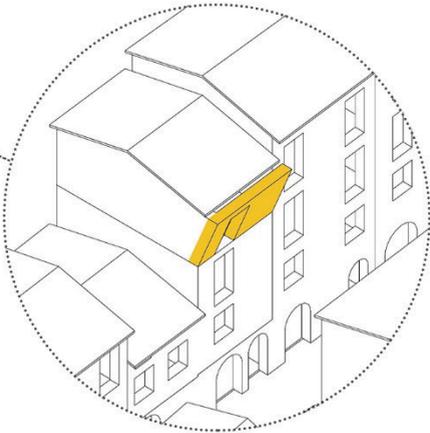


- 01 Flessione orizzontale
- 02 Ribaltamento lungo le aperture
- 03 Ribaltamento lungo le aperture
- 04 Ribaltamento lungo le aperture
- 05 Ribaltamento semplice parziale
- 06 Ribaltamento semplice parziale
- 07 Flessione orizzontale
- 08 Flessione orizzontale
- 09 Flessione orizzontale
- 10 Ribaltamento semplice parziale
- 11 Ribaltamento lungo le aperture
- 12 Ribaltamento semplice parziale
- 13 Flessione orizzontale
- 14 Ribaltamento semplice parziale
- 15 Flessione orizzontale

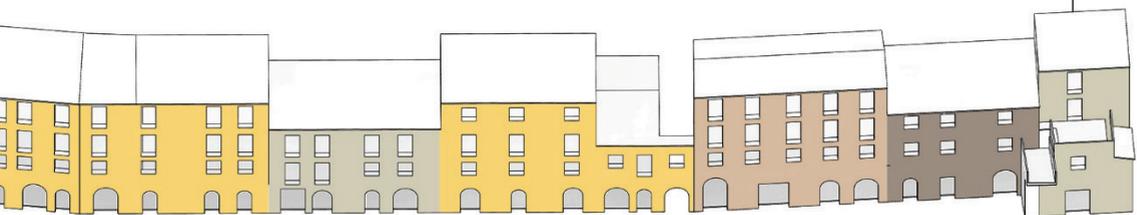




- Ribaltamento semplice globale ●
- Ribaltamento semplice parziale ●
- Ribaltamento del cantonale ●
- Ribaltamento lungo le aperture ●
- Flessione verticale ●
- Flessione orizzontale ●
- Ribaltamento del timpano ●



- Ribaltamento lungo le aperture 01
- Ribaltamento semplice parziale 02
- Ribaltamento semplice parziale 03
- Ribaltamento semplice parziale 04
- Ribaltamento semplice globale 05
- Ribaltamento lungo le aperture 06
- Ribaltamento semplice parziale 07
- Ribaltamento semplice parziale 08
- Ribaltamento semplice parziale 09
- Ribaltamento semplice globale 10
- Ribaltamento semplice parziale 11
- Ribaltamento semplice parziale 12
- Flessione orizzontale 13
- Ribaltamento lungo le aperture 14
- Ribaltamento semplice globale 15



MASON - Approccio Qualitativo

BorgoSanRocco

Ribaltamento semplice globale



Ribaltamento semplice parziale



Ribaltamento lungo le aperture



Flessione orizzontale



0 25 50 75 m



ID MASON	A2.Provinc	A3.Comune	A4.Indiriz	A7.Dest us	A9.Operato	I1.Meccani
20A	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Flessione orizzontale
19A	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Ribaltamento semplice parziale
18A	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Flessione orizzontale
17A	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Ribaltamento semplice parziale
16A	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Ribaltamento lungo le aperture
15A	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Ribaltamento semplice parziale
14A	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Flessione orizzontale
13A	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Flessione orizzontale
12A	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Flessione orizzontale
11A	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Ribaltamento semplice parziale
10A	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Ribaltamento semplice parziale
09A	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Ribaltamento lungo le aperture
08A	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Ribaltamento lungo le aperture
05A	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Ribaltamento lungo le aperture
01A	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Flessione orizzontale
16B	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	
15B	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Ribaltamento semplice globale
14B	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Ribaltamento lungo le aperture
13B	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Flessione orizzontale
12B	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Ribaltamento semplice parziale
11B	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Ribaltamento semplice parziale
10B	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Ribaltamento semplice globale
09B	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Ribaltamento semplice parziale
08B	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Ribaltamento semplice parziale
07B	Frosinone	Sora	Borgo San Rocco	Residenziale	Marco Saccucci	Ribaltamento semplice parziale



Livello II – Precisione digitale

Dopo la fase qualitativa, il secondo livello dell'approccio MASON prevede un approfondimento quantitativo basato su rilievi strumentali e modelli di calcolo, in grado di definire con maggiore precisione il comportamento sismico delle unità strutturali analizzate. Questa fase si fonda sull'ipotesi che una più alta risoluzione nel rilievo e nella conoscenza dei materiali permetta un'analisi cinematico-strutturale conforme alle indicazioni delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018).

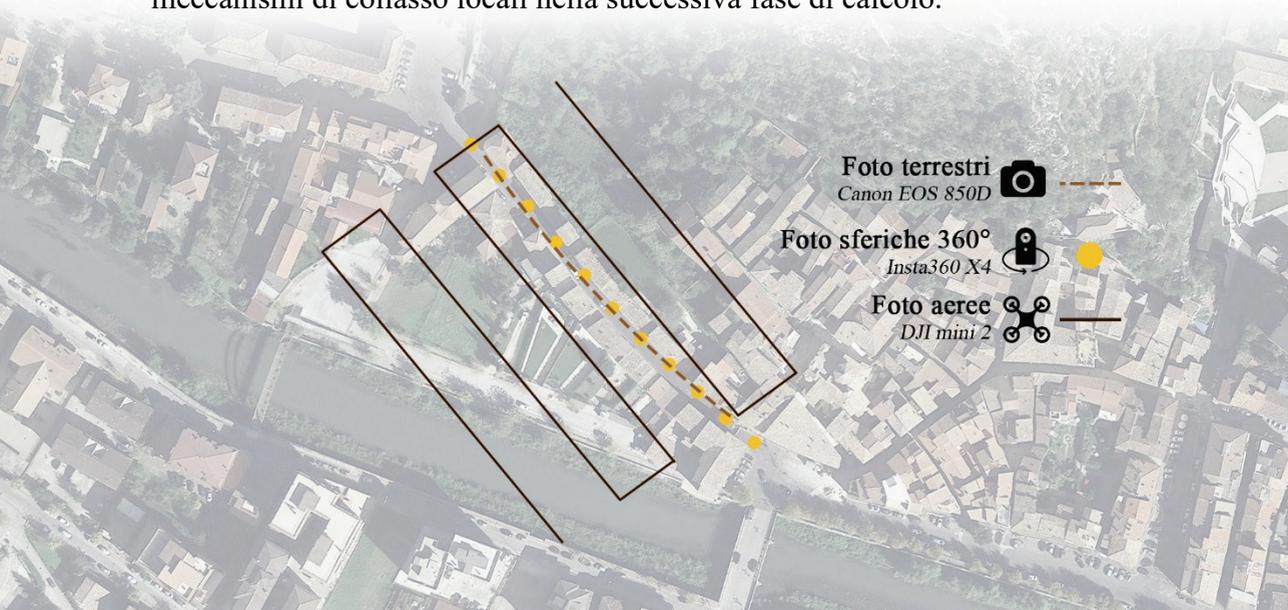
Il rilievo avanzato

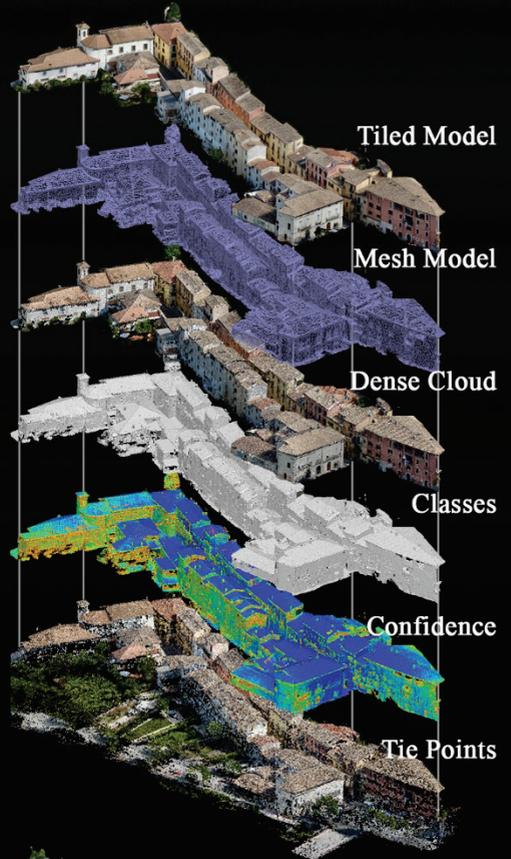
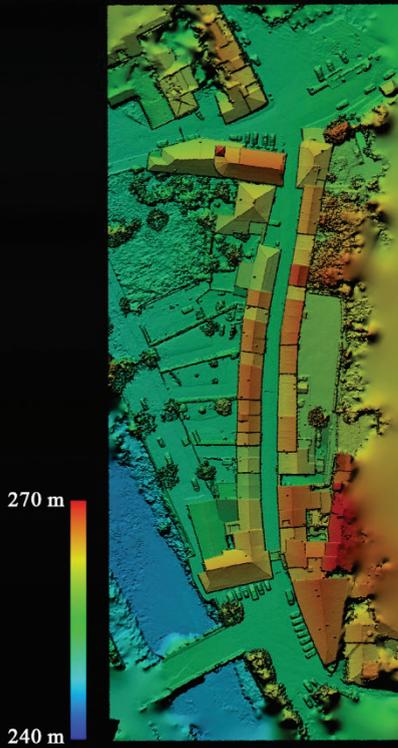
La campagna di rilievo integrato condotta su Borgo San Rocco rappresenta una delle fasi centrali dell'approccio di secondo livello dell'analisi MASON, finalizzata alla produzione di una documentazione tridimensionale metrica, continua e georeferenziata dell'intero aggregato edilizio. L'attività si configura come un rilievo multi-tecnologico, strutturato mediante l'impiego combinato di fotogrammetria aerea da drone, fotogrammetria terrestre classica e fotogrammetria sferica da camere a 360°, allo scopo di garantire un'acquisizione completa, sia in pianta che in elevazione, degli spazi urbani e delle superfici murarie.

Per la fotogrammetria aerea è stato utilizzato un drone DJI Mini 2, equipaggiato con una fotocamera da 12 megapixel stabilizzata su gimbal a tre assi, in grado di acquisire immagini ad alta risoluzione con margini contenuti di distorsione ottica anche in condizioni atmosferiche variabili. Le missioni di volo sono state programmate con schema a griglia ortogonale, in modo da assicurare una copertura regolare e sistematica del sito. L'altezza di volo è stata mantenuta a circa 50 metri dal suolo, scelta che ha permesso di ottenere una risoluzione spaziale inferiore a 5 cm/pixel. Le immagini sono state raccolte lungo due direttrici – longitudinale e trasversale rispetto all'asse del borgo – con una sovrapposizione rispettivamente del 75% e del 60%, in linea con gli standard richiesti per la generazione di modelli tridimensionali ad alta densità.

Alla componente aerea si è affiancato un rilievo terrestre, realizzato mediante acquisizioni fotografiche mirate lungo i fronti delle cortine edilizie, in particolare per le porzioni non accessibili dal drone. Le immagini sono state scattate con fotocamere reflex CANON EOS 850D e ottiche EF 14mm f/2.8L II USM, in condizioni di buona illuminazione diffusa, prevalentemente nelle ore mattutine, al fine di minimizzare la presenza di ombre marcate lungo le superfici. A completamento, è stata eseguita una serie di riprese sferiche da fotocamera Insta360 X4, con l'obiettivo di integrare lacune visive in prossimità di spazi angusti, varchi o dettagli architettonici complessi.

Tutti i set fotografici vengono elaborati in ambiente *Agisoft Metashape*, seguendo una procedura fotogrammetrica di tipo *Structure from Motion (SfM)* che consente la generazione di una nuvola di punti densa e georeferenziata. Il dataset impiegato per la ricostruzione tridimensionale comprende circa 1.200 immagini aeree acquisite tramite drone, circa 600 immagini terrestri ottenute da postazioni fisse lungo i fronti edilizi, e 24 immagini sferiche da camera a 360°. La nuvola di punti prodotta presenta una densità superiore a 11,5 milioni di punti. Ogni punto è caratterizzato da coordinate spaziali tridimensionali (x, y, z) e valori cromatici (r, g, b), così da restituire un modello che rappresenta fedelmente sia la geometria volumetrica, sia l'aspetto esterno dell'aggregato edilizio. La precisione metrica del rilievo viene validata attraverso il confronto con misurazioni dirette eseguite sul campo, che mostrano un errore medio inferiore all'1%, compatibile con i requisiti dell'analisi cinematica prevista dalla metodologia MASON. Il modello ottenuto costituisce una base geometrica affidabile e ad alta risoluzione, utilizzata come supporto sia per la modellazione parametrica dell'aggregato, sia per la valutazione dei meccanismi di collasso locali nella successiva fase di calcolo.





Dal pixel alla pietra

L'analisi dei materiali che compongono il tessuto edilizio del borgo San Rocco rappresenta una fase essenziale del secondo livello dell'approccio MASON. La conoscenza delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali impiegati nelle murature storiche risulta infatti fondamentale per valutare la capacità resistente delle strutture, stimare la vulnerabilità nei confronti delle azioni sismiche e calibrare con maggiore accuratezza i modelli di analisi cinematica.

L'indagine si concentra sulle murature verticali in pietra, elemento strutturale prevalente all'interno dell'aggregato. A tal fine, viene selezionato un campione rappresentativo proveniente da una porzione non intonacata del comparto orientato verso il monte San Casto. Su questo materiale vengono condotte prove di laboratorio secondo una procedura standardizzata articolata in più fasi.

In primo luogo, si determina la porosità aperta del materiale tramite pesate eseguite in condizioni secche, umide e sature. Il campione viene inizialmente essiccato in stufa a temperatura controllata (60 °C), quindi immerso in acqua distillata all'interno di un essiccatore a vuoto, al fine di saturare completamente i pori accessibili. Successivamente, mediante bilancia idrostatica, si effettuano le misurazioni di peso in aria e in immersione, da cui si ricavano il volume totale del campione e il rapporto tra vuoti e massa lapidea. Il valore di porosità aperta risulta pari al 25,09%, indice di un'elevata porosità, con implicazioni significative sulla durabilità del materiale e sulla sua risposta meccanica in caso di sollecitazioni dinamiche.

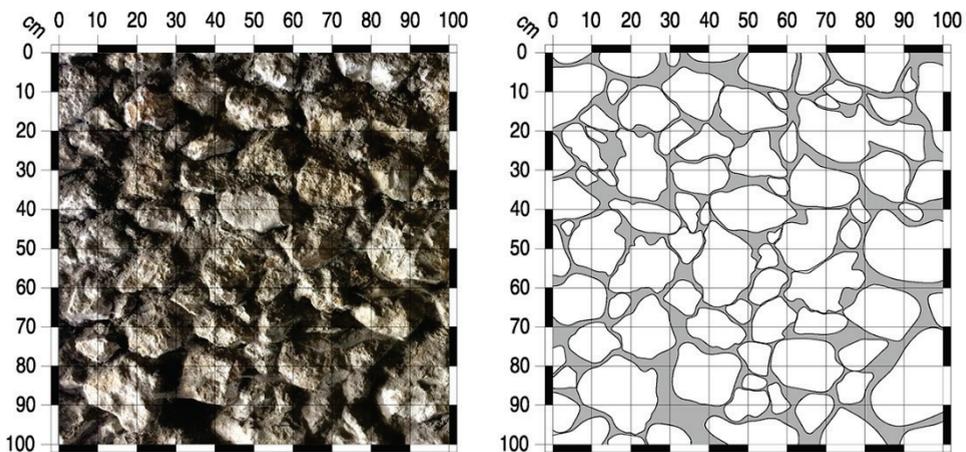
Parallelamente, viene effettuata una prova di attacco acido per identificare la composizione chimica del materiale. L'effervescenza osservata al contatto con acido cloridrico, priva di residui solidi, indica una composizione quasi esclusivamente a base di carbonato di calcio. Il risultato trova conferma tramite analisi diffrattometrica a raggi X (XRD), che individua la calcite come fase cristallina predominante. Il campione, precedentemente polverizzato, viene sottoposto a scansione e genera un diffrattogramma i cui picchi principali coincidono con quelli della calcite naturale.

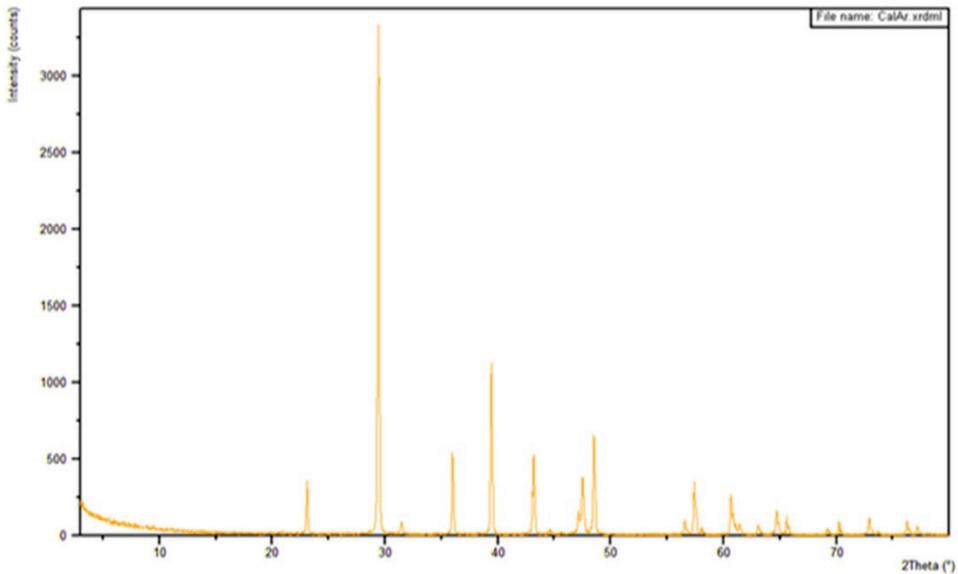
Sulla base di queste evidenze, la muratura analizzata viene classificata come costituita da pietrame disordinato di origine calcarea, probabilmente prelevato localmente dal letto del fiume Liri o dalle pendici del monte San

Casto. Le pietre, di forma irregolare e non lavorata, risultano legate da una malta povera, friabile al tatto, con una significativa percentuale di vuoti. La tessitura muraria viene ulteriormente valutata mediante digitalizzazione di immagini campione e applicazione di griglie regolari su superfici di 1 dm². La superficie coperta da pietre risulta pari al 76,88%, quella occupata dalla malta al 23,12%, con un rapporto pietra/malta indicativo di una tessitura poco compatta.

Ai fini delle successive analisi strutturali, vengono assegnati ai materiali i parametri meccanici riportati nella Tabella C8.5.I della Circolare 2019 delle NTC18, relativi a murature in pietrame non lavorato e malta di bassa qualità. I valori di riferimento includono una resistenza media a compressione di 1,00 MPa e una resistenza a taglio senza coazione pari a 0,07 MPa, risultando coerenti con le condizioni materiche rilevate *in situ*.

Nel complesso, l'indagine evidenzia una muratura storica con marcata eterogeneità, caratterizzata da basse prestazioni meccaniche e da una significativa disomogeneità strutturale, elementi che concorrono ad aumentare la vulnerabilità complessiva dell'aggregato in caso di evento sismico.





Quando inizia il collasso: calcolo dei meccanismi di collasso

La fase di calcolo dell'analisi di secondo livello costituisce il momento culminante dell'approccio quantitativo MASON. Essa si basa su una conoscenza approfondita del costruito e sull'applicazione dell'analisi cinematica lineare per la verifica della stabilità locale delle pareti murarie soggette a collasso fuori piano. A partire dai dati ottenuti attraverso il rilievo integrato e l'analisi materica, le singole unità strutturali dell'aggregato di Borgo San Rocco vengono modellate con precisione geometrica, così da consentire la valutazione meccanica dei cinematismi ipotizzati nella prima fase del metodo.

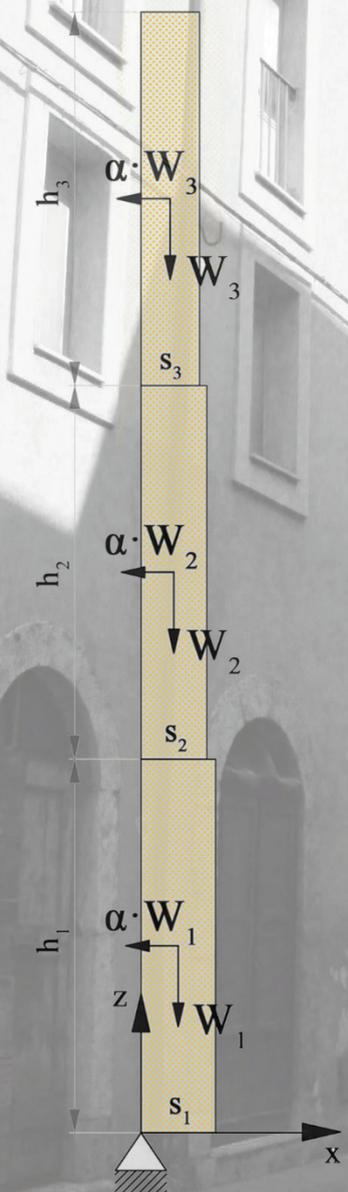
L'approccio adottato si fonda sull'applicazione del *Principio dei Lavori Virtuali* (PLV), secondo quanto previsto dalla Circolare 2019 delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC18), che consente il calcolo del moltiplicatore di collasso orizzontale α_0 , inteso come il rapporto tra le forze resistenti e quelle destabilizzanti associate a ciascun meccanismo. Nell'analisi si assume che le pareti murarie si comportino come corpi rigidi fino all'attivazione del cinematismo, il quale si sviluppa lungo superfici cinematiche idealizzate.

Ogni unità strutturale (US) viene trattata come un macroelemento. Il tipo di meccanismo viene individuato sulla base dei risultati dell'analisi qualitativa di primo livello. Per ciascuna US si definiscono la geometria, gli spessori murari ai vari livelli, le altezze interpiano, la posizione del baricentro, la distribuzione dei carichi verticali e l'eventuale presenza di solai ammortati o di elementi spingenti. Sulla base di queste informazioni vengono calcolati i bracci delle forze, i momenti destabilizzanti e quelli resistenti. Tutti i dati vengono inseriti in un foglio di calcolo strutturato secondo la metodologia MASON, che restituisce i valori di α_0 e, da essi, le accelerazioni spettrali di attivazione dei meccanismi (a_0).

Il confronto tra il valore di a_0 e la PGA di riferimento per il sito²⁶⁵ consente di verificare se il meccanismo analizzato risulta attivabile o meno in caso di sisma.

A titolo esemplificativo, per l'unità strutturale 10B viene considerato un meccanismo di ribaltamento semplice globale della facciata, con rotazione attorno a una cerniera alla base. L'edificio, sviluppato su tre piani, presenta spessori murari decrescenti (da 75 cm a 60 cm) e una configurazione priva di ammortamenti trasversali. I solai risultano ortogonali alla direzione del ribaltamento e non sono presenti archi o tiranti. Il calcolo restituisce un valore di α_0 insufficiente a garantire la stabilità rispetto alla PGA, con esito negativo della verifica. L'intero aggregato viene sottoposto a questa tipologia di analisi. Dall'analisi emerge che, tra le 31 unità strutturali prospicienti la strada, solo 10 risultano verificate, mentre le restanti 21 presentano un'accelerazione di attivazione inferiore alla soglia sismica di riferimento.

²⁶⁵ $a_{g,SLV} = 0,24$ g per il comune di Sora.



$$\alpha_0 = \frac{\sum_{k=1}^N P_k \delta_{Py,k} - \sum_{k=1}^N F_k \delta_{Fy,k} - L_i}{\sum_{k=1}^{N_0} (P_k + Q_k) \delta_{PQx,k}}$$

$$\alpha_0 = \frac{\sum W_i \cdot x_{Gi}}{\sum W_i \cdot z_{Gi}}$$

$$a_z(z) = S_e(T_k' \xi_k) |\gamma_k \psi_k(z)| \sqrt{1 + 0.0004 \xi_k^2}$$

$$a_{z,SLV} = \frac{\alpha_0 \cdot g}{e^* \cdot FC}$$

$$a_{z,SLV} \geq a_{g,SLV}$$

Letture integrata tra HBIM e GIS

La modellazione del caso studio di Borgo San Rocco viene sviluppata in due ambienti digitali distinti ma tra loro interconnessi: l'ambiente HBIM (*Historic Building Information Modeling*) e l'ambiente GIS 3D (*Geographic Information System*). Entrambi gli strumenti operano come supporto operativo per la rappresentazione, la consultazione e la visualizzazione dei risultati ottenuti dall'approccio quantitativo MASON, consentendo un'articolata lettura della vulnerabilità sismica su più livelli di scala.

La modellazione HBIM viene realizzata in ambiente Autodesk Revit, a partire dalla nuvola di punti generata mediante rilievo fotogrammetrico ad alta risoluzione. I dati vengono importati nel software tramite formato .rcp e utilizzati come base per la ricostruzione parametrica degli edifici, condotta con un livello di dettaglio corrispondente a LOD 400/500, come definito dalla normativa UNI 11337. Questo livello avanzato di sviluppo informativo, tipico della fase *as built*, prevede una modellazione geometrica accurata degli elementi strutturali e architettonici, includendo volumi principali, orizzontamenti, murature, coperture, e componenti secondari quali cornici, timpani, archi e bucatore. Per la rappresentazione di elementi storici specifici vengono create famiglie personalizzate (.rfa), configurate sulla base di rilievi puntuali e documentazione archivistica, in modo da riprodurre fedelmente le geometrie originarie. Oltre alla componente geometrica, a ogni elemento modellato viene associato un insieme di parametri informativi strutturati, derivanti dalle analisi di rilievo diretto, d'archivio e dai risultati della fase di calcolo. Per ciascuna unità strutturale (US) vengono inseriti dati relativi a: tipologia muraria, materiali costituenti, numero di piani, tipo di solai, stato di conservazione, presenza di catene o tiranti, esiti delle analisi cinematiche e accelerazioni spettrali di attivazione e verifica rispetto alla PGA di progetto. Queste informazioni costituiscono la base per una visualizzazione interattiva dei risultati dell'analisi MASON, mediante codifica cromatica dei meccanismi di collasso e rappresentazione sintetica dei parametri di vulnerabilità.

Parallelamente, le informazioni geometriche e descrittive vengono organizzate all'interno di un sistema GIS 3D, costruito in ambiente QGIS. Il modello viene georeferenziato a partire dai punti di controllo topografici e inserito nel contesto territoriale tramite coordinate WGS 84/UTM 33N. Il GIS consente l'integrazione multilivello delle informazioni: dalle mappe catastali storiche

e della CTR regionale, fino alla cartografia tematica di supporto alla valutazione del rischio sismico. In particolare, il sistema include la Carta di microzonazione sismica comunale (livello 1 e 2), la Carta geologica e geomorfologica di dettaglio, le Mappe storiche georeferenziate (XVIII e XIX secolo), il Rischio idrogeologico PAI (Piani Assetto Idrogeologico), i Vincoli urbanistici e strumenti di pianificazione territoriale, le Reti infrastrutturali e servizi di emergenza come il Piano di Emergenza Comunale e la Condizione Limite per l'Emergenza (CLE). Per ciascuna unità strutturale, i risultati delle analisi cinematiche vengono importati come attributi informativi associati a *feature* tridimensionali. Le US sono interrogabili mediante *tool* interattivi, e ogni *record* restituisce un riepilogo strutturato contenente: geometria, categoria muraria, presenza di vulnerabilità, cinematicismo atteso, valore di accelerazione di attivazione (a_0) e stato di verifica rispetto alla soglia di riferimento. La rappresentazione avviene tramite filtri tematici e codici colore che permettono di costruire mappe dinamiche della vulnerabilità sismica aggregata.

L'integrazione tra modello HBIM e sistema GIS 3D consente una restituzione coerente su più livelli di analisi: da un lato, la modellazione architettonico-strutturale di dettaglio, capace di documentare ogni elemento edilizio in modo informativo; dall'altro, la visione geospaziale sistemica, necessaria per la gestione territoriale del rischio, la pianificazione degli interventi e l'interoperabilità tra dati. Entrambi i sistemi operano come strumenti di lettura del costruito e come interfacce per la visualizzazione dei risultati dell'approccio MASON, fornendo supporto operativo alla diagnostica, alla progettazione e alla gestione del patrimonio storico vulnerabile.





Proprietà

Muro di base
MS_Muro50cm (Bianco)

Muri (1) Modifica tipo

Vincoli

Linea di ubicazione Superficie di finitura: esterno

Vincolo di base A-20_Piano3

Offset base 0.0000

La base è associata

Distanza estensione base 0.0000

Vincolo parte superiore Fino al livello: A-20_Piano4 (Co...

Altezza non collegata 3.5000

Offset superiore 0.0000

La parte superiore è associata

Distanza estensione superiore 0.0000

Delimita il locale

Relativo a massa

Definizione sezione trasversale

Strutturale

Quote

Lunghezza 5.5691

Area 16.194 m²

Volume 7.985 m³

Dati identità

Immagine

Commenti

Contrassegno

Con associazione

Fasi

Parametri IFC

Altro

MASON_a0 0,19g

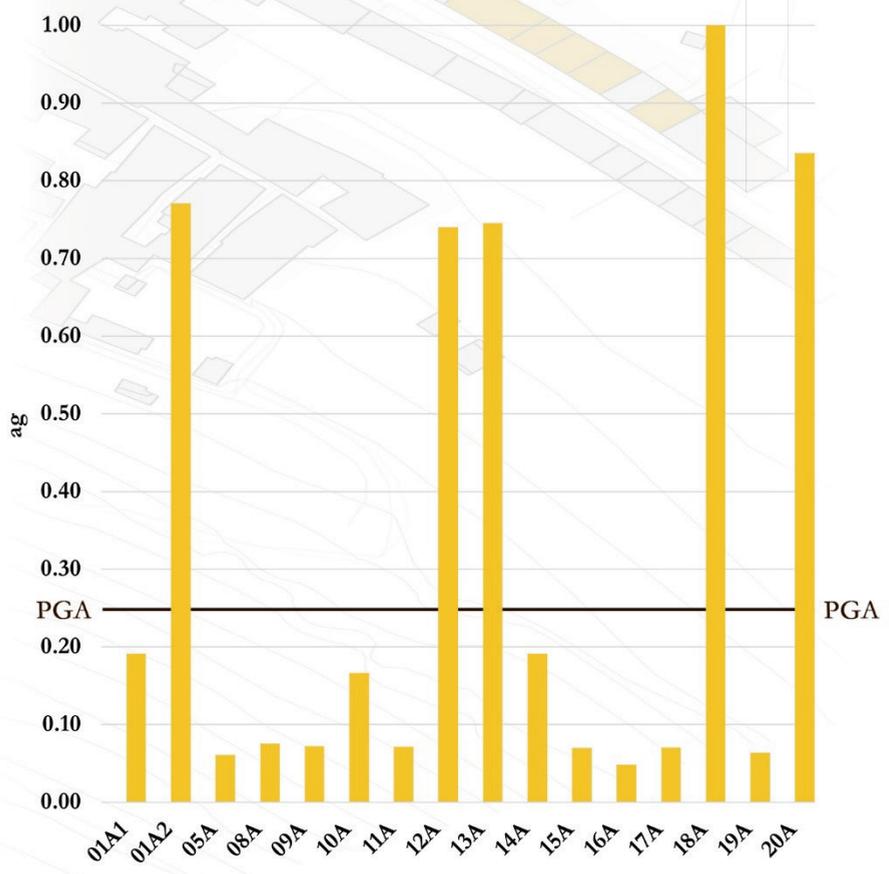
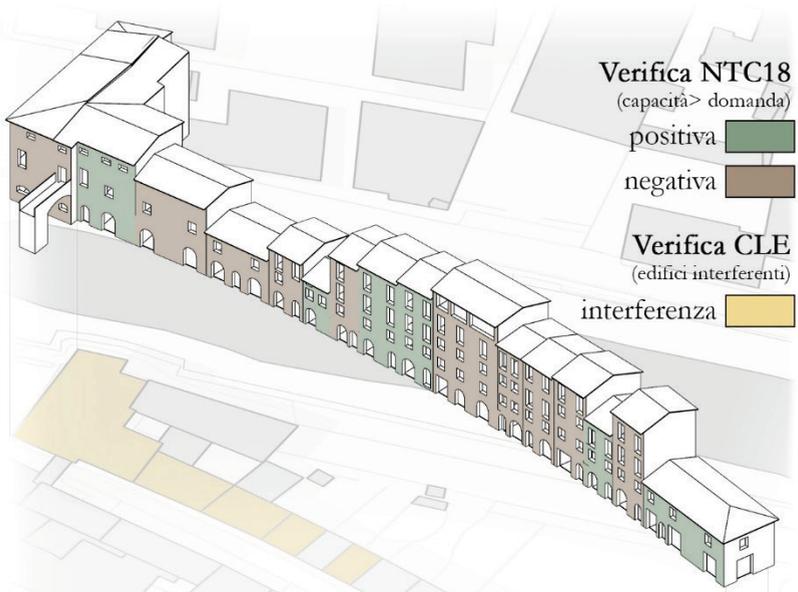
MASON_alpha0 0,15

MASON_Cinematismo Ribaltamento semplice parziale

MASON_SchedaRilievo <https://drive.google.com/drive...>

Applica





Verifica NTC18

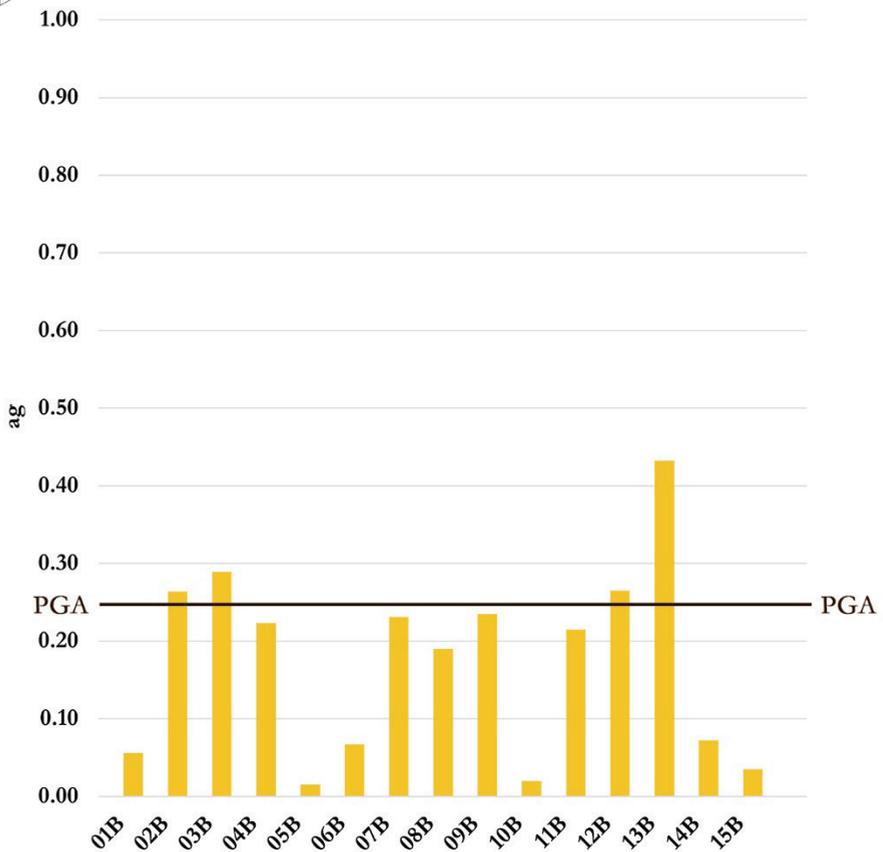
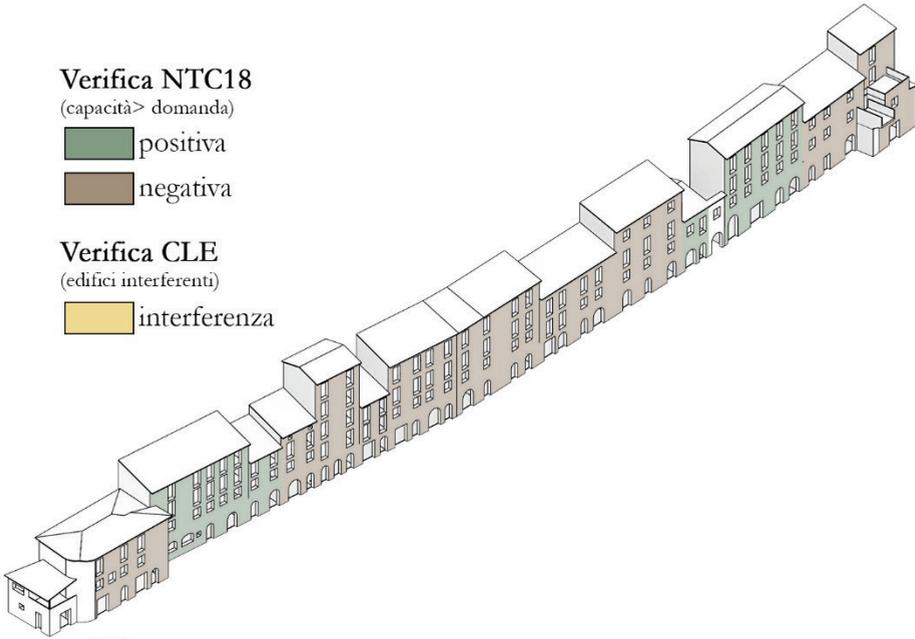
(capacità > domanda)

- positiva
- negativa

Verifica CLE

(edifici interferenti)

- interferenza



Dalla diagnosi alla pianificazione

L'applicazione della metodologia MASON al caso studio di Borgo San Rocco evidenzia non solo l'efficacia dell'approccio multilivello nella valutazione della vulnerabilità sismica, ma anche la sua concreta utilità come strumento di supporto alla pianificazione preventiva e all'organizzazione delle emergenze. Attraverso il primo livello di analisi, fondato su rilievi speditivi e interpretazione qualitativa delle caratteristiche costruttive, è possibile identificare con rapidità le unità strutturali maggiormente esposte a meccanismi di collasso, definendo aree a maggiore criticità e orientando l'attenzione verso i comparti che richiedono approfondimenti o interventi prioritari. Questa capacità diagnostica preliminare risulta particolarmente utile nei contesti storici estesi, dove le risorse tecniche ed economiche sono spesso limitate, e dove una mappatura di rischio a bassa soglia di accesso può costituire la base operativa per azioni di mitigazione progressive.

Il secondo livello di analisi, grazie alla precisione delle valutazioni cinematiche e alla georeferenziazione dei risultati in ambiente HBIM e GIS, consente di quantificare la vulnerabilità in termini comparabili, associando a ciascuna unità valori oggettivi (accelerazione di attivazione a_0) e verifiche esplicite rispetto alla PGA di progetto. In tal modo, il metodo fornisce dati strutturati e territorializzati, utili non solo per la progettazione degli interventi di consolidamento, ma anche per la formulazione o l'aggiornamento dei piani di emergenza comunale, in particolare nella localizzazione delle aree critiche, l'individuazione delle interferenze definite dalle Linee guida per la Condizione Limite per l'Emergenza (CLE), gli edifici strategici o i poli di accoglienza temporanea.

Nel caso di Borgo San Rocco, l'individuazione di vulnerabilità localizzate lungo l'asse principale dell'aggregato conferma come l'approccio MASON possa offrire un supporto operativo alla gestione del rischio urbano. La combinazione tra analisi strutturale, modellazione informativa e rappresentazione geospaziale consente di costruire mappe di priorità d'intervento, utili sia in fase di pianificazione ordinaria sia in situazioni di emergenza. In questo senso, MASON si configura come strumento intermedio tra la conoscenza tecnica e le decisioni amministrative, in grado di rendere accessibili e

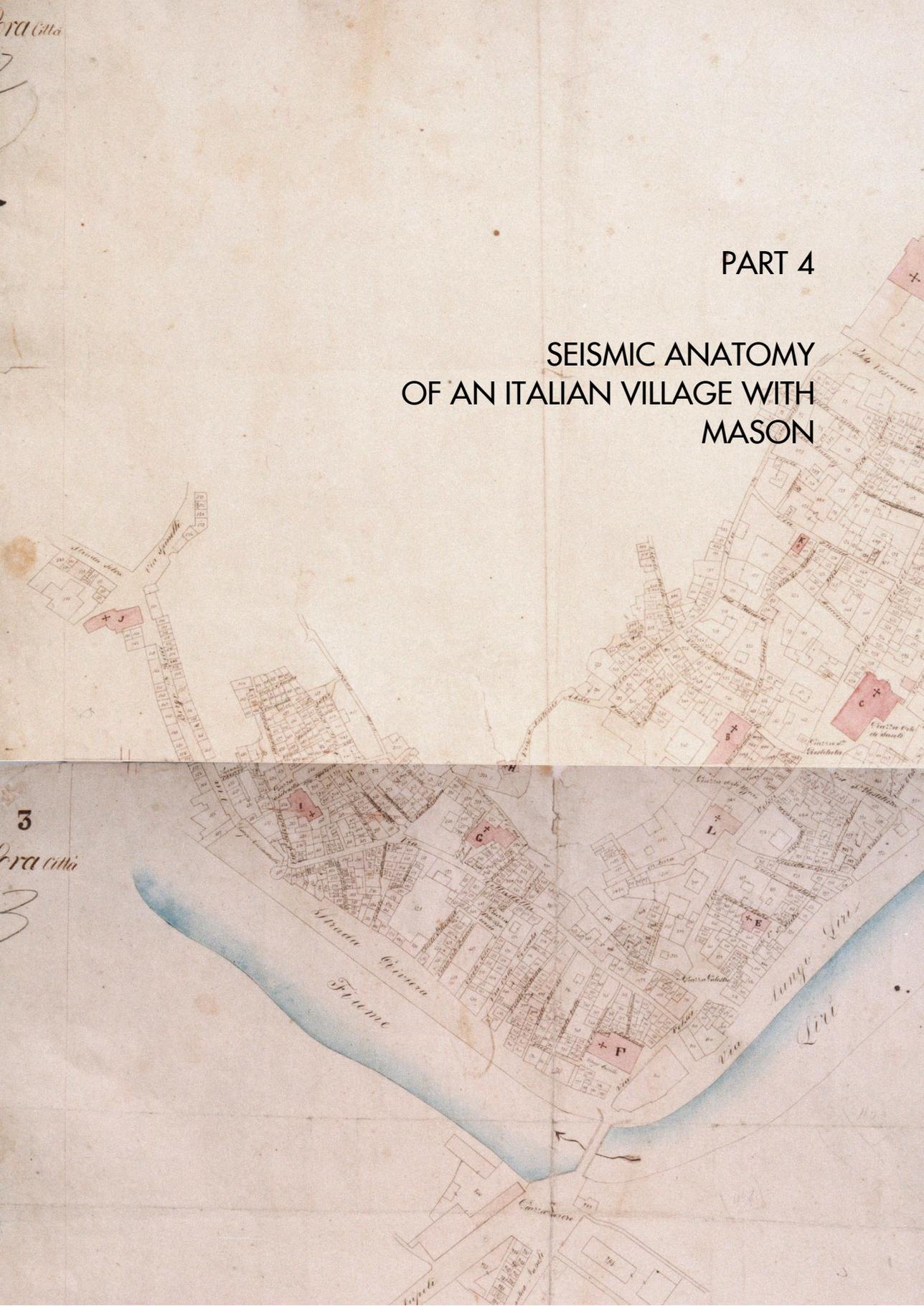
utilizzabili le informazioni sul rischio sismico ai fini della prevenzione, della programmazione strategica e della sicurezza civile.



PART 4

PART 4

SEISMIC ANATOMY
OF AN ITALIAN VILLAGE WITH
MASON



Fra città

3

Fra città

3

*S. Maria
Francis*

*lungo S. Maria
Liri*

The issue at stake is that no civilization [...] can exist and survive without a collective memory. Societies have always relied on memory to preserve their identity.

Umberto Eco

Between the mountains and river: Borgo San Rocco in Sora (FR)

Among the many smaller historic centers of central Italy, Sora stands out for its complex geographical position, its long history of settlement, and an inherent seismic vulnerability that has become evident over the centuries. Although it is not among the major urban centers of Lazio, its architectural heritage and compact urban structure make the territory a paradigmatic example of a historic center at seismic risk. Within this context lies Borgo San Rocco, a dense and cohesive portion of Sora's historic fabric that – due to its layout, age, and urban function – represents an ideal testing ground for innovative risk assessment approaches.

The MASON method, developed to address the complexity of historic building aggregates through a multi-level analysis, finds a perfect operational setting in Borgo San Rocco: an aggregate of historic masonry buildings, characterized by typological heterogeneity, complex physical interconnections, natural morphological constraints, and a strategic urban location. The choice of this site stems from the desire to verify the method's reliability in a real case, but above all from the need to identify accessible, scalable, and replicable tools for mitigating seismic risk in smaller historic centers.

The municipality of Sora is in the southern part of Lazio, in the province of Frosinone, and extends over approximately 72 km² within a river basin bounded to the east by the Abruzzo Apennines and open to the west toward the Liri plain. The urban center lies about 300 meters above sea level, in a strategic but geologically complex location, at the intersection of the Roveto Valley, the Comino Valley, and the Liri Valley. The municipal territory is traversed longitudinally by the Liri River, which plays a central landscape and functional role: it not only facilitated urban settlement and early industrial

activities – especially paper mills and wool factories – but also formed a physical barrier to urban development, influencing the direction and density of expansion. To the north of the city rises Mount San Casto (546 m), a limestone outcrop that overlooks the historic center. To the west and south lies the Liri River plain, a more favorable area for building, where most modern urban expansion has occurred. The highly irregular topography and fragile geological structure make the entire territory particularly exposed to the seismicity typical of the central Apennines. In fact, Sora lies within one of the highest seismic hazard zones of central Italy. According to the current official classification²⁶⁶, Sora falls within seismic zone 1, meaning it is subject to the highest expected peak ground acceleration (PGA), compatible with strong and recurrent seismic events. This classification aligns with the geodynamic framework of the region, which lies near the active fault system of the central-southern Apennines, affecting a vast area from the Marsica to the Roveto Valley and the Comino Valley.

Sora's seismic history is documented by numerous sources, both historical and scientific. According to the Italian Macroseismic Database (DBMI15)²⁶⁷, the area has been affected by several significant earthquakes over the centuries, with intense, sometimes destructive, macroseismic effects. The main events include:

- The earthquake of September 9, 1349²⁶⁸, associated with the Lower Lazio fault, which devastated large parts of the Kingdom of Naples and also caused damage in the Liri basin.
- The earthquake of December 5, 1456²⁶⁹, one of the most violent in southern Italy, which affected a vast area of the South with disastrous effects also in Sora.
- Smaller seismic events recorded between the 16th and 18th centuries, often associated with partial collapses and damage.

However, the most dramatic event for the city was undoubtedly the January 13, 1915, Marsica earthquake²⁷⁰. With an estimated magnitude of Mw 7.0, the quake struck the area between Avezzano, Sora, and the Liri Valley,

²⁶⁶ Prime Minister's Ordinance No. 3274/2003 and subsequent regional updates.

²⁶⁷ Edited by the National Institute of Geophysics and Volcanology (INGV).

²⁶⁸ See [webliography](#), entry no. 10.

²⁶⁹ See [webliography](#), entry no. 11.

²⁷⁰ See [webliography](#), entry no. 12.

causing over 30,000 deaths in total²⁷¹. In Sora, more than 400 deaths were recorded and about 50% of the building stock was destroyed. Contemporary reports describe a severely damaged urban center, with building collapses especially along the Liri River, and serious damage to those that did not collapse. The event had a lasting impact on the city's urban structure, prompting reconstruction plans and the modification of some parts of the historic center.

Additional seismic events occurred throughout the 20th century, such as the earthquakes of May 7 and 11, 1984²⁷², which again affected the area with moderate intensity, still causing widespread damage to already vulnerable buildings.

Of particular interest in selecting this case study is the city's millennia-old settlement history, which dates to prehistoric times. Archaeological excavations in nearby areas such as Valle Radice and Carnello have uncovered artifacts dating to the Middle Paleolithic, confirming a stable human presence since the earliest phases of habitation in central Italy²⁷³. More structured settlements have been uncovered especially in the monte San Casto area, where ceramic remains and wall structures from the Bronze and Iron Ages have been found. In the 8th-7th centuries BCE, the region saw the passage and settlement of proto-Sabine and Volscian peoples, who likely began the first forms of urbanization, documented by the construction of a polygonal masonry wall still partially visible today²⁷⁴. With Rome's progressive expansion southward, Sora was conquered in 306 BCE during the Samnite Wars and became a Latin colony in 303 BCE.

During the Roman era, Sora experienced a phase of intense urban development. It was assigned important military, logistical, and commercial functions. With the fall of the Empire and the arrival of the Lombards in the 7th century, Sora became a *gastaldato* and was long contested between the Duchy of Benevento, the Abbey of Montecassino, and the Papal States. Throughout the Middle Ages, the city endured raids, fires (in 1113 and 1156), sackings, and periods of abandonment, but was never completely destroyed. In the late medieval and early modern periods, Sora became the seat of an important independent duchy, the Duchy of Sora, ruled first by the Cantelmo, then by

²⁷¹ The earthquakes of the 20th century: the January 13, 1915, earthquake in the Fucino Plain.

²⁷² See [weblibliography](#), entry no. 14 and no. 15.

²⁷³ MEZZAZAPPA S. (2017), *op. cit.* in bibliographic reference no. 64.

²⁷⁴ BERANGER E. M. (1981), *op. cit.* in bibliographic reference no. 7.

the Della Rovere and the Boncompagni families. Between the 16th and 18th centuries, the city underwent institutional, religious, and urban reorganization, with the construction of significant civil and religious buildings, strengthening its role as an administrative and commercial center²⁷⁵.

In the 19th century, with annexation to the Kingdom of Naples and then the Kingdom of Italy, Sora entered a new phase of development, marked by significant industrial activity. During World War II, Sora was severely bombed but recovered once again in the post-war period, reinforcing its territorial role as a commercial, educational, and healthcare hub for the Liri Valley. Today, Sora presents itself as a city that combines the historical depth of its ancient core with the economic vitality of its more recent areas, while still showing tangible signs of structural fragility in its building fabric.

As previously highlighted, Sora's urban development reflects the historical, morphological, and functional complexity that has shaped the city over the centuries. From its earliest settlement phases, the relationship between the city and its physical context has played a crucial role in shaping its urban form: the presence of the mountain and the river profoundly influenced site selection, the shape of the built environment, and its transformations.

In Roman times, Sora was reorganized following an orthogonal (Hippodamian) grid layout, based on regular street axes (*decumani* and *cardines*) that outlined rectangular building blocks (*insulae*). Traces of this structure are still visible today in the layout of *corso Volsci* and the perpendicular side streets. The Roman bridge and some infrastructural remains further testify to the city's full integration within the Roman road and trade networks.

During the Middle Ages, with the construction of defensive walls, the city contracted into a more compact and fortified layout. The urban fabric progressively assumed a spindle-shaped morphology, driven by the need to contain expansion within the walls and the natural constraints of the buildable land. Over time, comb-like extensions developed along the river axis, where buildings set perpendicular to the street were oriented toward the water, reflecting economic and productive uses such as fishing.

The transition to the modern age did not bring major planimetric changes but saw the insertion of isolated public and religious buildings – churches, convents, noble residences – which were layered into the dense fabric without significantly altering its morphology. It was only from the late 18th to the

²⁷⁵ LOFFREDO L. (1985), *op. cit.* in bibliographic reference no. 60.

19th century that the city began to expand more permanently beyond the river, starting a process of suburban growth that intensified after World War II.

The 1915 earthquake triggered the first major urban reorganization. Although the initial reconstruction preserved most of the original street layout, the 1930s saw the introduction of new road axes and building alignments aimed at improving accessibility and urban hygiene. In some cases, selective demolition of buildings was carried out to create small squares or set back facades for greater regularity.

The second half of the 20th century witnessed the explosion of modern building activity, driven by population growth and the development of new infrastructure (roads, railway, aqueduct). The city expanded into the plains, with wider grid-like neighborhoods, mixed-use functions, and isolated building types. However, the historic center has retained to this day an aggregated and continuous morphology: adjacent building units with shared walls, variable heights, and direct access from the street, often built in phases using different construction techniques.

Within this framework, Borgo San Rocco is located just outside the old city walls of Sora, at the edge of the consolidated historic center, yet still connected to it both morphologically and functionally. It develops along a narrow and well-defined street axis that links the oldest part of the city with the southeastern zone, establishing itself as one of the main urban thoroughfares. The neighborhood extends precisely between two distinctive natural features: on one side, the banks of the Liri River; on the other, the rocky slope of Mount San Casto. This geographical position – between the mountains and river – has strongly influenced the urban form of the aggregate, generating a compressed, linear, and highly compact layout, corresponding to the so-called *street canyon* typology.

The urban environment is characterized by two continuous and parallel building fronts, composed of load-bearing masonry structures of varying height (from two to five stories), interconnected by through arches and vaulted structures. The focal point of the system is represented by the *arco di San Rocco*, which functions as both a physical and symbolic gateway to the district.

The historical origins of the settlement likely date back to the first half of the 18th century, when the first Church of San Rocco was built, dedicated to the saint protector against the plague. This marginal and protective function

explains its location outside the city walls: in pre-modern times, it was common to place structures intended for the reception and quarantine of the sick outside the city limits.

Only between the late 18th and early 19th centuries did the district take on a more complete configuration, developing along the main road axis with the addition of artisan workshops and compact residential buildings.

The construction characteristics, the variety of floor levels, the irregularity in elevation, and the strong heterogeneity among facades make the building aggregate particularly vulnerable to typical collapse mechanisms of masonry buildings. Moreover, the presence of numerous geometric-structural criticalities makes it an ideal case for the application of the MASON method, aimed at testing the reliability of the multi-level seismic vulnerability assessment approach in aggregated historic contexts, with the goal of extending the methodology to other similar urban settings.

Level I – preliminary diagnosis

The qualitative approach defined by the MASON method is based on a structured process designed to allow for a rapid yet systematic assessment of the seismic vulnerability of historic building aggregates. In this phase of the method, the focus is on the ability to effectively interpret the geometric, constructional, and spatial characteristics of the aggregate even in the absence of high-precision instrumental surveys.

The strength of this methodology lies in its ability to operate at a large scale, with limited time and resources, while still delivering a technically reliable reading of local risk. This makes it a valuable foundation for decision-making regarding potential interventions or further in-depth investigations.

From documents to survey: reconstructing the urban form

The first step of the MASON qualitative analysis involves establishing a solid knowledge base, built through the collection and critical interpretation of historical, archival, and technical sources essential for understanding the morphology and development of the building aggregate. In this context, historical documentation plays a central role in reconstructing the urban genesis of the site and defining its construction identity.

For Borgo San Rocco, the investigation was conducted using diverse sources, including local texts and chronicles, iconographic materials such as lithographs, engravings, and historical paintings – notably the 17th-century view of Sora by Francesco Vanni²⁷⁶ – as well as sculptural surveys like the

²⁷⁶ The view of Sora painted by Francesco Vanni (1563-1610), preserved in the Church of *Santa Maria degli Angeli* of the Passionist Fathers in Sora, is one of the oldest urban representations of the city. Created at the beginning of the 17th century during the Boncompagni rule, the work shows a vertical projection of the historic center enclosed by walls and surrounded by the Liri River, highlighting the peripheral location of Borgo San Rocco, which was still in the process of formation. The scene, of great documentary value, is integrated into the lower part of the painting, beneath the figures of Saint Francis and Saint Restituta.

high-reliefs preserved at the Ducal Palace of Isola del Liri²⁷⁷. The combined analysis of these sources enabled the reconstruction of the main transformation phases of the aggregate, from its 16th-century origins to its urban consolidation in the 18th century, highlighting its settlement logic, assigned function, and strategic position in relation to the consolidated town center.

This historical *corpus* was complemented by the study of technical documentation available at the Technical Office of the Municipality of Sora, with a focus on the surveys produced following the seismic events of May 1984²⁷⁸. These materials, at 1:100 scale, include floor plans, sections, and elevations of the two building fronts making up the aggregate and proved crucial for understanding the typological structure, physical connections between units, and building stratification processes. Additional information was integrated by comparing historical cadastral maps – particularly those from the 18th century and the 1876 map – to trace the continuity and transformation of the urban layout over time, along with the most recent cadastral data.

This documentary base was completed through a rapid on-site survey aimed at verifying current conditions and reading the aggregate's morphology. Visual observation clearly distinguished the two main sectors – facing the Liri River and Mount San Casto respectively – and identified the individual structural units, discernible by differences in floor plans, window configurations, construction materials, and distinctive architectural elements. Key structural features were also recorded, such as connecting arches, floors, roofing systems, and tie rods, as well as signs of degradation or morphological alterations related to later interventions.

The cross-referencing of documentary sources, archival data, and direct observations enabled a coherent reconstruction of the borgo's building structure, highlighting its original settlement logic, major morphological

²⁷⁷ Another important historical representation of the city of Sora is offered by a stucco bas-relief dating back to the first half of the 17th century, preserved in the Palazzo Boncompagni in Isola del Liri, formerly a ducal residence. The relief depicts a perspective view of the city, accompanied by the inscription *Sorae Civitas Romana Colonia*, attesting to the prestige attributed to the city during the Baroque period. The work, clearly of a celebratory function, documents the premodern urban structure and includes fortified elements, the course of the Liri River, and the surrounding hilly morphology.

²⁷⁸ The technical documentation is drawn from the project titled *Survey and interventions for the restoration and hygienic-functional adaptation of buildings damaged by the earthquakes of May 7 and 11, 1984, in Borgo San Rocco*, prepared by the Municipality of Sora.

transformations, and observable structural weaknesses all supporting the following phases of vulnerability analysis.

Hidden criticalities: reading risk in construction details

Once the knowledge base of the building aggregate has been defined and organized, the qualitative analysis within the MASON method proceeds with the completion of the corresponding evaluation form a central tool for translating observations into structured data. The form serves as the link between visual survey and automated processing, allowing the information collected to be systematized according to a set of assessable parameters later used as inputs for the computational algorithm.

Filling in the form requires a critical reading of the buildings, performed by assigning qualitative and quantitative values to each previously identified structural unit (SU). The analysis considers geometric, constructional, and morphological aspects, with particular attention to visible structural conditions. The selected parameters are defined based on their relevance to the local seismic response.

The information to be entered into the MASON form covers multiple areas. First, the dimensional characteristics of the unit are reported including height, number of stories, and the presence of discontinuities or irregularities in alignment between floors or roofs. The quality of the masonry is also assessed, considering texture, regularity of elements, material type, and bond effectiveness. Special attention is given to the distribution of openings: their size, placement, and any vertical or horizontal misalignments are recognized as potential points of weakness in load-bearing walls. Additionally, structural and constructional elements influencing seismic behavior – such as tie rods, steel ties, or ring beams – are noted, along with anomalies like niches, utility shafts, chimneys, or vertical extensions. Each observation is recorded using predefined criteria, either binary coding (presence/absence) or simplified scoring, to yield a concise, coherent, and comparable snapshot of each examined unit's condition.

Each completed form for an SU constitutes the dataset for triggering the MASON algorithm, the computational core of the methodology. The algorithm processes the information based on recurring patterns between

structural configurations and documented collapse mechanisms. Detected conditions are compared with a matrix of codified structural scenarios drawn from literature, assigning each configuration to a potentially triggerable collapse mechanism.

The process uses binary logic, assigning boolean values (true/false) to the individual parameters in the form. The resulting configurations are linked to specific mechanisms from the model, including: simple overturning (partial or full), overturning along openings, out-of-plane bending (horizontal or vertical), gable overturning, and corner detachment.

The output is qualitative in nature: for each structural unit, the most likely collapse mechanism is indicated not probabilistically, but as a diagnostic result grounded in objective technical criteria. This enables the creation of a summarized map of criticalities within the building aggregate, highlighting configurations most susceptible to local mechanisms in the event of seismic activity.

Drawing the mechanisms

Once data processing via the MASON algorithm is complete, the final phase of the qualitative approach involves the visual and thematic representation of results, aimed at translating technical information into clear, accessible, and functional formats for risk assessment and intervention planning. The output generated is not just an illustration: it is an operational tool supporting comparative analysis of vulnerabilities and spatial interpretation of expected collapse mechanisms.

Results are represented through a simplified 3D informational model of the building aggregate, in which each structural unit is associated with its identified collapse mechanism, encoded using a differentiated color system. This method allows for immediate visual distinction between different seismic responses and the identification of units with higher vulnerability.

The representation, developed in an HBIM environment at a detailed level corresponding to LOD 100/200²⁷⁹, aligns with the needs of the preliminary analysis phase. The parametric 3D model, complete with information and data

²⁷⁹ It defines an approximate level of detail for the model elements, represented as generic systems or objects.

from the rapid survey, links each architectural element to an information set including essential geometric data, main construction features, qualitative analysis outcomes, and the expected collapse mechanism. Those data can be queried directly within the model and updated over time following a progressive and integrative approach.

In the case of Borgo San Rocco, the HBIM model enables localization of the expected mechanisms and offers a clear, immediate visualization of risk along the two building fronts with particular emphasis on the sector facing Mount San Casto and the main urban façade. The integration of informational content and geometric representation supports a synthesized reading of the risk scenario, useful for both diagnosis and possible operational developments.

Simultaneously, the analysis results are imported into a GIS environment, where structural units are georeferenced within their urban context. This extends the analysis to urban and territorial scales, facilitating the identification of spatial relationships, distributed criticalities, and intervention priorities.

This mode of representation – dynamic and scalable in both GIS and HBIM – does not mark the end of the process but rather serves as an operational tool supporting seismic risk prevention, planning, and management. In the case study, mapping of the mechanisms clearly illustrates the irregular distribution of vulnerabilities, confirming the higher susceptibility of the units facing the slope and the street front, which are frequently affected by partial overturning and horizontal bending mechanisms. The ability to selectively query the model facilitates analytical synthesis and enhances data communication between technical personnel and decision-makers.

The visual representation and graphical rendering of the qualitative analysis results is a core component of the MASON methodology, as it transforms a complex set of observations into a coherent framework supporting both technical understanding and seismic risk mitigation strategies in historic contexts.

Level II – Digital precision

After the qualitative phase, the second level of the MASON approach involves a quantitative deepening based on instrumental surveys and computational models, enabling a more precise definition of the seismic behavior of the structural units analyzed. This phase is based on the assumptions that higher-resolution surveys and material knowledge allow for a kinematic-structural analysis in accordance with the guidelines of the *Norme Tecniche per le Costruzioni* (NTC 2018).

Advanced surveying

The integrated survey campaign carried out in Borgo San Rocco represents one of the core stages of the second-level MASON analysis. Its goal is to produce a metric, continuous, and georeferenced three-dimensional documentation of the entire building aggregate. The activity is structured as a multi-technology survey, combining aerial drone photogrammetry, classical terrestrial photogrammetry, and spherical photogrammetry via 360° cameras, to ensure comprehensive acquisition of urban spaces and masonry surfaces, both in plan and elevation.

For the aerial photogrammetry, a DJI Mini 2 drone equipped with a 12-megapixel camera stabilized on a three-axis gimbal was used. It acquired high-resolution images with minimal optical distortion even in variable weather conditions. Flight missions were planned in an orthogonal grid pattern to ensure systematic site coverage. The flight altitude was maintained at about 50 meters above ground, allowing for a spatial resolution below 5 cm/pixel. Images were captured along two directions – longitudinal and transverse relative to the borgo's axis – with 75% and 60% overlap, respectively, meeting the standards for generating high-density 3D models.

The aerial component was supplemented by terrestrial surveying using targeted photographic acquisitions along the building frontages, especially for portions inaccessible by drone. Images were captured with CANON EOS 850D DSLR cameras equipped with EF 14mm f/2.8L II USM lenses under diffused morning lighting to minimize harsh shadows. Additionally, spherical

images were captured using an Insta360 X4 camera to fill visual gaps near narrow spaces, doorways, or complex architectural features.

All image sets were processed in *Agisoft Metashape*, using a structure-from-motion (SfM) photogrammetric workflow to generate a dense, georeferenced point cloud. The dataset includes about 1,200 aerial images, 600 terrestrial images, and 24 spherical photos. The resulting point cloud comprises over 11.5 million points, each with 3D spatial coordinates (x, y, z) and RGB color values, faithfully representing both the volumetric geometry and exterior appearance of the building aggregate. Metric precision was validated by field measurements, yielding an average error of less than 1%, in line with the precision requirements of MASON's kinematic analysis. This high-resolution geometric model forms a reliable base for both parametric modeling and the assessment of local collapse mechanisms in the subsequent calculation phase.

From pixel to stone

The analysis of the materials composing the building fabric of Borgo San Rocco is a key component of MASON's second level. Understanding the physical and mechanical characteristics of materials used in historical masonry is crucial for evaluating structural capacity, estimating seismic vulnerability, and accurately calibrating kinematic analysis models.

The investigation focuses on the vertical stone masonry walls, the primary structural element of the aggregate. A representative sample was selected from an unplastered portion facing monte San Casto. Laboratory testing followed a standardized multi-phase procedure.

First, the open porosity of the material was measured using weight tests under dry, damp, and saturated conditions. The sample was oven-dried at 60 °C, then immersed in distilled water inside a vacuum desiccator to saturate accessible pores. Using a hydrostatic balance, weight was recorded in air and submerged to calculate the sample's total volume and the void-to-solid ratio. The open porosity was found to be 25.09%, indicating high porosity, which has significant implications for the material's durability and mechanical response under dynamic loads.

In parallel, an acid attack test was conducted to identify the material's chemical composition. The observed effervescence upon contact with hydrochloric acid, with no solid residue, indicated a composition almost entirely based on calcium carbonate. This was confirmed via X-ray diffraction (XRD) analysis, which identified calcite as the dominant crystalline phase.

Based on this data, the analyzed masonry was classified as irregular limestone rubble masonry, likely sourced locally from the Liri riverbed or monte San Casto slopes. The stones, irregular and unworked, are bound with weak, friable mortar showing a high void content. The masonry texture was further analyzed using digital image sampling and regular grid overlays over 1 dm² surfaces. Stone coverage was found to be 76.88%, and mortar 23.12%, indicating a loose masonry texture.

For structural analysis purposes, mechanical parameters were assigned to the materials as listed in Table C8.5.I of the 2019 NTC Circular, for rubble masonry with poor-quality mortar. These include a mean compressive strength of 1.00 MPa and a cohesionless shear strength of 0.07 MPa consistent with observed in-situ conditions.

Overall, the analysis reveals a historically heterogeneous masonry type with low mechanical performance and significant structural inconsistency, all contributing to increased seismic vulnerability of the aggregate.

When collapse begins: mechanism calculation

The computational phase of MASON's second-level analysis is its most critical moment. It applies linear kinematic analysis to assess the local stability of masonry walls subject to out-of-plane failure. Based on integrated survey and material analysis data, each structural unit in Borgo San Rocco is geometrically modeled to evaluate the mechanical behavior of potential collapse mechanisms identified in the first analysis phase.

This approach applies the *Principle of Virtual Work* as per the 2019 Circular of the NTC18, which allows the calculation of the horizontal collapse multiplier α_0 , *i.e.*, the ratio between resisting and destabilizing forces for each mechanism. It assumes masonry walls behave as rigid bodies up to the activation of an idealized collapse mechanism.

Each Structural Unit (SU) is treated as a macroelement. The type of mechanism is based on Level I results. For each SU, geometry, wall thickness at different levels, floor-to-floor heights, centroid location, vertical load distribution, and presence of tied floors or pushing elements are defined. These parameters are used to compute force arms, destabilizing and resisting moments. All data is entered into a structured MASON spreadsheet, which returns α_0 values and their corresponding spectral activation accelerations (a_0).

Comparison between a_0 and the site-specific *Peak Ground Acceleration* (PGA)²⁸⁰ determines whether a collapse mechanism is likely to activate in a seismic event.

For example, Structural Unit 10B was assessed as a simple global overturning mechanism around a base hinge. The three-story building, with wall thickness decreasing from 75 cm to 60 cm, lacks transverse connections. Floors are orthogonal to the overturning direction, with no arches or tie rods. The resulting α_0 was insufficient to ensure stability against PGA, leading to a negative outcome. The same analysis was applied to the entire aggregate: out of 31 road-facing structural units, only 10 passed the check, while 21 had activation accelerations below the seismic threshold.

Integrated visualization: HBIM and GIS

The Borgo San Rocco case study was modeled using two interconnected digital environments: HBIM (*Historic Building Information Modeling*) and 3D GIS (*Geographic Information System*). These tools support representation, consultation, and visualization of MASON's second-level analysis results, enabling multi-scale interpretation of seismic vulnerability.

HBIM modeling was developed in Autodesk Revit, starting from the high-resolution photogrammetric point cloud (.rcp format). This served as the base for parametric reconstruction at LOD 400/500, as defined by UNI 11337 standards. This *As Built* development level includes accurate geometric modeling of structural and architectural elements: walls, floors, roofs, and secondary components like cornices, gables, arches, and openings. Custom Revit families (.rfa), based on specific survey data and archival documentation, were created to faithfully reproduce original historical geometries.

²⁸⁰ $a_{g,SLV} = 0.24$ g for the municipality of Sora.

Each modeled element is enriched with structured information derived from direct surveys, archival sources, and analysis outcomes. For each SU, data is entered regarding wall type, materials, number of stories, floor type, conservation state, tie elements, kinematic analysis results, activation accelerations, and verification against design PGA. This enables interactive visualization of MASON results through color-coded collapse mechanisms and concise vulnerability parameters.

Concurrently, geometric and descriptive data are organized in a 3D GIS built in QGIS, georeferenced using topographic control points and WGS 84/UTM 33N coordinates. The GIS integrates multiple data layers: historical cadastral maps, regional topographic maps, seismic microzonation (levels 1 and 2), geological and geomorphological maps, georeferenced historical maps (18th and 19th centuries), hydrogeological risk (PAI), zoning constraints, infrastructure networks, and emergency services (Municipal Emergency Plan, Emergency Limit Condition - CLE).

Each SU's kinematic results are imported as attribute data tied to 3D features. Units can be queried via interactive tools, returning structured summaries including: geometry, wall category, vulnerabilities, expected mechanism, activation acceleration (a_0), and compliance status. Thematic filters and color coding allow for dynamic seismic vulnerability maps.

The integration of HBIM and 3D GIS provides a consistent multi-level analysis framework: detailed architectural-structural modeling for each building element, and systemic geospatial views for territorial risk management, intervention planning, and data interoperability. Both systems serve as tools for interpreting the built environment and visualizing MASON results, offering operational support for diagnosis, design, and management of vulnerable historic heritage.

From diagnosis to planning

The application of the MASON methodology to the case study of Borgo San Rocco demonstrates not only the effectiveness of a multi-level approach in assessing seismic vulnerability, but also its tangible utility as a tool for preventive planning and emergency organization.

Through the first level of analysis, based on rapid surveys and qualitative interpretation of construction characteristics, it becomes possible to quickly identify the structural units most exposed to collapse mechanisms. This allows the definition of high-risk areas and directs attention to the sectors that require further investigation or priority interventions. Such preliminary diagnostic capability proves particularly valuable in extensive historic contexts, where technical and economic resources are often limited, and where low-threshold risk mapping can serve as a practical foundation for progressive mitigation strategies.

The second level of analysis, thanks to the precision of kinematic evaluations and the georeferencing of results within HBIM and GIS environments, allows vulnerability to be quantified in comparable terms, associating each structural unit with objective values (activation acceleration a_0) and explicit checks against the design-level Peak Ground Acceleration (PGA). In this way, the method provides structured and spatially contextualized data, useful not only for designing consolidation interventions, but also for drafting or updating municipal emergency plans. Specifically, this includes locating critical areas, identifying interferences as defined by the *Guidelines for Emergency Limit Conditions* (CLE), and mapping strategic buildings or temporary reception centers.

In the case of Borgo San Rocco, the detection of localized vulnerabilities along the main axis of the aggregate confirms how the MASON approach can offer operational support for urban risk management. The combination of structural analysis, information modeling, and geospatial representation makes it possible to build intervention priority maps, useful for both routine planning and emergency situations.

In this sense, MASON functions as an intermediary tool between technical knowledge and administrative decision-making. It enables accessible and

actionable use of seismic risk information, supporting prevention, strategic programming, and civil safety efforts.

ELENCO ICONOGRAFICO

LIST OF ILLUSTRATIONS

PARTE 1

PART 1

1. Il sisma nei centri storici minori. *Disegno a china su carta, ©2025.* p. 31
The earthquake in minor historic centers. Ink drawing on paper, ©2025.
2. Borghi della valle del Liri: identità territoriali e insediative. p. 38
Villages of the Liri Valley: territorial and settlement identities.
3. Tipologie di impianto urbano nei centri storici italiani. p. 61
Urban layout typologies in Italian historic centers.
4. Sistema edilizio tradizionale nei centri storici: elementi strutturali e costruttivi. p. 64
Traditional building system in historic centers: structural and construction elements.
5. Veduta aerea del centro storico di Accumoli (RI) dopo il sisma del Centro Italia del 2016-2017. *Foto da drone ©2021.* p. 74
Aerial view of the historic center of Accumoli (RI) after the 2016-2017 Central Italy earthquake. UAV photo ©2021.
6. HT_GIS: Distribuzione geografica dei centri storici minori in Italia. p. 80
HT_GIS: Geographic distribution of minor historic centers in Italy.
7. HT_GIS: Distribuzione dei centri storici minori in relazione alla pericolosità sismica. p. 81
HT_GIS: Distribution of minor historic centers in relation to seismic hazard.
8. Centro storico di Fumone (FR). *Estratto del Catasto Gregoriano.* p. 83
Historic center of Fumone (FR). Excerpt from the Gregorian Cadastre.

PARTE 2

PART 2

9. Tecnologie per il rilievo e la conoscenza del costruito storico. *Disegno a china su carta*, ©2025. p. 123
Survey and knowledge technologies for historic buildings. *Ink drawing on paper*, ©2025.
10. Tecnologie digitali per la gestione del costruito: GIS, BIM, AR/VR e AI. p. 148
Digital technologies for built heritage management: GIS, BIM, AR/VR, and AI.
11. *Smart city*: integrazione di dati per la gestione del patrimonio costruito. p. 151
Smart city: data integration for built heritage management.
12. GIS e BIM per il ciclo di vita dell'edificio: dalla pianificazione alla gestione. p. 152
GIS and BIM for the building life cycle: from planning to management.
13. Nuvola di parole chiave sulla digitalizzazione dell'ambiente costruito. p. 155
Word cloud of key terms on the digitalization of the built environment.

PARTE 3

PART 3

14. Modello semplificato per l'analisi della vulnerabilità di un edificio storico. *Disegno a china su carta, ©2025.* p. 181
Simplified model for the vulnerability analysis of a historic building. *Ink drawing on paper, ©2025.*
15. Evoluzione dei metodi per la valutazione della vulnerabilità sismica in Italia. p. 211
Evolution of methods for seismic vulnerability assessment in Italy.
16. MASON: processo multilivello per l'analisi della vulnerabilità sismica dal tessuto urbano all'edificio. p. 216
MASON: multilevel process for seismic vulnerability analysis from urban fabric to individual buildings.
17. Scheda MASON per la valutazione della vulnerabilità: definizione del meccanismo di collasso probabile. p. 224
MASON assessment sheet for seismic vulnerability: definition of the probable collapse mechanism.
18. Logo del metodo MASON (*Multilevel Assessment for Structural Overturning and Notation*). p. 235
Logo of the MASON method (*Multilevel Assessment for Structural Overturning and Notation*).

PARTE 4

PART 4

19. Arco di Borgo San Rocco a Sora. *Disegno a china su carta*, ©2025. p. 271
Arch of Borgo San Rocco in Sora. *Ink drawing on paper*, ©2025.
20. Inquadramento territoriale di Sora e del Borgo San Rocco. p. 274
Territorial context of Sora and Borgo San Rocco.
21. Sismicità storica nell'area di Sora (FR): eventi registrati dal 1300 a oggi. *Elaborazione dati CPTI*, 2025. p. 276
Historical seismicity in the Sora (FR) area: recorded events from 1300 to the present. *Data processing from CPTI*, 2025.
22. Evoluzione storico-insediativa del centro urbano di Sora dal periodo romano all'Ottocento. p. 280
Historical and settlement evolution of the urban center of Sora from the Roman period to the 19th century.
23. Veduta aerea del Borgo San Rocco e del centro storico di Sora. *Foto da drone* ©2024. p. 282
Aerial view of Borgo San Rocco and the historic center of Sora. *UAV photo* ©2024.
24. Piante, sezioni e prospetti dei fronti edilizi su via Borgo San Rocco, Sora. *Rielaborazione della documentazione tecnica redatta dal Comune di Sora*. p. 286
Plans, sections, and elevations of building frontages on Via Borgo San Rocco, Sora. *Redrawn from technical documentation produced by the Municipality of Sora*.
25. Mappatura delle unità strutturali con relative schede di vulnerabilità MASON. p. 287
Mapping of structural units with corresponding MASON vulnerability assessment sheets.

26. Modello HBIM (LOD 100) per la classificazione, visualizzazione e rappresentazione dei meccanismi locali di collasso nelle facciate. p. 292
HBIM model (LOD 100) for the classification, visualization, and representation of local collapse mechanisms on building façades.
27. Mappatura GIS qualitativa dei meccanismi locali di collasso in Borgo San Rocco secondo il metodo MASON. p. 294
GIS mapping of local collapse mechanisms in Borgo San Rocco according to the MASON method.
28. Progetto del rilievo digitale integrato: foto terrestri, foto sferiche 360°, foto aeree. p. 296
Integrated digital survey project: terrestrial photos, 360° spherical images, aerial photographs.
29. Fasi del processo fotogrammetrico aereo e terrestre: modelli digitali e nuvole di punti di Borgo San Rocco. p. 297
Phases of the aerial and terrestrial photogrammetric process: digital models and point clouds of Borgo San Rocco.
30. Analisi morfologica della tessitura muraria: confronto tra fotografia e schematizzazione grafica. p. 299
Morphological analysis of masonry texture: comparison between photograph and graphic schematization.
31. Diffrazione a raggi X (XRD) per l'identificazione mineralogica di campioni da muratura. *Elaborazione della prof.ssa Maria Cristina Mascolo.* p. 300
X-ray diffraction (XRD) for mineralogical identification of masonry samples. *Analysis by Prof. Maria Cristina Mascolo.*
32. Analisi cinematica lineare del cinematisimo di ribaltamento: modellazione e parametri di verifica. p. 302
Linear kinematic analysis of the overturning mechanism: modeling and verification parameters.

33. Restituzione integrata del fronte edilizio: dalla nuvola di punti al modello HBIM (LOD 400) di Borgo San Rocco. p. 306
Integrated restitution of the building front: from point cloud to HBIM model (LOD 400) of Borgo San Rocco.
34. Modello HBIM informativo con integrazione dei parametri MASON per la vulnerabilità sismica. p. 307
Informative HBIM model with integrated MASON parameters for seismic vulnerability.
35. Verifica della sicurezza sismica degli edifici su via Borgo San Rocco secondo NTC18 e CLE: confronto tra capacità, domanda e interferenze in ambiente GIS 3D. p. 308
Seismic safety assessment of buildings on via Borgo San Rocco according to NTC18 and CLE: comparison of capacity, demand, and interferences in a 3D GIS environment.
36. Mappa storica del centro urbano di Sora (FR). *Tavola catastale ottocentesca.* p. 311
Historical map of the urban center of Sora (FR). *19th-century cadastral sheet.*

BIBLIOGRAFIA REFERENCES

1. ALBARELLO D., AZZARO R., BARBANO M. S., D'AMICO V., D'AMICO S., ROTONDI R., TUVÈ T., ZONNO G. (2007), *Valutazioni di pericolosità sismica in termini di intensità macrosismica utilizzando metodi di sito*, CNR-INGV.
2. AVETA A. (2001), *Tutela, restauro, gestione dei beni architettonici e ambientali*, Napoli: CUEN.
3. BAGGIO C., BERNARDINI A., COLOZZA R., CORAZZA L., DELLA BELLA M., DI PASQUALE G., DOLCE M., GORETTI A., MARTINELLI A., ORSINI G. PAPA F., ZUCCARO G. (2014), *Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica (AeDES)*, Roma: Dipartimento della Protezione Civile.
4. BAQUEDANO-JULIÁ P., FERREIRA T. M., ARRIAGADA-LUCO C., SANDOVAL C., PALAZZI N. C., OLIVEIRA D. V. (2024), *Multi-vulnerability analysis for seismic risk management in historic city centres: an application to the historic city centre of La Serena*, Natural Hazards, Chile: Springer-Verlag, vol. 120, no. 10, pp. 9223-9266.
5. BARTOLOMUCCI C., DONATELLI A. (a cura di) (2012), *La conservazione nei centri storici minori abruzzesi colpiti dal sisma del 2009: esigenze di riuso e questioni di conservazione*, in *Scienza e beni culturali XXVIII*, Venezia: Arcadia Ricerche, vol. 28, pp. 101-111.
6. BENEDETTI D., PETRINI V. (1984), *Sulla vulnerabilità di edifici in muratura: proposta di un metodo di valutazione*, Roma: L'industria delle Costruzioni, vol. 149, no. 1, pp. 66-74.
7. BERANGER E. M. (1981), *La Cinta Muraria di Sora nel Quadro delle Fortificazioni in Opera Poligonale delle media Valle del Liri*, Sora (FR): Centro di Studi Sorani «V. Patriarca».
8. BERNARDINI A. (2000), *La vulnerabilità degli edifici: valutazione a scala nazionale della vulnerabilità sismica degli edifici ordinari*, Roma: CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, pp. 105-152.
9. BERNARDINI A., GIOVINAZZI S., LAGOMARSINO S., PARODI S. (2007), *Matrici di probabilità di danno implicite nella scala EMS-98*, in *XII Convegno Nazionale ANIDIS 'L'Ingegneria Sismica in Italia'*, Pisa, 10-14 giugno 2007.

10. BERNARDINI A., GIOVINAZZI S., LAGOMARSINO S., PARODI S. (2007), *Vulnerabilità e previsione di danno a scala territoriale secondo una metodologia macrosismica coe-rente con la scala EMS-98*, in *Atti del XII Convegno Nazionale ANIDIS*, Pisa: Edizioni Plus – Pisa University Press, 10-14 giugno 2007.
11. BETTINI M. C., NICOSIA A. (a cura di) (2009), *Le mura megalitiche: il Lazio meridionale tra storia e mito*, Roma: Gangemi Editore.
12. BEVILACQUA M. G., RUSSO M., GIORDANO A., SPALLONE R. (2022), *3D reconstruction, digital twinning, and virtual reality: Architectural heritage applications*, in *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops*, IEEE, pp. 92-96.
13. BINI M., BERTOCCHI S. (2012), *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, Novara: Città Studi Edizioni.
14. BONELLI R. (1976), *I metodi di insegnamento universitario per la riqualificazione dei centri storici*.
15. BORRI A., CORRADI M., CASTORI G., DE MARIA A. (2015), *A method for the analysis and classification of historic masonry*, in *Bulletin of Earthquake Engineering*, Heidelberg, Germania: Springer-Verlag, vol. 13(9), pp. 2647-2665.
16. BORRI A., DE MARIA A. (2019), *Il metodo IQM per la stima delle caratteristiche meccaniche delle murature: allineamento alla circolare n. 7/2019*, in *Atti del XVIII Convegno Nazionale ANIDIS 'L'Ingegneria Sismica in Italia'*, Ascoli Piceno: Pisa University Press, pp. 15-19.
17. BRAGA F., DOLCE M., LIBERATORE D. (1982), *A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the MSK-76 scale*, in *Proceedings of the seventh European conference on earthquake engineering*, Athens, Greece: Technical Chamber of Greece, pp. 431-450.
18. BRUSAPORCI S. (2010), *Sperimentazione di modelli tridimensionali nello studio dell'architettura storica*, Roma: Gangemi Editore, pp. 58-64.
19. BRUSAPORCI S., MAIEZZA P., TATA A. (2018), *A framework for architectural heritage HBIM semantization and development*, in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XLII-2, pp. 179-184.
20. BRUSAPORCI S., TRIZIO I., RUGGERI G., MAIEZZA P., TATA A., GIANNANGELI A. (2018), *AHBIM per l'analisi stratigrafica dell'architettura storica*, in *Restauro Archeologico*, vol. 26, no. 1, pp. 112-131.

21. CACCIARI M. (2004), *La città*, Villa Verucchio (RN): Pazzini.
22. CARDINALI V., CRISTOFARO M. T., FERRINI M., NUDO R., PAOLETTI B., TANGANELLI M. (2024), *A multiscale approach for the seismic vulnerability assessment of historical centres in masonry building aggregates: cognitive approach and interdisciplinary perspectives*, in *Sustainability, Risks and Resilience of Vernacular Heritage*, Routledge, pp. 23-48.
23. CIARDINI F., FALINI P. (a cura di) (AA.VV.) (1978), *I centri storici. Politica urbanistica e programmi di intervento pubblico: Bergamo, Bologna, Brescia, Como, Gubbio, Pesaro, Vicenza*, Milano: Mazzotta.
24. CIMA V., TOMEI V., GRANDE E., IMBIMBO M. (2024), *Fragility curves for the seismic assessment of masonry buildings in historic centres prone to out-of-plane failure modes*, in *Bulletin of earthquake engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 1801-1826.
25. Circolare NTC 2018. Circolare n. 7 del 21 gennaio 2019, *Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni»* di cui al D.M. 17 gennaio 2018, C.S.LL.PP., 2019.
26. COPPOLA A., D'ANGELO G., SPENA M. (2004), *La legislazione dei beni culturali e del paesaggio*, Napoli: Edizioni Giuridiche Simone.
27. CORRADINI F. (2007), *Il fiume Liri nella nostra storia: dalla funzione di delimitazione territoriale a fonte di vita per le popolazioni locali*, Cassino: Centro Studi Cassinati, anno 2007, n. 1.
28. CROCE V., BEVILACQUA M. G., CAROTI G., PIEMONTE A. (2021), *Connecting geometry and semantics via artificial intelligence: from 3D classification of heritage data to H-BIM representations*, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 43, pp. 145-152.
29. D'ALESSIO G. (1983), *I centri storici: aspetti giuridici*, Milano: Giuffrè.
30. D'AYALA D., SPERANZA E. (2002), *An integrated procedure for the assessment of seismic vulnerability of historic buildings*, paper presented at *12th European Conference on Earthquake Engineering*.
31. D'AYALA D., SPERANZA E. (2004), *Un criterio per la formulazione e la calibrazione di curve di fragilità e scenari di danno: il caso di Nocera Umbra (PG)*, in *Atti dell'XI Convegno Nazionale ANDIS 'L'Ingegneria Sismica in Italia'*, Genova, Palazzo Ducale, 25-29 gennaio 2004.

32. DE MAGISTRIS A., DESIDERI P., OLMO C., POGACNIK M., SORACE S. (2013), *La concezione strutturale: ingegneria e architettura in Italia negli anni Cinquanta e Sessanta*, Torino: Allemandi & C.
33. DELFINO F. (1976), *Osservazioni sul problema dei centri storici*, Milano: Rivista giuridica dell'edilizia.
34. DE RUBERTIS R. (1994), *Il disegno dell'architettura*, Roma: La Nuova Italia Scientifica.
35. DI GIOIA V. (1975), *Criteri di definizione dei centri storici*, Milano: Civiltà delle Macchine.
36. DI STEFANO R. (1979), *Il recupero dei valori: centri storici e monumenti: limiti della conservazione e del restauro*, Napoli: Edizioni Scientifiche Italiane.
37. DOCCI M., ATTENNI M., IPPOLITO A. (2024), *Virtual models for the preservation and assessment of architectural and archaeological heritage*, in ASCIUTTI M., CERRO R., SCOPINARO E. (a cura di), *Cities: the future of the past: architecture, urban planning and restoration in Iran and Italy*, Roma: «L'Erma» di Bretschneider, pp. 91-105.
38. DOCCI M., MAESTRI D. (2009), *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Bari: Laterza.
39. DOLCE M. (1991), *Schematizzazione e modellazione degli edifici in muratura soggetti ad azioni sismiche*, Roma: L'industria delle costruzioni, pp. 44-57.
40. DOLCE M., BRAMERINI F., CASTENETTO S., NASO G. (2014), *Strategie di mitigazione del rischio sismico: progetto standard e indicatore di resilienza ai terremoti degli insediamenti*, in *Atti del 33° Convegno GNGTS*, Bologna, 25-27 novembre 2014, pp. 371-380.
41. DOLCE M., MASI A., SAMELA C., SANTARSIERO G., VONA M., ZUCCARO G., CACACE F., PAPA F., (2004), *Esame delle caratteristiche tipologiche e del danneggiamento del patrimonio edilizio di San Giuliano di Puglia*, in: *Atti dell'XI Congresso Nazionale ANDIS 'L'ingegneria Sismica in Italia'*, Genova, 25-29 gennaio 2004, pp. 25-29.
42. FAVA M., MUNARI M., DA PORTO F., MODENA C. (2015), *Valutazione della vulnerabilità sismica locale di edifici esistenti in muratura attraverso analisi cinematica dei meccanismi di collasso e curve di fragilità*, in *Atti del XVI Convegno Nazionale ANIDIS 'L'Ingegneria Sismica in Italia'*, L'Aquila, 13-17 settembre 2015.
43. FORMISANO A., MARZO A., INDIRLI M. (2013), *Analisi comparativa tra metodi di valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici murari di Arsita (TE)*, in *XV Convegno Nazionale ANIDIS 'L'Ingegneria Sismica in Italia'*, Padova, 30 giugno - 4 luglio 2013.

44. FORMISANO A. (2017), *Local-and global-scale seismic analyses of historical masonry compounds in San Pio delle Camere (L'Aquila, Italy)*, *Natural Hazards*, 86(2), pp. 465-487.
45. FORMISANO A. (2017), *Theoretical and numerical seismic analysis of masonry building aggregates: case studies in San Pio Delle Camere (L'Aquila, Italy)*, *Journal of Earthquake Engineering*, 21(2), pp. 227-245.
46. FRANCINI M., COLUCCI M., PALERMO A., VIAPIANA M. F. (2012), *I centri storici minori. Strategie di rigenerazione funzionale*, Milano: Franco Angeli.
47. GASPARRINI C. (1994), *L'attualità dell'urbanistica: dal piano al progetto, dal progetto al piano*, Milano: Etas.
48. GRÜNTAL G. (1998), *European macroseismic scale 1998*, Luxembourg: Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Consiglio d'Europa.
49. GUIDI G., RUSSO M., ANGHELEDDU D. (2014), *3D Survey and Virtual Reconstruction of archeological sites*, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 1(2), pp. 55-69.
50. HEIDEGGER M. (2017), *La questione della tecnica*, collana: Meme, *Piccoli grandi classici*, Firenze: goWare.
51. HEIDEGGER M., in TADDIO L. (a cura di) (1951), *Costruire, Abitare, Pensare*, Sesto San Giovanni (MI) - Gemona del Friuli (UD): Mimesis.
52. HEIDEGGER M., *Building Dwelling Thinking*, in HOFSTADTER A. (a cura di) (1971), New York City: Harper & Row.
53. HILLIER A. (2010), *Invitation to mapping: how GIS can facilitate new discoveries in urban and planning history*, in *Journal of Planning History*, SAGE Publications, Society for American City and Regional Planning History.
54. IMBIMBO M., MODONI G., PELLICCIO A., SACCUCCI M. (2021), *Vulnerability of Buildings: From Heritage Building Information Modelling (HBIM) to Seismic Analysis*, in *Critical Thinking in the Sustainable Rehabilitation and Risk Management of the Built Environment: CRIT-RE-BUILT*, in *Proceedings of the International Conference*, Iași, Romania, November 7-9, 2019: Springer International Publishing, pp. 311-329.
55. INZERILLO L., LO TURCO M., PARRINELLO S., SANTAGATI C., VALENTI G. M. (2016), *BIM e beni architettonici. Verso una metodologia operativa per la conoscenza e la gestione del patrimonio culturale*, L'Aquila: DISEGNARECON.

56. LAGOMARSINO S., CATTARI S. (2015), *Perpetuate guidelines for seismic performance-based assessment of cultural heritage masonry structures*, Bulletin of Earthquake Engineering 13, pp. 13-47.
57. LAURI A. (1913), *Sora, Isola del Liri e dintorni*, Sora (FR): V. D'Amico.
58. LENZA P., GHERSI A., CALDERONI B. (2011), *Edifici in muratura*, Palermo: Dario Flaccovio.
59. LIN G., GIORDANO A., SANG K. (2020), *From site survey to HBIM model for the documentation of historic buildings: The case study of Hexinwu village in China*, in Conservation Science in Cultural Heritage, Bologna: Università di Bologna (Centro di Conservazione del Patrimonio Culturale), vol. 20, pp. 111-123.
60. LOFFREDO L. (1985), *SORA. Storia, archeologia, folklore, tradizioni*, collana: *Itinerari turistici*, Casamari (FR): Tipografia dell'Abbazia di Casamari.
61. MAIETTI F. (2008), *Centri Storici Minori. Progetti di recupero e restauro del tessuto urbano fra identità culturale e salvaguardia*, Santarcangelo di Romagna (RN): Maggioli.
62. MANIERI Elia M. (1978), *Il problema dei centri storici minori del Mezzogiorno 'interno'*, in CIARDINI F., FALINI P. (a cura di), *I centri storici. Politica urbana e programmi di intervento pubblico*, Milano: Mazzotta.
63. MARRA A., TRIZIO I., CORDISCO A., GIALLONARDO M., SACCUCCI M., SAVINI F. (2024), *Misure a dismisura: problematiche e spunti di riflessione sul rilievo urbano / Measures out of measure: issues and reflections on urban surveying*, in BERGAMO F., CALANDRIELLO A., CIAMMAICHELLA M., FRISO I., GAY F., LIVA G., MONTELEONE C. (a cura di), *Misura / Dismisura. Atti del 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione / Measure / Out of Measure. Transitions. Proceedings of the 45th International Conference of Representation Disciplines Teachers*, Milano: Franco Angeli, pp. 1715-1734.
64. MEZZAZAPPA S. (2003), *La forma della città di Sora ei suoi santuari*, collana: *Atlante tematico di topografia antica*, 12, 2003, Roma: «L'Erma» di Bretschneider, pp. 99-126.
65. MIARELLI MILANI G. (1979), *Centri storici, un nodo ancora da sciogliere*, Roma: Palladio, pp. 133-142.
66. MILANO L., MANNELLA A., MORISI C., MARTINELLI A. (2008), *Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso locali negli edifici esistenti in muratura e dei relativi modelli cinematici di analisi*, allegato alle *Linee guida per la riparazione e il rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni*.

67. MILDENHALL B., SRINIVASAN P. P., TANCIK M., BARRON J. T., RAMAMOORTHI R., NG R. (2021), *Nerf: Representing scenes as neural radiance fields for view synthesis*, New York City: Communications of the ACM, 65(1), pp. 99-106.
68. MOUROUX P., BERTRAND E., BOUR M., LE BRUN B., DEPINOIS S., MASURE P. (2004), *The European RISK-UE project: an advanced approach to earthquake risk scenarios*, in *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*.
69. MÜNSTER S., APOLLONIO F. I., BLUEMEL I., FALLAVOLLITA F., FOSCHI R., GRELLERT M., IOANNIDES M., JAHN P. H., KURDIOVSY R., KUROCZYŃSKI P., LUTTEROTH J. E., MESSEMER H., SCHELBERT G. (2024), *Handbook of digital 3D reconstruction of historical architecture*, Springer Nature.
70. MURPHY M., MCGOVERN E., PAVIA S. (2009), *Historic building information modelling (HBIM)*, Structural Survey, vol. 27, no. 4, pp. 311-327.
71. MURPHY M., MCGOVERN E., PAVIA S. (2013), *Historic Building Information Modelling – Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture*, in *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 76, DOI: 10.1016/j.isprs.2012.11.006, pp. 89-102.
72. NORA P. (a cura di) (1984), *Entre mémoire et histoire. Les Lieux de mémoire*, Bibliothèque illustrée des histoires, Parigi: Gallimard, pp. 23-43.
73. NORBERG-SCHULZ C. (1979), *Genius Loci*, Milano: Electa.
74. Norme Tecniche per le Costruzioni (2018), *Aggiornamento delle 'Norme Tecniche per le Costruzioni'*, D.M. 17 gennaio 2018.
75. PANE R. (1965), *Centro storico e centro antico*, in *Napoli nobilissima IV*, Napoli: Arte tipografica Napoli.
76. PARIS L. (2012), *Fotogrammetria e/o fotomodellazione*, in *Geometria descrittiva e rappresentazione digitale. Memoria e innovazione*, vol. 2, Roma: Edizioni Kappa, pp. 55-62.
77. PARRA G., BINCI M., MAGAGNINI M., ZANNONI M. (2005), *Il disegno dell'architettura*, Bologna: Pitagora.
78. PELLICCIO A., SACCUCCI M., GRANDE E. (2017), *HT_BIM: Parametric modelling for the assessment of risk in historic centers*, vol. 10, L'Aquila: DISEGNARECON.

79. PELLICCIO A., NOWAK M. Ż., SACCUCCI M. (2018), *Una mappa per la consapevolezza: il GIS per il recupero dei siti industriali dismessi*, in *Storia e iconografia dell'architettura, delle città e dei siti europei*, pp. 1233-1243.
80. PELLICCIO A., SACCUCCI M. (2020), *UAV & Aerial photogrammetry technology for cultural heritage survey. From the urban to architectural scale*, in PARRINELLO S., BARBA S., DELL'AMICO A., DI FILIPPO A. (a cura di), *Drones. Systems of Information on Cultural Heritage for a spatial and social investigation*, Pavia: Pavia University Press, pp. 166-173.
81. PELLICCIO A., SACCUCCI M., MIELE V. (2023), *Deformations of the Fortress Towers Analyzed by the SfM Survey*, in *Nexus Network Journal* 25, suppl. 1, pp. 39-46.
82. PETRINI V. (1993), *Rischio sismico di edifici pubblici, Parte I: Aspetti metodologici*, in *Atti del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) e del Gruppo Nazionale Difesa Terremoti (GNDT)*, Roma: Tipografia Moderna.
83. REMONDINO F., EL-HAKIM S. (2006), *Image-based 3D modelling: a review*, in *The photogrammetric record*, Londra: Wiley-Blackwell, vol. 21 no. 115, pp. 269-291.
84. SACCUCCI M., PELLICCIO A. (2018, October), *Integrated BIM-GIS System for the enhancement of urban heritage*, in *2018 Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (MetroArchaeo)*, IEEE, pp. 222-226.
85. SACCUCCI M., CIMA V., GRANDE E., IMBIMBO M., PELLICCIO A. (2019), *Valutazione della vulnerabilità sismica degli aggregati in muratura: il caso di Borgo San Rocco a Sora (Italia)*, in *Atti del XVIII Convegno Nazionale ANIDIS 'L'ingegneria Sismica in Italia'*, Ascoli Piceno: Pisa University Press, 15-19 settembre 2019, pp. 152-162.
86. SACCUCCI M., CIMA V., GRANDE E., IMBIMBO M., PELLICCIO A. (2021), *The Knowledge Process in the Seismic Assessment of Masonry Building Aggregates – An Italian Case Study*, in *Critical Thinking in the Sustainable Rehabilitation and Risk Management of the Built Environment: CRIT-RE-BUILT. Proceedings of the International Conference*, Iași, Romania, November 7-9, 2019, Springer International Publishing, pp. 330-347.
87. SACCUCCI M., MIELE V. (2022), *WebGIS for enhancement of post-industrial heritage: an italian case study*. In *International Multiconference Design - Research - Education in Architecture. DREAMSilesia*, Gliwice, Polonia: Politechnika Śląska (Silesian University of Technology), 22nd-23rd April 2022, Book of abstracts, Politechnika Śląska, pp. 91-92.
88. SACCUCCI M., PELLICCIO A. (2022), *3D multilevel approach for the seismic risk of historic centers*, in *Journal of Physics, Conference Series*, Bristol (UK): IOP Publishing, vol. 2204, no. 1.

89. SACCUCCI M., MIELE V., PELLICCIO A. (2022), *UAVs for the analysis of geometrical deformation of fortresses and castles. The case study of Sora Castle*, in PARRINELLO S., BARBA S., DELL'AMICO A., DI FILIPPO A. (a cura di), *D-SITE, Drones-Systems of Information on Cultural Heritage for a spatial and social investigation*, Pavia: Pavia University Press, vol. 2, pp. 58-65.
90. SAMONÀ A. (1969), *Centri storici: architetti contro urbanisti*, Bologna: Il Mulino, 18(6), pp. 630-634.
91. SPALLONE R., PIANO A., SIMONA P. (2016), *BIM e beni architettonici: analisi e rappresentazione multiscalare e multidimensionale di un insediamento storico. Il caso studio di Montemagno, Borgo Nuovo piemontese*. L'Aquila: DISEGNARECON.
92. TRIZIO I., MARRA A., SAVINI F., GIALLONARDO M., CORDISCO A., SACCUCCI M. (2024), *Misura o dismisura? Considerazioni e confronti tra NeRF e fotogrammetria digitale / Measure or out of measure? Considerations and comparisons between NeRF and digital photogrammetry*, in BERGAMO F., CALANDRIELLO A., CIAMMAICHELLA M., FRISO I., GAY F., LIVA G., MONTELEONE C. (a cura di), *Misura / Dismisura. Atti del 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione / Measure / Out of Measure. Transitions. Proceedings of the 45th International Conference of Representation Disciplines Teachers*, Milano: Franco Angeli, pp. 2113-2132.
93. TUZII F. (1727), *Memorie storiche massimamente sacre della città di Sora*, Roma: Antonio de' Rossi, ristampa anastatica: Kessinger Publishing, LLC.
94. VALLUZZI M. R., MUNARI M., MODENA C., CARDANI G., BINDA L. (2007), *Analisi di vulnerabilità sismica degli aggregati storici: il caso di Castelluccio di Norcia*, in *Atti del XII Congresso Nazionale ANIDIS 'L'Ingegneria Sismica in Italia'*, Pisa: Pisa University Press, 10-14 giugno 2007, pp. 10-14.
95. VIANELLO D. (1988), *Metodologia di analisi e progetto per i centri storici minori*, ISIG.
96. VINADIO P. P. B., Y BALLARÀ S. C., PARIS T. (1983), *La Valle del Liri: gli insediamenti storici della media Valle del Liri e del Sacco*, Roma: Officina.
97. ZUCCARO G. (2024), *Inventario e vulnerabilità del patrimonio edilizio residenziale del territorio nazionale, mappe di rischio e perdite socio-economiche*, in: SAVE - Strumenti aggiornati per la vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio e dei sistemi urbani, Napoli: Università degli Studi di Napoli "Federico II" – Centro di Ricerche LUPT.
98. ZUCCARO G., DOLCE M., DE GREGORIO D., SPERANZA E., MORONI C. (2015), *La scheda CARTIS per la caratterizzazione tipologico-strutturale dei comparti urbani costituiti da edifici ordinari. Valutazione dell'esposizione in analisi di rischio sismico*, in *Proceedings of the GNGTS*, Roma: Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).

99. ZUCCARO G., DOLCE M., DE GREGORIO D., SPERANZA E., MORONI C. (2014), *Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello per la caratterizzazione tipologico-strutturale dei comparti urbani costituiti da edifici ordinari – CARTIS 2014*, Progetto Reluis 2014-2016, Unità di ricerca Università degli Studi di Napoli Federico II, Dipartimento della Protezione Civile, Napoli.

SITOGRAFIA WEBLIOGRAPHY

1. <https://agriculture.ec.europa.eu/>
2. <https://terremoti.ingv.it/event/1895389>
3. <https://terremoti.ingv.it/event/772691>
4. <https://terremoti.ingv.it/it/event/7079501>
5. <https://www.istat.it/>
6. <https://www.dea-digitaleaccessibile.com/>
7. <https://emidius.mi.ingv.it/GNDT2/>
8. <https://www.resistoproject.com/>
9. https://www.inforestauro.org/wptest/wp-content/uploads/2012/02/biblio_norma_06.pdf
10. <https://storing.ingv.it/cfti/cfti5/quake.php?42004IT>
11. <https://storing.ingv.it/cfti/cfti5/quake.php?B0413IT>
12. <https://storing.ingv.it/cfti/cfti5/quake.php?24751IT>
13. <https://www.ingvterremoti.com>
14. <https://storing.ingv.it/cfti/cfti5/quake.php?42010IT>
15. <https://storing.ingv.it/cfti/cfti5/quake.php?42013IT>

