

MICHe project

Rischio sismico centro storico di
Firenze

Responsabile scientifico: Mario De Stefano

Collaboratori: Marco Tanganelli

Antonino Marra

Maria Teresa Cristofaro



Sommario

Introduzione	2
Nascita di Florentia	4
Le cerchia murarie	7
Il sottosuolo.....	9
I terremoti storici a Firenze.....	11
Caso studio: Rischio sismico centro storico di Firenze	14
Periodo fondamentale e risonanza.....	20
Indice di danno e indice di rischio.....	24
Perdita Annuale Media attesa.....	28
Stima dei costi.....	34
Bibliografia	39



Introduzione

Nel corso degli ultimi 50 anni, l'Italia è stata interessata da numerosi terremoti, ultima in ordine temporale, la sequenza sismica che ha colpito il Centro Italia dall'agosto 2016 al gennaio 2017. La distruzione dei paesi di Amatrice, Accumoli e Arquata del Tronto con un grave bilancio in termini di perdita di vite umane, pari al 7% della popolazione residente (il 9% se si considera la sola Amatrice), è il più pesante se confrontato ai recenti terremoti che hanno colpito l'Aquila nel 2009 e l'Emilia Romagna nel 2013, ed evidenzia, come ad oggi, gli sforzi compiuti dalla collettività per fronteggiare tale calamità siano del tutto insufficienti. Prevenzione e mitigazione del rischio sismico, uniche armi di difesa possibili, oggi come ieri, sono bisogni impellenti del nostro Paese.

La definizione di politiche di prevenzione o di pianificazione dell'emergenza, si basa sull'analisi degli scenari di rischio (o danno), strumenti di cui si serve la Protezione Civile per redigere piani d'intervento atti a fronteggiare e gestire eventuali calamità. Definiti in base all'esposizione, la vulnerabilità del patrimonio edilizio e la pericolosità dell'area in esame, gli scenari di rischio, sono mezzi di previsione del possibile danneggiamento di un centro urbano e delle possibili conseguenze derivanti dal coinvolgimento della popolazione. Questi forniscono importanti informazioni riguardanti le dimensioni e la localizzazione delle aree a rischio, la funzionalità delle reti dei trasporti, lo stato delle vie di comunicazione e di distribuzione, le perdite attese in termini di vite umane, i possibili danni al patrimonio edilizio ed il corrispondente danno economico [1].

La città di Firenze, unica al mondo per l'eccezionale patrimonio storico architettonico, si presenta come un'area fortemente urbanizzata e industrializzata estesa nella pianura alluvionale attraversata dal fiume Arno e sui rilievi collinari che la circondano. L'area è



notoriamente sede di una moderata attività tellurica con sismi di magnitudo intorno a 5 ML, nel corso dei secoli le scosse più rilevanti che hanno colpito la città hanno avuto epicentro nel Mugello (nel 1542 e 1919), Impruneta (1453 e 1895) e Valdarno (1770) [2]. La sismologia storica è la principale fonte d'informazione per la caratterizzazione della pericolosità sismica di un'area, la stima dell'intensità di un evento del passato richiede un lungo percorso di analisi delle fonti storiche, cronache scritte, registri, diari e lapidi negli edifici di culto.

Le fonti storiche, indicano gli eventi del 28 settembre 1453 e quello del 18 maggio 1895, come i più rovinosi che abbiano mai colpito la città di Firenze, entrambi di VII-VIII grado della scala MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg) [3]. L'analisi di iconografie e documentazione scritta, riguardante ai danni riportati dall'edificato (lesioni al patrimonio monumentale, sconessioni murarie e danneggiamento diffuso degli elementi non strutturali), ha permesso di caratterizzare quello che viene chiamato "terremoto di progetto", cioè l'ipotetico evento sismico massimo più probabile per una data area.

Rimane, ancora, da definire un quadro esaustivo della vulnerabilità sismica dell'edificato totale fiorentino, composto da circa 31000 unità secondo l'ultimo censimento ISTAT del 2011. E' possibile distinguere tre principali fasi evolutive, una precedente al 1895, una compresa fra il 1895 e il 1982 ante e post 1981. Solo il 30% dell'edificato esistente ha subito il collaudo del "grande terremoto" del 1895, ovvero il centro storico e le aree di espansione ottocentesche, un evento di intensità ripetibile per la pericolosità sismica che caratterizza l'area. A fronte di interventi più o meno invasivi di costruzione o ristrutturazione, successivamente eseguiti, non è chiaro quale possa oggi essere la risposta di queste strutture a un sisma simile a quello già subito. La seconda fase, individua il patrimonio edilizio post 1895 e antecedente al 1982, anno di classificazione come zona sismica del comune. Pari al 67% del totale, è in gran parte frutto



delle ricostruzioni post belliche e del boom edilizio degli anni sessanta, notoriamente “fragile”, è un edificato costruito in assenza di alcuna normativa antisismica, affetto da carenze strutturali e degrado per vetustà. Alla luce di queste costatazioni, non possiamo escludere che la Firenze odierna, possa essere più esposta e vulnerabile di quella ottocentesca, a fronte di un nuovo evento sismico paragonabile a quello del 1895 [4].

Risulta quindi di fondamentale importanza, il reperimento e la gestione di enormi moli di dati di diversa natura, provenienza e destinazione, facilitata oggi dall'utilizzo di database Gis [5]. Un sistema che rende possibile la gestione di ingenti quantità di informazioni, infinite correlazioni e acquisizioni di ulteriori conoscenze graficizzate su mappe tematiche georeferenziate.

L'elaborazione di uno scenario di rischio per la città di Firenze, necessita della conoscenza della vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio, la definizione di una Mappa della Vulnerabilità dell'edificato fiorentino, oggetto del progetto, è quindi una base imprescindibile per una futura ed efficiente Pianificazione delle Risorse destinate ad opere di adeguamento e miglioramento sismico con importanti ricadute in ambito Urbanistico, Sociale e di Protezione Civile [6].

Nascita di Florentia

Florentia fu fondata ne 59 a.C. per volere di Cesare, quando, con la Lex Julia agraria si sono voluti affidare appezzamenti di terreno da coltivare a coloro che avevano combattuto nelle guerre di Roma. Il primo insediamento “Castrum” realizzato secondo la tradizione, tramite un processo di individuazione del luogo ritenuto più opportuno fu suddiviso in una maglia ortogonale con i decumani paralleli alla via pedemontana. Il decumanus maximus è

individuabile nell'asse dato dalle attuali via della Spada e via del Palazzuolo mentre il cardo maximus nelle attuali vie Ginori, San Gallo e Faentina (Fig. 1).



FIGURA 1: PIANTA DELLA CITTÀ' DI FIRENZE CON INDICATE IL DECUMANO ED IL CARDO.

Il centro del Castrum, considerato un luogo sacro, corrisponde all'attuale Piazza della Repubblica. La colonia comprendeva in totale nove cardì e sette decumani che suddividevano la città in circa 50 insulae, all'interno delle quali vi erano le domus residenziali. Il Castrum era poi perimetrato da mura realizzate in laterizio i cui lati erano difesi da torri circolari di diametro dai 5 ai 7 metri. Al centro dei lati, erano presenti 4 porte, oltre ad alcuni passaggi minori presso gli angoli delle mura, per l'ingresso nella città

Il Castrum appena descritto si mantenne più o meno inalterato per circa quattro secoli. Quattro erano le porte di accesso (dai nomi "medioevali") ora non più visibili: a ovest la Porta di San Pancrazio o Brancazio; a est la Porta San Piero che si trovava all'incrocio di via del Proconsole e Via del Corso; a nord la Porta Aquilonia o anche Porta Contra Aquilonem; a sud la Por Santa

Maria, che conduce ad una delle strade più antiche della città, risalente all'epoca romana come prolungamento del cardo al di fuori della prima cinta muraria [7].



(a)



(b)

FIGURA 2: PIANTA DELLA CITTA' DI FIRENZE. 1594-1624 (A) – 1731 (B).



(a)



(b)

FIGURA 3: PIANTA DELLA CITTA' DI FIRENZE. 1783 (A) – 1837 (B).



(a)



(b)

FIGURA 4: PIANTA DELLA CITTA' DI FIRENZE. 1843 (A) – 1865-1870 (B).

Le cerchia murarie

Sei sono le cerchie murarie che si sono succedute nella città a partire dalla sua fondazione (Fig. 5). La prima coincide con il Castrum, per un'area di circa 20 ettari. Il corso del fiume Mugnone, a causa della costruzione delle mura, assume la forma di fossato attorno alla città e portato a sfociare nell'Arno nei pressi di Ponte Santa Trinità [8].

Nel 539 Firenze viene occupata dai Bizantini e tra il 541 ed il 544 viene realizzata una seconda cerchia muraria "cerchia bizantina" di dimensioni ridotte rispetto al Castrum, seguendo una modalità tipicamente alto-medioevale.

Alla metà del IX secolo fu realizzata la "cerchia carolingia" la quale si spinge a sud fino all'Arno, ma lasciando fuori di essa il Battistero e la chiesa di San Salvatore (poi Santa Reparata).

La "cerchia antica", epiteto con cui Dante (Paradiso, XV, 97) si riferisce alla cerchia matildina fu costruita nel 1078 per volere della Contessa Toscana Matilde di Canossa. Il tracciato



ricalcava quello della prima cerchia, ad eccezione di una appendice nella zona degli Uffizi. Con questo intervento il Mugnone viene nuovamente deviato dandogli una leggera smussatura, nei pressi del Canto dei Carneseccchi, per consentire una maggiore deflusso delle acque fino all'Arno.

La prima cerchia comunale, quinta, realizzata nel 1172, fu resa necessaria dall'espansione dei borghi al di fuori delle mura, lungo le più importanti vie di comunicazione in uscita dalle porte della città. Le sue dimensioni erano cinque volte rispetto alla prima, ma nel suo interno vi erano molte aree inedificate. Il Mugnone viene deviato da San Marco a sud lungo l'attuale via San Gallo dove era presente un mulino. Nella zona Oltrarno non erano presenti vere e proprie mura, ma il confine era delimitato dalle abitazioni dei borghi che qui erano sorti.

Nel 1284, fu eretta la seconda cerchia comunale, sesta cerchia, per inglobare ancora una volta i borghi nati fuori le mura, attorno ai conventi e alle chiese sorte lungo le direttrici di maggiore sviluppo oltre che per far fronte al forte inurbamento all'interno delle precedenti mura. Eventi bellici hanno più volte interrotto la costruzione fino al 1333 quando le mura furono terminate. Il corso del fiume Mugnone subisce nuovamente delle modifiche per adeguarsi al nuovo assetto della città, giungendo fino fuori le mura lungo l'attuale via Spartaco Lavagnini [8].

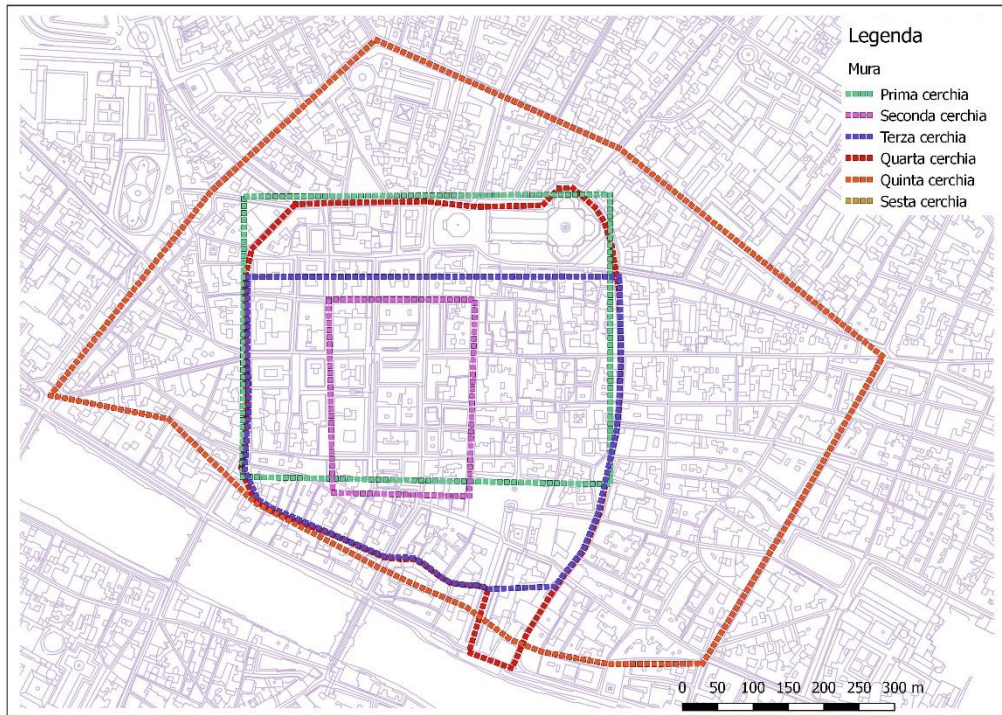


FIGURA 5: PIANTA DELLA CITTÀ DI FIRENZE CON LE 6 CERCHIA MURARIE.

Il sottosuolo

Il comune di Firenze nel corso degli ultimi anni ha ritenuto necessaria una conoscenza più dettagliata e puntuale della pericolosità sismica del territorio. In collaborazione con in DST (Dipartimento di Scienze della Terra-UNIFI) è stata elaborata la “Carta del Fattore di Amplificazione Calcolato” (Fig. 6) variante al Piano Strutturale del 2010, che ha portato ad un elevato livello di conoscenza dell’assetto geologico del sottosuolo, una base di partenza oggi imprescindibile ai fini della pianificazione territoriale, urbanistica e di Protezione Civile. Per i vari livelli litostratigrafici di riempimento del bacino di Firenze-Pistoia sono state definite, su prove sperimentali down-hole, le velocità sismiche di ancoraggio dei vari livelli litologici e su questa base è stato calcolato l’FA (fattore di amplificazione) ed il periodo di oscillazione del

suolo (Fig. 7) per i circa 2.000 sondaggi disponibili nell'area fiorentina. Da questi dati puntuali, con tecniche di interpolazione statistica, è stata estrapolata la risposta al suolo per l'intera area urbana [4, 5].

Uncoformity-Bounded Stratigraphic Units (UBSU): Dr-a Depositi recenti coesivi; Dr-b depositi recenti granulari; Da-a Depositi antichi coesivi; Da-b depositi antichi granulari; FPT-a Sintema di Firenze-Pistoia depositi coesivi; FPT-b Sintema di Firenze-Pistoia depositi granulari; FPT-c Sintema di Firenze-Pistoia Argille Turchine.

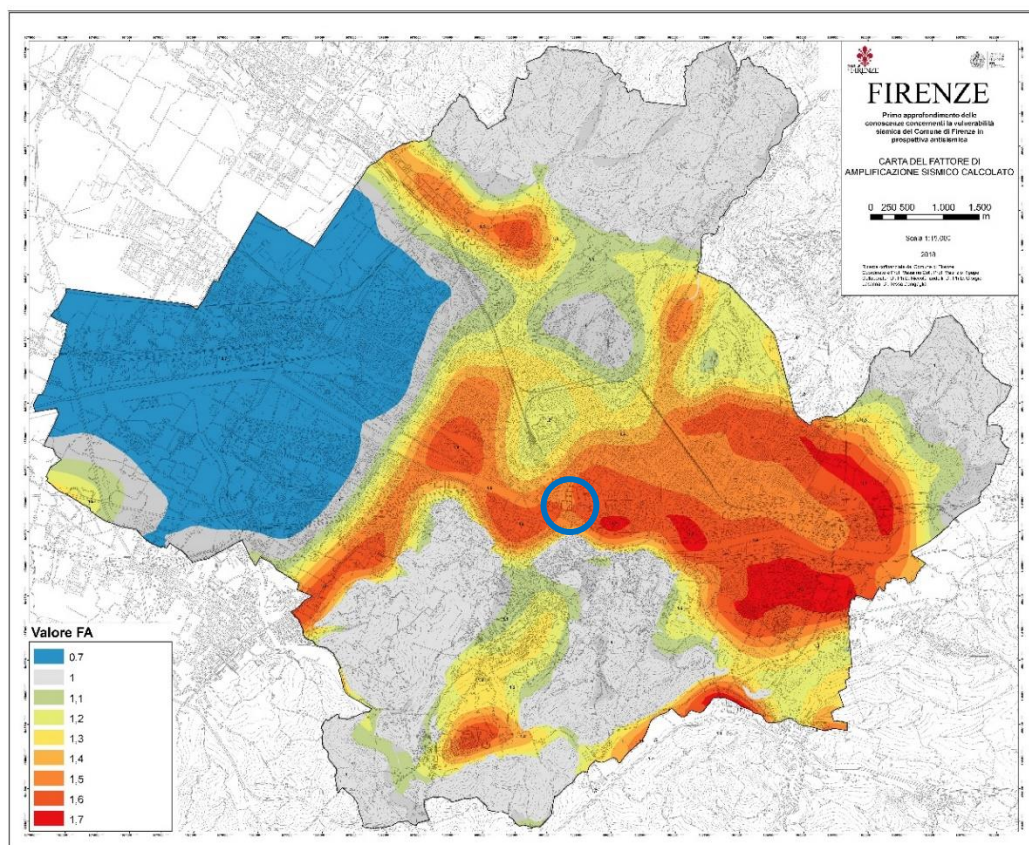


FIGURA 6: CARTA DEL FATTORE DI AMPLIFICAZIONE.

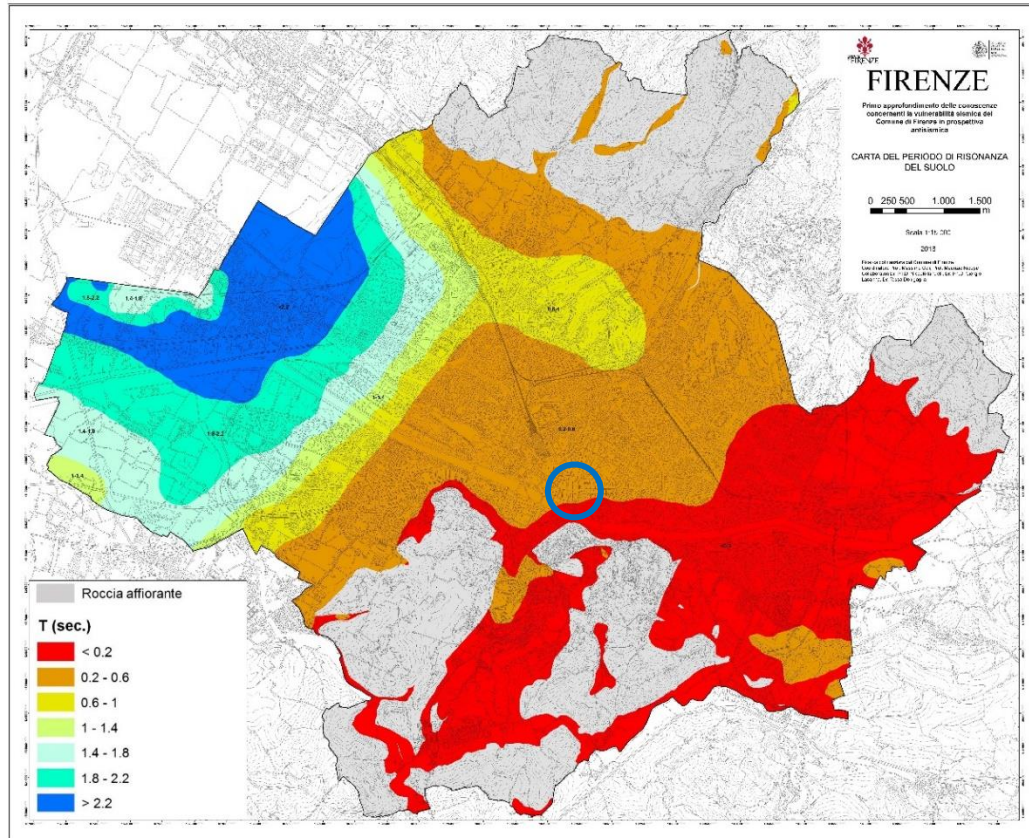


FIGURA 7: CARTA DEL PERIODO FONDAMENTALE DEL SUOLO.

I terremoti storici a Firenze

Dal XII secolo, oltre 140 (Fig. 8) eventi sismici si sono rilevati nel territorio fiorentino con un'intensità superiore a V sulla scala Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS) [2]. Gli eventi più importanti si sono avuti in Mugello con risentimenti nell'area fiorentina fino a I_{max} VII-VIII grado della scala MCS. Numerosi terremoti di piccola intensità sono stati registrati anche nella pianura alluvionale di Firenze-Pistoia. Le soluzioni focali disponibili evidenziano nell'area appenninica intorno a Firenze un'attività sismica legata a meccanismi principalmente estensionali ed in parte di tipo trascorrente. Dallo studio dell'attività sismica storica, anche la

città di Firenze risulta epicentro di importanti terremoti, con magnitudo stimata sempre inferiore a 5 ML.

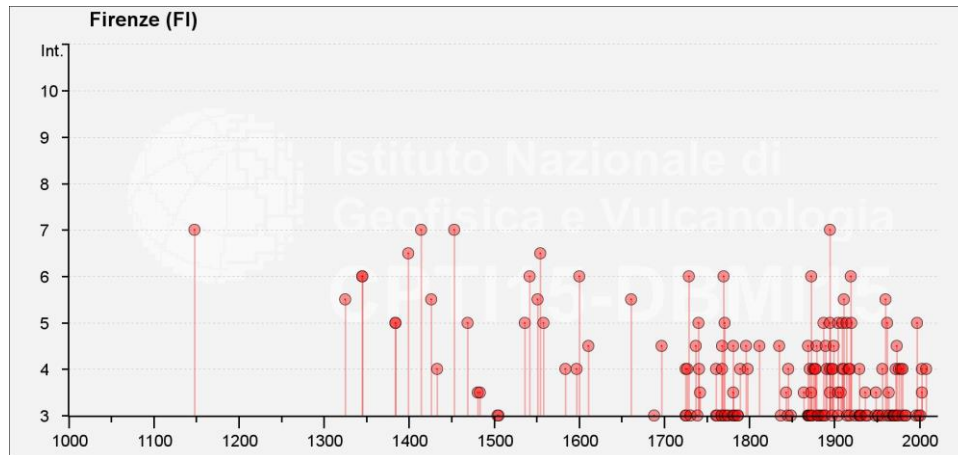


FIGURA 8: DISTRIBUZIONE ED INTENSITÀ DEI TERREMOTI STORICI A FIRENZE E AREE LIMITROFE (DA DBM115).

Con la Delibera GRT n. 421 del 26/05/2014 Firenze ricade in zona 3 nella classificazione sismica regionale, ma poiché contiene un patrimonio artistico e culturale tra i più importanti non solo d'Italia, ma del mondo, il rischio legato a possibili effetti distruttivi a causa del sisma diviene elevato.

Due sono i principali terremoti che hanno colpito Firenze nel corso dei secoli. Il terremoto del 28 settembre 1453, grado 7 della scala MCS il cui periodo sismico perdurò per circa un mese. Gli edifici non subirono crolli, ma alcuni danni si ebbero ai monumenti, in particolar modo a Santa Reparata (oggi Duomo) in cui crollarono alcune pietre dalle volte e al Convento di San Marco dove si ebbero lesioni sui muri e sulle volte della biblioteca.

Dalle carte che riportano i danni subiti dalla città di Firenze in occasione del terremoto del 1895 e 1919 [9] si evince che le zone di maggior danno si concentrarono nei quartieri delle Cure, di



San Jacopino, di San Salvi, di San Frediano e di San Niccolò, in particolare, per quanto riguarda la zona interna alle mura, le zone maggiormente danneggiate sono risultate essere Santa Croce, San Gallo e Piazza della Libertà.

In particolare il terremoto del 18 maggio 1895 è ricordato come il 'Grande terremoto di Firenze'. I danni furono molto estesi, ma complessivamente non gravissimi; infatti non ci furono grandi distruzioni, ma rimasero danneggiati buona parte dei monumenti, chiese e palazzi storici. Piccoli crolli interessarono Palazzo Pitti e la Galleria degli Uffizi, lesioni rilevanti si ebbero nel Palazzo Medici Riccardi, nel Palazzo Strozzi, nelle volte dei porticati di Piazza SS. Annunziata e di Piazza Cavour (oggi Piazza della Libertà). Al Museo Nazionale del Bargello subirono gravi danni la collezione di maioliche dei Della Robbia. Gravi danni vi furono al Museo di San Marco, nell'omonima chiesa e convento già interessati dal sisma del 1453, con cadute di cornicioni e lesioni alle volte ed agli archi, soprattutto nel refettorio grande e nella biblioteca. Anche la Cattedrale fu interessata dalla rottura di una catena della navata centrale.

La mappa realizzata da Vannucci et al. [9] riporta la distribuzione degli effetti di danno causati dal terremoto: i colori più scuri (dall'arancione al viola) indicano gli effetti più gravi, il giallo quelli minori (Fig. 9). Nel complesso gli effetti a Firenze furono pari al grado 7 della scala MCS si ebbero al Galluzzo.

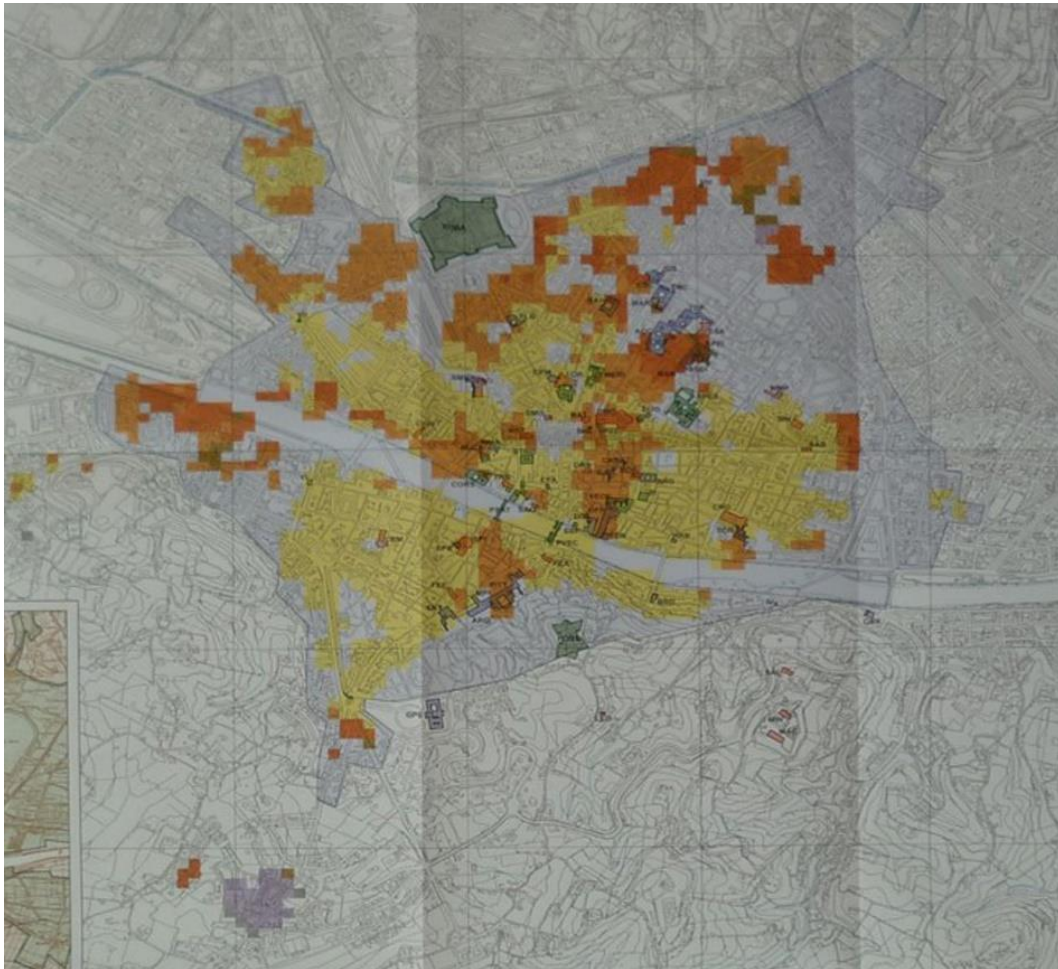


FIGURA 9: MAPPA REALIZZATA DA VANNUCCI ET AL. 2004 RELATIVA AL TERREMOTO DI FIRENZE 1895.

Caso studio: Rischio sismico centro storico di Firenze

L'obiettivo della ricerca è di fornire una struttura nella quale inserire tutte le informazioni mediante un sistema informativo territoriale. Nello specifico è stato adottato QGis [10] il quale permette di far confluire dati provenienti da diverse fonti in un unico progetto di analisi territoriale.

L'area oggetto di studio ricade all'interno della quarta cerchia muraria "cerchia antica". Gli edifici di culto ed i campanili, per un totale di 25 manufatti, compresi all'interno di tale area sono evidenziati in giallo (Fig. 10).

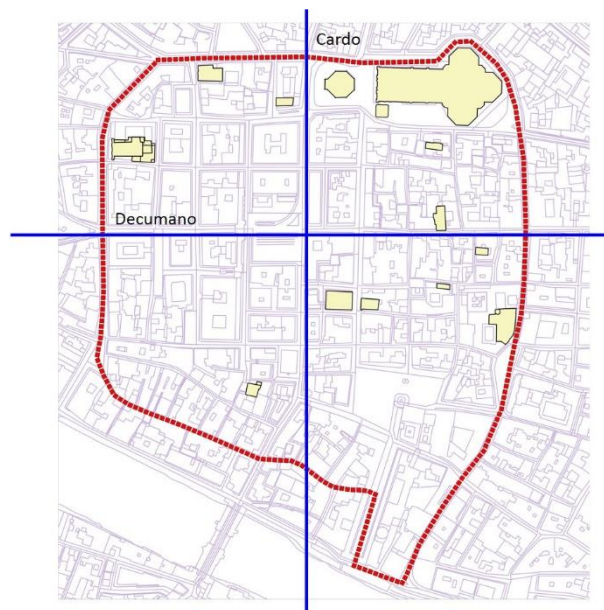


FIGURA 10: PERIMETRAZIONE DELL'AREA OGGETTO DI STUDIO.

Tale area è stata suddivisa in tre Zone riferite a tre periodi significativi dal punto di vista dello sviluppo del tessuto urbano (Fig 11):

Zona 1: edifici antecedenti il periodo di Firenze Capitale (74%).

Zona 2: edifici ricadenti nell'area ricostruita a seguito della demolizione del Ghetto (19%).

Zona 3: edifici in c.a. ricostruiti dopo il bombardamento dell'agosto 1944 (3%).

Gli edifici di culto ed i campanili rappresentano il 4% del costruito.

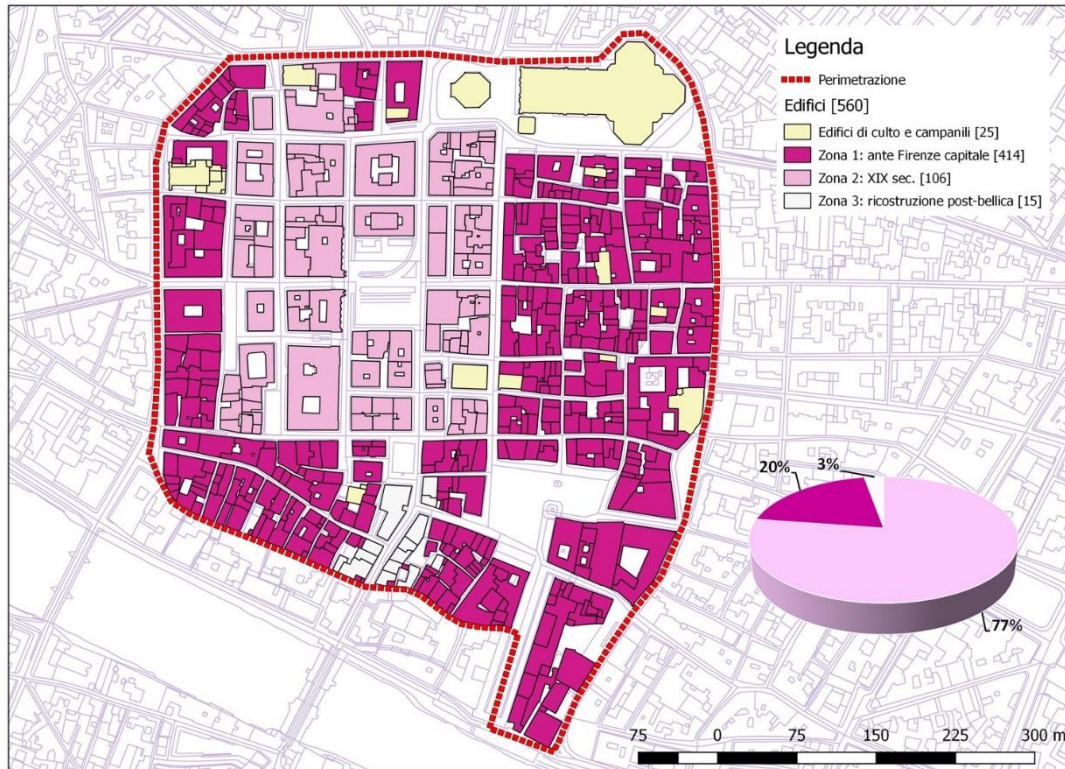


FIGURA 11: MAPPA DELLA PERIODIZZAZIONE.



(a)



(b)

FIGURA 12: BOMBARDAMENTO PONTE SANTA TRINITA (A) – BOMBARDAMENTO NELL'AREA DI PONTE VECCHIO (B).



Ogni manufatto è stato identificato e catalogato (INPUT) mediante una serie di attributi:

- ID: identificazione del manufatto
- Is: isolato di appartenenza
- F: numero del foglio catastale
- P: numero della particella catastale
- NP: numero dei piani
- h_t: altezza base dell'edificio
- h_g: altezza in gronda dell'edificio
- H: altezza totale edificio
- T: tipologia costruttiva
- E: età di realizzazione
- FA: fattore di amplificazione
- T_{suolo}: periodo fondamentale del suolo

In totale sono stati rilevati 560 edifici. I dati suddetti, alcuni dei quali recepiti dalla Carta Tecnica Regionale CTR, banca dati del Comune e da dati ISTAT, sono stati elaborati producendo le relative carte tematiche ed analisi statistiche.

In Fig. 13 si riporta la vista 3D dell'area analizzata.



(a)



(b)

FIGURA 13: VISTA 3D DELL'AREA ANALIZZATA.

Identificando gli edifici per il numero di piani, secondo quanto indicato in [6], la suddivisione è avvenuta secondo il seguente criterio:

1. Edifici ad 1 e 2 piani
2. Edifici a 3, 4 e 5 piani
3. Edifici oltre i 6 piani

Dai dati desunti si evidenzia che ben il 76% di edifici rientra nel range tra 3 e 5 piani, l'8% di edifici presenta massimo 2 piani mentre il 16% supera i 6 piani, per un totale di 535 edifici avendo escluso gli edifici di culto ed i campanili (Fig. 14).

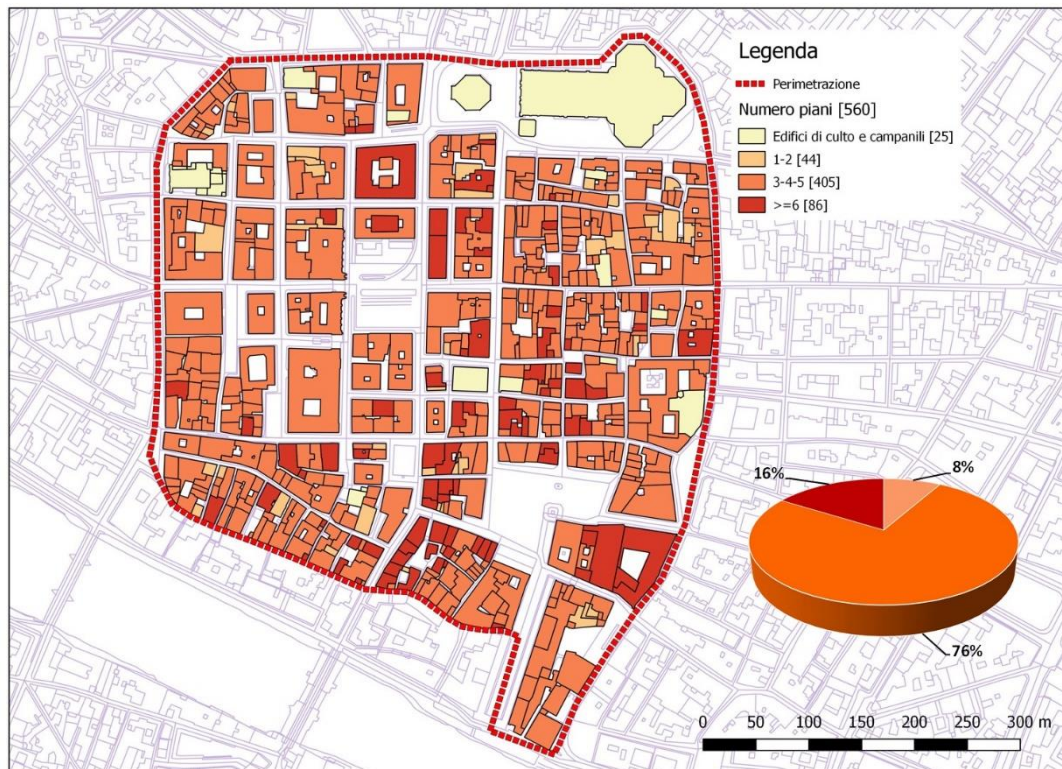


FIGURA 14: MAPPA DELLA SUDDIVISIONE DEGLI EDIFICI PER NUMERO DI PIANI.

Dalla classificazione degli edifici per tipologia costruttiva si evince come l'area sia caratterizzata prevalentemente da edifici in muratura (97%), eccezione fatta per quelli in prossimità di Ponte Vecchio che, come precedentemente detto, risultano essere in c.a. (3%) poiché distrutti e ricostruiti dopo i bombardamenti tedeschi (Fig. 15).

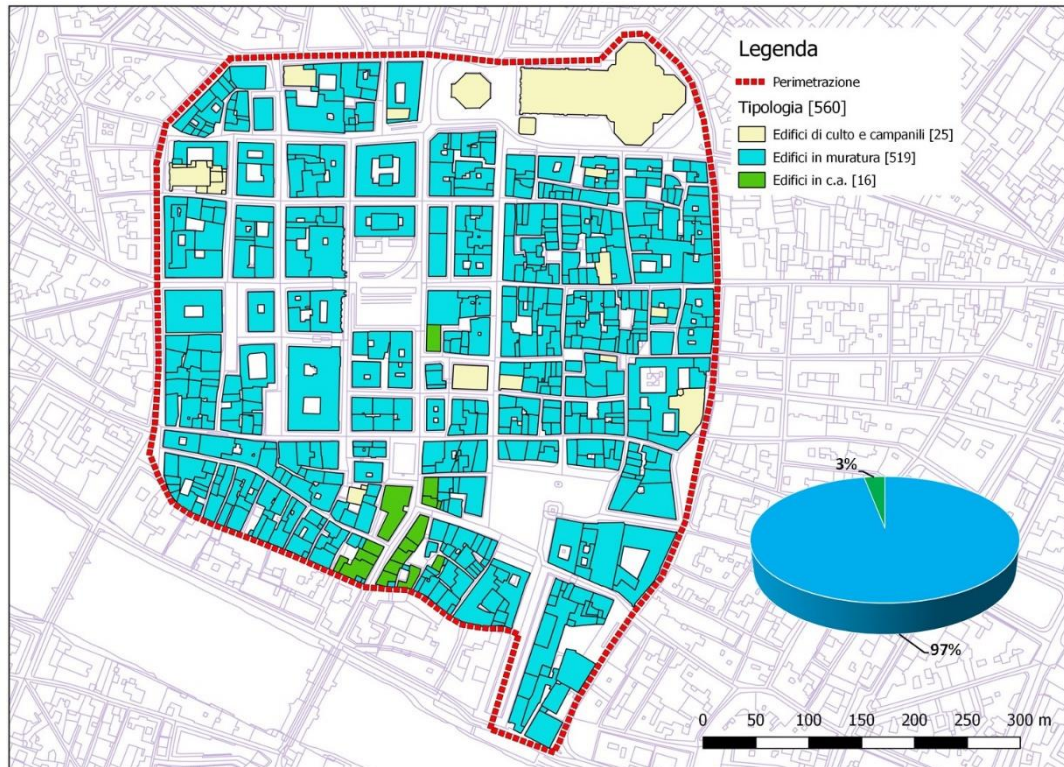


FIGURA 15: MAPPA DELLA SUDDIVISIONE DEGLI EDIFICI PER TIPOLOGIA.

Periodo fondamentale e risonanza

Seguendo quanto prescritto dalle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC08) [11] e formulazioni elaborate all'interno del Progetto Sismed [12, 5, 4] per l'edificato fiorentino, si è proceduto a calcolare il periodo fondamentale degli edifici. Le formulazioni adottate sono riportate in Tab. 1.

TABELLA 1: FORMULAZIONI PER LA DETERMINAZIONE DEL PERIODO PROPRIO DELL'EDIFICIO.

Tipologia costruttiva	NTC2008	Progetto Sismed
Muratura	$T = 0.05 * H^{3/4}$	$T = 0.0162 * H$
Cemento armato	$T = 0.075 * H^{3/4}$	$T = 0.019 * H$

Premesso che gli edifici di culto e campanili sono stati esclusi dalla computazione, le elaborazioni relative al periodo fondamentale, secondo le due procedure, hanno evidenziato una sostanziale eterogeneità (Fig. 16)

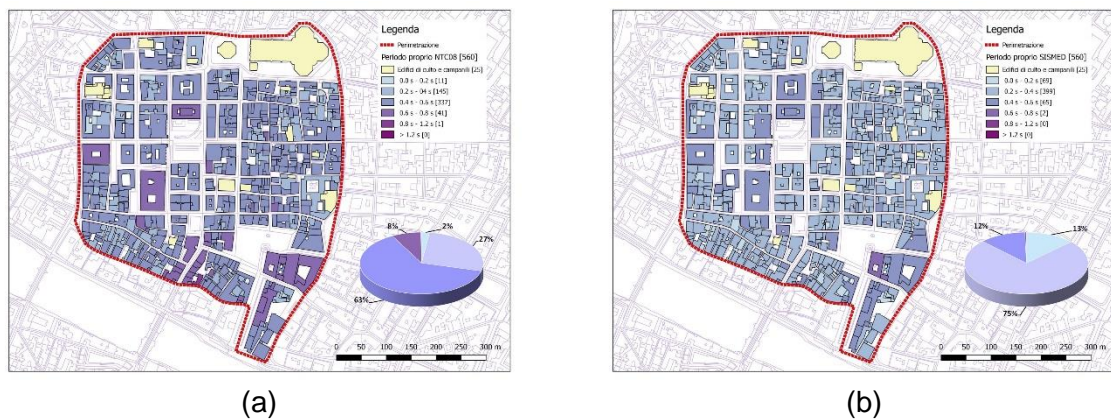


FIGURA 16: MAPPA DEL PERIODO FONDAMENTALE DELL'EDIFICIO. NTC08 (A) – PROGETTO SISMED (B).

Con le formulazioni delle NTC08 si sono riscontrati circa il 63% di edifici il cui periodo fondamentale ricade tra 0.4 sec. e 0.6 sec., circa il 27% con 0.2 sec.<T<0.4 sec. e l' 8% con un periodo compreso tra 0.6 sec. e 0.8 sec. Diversamente è quanto accade con le formulazioni elaborate con il Progetto Sismed. In particolare si evidenzia una percentualità elevata di edifici ricadenti nell'intervallo 0.2÷0.4 sec. 75%), tra il 12% ed il 13% di edifici ricadono rispettivamente nei range 0.4÷0.6 sec. e 0.0÷0.2 sec. (Tab. 2).

TABELLA 2: PERIODO FONDAMENTALE DELLA STRUTTURA, IN PERCENTUALE, CON LE DUE PROCEDURE.

T [sec]	NTC2008 [%]	Sismed [%]
0.0-0.2	2	13
0.2-0.4	27	75
0.4-0.6	63	12
0.6-0.8	8	0
0.8-1.2	0	0
> 1.2	0	0

I grafici riportati di seguito (Fig. 17) mostrano l'andamento del periodo fondamentale degli edifici in relazione all'altezza ed alla tipologia costruttiva, precisando che nessuno di essi supera i 40 m di altezza.

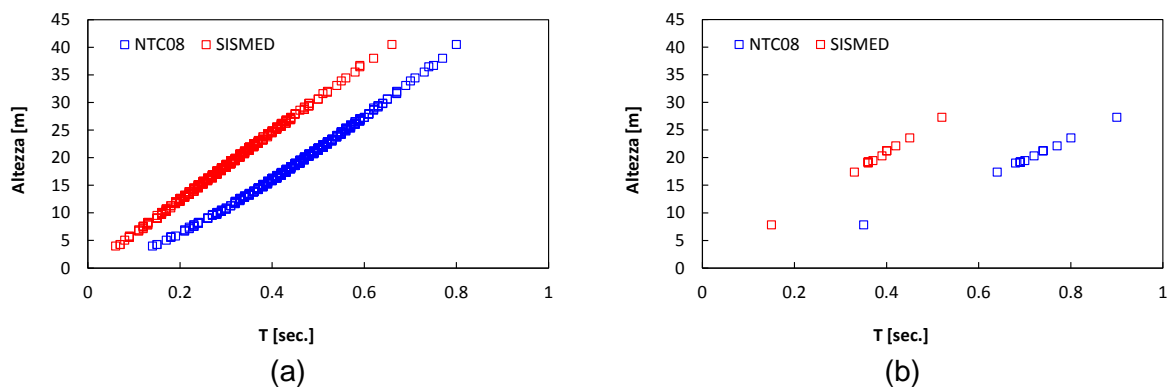


FIGURA 17: PERIODO FONDAMENTALE DEGLI EDIFICI. MURATURA (A) – C.A. (B).

Dal periodo fondamentale del suolo e quello degli edifici è stata prodotta la mappa dell'indice di risonanza (Fig. 18 e 19) così valutato [13]:

$$I_R = T_e/T_s \quad (1)$$

dove T_e è il periodo proprio dell'edificio e T_s è il periodo proprio del suolo.

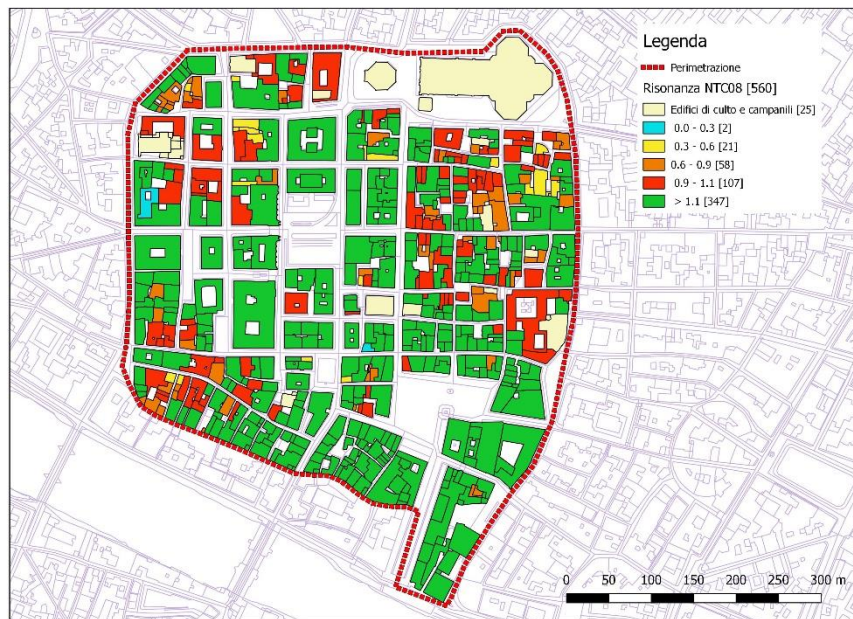


FIGURA 18: MAPPA DELL'INDICE DI RISONANZA - NTC08.

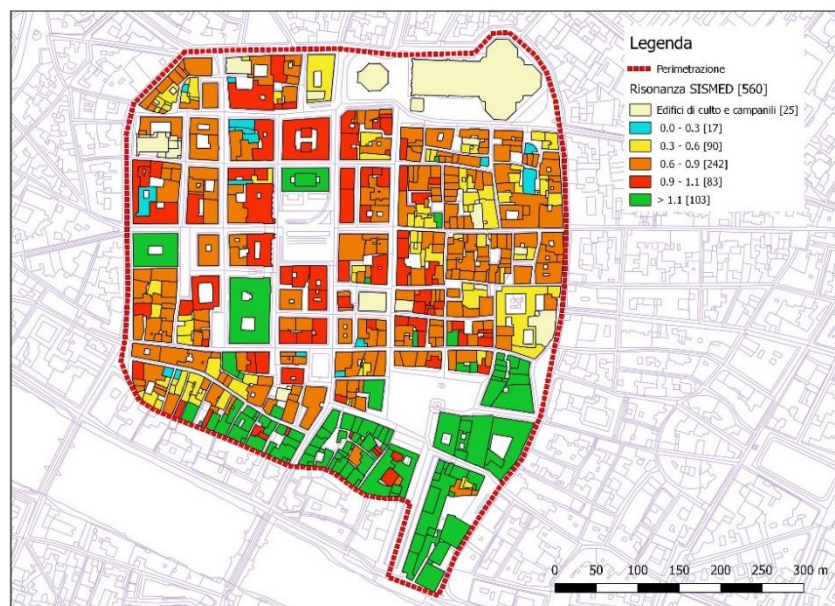


FIGURA 19: MAPPA DELL'INDICE DI RISONANZA - SISMED.



Dai risultati ottenuti sono stati selezionati dei range per individuare la presenza o meno di risonanza, sia che essa sia calcolata con il periodo dell'edificio secondo NTC08 sia con la formulazione proposta in Sismed. In Tab. 3 si riportano i risultati:

TABELLA 3: INDICE DI RISONANZA.

IR	Risonanza	NTC2008 [n° edifici]	Sismed [n° edifici]
0.0-0.3	Assente	2	17
0.3-0.6	Scarsa	21	90
0.6-0.9	Rilevante per terremoti di elevata intensità	58	242
0.9-1.1	Rilevante per terremoti di bassa intensità	107	83
> 1.1	Assente	347	103

Indice di danno e indice di rischio

Per risalire ad un indice di danno e ottenere dunque una mappatura di uno scenario di danno dell'area analizzata è stata scelta una metodologia macrosismica nota in letteratura tecnica dal punto di vista del trattamento delle tipologie descrivibili a partire da dati poveri quali il comportamento atteso dalla presenza accertata di specifici fattori (ad esempio il grado di manutenzione) o le caratteristiche tipologiche (ad esempio il numero di piani) [6, 14, 15, 16].

L'indice di danno di seguito calcolato (eq. 2) dipende da due fattori: intensità macrosismica e indice di vulnerabilità V_I (eq. 3).

$$\mu_D = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I+6.25 \cdot V_I - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad 0 < \mu_D < 5 \quad (2)$$

$$V_I = V_I^* + \Delta V_m \quad (3)$$

$$\Delta V_m = \sum V_{m,k} \quad (4)$$

dove ΔV_m è il fattore che tiene conto dei modificatori del comportamento sismico $V_{m,k}$ (Fig. 20).

ΔV_m è stato calcolato attingendo ai punteggi $V_{m,k}$ della scheda riportata in Fig. 20, solo per i parametri reperibili, mentre l'intensità macrosismica, è stata assunta pari a 6 e 8.

Behaviour modifier	Masonry	
		V_{mk}
State of preservation	Good	-0.04
	Bad	+0.04
Number of floors	Low (1 or 2)	-0.04
	Medium (3,4 or 5)	0
	High (6 or more)	+0.04
Structural system	Wall thickness	
	Wall distance	-0.04
	Wall connections	+0.04
Plan Irregularity	Geometry	
	Mass distribution	+0.04
Vertical Irregularity	Geometry	
	Mass distribution	+0.04
Superimposed floors		+0.04
Roof	Weight, thrust and connections	+0.04
Retrofitting Intervention		-0.08
Aseismic Devices	Barbican, Foil arches, Buttresses	-0.04
Aggregate Building: position	Middle	-0.04
	Corner	+0.04
	Header	+0.06
Aggregate Building: elevation	Staggered floors	+0.04
	Buildings with different height	-0.04
Foundation	Different level foundations	+0.04

FIGURA 20: PUNTEGGI DEI FATTORI MODIFICATORI DI COMPORTAMENTO DI EDIFICI IN MURATURA. (TRATTO DA [6]).

Le tipologie strutturali presenti nel tessuto edilizio analizzato, da cui ricavare l'indice di vulnerabilità tipologico V_i^* , sono:

- M3: muratura di pietra sbazzata $V_i^* = 0.74$
- M4: muratura di pietra massiccia $V_i^* = 0.616$

- M5: muratura di mattoni e pietra lavorata $V_i^* = 0.74$

In Fig. 21 è riportata la mappatura della tipologia strutturale. Si evidenzia una forte percentuale di manufatti ricadenti nella categoria di muratura di pietra sbazzata (88%), il 12% a quella di mattoni e pietra lavorata e solamente 1 edificio è caratterizzato da una muratura in pietra massiccia “Palazzo Strozzi”.

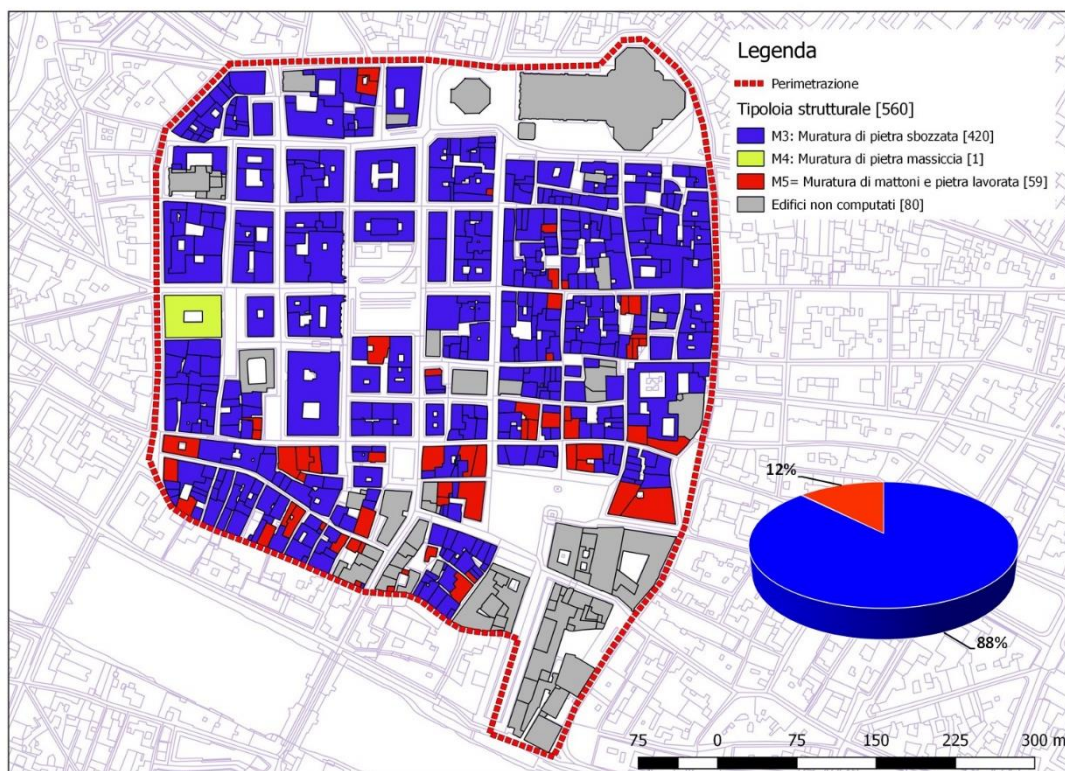


FIGURA 21: MAPPA DELLE TIPOLOGIE STRUTTURALI.

In Tab. 4 sono evidenziate le tipologie adottate con i relativi indici di vulnerabilità tipologica.

Sono inoltre riportati i seguenti parametri:

V_{\min} = valore più basso del possibile valore dell'indice di vulnerabilità finale

$V_{I_{max}}$ = valore più alto del possibile valore dell'indice di vulnerabilità finale

V_i^* = valore dell'indice di vulnerabilità tipologica

V_i^- e V_i^+ = rappresentano i limiti del range di incertezza dell'indice di vulnerabilità tipologica per lo specifico tipo di edificio.

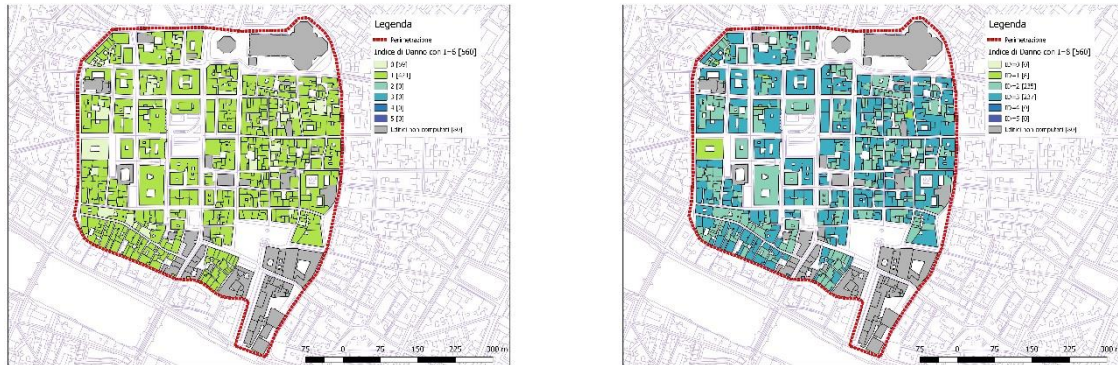
TABELLA 4: TIPOLOGIE COSTRUTTIVE, CLASSI DI VULNERABILITÀ E INDICE DI VULNERABILITÀ (TRATTO DA [6]).

Typologies	Building type	Vulnerability Class EMS98						Vulnerability Index				
		A	B	C	D	E	F	$V_{I_{min}}$	V_i^-	V_i^*	V_i^+	$V_{I_{max}}$
Masonry	M1 Rubble stone	■						0.62	0.81	0.873	0.98	1.02
	M2 Adobe (earth bricks)	■	■					0.62	0.687	0.84	0.98	1.02
	M3 Simple stone	■	■					0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
	M4 Massive stone		■	■	■			0.30	0.49	0.616	0.793	0.86
	M5 Unreinforced M (old bricks)	■	■	■				0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
	M6 Unreinforced M with r.c. floors		■	■	■			0.30	0.49	0.616	0.79	0.86
	M7 Reinforced or confined masonry			■	■	■	■	0.14	0.33	0.451	0.633	0.70
Reinforced Concrete	RC1 Frame in r.c. (without E.R.D.)		■	■	■			0.3	0.49	0.644	0.80	1.02
	RC2 Frame in r.c. (moderate E.R.D.)			■	■	■		0.14	0.33	0.484	0.64	0.86
	RC3 Frame in r.c. (high E.R.D.)				■	■	■	-0.02	0.17	0.324	0.48	0.70
	RC4 Shear walls (without E.R.D.)			■	■	■		0.3	0.367	0.544	0.67	0.86
	RC5 Shear walls (moderate E.R.D.)				■	■		0.14	0.21	0.384	0.51	0.70
	RC6 Shear walls (high E.R.D.)					■	■	-0.02	0.047	0.224	0.35	0.54
Steel	S Steel structures				■	■	■	-0.02	0.17	0.324	0.48	0.70
Tiber	W Timber structures		■	■	■	■		0.14	0.207	0.447	0.64	0.86

SITUAZIONE: ■ PIÙ PROBABILE ■ POSSIBILE ■ POCO PROBABILE

Le valutazioni che seguiranno sono riferite a tutti gli edifici in muratura esclusi quelli riconducibili a modelli ad "Aula", il complesso degli Uffizi e Palazzo Vecchio.

In Fig. 22 si riporta la mappatura dell'indice di danno ID calcolato con eq. 2 considerando l'intensità macrosismica I pari a 6 e 8 mentre la Fig. 23 riporta l'indice di rischio IR derivante.



(a) (b)
FIGURA 22: MAPPA DELL'INDICE DI DANNO. I=6 (A) – I=8 (B).

Sul campione analizzato, 535 edifici escludendo quelli di culto ed i campanili (25), si evidenzia come l'ID varia da 0 ad 1 nel caso di intensità macrosismica pari a 6 tra 1 e 3 per I=8.

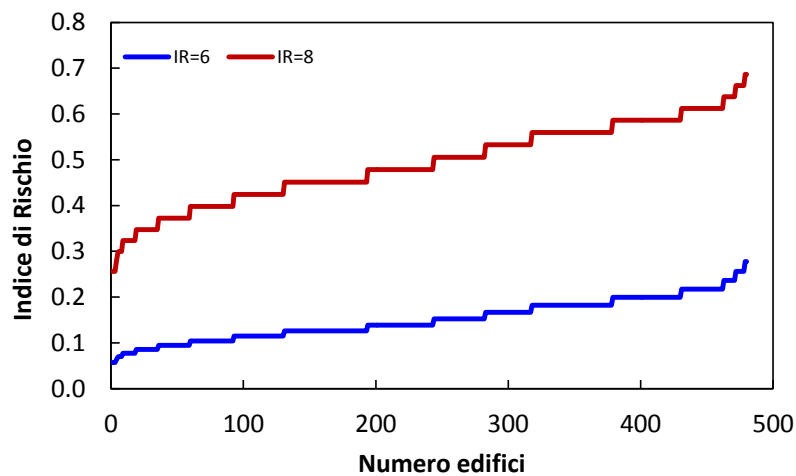


FIGURA 23: INDICE DI RISCHIO.

Perdita Annuale Media attesa

La classificazione del Rischio Sismico degli edifici è stata condotta mediante il metodo semplificato riportato nelle Linee Guida per la Classificazione del Rischio Sismico delle



Costruzioni [17]. Il metodo è applicabile per i soli edifici in muratura e consente di individuare una classe di vulnerabilità del manufatto, in funzione della tipologia strutturale a cui appartiene, da cui ricavare la relativa Classe di Rischio in funzione della zona sismica di appartenenza così come indicato dall'O.P.C.M. 3274 del 20/03/2003 e successive modifiche ed integrazioni.

Le classi di vulnerabilità sono 6, con vulnerabilità crescente da $V_1 \div V_6$, mentre le classi di Rischio sono 8: A_+ , A^* , B^* , C^* , D^* , E^* , F^* e G^* (l'asterisco indica che le classi si sono ottenute con il metodo semplificato) (Tab. 5). Le classi di vulnerabilità media possono subire uno scostamento a causa di un elevato degrado, di una scarsa qualità costruttiva o della presenza di peculiarità che possono innescare meccanismi di collasso locale per valori particolarmente bassi dell'azione sismica e aumentare la vulnerabilità globale.

Le tipologie strutturali alle quali le Linee Guida fanno riferimento sono le medesime di quelle adottate dalle EMS-98 [16], vedi Tab. 4.

TABELLA 5: CLASSE DI RISCHIO E PERDITA ANNUALE MEDIA ATTESA PAM IN FUNZIONE DELLA ZONA SISMICA IN CUI L'EDIFICIO È SITUATO (TRATTO DA [17]).

Classe di Rischio	PAM	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
A+*	$PAM \leq 0,50 \%$				$V_1 \div V_2$
A*	$0,50 < PAM \leq 1,0 \%$			$V_1 \div V_2$	$V_3 \div V_4$
B*	$1,0 < PAM \leq 1,5 \%$	V_1	$V_1 \div V_2$	V_3	V_5
C*	$1,5 < PAM \leq 2,5 \%$	V_2	V_3	V_4	V_6
D*	$2,5 < PAM \leq 3,5 \%$	V_3	V_4	$V_5 \div V_6$	
E*	$3,5 < PAM \leq 4,5 \%$	V_4	V_5		
F*	$4,5 < PAM \leq 7,5 \%$	V_5	V_6		
G*	$7,5 < PAM$	V_6			

Nel caso dell'area in esame, le tipologie strutturali individuate sono le medesime di quelle indicate nella valutazione dell'indice di danno (Fig. 21 e Tab. 4). Essendo Firenze ricadente in

zona sismica 3 e le tipologie strutturali prevalenti M3 e M5 (solo un edificio ricade in M4), la classe di vulnerabilità corrispondente in entrambe i casi è V5. Alcuni dei manufatti hanno subito uno scostamento della vulnerabilità iniziale a causa della presenza di criticità, di conseguenza, per taluni edifici si è avuto il passaggio da V₅ a V₆ (Fig. 24)

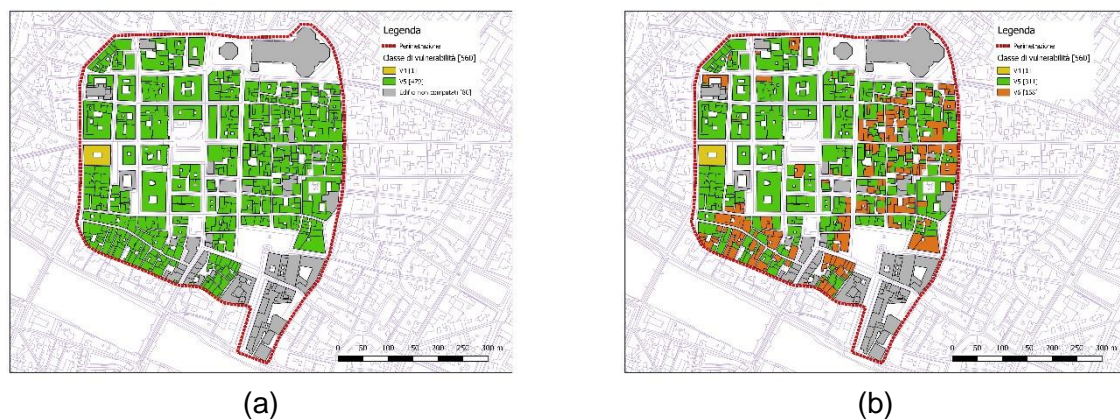


FIGURA 24: MAPPA DELLA CLASSE DI RISCHIO. SENZA SCOSTAMENTO (A) – CON SCOSTAMENTO (B).

Interpolando la zona di appartenenza (Zona 3) con la classe di vulnerabilità (V₅ e V₆), la Classe di Rischio che si ottiene per l'intera area è D* (Fig. 25) a cui è associata una Perdita Annuale Media attesa compresa tra 2,5% e 3,5 %.

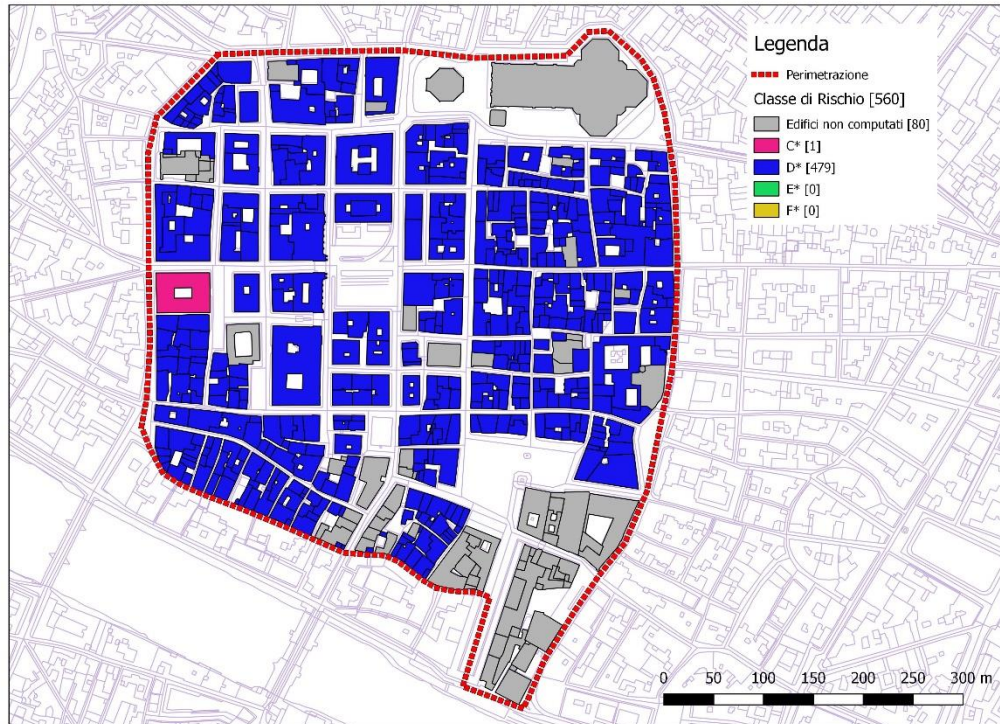


FIGURA 25: MAPPA DELLA CLASSE DI RISCHIO PER ZONA 3.

Una valutazione interessante è quella di trasformare l'intensità macrosismica "I" nei valori corrispondenti di Peak Ground Acceleration "PGA" mediante una legge di correlazione. Molte di queste leggi presenti in letteratura possono essere ricondotte ad una stessa formula (eq. 5) proposta da Lagomarsino e Giovinazzi [18]:

$$a_g = c_1 \cdot c_2^{(I-5)} \quad (5)$$

Dove a_g è l'accelerazione al suolo in unità di g, I è l'intensità macrosismica misurata nella scala convenzionale EMS-98, c_1 è il valore di accelerazione corrispondente ad un'intensità macrosismica pari a 5 e c_2 è la pendenza della curva di correlazione.

In Tab. 6 si riportano i coefficienti ricavati per tre differenti leggi di correlazione [15].



TABELLA 6: VALORI DEI PARAMETRI c_1 E c_2 PER TRE LEGGI DI CORRELAZIONE PRESE IN ESAME (TRATTO DA [15]).

Legge di correlazione	c_1	c_2
Guarenti - Petrini	0.03	2.05
Margottini	0.04	1.65
Murphu O'Brien	0.03	1.75

La legge di Guarenti e Petrini [19] si sviluppa su dati italiani e fa riferimento all'intensità macrosismica misurata nella scala MCS (Mercalli, Cancani, Sieberg), la legge di Murphy e O'Brien [20] fa riferimento alla scala MMI (Mercalli Modificata) mentre Margottini et al. [21] ha proposto due correlazioni una per l'intensità MCS ed una per la scala MSK (Medvedev, Sponheuer, Karnik). In [15] le tre correlazioni sono state ricondotte alla scala EMS-98. In particolare, le intensità misurate nella scala MCS sono state ricondotte in MSK mediante la seguente relazione:

$$I_{MSK} = 0.85 \cdot I_{MCS} \quad (6)$$

Considerando per Firenze due intensità macrosismiche pari rispettivamente a 6 e 8, le accelerazioni che si ottengono sono quelle riportate in Tab. 7.

TABELLA 7: VALORI DI ACCELERAZIONE IN FUNZIONE DELLE TRE CORRELAZIONI ESAMINATE E DI DUE INTENSITÀ MACROSISMICHE.

Legge di correlazione	$I=6$	$I=8$
Guarenti - Petrini	0.062	0.258
Margottini	0.066	0.180
Murphu O'Brien	0.053	0.161

Esaminando i risultati si evince come per $I=6$ a_g è compreso tra 0.053 e 0.062 e dunque ricade all'interno del range di accelerazione previsto per la zona 3 e cioè $0.05 < a_g \leq 0,15$.



Diversamente, per $I=8$ a_g è compreso tra 0.161 e 0.258, valori questi superiori al range di cui sopra, ricadendo quindi non più in zona 3, ma in zona 2 [20, 21] o addirittura in zona 1 [19], come riportato in Tab. 8.

TABELLA 8: ZONE SISMICHE DI RIFERIMENTO RIFERITE ALLE DUE INTENSITÀ MACROSISMICHE.

Legge di correlazione	$I=6$	$I=8$
Guarenti - Petrini	Zona 3	Zona 1
Margottini	Zona 3	Zona 2
Murphu O'Brien	Zona 3	Zona 2

Prendere in considerazione la correlazione di Margottini et al., per una intensità macrosismica pari a 8 si cadrebbe in zona 2, lo scenario della classe di rischio sarebbe completamente diverso andando ad interessare le classi E* e F* come meglio illustrato in Fig. 26.

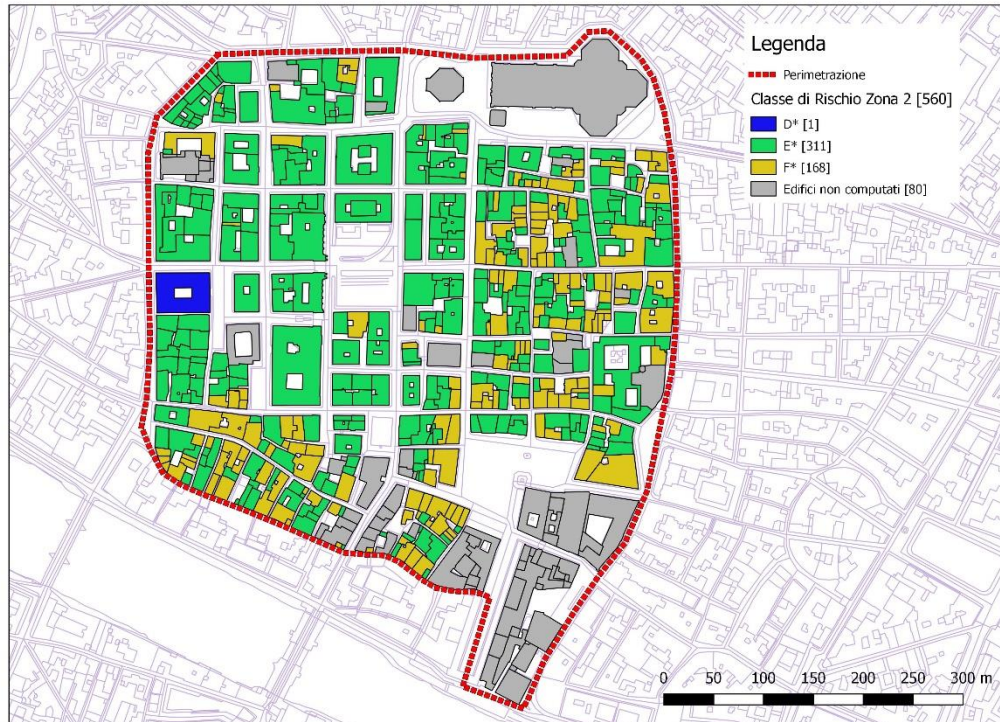


FIGURA 26: MAPPA DELLA CLASSE DI RISCHIO PER ZONA 2.

Stima dei costi

Per la stima dei costi si è fatto riferimento al “Libro bianco sulla ricostruzione privata fuori dai centri storici nei comuni colpiti dal sisma dell’Abruzzo del 6 Aprile 2009” [22] ed in particolare a “Analisi tecnico-economico degli edifici – Comune di l’Aquila” [22]. All’interno del documento la ricostruzione dell’edilizia privata danneggiata o distrutta dal sisma è suddivisa in due grandi categorie: ricostruzione leggera e ricostruzione pesante.

In merito alla ricostruzione leggera, per edifici in muratura, i costi di riparazione e rafforzamento sono:

- Costo medio di riparazione: 217,00 €/mq

- Costo medio di rafforzamento locale: 68,00 €/mq
- Costo medio totale: **285,00 €/mq**

Per quanto concerne la ricostruzione pesante, i costi di riparazione e miglioramento sono:

- Costo medio di riparazione: 448,00 €/mq
- Costo medio di miglioramento sismico: 320,00 €/mq
- Costo medio per le prove e l'adeguamento energetico: 69,00 €/mq
- Costo medio totale: **837,00 €/mq**

Per l'attribuzione dei costi di riparazione all'area oggetto di studio, si è proceduto facendo riferimento ai risultati dell'indice di danno. Precisando che per ID=0 il danno è nullo e per ID=5 vi è il collasso, all'indice di danno pari a 1 e 2 si è attribuito un danno leggero mentre all'indice di danno pari a 3 e 4 un danno pesante, come riportato in Fig. 27.

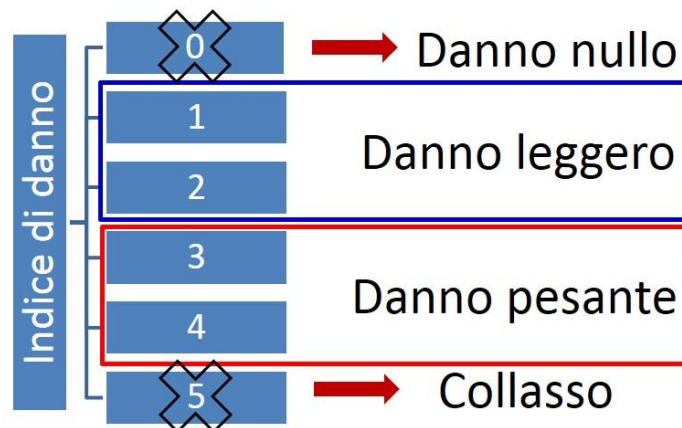


FIGURA 27: DANNO LEGGERO E DANNO PESANTE IN FUNZIONE DI ID.



In particolare l'attribuzione dei costi è stata così ripartita:

- ID = 1 – Danno leggero

Solo costo medio di riparazione: 217,00 €/mq

- ID= 2 – Danno leggero

Costo medio di riparazione + costo medio di rafforzamento locale 285,00 €/mq

- ID = 3 – Danno pesante

Solo costo medio di riparazione: 448,00 €/mq

Alla luce di ciò, possiamo ipotizzare due possibili scenari:

1. Caso con intensità macrosismica I=6 e zona 3 (Fig. 28)

L'intera area di studio è interessata da una classe di rischio è D* (2,5% < PAM ≤ 3,5%) e ID pari a 1 (Fig. 22 A). Assumendo PAM = 3% si ha:

$$ID = 1 \quad 217,00 \text{ €/mq} \times 0,03 = 6,51 \text{ €/mq}$$

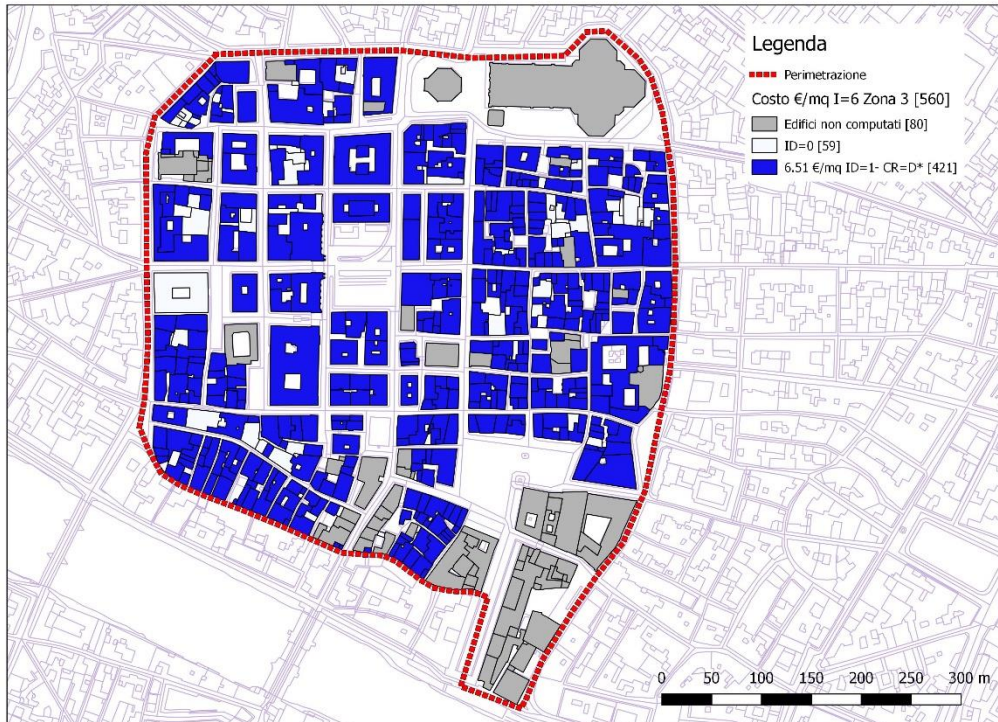


FIGURA 28: MAPPA DEI COSTI DI RIPARAZIONE PER I=6 E ZONA 3.

2. Caso con intensità macrosismica I=8 e zona 2 (Fig. 29)

L'area di studio è interessata da una classe di rischio E* ($3,5\% < PAM \leq 4,5\%$) e F* ($4,5\% < PAM \leq 7,5\%$), con ID prevalentemente pari a 2 e 3 e in pochissimi casi pari a 1 (Fig. 22 B).

Assumendo per la classe di rischio E* PAM = 4% e per la classe di rischio F* PAM pari a 6% si ha:

$$ID=1 \quad 217 \text{ €/mq} \times 0,040 = 8,68 \text{ €/mq}$$

$$ID=1 \quad 217 \text{ €/mq} \times 0,060 = 13,02 \text{ €/mq}$$

$$ID=2 \quad 285 \text{ €/mq} \times 0,040 = 11,40 \text{ €/mq}$$

ID=2 285 €/mq X 0,060 = 17,10 €/mq

ID=3 448 €/mq X 0,040 = 17,92 €/mq

ID=3 448 €/mq X 0,060 = 26,88 €/mq

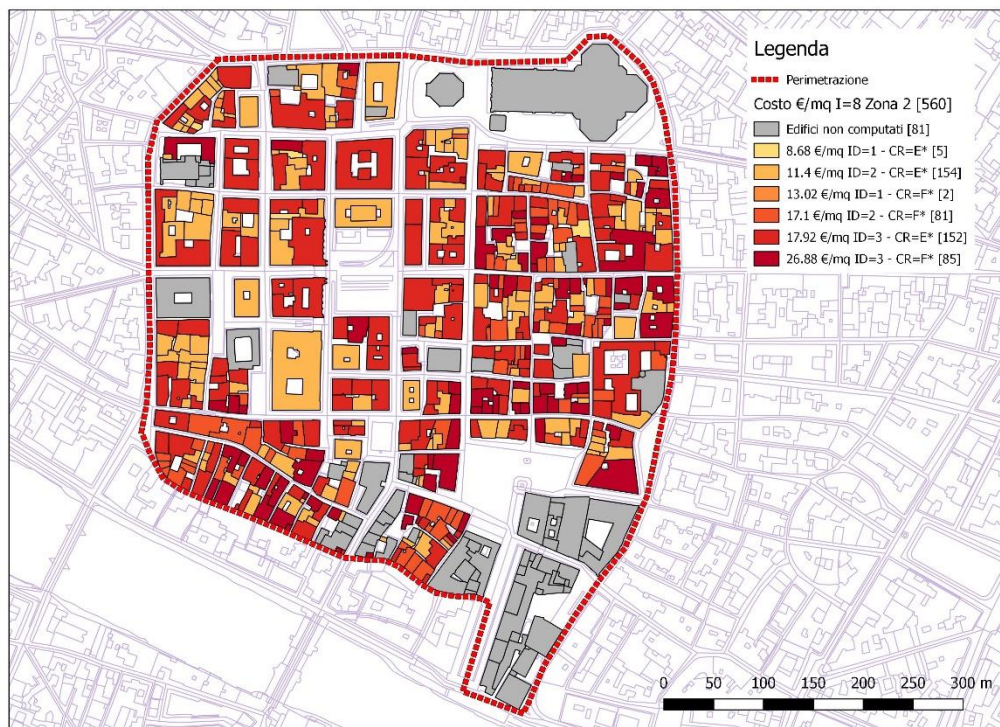


FIGURA 29: MAPPA DEI COSTI DI RIPARAZIONE PER I=8 E ZONA 2.



Bibliografia

- [1] Dolce, M., Masi, A., Marino, M. and Vona, M. (2003). Earthquake Damage Scenarios of the Building Stock of Potenza (Southern Italy) Including Site Effects, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 115-140.
- [2] M. Coli, M. Ripepe, P. Rubellini (2008). Sismicità dell'area fiorentina. Firenze: SELCA.
- [3] E. Guidoboni (2018). Florence: the effects of earthquakes on the artistic heritage. Method and historical sources (15th-20th). VII Convegno di Storia dell'Ingegneria, 3rd International Conference Proceedings, Napoli. International Journal for Housing Science and Its Applications, vol. 37, no. 4, pp. 229–238, 2013.
- [4] M. Ripepe et al (2018). Rischio sismico di aree urbane complesse: Progetto Sismed. VI Convegno Internazionale ReUSO, Messina 11-13 ottobre.
- [5] G. Lacanna et al. (2016). Seismic hazard of urban areas: a case-study. VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. Crete Island, Greece, 5-10 June.
- [6] S. Giovinazzi, S. Lagomarsino (2004). A macroseismic method for the vulnerability assessment of buildings. Proc. of 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No. 896.
- [7] M. Lopes Pegna (1974). Firenze dalle origini al Medioevo, Firenze, Del Re Editore.
- [8] A. Cecconi (1980). Il Mugnone attraverso i secoli, Bologna, Cappelli Editore, 1980.
- [9] G. Vannucci, P. Gasperini e M. Boccaletti (2004). Database e Carta della zonazione sismica dell'area urbana di Firenze: Valutazione del rischio per i beni artistici e culturali. CNR-Progetto Finalizzato "Beni culturali", Sottoprogetto 1, Tema 1.2, Linea 1.2.3.



[10] QGIS Geographic Information System 2.18.24. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>

[11] D.M. 14 gennaio 2008 (G.U. 4 febbraio 2008 n°29), Norme Tecniche per le Costruzioni.

[12] Progetto SISMED (2016)- Modelli sperimentali di valutazione della vulnerabilità sismica di aree urbane complesse: il caso della città di Firenze. Responsabile scientifico DST M. Ripepe, DIDA M. De Stefano, DISIA B. Bertaccini. Finanziato da Ente Cassa di Risparmio di Firenze.

[13] M. Ripepe et al (2015). Large-scale seismic vulnerability assessment method for urban centres. An application to the city of Florence. Engineering Materials Vol. 628, pp 49-54.

[14] A. Bernardini et al (2007). Vulnerabilità e previsione di danno a scala territoriale secondo una metodologia macrosismica coerente con la scala EMS-98. XII Convegno ANIDIS "L'ingegneria sismica in Italia", Pisa.

[15] A. Bernardini et al (2007). Matrici di probabilità di danno implicite nella scala EMS-98 per tipologie di edilizia abitativa. XII Convegno ANIDIS "L'ingegneria sismica in Italia", Pisa.

[16] EMS-98

[17] Linee Guida per la Valutazione del Rischio Sismico delle Costruzioni

[18] S. Lagomarsino and S. Giovinazzi (2006). Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. Bulletin of Earthquake Engineering, Special Issue "Risk-Ue Project", Vol. 4, pp 415-443, November.

[19] E. Guarenti e V. Petrini (1989). Il caso delle vecchie costruzioni: verso una nuova legge danni-intensità. Proc. of 4th Italian Conference of Earthquake Engineering, Milano, Vol. I, pp 145-153.



[20] J. Murphy and L.J. O'Brien (1977). The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 67, pp 877-915.

[21] C. Margottini, D. Molin, B. Narcisi, L. Serva (1992). Intensity versus ground motion: a new approach using Italian data. Engineering Geology, Vol. 33, pp 45-48.

[22] M. Dolce e G. Mangredi (2015). Libro bianco sulla ricostruzione privata fuori dai centri storici nei comuni colpiti dal sisma dell'Abruzzo del 6 Aprile 2009.

http://www.doppiavoce.it/index.php?option=com_virtuemart&Itemid=68