



Effect of the different data survey scale on assessment of seismic exposure and vulnerability of the historic center of Caltabellotta

Piero Colajanni^a, Calogero Cucchiara^a, Jennifer Danna^a, Giuseppe Di Gesaro^a, Salvatore Pagnotta^a, Silvia Pennisi^a
^a *Dipartimento di Ingegneria, Viale delle Scienze, 90128 Palermo, Italy*

Keywords: seismic fragility; cultural heritage; earthquake damage; reliability

ABSTRACT

The results of the prediction of exposure and seismic vulnerability for the buildings of the historic center of Caltabellotta, obtained with databases of different levels of accuracy, are compared. In particular, the results obtained on the basis of the estimation of the characteristics and of the distribution of the typologies derived from the filling in of the CARTIS sheets on a sector scale are compared with those obtained through a survey from the outside to a building scale. In this latter area, indicators contained in the CARTIS are suitably supplemented with those available in the literature, partly modified to adapt them to the local reality. The vulnerability is evaluated on the basis of the RISK-UE method, using suitably adapted values of the vulnerability modifiers. In the application of the procedure, the difficulties emerged in the recognition and attribution of the typology of masonry in the presence of plastered buildings are highlighted. In this context, a typological investigation is developed which, starting from the survey and the material classification of the buildings with exposed faces, and retracing the possible transformation processes that the structural housing units have completed, formulating two simplified criteria for the attribution of material properties. to the buildings plastered according to the plano-altimetric characteristics and the elevation of the buildings. The outcomes prove the accuracy of the procedure based on survey at the sector scale.

1 INTRODUZIONE

Molteplici sono le motivazioni che recentemente hanno riportato in auge studi e ricerche finalizzate alla valutazione del rischio sismico, e dei fattori che lo determinano: pericolosità, vulnerabilità ed esposizione. Le analisi di rischio sismico a scala territoriale sono strumenti imprescindibili nella programmazione di politiche di programmazione ed incentivazione economica di interventi di riduzione del rischio, sia per la quantificazione che per la allocazione ottimale delle risorse, ma anche per la valutazione economica dei canoni assicurativi per i fabbricati ed opere civili. Esposizione e vulnerabilità costituiscono poi ingredienti essenziali per lo sviluppo di scenari di danno condizionati, strumenti di rilevanza basilare per la programmazione e la gestione dell'emergenza post-terremoto. Gli strumenti attualmente impiegati per analisi sull'intero territorio nazionale utilizzano come database per la valutazione dell'esposizione del patrimonio edilizio costituito dagli edifici ordinari i risultati dei censimenti ISTAT, che solo marginalmente

contengono informazioni utili ad una valutazione di vulnerabilità: in genere ci si limita ad utilizzare le informazioni legate alle caratteristiche materiche del sistema costruttivo, l'anno di costruzione ed il numero di elevazioni del costruito. Le stime di vulnerabilità ed esposizione che ne derivano condizionano in modo irreparabile l'accuratezza dei risultati ottenuti, anche mediante impiego di approcci sofisticati come quelli probabilistici, e rendono gli intervalli di confidenza degli scenari di danno prossimi all'ordine di grandezza. Appare pertanto evidente come gli enti preposti a tali studi, e in particolare il Dipartimento di Protezione Civile, siano particolarmente interessati ad avere a disposizione sia strumenti analitici che banche dati per la valutazione dell'esposizione sismica a scala territoriale.

In questo ambito si colloca l'attività che la REte di Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (RELUIS) sta svolgendo sin dal triennio 2014-2016, che durante il piano triennale 2019-2021 finalizzata allo sviluppo di una metodologia sistematica per la valutazione dell'esposizione a

scala territoriale sulla base delle caratteristiche tipologico- strutturali degli edifici ordinari, e per la realizzazione di una banca dati contenente informazioni di carattere tipologico- strutturale degli edifici ordinari italiani. L'obiettivo è quello di mettere a disposizione dei ricercatori entrambi gli strumenti allo scopo di pervenire ad una stima affidabile e robusta della esposizione e della vulnerabilità sismica sulla quale costruire mappe di rischio sismico affidabili. In quest'ambito, per la definizione di metodologie per la valutazione della esposizione a scala territoriale, è stata ideata la scheda di 1° livello CARTIS, e il relativo manuale per la compilazione (Dolce et al. 2014, Zuccaro et al. 2015). La scheda consente il rilevamento delle tipologie edilizie ordinarie prevalenti nell'ambito di zone comunali o sub-comunali, dette "comparti", caratterizzate da omogeneità del tessuto edilizio per età di primo impianto, impiego di tecniche costruttive, e caratteristiche strutturali. La dettagliata descrizione delle tipologie edilizie nasce con l'intento di indagare sul panorama costruttivo nazionale, individuando sotto il profilo qualitativo caratteristiche costruttive locali, ed è finalizzata anche a definire una tassonomia delle tipologie edilizie rappresentative per ambiti geografici.

La scheda consente di valutare l'esposizione a scala comunale sulla base di una stima della numero complessivo di unità e della percentuale di ogni tipologia all'interno di ogni comparto. La scheda è compilata da un esperto, attraverso le informazioni ricavate da un'intervista ad un tecnico locale afferente ad un Ente Pubblico, o che svolga professione privata nell'area oggetto di studio, che abbia così maturato negli anni una conoscenza della storia e dell'evoluzione del processo di urbanizzazione, delle tecniche costruttive, dei materiali, e per gli edifici più recenti dei criteri e delle regole di progettazione e realizzazione del costruito.

Appare pertanto evidente che i risultati ottenibili siano in qualche misura dipendenti dalla sensibilità del tecnico intervistato nel contribuire a definire le caratteristiche strutturali delle tipologie, ma anche le percentuali di diffusione di ogni tipologia all'interno del comparto.

In questo ambito vengono nel seguito confrontati i risultati della predizione di esposizione e vulnerabilità sismica per gli edifici del centro storico di Caltabellotta ottenuti con database di differenti livelli di accuratezza. In particolare si confrontano i risultati ottenuti sulla base della stima delle caratteristiche e della distribuzione delle tipologie derivate dalla redazione delle schede CARTIS a scala di comparto, evidenziando inoltre il grado di

affidabilità dei risultati ottenuto sulla base di interviste a più tecnici operanti sul territorio, con quelli ottenuti attraverso un rilievo speditivo dall'esterno delle caratteristiche costruttive a scala di edificio. Per la valutazione dei valori di danno medio e delle curve di vulnerabilità verrà impiegato il metodo macrosismico, noto con l'acronimo RISK-UE, proposto da Lagomarsino e Giovinazzi (2006). Nelle due sezioni successive vengono brevemente riassunte le caratteristiche salienti della scheda CARTIS e le procedure del metodo macrosismico impiegate nelle analisi, per poi passare successivamente al caso studio.

2 LA SCHEDA CARTIS

La scheda di 1° livello per la CARatterizzazione Tipologia Strutturale (CARTIS) dei comparti urbani costituiti da edifici ordinari (Dolce et al. 2014, Zuccaro et al. 2015) è divisa nelle quattro sezioni seguenti:

- Sezione 0 per l'identificazione del Comune in esame e dei Comparti in esso individuati. Essi andranno opportunamente perimetrati su mappa (da allegare alla scheda), tracciandone i confini. Nella parte B (Figura1) vanno riportate le informazioni sulla consistenza dell'edificato, e la percentuale di presenza di ciascuna tipologia all'interno di ogni singolo comparto.
- Sezione 1 per l'identificazione di ciascuna delle tipologie prevalenti caratterizzanti il generico comparto dell'assegnato comune.
- Sezione 2 per l'identificazione delle caratteristiche generali della tipologia in esame.
- Sezione 3 per la caratterizzazione degli elementi strutturali della tipologia in esame.

“L'individuazione delle tipologie prevalenti in ciascun comparto viene condotta con particolare riferimento ai seguenti campi, presenti nelle Sezioni 2 e 3, ritenuti fondamentali nella caratterizzazione di un differente comportamento sismico: numero piani totali; età della costruzione; caratteristiche della muratura (Figura 2); caratteristiche dei solai; caratteristiche delle volte; caratteristiche delle strutture miste; qualifica della struttura in cemento armato; presenza di giunti di separazione; presenza di telai in una sola direzione; presenza di tamponature al piano; caratteristiche della copertura; interventi strutturali eseguiti sulla tipologia” (Zuccaro et al. 2015).

SEZIONE 0: Identificazione Comune e Comparti										PARTE B									
ELENCO COMPARTI																			
C. Comparto	D. Denominazione Comparto	E. Coordinate UTM	F. Area (mq)	G. Altezza (m)	H. Tipologia Muratura	I. Tipologie presenti nel comparto								L. Stato	M. Stato	N. Stato	O. Stato		
						MURATURA (Codici)				CEMENTO ARMATO (Codici)									
C.1	CENTRO STORICO	111111	12111505	213014	1.1.1.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C.2	CAPPUCINI	111111	1181313	141716	1.1.1.1	131418	1101%	21.4%	1.15%	1.12%	14.4%	1101%	1.1.1.1	0	0	0	0	0	0
C.3	FUORI CENTRO	111111	1121332	112818	1.1.1.1	112818	00	00	00	00	00	00	1.1.1.1	0	0	0	0	0	0
C.4	CIMITERO	111111	1111581	111112	1.1.1.1	111112	1.1.1.1	1.1.1.1	1.1.1.1	1.1.1.1	1.1.1.1	1.1.1.1	1.1.1.1	0	0	0	0	0	0
C.5	SANT'ANNA	111111	1115818	114016	1.1.1.1	113818	1.1.1.1	1.1.1.1	1.1.1.1	1.1.1.1	1.1.1.1	1.1.1.1	1.1.1.1	0	0	0	0	0	0

Figura 1. Scheda CARTIS: sezione 0 Parte B: consistenza dell'edificato e percentuali tipologie nei comparti di Caltabellotta

a. Caratteristiche Muratura					
A 1.1	MURATURA IRREGOLARE	Pietra arrotondata	Senza ricorsi	Ciottoli con tessitura disordinata nel paramento	○
A 1.2			Ciottoli con tessitura ordinata nel paramento	○	
A 1.3			Con ricorsi	Ciottoli e mattoni	○
A 1.4			Con ricorsi	Ciottoli e mattoni con ricorsi in laterizio	○
A 2.1	Pietra grezza	Pietra grezza	Senza ricorsi	Pietrame con tessitura disordinata nel paramento	●
A 2.2			Con ricorsi	Pietrame con tessitura ordinata nel paramento	○
A 2.3			Con ricorsi	Murata disordinata con embrici e calcare	○
A 2.4			Con ricorsi	Pietrame con ricorsi in laterizio	○
B 1.1	MURATURA SBOZZATA	Pietra lastriforme	Senza ricorsi		○
B 1.2			Con ricorsi		○
B 2.1	Pietra pseudo regolare	Pietra pseudo regolare	Senza ricorsi		○
B 2.2			Con ricorsi		○
C 1.1	MURATURA REGOLARE	Pietra squadrata	Senza ricorsi		○
C 1.2			Con ricorsi		○
C 2.0		Mattoni			○

Figura 2. Tipologie di muratura prevista nella scheda CARTIS

3 IL METODO MACROSISMICO (Giovinazzi e Lagomarsino, 2004, 2006)

Le informazioni sull'esposizione raccolte in un primo caso a scala di comparto, ed in un secondo caso attraverso una più dettagliata indagine a scala di edificio vengono utilizzate per la valutazione delle curve di vulnerabilità e di fragilità attraverso l'implementazione del metodo macrosismico (Giovinazzi e Lagomarsino, 2004, 2006). A tale scopo, devono essere compiuti i seguenti passi:

i) a ciascuna delle tipologie individuate attraverso la scheda CARTIS viene fatta corrispondere una tipologia strutturale prevista dal metodo macrosismico (vedi Tab.1); per ogni tipologia strutturale vengono compiute le seguenti azioni:

ii) attribuzione del valore dell'indice di vulnerabilità di riferimento $V=V_i^*$ (Tabella 1) e dei modificatori di comportamento (Tabella 2);

iii) calcolo del danno medio per sisma di intensità macrosismica I , mediante la relazione:

$$\mu_D = 2,5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I+6,25 VI-13,1}{2,3} \right) \right] \quad (1)$$

iv) calcolo della funzione cumulata della distribuzione di probabilità del danno β

$$P_\beta(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(r)\Gamma(t-r)} \frac{(x-a)^{r-1} (b-x)^{t-r-1}}{(b-a)^{t-1}} \quad (2)$$

con Γ funzione Gamma e $a \leq x \leq b$, dove si è assunto $a=0, b=6, t=8$ e

Tabella 1. Tipologie e corrispondenti valori caratteristici dell'indice macrosismico (Giovinazzi e Lagomarsino, 2006) (2004).

Typologies	Building type	ulnerabilità Classes				
		$V_{i, min}$	$V_{i, -}$	$V_{i, 0}$	$V_{i, +}$	$V_{i, max}$
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	0.3	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	0.3	0.49	0.616	0.79	0.86
	M7 Reinforced or confined masonry	0.14	0.33	0.451	0.633	0.7
Reinforced Concrete	RC1 Frame in r.c. (without E.R.D.)	0.3	0.49	0.644	0.8	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	0.7
	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	0.7
	RC6 Shear walls (high E.R.D.)	-0.02	0.047	0.224	0.35	0.54
Stell	S Steel structures	-0.02	0.17	0.324	0.48	0.7
Tiber	W Timber structures	0.14	0.207	0.447	0.64	0.86

Tabella 2. Modificatori dell'indice di vulnerabilità (Giovinazzi e Lagomarsino, 2004).

Behaviour modifier	Masonry	Reinforced Concrete				
		ERD Level	Pre/Low	Medium	High	
State of preservation	Good	V_{mk}				
	Bad	-0.04	-0.04	-0.02	0	
Number of floors	Low (1or 2)	-0.08	-0.02	-0.02	-0.02	
	Medium (3,4 or 5)	0	0	0	0	
	High (6 or more)	+0.08	+0.04	+0.04	+0.04	
Structural system	Wall thickness					
	Wall distance	-0.04++0.04				
	Wall connections					
Plan Irregularity	Geometry	+0.04	-0.04	+0.02	0	
	Mass distribution		+0.02	+0.01	0	
Vertical Irregularity	Geometry	+0.04				
	Mass distribution		+0.04	+0.02	0	
Superimposed floors		+0.04				
Roof	Weight, thrust and connections	+0.04				
Retrofitting Intervention		-0.08++0.08				
Aseismic Devices	Barbican, Foil arches, Buttresses	-0.04				
Aggregate Building: position	Middle	-0.04				
	Corner	+0.04	Insufficient aseismic joints	+0.04	0	
	Header	+0.06				
Aggregate Building: elevation	Staggered floors	+0.04				
	Buildings with different height	-0.04++0.04				
Foundation	Different level foundations	+0.04	Beams	-0.04	0	0
			Connected beams	0	0	0
			Isolated Footing	+0.04	0	0
			Short-column	-0.02	+0.01	0
	Bow windows	-0.04	+0.02	0		

$$r = t \left(0.007 \mu_D^3 - 0.0525 \mu_D^2 + 0.2875 \mu_D \right) \quad (3)$$

v) Calcolo delle curve di fragilità.

Sfruttando la relazione che consente di calcolare la probabilità associata al grado di danno k mediante l'equazione:

$$P_k = P_\beta(k + 1) - P_\beta(k) \quad (4)$$

è possibile valutare per punti discreti le curve di fragilità.

Considerando il livello di pericolosità sismica definito dalle NTC08, e impiegando la relazione di Guagenti e Petrini (1989) per correlare l'intensità macrosismica ai valori di PGA previsti, possono essere valutati gli scenari di danno.

4 CASO STUDIO: IL CENTRO STORICO DEL COMUNE DI CALTABELLOTTA

Caltabellotta è un comune siciliano in provincia di Agrigento che conta 3.907 abitanti. Possiede una superficie di 12.358 ettari per una densità abitativa di 39 abitanti per chilometro quadrato e sorge in una zona collinare interna, posta a 949 metri sopra il livello del mare. Il suo territorio

comprende anche la frazione di Sant'Anna, poco distante dal comune, con una popolazione di 584 abitanti (Tabella 1).

Ai fini del rilievo del costruito mediante le schede CARTIS, sono stati individuati in totale cinque comparti. Le analisi che qui si riportano sono relative al solo comparto Centro Storico, coincidente con quello individuato dal PRG corrente, a cui sono state sottratte due piccole aree (comparti C03, C04) caratterizzate dalla presenza prevalente di tipologie costruttive differenti da quelle diffuse nel comparto C01.

Sulla base dei dati ISTAT e da informazioni fornite dagli uffici del comune, nel comparto Centro Storico CS si trovano circa 2050 edifici ordinari, mentre la popolazione residente stimata dal comune è di 2150 persone.

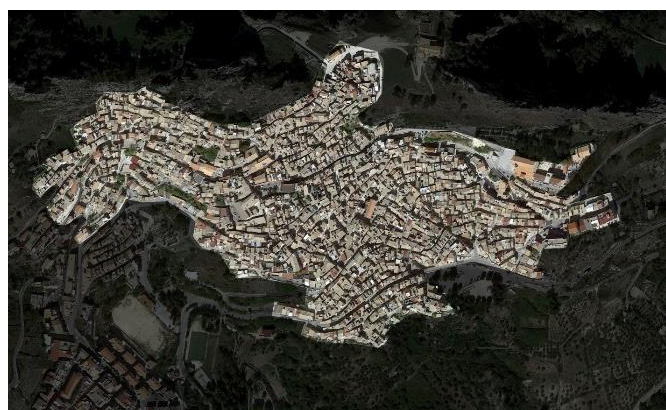


Figura 3. Il comparto Centro Storico del comune di Caltabellotta

4.1 Tipologie murarie e strutturali

Con riferimento al centro storico del comune di Caltabellotta, sono state individuate quattro tipologie di muratura principali (Fatta e Vinci, 2020). Ad ognuna di esse può associarsi una delle tipologie di costruzioni del metodo macrosismico RISK-UE riportate in Tabella 1. Tali caratteristiche, unitamente ad altre caratteristiche geometriche, morfologiche e strutturali per brevità qui non riportate, individuano quattro tipologie della scheda CARTIS. Le quattro tipologie di muratura e le corrispondenti tipologie strutturali individuate sono: -murature caratterizzate da una tessitura muraria ad assestamento caotico, con elementi informi di dimensioni variabili; di queste una parte sono caratterizzate da pietre informi di ridotte dimensioni fortemente variabili, in cui il pietrame è disposto in maniera casuale; a tale tipologia muraria è assimilabile la tipologia M1 del metodo macrosismico in Tabella 1, e corrisponde la tipologia di muratura A.2.1 della scheda CARTIS in Figura 2, cioè muratura in pietra grezza, senza ricorsi, con pietrame con

tessitura disordinata nel paramento, di seguito denotata con il codice MUR0; - una seconda tipologia, con una pezzatura del pietrame più grande, di dimensioni massime di 50x35x30 cm, con piani di posa orizzontali, non rilevabili nella totalità del paramento, assimilabile nuovamente alla tipologia M1 del metodo macrosismico, e alla tipologia muraria A.2.2 della Tabella 2, quest'ultima caratterizzata da pietrame con tessitura ordinata nel paramento, denotata con il codice MUR1; - muratura a due paramenti costituita da conci sbozzati ottenuti mediante sagomatura a spacco e allettati con malta secondo filari regolari, assimilabile alla tipologia M3 del metodo macrosismico, e alla muratura di tipo B.2.1 in pietra sbozzata pseudo regolare senza ricorsi della Tabella 2, denotata con il codice MUR2; - muratura ad assestamento pseudo-isodomo, costituite da conci mediamente squadrati allettati con malta secondo filari regolari e orizzontali, assimilabile alla tipologia M3 del metodo macrosismico in assenza di solai rigidi, e alla tipologia M6 in presenza di solai in cemento armato; tale tipologia muraria è identificabile con la muratura di tipo C1.1 regolare con pietra squadrata senza ricorsi, denotata con il codice MUR3 nella scheda CARTIS. Infine è stata riscontrata la presenza nel comparto centro storico di edifici di recente costruzione, nella quale quest'ultima tipologia di muratura, è inserita all'interno di maglie di telai in calcestruzzo armato con elementi di ridotte dimensioni trasversali, assimilabile alla tipologia M7 del metodo macrosismico, costituenti così la tipologia di muratura confinata MUR4.

Infine, come esito di processi di demolizione e ricostruzione, sono presenti edifici di nuova costruzione in cemento armato, costruiti in assenza di criteri di progettazione antisismica, assimilabili ed edifici di tipologia RC1 della Tabella 1, e di seguito individuati con il codice CAR1.

Per le 5 tipologie sopra descritte, una volta compilata la scheda CARTIS in base alle informazioni ottenute attraverso la comparazione dei risultati delle interviste al responsabile del settore tecnico comunale ed a tre diversi professionisti che svolgono da anni attività privata nell'area oggetto di studio, sono stati valutati i valori più probabili dell'indice di vulnerabilità in base ai valori dei modificatori di comportamento. A tale scopo sono stati considerati i modificatori riportati in Tabella 2, quelli contenuti in Lagomarsino e Giovinazzi (2001) specifici per i centri storici, e i seguenti nuovi modificatori

definiti con lo scopo di utilizzare le informazioni contenute nella scheda CARTIS:

1. Presenza di strutture miste o sopraelevazioni di materiale diverso a quello della struttura sottostante: $\Delta V = +0.03$ per CA su muratura, muratura perimetrale e pilastri interni o esterni; $\Delta V = +0.04$ per muratura su CA o muratura di caratteristiche meccaniche simili alla muratura pre-esistente; $+0.06$ per muratura di caratteristiche meccaniche inferiori alla muratura pre-esistente;
2. Forature su un paramento della costruzione: indicando con n il numero dei piani della costruzione, con ρ_{fi} la percentuale di foratura al piano i ($1 \leq i \leq n$), $\Delta V = \max_{1 \leq i \leq n} (\rho_{fi} - 0.4)/i$. Il modificatore così definito terrà in conto della diversa vulnerabilità indotta dalla foratura in relazione al piano.

Inoltre nel determinare la percentuale di unità con diversa ubicazione nell'aggregato, il dato complessivo presente nella scheda CARTIS relativo alle unità in aggregato è stato scorporato immaginando che il 70% di esse fossero in posizione interclusa, e il 15% in posizione di testata, e il 15% in posizione d'angolo.

4.2 Stime di vulnerabilità mediante indagini a scala di comparto

A partire dai valori dell'indice di vulnerabilità di Tabella 1, e mediante l'attribuzione dei modificatori si sono ottenute per le tipologie sopra descritte i seguenti valori dell'indice di vulnerabilità: $V_{MUR0} = 0.98$; $V_{MUR1} = 0.96$; $V_{MUR2} = 0.79$; $V_{MUR3} = 0.74$; $V_{MUR4} = 0.48$; $V_{CAR1} = 0.67$.

Nel valutare scenari di danno o di rischio per il comparto, gioca un ruolo fondamentale la stima della consistenza di ogni tipologia edilizia all'interno del comparto. Le stime della consistenze, espresse in %, ottenute dalle interviste di quattro tecnici sono riportate in Tabella 3, dove i dati relativi alle tipologie MUR0 e MUR1 sono accorpati, in quanto nessuno dei tecnici ha inizialmente ipotizzato una differenza fra le due tipologie; tale circostanza è poco influente sulla valutazione complessiva dell'esposizione e della vulnerabilità in quanto i valori dell'indice di vulnerabilità delle due tipologie sono risultati molto simili. Dai valori del COefficiente di Variazione (COV) riportato in tabella è immediato rilevare che le percentuali previste dai 4 tecnici presentano valori fortemente dispersi, con valori

prossimi al 40% per ben tre tipologie. Una prima grossolana stima degli effetti che tali dispersioni possono avere sulla valutazione complessiva della vulnerabilità del comparto può essere ottenuta attraverso un valore medio dell'indice di vulnerabilità del comparto, ottenuto come media pesata secondo le percentuali di consistenza degli indici di vulnerabilità delle tipologie riscontrate. I valori così ottenuti riportati nell'ultima riga in tabella, variano nel range [0.78-0.83] con valore medio pari a 0.79 e COV=3%, e mostrano che nonostante la forte dispersione dei dati singoli, il dato complessivo è molto stabile e quindi affidabile.

Tabella 3. Stima della consistenza [%] delle diverse tipologie strutturali nel comparto Centro Storico secondo i 4 tecnici intervistati.

Tip.	V	T1	T2	T3	T4	Med.	COV
MUR01	0.97	16.0	40.0	33.5	45.0	33.6	0.38
MUR2	0.79	32.0	25.0	23.50	30.00	27.63	0.15
MUR3	0.74	37.0	20.0	26.50	15.00	24.63	0.39
MUR4	0.48	5.00	15.0	16.50	10.00	11.63	0.45
CAR1	0.67	5.00	0.00	0.00	0.00	1.25	2.00
Altro		5.00	/	/	/	1.25	0.00
$V_{med,comp}$	0.78	0.80	0.78	0.83	0.79	0.03	

I dati ottenuti sono stati utilizzati per la valutazione delle curve di vulnerabilità, di fragilità e scenari di danno secondo la procedura descritta precedentemente. Per brevità, i risultati verranno presentati successivamente, a confronto con quelli ottenuti con indagini a scala di edificio. Vengono qui solamente anticipate le curve di vulnerabilità medie del comparto, ottenute in base ai valori minimi, medi e massimi dell'indice $V_{med,comp}$ di Tabella 3, che evidenziano una certa variabilità del dato complessivo.

Nella Figura 5 e nella Figura 6 sono riportati gli scenari di danno previsti in base alle stime del tecnico 1 e del tecnico 4, corrispondenti rispettivamente al valore minimo e al valore massimo di $V_{med,comp}$. La pericolosità sismica è stata valutata mediante le indicazioni fornite dall'attuale normativa italiana.

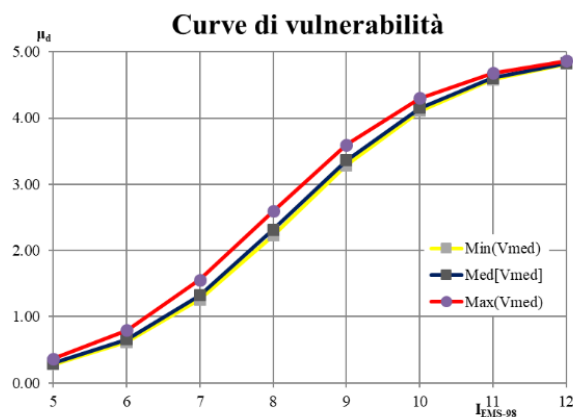


Figura 4. Confronto fra curve di vulnerabilità media del comparto secondo le stime dei diversi tecnici.

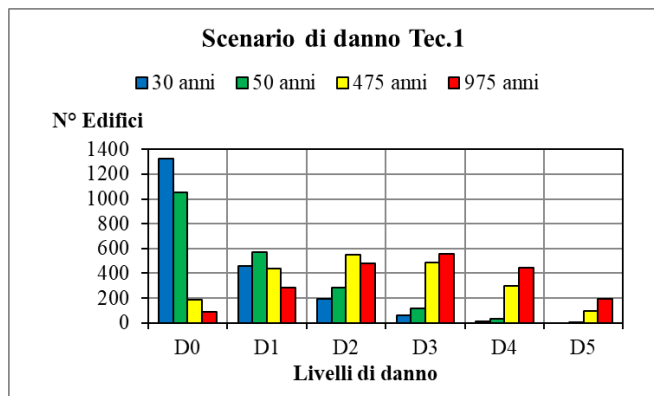


Figura 5. Scenario di danno per diversi tempi di ritorno dell'azione sismica secondo le stime del tecnico N°1.

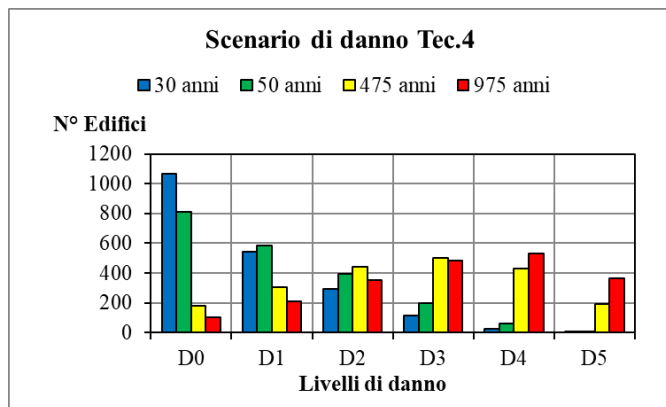


Figura 6. Scenario di danno per diversi tempi di ritorno dell'azione sismica secondo le stime del tecnico N°4.

Con riferimento al tempo di ritorno di 475 anni, il tecnico 4 prevede un incremento di 98 unità (pari al 4.8% delle unità totali) che subiscono danni di livello D5, 132 (6.4%) di livello D4, e 13 (0.6%) di livello D3, evidenziando che la variazione della stima dei danni previsti è significativa, ma contenuta.

4.3 Le indagini a scala di edificio

Con l'obiettivo di valutare l'affidabilità delle curve di fragilità e degli scenari di danno ottenuti con stime a scala di comparto, è stata condotta una indagine a scala di edificio, realizzata attraverso indagini speditive condotte dall'esterno dell'edificio, attraverso il rilievo fotografico completo delle unità, l'ausilio delle immagini ottenibili sul web, e un successivo approfondimento attraverso ulteriori indagini in sito. Le foto e i risultati sono stati riportati su un database geo-referenziato, utilizzato poi come supporto per il calcolo dell'indice di vulnerabilità del singolo edificio.

Sono stati rilevati 1870 edifici ordinari. La distribuzione planimetrica delle tipologie materiche/strutturali rilevate è mostrata in Figura 7, ed evidenzia chiaramente la prevalenza di unità caratterizzate da prospetti completamente

intonacati, per i quali l'attribuzione della tipologia muraria risulta incerta. Il rilievo tiene già conto che la morfologia delle unità in calcestruzzo armato è sufficiente a riconoscerne la tipologia, anche in presenza di prospetti interamente intonacati. In Figura 8a il diagramma a torta mostra i valori percentuali delle tipologie rilevate, e la forte preponderanza delle unità con prospetto totalmente intonacato. Pertanto, nell'effettuare la stima della vulnerabilità del comparto sulla base dei dati rilevati a scala di edificio, la prima difficoltà emersa è stata l'attribuire la tipologia muraria a tutte quelle unità che mostravano prospetti completamente intonacati.

A tale scopo, ci si è basati sull'interpretazione dei dati rilevati sulle unità che non presentavano prospetto intonacato secondo due diversi criteri. Il primo finalizzato ad avere una stima della consistenza di ciascuna tipologia materica, è descritto in dettaglio in Colajanni e Pennisi (2020). Il criterio è basato su un riconoscimento di 7 tipologie di unità con diverse caratteristiche plano-altimetriche (numero di elevazioni, numero di cellule sul prospetto principale, numero e ubicazione dei vani sul prospetto principale) e la successiva assunzione che la distribuzione delle caratteristiche della muratura degli edifici intonacati fosse simile alla distribuzione degli edifici non intonacati della medesima tipologia plano-altimetrica, con eccezione della tipologia MUR2 (muratura a due paramenti costituita da conci sbalzati ottenuti mediante sagomatura a spacco) per la quale in relazione alla presenza di paramenti di pregio, si è ridotta del 50% la probabilità di trovare tale tipologia fra le unità intonacate. Il risultato di tale criterio, applicato nella sua declinazione più semplificata, è riportato in Figura 8b. La figura mostra che il criterio prevede una netta preponderanza di muratura MUR3, coerentemente a quanto stimato dal Tecnico 1 anche se con percentuali più ridotte, ed in controtendenza a quanto stimato dagli altri tecnici.

Il secondo criterio, utilizzato nello sviluppo delle valutazioni in questo lavoro, si limita ad attribuire alle unità intonacate delle tipologie plano-altimetriche precedentemente descritte, un valore di base dell'indice di vulnerabilità ottenuto dalla media pesata, secondo la consistenza di ciascuna tipologia, dei valori di base degli indici di vulnerabilità delle unità non intonacate. Il criterio è finalizzato alla valutazione delle stime di vulnerabilità e fragilità per l'interno comparto,

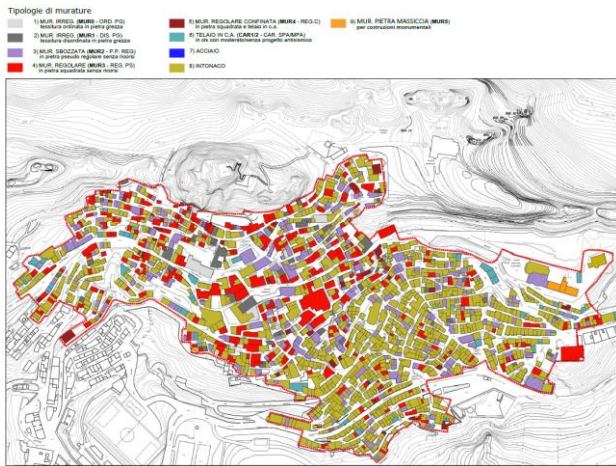


Figura 7. Planimetria del centro storico con tipologie materiche/strutturali rilevate.

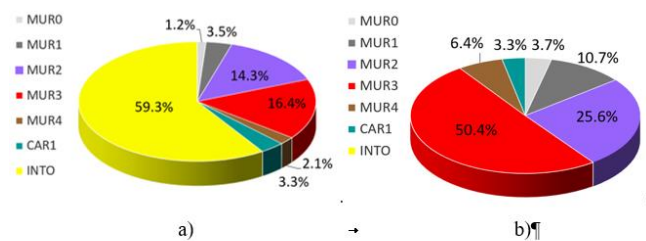


Figura 8. Diagramma a torta indicante le tipologie materiche/strutturali rilevate

invece che una stima della consistenza di ogni tipologia materico/strutturale.

Individuata per ogni unità il valore di riferimento dell'indice di vulnerabilità, sono poi stati valutati i valori finali dell'indice di vulnerabilità di ciascuna unità mediante l'applicazione dei modificatori di vulnerabilità descritti nella sezione precedente. In tale operazione si è potuto rilevare la forte presenza di unità che nel corso degli anni hanno subito trasformazioni. Fra queste le più rilevanti nel modificare il comportamento sismico possono identificarsi nella realizzazione di sopraelevazioni con materiali e sistemi costruttivi di diversa natura rispetto a quello della costruzione pre-esistente, e l'indiscriminata realizzazione o allargamento delle aperture del piano terra, senza che quasi mai fosse prevista una adeguata cerchiatura dell'apertura. A titolo esemplificativo in Figura 9 è mostrata la planimetria del centro storico che riporta il numero e la natura materica dell'edificio pre-esistente e delle sopraelevazioni. L'indagine ha evidenziato che più del 30% degli edifici hanno un piano aggiunto rispetto alla configurazione pre-esistente; stessa percentuale per gli edifici che hanno subito allargamento delle aperture al piano terra tali da generare una superficie resistente complessiva residua inferiore al 50% di quella senza aperture.

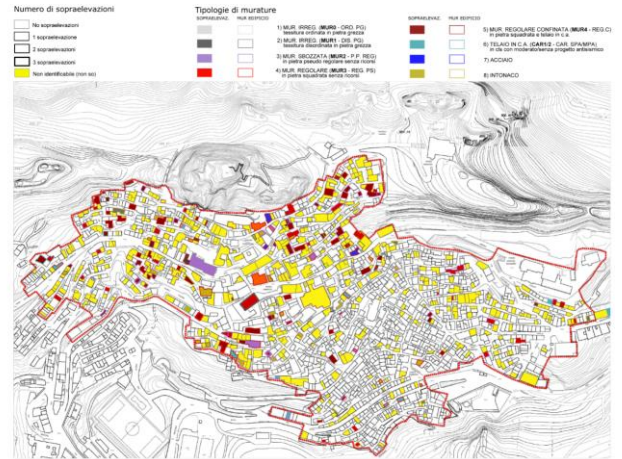


Figura 9. Planimetria indicante il numero e la natura materica delle sopraelevazioni e dell'edificio pre-esistente

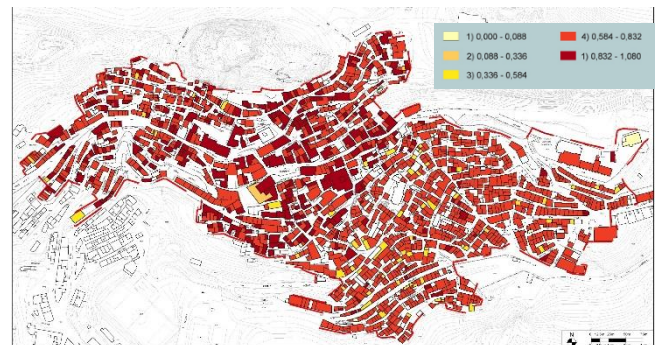


Figura 10. Planimetria indicante i valori degli indici di vulnerabilità delle diverse unità.

Tabella 4. Distribuzione degli edifici in funzione dell'indice di vulnerabilità stimato con indagine a scala di edificio.

V	N° Edifici	% Edifici
$V \geq 0.9$	116	6.22
$0.8 \leq V < 0.9$	381	20.4
$0.7 \leq V < 0.8$	688	36.9
$0.6 \leq V < 0.7$	526	28.2
$0.5 \leq V < 0.6$	120	6.44

In figura 10 ed in Tabella 4 sono mostrate rispettivamente la distribuzione planimetrica, e il numero e le percentuali di edifici caratterizzati da opportuni intervalli dei valori dell'indice di vulnerabilità. L'elevata vulnerabilità è attestata dalla circostanza che più di un terzo degli edifici hanno valori dell'indice compresi fra 0.7 e 0.8, e più di un quarto valori superiori a 0.8

4.4 Confronto fra le curve di vulnerabilità e di fragilità ottenuti con indagini a scala di comparto e di edificio.

Nella Figura 11 sono confrontate le curve di vulnerabilità delle diverse tipologie ottenute con la stima a scala di comparto con quella a scala di edificio. Quest'ultima è ottenuta in base al valore medio dell'indice di vulnerabilità di tutte le unità della data tipologia che sono state rilevate in

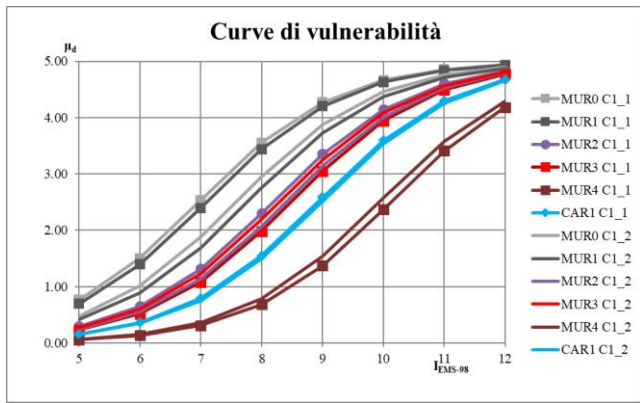


Figura 11 Confronto fra curve di vulnerabilità per diverse tipologie strutturali con indagine a scala di comparto (MURi_C1_1) e scala di edificio non tenendo conto delle unità intonacate (MURi_C1_2).

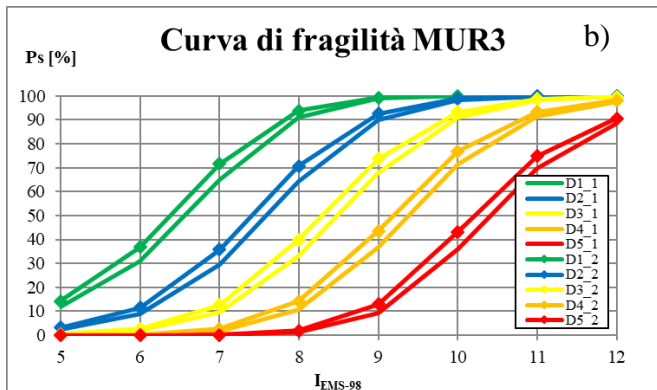
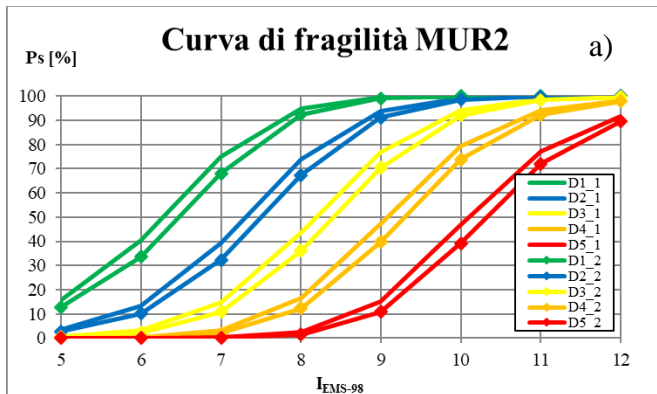


Figura 12 Confronto fra curve di vulnerabilità per diversi livelli di danno D_i con indagine a scala di comparto ($D_{i,1}$) e scala di edificio non tenendo conto delle unità intonacate ($D_{i,2}$) per tipologia strutturale: a) MUR2; b) MUR3

modo diretto, trascurando cioè le unità con prospetto interamente intonato. Sono apprezzabili, seppur modeste, le differenze per le tipologie murarie, mentre irrilevanti per le unità in calcestruzzo. Nella successive Figura 12a e Figura 12b è mostrato l'omologo confronto in termini di curva di fragilità per le tipologie strutturali MUR2 e MUR3, che sono le più diffuse nel comparto, mentre nelle Figura 13 sono confrontate le curve per livello di danno D3 stimate con i due diversi livelli di scala dell'analisi.

Per evidenziare l'effetto dell'inclusione degli edifici intonacati nella valutazione delle curve di fragilità, le unità intonacate sono state attribuite

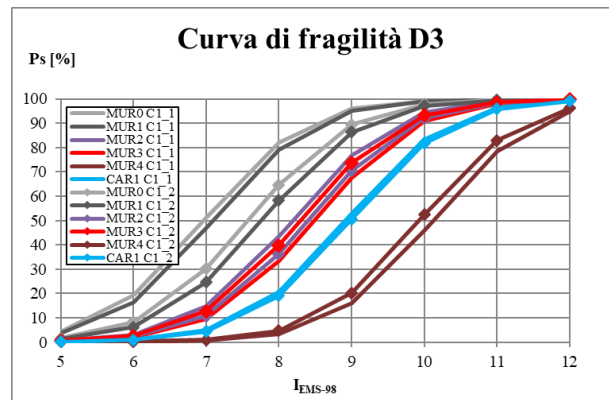


Figura 13 Confronto fra curve di fragilità per diverse tipologie strutturali per livello di danno D4 con indagine a scala di comparto (MURi_C1_1) e scala di edificio non tenendo conto delle unità intonacate (MURi_C1_2).

alle diverse tipologie con l'obiettivo di minimizzare la variazione delle curve di fragilità ottenute con i dati relativi alle unità non intonacate, la cui tipologia è stata identificata con indagine diretta. A tale scopo si è diviso l'asse dei valori dell'indice di vulnerabilità individuando su di esso i valori medi forniti per le tipologie murarie dagli edifici non intonacati, e bisecando gli intervalli fra esso contenuti, individuando il campo di valori di V appartenente a ciascuna tipologia. Le unità con prospetto intonato sono state attribuite alle diverse tipologie murarie sulla base dei valori dell'indice di vulnerabilità, calcolati in base ai valori di riferimento individuati con il secondo criterio sopra menzionato, e sommando i valori dei modificatori di comportamento. Il risultato di tale operazione, sintetizzato nella Figura 15, dove sono rappresentati gli intervalli di V attribuiti a ciascuna tipologia muraria, le percentuali di unità con prospetti non intonacati rilevate per quella tipologia, e in colore ocra la percentuale di edifici con prospetto intonato attribuitagli. I risultati evidenziano una buona coerenza con i risultati ottenuti con il primo criterio di attribuzione della tipologia di muratura alle unità intonacate, i cui risultati erano stati sintetizzati in Figura 6b. Il criterio è estremamente semplificato, postulando intervalli disgiunti per gli indici di vulnerabilità delle diverse tipologie. E' questo un punto fondamentale della procedura, qui affrontato in modo pragmatico con l'obiettivo sopra enunciato, e certamente richiede maggiori approfondimenti sui criteri da impiegare e sugli effetti sulle stime di vulnerabilità che ne conseguono.

Nelle Figura 16 e Figura 17 sono confrontate le curve di fragilità rispettivamente per diversi livelli di danno D_i per la MUR3, e per le diverse tipologie strutturali per il livello di danno D4.

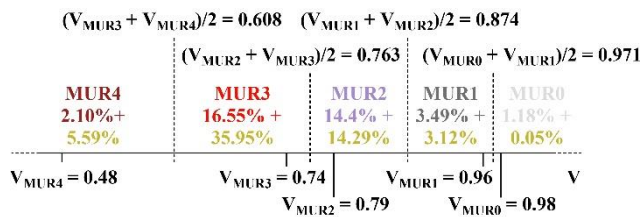


Figura 15 risultato del secondo criterio di attribuzione della tipologia muraria alle unità con prospetto intonacato

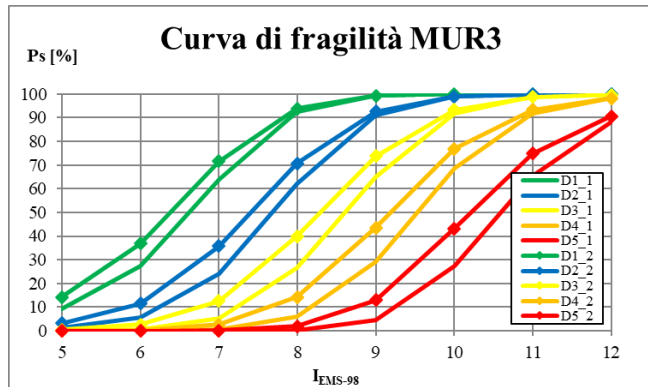


Figura 16 Confronto fra curve di fragilità per diversi livelli di danno i non tenendo conto (Di_2) e tenendo conto (Di_1) delle unità intonacate per la tipologia muraria MUR3 .

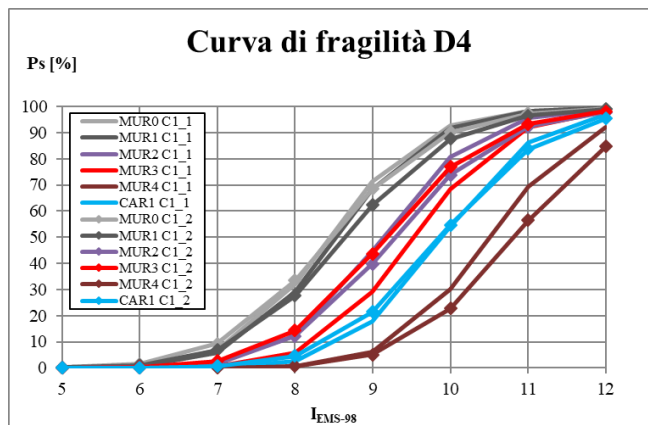


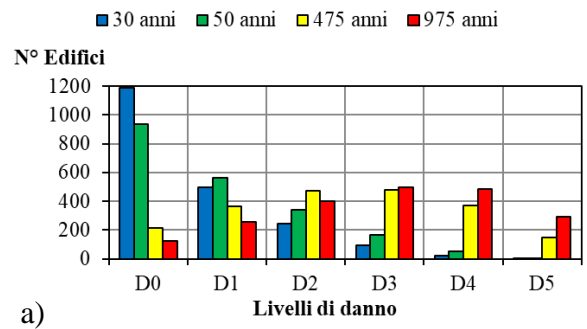
Figura 17 Confronto fra curve di fragilità per diverse tipologie strutturali per livello di danno D4 non tenendo conto (MURi_C1_2) e tenendo conto (MURi_C1_1) delle unità intonacate.

Le curve mostrano che le maggiori differenze si riscontrano proprio per la tipologia MUR3, in ragione del fatto che la maggior parte delle unità con prospetto intonacato hanno valori dell'indice di vulnerabilità ricadenti all'interno dell'intervallo caratteristico di questa tipologia muraria. Gli esiti di queste variabilità sugli scenari di danno verranno mostrati nella sezione successiva.

4.5 Confronto fra gli scenari di danno ottenuti con indagini a scala di comparto e di edificio.

In Figura 18a e Figura 18b sono confrontati gli scenari di danno, per diversi valori del tempo di ritorno dell'azione sismica ($T_R=30,50,475,975$

Scenario di danno -Indag. a Scala Comparto



Scenario di danno Indag. Scala Edificio

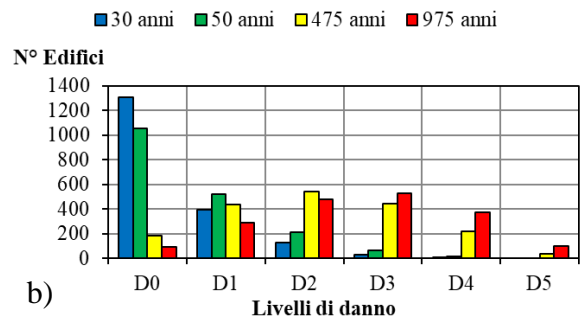


Figura 18 Confronto fra scenari di danno con indagini: a) a scala di comparto; b) a scala di edificio

Tabella 5. Differenza fra stima numero edifici che patiscono danni di livello Di per eventi sismici con diversi tempi di ritorno T_R fra indagine a scala di comparto e indagine a scala di edificio (# totale edifici 1870) .

T_R	D0	D1	D2	D3	D4	D5
30 anni	-119	109	118	63	17	1
50 anni	-122	43	127	99	38	4
475 anni	32	-75	-71	38	152	113
975 anni	37	-33	-81	-37	110	193

Tabella 6. Differenza fra le stime delle percentuali di edifici che patiscono danni di livello Di per eventi sismici con diversi tempi di ritorno T_R fra indagine a scala di comparto e indagine a scala di edificio

T_R	D0	D1	D2	D3	D4	D5
30 anni	-6.4	5.9	6.3	3.4	0.9	0.1
50 anni	-6.6	2.3	6.8	5.3	2.0	0.2
475 anni	1.7	-4.0	-3.8	2.0	8.2	6.1
975 anni	2.0	-1.8	-4.4	-2.0	5.9	10.4

anni) ottenuti da stime dell'esposizione condotte a scala di comparto e a scala di edificio. In Tabella 5 sono riportate le differenze fra il numero di edifici ordinari che raggiungono un dato livello di danno Di, stimato con indagini a scala comparto e scala di edificio. Una prima differenza deriva dal diverso numero totale di edifici ordinari stimati 2050, e quelli effettivamente rilevati, 1870. La seconda dalle differenti forme delle curve di fragilità ottenute (cfr. Figure 12 e 13).

La tabella 5 mostra che l'indagine a scala di comparto conduce alla stima di un maggiore

numero di edifici che subiscono danni più rilevanti. Al fine di enucleare l'aliquota delle differenze dovute alla diversa forma delle curve di fragilità, eliminando quella dovuta alla diversa stima del numero di edifici esposti, in Tabella 6 è riportata la differenza fra le percentuali degli edifici che subiscono un dato livello di danno attenuate con le due diverse scale di indagine. La tendenza emersa rimane confermata, ma la differenza percentuale è certamente accettabile, tenuto conto l'alto livello di incertezza che accompagna tutto il processo di stima.

Infine nella Tabella 7 sono mostrate le differenze fra le stime del numero edifici che patiscono danni di livello Di per eventi sismici con diversi tempi di ritorno T_R , calcolati mediante curve di fragilità ottenute da indagine a scala di edificio, tenendo conto degli edifici con prospetto intonato e non tenendoli in conto.

Tabella 7. Differenza fra stima numero edifici danneggiati mediante curve di fragilità ottenute da indagine a scala di edificio tenendo conto degli edifici con prospetto intonato e non tenendoli in conto (# totale edifici 1870).

T_R	D0	D1	D2	D3	D4	D5
30 anni	45	-29	-11	-4	-1	0
50 anni	57	-32	-20	-5	0	0
475 anni	17	43	1	-32	-25	-4
975 anni	1	39	27	-18	-37	-12

I risultati confermano la tendenza ad una minore vulnerabilità degli edifici con prospetto intonato evidenziata durante il trattamento dei dati ottenuti dalle indagini effettuate, dovuta ad un migliore stato di conservazione e una più diffusa manutenzione degli edifici con prospetto intonato.

5 CONCLUSIONI

Confrontando i risultati della stima di esposizione e vulnerabilità sismica per gli edifici del centro storico di Caltabellotta ottenuti con database di differenti livelli di accuratezza, è stato evidenziato che l'analisi con indagine a livello di comparto, sulla quale è basata la metodologia CARTIS, fornisce risultati comparabili con quelli ottenibili attraverso una più approfondita analisi dell'esposizione a scala di edificio. La maggiore differenza fra le stime fornite dai due metodi è da imputarsi al diverso livello di precisione con cui è valutata l'esposizione complessiva, in termini di numero di edifici. La differenza fra le forme delle curve di fragilità, da cui dipendono gli scenari di danno, introduce approssimazioni certamente compatibili con il livello di accuratezza assicurato dalla procedura di stima dei danni attesi.

Nelle analisi condotte a scala di comparto si è evidenziato che una delle maggiori ulteriori fonti di incertezza è l'attribuzione della consistenza di ciascuna tipologia all'interno del comparto. Le analisi svolte per il caso studio hanno evidenziato che tali incertezze, sebbene rilevanti, hanno una influenza limitata sulle stime delle curve di vulnerabilità, che si ripercuotono però in variazioni della distribuzione del danno atteso significative, ancorchè di entità limitata.

Nel sviluppare le analisi sulla base delle indagini condotte a scala di edificio con rilievi speditivi condotti dall'esterno dell'edificio, è stato evidenziato che una grande fonte di incertezza origina dalla presenza di edifici con prospetti interamente intonacati, per i quali è complesso attribuire la tipologia strutturale di competenza. Nelle analisi condotte sono stati ipotizzati due possibili criteri di attribuzione della tipologia, un primo finalizzato alla valutazione della consistenza di ciascuna tipologia all'interno del comparto, un secondo che si limita a fornire uno strumento per la valutazione dei valori medi e della dispersione dell'indice di vulnerabilità per le diverse tipologie del comparto. Quest'ultima procedura in questa sede è stata formulata con l'obiettivo di minimizzare la variazione delle curve di fragilità ottenute con i dati relativi alle unità non intonacate la cui tipologia è stata identificata con indagine diretta.

Anche se i risultati ottenuti con quest'ultimo criterio sono risultati coerenti con i risultati ottenuti con il primo criterio di attribuzione della tipologia di muratura alle unità intonacate, è stato sottolineato che il criterio formulato è estremamente semplificato, postulando intervalli disgiunti per gli indici di vulnerabilità delle diverse tipologie. E' questo un punto fondamentale della procedura, che è stato affrontato in modo pragmatico con l'obiettivo sopra enunciato, e certamente richiede maggiori approfondimenti sui criteri da impiegare e sugli effetti sulle stime di vulnerabilità che ne conseguono.

BIBLIOGRAFIA

- Bernardini A., Giovinazzi S., Lagomarsino S., e Parodi S.(2007), Matrici di probabilità di danno implicite nella scala EMS-98; *XII Congresso Nazionale ANIDIS "L'Ingegneria Sismica in Italia"*, 10-14 Giugno, Pisa (Italy).
- Colajanni P. e Pennisi S. 2020. Caratteristiche tipologico-strutturali per la valutazione della vulnerabilità sismica nel centro storico di caltabellotta tra persistenze e trasformazioni. In *Caltabellotta: studi e ricerche sul centro storico*, a cura di G. Trombino, in corso di pubblicazione

- De Gregorio D., Dolce M., Moroni C., Speranza E., Zuccaro G. 2014. CARTIS - Manuale per la compilazione della Scheda di 1° Livello per la caratterizzazione tipologico-strutturale dei comparti urbani costituiti da edifici ordinari.
- Dolce M., Moroni C., La valutazione della Vulnerabilità e del Rischio Sismico degli Edifici Pubblici mediante le procedure VC e VM. Progetto SAVE, Atti di Dipartimento, 2005, vol n. 4.
- Fatta G., Vinci C. 2020. Materiali e tecniche costruttive della edilizia storica. In *Caltabellotta: studi e ricerche sul centro storico*, a cura di G. Trombino, in corso di pubblicazione
- Lagomarsino, S., Giovinazzi, S., 2001. Una metodologia per l'analisi di vulnerabilità sismica del costruito. X Congresso Nazionale ANIDIS "L'Ingegneria Sismica in Italia", 9-13 settembre, Potenza-Matera (Italy).
- Giovinazzi S., Balbi A., Lagomarsino S. 2004, Un modello di vulnerabilità per gli edifici nei centri storici, XI Congresso Nazionale ANIDIS "L'Ingegneria Sismica in Italia", 25-29 Gennaio, Genova, (Italy).
- Giovinazzi S., Lagomarsino S., 2006. "Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings". *Bulletin of Earthquake Engineering*, November 4:415-443.
- GNDT, Scheda di esposizione e vulnerabilità e di rilevamento danni di primo livello e di secondo livello (muratura e cemento armato), Gruppo Nazionale per la Difesa dai terremoti, Roma, 1994.
- Lagomarsino, S., Giovinazzi, S., 2001. Una metodologia per l'analisi di vulnerabilità sismica del costruito. X Congresso Nazionale ANIDIS "L'Ingegneria Sismica in Italia", 9-13 settembre, Potenza-Matera (Italy).
- Zuccaro G. (a cura di), 2004. "Inventario e vulnerabilità del patrimonio edilizio residenziale del territorio nazionale, mappe di rischio e perdite socio - economiche". I.N.G.V./G.N.D.T. - Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia / Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, L'Aquila.
- 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, 34 *Convegno Nazionale GNGTSA*, Trieste.