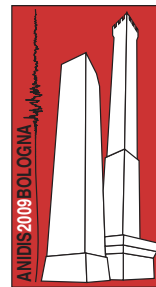


# Strumenti per la Valutazione e la Programmazione di Interventi di Mitigazione del Rischio Sismico a Scala Comunale: un Caso Studio



Sonia Giovinazzi

*Civil and Natural Resources Engineering Department, Canterbury University, Private Bag 4800, Christchurch 8140, New Zealand.*

Andrea Fiaschi, Luca Matassoni

*Prato Ricerche - Istituto per la ricerca ambientale e la mitigazione dei rischi, Via Galcianese 20/H, 59100 Prato - Italy.*

*Keywords: vulnerabilità, microzonazione, scenari di danno, analisi costi-benefici, analisi multicriteria*

## ABSTRACT

L'analisi di rischio sismico eseguita per il Comune di Prato è stata realizzata a scopi conoscitivi e pianificatori per conto dell'Amministrazione del Comune nell'ottica di una efficace programmazione di interventi di mitigazione del rischio. Lo studio, descritto in questo lavoro, ha rappresentato un caso esemplare di efficace collaborazione con le istituzioni interessate che ha portato al contenimento di tempi e costi, e alla rappresentazione dei risultati ottenuti in un formato utile e facilmente accessibile per gli utenti finali. Utilizzando per quanto possibile informazioni esistenti e risultati disponibili da studi precedenti, lo studio è stato sviluppato secondo un approccio multiscala e multilivello con diverso approfondimento dei dati acquisiti e delle analisi eseguite, a cui è corrisposta una diversa affidabilità dei risultati ottenuti. Sono stati quindi valutati scenari di danno deterministici e probabilistici per tutte le sezioni censuarie del Comune di Prato e per i singoli edifici. Il presente lavoro riporta in particolare procedimenti e risultati ottenuti per l'analisi di primo livello condotta a scala comunale. I risultati ottenuti, rappresentati sia in termini numerici che in termini di mappe GIS, hanno incluso la valutazione di: 1) esposizione e vulnerabilità del costruito; 2) danno, perdite e conseguenze attese per costruito e popolazione; 3) perdite economiche dirette; 4) analisi costi-benefici per valutare la convenienza economica di strategie di intervento alternative; 5) analisi multicriteria per analizzare l'efficacia di strategie di intervento alternative rispetto a molteplici e diversi criteri.

rispettivamente come: analisi di primo livello, L1, e analisi di secondo livello, L2.

## 1 INTRODUZIONE

Lo “Studio di Microzonazione Sismica del Comune di Prato, Fase III - Analisi della vulnerabilità degli edifici”, i cui risultati sono parzialmente sintetizzati in questo lavoro, è stato voluto e realizzato in collaborazione con il Comune di Prato, per fornire agli amministratori locali e ai funzionari di protezione civile, strumenti volti ad accrescere la consapevolezza sul rischio sismico e a supportare i processi decisionali per l'individuazione di strategie di mitigazione e gestione dello stesso.

La studio, che ha portato alla definizione di tali strumenti, è stato sviluppato secondo un approccio multiscala e multilivello con diverso approfondimento dei dati acquisiti e delle analisi eseguite, a cui è corrisposta una diversa affidabilità dei risultati ottenuti. La consistenza del costruito è stata analizzata per due diversi livelli di dettaglio, riferiti di seguito

L'analisi L1 è stata eseguita a scala comunale, cioè per l'intero territorio del Comune di Prato. L'unità di analisi per l'analisi di livello L1 è stata identificata con la sezione censuaria. Per ciascuna sezione censuaria i dati utili per la caratterizzazione degli edifici vulnerabili sono stati desunti dal censimento ISTAT-01 (ISTAT 2001) e dalle informazioni e cartografia resi disponibili dal Comune di Prato.

L'analisi di livello L2 ha interessato un campione di edifici opportunamente selezionati all'interno del territorio di Prato (25 sezioni censuarie per un totale di 215 edifici). Il singolo edificio è stato assunto come unità di riferimento e i dati per la sua caratterizzazione sono stati rilevati attraverso un rilievo speditivo e la raccolta di informazioni dalla documentazione progettuale disponibile.

Il presente lavoro riassume brevemente le fasi seguite per realizzare l'analisi di primo livello, L1, condotta a scala comunale, e riporta le scelte operate per ottenere e rappresentare i risultati in

un formato comprensibile, e immediatamente fruibile, dai parte dei dirigenti e amministratori del Comune e dell'Ufficio di Protezione Civile.

In particolare, nell'ambito dello studio L1 eseguito per il Comune di Prato, la pericolosità sismica è stata valutata sia in termini deterministici, rispetto a due terremoti di scenario che in termini probabilistici, facendo riferimento alla mappa di pericolosità, definita ai sensi dell'Ordinanza OPCM 3519 (2006), come descritto nel Paragrafo 2. Possibili effetti di amplificazione del moto sismico dovuti a particolari condizioni di sito, sono stati tenuti in conto grazie alla creazione di una mappa della distribuzione classi di suolo ottenuta per l'intero territorio comunale (Paragrafo 3).

Al fine della valutazione di vulnerabilità sismica e stima dei danni, è stato fatto riferimento a un modello di vulnerabilità cross-calibrato macrosismico/meccanico (Giovinazzi 2005; Lagomarsino e Giovinazzi 2006), brevemente descritto nel Paragrafo 1.1. In particolare, l'approccio macrosismico è stato implementato per l'analisi di livello L1, eseguita per tutto il territorio del Comune di Prato, per valutare un valore dell'indice di vulnerabilità per macrotipologie di costruito identificate all'interno di ciascuna sezione censuaria (Paragrafo 5). La validità delle ipotesi e assunzioni necessariamente avanzate per eseguire l'analisi di vulnerabilità a scala comunale sulla base di "dati poveri" sono state verificate nell'ambito dell'analisi di livello L2, che ha consentito la valutazione un indice di vulnerabilità e l'associazione di una curva di capacità a ciascun edificio rilevato sulla base di informazioni geometriche e costruttive rilevate sul campo e/o ricavate dall'analisi degli elaborati disponibili. Per 52 edifici selezionati tra quelli rilevati, sono state inoltre eseguite misure di microtremore, utilizzate per verificare l'affidabilità delle ipotesi fatte nell'applicazione del modello macrosismico/meccanico cross-calibrato al costruito di Prato e nella valutazione dell'amplificazione del moto sismico dovuto a particolari condizioni suolo-struttura.

Infine i risultati dell'analisi di vulnerabilità, sono stati combinati con la valutazione deterministica della pericolosità per stimare il danno atteso per gli edifici, le conseguenze attese sulle persone e le perdite economiche dirette per i due terremoti di scenario indagati. I risultati dell'analisi di vulnerabilità, sono stati, inoltre, combinati con la rappresentazione probabilistica della pericolosità, per ottenere una stima delle perdite attese per eventi con diverso periodo di ritorno (Paragrafo 6). Infine sono state

implementate analisi costi-benefici, ed è stata proposta l'analisi multicriteria per indagare l'efficacia di alternative strategie di intervento rispetto a diversi criteri (Paragrafo 7).

### 1.1 Un metodo macrosismico per la stima della vulnerabilità e dei danni attesi.

Il metodo di vulnerabilità macrosismico (Giovinazzi 2005, Giovinazzi e Lagomarsino 2006), implementato per la valutazione della vulnerabilità sismica del costruito nel Comune di Prato, prevede la misura della vulnerabilità attraverso un indice di vulnerabilità  $V$  e un indice di duttilità  $Q$ , entrambi stimati tenendo conto della tipologia e caratteristiche costruttive di un edificio o gruppo di edifici.

La correlazione tra input sismico e danno atteso, in funzione dei parametri  $V$  e  $Q$ , è espressa in termini di una curva di vulnerabilità, descritta da una funzione analitica chiusa:

$$\mu_D = 2.5 \left[ 1 + \tanh \left( \frac{I + 6.25V - 13.1}{Q} \right) \right] \quad (1)$$

dove  $I$  rappresenta la pericolosità sismica descritta come un parametro continuo, valutata in termini di intensità macrosismica, secondo la scala macrosismica europea EMS-98 (Grunthal 1998) e rispetto a condizioni di suolo rigido;  $\mu_D$  è il danno medio atteso per il gruppo di edifici.

In funzione del danno medio  $\mu_D$  ( $0 < \mu_D < 5$ ) stimato dalla (1), la distribuzione di danno attesa su 5 livelli di danno ( $D_k$   $k=0 \div 5$ :  $D_1$  - leggero,  $D_2$  - moderato,  $D_3$  - grave,  $D_4$  - molto grave,  $D_5$  - distruzione, più l'assenza di danno  $D_0$  - nessun danno) viene ricavata utilizzando una forma discretizzata della funzione beta (Bernardini et al. 2007a, 2007b).

$$\begin{aligned} P(0) &= \int_0^{0.5} k(r, t) \cdot x^{r-1} (5-x)^{t-r-1} dx \\ P(k) &= \int_{k-0.5}^{k+0.5} k(r, t) \cdot x^{r-1} (5-x)^{t-r-1} dx \\ P(5) &= \int_{4.5}^5 k(r, t) \cdot x^{r-1} (5-x)^{t-r-1} dx \end{aligned} \quad (2)$$

con i parametri  $t$  e  $r$  definiti come:

$$\begin{aligned} t &= \frac{\mu_D(5.18 - \mu_D)}{\sigma_D^2} - 1 \\ r &= t \cdot \frac{\mu_D}{5} \end{aligned} \quad (3)$$

A partire dalla distribuzioni probabilistica sui cinque livelli di danno considerati per gli edifici, la probabilità di occorrenza delle conseguenze  $p_C$  attese su edifici (ad esempio probabilità e di avere edifici inagibili) e sulle persone (sfollati, morti e

feriti gravi), e le perdite economiche viene stimata combinando la probabilità di occorrenza di un certo grado di danno  $P(k)$  con un fattore peso  $w_{C,k}$  (Giovinazzi 2005):

$$p_c = \sum_k w_{C,k} P(k) \quad (4)$$

Per informazioni sui fattori  $w_{C,k}$  utilizzati in questo lavoro, si faccia riferimento a Giovinazzi (2008) e Giovinazzi et al. (2006), così come per le ipotesi fatte relativamente ai costi relativi di riparazione,  $C_r$  ( $0 < C_r < 1$ ), ai costi di riparazione  $C_R$  [€/m<sup>2</sup>], di miglioramento  $C_M$  [€/m<sup>2</sup>] e di nuova costruzione  $C_{NC}$  [€/m<sup>2</sup>], assunti per la valutazione delle perdite economiche dirette (riparazione e ricostruzione degli edifici danneggiati) e per la valutazione del costo di interventi di adeguamento/miglioramento sismico degli edifici.

## 2 PERICOLOSITA' SISMICA

### 2.1 Analisi deterministica della pericolosità

Per la valutazione della pericolosità deterministica nel Comune di Prato, è stato fatto riferimento, a due eventi storici, selezionati in base all'analisi delle aree sismogenetiche con sismicità risentita a Prato e degli eventi storici noti per la regione (Matassoni e Morelli 2001). La Tabella 1 riporta le coordinate dell'epicentro, la magnitudo  $M$ , e l'intensità macrosismica  $I_{MM}$  risentita nel Comune di Prato per due terremoti di scenario assunti.

Tabella 1. Caratteristiche dei terremoti storici assunti come terremoti di scenario per il Comune di Prato.

TERREMOTO	Lat.	Long.	M	$I_{MM}$
Valle del Bisenzio	43.900	11.120	4.7	VI-VII
Mugello	43.950	11.480	6.2	VI

La propagazione del moto sismico è stata descritta secondo la legge di attenuazione di Crespellani et al. (1992):

$$I_{MM} = 8.6 + 1.4M - 6.4 \ln(R + 14) \quad (5)$$

dove  $M$  è la magnitudo del terremoto di riferimento,  $R$  è la distanza sito-sorgente.

La legge di attenuazione Crespellani et al. (1992) è stata derivata dalla regressione statistica di campi macrosismici rilevati a seguito di eventi storici nella Regione Toscana, pertanto il suo utilizzo per il Comune di Prato è stato ritenuto particolarmente adeguato. La validità di tale legge è, peraltro, riconosciuta a livello internazionale nell'ambito del Manuale Internazionale per la Zonazione dei Rischi Geotecnici TC4 (1999).

E' importante sottolineare che nella legge di attenuazione Crespellani et al. (1992), l'intensità macrosismica,  $I_{MM}$  è valutata secondo la scala Mercalli Modificata, che corrisponde nella definizione dei gradi di intensità, alla scala macrosismica europea EMS-98 (Grunthal 1998),  $I_{EMS-98} = I_{MM} = I_{MSK}$ . L'intensità valutata dalla legge di attenuazione assunta, non tiene conto di possibili amplificazione del moto sismico dovute a condizioni di suolo. Queste sono state computate, tenendo in considerazione in modo congiunto, le caratteristiche del suolo e quelle del costruito (Par. 5.1).

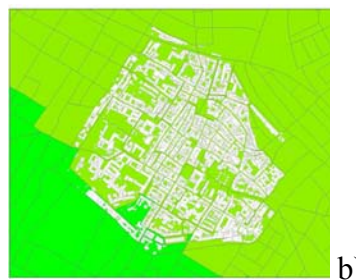
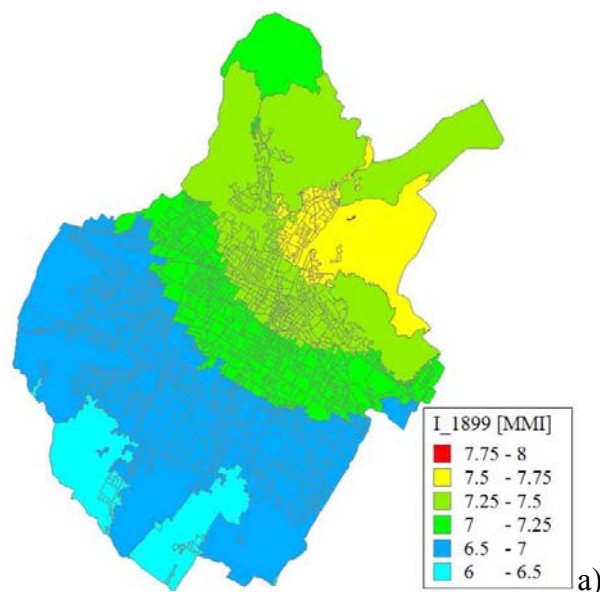


Figura 1. Campo Macrosismico per il terremoto Valle del Bisenzio 1899: a) Comune di Prato; b) nucleo storico.

Il campo macrosismico atteso per i due terremoti di scenario, è stato valutato implementando la legge di attenuazione (Equazione 5) all'interno dello strumento GIS, e valutando il parametro  $R$ , per ciascuna sezione censuaria, come distanza tra l'epicentro del terremoto e centroide del poligono che delinea i confini della sezione. Per il terremoto della Valle del Bisenzio è risultato un campo macrosismico variabile nell'intervallo di intensità  $I_{MM} = 6.3 \div 7.8$ , con il valore massimo computato in corrispondenza dell'epicentro, localizzato all'interno del territorio Comunale (Figura 1a).

L'intensità macrosismica per il terremoto del Mugello del 1919 è risultata più contenuta,  $I_{MM}=6.3\div 6.9$ . E' interessante notare come, per la zona del nucleo storico, sicuramente sviluppata negli anni di occorrenza dei terremoti storici assunti (Tabella 1), i campi macrosismici ottenuti dalla valutazione deterministica della pericolosità, siano risultanti coerenti con l'intensità risentita, come mostrato in Figura 1b per il terremoto della Valle del Bisenzio.

## 2.2 Analisi probabilistica della pericolosità

Per la rappresentazione della pericolosità sismica in termini probabilistici è stato fatto riferimento allo studio condotto di recente per ricavare una mappa della pericolosità sismica scientificamente aggiornata per tutto il territorio italiano (OPCM 3519, 2006). Come risultato di tale studio, effettuato ad opera dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, INGV, sono stati valutati e resi disponibili (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/>) i valori di accelerazione massima del suolo  $a_g$  riferita a suoli rigidi ( $V_{s30}>800$  m/s, ovvero cat. A, punto 3.2.1 del D.M. 14.09.2005), per otto valori di probabilità di eccedenza in 50 anni: 81%, 63%, 50%, 39%, 22%, 10%, 5%, 2% corrispondenti rispettivamente ai periodi di ritorno,  $T_r$ , di 30, 50, 72, 100, 200, 475, 975, 2475 anni.

La griglia di punti con passo 0.05 gradi rispetto alla quale i valori di  $a_g$  sono stati resi disponibili, e i valori di  $a_g$  (16°, 50° e 84° percentile) per gli otto diversi periodi di ritorno, sono stati importanti e georiferite nello strumento GIS utilizzato per lo studio. E' stata quindi eseguita un'operazione di interpolazione dei dati puntuali al fine di ottenere una rappresentazione continua della pericolosità. A titolo di esempio viene rappresentata in Figura 2 la mappa della accelerazione massima al suolo  $a_g$  (50° percentile) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, periodo di ritorno  $T_r=475$  anni.

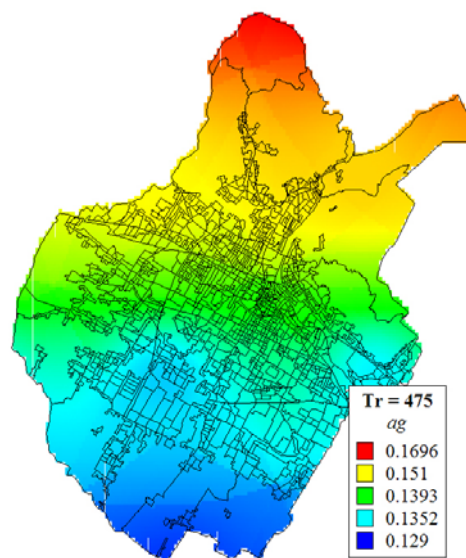


Figura 2. Accelerazione massima al suolo  $a_g$  con probabilità di eccedenza del 10% in 50,  $T_r=475$  anni.

## 3 MICROZONAZIONE SISMICA

Una mappa rappresentativa delle diverse classi di suolo identificabili nel territorio comunale è stata derivata con la finalità di tenere conto, nell'ambito dell'analisi, di possibili effetti di amplificazioni dovuti a particolari condizioni di sito. In termini di classificazione e caratterizzazione del suolo, è stato fatto riferimento alla classificazione prevista dalla ordinanza O.P.C.M. n. 3431 (2005), che rispecchia, identicamente, quanto prescritto nell'Eurocodice EC8 (CEN 2004). In entrambe le normative le stesse classi di suolo sono identificate in base ai valori assunti dai parametri: 1)  $V_{s30}$ , velocità media di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità al di sotto del piano di fondazione; 2)  $N_{SPT}$ , resistenza penetrometrica; e, 3)  $c_u$ , coesione non drenata.

La mappa delle classi di suolo è stata tracciata facendo esclusivamente riferimento a misurazioni precedentemente effettuate e a dati già disponibili per il Comune di Prato. In particolare è stato fatto riferimento a: 1) stima della frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo,  $f_{rp}$ , ottenuta per tutto il territorio del Comune processando secondo la tecnica dei rapporti spettrali tra componenti orizzontale e verticale del moto, H/V (Nakamura 1989), misure ambientali effettuate in diversi siti del Comune; 2) valori di resistenza penetrometrica  $q_c$ , stimati da prove CPT per 624 siti (Fiaschi et al. 2004).

Come primo passo del procedimento adottato, la mappa delle frequenze fondamentali di risonanza del sottosuolo  $f_{rp}$ , è stata digitalizzata e sovrapposta alla mappa delle sezioni censuarie in

modo da attribuire a ciascuna sezione un valore rappresentativo del parametro  $f_{rp}$ . Per ciascuna sezione censuaria è stata quindi stimata la velocità delle onde di taglio  $V_{S30}$ , in funzione del parametro  $f_{rp}$ , secondo la formula:

$$V_{S30} = \begin{cases} \frac{30}{4f_{pr} + \frac{(30-H)}{V_B}} & H \leq 30 \\ 4f_{pr} H & H > 30 \end{cases} \quad (6)$$

dove  $V_B$  è la velocità delle onde di taglio nel bedrock o bedrock-like, assunta pari a  $V_B=800$  m/s, in accordo con quanto previsto dall'OPCM 3431;  $H$  è la profondità del bedrock o bedrock-like stimata in base alle informazioni disponibili dagli studi di Capecchi et al. (1975) e di Matassoni e Morelli (2001). L'attendibilità dei risultati ottenuti con tale procedimento, è stata confermata dalla congruenza dei risultati ottenuti stimando lo stesso parametro  $V_{S30}$ , a partire dai valori di resistenza penetrometrica, (Equazione 7), per alcune sezioni di riferimento. In particolare, la velocità delle onde di taglio è stata valutata per ciascuno strato  $i$ -esimo di terreno in funzione dello spessore dello strato  $h_i$ [m], dei valori di resistenza penetrometrica  $q_{ci}$ [MPa] e dei coefficienti  $\alpha$  e  $\beta$  attribuiti in base alla litologia dello strato. L'operazione è stata ripetuta per gli  $N$  strati di terreno presenti nei 30 metri al di sotto del piano di fondazione.

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{\alpha_i q_{ci}^{\beta_i}}} \quad (7)$$

Facendo riferimento alla classificazione del suolo ai sensi dall'O.P.C.M. 3431(2005) e dall'EC8 (CEN 2004), in funzione dei valore di  $V_{S30}$  ottenuti dal procedimento sopra descritto, è stato possibile associare a ciascuna sezione censuaria una classe di suolo rappresentativa, (Figura 3). E' importante sottolineare che, nella realizzazione della mappa delle classi di suolo, è stato fatto riferimento alla sezione censuaria come unità minima di analisi, per ragioni di semplicità. Questo ha introdotto un certo grado di approssimazione nell'attribuzione della classe di suolo alle sezioni censuaria più estese che, vale la pena ricordare sono comunque le meno densamente edificate e popolate e quindi le meno significative al fine dell'analisi di rischio.

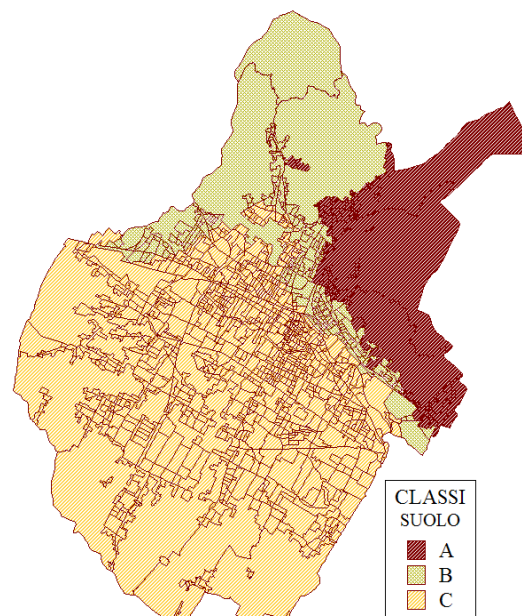


Figura 3. Mappa delle classi di suolo per il Comune di Prato.

#### 4 ANALISI DELL'ESPOSTO VULNERABILE

Il costruito esposto al rischio sismico nel Comune di Prato è stato identificato e caratterizzato a partire dai dati acquisiti durante il censimento della popolazione ISTAT (2001), ISTAT'01 che ha avuto come obiettivo, per la prima volta in Italia, anche quello di valutare la consistenza e le caratteristiche degli edifici abitativi.

Tabella 2. Dati ISTAT-01 utilizzati per la caratterizzazione degli edifici ad uso abitativo nel Comune di Prato.

Denominazione	Descrizione Attributi
Isolato/Aggregato	Edificio / complesso di edifici
Utilizzato/	utilizzato; non utilizzato (in
Abbandonato	costruzione); non utilizzato (rovina)
	abitazione; convivenza; albergo;
	ufficio; commercio industria;
Tipologia D'uso	telecomunicazione e trasporti; att.
	ricreative e sportive; scuola;
	ospedale; chiesa; altro
Contiguità	0 lati; 1 lato; 2 lati
Materiale	Muratura; CA; CA_pilotis; Altro
Epoca costruzione	<19; 19-45; 46-61; 62-71; 72-81; 82-91; >91
Conservazione	Ottimo; Buono; Mediocre; Pessimo
Piani Fuori Terra	1; 2; 3; 4; 5; 6; ≥ 7
Piani Interrati	presenza piani totalmente interrati;
	assenza piani totalmente interrati

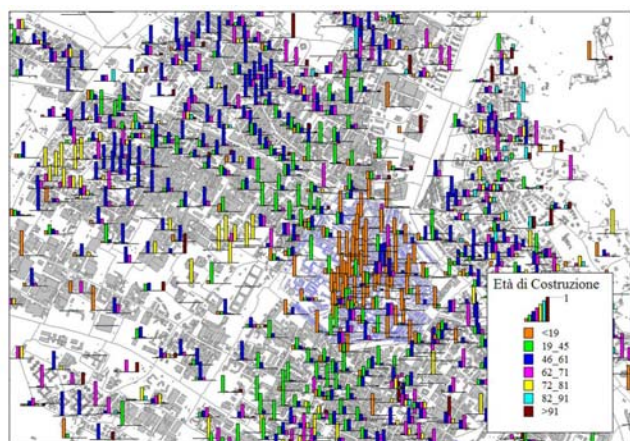
I dati ISTAT'01, elencati in Tabella 2, sono stati resi disponibili dall'amministrazione Comunale, per ciascuna sezione censuaria, sia come dati disaggregati che come dati parzialmente aggregati, secondo due diverse

combinazioni: 1) materiale, epoca di costruzione, stato di conservazione (56 combinazioni); 2) materiale, epoca di costruzione, piani fuori terra (112 combinazioni).

Come parte dello studio, i dati ISTAT'01, nella forma aggregata e disaggregata, sono stati georiferiti, associandoli alla sezione censuaria di competenza; diverse mappe sono state realizzate per visualizzare la distribuzione delle caratteristiche del costruito sul territorio (Figura 4).



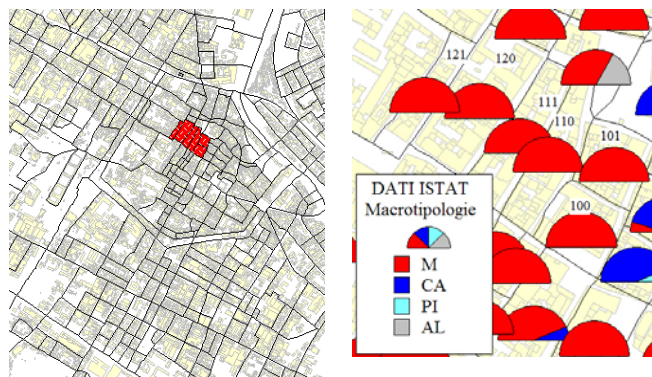
a)



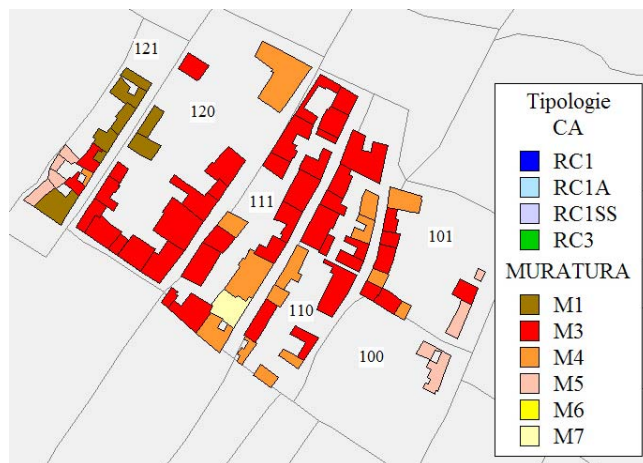
b)

Figura 4. Caratteristiche del costruito pratese nel centro storico del Comune: a) Materiale; b) Classi di età.

La consistenza e affidabilità dei dati ISTAT utilizzati per l'analisi a scala territoriale è stata verificata nell'ambito dell'analisi di secondo livello L2, con il rilievo sul campo di informazioni relative ai singoli edifici (Figura 5).



a)



c)

Figura 5. Verifica dei dati ISTAT'01 da analisi L2: a) sezioni rilevate nel centro storico; b) materiale costruttivo da ISTAT'01; c) tipologie costruttive da rilievo sul campo.

Dal confronto, è risultata una ragionevole coerenza tra i dati rilevati e i dati ISTAT; si sono comunque riscontrate differenze, a volte significative, nell'identificazione di tipologie più vulnerabili quali ad esempio edifici in cemento armato su pilotis e edifici realizzati in muratura, riconosciuti come altre tipologie o come edifici in cemento armato nel rilievo ISTAT. Di tali differenze è stato tenuto conto processando i dati ISTAT'01 ai fini della valutazione della vulnerabilità (Paragrafo 5).

Per la caratterizzazione della popolazione esposta al rischio sismico, il numero di persone residenti in ciascuna sezione censuaria è stati acquisiti dal censimento ISTAT01 e da quanto risultante all'ufficio anagrafe del Comune. E' importante sottolineare che il dato relative alla popolazione è stato fornito in modo non aggregato alle informazioni disponibili sul costruito. Ai fini della stima delle conseguenze attese sulla popolazione, è stato, pertanto, necessario avanzare delle ipotesi sulla distribuzione della popolazione nelle diverse tipologie costruttive.

## 5 VULNERABILITA' SISMICA DEL COSTRUITO

I dati ISTAT'01 hanno consentito di suddividere il costruito di Prato in macrotipologie costruttive identificate sulla base delle informazioni materiale costruttivo e epoca di costruzione. Come mostrato in Tabella 3 sono state identificate, cinque macrotipologie per gli edifici in muratura M, tre per gli edifici in cemento armato CA e per gli edifici su pilotis, PI, e tre per gli edifici riconosciuti, nell'ambito del rilievo ISTAT, come altre tipologie, AL.

Tabella 3. Macrotipologie di costruito identificate nel Comune di Prato in base a materiale e epoca di costruzione.

Macrotipologie	V	Macrotipologie	V		
I	M<19	0.78	VI	CA/PI<71	0.63
II	M=19-45	0.75	VII	CA/PI=71÷81	0.63
III	M=45-71	0.7	VIII	CA/PI >81	0.47
IV	M=71-81	0.63	IX	AL<19	0.72
V	M>81	0.56	X	AL=19-45	0.67
			XI	AL>81	0.55

A ciascuna macrotipologia è stato attribuito un valore dell'indice di vulnerabilità (Tabella 3) ipotizzando, in base alle informazioni rilevate sul campo nell'ambito dell'analisi L2, una distribuzione caratteristica delle tipologie costruttive (Giovinazzi et al. 2008). I dati ISTAT relativi al numero di piani e allo stato di manutenzione, aggregati alle informazioni età costruttiva e materiale (Par. 4), sono stati processati come modificatori di comportamento e hanno contribuito a rifinire il valore dell'indice di vulnerabilità valutato per ciascuna macrotipologia all'interno di ciascuna sezione censuaria. La Figura 6 rappresenta la mappa della distribuzione sul territorio della macrotipologia VI, edifici in CA < 71 e il valore dell'indice di vulnerabilità risultante in ciascuna sezione.

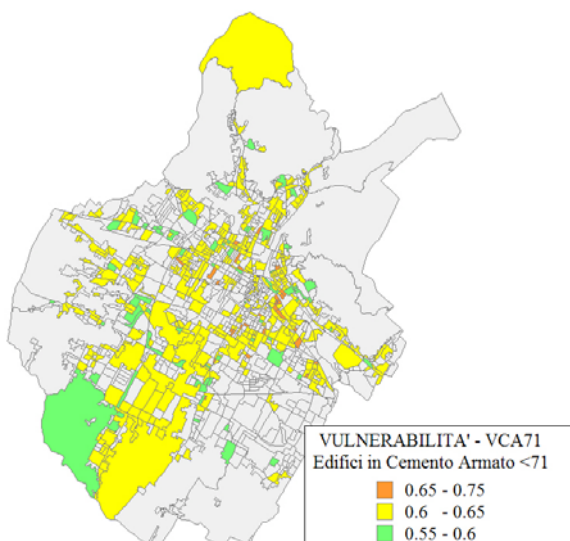


Figura 6. Mappa dell'indice di vulnerabilità per la macrotipologia edifici in cemento armato < 1971.

E' stato, quindi, valutato un valore dell'indice di vulnerabilità globale per ciascuna sezione censuaria, combinando i valori dell'indice di vulnerabilità ottenuti per le macrotipologie di costruito in base alla loro rilevanza all'interno della sezione stessa. La rappresentazione del valore assunto da tale indice (Figura 7) consente l'immediata visualizzazione e identificazione delle aree della città e delle sezioni censuarie con il costruito più vulnerabile.

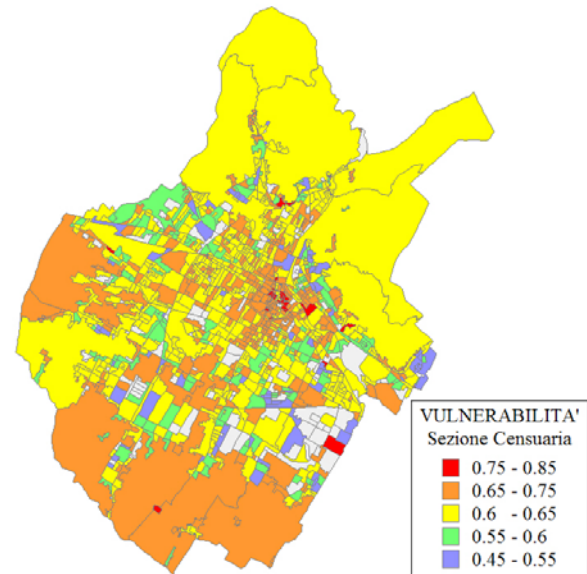


Figura 7. Mappa del valore dell'indice di vulnerabilità risultante per ciascuna sezione censuaria.

La validità delle ipotesi avanzate nella definizione dell'indice di vulnerabilità di base attribuito alle macrotipologie (Tabella 3) e nel processare i dati ISTAT al fine dell'analisi di vulnerabilità, è stata confermata dalla coerenza dei risultati ottenuti nelle valutazioni di vulnerabilità fatte nell'ambito dell'analisi L2 (Figura 8).

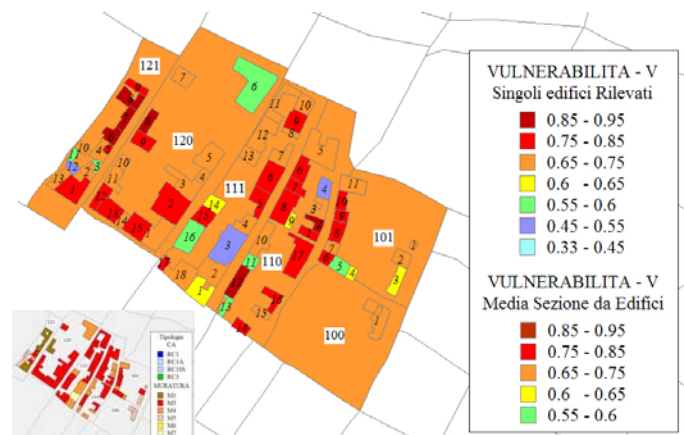


Figura 8. Confronto tra risultati ottenuti in termini di indice di vulnerabilità nelle analisi di livello L1 e L2.

### 5.1 Variazione dell'indice di vulnerabilità in funzione di suolo

L'utilizzo dell'intensità macrosismica per la rappresentazione della pericolosità sismica porta spesso a trascurare il computo di possibili effetti di amplificazioni dovuti a particolari condizioni di suolo o alla loro rappresentazione come incrementi locali del valore di intensità valutato alla roccia (TC4 1999). L'aumento indifferenziato dell'intensità per un certo tipo di suolo è, però, concettualmente scorretto, in quanto non consente di tenere in conto delle differenze nelle amplificazione dinamiche proprie del suolo e delle strutture. In questo lavoro è stato quindi scelto di considerare l'eventuale amplificazione dinamica connessa alle caratteristiche del suolo in termini di un modificatore dell'indice di vulnerabilità,  $\Delta V_s$  (Giovinazzi and Lagomarsino 2004), valutato in modo da tenere in considerazione in modo congiunto delle condizioni del suolo e delle caratteristiche del costruito.

Il parametro  $\Delta V_s$  è stato valutato per ciascuna sezione censuaria del Comune di Prato utilizzando da un lato i dati ISTAT'01 aggregati per materiale e numero di piani (sono state distinte tre classe di altezza, edifici bassi, medi e alti, diversamente definite per edifici in CA e Muratura,  $j=1\div 3$ ,  $i=1\div 3$ ) e dall'altro l'informazione sulla classe di suolo ottenuta secondo quanto descritto nel Par. 3:

$$\Delta V_s = \sum_{j=1}^3 (CA_j \Delta V_{s_{CA,j}} + AL_j \Delta V_{s_{AL,j}}) + \sum_{i=1}^3 M_i \Delta V_{s_{M,i}}$$

dove  $\Delta V_{s_{CA,j}}$ ,  $\Delta V_{s_{M,i}}$ ,  $\Delta V_{s_{AL,j}}$  sono parametri forniti nell'ambito del metodo macrosismico calcolati in funzione della classe di suolo ( $S= A, B, C, D$ ), della tipologia costruttiva ( $CA, M, AL$ ), della classe di altezza, e in coerenza con quanto prescritto dall'EC8, per terremoti di magnitudo  $M < 5.5$  e  $M \geq 5.5$ .

Gli incrementi dell'indice di vulnerabilità  $\Delta V_s$  valutati per il terremoto della Valle del Bisenzio,  $M=4.7$ , sono risultati variabili nell'intervallo  $\Delta V_s=0.07\div 0.09$  per quasi la totalità delle sezioni censuarie. La Figura 9 mostra i valori di  $\Delta V_s$  risultanti per il terremoto del Mugello,  $M=6.2$ , stimati variabili negli intervalli  $\Delta V_s=0.03\div 0.035$  e  $0.04\div 0.07$  per il 50% e per il 30% delle sezioni censuarie rispettivamente.

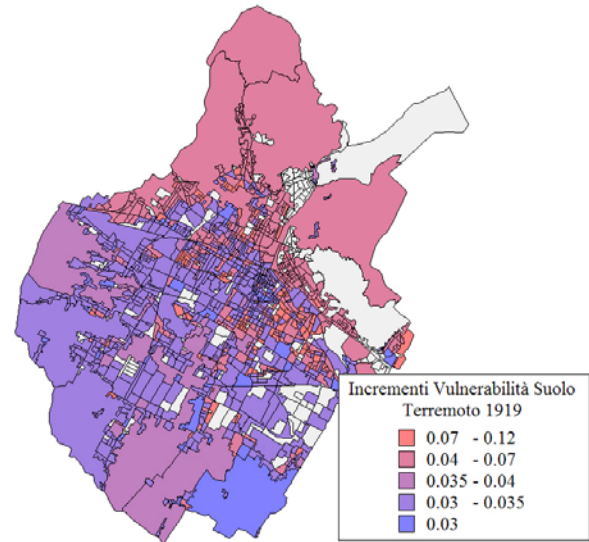


Figura 9. Incrementi dell'indice di vulnerabilità  $\Delta V_s$  valutati per il terremoto del Mugello, 1919.

Per tenere conto della ulteriore vulnerabilità aggiuntiva che particolari condizioni di suolo possono indurre nelle costruzioni, il parametro  $\Delta V_s$ , valutato per ciascuna sezione censuaria, è stato utilizzato per rifinire la valutazione dell'indice di vulnerabilità fatta in base alle sole caratteristiche del costruito (Par. 5).

## 6 SCENARIO DI DANNO

### 6.1 Danno e conseguenze stimate per i terremoti di scenario

Per i due terremoti di scenari assunti, il danno medio atteso  $\mu_D$  ( $\mu_D=0\div 5$ ) è stato stimato, secondo l'Equazione 1 per ciascuna sezione censuaria, in funzione del campo macrosismico risultante (Par. 2.1) e della vulnerabilità stimata per il costruito (Par. 5). La distribuzione di danno in termini di cinque gradi di danno  $D_1=D_5$  più assenza di danno  $D_0$ , è stata quindi valutata, per ciascuna sezione, in funzione di  $\mu_D$  secondo le Equazioni 2 e 3. La Figura 10 mostra la probabilità di occorrenza del danno  $D_5$ , corrispondente alla probabilità di collasso degli edifici per la zona del centro storico.

Sono stati, inoltre stimati il numero di edifici inagibili (Figura 11a), il numero atteso di sfollati (Figura 11b) oltre a quello di morti/feriti gravi. La Tabella 4 riporta un sommario dei risultati ottenuti in termini di conseguenze, e la stima delle perdite economiche dirette attese (riparazione/ricostruzione degli edifici danneggiati).



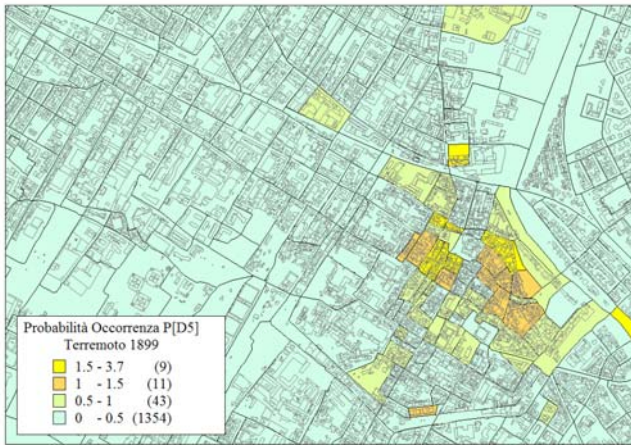


Figura 10. Probabilità di occorrenza del danno D5 per il terremoto di scenario Valle del Bisenzio, 1899.

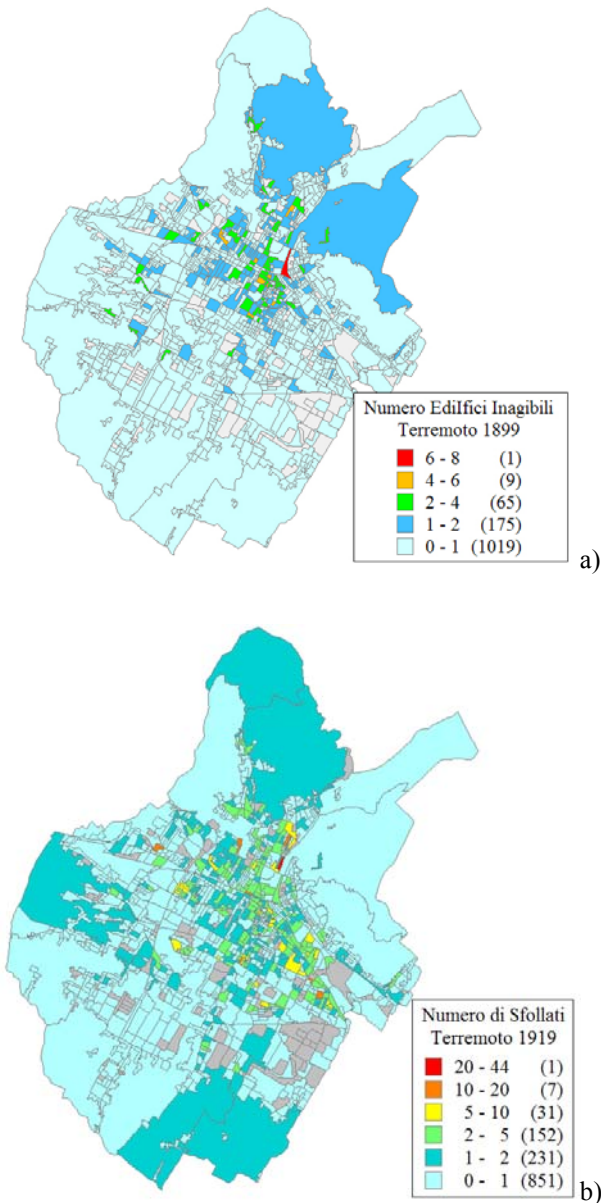


Figura 11. Numero di edifici inagibili attesi nel Comune di Parto, con riferimento al terremoto di scenario del 1899.

Tabella 4. Conseguenze stimate per i due terremoti di scenario assunti.

Terremoto	1899	1919
Collassi [%]	0.09	0.00
Inagibili [%]	3.97	0.71
Senzatetto [%]	4.05	0.84
Casualty [%]	0.03	0.00
Perdita Economica [M€]	811	361

## 6.2 Danno e conseguenze stimate per eventi attesi con diverso periodo di ritorno.

Al fine di stimare le conseguenze attese per eventi sismici diversi dai terremoti di scenario assunti, lo stesso approccio seguito per la stima degli scenari di danno deterministici è stato implementato facendo riferimento allo scuotimento atteso valutato in modo probabilistico per diversi periodi di ritorno (Par. 2.2). L'unità minima di analisi è stata, in questo caso, identificata con l'intero Comune, per il quale è stata valutata una vulnerabilità media comunale, combinando l'indice di vulnerabilità ottenuto per le diverse sezioni censuarie, in base all'entità e caratteristiche del costruito presente. Al fine dell'implementazione del modello macrosismico (Equazione 1), i valori medi di accelerazione  $a_g$  valutati per diversi valori di periodo di ritorno,  $T_r$ , sono stati tradotti in termini di intensità macrosismica, implementando la correlazione Guarenti e Petrini (1989), e trasformando le intensità secondo la scala EMS-98. La valutazione del danno medio  $\mu_D$ , della distribuzione di danno, delle conseguenze attese su persone e edifici e delle perdite economiche (Figura 12) ha quindi seguito l'approccio metodologico descritto nel Par. 1.1.

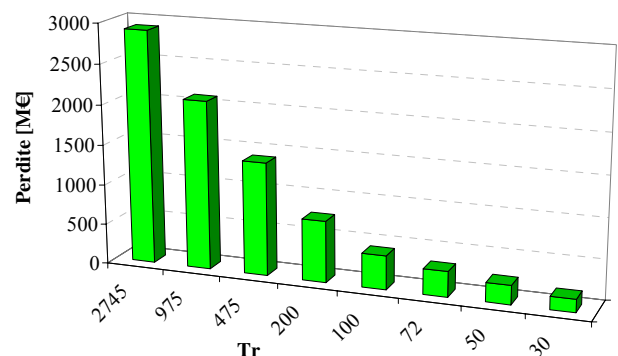


Figura 12. Perdite economiche dirette stimate per eventi attesi con diversi periodi di ritorno.

Vale la pena sottolineare che il procedimento descritto in questo paragrafo non deve essere confuso con i procedimento probabilistici

normalmente implementati per la stima delle perdite annuali attese, per i quali è richiesta la modellazione probabilistica di tutti i passi comunemente implementati nell'analisi di rischio.

## 7 ANALISI PER LA DEFINIZIONE DI STRATEGIE DI INTERVENTO

Di seguito viene fatto un breve accenno a come i risultati delle analisi sopra descritte possano essere utilizzate per informare gli amministratori locali e i funzionari di Protezione Civile al fine di supportare i processi decisionali finalizzati all'individuazione e messa a punto di strategie di mitigazione e gestione del rischio.

### 7.1 *Analisi Costi-Benefici*

Un'analisi costi benefici è stata realizzata facendo riferimento ai risultati dell'analisi deterministica, per analizzare i vantaggi in termini economici (valutati limitatamente a danno atteso per gli edifici, conseguenze sulle persone, e costi degli alloggi temporanei per gli sfollati) che si potrebbero ottenere realizzando interventi di riabilitazione finalizzati a raggiungere un diverso livello prestazionale, realizzati a larga scala (Giovinazzi et al. 2006) e implementata attraverso tecniche di rinforzo alternative (Pampanin and Christopoulos 2003).

In particolare, sono state valutate e paragonate cinque possibili strategie di intervento, ottenute combinando tre diverse tipologie di intervento:

1. *non intervento*, mantenere le condizioni esistenti dell'edificio, "As Built", AB;
2. *adeguamento sismico parziale*, "Partial Retrofit", PR;
3. *adeguamento sismico totale*, "Total Retrofit", TR.

con due diverse localizzazioni dell'intervento:

4. su tutti gli edifici  $CA < 71$ ;
5. sui soli edifici su pilotis  $PI < 71$ .

Nell'ambito del modello macrosismico assunto (Equazione 1.1.) l'effetto di interventi di rinforzo è stato rappresentato ipotizzando un aumento di resistenza, rigidità e spostamento ultimo per le tipologie costruttive tradotti in opportune variazioni dei valori degli indici di vulnerabilità, V e duttilità, Q (Giovinazzi et al. 2006), associati alle macrotipologie.

La Tabella 5 sintetizza i risultati ottenuti in termini di rapporto tra benefici e costi, valutati rispetto al valore attuale netto (con tasso di sconto assunto pari al 4%), nell'ipotesi dell'occorrenza di evento sismico, simile a quello

del terremoto Valle del Bisenzio, dopo 1 e 25 anni.

Tabella 5. Rapporto Costo/Benefici valutato per diverse strategie di rinforzo rispetto per un evento dopo 1 e 25 anni.

	Anni	CA < 71		PI < 71	
		PR	TR	PR	TR
B/C	25	0.12	0.11	1.38	1.33
	1	0.31	0.29	3.53	3.40

E' interessante notare (Tabella 5), come l'ipotesi di sottoporre a adeguamento sismico l'intero patrimonio costruttivo degli edifici  $CA < 71$ , appaia economicamente non conveniente sia nel caso di un intervento di rinforzo parziale, PR che totale, TR. Ulteriori criteri dovrebbero quindi essere considerati per giustificare questo tipo di intervento.

L'intervento limitato alle tipologie in cemento armato ritenute più vulnerabili,  $PI < 71$ , ha dimostrato, invece, di essere efficace anche considerando il solo criterio economico. E' interessante notare come, nonostante la maggiore convenienza risulti per l'intervento di rinforzo totale, TR, l'efficacia di un intervento di rinforzo parziale, PR appare comunque ampiamente confermata. Occorre tenere presente che la riduzione del rischio fornita da un intervento di rinforzo totale, TR rispetto a quanto ottenibile con un intervento di rinforzo parziale, PR può apparire spesso non giustificabile e non sostenibile da un punto di vista di investimento economico richiesto e risorse fisiche necessarie per realizzare l'intervento, soprattutto quando si decide di intervenire a larga scala. La realizzazione di un intervento di rinforzo parziale, PR adeguatamente localizzato sulle strutture più vulnerabili appare una strategia economicamente sostenibile e al tempo stesso vantaggioso per il Comune di Prato.

### 7.2 *Analisi Multicriteria*

Al fine di tenere in considerazione ulteriori criteri rispetto al solo criterio economico per l'identificazione di strategie di mitigazione e gestione del rischio, è stata discussa con il Comune di Prato la possibilità di sviluppare come passo successivo allo studio effettuato, una analisi multicriteria.

A tal fine sono stati individuati undici criteri raggruppati secondo tre obiettivi principali (Giovinazzi e Pampanin 2007) volti a garantire la riduzione del rischio sismico, prima, durante e dopo l'evento tramite: 1) mitigazione del rischio, realizzando un intervento di adeguamento sismico

sostenibile; 2) gestione efficace dell'emergenza; 3) ricostruzione resiliente nella malaugurata occorrenza di un evento.

La priorità dei criteri individuati e la valutazione delle diverse possibili strategie di rinforzo rispetto agli stessi criteri verrà valutata per il Comune di Prato risolvendo un problema decisionale a criteri multipli e spaziale. Il risultato delle analisi dipenderà, quindi dalla distribuzione spaziale dei danni stimati, risultante dalle analisi di scenario svolte (Paragrafo 6) e dalle risorse disponibili per la gestione dell'emergenza e per la ricostruzione, per le quali sono già state acquisite localizzazione e informazioni necessarie (Figura 13).

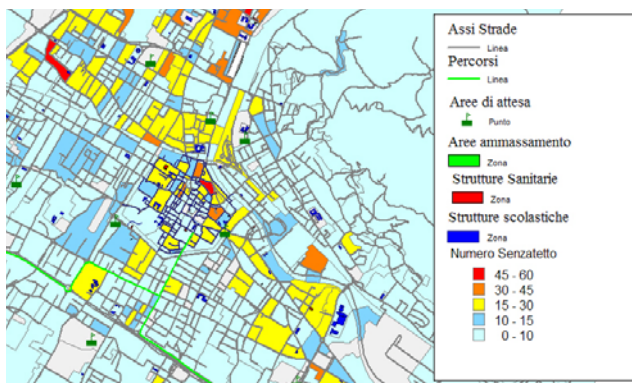


Figura 13. Mappa delle conseguenze attese e delle risorse disponibili da utilizzarsi nell'analisi multicriteria.

## 8 CONCLUSIONI

L'analisi di pericolosità, esposizione vulnerabilità del costruito e valutazione delle conseguenze e del danno per diverse ipotesi di terremoto, operata in questo studio, ha avuto la finalità quella di fornire un supporto informativo alla definizione di politiche di gestione e mitigazione del rischio sismico per il Comune di Prato. Tenendo conto di tale obiettivo, i risultati ottenuti in ciascuna fase dello studio sono stati riportati nella forma di un rapporto tecnico e in termini di mappe digitalizzate immediatamente fruibili da parte degli amministratori locali e dei funzionari di Protezione Civile. Analisi costi-benefici e analisi multicriteria, realizzate con riferimento ai risultati ottenuti dalle analisi di scenario, sono state inoltre realizzate a supporto del processo decisionale, per comparare diverse possibili strategie di intervento e individuare i vantaggi non solo economici che potrebbero risultare per il Comune dalla loro implementazione. I risultati ottenuti nell'ambito

di questo verranno parzialmente pubblicate nel sito web del Comune per informare la popolazione e aumentare la consapevolezza relativamente alla possibilità di mitigare il rischio sismico.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bernardini A., Giovinazzi S., Lagomarsino S., Parodi S., 2007a. Implicit Damage Probability Matrixes in the EMS-98 European Macroseismic Scale. *Proc. of 12th Italian Conference on Earthquake Engineering, Italy*.
- Bernardini A., Giovinazzi S., Lagomarsino S., Parodi S., 2007b. Vulnerability and damage assessment at a territorial scale according to a macroseismic approach coherent with EMS-98 European Macroseismic Scale. *Proc. of 12th Italian Conference on Earthquake Engineering, Italy*.
- Capecchi F., Guazzone G., Pranzini G. (1975). Il bacino lacustre di Firenze-Prato-Pistoia: geologia del sottosuolo e ricostruzione evolutiva. *Boll. Soc. Geol. It.*, **94**, 637-660.
- CEN Comité Européen de Normalisation, 2004. *Eurocode 8: Design of Structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Pr-EN 1998-1, Brussels.
- Crespellani T., Vannucchi G., Zeng X., 1992. Seismic Hazard Analysis in the Florence Area. *European Earthquake Engineering*, **3**.
- Crespellani T., a cura di 1999. *Ingegneria geotecnica nelle aree sismiche*, CISM, Udine, 507 pp.
- Fiaschi et al. 2004. Studio di Microzonazione Sismica del Comune di Prato. Fase II. Valutazione degli effetti di sito, Istituto Geofisico Toscano Rapporto Tecnico.
- Giovinazzi S. e Lagomarsino S. (2004). A Macroseismic Method for the Vulnerability Assessment of Buildings. *Proc. of 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada.
- Giovinazzi S. 2005. *The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis*, Ph.D Thesis of the doctoral course "Risk Management on the built environment" jointly organized by University of Florence (I) and TU-Braunschweig (D).
- Giovinazzi S., Pampanin S., Lagomarsino S., 2006. Alternative Retrofit Strategies for pre' 70 buildings: vulnerability models and a damage scenarios. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. Geneva, Switzerland, September, 2006.
- Giovinazzi S. and Pampanin S., 2007. Multi-criteria approaches for regional earthquake retrofit strategies. *8th Pacific Conference on Earthquake Engineering*. Singapore.
- Giovinazzi S. Fiaschi A., Matassoni L., 2008. *Studio di Microzonazione Sismica del Comune di Prato, Fase III - Analisi della vulnerabilità degli edifici*. Prato Ricerche - Istituto per la ricerca ambientale e la mitigazione dei rischi. Rapporto Tecnico.
- Grunthal, G. 1998. *European Macroseismic Scale 1998*. Luxembourg: Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie.
- Guagenti, E. e Petrini, V. (1989). Il caso delle vecchie costruzioni: verso una nuova legge danni-intensità. *Atti 4° Convegno Nazionale di Ingegneria Sismica*, Milano, vol. I, 145-153.

- ISTAT 2001. 14° *Censimento Generale della Popolazione 1991 – Istituto Nazionale di Statistica*. Roma.
- Lagomarsino S. and Giovinazzi S., 2006. Macroseismic and Mechanical Models for the Vulnerability assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering, Special Issue "Risk-Use Project"*, **4** (4).
- Matassoni L. e Morelli M. (2001). *Studio di Microzonazione Sismica del Comune di Prato. Fase I: Inquadramento macrosismico*, Istituto Geofisico Toscano. Rapporto Tecnico.
- Nakamura Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimates of subsurface using microtremor on the round surface, *QR of RTRI*, 30, 25-33.
- O.P.C.M. 3274, 2003. Ordinanza del presidente del consiglio dei ministri del 20/03/2003-n.3274. Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.
- O.P.C.M. 3431, 2005. Ordinanza del presidente del consiglio dei ministri del 03/05/2005 n.3431. Ulteriori modifiche ed integrazioni all'ordinanza del presidente del consiglio dei ministri n.3274 del 20 marzo 2003, recante "primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica"
- O.P.C.M. 3519, 2006. Ordinanza del presidente del consiglio dei ministri del 28/04/2006 n.3519. Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e aggiornamneto degli elenchi delle medesime zone.
- Pampanin, S., Christopoulos, C. 2003. Non-invasive Retrofit of Existing RC Frames Designed for Gravity Loads only, paper n. 170, fib2003 Symp. Concrete Struct. in Seismic Regions, Athens.
- TC4-ISSMFE (1993; revised 1999) *Manual for Zonation on seismic Geotechnical Hazards*. Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering. Japanese Society of Soil Mechanics and Fondation Engineering.