



Isolamento sismico a grande scala per la salvaguardia del tessuto urbano nella ricostruzione post-sisma

Alessandro Fulco^a, Fabrizio Comodini^b, Marco Mezzi^a

^a Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Via G.Duranti 63, 06125 Perugia.

^b Facoltà di Ingegneria, Università eCampus, Via Isimbardi 10, 22060 Novedrate, Como

Keywords: Seismic isolation; ground isolation; preservation; urban texture; post-earthquake reconstruction

ABSTRACT

After a seismic event, the observation of the consequences to buildings and infrastructures always highlights extensive damage in ancient or historical district of the hit towns. Damage depends not only on the local amplification of the seismic action, but also on the quality of the materials and the construction technique. The negative consequences of traditional design and construction approaches appeared in all their negative evidence in all areas of Central Italy affected by recent seismic sequences of medium intensity (M5-M6) in 2016-17. Now the reconstruction should solve the problem to rebuild with safety but preserving the historical aspect of buildings and landscape. This paper proposes a particular application of the known technique of seismic isolation for the integral seismic protection of entire urban quarter or entire small centers characterized by building of different characteristics also significantly irregular. The adoption of seismic isolation systems at village or quarter scale involves the construction of large floating slabs, supported by seismic isolators and/or dampers, above which to construct buildings that can present the aesthetic and constructive characteristics of the collapsed traditional ones. These large slabs could have the size of entire compartments (hundreds of meters on each side). Solution of ground isolation have already been implemented in various countries to isolate complex of buildings.

The solution allows a correct interpretation of the objective to rebuild "as it was, there where it was", safeguarding the landscape, prolonging the lifetime, and saving the expected cost. The paper illustrates a case study related to a quarter of a historic town in central Italy and shows the constructive solutions.

1 INTRODUZIONE

Molte delle aree del territorio italiano caratterizzate da una elevata pericolosità sismica comprendono centri abitati costituiti da edifici storici e soprattutto aventi una valenza storica nella loro interezza. In genere alla rilevanza storica, associata come detto all'insieme di edifici che li costituiscono ed alla loro struttura urbana, si accompagna una significatività anche sociale in quanto la popolazione riconosce come elemento fondante della propria aggregazione e compattezza, nonché come segno identificativo della propria identità, proprio la struttura urbana nel suo complesso, nonché i singoli componenti che la costituiscono, anche se singolarmente possono non avere una rilevanza architettonica.

Nella quasi totalità dei casi gli edifici che costituiscono le realtà di cui si parla sono caratterizzati da una elevata vulnerabilità sismica dovuta a ben note molteplici cause: la povertà dei materiali e degli apparecchi costruttivi originari, trattandosi sempre o quasi di edilizia spontanea; la carenza o assenza di dettagli e di presidi sismo-resistenti; il degrado dei materiali ed il

danneggiamento associati alla vetustà delle costruzioni ed alle vicissitudini subite nell'arco della vita, nonché alla assenza o inadeguatezza o nocività degli interventi manutentivi.

La elevata vulnerabilità, insieme con la pericolosità sismica delle aree di insediamento determina un elevato rischio di conseguenze negative in occasione del verificarsi di terremoti (Comodini et al. 2017). Anche in occasione degli ultimi gravi eventi sismici che hanno colpito l'Italia, quali il terremoto de L'Aquila del 2009 ed il terremoto dell'Italia Centrale del 2016-2017, si sono verificati gravi ed estesi danneggiamenti dei centri abitati storici delle aree colpite, in molti casi con la distruzione pressoché totale di interi centri o di interi quartieri (EERI 2009). Esempi emblematici sono costituiti dal centro abitato di Onna rimasto ampiamente distrutto in occasione del terremoto de L'Aquila del 2009, dai piccoli centri abitati di Arquata del Tronto e Castelluccio di Norcia, praticamente rasi al suolo rispettivamente nel primo (24 agosto 2016 M=6,0) e nel terzo (30 ottobre 2016 M=6,1) maggiore evento della sequenza sismica dell'Italia centrale del 2016-17. Soprattutto si ricorda il centro storico

della città di Amatrice significativamente danneggiato nella prima forte scossa della stessa sequenza e definitivamente raso al suolo nella seconda forte scossa del 26 ottobre 2016 (M=5,4 e 5,9) (Mazzoni et al. 2018).

In occasione di questi accadimenti si mette tipicamente in moto la "macchina della ricostruzione" e si ripropone, altrettanto tipicamente una problematica usuale che riguarda i principi che devono guidare la ricostruzione. In particolare la domanda che viene riproposta riguarda l'opportunità di ricostruire "lì dov'era, così com'era" oppure se non sia invece più opportuno ricostruire con diverse configurazioni strutturali o addirittura ricostruire in siti diversi, delocalizzando i vecchi centri abitati.

In considerazione della valenza storica, culturale, ma soprattutto sociale che questi centri storici rivestono, come detto in precedenza, la questione del dove e come ricostruire rappresenta un aspetto decisivo. C'è da dire che, proprio per i motivi esposti, molto spesso si è proceduto a ricostruire "lì dov'era" e con modalità non molto dissimili dal "come era". Purtroppo, l'impiego di materiali ed apparecchi costruttivi, migliorati, ma non dissimili da quelli originari, fa sì che la vulnerabilità sismica degli insediamenti ricostruiti risulti migliorata in modo non decisivo, e comunque tale da determinare danni importanti, pur assicurando la sostanziale salvaguardia delle vite umane, nei successivi terremoti, con la necessità di nuovi importanti interventi e la dislocazione degli abitanti.

Proprio in occasione dell'ultima sequenza di terremoti dell'Italia Centrale del 2016-17 gli autori, prendendo spunto dall'applicazione di nuove tecniche di isolamento sismico del terreno (ground isolation o artificial ground), avanzavano la proposta di ricostruire "lì dov'era, così com'era", addirittura con tecniche costruttive pienamente tradizionali, quali la muratura non armata, realizzando le nuove costruzioni su piattaforme isolate sismicamente aventi le dimensioni dell'intero centro abitato, quando costituito da una estensione limitata, o di interi comparti urbani, nel caso di cittadine di estensione più rilevante.

Nel presente lavoro la proposta viene sviluppata valutandone i principali aspetti di fattibilità tecnico-economica:

- compatibilità del tessuto urbano;
- tecnologie costruttive;
- prestazione sismo-resistente della soluzione;
- analisi costi/benefici.

2 IL "GROUND ISOLATION"

Diversi sono gli esempi isolamento sismico su larga scala nel mondo (Zhou et al. 2004), (Martelli et al. 1999). In particolare l'utilizzo di grandi piastre isolate è stata diretta conseguenza della necessità di combinare la prestazione sismica richiesta alle dimensioni significative funzionali per l'utilizzo dell'opera. Principalmente tali soluzioni sono state adottate per complessi ospedalieri e campus industriali e di ricerca.

In Turchia è stato realizzato nel 2011 l'ospedale di Adana con oltre 1.550 posti letto e una superficie coperta di 550.000 m². La sovrastruttura è fondata su una piastra collegata a 1.512 isolatori sismici a pendolo ed è oggi ritenuta la struttura ospedaliera sismicamente isolata più grande al mondo.

In Italia è stato realizzato l'Ospedale del Mare a Napoli isolato sismicamente mediante 327 dispositivi elastomerici su un sedime planimetrico di circa 25.000 m².

In California, Apple ha inaugurato il suo nuovo centro di produzione Campus2 a Cupertino, California. L'intera area misura 780.000 m² comprensivi di verde, mentre la costruzione ne occupa oltre 400.000. La struttura poggia su oltre 700 isolatori a pendolo di nuova generazione.

3 INDIVIDUAZIONE DEL SITO

Per l'individuazione di un sito favorevole per la fattibilità di una ricostruzione su piattaforma sismicamente isolata, sono state valutate le situazioni di alcuni centri abitati gravemente danneggiati negli eventi sismici del 2016-17, in cui risultasse evidente la necessità di una ricostruzione totale.

I centri oggetto di approfondimento sono stati Amatrice ed Accumoli nel Lazio, Arquata del Tronto e Pescara del Tronto nelle Marche, Castelluccio di Norcia in Umbria. In ognuno dei siti è stata individuata l'area urbana del centro storico su cui considerare l'intervento di isolamento sismico.

È stata condotta una valutazione prendendo in considerazione più aspetti: morfologia del terreno, numero di abitanti, ampiezza della zona di intervento, livello di informazioni disponibili, livello di danno, numerosità di edifici di importanza storico-culturale presenti. In definitiva è risultato come le condizioni maggiormente favorevoli siano quelle del centro storico di Amatrice.

La Tabella 1 mostra un riepilogo dei principali parametri considerati per ognuno dei centri urbani indagati

Tabella 1 Riepilogo dei parametri di scelta per l'area del caso studio

Comune	Pendenza media %	Area di intervento m ²	Abitanti n°
Castelluccio (PG)	22	34333	120
Arquata del Tronto (AP)	25	10990	1137
Pescara del Tronto (AP)	19	14270	137
Accumoli (RI)	18	20820	670
Amatrice (RI)	5	18690	1100

All'interno del centro storico di Amatrice è stata individuata un'area di estensione pari a circa 19000 m² caratterizzata da una pendenza media pari al 5,00% e dalla presenza di 1100 abitanti. L'area (Figura 1) è di forma irregolare con dimensioni di 230 x 100 m circa ed è individuata dalle principali strade che attraversano il centro storico: i lati lunghi del comparto sono delimitati da Corso Umberto I, via San Francesco e via Garibaldi, mentre i lati corti da via Madonna della Porta e via dei Tiratori. Prima degli eventi sismici del 2016 il comparto comprendeva aggregati in muratura aventi 1, 2 e 3 piani fuori terra, che coprivano per il 70% l'area di sedime con una volumetria totale di 97000 m³. La Tabella 2 riporta il dettaglio di aree e volumi degli edifici presenti.



Figura 1 Rilievo planimetrico dell'area oggetto di studio prima degli eventi sismici del 2016

Tabella 2 Aree e volumi degli edifici presenti nel comparto

Piani (h=3 m)	Area sedime m ²	Area di calpestio m ²	Volume m ³
1	700,70	700,70	2102,10
2	5128,70	10257,40	30772,00
3	6777,10	20331,30	60994,00
5	175,40	877,00	2630,70
Totale	12780,90	32166,40	96498,80

Ai fini della valutazione della fattibilità tecnica dell'intervento si considerano i seguenti aspetti (Mezzi et al. 2013) (Comodini et al. 2011) (Mezzi et al. 2011) graficamente identificati nella Figura 2:

- scavi e definizione delle quote
- fondazione e sottostruttura
- sistema di isolamento
- piastra isolata
- impianti e sotto-servizi
- opere di compensazione delle quote
- ripristino del tessuto urbano

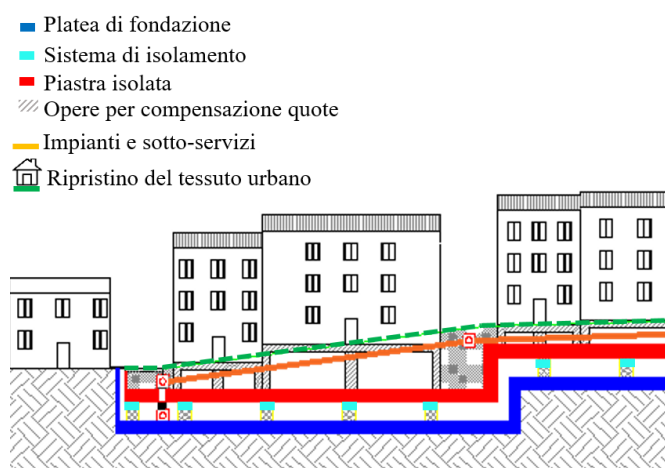


Figura 2 Schema di intervento

La massa complessiva delle costruzioni interessate dall'intervento risulta - sulla base dei dati della Tabella 2 ed assumendo una massa unitaria di 1,5 t/m² (edifici in muratura) - pari a circa 50000 t. L'area di sedime degli edifici è di 12781 m², quindi il carico unitario da isolare è pari a 39,12 t/m².

4.1 Quote altimetriche e volumi di scavo

Al fine di realizzare una ricostruzione equivalente a quella pre-sisma, uno dei principali aspetti da trattare è quello delle quote altimetriche. Le quote delle costruzioni vengono mantenute, in maniera da evitare incongruenze nelle zone di confine tra il comparto isolato e il contesto fisso. La piastra isolata deve essere organizzata a gradoni su un numero limitato di quote sfalsate in corrispondenza delle quali raggruppare il più largo numero di edifici. Nel caso studio sono state adottate quattro quote di riferimento che mediano il massimo dislivello di 8,50 m tra la zona sud-ovest e la zona nord est. Le quote di scavo (Figura 3) per la realizzazione della fondazione e della sottostruttura seguono lo stesso andamento: la distanza tra la quota scavo e l'estradosso della piastra isolata è pari a 3,50 m. Si assume come quota di riferimento la minima quota di scavo

corrispondente ad una quota topografica di 935,00 m slm. Complessivamente risultano circa 150000 m³ di scavo.

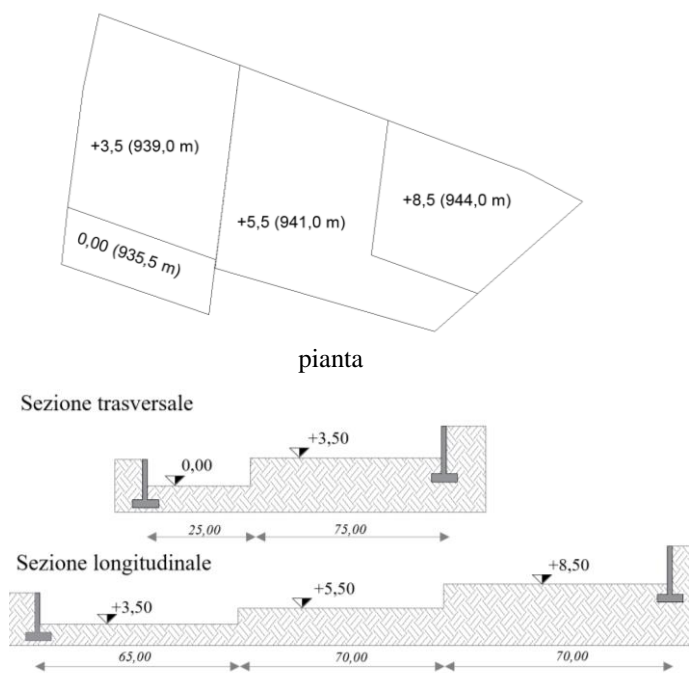


Figura 3 Pianta e sezioni degli scavi

4.2 Fondazione e sottostruttura

La fondazione è superficiale, a platea in c.a. di spessore 0,90 m. Al di sopra sono previsti pilastri con sezione di 1,20 x 1,20 m alla sommità dei quali sono installati gli isolatori. Lo spazio tra l'estradosso della fondazione e l'intradosso della piastra isolata (Figura 4) è pari a 1,60 m, utilizzato per le operazioni di ispezione e manutenzione e per il posizionamento degli impianti sotterranei (pompe di calore per gli impianti geo-termici, sistemi di smaltimenti delle acque superficiali, cablaggi di sistemi hi-tech di "smart city").

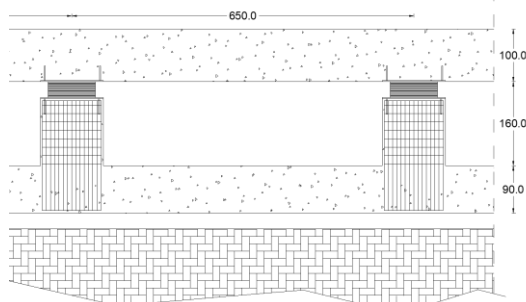


Figura 4 Schema della sottostruttura

4.3 Piastra isolata

La piastra isolata è alta un metro e presenta il medesimo sviluppo a gradoni adottato per lo scavo. In Figura 5 sono riportate la vista assonometrica e le sezioni schematiche trasversali e longitudinali della piastra isolata, sono

evidenziate le quote altimetriche sul livello del mare e le quote relative rispetto a quella minima di scavo posta a 0,00 m.

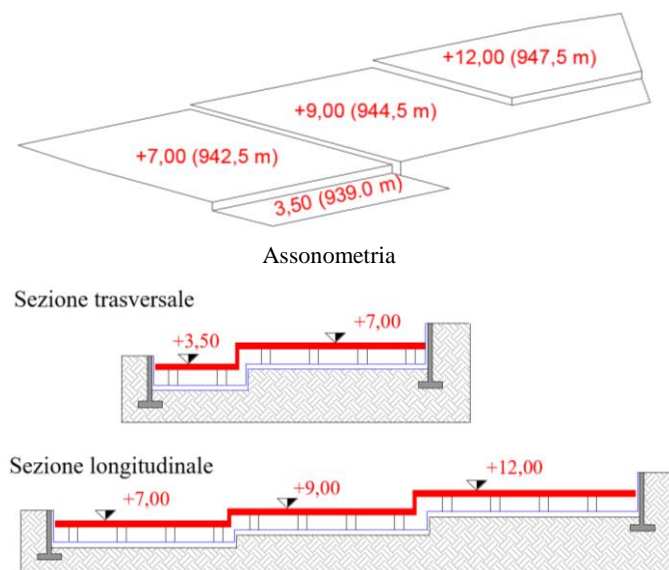


Figura 5 Vista assonometrica e sezioni della piastra isolata

Il pre-dimensionamento della piastra fa riferimento ad una porzione di forma quadrata di 50 metri di lato supportata da appoggi disposti su una maglia quadrata di 6,5 metri di lato sulla quale agiscono i seguenti carichi:

- sovraccarico permanente $G_2 = 20 \text{ kN/m}^2$
- sovraccarico accidentale $Q = 50 \text{ kN/m}^2$

I carichi sono stimati in considerazione della sovrastruttura prevista, costituita dagli edifici e dal riempimenti utili per la definizione del piano campagna. Le verifiche di norma (flessione, taglio, punzonamento) sono soddisfatte adottando quantitativi di armatura pari al 2,00 % in volume.

4.4 Disposizione degli isolatori

Gli isolatori si assumono disposti secondo una maglia di 6,50 m di lato, compatibile con la capacità portante della piastra isolata rispetto ai carichi verticali. Risulta un numero totale di dispositivi pari a 560. La Figura 6 mostra la pianta dei dispositivi

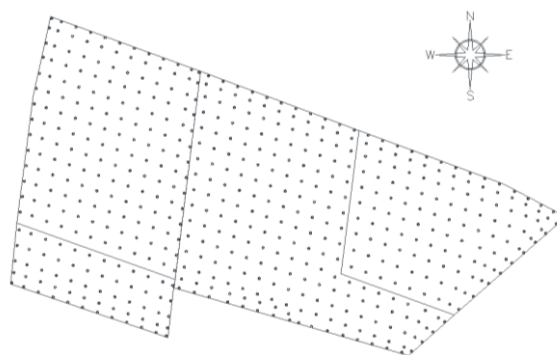


Figura 6 Pianta dei dispositivi di isolamento

4.5 Aspetti impiantistici e funzionali

Per il corretto funzionamento dell'opera non si può prescindere dalle infrastrutture necessarie alla vita residenziale del quartiere. Tali infrastrutture, solidali con il comparto isolato dovranno essere connesse ad una rete di base solidale al suolo "fisso", infatti non risulta economicamente compatibile la localizzazione di servizi e infrastrutture destinati al solo quartiere isolato, comunque di modeste dimensioni rispetto a quelle dell'intero centro abitato di cui fa parte. Le connessioni tra la porzione isolata e quella fissa verranno realizzate con sistemi flessibili (Figura 7), compatibili con gli spostamenti di progetto allo Stato Limite di Collasso (SLC). Ciò rientra nel concetto di "danno quasi-zero" che di fatto caratterizza la filosofia del progetto. Infatti in caso di evento sismico, non solo le costruzioni risultano esenti da danni ma l'intero quartiere mantiene inalterata la propria funzionalità.



Figura 7 Sistemi di collegamenti impiantistici di tipo flessibile negli interventi di isolamento sismico alla base

Lo spessore dello strato non strutturale al disopra della piastra isolata da destinare agli impianti è determinato dalla tipologia di reti impiantistiche presenti. Queste comprendono: rete di adduzione idrica, rete fognaria, rete elettrica, fibra ottica e telefono, rete gas.

Per quello che riguarda le acque (bianche/nere) in uscita dalle abitazioni, si prevedono tubazioni di raccolta dei discendenti provenienti da ogni singola abitazione che convergono nel punto più basso della piastra dove sarà presente una tubazione flessibile discendente verso la porzione "fissa" al di sotto del comparto isolato.

È stata ipotizzata una rete che parte dal punto più alto della piastra a Nord-Est per poi confluire verso il punto più basso della stessa, situato in corrispondenza dell'angolo Sud-Ovest, in via San Francesco sfruttando le pendenze naturali del piano campagna. Le tubazioni sono tipicamente non in pressione quindi si progetta con un grado di riempimento massimo del 50% e per velocità di movimento all'interno delle tubazioni comprese tra 0,5 m/s e i 2 m/s. Per il dimensionamento delle tubature sono state anche considerate la richiesta media giornaliera/abitante, i coefficienti di deflusso, le perdite e le dispersioni. Si sono

pertanto adottati diametri delle tubazioni pari a 200 mm per le acque nere e 300 mm per le acque bianche. Le condotte di adduzione sono state poste ad una quota più alta in maniera da limitare interferenze con i restanti sistemi. Sono stati inoltre considerati gli strati di regolarizzazione in sabbia avente spessore compreso tra i 10 e i 15 cm, e ulteriori strati di separazione in terreno naturale quantificabile in ulteriori 15-20 cm destinati a ricoprimento per gli impianti sottostanti e da strato di appoggio per quelli superiori fino alle condotte di adduzione dell'acqua potabile. Infine un ultimo ricoprimento è costituito dal sottofondo della pavimentazione stradale di spessore 20 cm. Complessivamente si ottiene un pacchetto di spessore totale pari a 1,70 m. In Figura 8 è illustrata una sezione schematica relativa allo strato di ricoprimento della piastra isolata destinato alla localizzazione degli impianti.

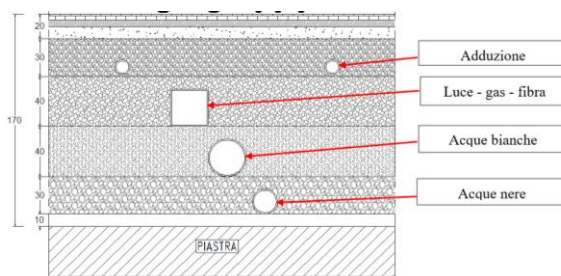


Figura 8 Strati superficiali destinati alla rete impiantistica

4.6 Ripristino del tessuto urbano

Il tessuto urbano è ricostituito in maniera uguale a quello pre-esistente agli eventi sismici del 2016-17 secondo il concetto "dov'era, com'era".

Definita la superficie topografica del terreno, è stato costruito un modello tridimensionale comprendente il corretto posizionamento planovolumetrico degli edifici (Figura 9). La disposizione dei fabbricati è da ritenere comunque flessibile, in quanto come successivamente mostrato, questa non influenza in maniera significativa la risposta dinamica del sistema. Lo spazio vuoto che resta tra l'estradosso della piastra e la superficie del terreno (al netto dello strato da 1,70 m dedicato agli impianti) viene compensato con materiale di riporto laddove non sono presenti edifici e con elementi scatolari rigidi in cemento armato di compensazione al di sotto degli edifici. Tali volumi non hanno una definizione funzionale ma potrebbero essere comunque utilizzati come seminterrati.

La Figura 10 mostra le sezioni schematiche trasversali e longitudinali dello sviluppo dell'intervento fino al ripristino della quota "urbana" pre-esistente (evidenziata in verde).

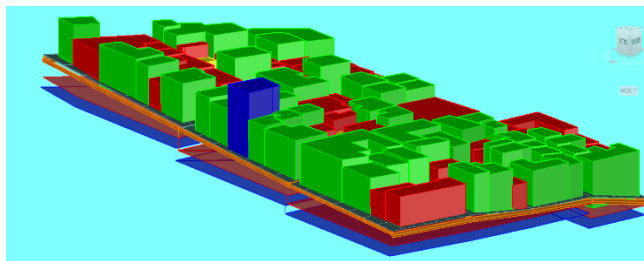


Figura 9 Ricostruzione tridimensionale del tessuto urbano

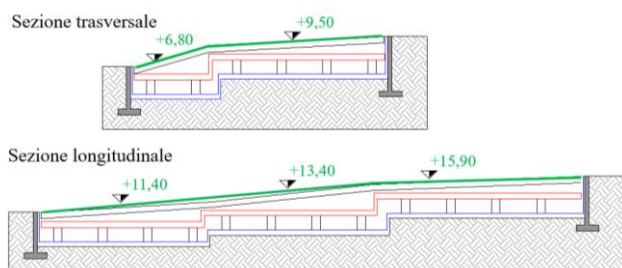


Figura 10 Sezioni trasversale e longitudinale corrispondente allo step di ripristino del tessuto urbano

5 PROGETTO DEL SISTEMA DI ISOLAMENTO

5.1 Pericolosità sismica di base

Per il progetto del sistema di isolamento si adottano gli spettri elastici in accelerazione corrispondenti agli stati limite SLV ed SLC (NTC2018).

La strategia di progetto è orientata ad assicurare livelli prestazionali superiori a quelli standard, che nell'ipotesi progettuale possono essere conseguiti praticamente senza aggravio di costo. Si considera quindi una Vita nominale $V_n = 75$ anni ed una Classe d'uso $C_u = III$, risultando una vita di riferimento $V_r = 112,5$ anni.

Sulla base delle informazioni disponibili per i terreni interessati dal caso studio è stata assunta una categoria di sottosuolo B ed una condizione topografica T1.

Nella Tabella 3 sono riportati i parametri sismici di base per gli stati limite di interesse. In particolare sono riportati l'accelerazione su suolo rigido a_g , il coefficiente di amplificazione F_0 , il periodo corrispondente al tratto a velocità costante dello spettro T_c^* , il coefficiente di amplificazione del terreno S , i valori di PGA corrispondenti, il periodo di ritorno T_r corrispondente all'intensità sismica.

Tabella 3 Parametri di pericolosità sismica

Stato limite	a_g g	F_0	T_c^* s	S	PGA g	T_r anni
SLV	0,342	2,405	0,362	1,070	0,366	1068
SLC	0,433	2,451	0,378	1,000	0,433	2193

5.2 Dispositivi di isolamento

Preliminarmente alle analisi numeriche è stato condotto il pre-dimensionamento dei dispositivi di isolamento. La tabella Tabella 4 mostra le componenti della massa sismica da isolare indicando, per ogni contributo, l'area A , il carico per unità di superficie G ed il peso totale P . Complessivamente la massa sismica isolata risulta $M_{iso} = 150000$ t. Il carico unitario agente sulla piastra isolata è

$$Q = \frac{P_{totale}}{A_{piastra_isolata}} = 77,45 \text{ kN/m}^2 \quad (2)$$

Tabella 4 Pesì sismici delle componenti isolate

	A m ²	G kN/m ²	P kN
Piastra isolata	18670	25	466750
Edifici	32166	15	482490
Piani interrati	12781	15	191715
Strade	2072	54	111888
Non edificato	3576	54	193104
TOTALE			1445947

Si assume l'impiego di dispositivi elastomerici con coefficiente di smorzamento ξ pari al 10% e l'obiettivo di un periodo di oscillazione del sistema isolato nell'intervallo 2,50 - 3,00 s.

Dalle valutazioni speditive condotte risulta appropriata l'adozione di dispositivi di mercato aventi le seguenti caratteristiche:

- $V = 5385$ kN, carico verticale massimo in condizioni sismiche;
- $F_z = 20320$ kN, carico verticale massimo in condizioni statiche;
- $K_d = 1500$ kN/m, rigidità laterale effettiva;
- $K_v = 1772000$ kN/m, rigidità verticale;
- $D_g = 1000$ mm, diametro;
- $t_e = 210$ mm, spessore totale di elastomero;
- $h = 326$ mm, altezza elastomero e lamierini;
- $H = 406$, altezza totale;
- $s_{disp} = 400$ mm, spostamento di progetto SLC.

La scelta di tali dispositivi corrisponde ad avere una rigidità complessiva del sistema isolato $K_{iso} = 840000$ kN/m

5.3 Modello di calcolo

E' stato costruito un modello numerico in cui la piastra isolata è riprodotta con elementi shell, ed i dispositivi con elementi link lineari.

Le costruzioni e le strade sono state considerate in termini di carichi agenti sulla piastra isolata secondo i valori già riportati in Tabella 4. Sono state considerate quattro varianti di disposizione

degli edifici (e quindi dei carichi) secondo un concetto di ri-costruzione “flessibile” e dunque non necessariamente corrispondente alla situazione pre-sisma, ma anche per dimostrare la flessibilità del sistema di protezione sismica di livello urbano. Di fatto, la localizzazione degli edifici a 1-2-3-5 piani è stata ricombinata definendo quattro differenti scenari (A, B, C, D) di tessuto urbano (Figura 11).



Figura 11 Le quattro varianti di ricostruzione urbana

Con il fine di ottimizzare la risposta del comparto mitigando gli effetti di eccentricità tra i baricentri di rigidezza e massa e dunque limitare gli effetti torcenti è stata prevista l’installazione di un sistema di dissipatori magneto-reologici (MR) che attraverso un sistema intelligente di regolazione della loro rigidezza, consente il controllo della risposta ed il suo ricentraggio istantaneo.

Si ipotizza l’adozione di dispositivi con forza reattiva fino a 400 kN, corrispondentemente alla quale possono fornire una rigidezza di 1000 kN/m.

La Figura 12 mostra la disposizione dei 12 dissipatori magnetoreologici previsti per il ricentraggio “intelligente” del sistema.

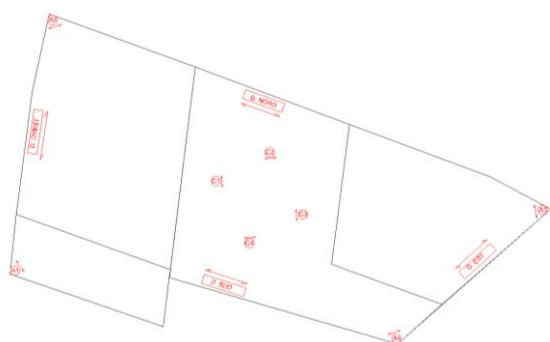


Figura 12 Disposizione dei dispositivi MR sulla piastra isolata

5.4 Analisi dinamiche lineari

Sono state condotte analisi dinamiche lineari (NTC2018) per determinare la risposta del comparto isolato e procedere alle verifiche.

Per le quattro varianti considerate sono riportati: in Tabella 5 i risultati dell’analisi modale, in particolare i periodi di oscillazione dei primi 3 modi di vibrare; in Tabella 6 le masse partecipanti in direzione longitudinale (Ux) e trasversale (Uy) per i primi due modi principali traslazionali; in Tabella 7 le eccentricità tra i baricentri di massa e rigidezza rapportate alle dimensioni longitudinali e trasversali della piastra.

Tabella 5 Analisi modale: periodi di oscillazioni

Variante	T ₁ (s)	T ₂ (s)	T ₃ (s)
A	2,71	2,70	2,56
B	2,60	2,50	2,47
C	2,59	2,58	2,45
D	2,69	2,69	2,55

Tabella 6 Analisi modale: percentuali di massa partecipante

Variante	modo 1		modo 2	
	Ux (%)	Uy (%)	Ux (%)	Uy (%)
A	98,0	0,1	0,1	99,0
B	0,0	99,0	98,0	0,1
C	97,0	0,2	0,2	98,0
D	0,0	99,0	99,0	0,0

Tabella 7 Analisi modale: differenze percentuali tra il baricentro delle rigidezze e delle masse

Variante	e _x (%)	e _y (%)
A	0,23	0,39
B	0,04	0,04
C	0,27	0,34
D	0,09	0,12

Dall’analisi risulta come i modi principali abbiano valori del periodo di oscillazione fondamentale nell’ambito dell’intervallo obiettivo (2,50-3,00 s) e siano caratterizzati da aliquote di massa partecipante quasi unitarie. La eccentricità tra centro di massa e di rigidezza è ridotta a valori inferiori allo 0,4%, grazie anche alle correzioni ottenute con i dissipatori MR ipotizzati.

Nella Tabella 8 sono riportati gli spostamenti massimi SLC dei dispositivi in direzione longitudinale (X) e trasversale (Y). In Tabella 9 sono riportate le sollecitazioni massime, sia SLC che SLV, di forza assiale N, taglio T_x e T_y, agenti sugli isolatori. I valori di spostamento massimo (367 mm) risultano compatibili con i dispositivi adottati e le verifiche condotte (EN15129), non riportate per brevità, danno esito positivo. Nessun isolatore presenta sollecitazioni di trazione. La sottostruttura dimensionata con le sollecitazioni di SLV richiede pilastri di dimensioni 1,20 x 1,20 m con percentuali di armatura inferiori all’1,00%.

Tabella 8 Analisi dinamiche lineari: spostamenti massimi degli isolatori

	$S_{max,x}$ (mm)	$S_{max,y}$ (mm)
A	352	330
B	325	367
C	345	339
D	322	340

Tabella 9 Analisi dinamiche lineari: sollecitazioni massime sugli isolatori

	N_{min} kN	N_{max} kN	T_x kN	T_y kN
SLV	4794,00	25,00	387,00	416,00
SLC	4819,00	12,00	481,00	519,00

Nella situazione esaminata gli effetti del vento non sono rilevanti (Ubertini et al. 2017). Per quanto riguarda gli effetti delle variazioni termiche, sono stati valutati nell'ordine dei 10-15 mm in considerazione delle condizioni termicamente isolate della sottostruttura. Gli effetti della temperatura e del ritiro possono comunque essere mitigati e compensati mediante opportune soluzioni tecnologico-costruttive quali giunti di dilatazione sulla piastra isolata.

6 ANALISI NON LINEARI E RISPOSTA SISMICA DEL SISTEMA

Al fine di analizzare la effettiva risposta sismica del comparto isolato sono state svolte analisi dinamiche non lineari utilizzando come input gli accelerogrammi registrati degli eventi sismici del 24 agosto e 30 ottobre. I valori delle accelerazioni di picco per le tre componenti HGE, HGN, HGZ, corrispondenti rispettivamente alle direzioni X, Y e Z sono riportati in Tabella 10. In particolare, si osserva un valore di picco prossimo a 1 g per l'evento del 24 agosto. Nella Figura 13 sono riportati gli spettri elastici in accelerazione delle tre componenti per l'evento del 24 agosto, nonché, come confronto, lo spettro di sito SLC di norma. Si osserva come, nel campo dei periodi fondamentali delle strutture ordinarie in muratura e c.a. (tra 0,1 s e 0,5 s), i valori delle accelerazioni spettrali risultano più che doppi di quelli dello spettro di sito SLC, raggiungendo valori di 2,23 g. Al contrario, nel campo dei periodi di oscillazione propri dei sistemi isolati sismicamente (>2,50 s), le accelerazioni spettrali registrate risultano di molto inferiori a quelle previste dallo spettro di norma, con valori intorno a 0,1 g.

La riduzione delle accelerazioni spettrali di risposta tra sistemi a base fissa e a base isolata considerando l'evento del 24 agosto 2016 è quindi stimata intorno a 20 volte.

Tabella 10 Valori di accelerazioni di picco registrate il 24 agosto e il 30 ottobre 2016, per le tre componenti

	24-ago PGA (g)	30-ott PGA (g)
HGE	0,892	0,529
HGN	0,379	0,411
HGZ	0,396	0,321

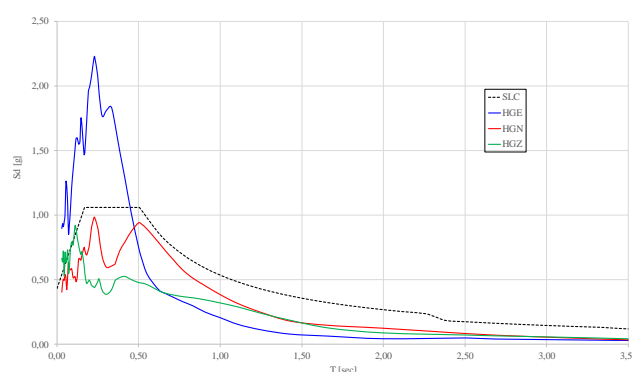


Figura 13 Spettri elastici di risposta degli accelerogrammi registrati il 24 agosto 2016 e spettro SLC di norma

6.1 Risposta del sistema di isolamento

Il comportamento non lineare degli isolatori elastomerici è stato definito mediante un legame costitutivo elasto-plastico incrudente (Figura 14) secondo quanto proposto da Kelly (1999) considerando lo smorzamento viscoso convenzionale e assumendo i seguenti parametri:

$$K_1 / K_{eff} = 4$$

$$K_1 / K_2 = 6$$

dove:

K_1 = rigidezza del ramo elastico

K_2 = rigidezza del ramo incrudente

K_{eff} = rigidezza orizzontale equivalente in corrispondenza dello spostamento d_{disp}

In Tabella 11 sono riportati i valori nominali dei parametri caratteristici degli elementi "isolatore". I valori associati agli spostamenti effettivi sono stati poi definiti attraverso successive iterazioni di analisi dinamiche.

Tabella 11 Parametri del legame non lineare degli elementi "isolatore" HDRB nel modello numerico

K_{eff}	K_1	K_2	F_1	d_1	F_2	d_{disp}
kN/m	kN/m	kN/m	kN	mm	kN	mm
1500	6000	977	250	42	600	400

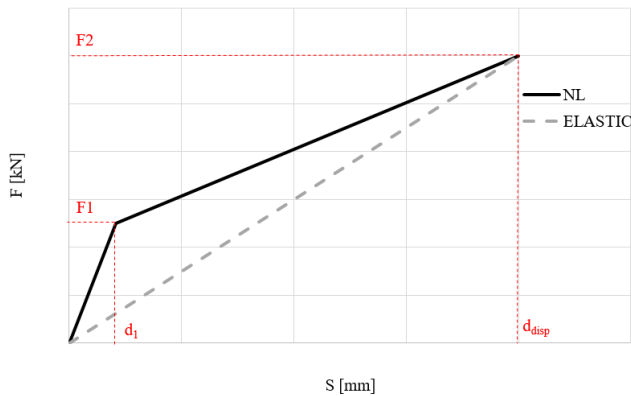


Figura 14 Legame costitutivo non lineare dei dispositivi di isolamento

Nella Tabella 12 sono riportate, per l'evento del 24 agosto, le componenti di spostamento longitudinale, s_x , e trasversale, s_y , nonché lo spostamento risultante nei punti significativi, corrispondenti ai vertici della piastra isolata (Figura 15).

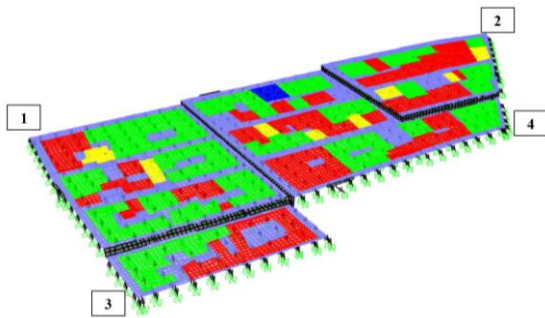


Figura 15 Individuazione dei punti monitorati sulla piastra isolata

Tabella 12 Spostamenti ottenuti dall'analisi dinamica non lineare con gli accelerogrammi registrati del 24 agosto 2016

nodì	s_x mm	s_y mm	s_{tot} mm
1	51,4	112,7	123,9
2	52,9	113,5	125,2
3	51,5	106,0	117,8
4	52,4	110,0	121,8

Il valore massimo di spostamento degli isolatori è pari a 125 mm, notevolmente inferiore a quelli risultanti dalle analisi lineari, in accordo con quanto già commentato a proposito degli spettri.

L'analisi della risposta non lineare del sistema isolato conferma la validità dei dispositivi adottati, compatibili con la domanda di spostamento e sollecitazione. Peraltro i dispositivi potrebbero essere ulteriormente ottimizzati, considerando gli spostamenti effettivamente richiesti.

6.2 Risposta della sovrastruttura

Per valutare la risposta sismica della sovrastruttura il modello numerico è stata integrato con elementi 3D a comportamento lineare riproducenti gli edifici (Figura 16). I parametri di modellazione sono stati calibrati in maniera da ottenere una rigidezza degli edifici equivalente a quella delle strutture reali. Sono state valutate le risposte degli edifici utilizzando gli accelerogrammi del 24 agosto 2016 e considerando il comparto sia nella condizione a base isolata che a base fissa. Nella Tabella 13 sono riportati i massimi valori delle componenti, δ_x e δ_y , degli spostamenti di sommità per gli edifici delle varie altezze H nelle condizioni a base isolata ed a base fissa, sono anche riportati i rapporti tra gli spostamenti nelle due configurazioni. Il sistema a base fissa mostra spostamenti dell'ordine di 10 volte superiore a quelli del sistema a base isolata. Per quest'ultimo si osservano drift massimi di piano molto contenuti, pari allo 0,1%. I valori di spostamento del sistema a base fissa sono invece incompatibili con un comportamento lineare delle strutture ed identificano condizioni di grave collasso della sovrastruttura, come si sono effettivamente manifestate. Nella Figura 17 e nella Figura 18 sono riportati i diagrammi delle accelerazioni alla base ed in sommità degli edifici calcolate per la configurazione a base isolata ed a base fissa, rispettivamente. In particolare è riportato il confronto tra le accelerazioni sulla piastra isolata/fissa e la sommità degli edifici, potendo determinare l'effettivo coefficiente di amplificazione. Nel caso di piastra isolata le amplificazioni sono molto ridotte, passando da valori pari a 0,10 g alla base fino a 0,20 g in sommità. Nel caso di sistema a base fissa invece si passa da 0,35g alla base a 1,81 g in sommità. Si osserva dunque un abbattimento delle accelerazioni di piano di circa 10 volte mediante il sistema di isolamento. I valori di spostamento ed accelerazione risultanti per la soluzione isolata sono addirittura nei limiti dello Stato Limite di Operatività delle costruzioni.

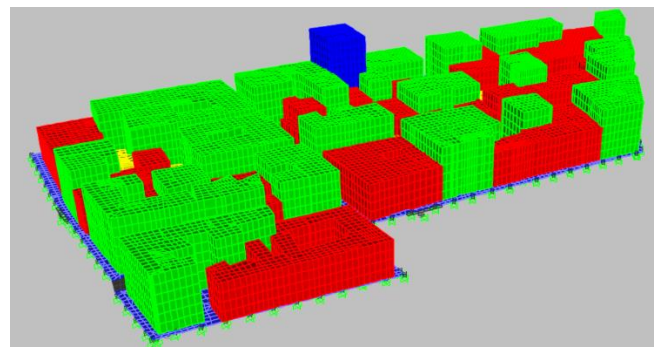


Figura 16 Modello numerico tridimensionale per la valutazione della risposta della sovrastruttura

Tabella 13 Spostamenti ottenuti dall'analisi dinamica non lineare con gli accelerogrammi registrati del 24 agosto 2016

H m	isolato		base fissa		fix/isolator	
	δ_x mm	δ_y mm	δ_x mm	δ_y mm	α_x	α_y
15	5,00	16,00	73,00	148,00	14,60	9,25
9	5,00	5,00	51,00	133,00	10,20	26,60
6	0,80	1,80	4,00	2,50	5,00	1,39
3	1,50	0,40	3,00	2,50	2,00	6,25

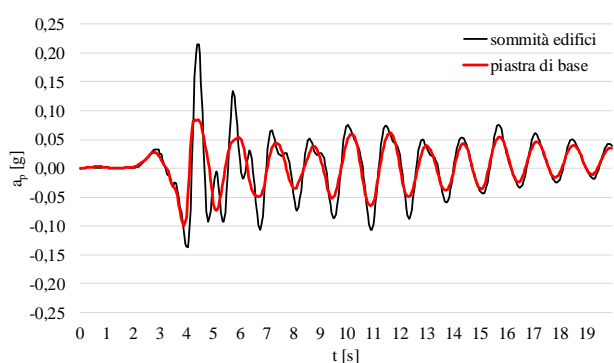


Figura 17 Accelerazioni di piano alla base e in sommità nella condizione di piastra di base isolata

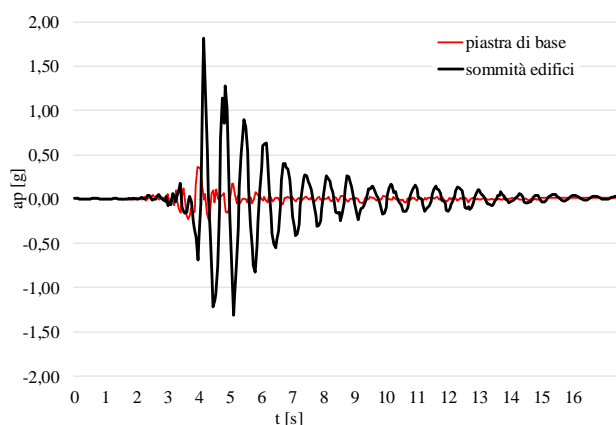


Figura 18 Accelerazioni di piano alla base e in sommità nella condizione di piastra di base fissa

7 ASPETTI ECONOMICI

Ai fini di condurre delle comparazioni economiche sono stati analizzati i costi diretti e indiretti della ricostruzione della sovrastruttura ed i sovracosti connessi all'adozione del sistema di isolamento. Sono riportati i risultati di valutazioni preliminari relative alle conseguenze attese su orizzonti temporali di 50 e 100 anni.

7.1 Incidenza economica del "Ground isolation"

Si valutano in primo luogo i costi necessari al ripristino del comparto in oggetto sia per quanto riguarda la ricostruzione (costi diretti) che la gestione emergenziale (costi indiretti). I primi

sono valutati in accordo con le ordinanze del Commissario Unico per la ricostruzione, considerando un costo unitario, comprensivo degli incrementi vari previsti, di 1690 €/m² per una superficie totale di circa 33000 m², ai quali vanno aggiunti i costi relativi alla ricostruzione non residenziale, arrivando ad una stima dei costi diretti pari a 70 M€. Per quanto riguarda i costi indiretti vanno considerati i seguenti aspetti: (a) dislocazione degli abitanti; (b) fermo attività; (c) costi di prima emergenza; (d) costo delle infrastrutture pubbliche e culturali. In questa sede si è assunto cautelativamente un importo dei costi indiretti circa doppio a quello dei costi diretti.

Come validazione dei costi assunti sono stati presi in considerazione i finanziamenti previsti dal DPC per l'intera regione Lazio e pari a 3,7 G€. È stato quindi valutato, proporzionalmente all'area interessata nell'ambito del Comune di Amatrice, che per il comparto urbano in oggetto siano destinate risorse non meno di 210-240 M€ (costo totale).

Per integrare il comparto con un sistema di "ground-isolation" è stato stimato, sulla base di un computo speditivo della soluzione ipotizzata, un costo totale, aggiuntivo rispetto a quello già previsto per le sovrastrutture, pari a 11,9 M€. Le componenti di costo che portano alla stima suddetta sono riportate nella Tabella 14. Pertanto l'incidenza economica del sistema di isolamento di comparto risulta pari al 17 % rispetto ai costi diretti ed al 5-6 % rispetto ai costi totali.

Tabella 14 Dettaglio dei costi diretti per l'adozione del "ground isolation" nel ripristino del comparto in oggetto

scavi	0,90 M€
fondazione	4,20 M€
sottostruttura	0,40 M€
dispositivi isolamento	5,00 M€
opere di compensazione	1,00 M€
extra impianti	0,40 M€
TOTALE	11,90 M€

Occorre inoltre considerare che un evento sismico estremo comporta ulteriori costi connessi alle conseguenze sociali, culturali, gestionali. Basti pensare allo spopolamento, alle criticità di reinsediamento e reinserimento sociale, al deficit delle attività produttive, alla compensazione degli investimenti, all'indebitamento statale. Infine, ma non per ultimo, vanno prese in considerazione le conseguenze dirette sugli esseri umani (vittime, feriti). Tutti questi aspetti non sono valutati nel presente lavoro ma assumono una importanza

determinante nelle scelte e nelle strategie di gestione degli eventi estremi.

7.2 Scelte e strategie di ricostruzione

Per definire i criteri di opportunità nell'ambito di una strategia ottimale di ricostruzione è opportuno e necessario passare dalle stime economiche a valutazioni di natura prestazionale.

La strategia di progetto della ricostruzione convenzionale, in linea con le vigenti norme, prevederebbe il raggiungimento dello Stato Limite di Salvaguardia della Vita per una intensità sismica avente una probabilità di superamento pari al 10% nei prossimi 50 anni. Al superamento di tale stato limite corrisponderebbero costi di ripristino dell'area interessata sostanzialmente dello stesso ordine di quelli dell'evento verificatosi e per il quale si attua la ricostruzione, ma danni inferiori sono attesi anche per eventi di intensità minore.

E' possibile dunque definire il costo atteso C_{exp} in n anni come:

$$C_{exp} = \sum_{i=1}^m p_{n,i} \cdot C_{pot,i} \quad (11)$$

dove

$p_{n,i}$ = probabilità di raggiungere le conseguenze dell'evento di livello di conseguenze i -esimo;

$C_{pot,i}$ = conseguenze economiche corrispondenti al livello di conseguenze i -esimo.

Si ottiene quindi che le conseguenze attese nei prossimi 50 anni per il comparto urbano in oggetto interessato da una ricostruzione convenzionale risultano pari a circa 30 M€. Tale costo è circa tre volte superiore al maggior costo associato all'isolamento sismico.

All'opposto il costo atteso per il comparto dotato di ground isolation risulta invece praticamente nullo, infatti come illustrato nel presente lavoro, un evento sismico come quello registrato nel 2016, di intensità anche superiori a quelle di SLV, non produrrebbe danni significativi sul comparto che resterebbe in uno stato di operatività. Inoltre, oltre a mitigare (annullare) le conseguenze economiche si avrebbe riduzione pressoché totale anche di quelle conseguenze socio-culturali non strettamente valutabili economicamente e soprattutto delle conseguenze sulle persone.

8 CONCLUSIONI

Il lavoro svolto ha mostrato la fattibilità della ricostruzione di interi centri urbani o comparti interessati da eventi sismici catastrofici in aree come quelle del Centro Italia colpite dagli ultimi sismi del 2016-17 utilizzando l'isolamento sismico

degli interi comparti secondo la tecnologia definita "ground isolation" o "artificial ground".

In considerazione dell'elevato livello di abbattimento della risposta sismica consentito dalla tecnologia dell'isolamento può essere pienamente attuato, senza remore, l'obiettivo di ricostruire "com'era, dov'era", applicando tecniche riconducibili a quelle tradizionali e realizzando peraltro costruzioni a danno "quasi nullo", ovvero a protezione sismica integrale, anche per i terremoti massimi attesi con periodo di ritorno di 1000-2000 anni.

Le valutazioni economiche dei costi attesi mostrano che i sovracosti connessi all'impiego della tecnica del ground isolation (4-5% dei costi totali di intervento nelle aree terremotate) sono due-tre volte inferiori rispetto ai costi attesi nell'arco della vita utile delle costruzioni ricostruite secondo i criteri convenzionali. A ciò si aggiungono i benefici connessi alla assenza di tutte le conseguenze sociali, culturali, gestionali non valutate economicamente.

REFERENCES

- Comodini, F., Mezzi, M., Fulco, A., 2017. Procedura speditiva per la valutazione del rischio sismico di edifici in c.a. Convegno ANIDIS - Pistoia (IT).
- Comodini, F., Mezzi, M., 2011. Performance Comparison of Isolated, Dissipated and Fixed-Based Steel Buildings. In: 13th Int. Conf. on Civil, Structural and Environmental Engin. Computing, Chania, Crete, Greece. CIVIL-COMP PROCEEDINGS, Stirlingshire:B.H.V. Topping and Y. Tsompanakis, Civil-Comp Press, ISBN: 978-1-905088-47-8, ISSN: 1759-3433, doi: 10.4203/ccp.96.71
- EERI, 2009. The Mw 6.3 Abruzzo, Italy, Earthquake of April 6, *EERI Special Earthquake Report*. EN15129. Anti-seismic devices. CEN. Brussels. 2009
- Kelly, M., 1999. Design of seismic isolated structures. from theory to practice, *John Wiley & Sons inc.*
- Martelli, A., Forni, M., Bettinali, F., Bonacina, G., Bergamo, G., Castellano, M.G., Medeot, R., Marioni, A., Sanò, T., Pugliese, A., 1999. New Activities Performed in Italy on Innovative Anti-Seismic Techniques for Civil and Industrial Structures. *Proc. ASME-PVP Conf.*, Boston, USA, PVP-Vol. 387 pp. 311-326.
- Mazzoni, S. Fulco, A., Castori, G., Galasso, C., Calvi, P., Dreyer, R., Fisher, E., Sorrentino, L., Wilson, J., Penna, A., Magenes, G., 2018. 2016–17 Central Italy Earthquake Sequence: Seismic Retrofit Policy and Effectiveness. *Earthquake Spectra*, **34**(4).
- Mezzi, M., Comodini, F., Rossi, L., 2011. Base Isolation Option for the Full Seismic Protection of an Existing Masonry School Building. 13th Int. Conf. on Civil, Structural and Environmental Engin. Computing, Chania, Crete, Greece. CIVIL-COMP PROCEEDINGS, Stirlingshire:B.H.V. Topping, Civil-Comp Press, ISBN: 978-1-905088-47-8, ISSN:1759-3433 doi: 10.4203/ccp.96.72
- Mezzi, M. and Petrella, P. 2013. Experiences from the Reconstruction After the 2009 L'Aquila Earthquake.

- Damage, Vulnerability, Retrofitting, *ISEC-7 New Developments in Structural Engineering and Construction*. Honolulu, USA.
- NTC2018. Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 17 gennaio 2018, *Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, GU Repubblica Italiana, Roma*.
- Ubertini, F., Comodini, F., Fulco, A., Mezzi, M., 2017. A Simplified Parametric Study on Occupant Comfort Conditions in Base Isolated Buildings under Wind Loading. *Advances in Civil Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, Article ID 3524975, 13 pages <https://doi.org/10.1155/2017/3524975>.
- Zhou, F. L., Yang, Z., Liu, W.G., Tan, P., 2004. New seismic isolation system for irregular structure with the largest isolation building area in the world. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada. August 2004.