

XIX ANIDIS Conference, Seismic Engineering in Italy

Interventi di miglioramento sismico finalizzati alla riduzione del coefficiente di amplificazione sismica locale

Ing. Alberto Lemme^a, Ing. Carmenzo Miozzi^d, Ing. Cristian Vassolo^a, Roberto Menichetti^b, dott. Fabio Colantonio^d.

^a *Ingegnere Liberto Professionista – Isernia*

^b *dott. Roberto Menichetti – Edilsystem srl – Foligno (Pg)*

^c *geologo. Fabio Colantonio – dott. in Progettazione del sottosuolo e del costruito - Chieti*

^d *ingegnere – Ufficio Ricostruzione Regione Abruzzo*

Abstract

Per migliorare il comportamento sismico degli edifici in zona sismica in presenza di fondazioni con capacità portante insufficiente e/o terreni scarsamente consistenti caratterizzati da un elevato fattore di amplificazione locale la soluzione dei minipali in acciaio di piccola sezione forati all'interno per iniettare miscele cementizie espansive rappresenta una soluzione indiretta poco invasiva con elevata efficacia e costi limitati. Tale soluzione consente di migliorare le proprietà meccaniche del terreno, ridurre il fattore di amplificazione locale contribuendo a migliorare l'indice di sicurezza degli edifici con costi accettabili.

Keywords: prevenzione sismica; cemento armato; consolidamento terreno

1. Premessa

Nelle zone ad elevato rischio sismico, in presenza di terreni di scadente qualità, l'amplificazione sismica ha accentuato il danneggiamento degli edifici ed ha favorito numerosi crolli. Nell'ambito della prevenzione sismica oltre al miglioramento sismico degli edifici è consigliabile prevedere il miglioramento delle condizioni dei siti di appoggio degli edifici attraverso il consolidamento dei terreni di fondazione. Nel presente lavoro si prende in esame un intervento di miglioramento sismico di un edificio esistente in cemento armato integrato con il consolidamento del terreno di fondazione di tipo C con minipali e si valuta il contributo di tale intervento in termini di risposta alle azioni sismiche e di analisi costi-benefici.

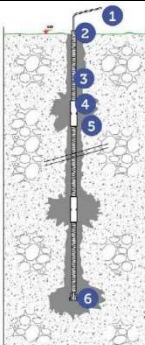
2. La tecnologia dei minipali [2]

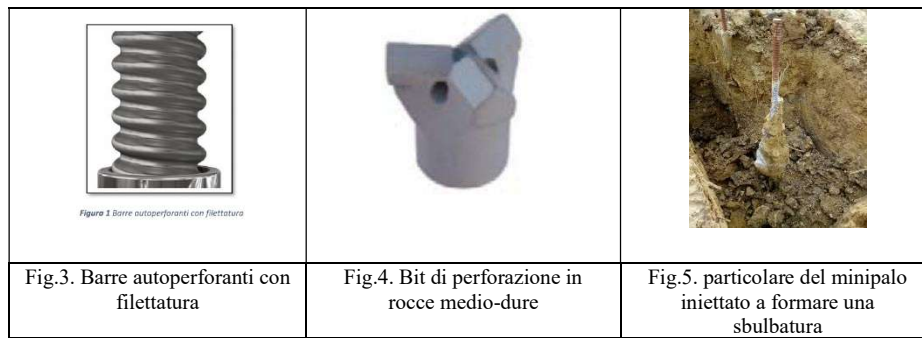
“La tecnologia dei minipali è stata pensata per il consolidamento delle fondazioni e dei terreni, grazie anche alla facilità di posa e l'impiego di macchinari di ridotto ingombro, utilizzabili all'interno di edifici ed in spazi molto

limitati. Le tecnologie disponibili per il consolidamento del terreno o l'eliminazione di cedimenti fondali prevedono due possibilità contrapposte: eseguire dei micropali con l'aggravio di tutte le opere correlate (scavi, cordoli di collegamento e successiva ricostruzione), o iniettare resine espandenti a base poliuretanica che consolidano direttamente il terreno senza agire sul fabbricato, ma con il limite di risolvere problematiche di cedimento superficiale di modesta entità. La tecnologia del "Minipalo" combina i vantaggi di entrambi le tecnologie descritte, permettendo l'impiego congiunto di malte cementizie espandenti, a pali in acciaio di ridotto diametro. Il procedimento consiste nell'inserimento di barre di acciaio cave ad elevata resistenza attraverso macchinari a rotoperussione di piccolo diametro (utilizzabili anche all'interno di garages e scantinati), fino a raggiungere gli strati più profondi e compatti del terreno, riducendo i disagi all'interno degli edifici abitati e i tempi di lavoro. La riduzione della dimensione dei minipali è compensata dall'iniezione nel terreno di resine poliuretaniche bicomponenti ad elevata resistenza, e/o da una malta cementizia espandente. Il procedimento per la realizzazione dei Minipali prevede l'inserimento di barre di acciaio cave autoperforanti ad elevata resistenza (disponibili nei diametri 32/38/51 mm), mediante l'impiego di macchinari a rotoperussione. La malta cementizia espandente tenderà a riempire non solo la sottile intercapedine tra tubolare e terreno ma anche i vuoti presenti nel terreno circostante e, di conseguenza, contribuirà ad incrementare la resistenza laterale dell'elemento strutturale. La perforazione interessa un primo tratto costituito dalla fondazione esistente (in muratura o in cemento armato), per una lunghezza sufficiente a trasferire il carico dell'edificio sui minipali, e un secondo tratto costituito dal terreno per una lunghezza determinata in funzione del carico limite stabilito in progetto. Ne consegue che:

- il primo tratto, ovvero la testa di ancoraggio, viene iniettato con betoncino epossidico o con una speciale micromalta cementizia antiritiro a rapido indurimento (GEO ANCHOR);
- il secondo tratto viene iniettato con la miscela di malta cementizia espandente ecocompatibile (GEO-XP), con resistenza a compressione in espansione libera di 7 MPa a 28 giorni, in grado di raggiungere un livello di espansione pari a 80-100% del suo volume iniziale. In tal modo si ottiene il trasferimento delle sollecitazioni dall'armatura interna al terreno circostante ed il consolidamento del terreno stesso, grazie alla capacità di resistenza, penetrazione ed espansione dei materiali impiegati.

I Minipali possono lavorare autonomamente oppure essere collegati tra di loro in sommità. In quest'ultimo caso si utilizzano piatti o piastre in acciaio di varia forma o dimensioni, collegati alla fondazione con elementi di fissaggio che variano in funzione del supporto. L'accoppiamento piastra-minipalo viene assicurato con bulloni in acciaio ad alta resistenza, al fine di realizzare un incremento di rigidità della fondazione superficiale, nella zona interessata dall'intervento. L'armatura del Minipalo è costituita, come detto, da una barra cava in acciaio S355 del tipo autoperforante Ø32/38/51 mm dotata di una filettatura continua, ottenuta per rullatura a freddo da un tubo liscio, che, secondo gli standard ISO 10208, contribuisce ad aumentare l'aderenza tra l'acciaio e la malta cementizia (Figura 3).

1. Barre autoperforanti in acciaio 2. Manicotto in acciaio 3. Valvola di non ritorno 4. Bit autoperforante in acciaio 	1. Tubo d'iniezione della espandente o resina ricomponente l'ancoraggio della barra 2. Tappo di chiusura; 3. Tubo d'iniezione della espandente o resina 4. Manicotto in acciaio valvole di non ritorno; 5. Bulbo di malta resina poliuretanica; 6. Bit autoperforante in acciaio  malta cementizia espandente per al terreno; malta cementizia poliuretanica; con diametro 51 mm con cementizia espandente o acciaio
Fig1. Barre autoperforanti in acciaio	Fig. 2. Barre autoperforanti in acciaio e iniezione di malte espandenti



Le barre possono essere di lunghezza diversa e sono collegate tra di loro attraverso dei manicotti di giunzione e sono corodate di una punta di perforazione per terreni e rocce di media durezza e per terreni e rocce dure.

Il bit di perforazione per rocce medio/dure (Figura 4) è costituito da tre lame in acciaio da utilizzare in terreni con resistenze inferiori a 70 MPa e diametro di perforazione pari a 76 mm. Il calcolo della capacità portante si basa quindi sull'adeguata valutazione della resistenza laterale sia nel caso di sollecitazione a trazione che a compressione. La capacità portante dei minipali è data dalla resistenza laterale e alla punta che viene trascurata cautelativamente e a causa del ridotto diametro. La resistenza laterale S , in via preliminare, è data dalla espressione :

- $S = \pi ds Ls$
- dove:
- ds = è il diametro del micropalo che viene incrementato, rispetto al diametro iniziale di perforazione, per tener conto dell'allargamento di diametro, che è funzione della tecnologia di installazione e della sbulbatura.
- Ls = lunghezza della zona iniettata (bulbo);
- $s = \tau$ = resistenza tangenziale unitaria all'interfaccia fra zona iniettata e terreno

Nel caso in cui il micropalo attraversi strati di terreno dalle caratteristiche diverse, la relazione per la determinazione di S sarà: $S_i = \sum (\pi ds_i Ls_i)$

Ove il pedice i si riferisce ai parametri propri del generico strato i . Come detto, si assume $ds = \alpha d$, dove d è il diametro di perforazione iniziale e α è un coefficiente amplificativo, che tiene conto dell'incremento del diametro dovuto all'iniezione di malta e relativa espansione, il cui valore dipende dal tipo di terreno e dalla tecnologia di installazione, come si può osservare dalla Tabella (figura.6) proposta da Bustamante e Doix. La Tabella fornisce anche ulteriori indicazioni sui volumi di malta minima che si deve immettere per una buona esecuzione del micropalo.

Terreno	Valori di α		Quantità minima di miscela consigliata
	IRS	IGU	
Ghiaia	1,8	1,3 - 1,4	1,5 V_s
Ghiaia sabbiosa	1,6 - 1,8	1,2 - 1,4	1,5 V_s
Sabbia ghiaiosa	1,5 - 1,6	1,2 - 1,3	1,5 V_s
Sabbia grossa	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	1,5 V_s
Sabbia media	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	1,5 V_s
Sabbia fine	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	1,5 V_s
Sabbia limosa	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	IRS: (1,5 - 2) V_s ; IGU: 1,5 V_s
Limo	1,4 - 1,6	1,1 - 1,2	IRS: 2 V_s ; IGU: 1,5 V_s
Argilla	1,8 - 2,0	1,2	IRS: (2,5 - 3) V_s ; IGU: (1,5-2) V_s
Marne	1,8	1,1 - 1,2	(1,5 - 2) V_s per strati compatti
Calcarei marnosi	1,8	1,1 - 1,2	(2 - 6) V_s o più per strati fratturati
Calcarei alterati o fratturati	1,8	1,1 - 1,2	(1,1-1,5) V_s per strati poco fratturati 2 V_s o più per strati fratturati
Roccia alterata e/o fratturata	1,2	1,1	

Fig.6. Valori dei coefficienti α – Bustamante e Doix

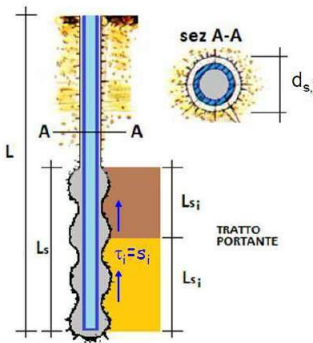


Fig.7. Schema per il calcolo della capacità portante del minipalo

È utile osservare che tanto il metodo proposto quanto gli abachi sperimentali per la progettazione dei minipali potranno essere ulteriormente messi a punto e ottimizzati sulla base di ulteriori dati sperimentali inoltre, sia nel caso di litologia nota che nel caso di litologia non nota il diametro equivalente del minipalo è calcolato moltiplicando il diametro di perforazione (noto) per il coefficiente (α), che tiene conto di un possibile incremento del diametro per la quantità di

malta iniettata. Tale coefficiente α , ha valori compresi tra 1 e 1.4 (1 per quantità di malta iniettata compresa tra 1-5 kg/m, 1,2 per 5-10 kg/m e 1,4 per 10-15 kg/m).

Nel caso dell'intervento di seguito illustrato la capacità portante è stata stimata in circa 9,00 Kn. I minipali sono stati distribuiti sull'intera area ad una distanza di circa 150 cm. Lungo le fondazioni sono stati ancorati alla trave mentre nelle vasche di fondazione sono stati lasciati liberi. I minipali che interessano le fondazioni contribuiscono a migliorare la capacità portante della stessa fondazione oltre che a migliorare le caratteristiche del terreno mentre nelle vasche contribuiscono a migliorare la qualità del terreno.

3. Descrizione del complesso edilizio [3]

L'intervento è stato eseguito su un edificio ubicato nel comune di Chieti su un edificio che risale agli inizi degli anni '90, ha una struttura in cemento armato in una zona in leggero pendio. La struttura portante dell'immobile è costituita da telai in c.a. orientati nelle due direzioni, che si estendono per 5 impalcati abitabili più il piano sottotetto non praticabile né accessibile. Presenta una forma in pianta rettangolare avente dimensioni 20,90 x 10,30 m. ed è caratterizzata da un numero elevato di travi a spessore con poche travi emergenti sulle quali sono incastrati i balconi a sbalzo. I solai sono in latero-cemento di altezza 16+4, realizzati da travetti precompressi e blocchi in laterizio con soletta di ripartizione, orditi in direzione trasversale l'edificio; le travate principali sono infatti esclusivamente in direzione longitudinale l'edificio, mentre in direzione trasversale sono presenti travi a spessore di solaio. La copertura a padiglione caratterizzata da travi perimetrali emergenti, sulle quali poggiano sia il solaio di sottotetto che quello di copertura e che fungono da incastro del cornicione a sbalzo di dimensioni variabili da 90 cm a 120 cm, e da una trave di colmo sempre emergente. Le fondazioni sono costituite da un reticolo di travi a T rovescia.



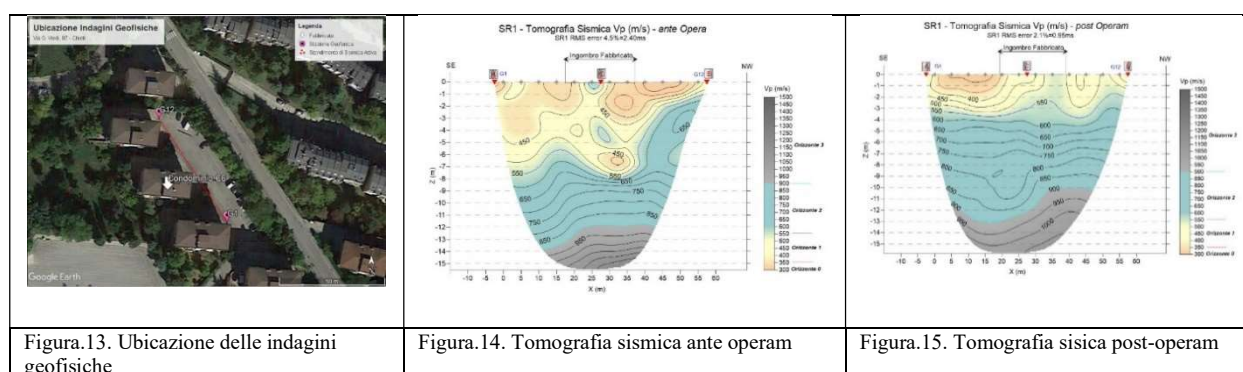
3.1. Aspetti geologici e geomorfologici dell'area [3]

L'area si presenta geomorfologicamente come un rilievo collinare costituito da litotipi argillosi, avente alla sommità litotipi più competenti quali sabbie e conglomerati. La litologia è composta da argille marnose ed argille siltose di

colore grigio – azzurro, con lenti e livelli di materiale limoso e sabbioso di spessore da centimetrico a metrico. Laddove la litologia passa al membro inferiore argilloso, a quota più basse, si possono generare, per motivi di cambiamento del tasso erosivo legato alla competenza dei materiali, scarpate strutturali, e movimenti gravitativi di versante come in questo caso, sia a monte che a valle dell'area di studio. Inoltre, sono presenti diffusi fenomeni gravitativi ascrivibili a frane da scorrimento rotazionale classificate con stato di attività quiescente che interessano il versante su cui è ubicata l'area di studio.

3.2. Risultati della tomografia sismica ante e post opera [3]

E' stato possibile valutare il miglioramento delle proprietà meccaniche del terreno attraverso delle tomografie sismiche in onde di compressione P e onde di taglio S, pre-e post intervento, concentrando la risoluzione nell'accoppiamento (*coupling*) tra struttura e sottosuolo. Le tomografie eseguite prima e dopo l'intervento, hanno rilevato un miglioramento del volume caratteristico interessato dall'intervento. Tale miglioramento dei parametri meccanici e soprattutto dei parametri sismici è caratterizzato da un aumento sensibile delle velocità delle onde P, ma soprattutto con l'aumento delle velocità delle onde di taglio, S, con la conseguenza di una riduzione del fattore di amplificazione locale del sito di intervento che è stato misurato prima e dopo l'esecuzione dell'intervento di consolidamento. Sono state acquisite due linee sismiche attive, una sismica a rifrazione elaborata in tomografia sismica e una sismica in onde superficiali, M.A.S.W., prima e dopo l'intervento strutturale di consolidamento, al fine di valutare in modo geofisico gli effetti dell'intervento sul volume geologico significativo in relazione al fabbricato in oggetto. Di seguito in figura 3 la localizzazione dello stendimento sismico. I risultati mettono in evidenza quattro orizzonti stratigrafici dallo zero, inconsistente fino al 3 che rappresenta il bedrock geologico, e soprattutto il loro miglioramento di comportamento sismico dopo l'intervento. Sempre di seguito si può osservare anche un aumento del modulo di rigidità del volume significativo, testimoniato dall'aumento della velocità delle onde di taglio "S" e quindi anche del parametro Vs30, passando da una categoria di sottosuolo "C" ad una categoria di sottosuolo "B". Tenuto conto inoltre della presenza dei minipali nel corpo del terreno è possibile considerare un terreno di tipo A con fattore di amplificazione pari a $S_s=1$.



4. Strategia di intervento [1]

Per quanto riguarda il miglioramento sismico le linee guida del 2017 per la riduzione del rischio sismico degli edifici residenziali forniscono indicazioni per la valutazione della vulnerabilità in funzione della tipologia costruttiva e delle vulnerabilità presenti che va calibrata di volta in volta sul singolo edificio e difficilmente è possibile prevedere una soluzione tecnologica applicabile in tutti i casi. Tuttavia è possibile schematizzare alcune sequenze logiche di interventi da prevedere per le tipologie costruttive più ricorrenti che prevedono interventi locali e interventi globali e il miglioramento può essere attuato con interventi semplici eseguibili anche soltanto dall'esterno o più complessi ed invasivi. Per gli edifici in cemento armato sono possibili 3 livelli di intervento:

Il primo livello ha l'obiettivo:

- di controllare e posticipare i meccanismi locali e di piano nei pilastri perimetrali non confinati.

- di controllare i meccanismi di taglio e ribaltamento nelle tamponature;

Gli interventi che possono consentire di raggiungere gli obiettivi indicati sono il rinforzo e il collegamento delle pareti perimetrali ai telai e il confinamento dei nodi perimetrali.

Con il primo livello è possibile aumentare di almeno una classe il livello di sicurezza.

Il secondo livello ha come ulteriore obiettivo quello di assorbire parzialmente le azioni orizzontali. Gli interventi prevedibili, oltre a quelli del primo livello, sono:

- Il confinamento perimetrale delle travi e dei pilastri;
- l'inserimento di controventi anche dissipativi nelle pareti perimetrali;
- il rinforzo puntuale dei pilastri e della travi;
- l'inserimento di travi nel caso di telai in una sola direzione;
- la realizzazione di un involucro perimetrale che sia in grado rendere collaboranti le tamponature, assorbire le azioni orizzontali e controllare i meccanismi di piano.

Con il secondo livello è possibile migliorare di due o più classi il livello di sicurezza.

Il terzo livello oltre agli obiettivi del primo e del secondo livello prevede di raggiungere un livello elevato di sicurezza con interventi diffusi di rinforzo all'intero sistema strutturale e di riduzione delle carenze costruttive e degli indicatori di vulnerabilità. Gli interventi che possono consentire di raggiungere gli obiettivi indicati per il terzo livello, oltre agli interventi dei due livelli precedenti, prevedono :

- il rinforzo diffuso delle strutture verticali;
- il rinforzo o la sostituzione delle strutture orizzontali e di copertura
- eventuali interventi in fondazione in presenza di cedimenti e terreni instabili;

In base alla scala macrosismica europea EMS 98 e alle LG 2017 gli edifici in cemento armato sono stati classificati in tre categorie che tengono conto del livello di progettazione antisismica: nullo, moderato ed elevato.

Interventi per tipologia costruttiva

Edifici con livello di progettazione antisismico nullo: sono caratterizzati dal sistema resistente costituito da telai soltanto in una direzione. Questi edifici di solito sono stati costruiti prima del 1974-75, le armature sono lisce e il calcestruzzo non sempre è stato confezionato in una centrale di betonaggio. A ciò si può aggiungere una irregolarità in pianta ed in elevazione e una disposizione irregolare delle murature fuori dal piano dei pilastri, presenza di travi e pilastri tozzi non armate a sufficienza.

In questo caso il miglioramento sismico deve essere necessariamente realizzato con interventi diffusi e fortemente invasivi propri del livello 3.

Edifici con livello di progettazione sismica moderato: sono caratterizzati dal sistema resistente costituito da telai nelle due direzioni ma con la presenza di travi a spessore di solaio. Questi edifici di solito sono stati costruiti dopo il 1974-75, le armature sono nervate e il calcestruzzo è stato confezionato in una centrale di betonaggio. A ciò si può aggiungere una irregolarità in pianta ed in elevazione e una disposizione irregolare delle murature fuori dal piano dei pilastri, presenza di travi e pilastri tozzi non armate a sufficienza. In questo caso è possibile prevedere il miglioramento sismico con interventi del livello 1 e 2.

Edifici con livello di progettazione sismica elevato

A differenza dei precedenti sono caratterizzati dal sistema resistente costituito da telai nelle due direzioni ma con la presenza di travi emergenti. In questo caso è possibile anche la realizzazione di interventi dall'esterno e volti ad eliminare le altre carenze costruttive nelle tamponature nei pilastri tozzi, nelle aperture. . In questo caso è possibile prevedere il miglioramento sismico con interventi del livello 1.

Il caso in esame rientra tra gli edifici con un livello di progettazione antisismica moderata in una zona a media sismicità e pertanto si ritiene possibile prevedere un intervento di secondo livello operando prevalentemente dall'esterno senza la fuoriuscita degli occupant l'edificio. Si riporta una sintesi degli interventi previsti divisi tra globali e locali:

- Intervento in fondazione con minipali e consolidamento del terreno (globale);
- Rinforzo dei nodi non confinati, dei pilastri e delle travi mediante sistema in FRP (globale);
- Interventi di rinforzo delle tamponature con FRCM (globale).

- Cerchiatura delle aperture del piano terra (globale)
- Risanamento del calcestruzzo dopo la spicconatura dell'intonaco esterno (globale);
- Antisfondellamento dei solai del piano terra (locale)
- Sostituzione dei parapetti in c.a. sugli sbalzi con elementi leggeri (locale)
- Placcaggio con tessuto quadriassiale in fibra di carbonio degli sbalzi (locale)
- Rinforzo a flessione delle travi di colmo (locale)

4.1. Analisi della vulnerabilità prima e dopo l'intervento [3]

Con l'intervento eseguito è stato possibile migliorare il livello di sicurezza da circa 8% al 36% mentre per conseguire un livello maggiore sarebbe stato necessario prevedere interventi invasivi e diffusi con la fuoriuscita degli occupanti. Tale intervento trova una sua giustificazione operativa in una zona come Chieti a media sismicità inoltre, tenuto conto della qualità scadente del terreno, la criticità è stata superata parzialmente con l'intervento in fondazione che ha migliorato di circa il 10% il livello di sicurezza complessivo dell'edificio.

Parametri caratteristici della verifica ante e post intervento.

	Categoria Terreno	Categoria Topografica	Fattore Amplificazione S_s	Ag rif SLV	Domanda Ag sito SLV $A_{grif} \cdot S_s$	Capacità g	C/D	Is-V
Ante operam	C	T1	1,47	0,1523	0,22	0,018g	0,082	8%
Post operam senza minipali	C	T1	1,47	0,1523	0,22	0,08g	0,36	36%
Post operam con minipali	A	T1	1	0,1523	0,1523	0,08g	0,52	52%

Tabella n.1. risultati della verifica ante e post operam

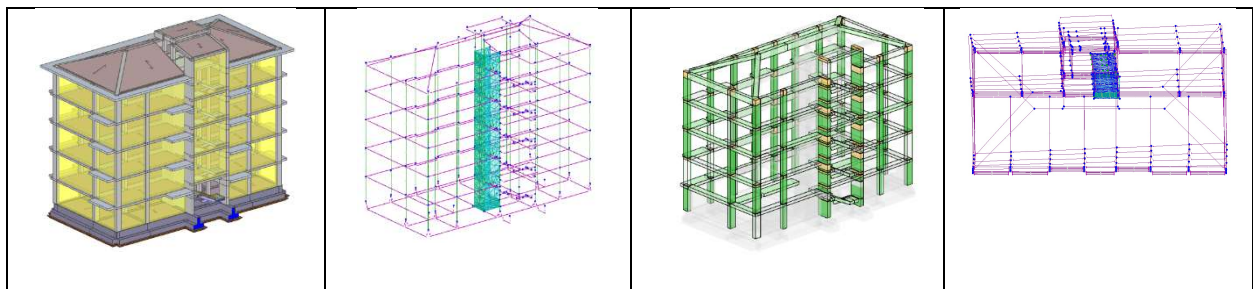
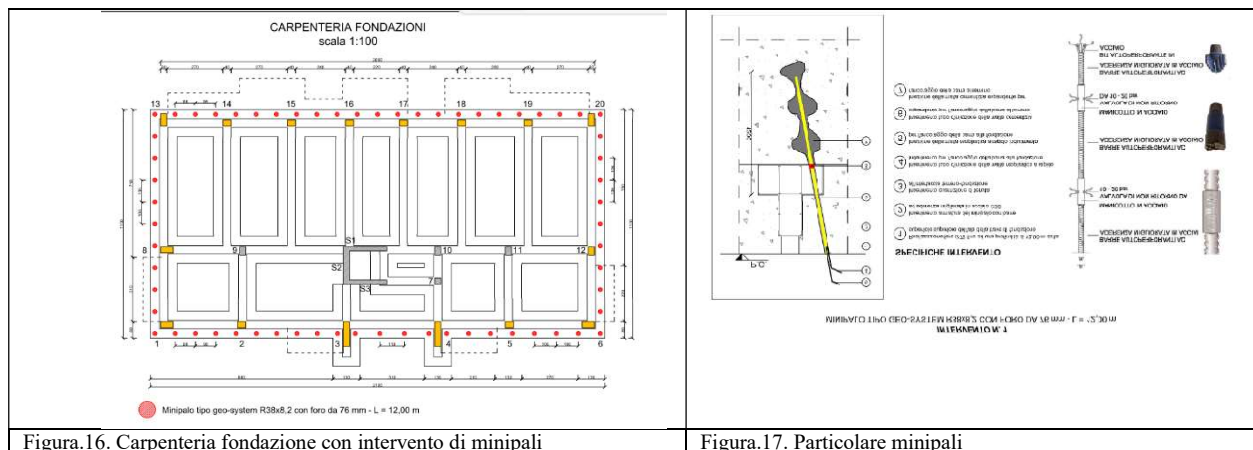
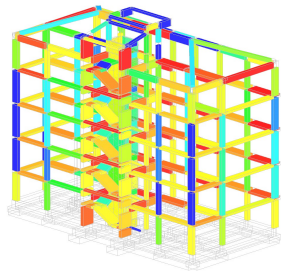
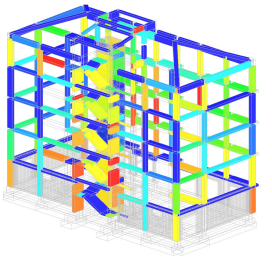
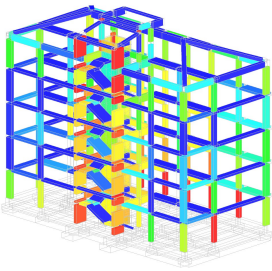
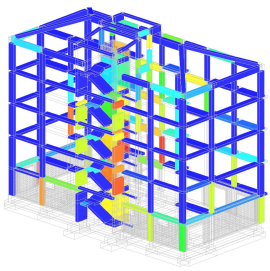
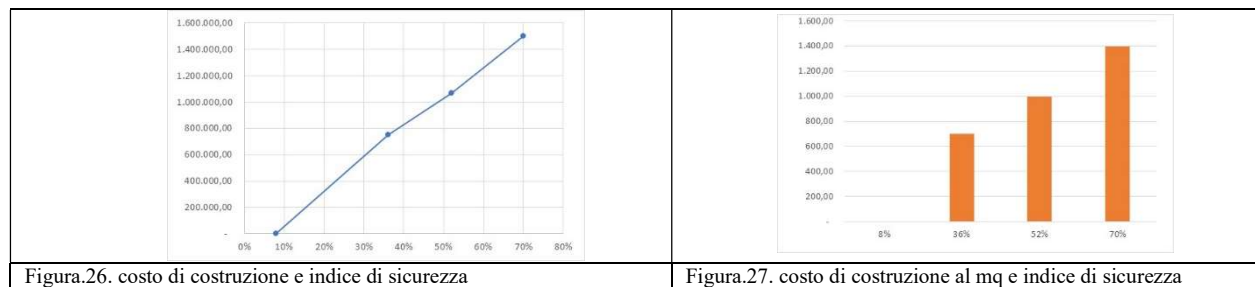


Figura.18. Modello struttura 3D	Figura.19. Modello Fem struttura unifilare	Figura.20. Vista rinforzi	Figura.21. Modo n.1 di vibrazione
			
figura.22. Pressoflessione-ante operam	Figura.23. Pressoflessione-post-operam	Figura.24. Taglio ante operam	Figura.25. Taglio post operam

4.2. Analisi costi benefici

L'intervento complessivo di miglioramento sismico ha avuto un costo di circa 1.069.000 euro di cui circa 300.000 per la esecuzione dell'intervento in fondazione e circa 750.000 euro sull'edificio.

La superficie abitabile compreso il vano scala è di circa 861 mq oltre 215 mq al piano terra con un costo al mq pari a circa 994 euro al mq. Escludendo l'intervento in fondazione di ottiene un costo di circa 697 euro al mq mentre l'intervento in fondazione comporta una incidenza al mq di circa 296 euro al mq. Nel caso in cui si volesse ottenere un livello di sicurezza pari a circa il 70% il costo stimato è di circa 1.500.00 euro con un costo di circa 1395 euro/mq e gli interventi dovrebbero essere eseguiti all'interno dell'edificio con la previsione della fuoriuscita degli occupanti per circa 12 mesi.



5. Conclusioni

La soluzione dei micropali e il consolidamento dei terreni di fondazione contribuisce a migliorare il livello di sicurezza degli edifici con costi accettabili e con interventi poco invasivi senza lo sgombero degli edifici e consente di superare la soglia critica della sicurezza sismica per interventi eseguiti dall'esterno. Tale soluzione, come illustrato nel presente lavoro, è possibile per edifici con livello di progettazione sismica moderata.

References

- Decreto del Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti 28 febbraio 2017. Linee guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni
- Università degli studi di Parma, Dipartimento Scienze Chimiche della Vita e della Sostenibilità ambientale, prof. R.Valentino, Università degli Studi di Chieti, Dipartimento di Ingegneria e Geologia prof. A.Paglieroi, 2022. Messa a punto di un metodo per il dimensionamento dei micropali della Geosystem;
- A.Lemme, C.Cicolani, A.Micantonio, C.Vassolo, P.Giunta, A.Mazzariello, A.Padula, F.Colantonio, Tensoitalia srl L'Aquila, Geosystem srl. Progetto di Miglioramento sismico ed efficientamento energetico ai sensi D.L. Rilancio 2020, Edificio Lotto C6 Chieti;