

Intervento di adeguamento sismico mediante isolamento alla base dell'edificio amministrativo di Sorin Group a Mirandola (MO)

Luciano Gasparini¹, Matteo Tavano² ■



Nome dell'opera/progetto:

Progetto per la ristrutturazione e adeguamento sismico dell'edificio amministrativo

Ubicazione:

Mirandola (MO)

Committente:

Sorin Group S.p.A.

Progettazione strutturale:

Politecnica Ingegneria e Architettura
Ing. Luciano Gasparini
Ing. Matteo Tavano

Progetto architettonico:

Politecnica Ingegneria e Architettura
Arch. Paola Gabrielli
Arch. Thorsten Lang

Il lavoro presentato di seguito è relativo all'intervento di adeguamento sismico eseguito sull'edificio amministrativo di Sorin Group S.p.a., sito in Strada Statale 12 Nord in località Mirandola (MO).

La struttura portante originaria dell'edificio si presenta come un telaio in conglomerato cementizio armato a più piani e più campate, con la presenza di setti in corrispondenza del vano scale e ascensore. Si distinguono un piano interrato e quattro piani fuori terra, oltre ad un locale impianti posto in copertura.

L'edificio è stato gravemente danneggiato dagli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012 e conseguentemente dichiarato inagibile a causa dei danni strutturali subiti. Tutti gli uffici presenti nel fabbricato sono stati quindi temporaneamente delocalizzati, in attesa dei lavori per il ripristino dell'agibilità. L'edificio ha subito una rotazione con asse sul vano scala che risultava l'elemento strutturale più danneggiato (Figura 1). I telai in conglomerato cementizio armato presentavano danneggiamenti di modesta entità soprattutto ai piani alti (Figura 2). Si denotavano lesioni sui campi di solaio prospicienti il vano scala a tutti i piani. Tali

¹ Ingegnere Strutturista, Politecnica Ingegneria e Architettura
✉ lgasparini@politecnica.it

² Ingegnere Strutturista, Politecnica Ingegneria e Architettura
✉ matteo.tavano@gmail.com

lesioni interessavano sia travetti che gli elementi di alleggerimento in laterizio ed erano passanti attraverso tutto lo spessore del solaio (Figura 3). Si denotava inoltre un fuori-piombo della scala di emergenza lato nord. Oltre ai danni alle strutture portanti, il fabbricato ha subito il cedimento diffuso dei controsoffitti con relativo danneggiamento degli impianti, oltre ai danni agli elementi secondari come partizioni e scaffalature (Figura 4).

In seguito ai numerosi sopralluoghi effettuati nei mesi successivi al sisma sono stati condotti alcuni studi comparativi con l'obiettivo di valutare quale fosse la strategia di intervento migliore per l'adeguamento del fabbricato. Tra le varie ipotesi, sono state vagliate: inserimento di controventi elastici tradizionali, inserimento di controventi dissipativi, inserimento di nuovi setti in conglomerato cementizio armato e retrofit mediante isolamento alla base. La Committenza, sulla base di tali studi preliminari, ha valutato come percorribile la ristrutturazione integrale del fabbricato orientata ai seguenti principali obiettivi:

- Adeguamento della struttura al 100% dell'azione sismica prevista dalle Norme Tecniche per le Costruzioni, mediante l'introduzione di isolatori sismici posti alla base tra il piano terra ed il piano interrato.
- Completo restyling dell'edificio e dei suoi spazi interni con ridisegno del layout degli uffici per meglio rispondere alle nuove esigenze aziendali (Figura 5).

Tra le varie strategie di intervento studiate, il retrofit mediante inserimento di isolatori è certamente quella che ha anche consentito una maggiore flessibilità nello sviluppo del progetto architettonico di completo restyling dell'edificio. Inoltre, tale intervento ha permesso una velocizzazione dei tempi di recupero del fabbricato poiché, essendo concentrato tra piano interrato e piano terra, consentiva le contemporanee lavorazioni impiantistiche e di finitura ai piani superiori. La durata totale dei lavori, compresi gli allestimenti interni, è stata di sei mesi.

Oltre ai vantaggi di cui sopra, dal punto di vista strutturale la caratteristica principale del sistema di isolamento è certamente quella legata al disaccoppiamento tra le frequenze del sisma e le frequenze della struttura in elevazione. Infatti, in virtù dell'allungamento del periodo proprio di vibrazione della struttura e della conseguente riduzione dell'accelerazione spettrale subita, questo tipo di intervento consente di ridurre le sollecitazioni sugli elementi della sovrastruttura e pertanto di minimizzare gli interventi su di essa. Limitando le sollecitazioni si perviene anche ad un abbattimento delle azioni trasmesse alle fondazioni. Oltre agli evidenti vantaggi di carattere strutturale e architettonico, la riduzione dell'ac-

celerazione subita dall'edificio comporta notevoli vantaggi per tutti gli utenti e le attrezzature interne in caso di sisma. La protezione dell'edificio dal sisma è così globale: non è solo limitata alla prevenzione del collasso ma è anche mirata al contenimento del danno delle strutture, dei tamponamenti, degli impianti, ecc.

Si pone in evidenza come il corretto funzionamento di una struttura con isolamento sismico si realizza solo a condizione che la massa isolata, ossia quella della sovrastruttura, possa muoversi liberamente in tutte le direzioni orizzontali per spostamenti almeno pari a quelli di progetto. Questa condizione deve essere continuamente verificata in tutte le fasi progettuali, realizzative e di collaudo. In particolare è importante controllare che elementi non strutturali non riducano o annullino le possibilità di movimento della struttura previste nella progettazione strutturale. A tal proposito, in sede progettuale, particolare attenzione è stata posta anche alla progettazione di finiture e impianti, rendendoli compatibili con il sistema di isolamento (Figura 6).

I tipi più diffusi di isolatori sismici esistenti attualmente in commercio sono sostanzialmente riassumibili in due categorie: quelli a scorrimento e quelli elastomerici. Per il caso in esame si è deciso di impiegare isolatori sismici del tipo a scorrimento a superficie curva doppia aventi raggio di curvatura $R = 3.7$ m e spostamento orizzontale massimo $d_{max} = +/-200$ mm, caratterizzati dalle seguenti peculiarità:

- lo scorrimento avviene su superfici sferiche consentendo così l'auto-centramento della struttura dopo il sisma;
- la dissipazione di energia e lo smorzamento viscoso equivalente sono associati all'attrito delle due superfici di scorrimento;
- il raggio di curvatura determina il periodo proprio di vibrazione della struttura;
- il periodo proprio è praticamente indipendente dalla massa della struttura;
- rispetto alle altre tipologie di isolatori, l'eccentricità del carico verticale durante il moto sismico (effetto $P-\Delta$) è dimezzata, trasmettendo così ai pilastri della sottostruttura momenti flettenti dimezzati relativamente a tale effetto.

È stata condotta una modellazione numerica tridimensionale della struttura. Il modello FEM è costituito da elementi *beam* (travi e pilastri) ed elementi *shell* (setti)(Figura 7). I solai sono stati considerati infinitamente rigidi nel loro piano. Gli isolatori a doppio pendolo sono stati modellati usando opportuni elementi link a comportamento non-lineare. Come parametri di input per tali elementi sono necessari raggio di curvatura, coefficiente d'attrito, coefficiente di smorzamento e rigidità. Tali parametri definiscono la legge

non-lineare forza-spostamento degli isolatori sottoposti ad una forzante dinamica. In tale curva (Figura 8) F_0 rappresenta la forza di attrito sviluppata dall'isolatore (o "forza di primo distacco"), K_r è la rigidità di richiamo e F_{max} è la massima forza orizzontale, funzione dello spostamento ultimo d_{max} . Tali quantità sono state definite mediante le seguenti espressioni:

$$F_0 = \mu \cdot N_{Sd}$$

$$K_r = N_{Sd}/R$$

$$F_{max} = F_0 + K_r \cdot d_{max}$$

Il coefficiente d'attrito dinamico μ è stato calcolato attraverso le leggi fornite direttamente dal produttore dei dispositivi, in funzione del rapporto tra carico verticale agente sul dispositivo in condizioni sismiche ed il carico verticale massimo sopportabile dal dispositivo stesso. Per il caso in esame i coefficienti d'attrito variano nel range di valori compresi tra 0.043 e 0.082 con valor medio pari a $\mu_{medio} = 0.054$. Solo gli isolatori esterni posti alla base della scala metallica di emergenza e della rampa di ingresso sono caratterizzati da $\mu = 0.010$, in virtù dei ridotti valori di carico verticale su di essi agenti.

Sul modello FEM appena illustrato è stata successivamente eseguita un'analisi dinamica non-lineare. Essendo in presenza di un sistema in cui le non-linearità sono interamente concentrate nel sistema d'isolamento (gli elementi della struttura operano sostanzialmente in campo lineare) e pertanto presenti in un numero limitato di elementi, si è optato per la strategia di soluzione che va sotto il nome di "Fast Nonlinear Analysis" (FNA). Tale strategia opera non attraverso l'integrazione diretta delle equazioni del moto, bensì per estensione al campo non-lineare del metodo dell'analisi per sovrapposizione modale. Ciò consente di ridurre nettamente i tempi di analisi. Ai fini delle analisi *time-history* sono state selezionate sette coppie di accelerogrammi registrati, resi compatibili allo spettro di risposta elastico da normativa smorzato al 5% nel campo di periodi di interesse (Tabella 1). Ogni coppia è costituita dalle due registrazioni delle componenti orizzontali dello stesso evento sismico. Relativamente ai criteri di spettro-compatibilità, le Norme Tecniche per le Costruzioni non forniscono indicazioni esaustive circa la scalatura di registrazioni appartenenti allo stesso evento sismico. Pertanto sono state implementate due strategie di scalatura dei segnali originali. Nel primo caso sono stati adottati fattori di scala diversificati per le due componenti dello stesso evento sismico, rendendo compatibile lo spettro di ogni singola registrazione, per un totale di quattordici fatto-

ri di scala (Figura 9). Nel secondo caso è stato adottato un metodo differente e più aderente ai criteri di combinazione dell'azione sismica nelle due direzioni; in particolare, per ogni evento è stato reso compatibile lo spettro ottenuto come involuppo tra le curve spettrali nelle due direzioni ortogonali, pervenendo così ad un totale di sette fattori di scala, uno per ogni evento. Le analisi sismiche effettuate utilizzando questi ultimi fattori di scala consentono di ottenere effetti sulla struttura (forze, spostamenti, ecc...) inferiori.

Le numerose analisi effettuate hanno condotto ad un periodo di vibrazione della struttura isolata pari a 2.50 secondi, circa quattro volte superiore al periodo della struttura stessa considerata a base fissa. A sostegno dell'efficacia dell'intervento di adeguamento scelto, si pone in evidenza come grazie all'incremento del periodo proprio di vibrazione le accelerazioni spettrali subite dalla struttura siano inferiori di circa il 90% rispetto a quelle subite dalla struttura considerata a base fissa (Figura 10).

Sulla sovrastruttura sono stati eseguiti interventi locali di consolidamento e ripristino laddove necessarie. In particolare, oltre agli interventi con fasciatura in FRP su alcuni pilastri (Figura 11), sono stati demoliti e ricostruiti il nucleo scale-ascensore e i campi di solaio lesionati (Figura 12). La scala esterna in conglomerato cementizio armato è stata demolita e sostituita con una nuova scala metallica, isolata alla base, e pertanto anch'essa solidale all'edificio principale in caso di sisma, avendo realizzato così l'accoppiamento dinamico tra i due corpi strutturali. Al fine di minimizzare il numero degli isolatori per la scala esterna si è pensato ad una configurazione statica caratterizzata da quattro pilastri in linea abbinati ad un sistema di appensione di rampe e pianerottoli, sfruttando così il carico gravitativo inerte dell'edificio esistente (Figura 13). È stato poi realizzato un giunto sismico in corrispondenza del tunnel posto sul lato est dell'edificio in modo tale da evitare fenomeni di martellamento in caso di sisma (Figura 14).

Le operazioni propedeutiche all'inserimento degli isolatori hanno riguardato:

- esecuzione dei ringrossi inferiori dei pilastri e dei baggioli superiori per l'ancoraggio dei dispositivi (Figura 15);
- esecuzione di nuovi cordoli di fondazione nella direzione ortogonale ai telai in conglomerato cementizio armato, mancanti allo stato di fatto (Figura 16);
- esecuzione al primo solaio di nuove travi nella direzione ortogonale ai telai in conglomerato cementizio armato, mancanti allo stato di fatto, e necessarie per il corretto funzionamento del sistema di isolamento (Figura 17).

La procedura di retrofit consiste nella presa in

carico di un pilastro per la posa di dispositivi di isolamento sismico, eseguita mediante applicazione di spinta idraulica a mezzo di speciali martinetti oleodinamici, comandati da centralina elettroidraulica controllata da trasduttori di spostamento centesimali. Operando in controllo di spostamento, oltre che di pressioni, il sistema ha consentito il monitoraggio continuo di eventuali cedimenti della struttura. La procedura è stata articolata nelle seguenti fasi:

- posizionamento dei martinetti idraulici e presa in carico del pilastro (Figura 18);
- taglio mediante catena della porzione di pilastro necessaria all'inserimento dell'isolatore (Figura 19);
- posa in opera dell'isolatore (Figura 20);
- inserimento martinetto piatto e messa in carico dell'isolatore (questa operazione consente di caricare l'isolatore comprimendolo azzerandone i giochi in modo da non avere cedimenti al momento dello scarico dei martinetti idraulici) (Figura 21);
- esecuzione del getto di allettamento e inghiessaggio dell'isolatore con l'utilizzo malta cementizia premiscelata, fluida, a rapido sviluppo delle resistenze meccaniche (Figura 22);
- rimozione delle attrezzature (Figura 23).

Una volta terminati i lavori, è stato deciso di comune accordo con il Collaudatore di eseguire una prova di carico sul sistema di isolamento, al fine di testare l'effettivo distacco tra sovrastruttura e sottostruttura. La prova è consistita nella forzatura a contrasto eseguita tramite martinetti idraulici operanti tra sovrastruttura e sottostruttura nella direzione longitudinale del fabbricato (N-S) l'applicazione della forza è avvenuta in modo quasi statico. I martinetti sono stati posi-

zionati tra baggiolo superiore e specifici muri in conglomerato cementizio armato realizzati all'interrato e aventi anche la finalità di costituire i "fine corsa" della struttura. (Figura 24). La prova è stata preceduta da numerose simulazioni numeriche necessarie a dimensionare i martinetti e a progettare i muri di contrasto. Dall'analisi dei risultati della prova e degli andamenti dei grafici sono state dedotte le seguenti considerazioni:

- la traslazione orizzontale è progressiva, linearmente crescente con i carichi applicati;
- la traslazione orizzontale è dello stesso ordine di grandezza nei due punti di applicazione del carico a conferma di un comportamento complessivo omogeneo e privo di fenomeni significativi rotazionali;
- la traslazione orizzontale nella direzione dei carichi applicati è dello stesso ordine di grandezza anche negli isolatori più distanti dai punti di applicazione del carico;
- al raggiungimento del massimo livello di carico (in accordo ai valori teorici stimati) è stato registrato il distacco degli isolatori, con valori di spostamenti leggermente differenziati tra gli isolatori più prossimi ai punti di applicazione delle forze rispetto a quelli più distanti. Ciò è da imputarsi all'inevitabile, seppur minima, deformabilità della sovrastruttura;
- le traslazioni verticali in corrispondenza dei punti di applicazione dei carichi sono risultate prossime a zero;
- durante la prova è stato possibile percepire significativamente i rumori sordi tipici della movimentazione relativa delle componenti del sistema di isolamento.

La prova è stata ritenuta soddisfacente.

Figura 1
Danneggiamenti sui setti del vano scala e ascensore.





Figura 2
Danneggiamenti dei pilastri
in conglomerato cementizio
armato.



Figura 3
Lesioni passanti sui solai.



Figura 4
Croli parziali di
controsoffittature e impianti
tecnologici, danni alle
attrezzature interne.



Figura 5
Edifício pre e
post-intervento.





Figura 6
Finiture e impianti compatibili con il sistema di isolamento.

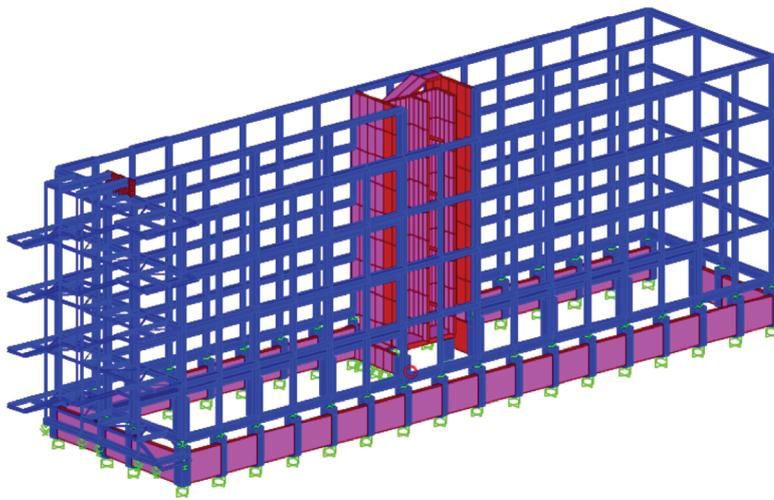


Figura 7
Modello FEM.

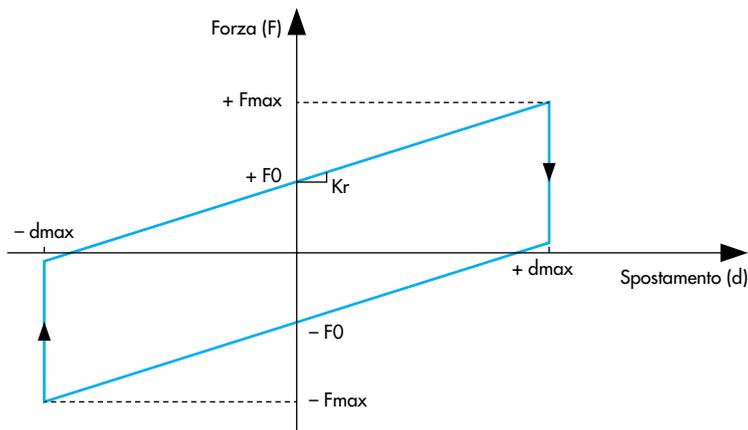
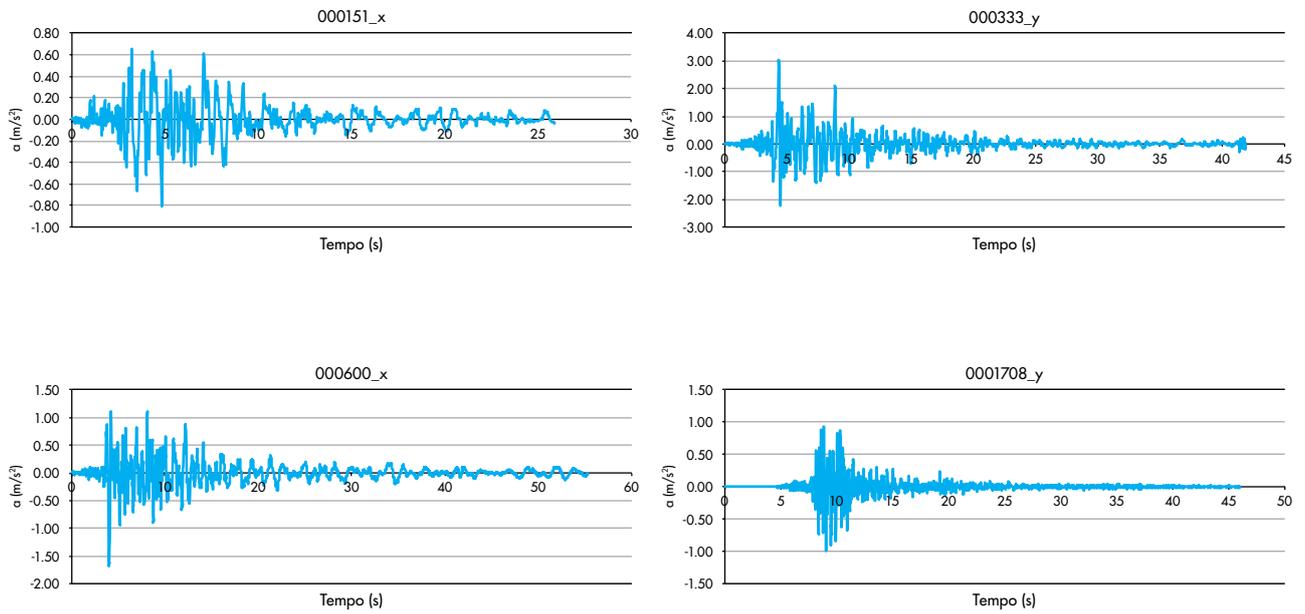


Figura 8
Curva bilineare forza-spostamento degli isolatori a superficie curva doppia.

Tabella 1 - Accelerogrammi selezionati e spettro-compatibilità

Waveform ID	Earthquake ID	Station ID	Earthquake Name	Date	Mw	Fault Mechanism	Epicentral Distance [km]	PGA_X [m/s ²]	[m/s ²] EC8	PGA_Y Site class
600	286	ST223	Umbria e Marche	26/09/1997	6	normal	22	1.69	1.04	C
333	65	ST33	Friuli (aftershock)	15/09/1976	6	thrust	11	2.26	3.04	C
151	81	ST46	Basso Tirreno	15/04/1978	6	oblique	18	0.81	0.88	C
7329	474	ST1253	Ano Liosia	07/09/1999	6	normal	19	4.12	3.75	C
1708	561	ST549	Adana	27/06/1998	6.3	strike slip	30	0.82	0.99	C
879	349	ST271	Dinar	01/10/1995	6.4	normal	8	2.67	3.13	C
335	158	ST121	Alkion	25/02/1981	6.3	normal	25	1.14	1.18	C

Figura 9
Accelerogrammi selezionati
e spettro-compatibilità.



Combinazione N. 1, $SF_{mean} = 1.3758$

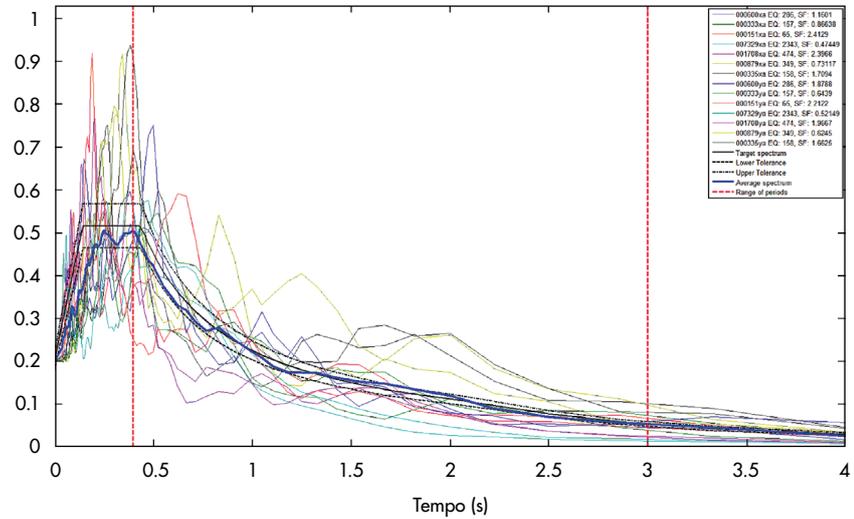


Figura 10
Riduzione dell'accelerazione
subita dalla struttura isolata
rispetto alla struttura a base
fissa.

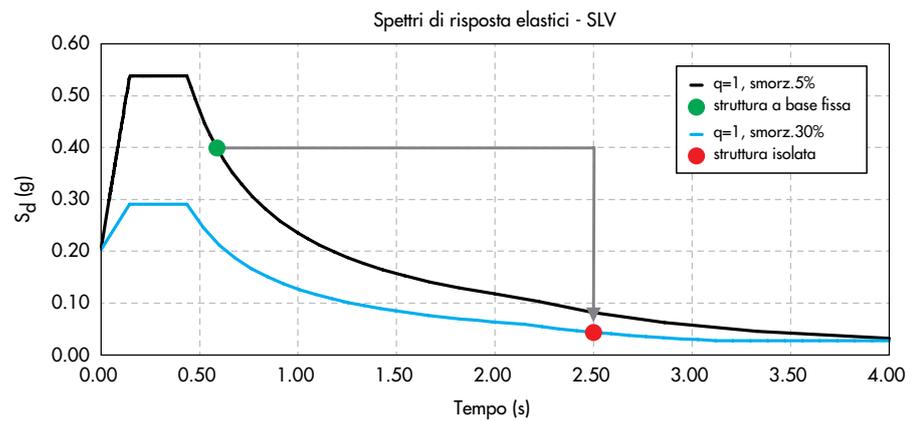




Figura 11
Consolidamento mediante FRP di alcuni pilastri della sovrastruttura e alcuni nodi trave-pilastro.



Figura 12
Demolizione e ricostruzione corpo scale-ascensore e campi di solaio lesionati.

Figura 13
Nuova scala metallica
esterna, isolata alla base.

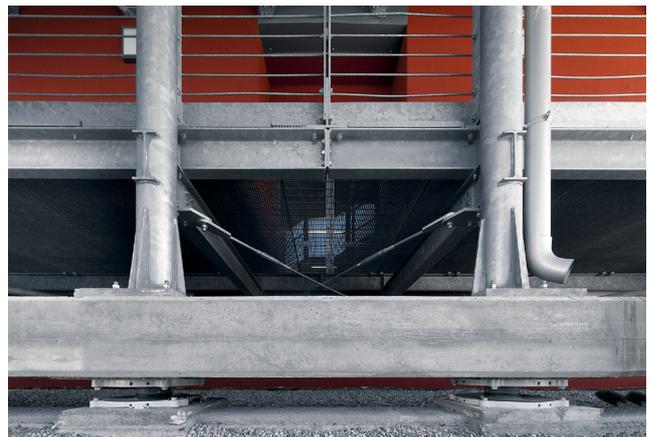
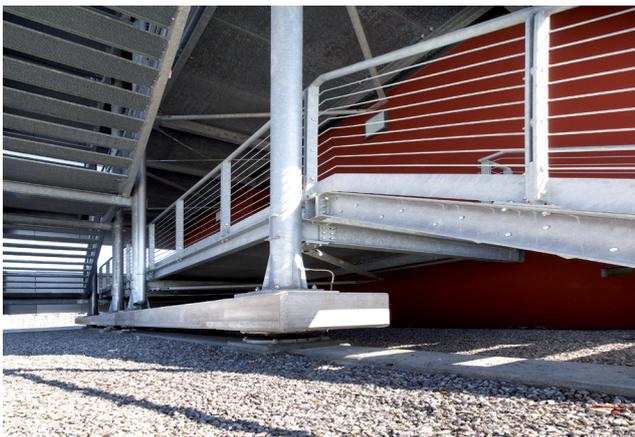
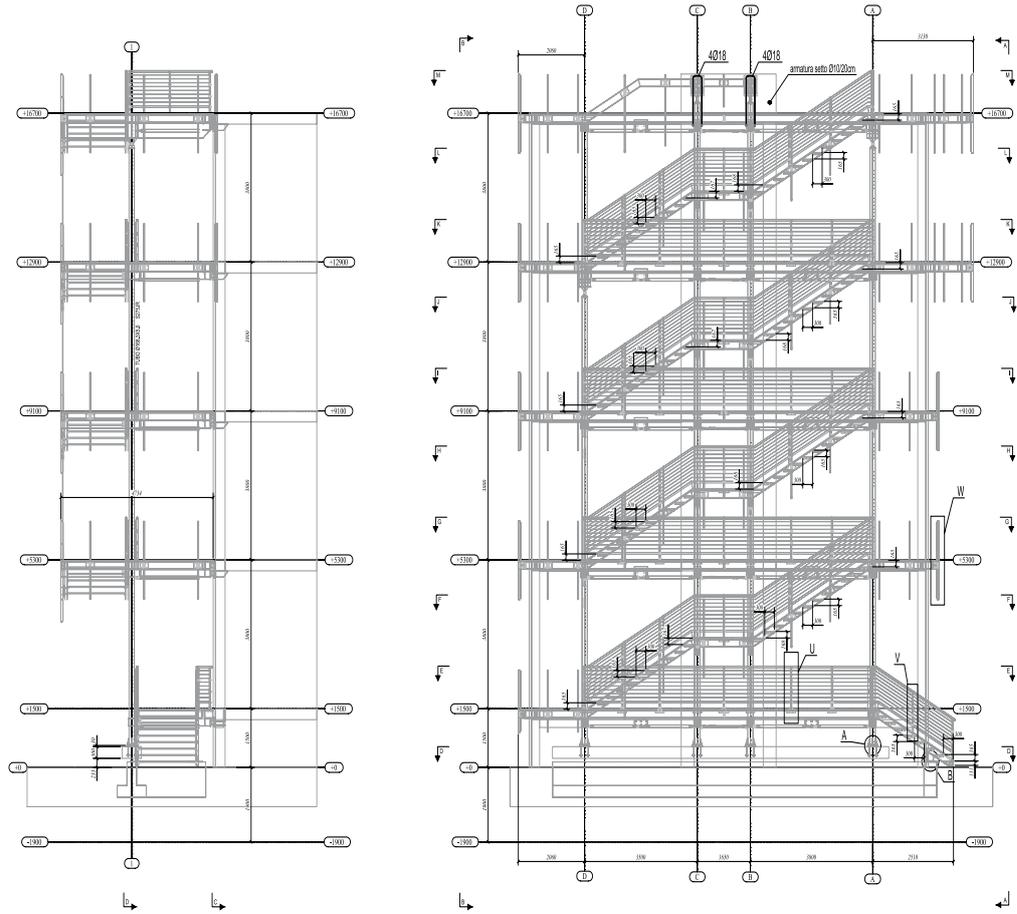




Figura 14
Consolidamento tunnel lato est e realizzazione giunto sismico.

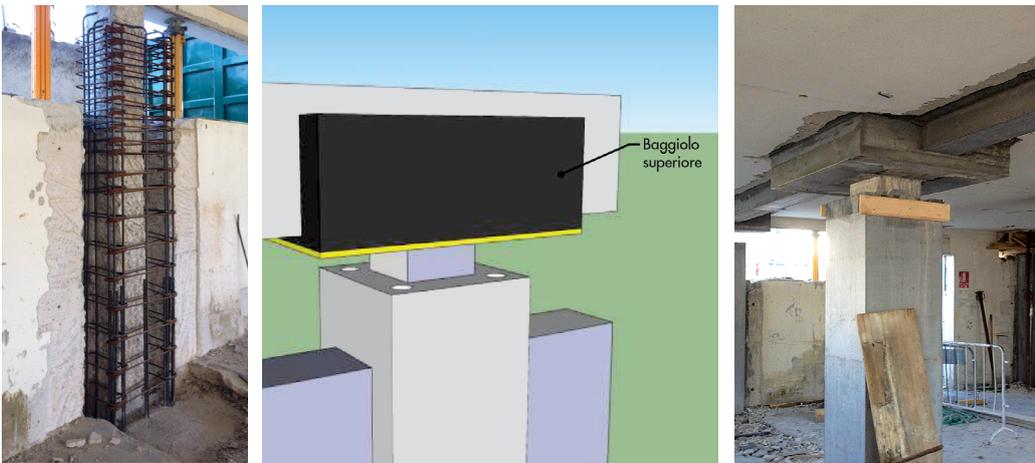


Figura 15
Esecuzione dei ringrossi inferiori dei pilastri e dei baggioli superiori per l'ancoraggio dei dispositivi.



Figura 16
Esecuzione di nuovi cordoli di fondazione nella direzione ortogonale ai telai in conglomerato cementizio armato.



Figura 17
Esecuzione al primo solaio di nuove travi nella direzione ortogonale ai telai in conglomerato cementizio armato.

Figura 18
Posizionamento dei martinetti idraulici e presa in carico del pilastro.

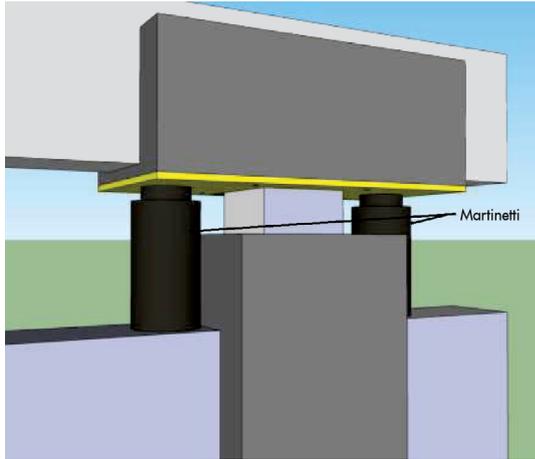


Figura 19
Taglio mediante catena della porzione di pilastro necessaria all'inserimento dell'isolatore.

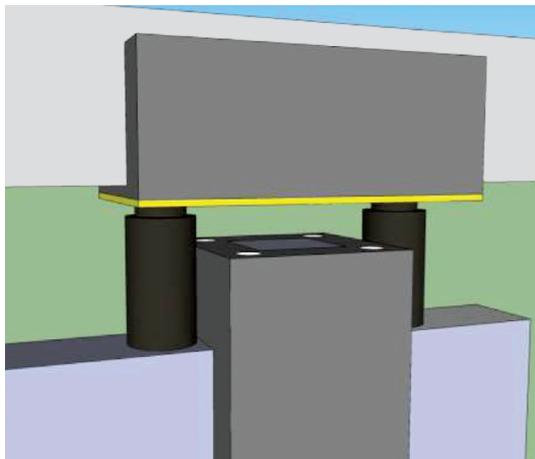


Figura 20
Posa in opera degli isolatori.

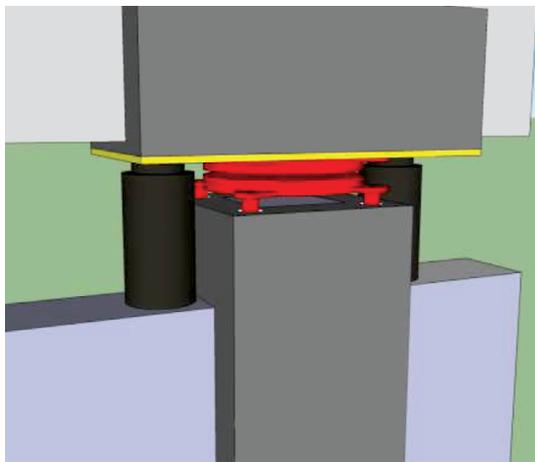
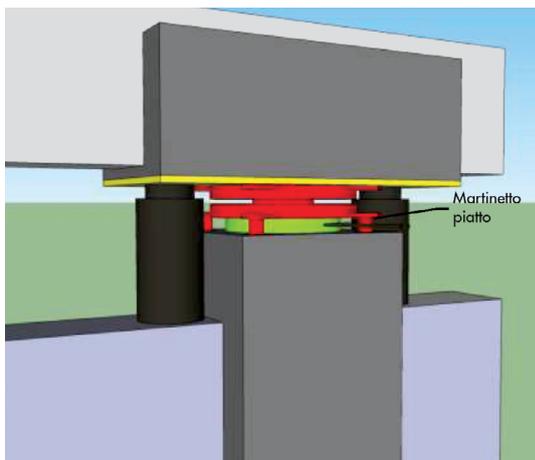


Figura 21
Inserimento martinetto piatto e messa in carico dell'isolatore.



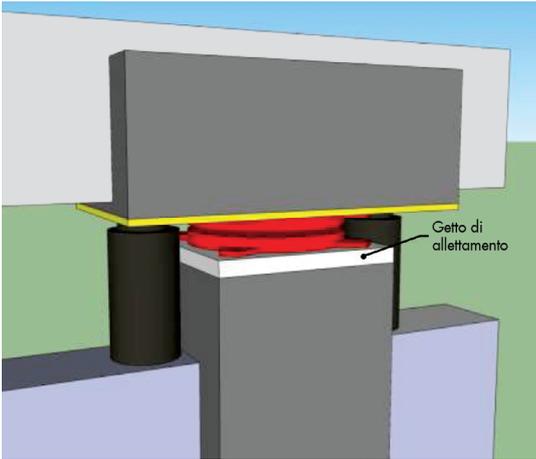


Figura 22:
Esecuzione del getto di allettamento e inghisaggio dell'isolatore con l'utilizzo malta cementizia.

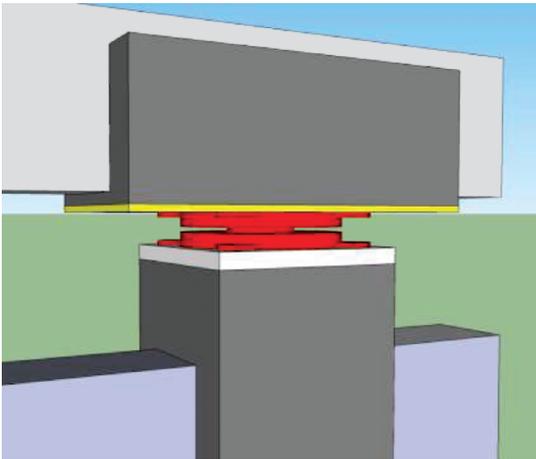


Figura 23
Rimozione delle attrezzature.



Figura 24
Prova di spinta dell'edificio, posizionamento martinetti idraulici e muri di contrasto.

