

Progetto di una Caserma dell'Arma dei Carabinieri – Strategie di protezione sismica a confronto

Design of a Military Police Station – Comparison between different seismic retrofitting strategies

Giampiero Martuscelli¹, Edoardo Brancati², Ida Coppola³ ■

Sommario

Il presente articolo si propone di confrontare l'efficienza strutturale di un edificio in c.a. progettato per una nuova Caserma dei Carabinieri, nelle due distinte versioni di struttura a base fissa ed a base isolata.

L'iter per la progettazione esecutiva ha avuto inizio nel 2006; ragioni amministrative hanno però comportato un'interruzione del processo progettuale che, sospeso per qualche anno, è ripreso nel 2010 e si è concluso nello stesso anno.

La prima versione del progetto esecutivo, del 2006, è stata condotta secondo le prescrizioni del D.M. 16.01.1996, all'epoca ancora in vigore.

Alla ripresa delle attività, nel 2010, alla luce dell'entrata in vigore delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14.01.2008, si è reso necessario un riesame del progetto esistente.

L'obiettivo di questo lavoro è stato quindi duplice: innanzitutto definire le misure da adottare affinché l'edificio a base fissa, così come progettato nel 2006, potesse essere in grado di fronteggiare le azioni previste dalle NTC 08 e soddisfarne i requisiti; in secondo luogo evidenziare i benefici tecnici, funzionali ed economici che l'isolamento sismico alla base, adottato come soluzione progettuale finale, ha comportato rispetto ad una progettazione di tipo tradizionale.

A tale scopo, sono stati utilizzati tre distinti scenari di riferimento:

- struttura a base fissa progettata secondo il D.M.'96;
- struttura a base fissa progettata secondo le NTC 08;
- struttura a base isolata progettata secondo le NTC 08.

Per ciascuna delle tre tipologie strutturali, sono stati analizzati il comportamento dinamico, i tagli sismici di piano ed i drift d'interpiano.

Riguardo all'aspetto funzionale è stato effettuato un confronto in termini di fruibilità e di manutenibilità relativa al post-sisma.

Si è inoltre affrontato il tema dei costi mettendo a confronto le quantità di calcestruzzo e di acciaio impiegate per le diverse componenti della struttura in ciascuna delle tre soluzioni progettuali.

Parole chiave: Adeguamento sismico, edifici di nuova progettazione in zona sismica, calcestruzzo armato, isolamento alla base.

Abstract

The objective of this paper is to compare the structural effectiveness of two different configurations (fixed base and base-isolated building) of a reinforced concrete (RC) building designed to be a new Military Police Station.

Although the design was defined since 2006, the development of the works was interrupted for four years due to administrative reasons, so the building was constructed only in 2010. As a consequence, since the first version of the design was developed in accordance with the old Italian seismic code (D.M. 16 January 1996), the throughout design had to be revised accordingly to the new (current) code (D.M. 14 January 2008, also called NTC'08), which came into force in the mid-2009.

For these reasons, the philosophy of the new design followed two steps: to evaluate different retrofitting solutions which permitted to the building, initially with fixed base, to resist the seismic event defined by the code, then to establish the most effective one (the base isolation technique was adopted) in terms of

¹ Università degli Studi di Napoli Federico II – Direttore Tecnico Interprogetti Srl - ✉ gmartuscelli@interprogettisrl.com

² Università degli Studi di Napoli Federico II – Consulente Interprogetti Srl - ✉ brancati@interprogettisrl.com

³ Imperial College, Londra (UK) - Consulente Interprogetti Srl - ✉ coppola@interprogettisrl.com

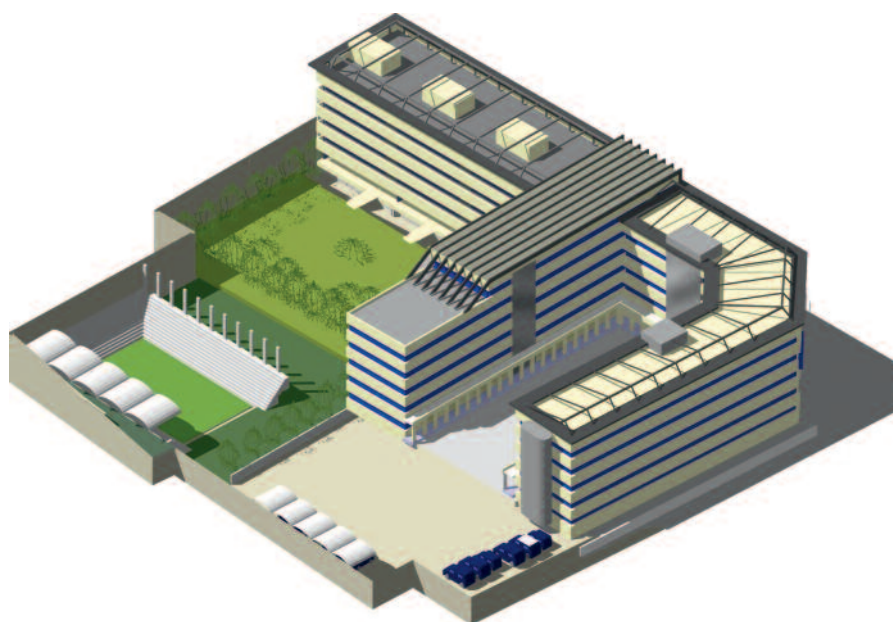
technical, functional and economical benefits. Different building configurations and strategies were considered to this purpose, analyzing the dynamic behavior, the seismic demand in terms of design loads (interstorey shear) and displacement (interstorey drift):

- structure with fixed base, designed in accordance with the old seismic Code (D.M. 14/01/'96);
- structure with fixed base, designed in accordance with the new seismic Code (NTC'08);
- structure isolated at the base, designed accordingly to the new seismic Code (NTC'08).

The cost of the amount of materials (concrete and steel), in addition to the usability and the maintenance of the building after the seismic event have been three aspects evaluated and compared in order to define the most suitable configuration in terms of functionality.

Keywords: Seismic retrofitting, seismic design of buildings, reinforced concrete, base isolation.

Figura 1
Immagine 3D dell'edificio.



1. Introduzione

L'edificio della Caserma dell'Arma dei Carabinieri in oggetto si trova a Napoli ed è attualmente in fase di realizzazione (Figura 1). La progettazione strutturale in fase esecutiva è stata curata dalla società di ingegneria, Interprogetti s.r.l.

Come anticipato, la prima versione del progetto esecutivo, risalente al 2006, è stata elaborata secondo le indicazioni del D.M. '96.

La successiva variante del 2010 è invece figlia della moderna filosofia progettuale del *performance-based design*, ereditata dalle normative europee (Eurocodici) ed inclusa nelle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14.01.2008.

L'evoluzione normativa ha condizionato profondamente il passaggio tra le due fasi della progettazione esecutiva. Il progetto di variante è innanzitutto il risultato di un attento studio preliminare mirato a valutare in quale misura e a quale costo l'edificio, elaborato secondo la precedente normativa, potesse soddisfare i nuovi

requisiti prestazionali. Al termine di questa fase preliminare, ed alla luce delle valutazioni svolte, si è deciso di orientare le scelte progettuali verso una concezione più innovativa dell'organismo strutturale, introducendo la tecnica dell'isolamento alla base quale strategia di protezione sismica dell'edificio.

2. La struttura a base fissa progettata secondo il D.M. '96

Il complesso strutturale destinato ad ospitare la centrale operativa dell'Arma dei Carabinieri presenta una conformazione in pianta prossima ad una "U" (Figure 2 e 3). In elevazione la struttura si sviluppa su cinque livelli fuori terra ed un piano interrato destinato a parcheggi; solo un'ala dell'edificio presenta anche un sesto livello.

L'esigenza di ridurre gli effetti torsionali legati alla forte irregolarità in pianta giustifica la suddivisione della struttura in tre corpi di fabbrica

indipendenti, reciprocamente giuntati. Ciascun corpo è concepito come una struttura mista a telai e pareti o nuclei in c.a., in cui ai primi è affidato prevalentemente l'assorbimento delle azioni verticali, mentre a setti e nuclei quello delle azioni orizzontali.

I pilastri hanno sezioni rettangolari che rastremano in altezza, setti e nuclei presentano tutti spessore pari a 0.30 m, mentre le travi sono generalmente a spessore.

Le fondazioni sono del tipo indirette e costituite da plinti su pali trivellati, del tipo FDP, con diametro $\phi 0.60$ m e lunghezza pari a 14 m. I plinti, infine, sono collegati tra loro da una soletta in c.a. di altezza pari a 0.40 m che ha il duplice ruolo di limitare i cedimenti differenziali delle fondazioni ed isolare la struttura dalla falda sottostante.

3. La struttura a base fissa progettata secondo le NTC 08

Le NTC 08 impongono che la struttura soddisfi requisiti prestazionali legati a ciascuno stato limite di riferimento, a cui è associato un prestabilito periodo di ritorno dell'input sismico. In sostanza, il progettista deve imporre il meccanismo di collasso in modo tale che la struttura subisca un danneggiamento controllato anche in occasione di eventi sismici violenti. È essenziale, a tale scopo, evitare la formazione di meccanismi o rotture di tipo fragile favorendo invece quelli di tipo duttile e dissipativo. Risultano quindi fondamentali il rispetto dei criteri di

gerarchia delle resistenze e l'attenzione nei riguardi dei dettagli costruttivi all'interno degli elementi strutturali. I criteri introdotti dalle NTC 08 hanno quindi inevitabilmente richiesto un sostanziale riesame del progetto del 2006.

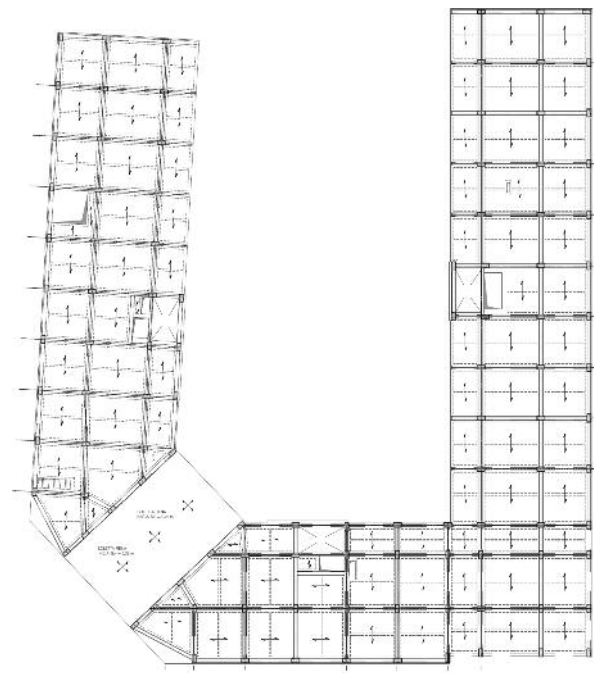
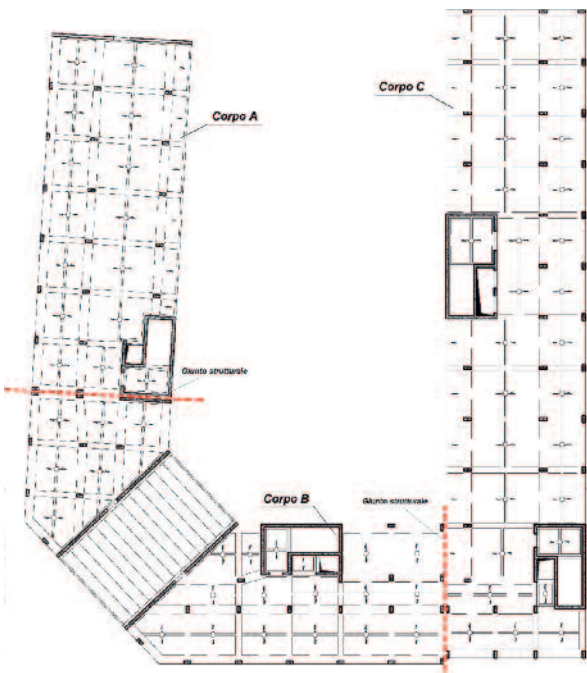
La tipologia strutturale è rimasta invariata, nel senso che la struttura continua ad essere concepita come un sistema misto equivalente a parete. Il fattore di struttura q adottato, come da indicazioni normative, è pari a 3. L'intento è stato quello di lasciare inalterate, laddove possibile, le sezioni degli elementi strutturali, intervenendo unicamente sui quantitativi di armatura. Invariate sono rimaste le dimensioni di pilastri e setti; lievi variazioni sono state necessarie, invece, per le travi. Gli interventi più significativi sulla geometria hanno riguardato le strutture di fondazione: il forte incremento di tagli e momenti sismici, registrato soprattutto alla base di setti e nuclei in c.a., ha comportato variazioni significative sul numero e sulle lunghezze dei pali, che da 14 m sono passate a 25 m.

4. La struttura a base isolata

Il danneggiamento, seppur controllato, di una struttura a base fissa in occasione di un evento sismico violento, può comprometterne la piena funzionalità nell'immediato post-sisma. L'aspetto legato al mantenimento della funzionalità assume invece un'importanza fondamentale per una Caserma dei Carabinieri al fine della gestione dell'emergenza. Da qui l'idea di valutare l'isolamento sismico alla base come possi-

Figura 2
Piano tipo struttura a base fissa.

Figura 3
Piano tipo struttura a base isolata.



bile soluzione progettuale per conferire alla struttura i requisiti prestazionali richiesti.

L'inserimento di opportuni dispositivi di isolamento ha permesso di ottenere una struttura molto meno vulnerabile nei confronti dei fenomeni sismici; la presenza degli isolatori consente, infatti, di disaccoppiare il moto del terreno da quello della struttura, realizzando una sconnessione lungo lo sviluppo verticale dell'edificio. Ne risulta un sistema molto più deformabile, i cui periodi propri di vibrazione tendono ad allontanarsi sensibilmente dalla zona più critica dello spettro di risposta (Figura 9). Per la struttura in esame, si è spostato il periodo proprio di vibrazione dell'edificio da circa 0.5 secondi a circa 3.0 secondi. Per il contenuto in frequenza del sisma di progetto, la struttura isolata è risultata così molto meno sensibile all'azione sismica, facendo registrare una drastica riduzione dell'accelerazione spettrale.

Tale riduzione è risultata talmente significativa da poter progettare la struttura in campo elastico anche in occasione di un evento sismico violento. È stato altresì possibile eliminare completamente setti e nuclei in c.a. passando da una struttura mista telai-pareti ad una esclusivamente a telai (Figure 3 e 4b).

La forte riduzione delle sollecitazioni ha inoltre consentito di limitare significativamente gli effetti torsionali connessi all'irregolarità in pianta evitando così di dover dividere la struttura in più corpi di fabbrica, giuntati tra loro. Sono tuttavia previsti giunti tra il corpo principale ad "U" e le strutture adiacenti (rampe perimetrali, parcheggio monopiano, edificio alloggi).

Gli isolatori sono stati posizionati tra la sommità dei pilastri del piano interrato ed il primo impalcato (Figure 5 - 6); la tipologia di isolatori adottata è quella di dispositivi a pendolo scorrevole

con due superfici di scorrimento (Figura 7).

Rispetto ad altre tipologie di isolatori, questi ultimi garantiscono una minore suscettibilità della struttura agli effetti dell'eccentricità accidentale o, in generale, di una distribuzione delle masse diversa da quella di progetto. La risposta di questi isolatori è infatti influenzata dalla variazione di carico assiale agente, essendo la rigidità del singolo dispositivo sempre proporzionale allo sforzo normale applicato. Ne consegue che, sul piano degli isolatori, si ha sempre coincidenza tra proiezione del centro di massa e centro di rigidità del sistema di isolamento.

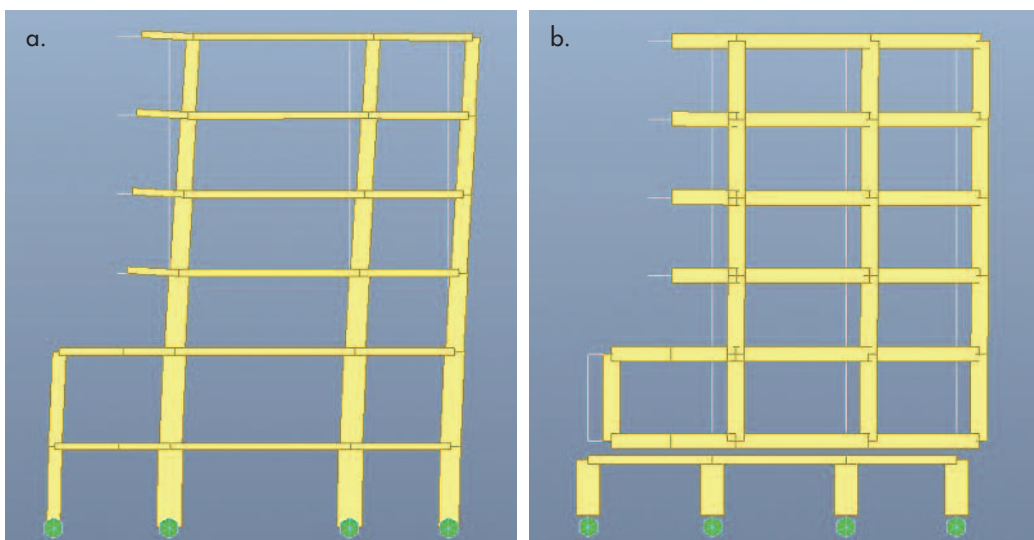
L'elevata resistenza all'usura e la minore vulnerabilità al fuoco ed alle alte temperature sono ulteriori caratteristiche che hanno motivato l'adozione di isolatori a pendolo scorrevole.

Un grigliato di travi è previsto sia al di sopra che al di sotto del piano di posa degli isolatori allo scopo di limitare gli effetti di eventuali spostamenti sismici differenziali.

Le fondazioni, ancora del tipo indirette, sono risultate più snelle e regolari, con una lunghezza complessiva dei pali notevolmente minore rispetto alla struttura a base fissa.

L'aumento di deformabilità ha però comportato un incremento degli spostamenti di progetto, il cui valore massimo è di circa 15 cm; è stato quindi necessario dimensionare in modo opportuno i giunti strutturali rispetto alle strutture adiacenti e trattare con adeguati giunti flessibili le parti impiantistiche. Occorre tuttavia precisare che gli spostamenti del sistema isolato si concentrano per la maggior parte nei dispositivi di isolamento (Figura 4b); la sovrastruttura esibisce invece un comportamento quasi da blocco rigido, accentuato dalla scelta di inserire travi emergenti in entrambe le direzioni e non prevedere alcuna rastremazione per le sezioni dei

Figura 4
Differenza di
comportamento tra struttura
a base fissa
(a) ed a base isolata
(b) sotto sisma.



pilastri lungo lo sviluppo verticale dell'edificio. Si registrano in elevazione spostamenti relativi di interpiano piuttosto contenuti, con sensibile riduzione dei danni previsti alle parti non strutturali, nonché della percezione umana delle scosse sismiche all'interno del fabbricato.

5. Modellazione della struttura e criteri progettuali

I confronti anticipati si basano sui risultati dedotti da una modellazione spaziale dell'edificio, nelle sue diverse configurazioni geometriche; le analisi condotte miravano a cogliere lo stato di sollecitazione e di deformazione della struttura per effetto delle azioni di progetto.

Per la modellazione ci si è avvalsi dell'ausilio del codice di calcolo agli elementi finiti "MIDAS GEN 2010 (v1.2)" prodotto da Midas Information Technology Co., Ltd (Corea).

Più in dettaglio, utilizzando il medesimo software di calcolo, sono stati implementati i seguenti modelli:

- Modello 1: edificio a base fissa progettato con il D.M. 09.01.1996;
- Modello 2: edificio a base fissa progettato con il D.M. 14.01.2008;
- Modello 3: edificio a base isolata progettato con il D.M. 14.01.2008;

Per quanto concerne il metodo di analisi della struttura, si è optato per eseguire un'analisi dina-

mica modale con spettro di risposta, ammessa, per gli edifici con isolamento sismico alla base, nei casi in cui sia possibile modellare elasticamente il comportamento del sistema di isolamento (punto 7.10.5.3.2 del D.M. 14-01-2008).

5.1 Struttura a base fissa (Modelli 1 e 2)

Il sistema resistente nei confronti dei carichi verticali e laterali della sovrastruttura è costituito da telai spaziali e setti e/o nuclei in c.a. Le travi ed i pilastri sono modellati come elementi monodimensionali rettilinei (beam), mentre per setti e nuclei in c.a. è previsto l'utilizzo di elementi cosiddetti "wall" di tipo bidimensionali (Figura 8).

Al materiale c.a. viene attribuito, nel modello di calcolo, un comportamento di tipo lineare. Agli elementi strutturali sono applicate le relative azioni e più in dettaglio i carichi dovuti al peso proprio degli elementi strutturali, i carichi permanenti strutturali e non strutturali, i carichi accidentali, le azioni da neve, da vento, le variazioni termiche e le azioni sismiche.

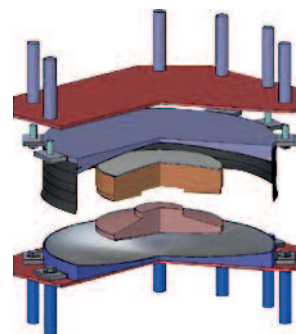
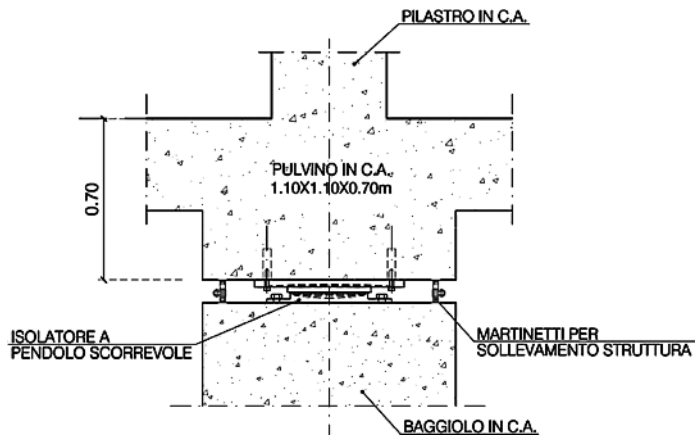
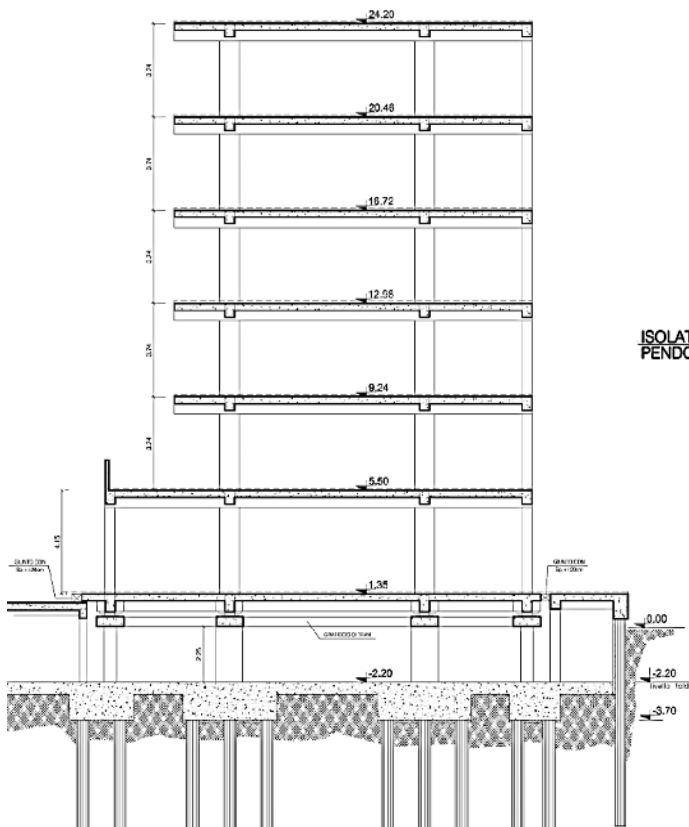
Le forze sismiche sono ricavate dal software di calcolo sulla base dei pesi sismici, dei modi propri di vibrazione della struttura e degli spettri di progetto assegnati.

All'interno del codice di calcolo sono state infine implementate le combinazioni delle azioni sismiche e non sismiche previste dalla norma di riferimento.

Figura 5 Sezione tipo struttura a base isolata.

Figura 6 Dettaglio installazione isolatori.

Figura 7 Isolatore a pendolo scorrevole con due superfici di scorrimento.



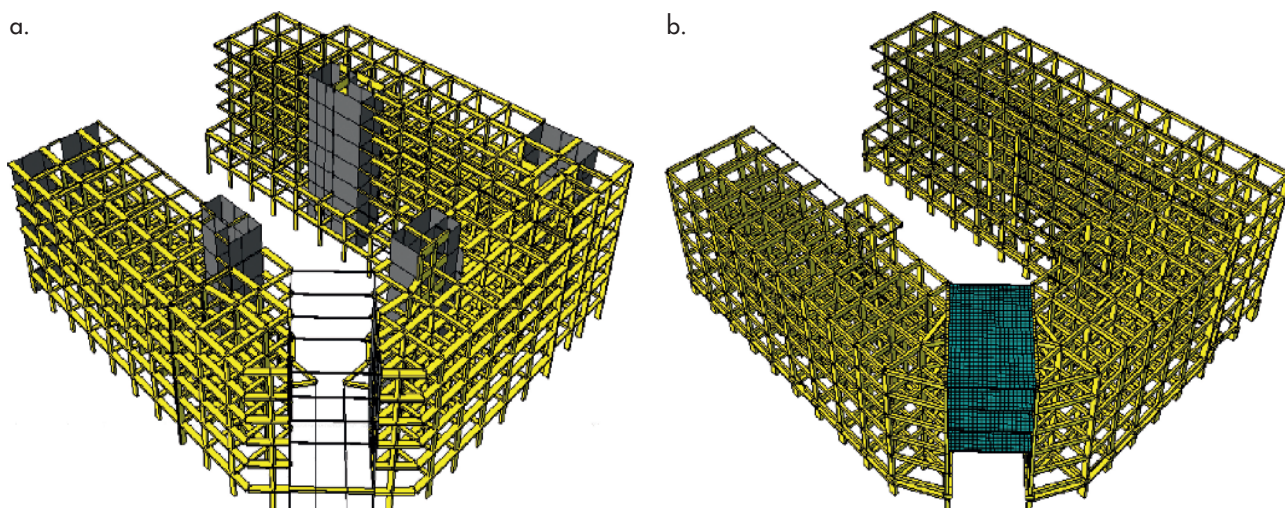


Figura 8
Modello di calcolo 3D:
a) dell'edificio a base fissa;
b) a base isolata.

5.2 Struttura a base isolata (Modello 3)

Il modello di calcolo della struttura isolata alla base include sia la sovrastruttura che la sottostruttura (Figura 8). Nell'ottica di eseguire un'analisi di tipo dinamica lineare, tutti gli elementi strutturali sono modellati a comportamento elastico lineare. Il sistema resistente nei confronti dei carichi verticali e laterali della sovrastruttura è costituito da telai spaziali di travi e pilastri, modellati come elementi monodimensionali rettilinei (*beam*).

Analogamente, gli elementi verticali della sottostruttura (baggioli) su cui sono collocati i dispositivi di isolamento, sono anch'essi modellati come elementi monodimensionali rettilinei (*beam*).

Lo stesso sistema di isolamento è modellato come un sistema a comportamento lineare equivalente. Con l'ausilio dei fornitori, sono state studiate le soluzioni ottimali in termini di caratteristiche geometriche e meccaniche dei dispositivi (raggio di curvatura, coefficiente di attrito, spostamento massimo) al fine di garantire che gli isolatori adottati fossero in grado di soddisfare le condizioni indicate al punto 7.10.5.2 del D.M. 14.01.2008, che ne consentono una modellazione lineare.

Più in dettaglio i dispositivi di isolamento sono modellati mediante degli "elastic link" a cui è stato attribuito un valore della rigidezza alla traslazione orizzontale proporzionale ai carichi verticali su essi agenti. Il mantenimento in campo sostanzialmente elastico della struttura determina, dal punto di vista del calcolo, due importanti benefici:

- le sollecitazioni di progetto sono quelle derivanti direttamente dalle analisi senza il ricorso a particolari regole (criterio della gerarchia delle resistenze) per la loro determinazione;
- l'intera procedura di progettazione risulta più affidabile grazie alla migliore aderenza del modello di calcolo al reale comportamento della struttura soggetta ad eventi sismici di forte intensità.

6. Confronto in termini di accelerazioni spettrali

L'analisi dinamica lineare prevede la definizione dell'azione sismica di progetto a partire dagli spettri di risposta. La Figura 9 evidenzia, relativamente a ciascuno dei tre scenari analizzati, un confronto in termini di accelerazioni spettrali della componente sismica orizzontale. Gli spettri di risposta riportati si riferiscono alle verifiche in condizione di stato limite ultimo. (SLU).

Per la struttura a base fissa, il D.M. '96 è meno cautelativo del D.M. '08 fino a valori del periodo pari a circa 0.6 sec. Si precisa che lo spettro relativo al D.M. '96 è amplificato del 50% come da indicazione normativa riguardo la combinazione dell'azione sismica con le altre azioni.

Lo spettro di progetto del D.M. '08 allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) è ottenuto invece a partire dal corrispondente spettro elastico, riducendo le ordinate spettrali attraverso il fattore di struttura q , assunto pari a 3 (struttura mista equivalente a pareti).

Lo spettro di progetto del sistema isolato è ottenuto ancora a partire dallo spettro elastico riducendo le ordinate spettrali, per tutto il campo di periodi $T \geq 0.8 T_{is}$ (dove con T_{is} si indica il periodo della struttura isolata), in funzione dello smorzamento viscoso equivalente ξ_{esi} del sistema di isolamento. In un modello di calcolo che includa anche la sottostruttura, ciò consente di attribuire, tramite un unico spettro, i valori di accelerazioni spettrali che competono sia alle parti isolate che a quelle non isolate della struttura.

Dal confronto emerge un dato molto significativo: la struttura isolata subisce, restando in campo elastico, un'accelerazione sismica circa quattro volte più bassa rispetto all'analoga struttura a base fissa; quest'ultima è destinata inoltre ad avere forti escursioni in campo plastico ed a risultare quindi gravemente danneggiata a seguito di un evento sismico.

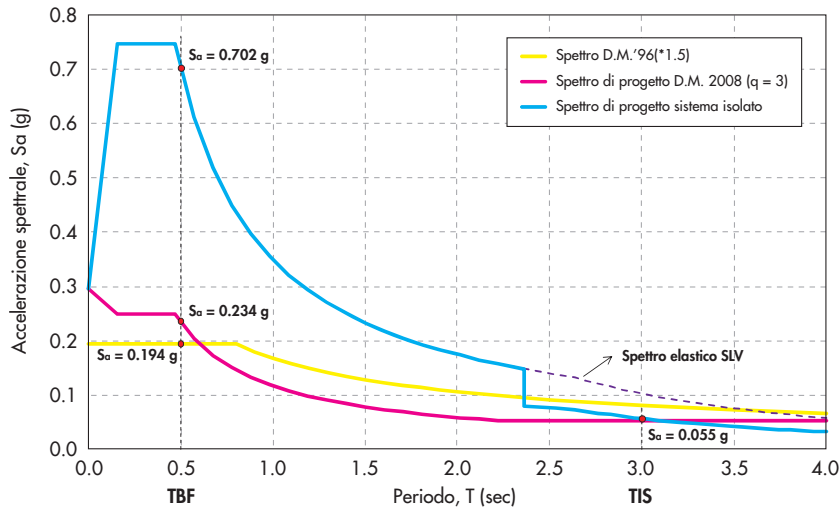


Figura 9
Confronto tra i diversi spettri di risposta in accelerazione della componente sismica orizzontale.

7. Confronto del comportamento dinamico

7.1 Struttura a base fissa (Modelli 1 e 2)

Come già evidenziato, per migliorarne il comportamento dinamico, la struttura a base fissa è suddivisa in tre corpi di fabbrica indipendenti tra loro. In Figura 10 si riportano gli andamenti dei modi più significativi per ciascuno dei singoli corpi, corredati dai valori dei relativi periodi propri di vibrazione e delle masse partecipanti. Si riscontra un accoppiamento latero-torsionale più o meno significativo nei tre corpi dovuto ad una distribuzione non uniforme delle rigidità in pianta a cui si aggiunge, per il corpo B, una conformazione piuttosto irregolare. Per ciascuno dei tre corpi, i valori dei primi periodi di vibrazione risultano piuttosto dissimili tra loro: ciò è da attribuire alle differenti rigidità esibite dai singoli corpi nelle due direzioni.

7.2 Struttura a base isolata (Modello 3)

Dall'analisi dei principali modi di vibrazione della struttura isolata si evince un totale disaccoppiamento latero-torsionale nel modo con direzione prevalente lungo Y e solo un parziale

accoppiamento tra il modo con direzione prevalente lungo X e quello rotazionale (Figura 11). Ne consegue la possibilità di concepire la struttura come un unico corpo di fabbrica, eliminando quindi i giunti strutturali previsti nella struttura a base fissa tra i tre corpi di fabbrica, ed evitando, in tali zone, il raddoppio degli elementi strutturali.

8. Confronto in termini di tagli sismici di piano

La riduzione delle accelerazioni spettrali dovute alla presenza degli isolatori si traduce in una riduzione delle forze di inerzia agenti sulle masse strutturali. Rispetto alla struttura iniziale a base fissa, il sistema isolato presenta quindi una forte riduzione dei tagli di piano ai vari livelli e di conseguenza del tagliante globale (Figure 12 e 13). Tale riduzione, alla base dell'edificio, è di circa il 73% sia in direzione X che in direzione Y. Anche nei confronti delle azioni di progetto previste dal D.M. '96, benché meno gravose di quelle del D.M. '08, l'isolamento alla base garantisce una riduzione del tagliante globale pari a

Tabella 1 - Riduzione del taglio sismico da struttura a base fissa a struttura a base isolata

Livello n°	Base fissa (D.M. '96)		Base fissa(D.M.'08)		Base isolata		Riduzione (D.M.'08)	
	Tx (kN)	Ty (kN)	Tx (kN)	Ty (kN)	Tx (kN)	Ty (kN)	Dir. X (%)	Dir. Y (%)
7	2184	2427	2865	3221	338	350	88%	89%
6	7717	7929	9658	10424	1469	1499	85%	86%
5	12821	12954	15922	17001	2710	2747	83%	84%
4	17155	17184	21348	22626	3887	3923	82%	83%
3	20843	21020	26073	27847	5059	5088	81%	82%
2	24617	25075	31101	33510	6415	6451	79%	81%
1	27336	28084	34961	37864	9419	9931	73%	74%

Figura 10
Primi tre modi di vibrazione
dei singoli corpi di fabbrica
in cui è suddivisa la struttura
a base fissa.

Corpo A

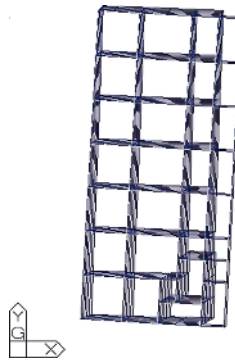
Modo 1

Modo 2

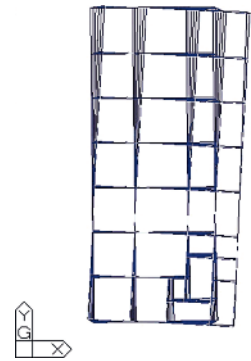
Modo 3



$T_1 = 0.44 \text{ sec}$
 $M_x = 16.38\%$
 $M_y = 43.50\%$
 $R_z = 10.44\%$



$T_2 = 0.30 \text{ sec}$
 $M_x = 42.45\%$
 $M_y = 24.55\%$
 $R_z = 2.55\%$



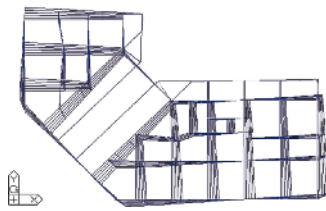
$T_3 = 0.18 \text{ sec}$
 $M_x = 10.59\%$
 $M_y = 2.91\%$
 $R_z = 55.43\%$

Corpo B

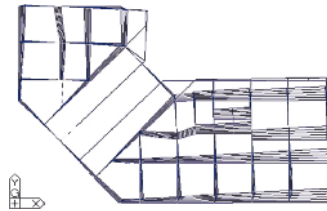
Modo 1

Modo 2

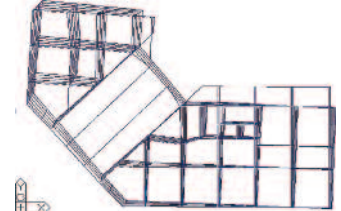
Modo 3



$T_1 = 0.51 \text{ sec}$
 $M_x = 32.10\%$
 $M_y = 13.71\%$
 $R_z = 27.40\%$



$T_2 = 0.37 \text{ sec}$
 $M_x = 1.12\%$
 $M_y = 39.13\%$
 $R_z = 29.97\%$



$T_3 = 0.18 \text{ sec}$
 $M_x = 40.21\%$
 $M_y = 16.82\%$
 $R_z = 13.10\%$

Corpo C

Modo 1

Modo 2

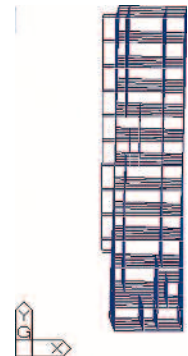
Modo 3



$T_1 = 0.49 \text{ sec}$
 $M_x = 54.15\%$
 $M_y = 0.31\%$
 $R_z = 13.70\%$



$T_2 = 0.42 \text{ sec}$
 $M_x = 13.42\%$
 $M_y = 3.00\%$
 $R_z = 55.20\%$



$T_3 = 0.29 \text{ sec}$
 $M_x = 0.05\%$
 $M_y = 67.36\%$
 $R_z = 3.31\%$

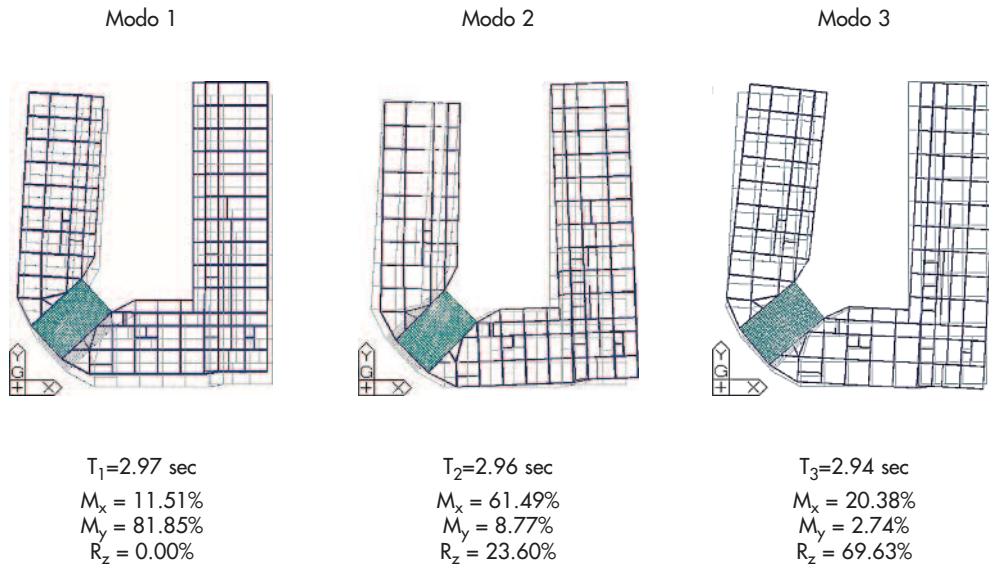


Figura 11
Primi tre modi di vibrazione della struttura a base isolata.

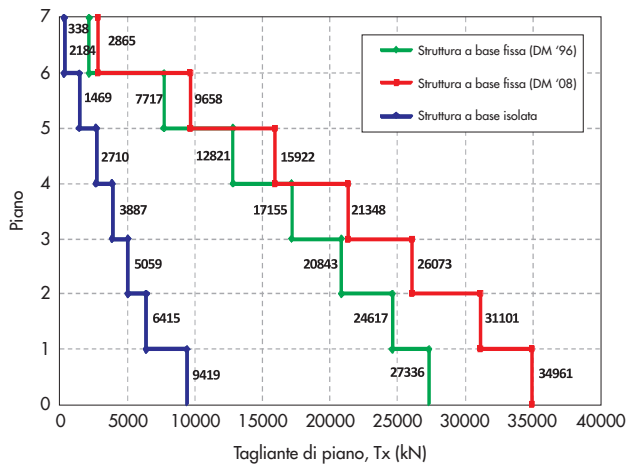


Figura 12
Tagli di piano in direzione X (sisma in X - SLV).

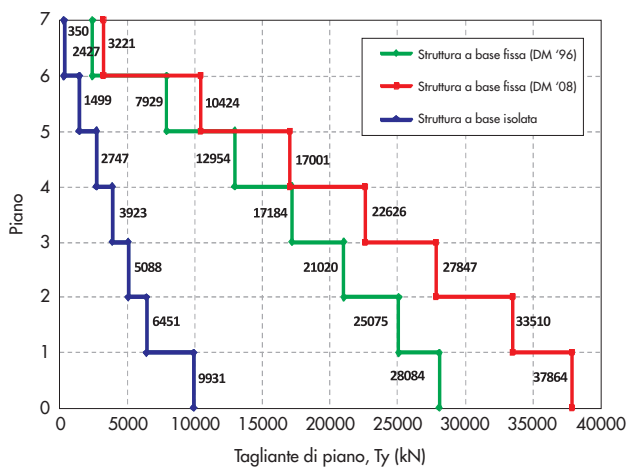


Figura 13
Tagli di piano in direzione Y (sisma in Y - SLV).

circa il 65% in entrambe le direzioni analizzate. La differenza si accentua ancora di più ai livelli superiori; questo perché mentre nella struttura a base fissa i piani più alti subiscono delle accele-

razioni maggiori, nella struttura a base isolata le accelerazioni ai vari piani sono più simili tra loro per effetto del comportamento da blocco rigido della sovrastruttura.

Figura 14
Tagli di piano in direzione
X (sisma in X - SLV).

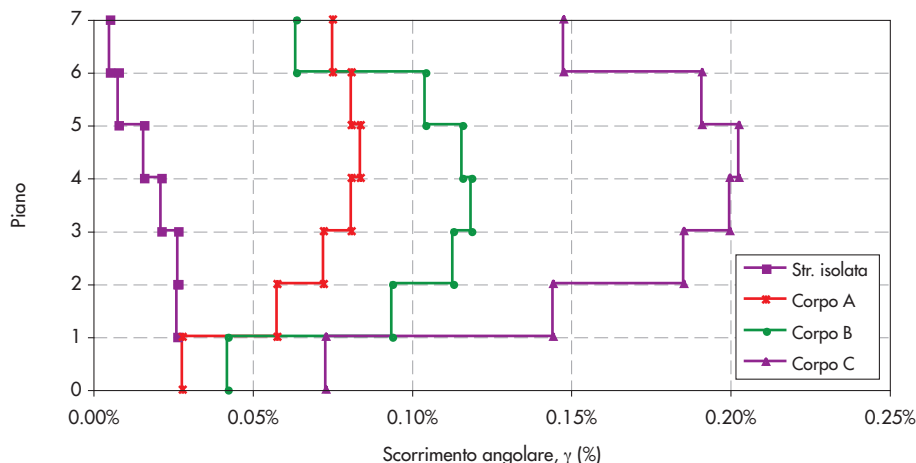
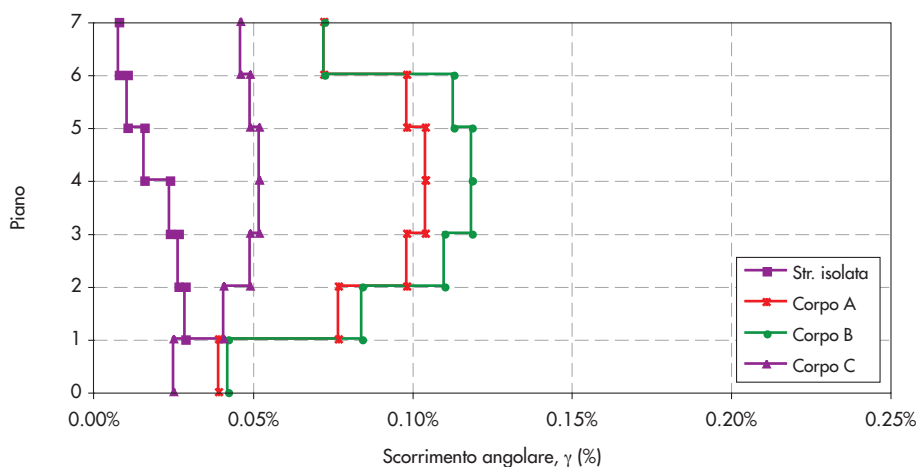


Figura 15
Tagli di piano in direzione
Y (sisma in Y - SLV).



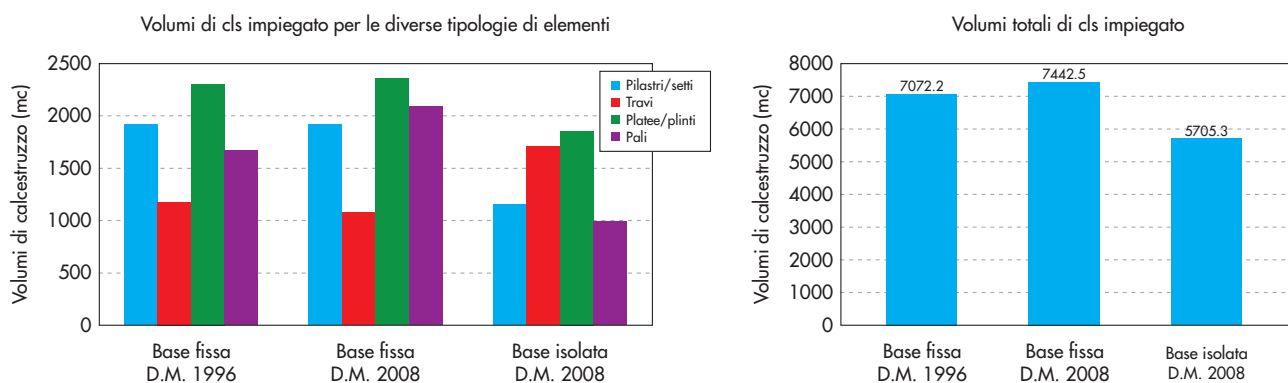
9. Confronto in termini di drift di inter-piano

Allo stato limite di danno (SLD) gli scorrimenti angolari di piano per la struttura a base isolata risultano notevolmente inferiori rispetto agli stessi relativi alla struttura a base fissa; è da notare che nella struttura a base isolata, essendo i primi due periodi traslazionali molto prossimi tra loro, gli spostamenti di interpiano nelle due direzioni risultano confrontabili. Diverso, invece, il discorso per la struttura a base fissa in cui, ciascuno dei tre corpi di fabbrica, presenta rigidità differenti nelle due direzioni principali; ne consegue, soprattutto per il corpo C, un comportamento dinamico piuttosto diverso nelle due direzioni con spostamenti di interpiano molto maggiori in una direzione piuttosto che nell'altra (Figure 14 e 15). Si precisa che i dati relativi agli spostamenti indotti dal sisma di progetto previsto dal D.M. '96 non sono riportati in quanto non confrontabili con quelli del D.M. '08. Il D.M. '96 prevedeva infatti un unico spettro di risposta (quello elastico) da utilizzare sia per le verifiche agli stati limite ultimi (SLU) che per quelle agli stati limite di esercizio (SLE), con l'adozione di limiti

di ammissibilità per gli spostamenti di interpiano diversi rispetto al D.M. '08.

10. Confronto in termini di volumi di calcestruzzo impiegato

La struttura a base fissa progettata secondo le prescrizioni delle NTC 08 non differisce in maniera sostanziale, in termini di volumi di calcestruzzo utilizzato, da quella prevista del progetto realizzato nel rispetto del D.M. '96. Laddove possibile, si è optato per lasciare inalterate le geometrie degli elementi strutturali, variando soltanto le armature di progetto in modo da soddisfare i requisiti richiesti dalla nuova normativa. Ne risultano due strutture molto simili tra loro dal punto di vista geometrico, con un impiego in eccesso di volume di calcestruzzo per l'edificio progettato secondo le NTC 08 di circa il 5%, prevalentemente dovuto alla maggiore lunghezza dei pali di fondazione. L'adozione della strategia dell'isolamento sismico ha consentito, invece, l'eliminazione di setti e nuclei in c.a. rispetto alla struttura a base fissa, passando da un sistema misto telai -



pareti ad un sistema interamente a telai. Ciò ha determinato un risparmio notevole (circa il 40%) nei quantitativi di calcestruzzo impiegato negli elementi verticali dell'edificio; l'assenza di setti e nuclei ha dato luogo inoltre a strutture di fondazione più snelle e regolari con una significativa riduzione del numero complessivo di pali e dei volumi di calcestruzzo per la realizzazione dei plinti (Figura 16).

11. Confronto in termini di quantitativi di acciaio impiegato

Il progetto della struttura a base fissa secondo le indicazioni delle NTC 08 richiede in generale un aumento di circa l'82% nel quantitativo di armature rispetto a quanto previsto dal progetto realizzato nel rispetto del D.M. '96. Le ragioni sono da ricercare in tre aspetti sostanziali legati all'entrata in vigore nelle nuove NTC:

- aumento dell'entità dell'azione sismica per la zona in esame a seguito della riclassificazione sismica del territorio nazionale;
- aumento dei quantitativi minimi di armatura previsti dalle NTC 08 (dettagli costruttivi);
- rispetto del criterio di gerarchia delle resistenze.

Quest'ultimo aspetto condiziona in particolar modo il progetto dei pilastri, armati non più

sulla base delle sollecitazioni di calcolo, bensì in funzione delle capacità resistenti delle travi.

La riduzione delle accelerazioni di progetto e la possibilità di progettare la struttura in campo sostanzialmente elastico (non si applica il criterio di gerarchia delle resistenze), hanno determinato, nell'edificio isolato alla base, una drastica riduzione dei quantitativi di armatura richiesti. I benefici maggiori sono stati riscontrati nel progetto di pilastri e strutture di fondazione, ancor più che nelle travi. Si stima in generale che nella struttura isolata alla base si registra una riduzione di circa il 64% di armatura richiesta rispetto alla struttura a base fissa progettata secondo le prescrizioni delle NTC 08 (Figura 17).

12. Confronto in termini di costi dei materiali impiegati

A partire dai quantitativi di calcestruzzo ed acciaio impiegati è immediato ricavare una stima dei costi dei materiali per le tre tipologie di strutture analizzate. Per la struttura a base isolata, il minore impiego di materiali, non solo è in grado di compensare ampiamente il costo di acquisto e messa in opera dei dispositivi di isolamento, ma garantisce un risparmio economico complessivo di circa il 30% rispetto alla struttura progettata in modo tradizionale (Figura 18).

Figura 16
Confronti sui quantitativi di calcestruzzo impiegato.

Tabella 2 - Incidenze medie d'armatura in kg/m³ per tipologia di elemento strutturale

Elemento	Incidenza media d'armatura (kg/m ³)		
	Base fissa D.M. 1996	Base fissa D.M. 2008	Base isolata D.M. 2008
Pilastrini/setti	115 kg/m ³	245 kg/m ³	100 kg/m ³
Travi	155 kg/m ³	215 kg/m ³	110 kg/m ³
Platee/Plinti	75 kg/m ³	75 kg/m ³	70 kg/m ³
Pali	140 kg/m ³	275 kg/m ³	95 kg/m ³

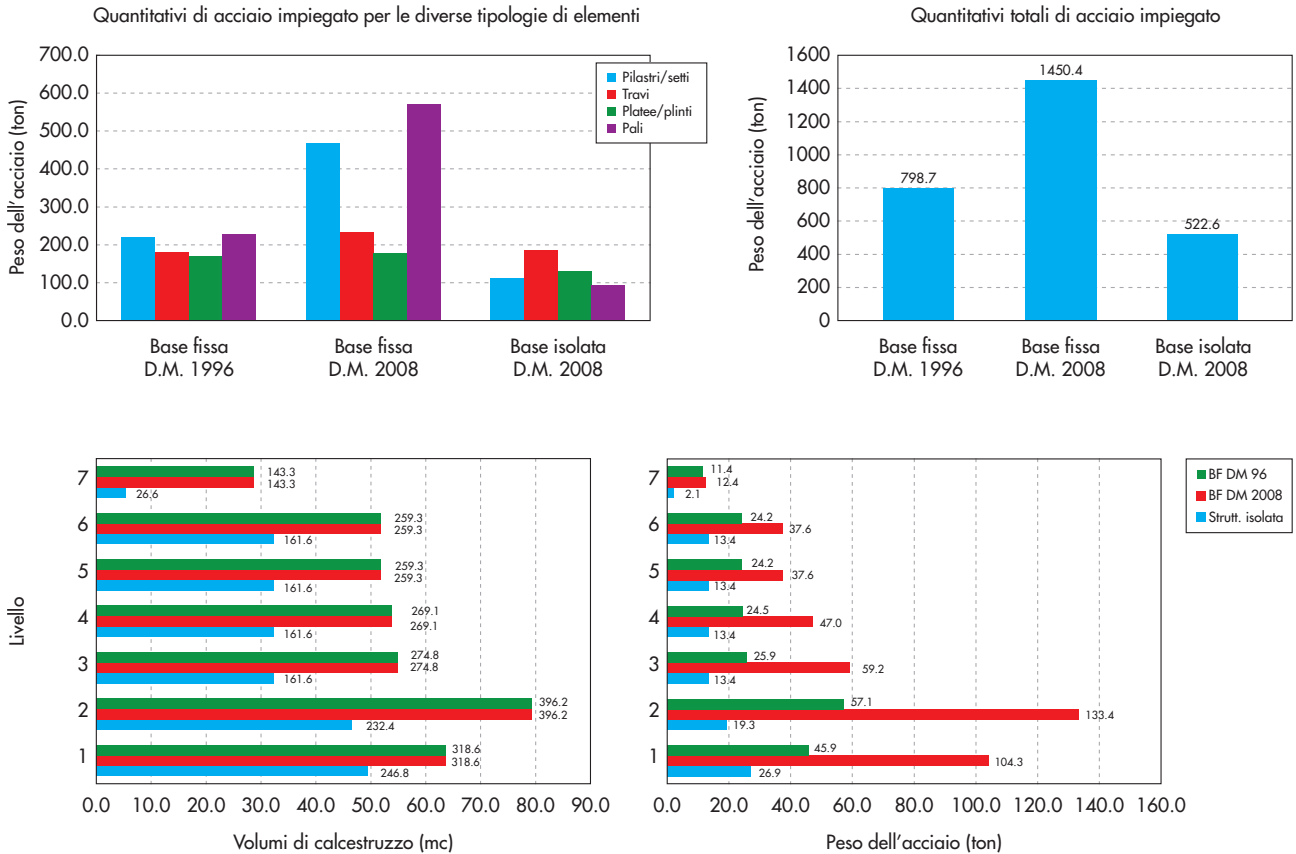
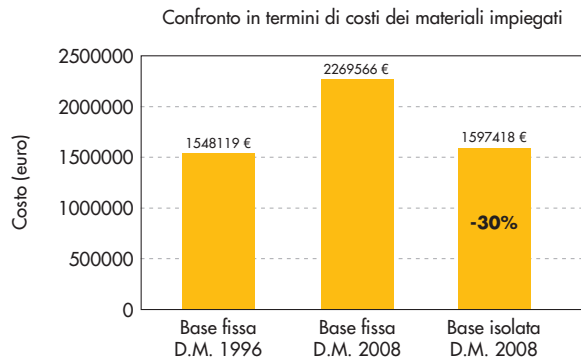


Figura 17
Confronti sui quantitativi di materiali impiegati.

Tabella 3 - Tabella di confronto dei costi

	Base fissa D.M. 1996	Base fissa D.M. 2008	Base isolata D.M. 2008
Cis	709483.10 €	746631.60 €	572355.70 €
Acciaio	838636.79 €	1522934.54 €	548720.97 €
Isolatori			476342.00 €
Totale	1548119.89 €	2269566.14 €	1597418.67 €

Figura 18
Riepilogo dei costi totali.



13. Conclusioni

Il presente articolo ha mirato a cogliere gli aspetti più rilevanti che emergono dal confronto tra le attuali norme e quelle precedenti, nonché tra diverse tecniche di progettazione antisismica.

La significativa riduzione delle accelerazioni spettrali (circa il 76%) dovute all'aumento del periodo del sistema strutturale isolato alla base ha permesso di poter passare da un sistema misto telai - pareti ad un sistema interamente a

telai. Ciò ha determinato vantaggi sia di tipo strutturale (passaggio da un comportamento a rigidità concentrata ad uno a rigidità diffusa) che di tipo funzionale (maggiore flessibilità nelle scelte progettuali per la distribuzione degli ambienti interni).

L'isolamento ha inoltre permesso di limitare gli effetti torsionali dovuti dell'irregolarità strutturale; nonostante la forma in pianta fortemente irregolare, è stato possibile concepire la struttura come un unico corpo di fabbrica, senza la necessità di ricorrere a giunti strutturali per suddividere la stessa in più corpi dinamicamente indipendenti.

Da un punto di vista dinamico la struttura a base isolata presenta un comportamento più omogeneo rispetto a quella a base fissa per la quale era inevitabile l'accoppiamento dei modi torsionali con quelli traslazionali nonché una significativa differenza in termini di rigidità lungo le due direzioni principali.

In termini di sollecitazione alla base si è osservata una riduzione dei tagli sismici molto significativa (circa 73%) nella struttura isolata rispetto all'analoga struttura concepita a base fissa.

La riduzione delle sollecitazioni ha permesso di rimodulare la geometria di alcuni elementi strut-

turali che ha permesso una riduzione globale in termini di quantitativi di calcestruzzo e di armatura pari rispettivamente al 23% e al 64%.

A parità di livello di sicurezza offerto, ossia di grado di protezione nei confronti della salvaguardia delle vite umane, la struttura isolata alla base presenta danneggiamento praticamente nullo sia degli elementi strutturali che non strutturali. Ciò è dovuto alla significativa riduzione dei drift di interpiano rispetto alla struttura a base fissa.

Ne conseguono due importanti vantaggi: innanzitutto si garantisce, nell'immediato post-sisma, il mantenimento della piena funzionalità dell'edificio; in secondo luogo non si richiedono particolari interventi per il recupero della struttura senza quindi costi aggiuntivi per eventuali riparazioni nel corso della vita utile dell'opera.

Quest'ultimo aspetto è di fondamentale importanza in un'analisi dei costi da cui non può prescindere un confronto tra struttura a base fissa ed isolata. È evidente, infatti, come il progetto di recupero di un edificio fortemente danneggiato da un sisma, soprattutto nelle parti strutturali, implica molto spesso dei costi paragonabili, se non addirittura più elevati, di quelli necessari per la sua ricostruzione.

Bibliografia

Chopra A. (1995) - Dynamic of structures: Theory and application to Earthquake Engineering - Prentice Hall.
 Cosenza E., Maddaloni G., Magliulo G., Pecce M., Ramasco R. (2004) - Progetto antisismico di edifici in cemento armato, Collana di manuali di progettazione antisismica, IUSS Press, Pavia.
 Dolce M., Cardone D., Ponzo F.C., Di Cesare A.

(2004) - Progetto di edifici con isolamento sismico, Collana di manuali di progettazione antisismica, IUSS PRESS, Pavia.

Petrini L., Pinho R., Calvi G.M. (2004) - Criteri di progettazione antisismica degli edifici, Collana di manuali di progettazione antisismica, IUSS Press, Pavia.

Ramasco R. (1993). - Dinamica delle strutture, CUEN.

Simbologia

g accelerazione di gravità
 M_x massa partecipante in direzione X
 M_y massa partecipante in direzione Y
 q fattore di struttura
 R_z massa rotazionale rispetto all'asse Z
 S_o accelerazione spettrale
 SLD Stato Limite di Danno
 SLE Stato Limite di Esercizio
 SLU Stato Limite Ultimo

SLV Stato Limite di salvaguardia della Vita
 T_i i-esimo periodo proprio di vibrazione
 T_{is} periodo proprio di vibrazione del sistema isolato alla base
 T_x tagliante sismico di piano in direzione X
 T_y tagliante sismico di piano in direzione Y
 γ scorrimenti angolari di piano ossia rapporti tra gli spostamenti di piano e le altezze di interpiano
 ξ_{esi} coefficiente di smorzamento viscoso del sistema di isolamento