



***VALUTAZIONE E MIGLIORAMENTO DELLA
SICUREZZA DI STRUTTURE ESISTENTI
L' ESOSCHELETRO SISMICO***

Proff. Ing. Flora Faleschini,
Mariano Angelo Zanini,
Lorenzo Hofer

L' ESOSCHELETRO SISMICO

INTRODUZIONE

Le principali problematiche delle strutture esistenti possono suddividersi in due macro-carenze:

- **Durabilità e degrado;**
- **Carenze progettuali** iniziali derivanti dall'assenza di dettami sismici e adeguate normative.



In ottica di un recupero completo di un fabbricato, il retrofit sismico deve intervenire su entrambi i fattori. Nel tempo sono state sviluppate **numeroso soluzioni tecniche** in grado di migliorare sostanzialmente la risposta strutturale di un edificio.

Tuttavia, **il campo dei possibili interventi si riduce notevolmente** qualora si introduca la necessità di **intervenire solo dall'esterno senza interrompere il funzionamento e/o utilizzo della struttura.**

L' ESOSCHELETRO SISMICO

INTRODUZIONE

ESOSCHELETRO



*Sistema strutturale interamente posto all'esterno dell'edificio, il quale **funziona in combinazione con gli impalcati** per assicurarne la gran parte della rigidezza e della portanza nei confronti delle azioni orizzontali.*

Nel caso di interventi sul costruito l'esoscheletro viene applicato per scaricare la struttura esistente dalla gran parte delle azioni orizzontali mentre le azioni verticali continuano a essere portate dal sistema esistente.

L' ESOSCHELETRO SISMICO

INTRODUZIONE

Alcuni dati sull'impatto ambientale:

- il settore dell'edilizia ***impatta in modo significativo sull'ambiente in ogni fase del ciclo di vita*** (progettazione iniziale, reperimento di materie prime, costruzione, funzionamento, manutenzione, dismissione, demolizione e smaltimento)
- le fasi che producono ***i più alti quantitativi di rifiuti sono la demolizione - ricostruzione***. I rifiuti generati dalla costruzione e demolizione o decostruzione di edifici e altre infrastrutture rappresentano circa un terzo dei rifiuti prodotti all'interno dell'Unione Europea (si stima, per la sola fase di costruzione, la produzione media di circa 15-20 m³ di rifiuti per 100 m² di superficie - circa 100-150 kg/m²).



Questi dati evidenziano chiaramente la ***necessità di studiare soluzioni alternative alla demolizione e ricostruzione per il recupero degli edifici esistenti***.

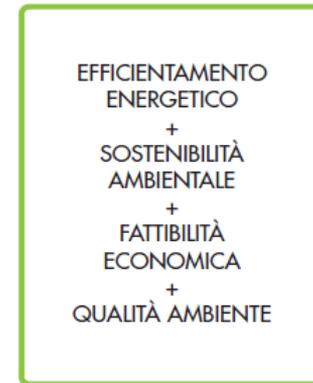
L' ESOSCHELETRO SISMICO

INTRODUZIONE

In molti casi, gli esoscheletri esterni rappresentano una **soluzione integrata per il soddisfacimento di diversi aspetti**

ASPETTI ENERGETICI

- Involucro tipicamente non coibentato;
- Presenza di ponti termici significativi;
- Impianti tecnologici vetusti.



ASPETTI FORMALI

- Edifici spesso privi di pregio architettonico;
- Distribuzione interna alloggi non più rispondente agli attuali standard abitativi;
- Degrado urbano.



ASPETTI STRUTTURALI

- Edifici spesso non verificati ai carichi VERTICALI (NTC 2008);
- Struttura non organizzata per resistere ai carichi ORIZZONTALI;
- Vita Utile (50 anni): esaurita.



L' ESOSCHELETRO SISMICO

INTRODUZIONE



L'esoscheletro:

- Si configura come un **intervento globale che modifica la capacità e la risposta dinamica** del sistema;
- Può essere dotato di **dispositivi di dissipazione** da inserire nei link di collegamento alla struttura esistente;
- Il doppio involucro **protegge la struttura dalle intemperie** con un benefico effetto sulla durabilità dei materiali e sulla vita utile della struttura;
- In molti casi possono essere di **rapida realizzazione** e si prestano alla prefabbricazione => costruzione in stabilimento e montaggio in cantiere, soprattutto se di natura metallica.
- Applicati su interi comparti possono inoltre **favorire la rigenerazione urbana**, riqualificando e rivalutando, anche economicamente, il patrimonio edilizio preesistente, con particolare riguardo alle periferie e alle aree più degradate delle nostre città.

L' ESOSCHELETRO SISMICO

INTRODUZIONE

ASPETTI STRUTTURALI

- Retrofit sismico;
- Miglioramento classe di rischio sismico;
- Aumento della durabilità della struttura originaria



ASPETTI ARCHITETTORNICI

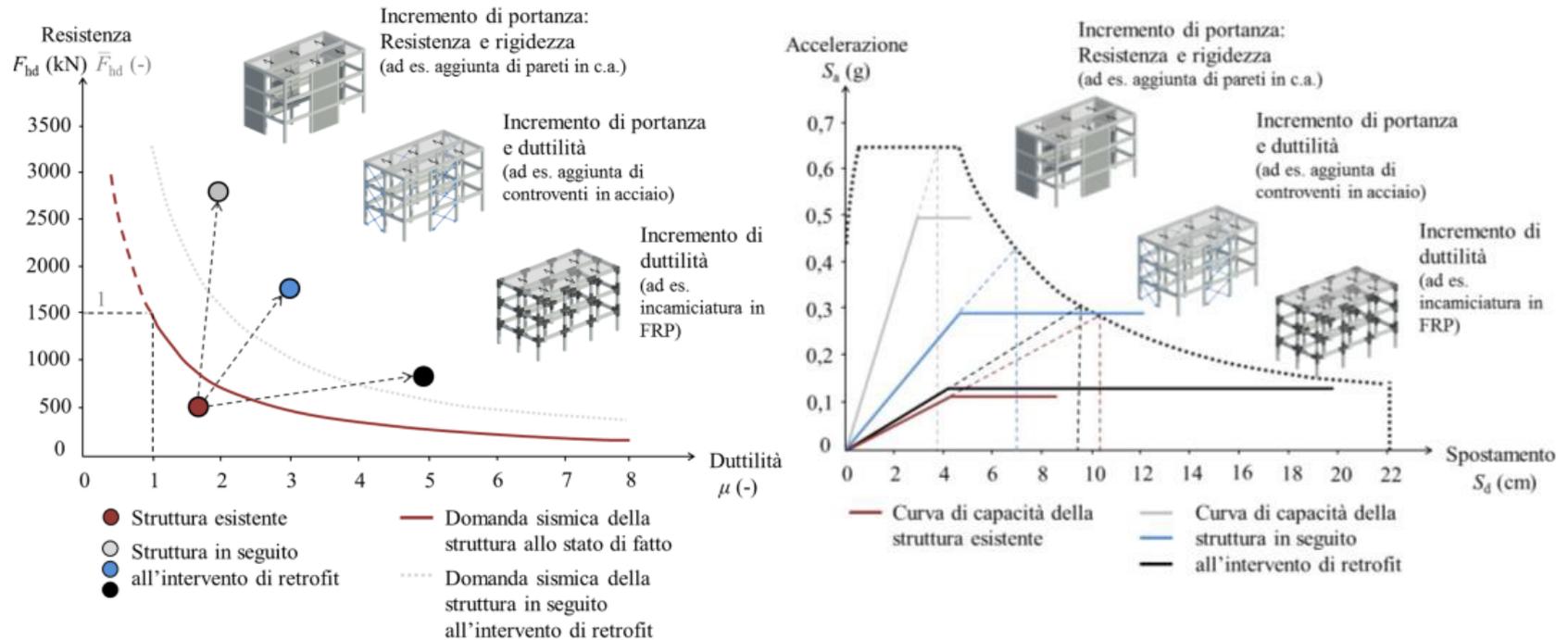
- Adeguamento funzionale
- Fruibilità della struttura durante l'intervento
- Rigenerazione urbana

ASPETTI AMBIENTALI

- Miglioramento classe energetica
- Utilizzo di materiali riciclabili

L' ESOSCHELETRO SISMICO

INTRODUZIONE

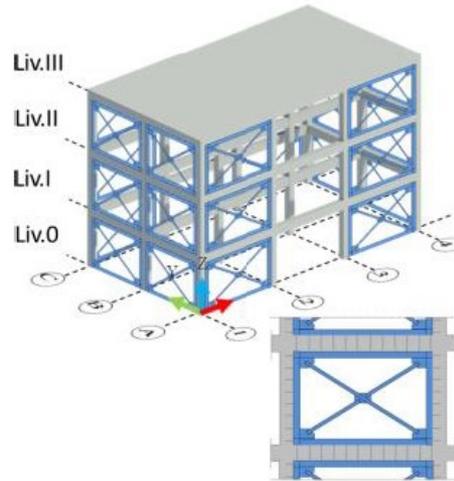


Gli esoscheletri sono generalmente associati ad un **forte aumento di portanza** che opportunamente progettato consente di adeguare sismicamente fabbricati esistenti caratterizzati da bassi livelli di sicurezza.

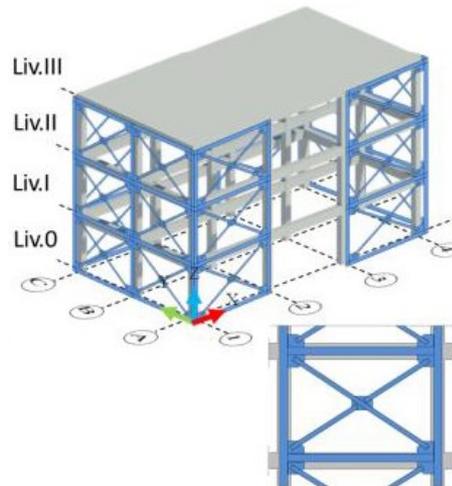
L' ESOSCHELETRO SISMICO

INTRODUZIONE

ENDOSCHELETRO



ESOSCHELETRO



- usati quando non sia possibile agire dall'esterno
- utilizzati ad esempio **in centri storici ed in strutture in muratura**, per cui possono servire a scaricare anche carichi verticali
- **evitano (o riducono) l'interruzione dell'utilizzo** della struttura esistente
- sono diffusi soprattutto nel caso di **edifici esistenti in calcestruzzo armato normale o precompresso**. Talvolta anche per strutture intelaiate in carpenteria metallica o legno.

L' ESOSCHELETRO SISMICO

INTRODUZIONE

Obiettivo dell'esoscheletro:

- ***l'adeguamento o il miglioramento sismico delle costruzioni esistenti (SLV)*** => incremento della portanza alle azioni orizzontali dell'intera costruzione in termini di ***resistenza e rigidezza*** globale.
- deve evitare il ***danneggiamento prematuro delle parti strutturali del fabbricato originale***. In particolare, in riferimento agli edifici esistenti in CA a bassa duttilità, generalmente realizzati prima degli anni '80 senza prescrizioni sismiche, l'esoscheletro deve ***evitare l'innescare di meccanismi fragili*** come la rottura dei nodi, meccanismi di piano soffici, rotture a taglio.
- salvaguardare ***l'integrità della struttura anche per quanto riguarda gli stati limite di esercizio*** => alta ***rigidezza globale***.

L' ESOSCHELETRO SISMICO

INTRODUZIONE

English Version, 1st

Standard

for Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Buildings, 2001

Guidelines

for Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings, 2001

and

Technical Manual

for Seismic Evaluation and Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings, 2001

Translated by :
Building Research Institute

Published by :
The Japan Building Disaster Prevention Assoc

Guidelines

for Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings, 2001

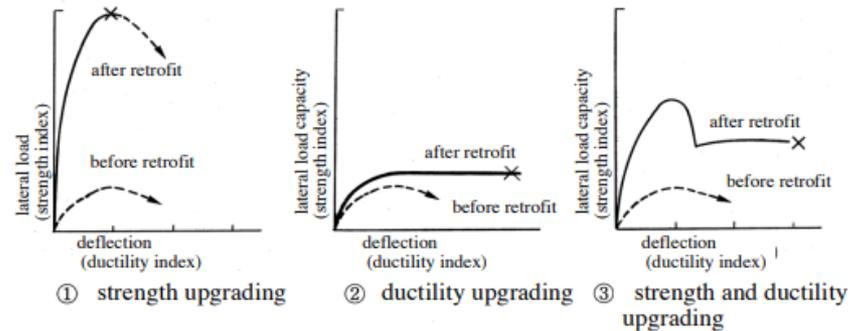
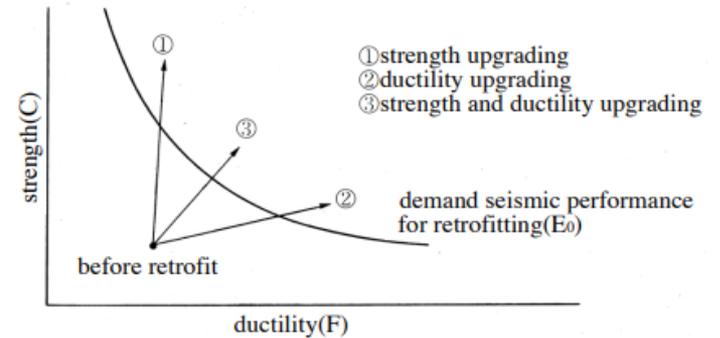
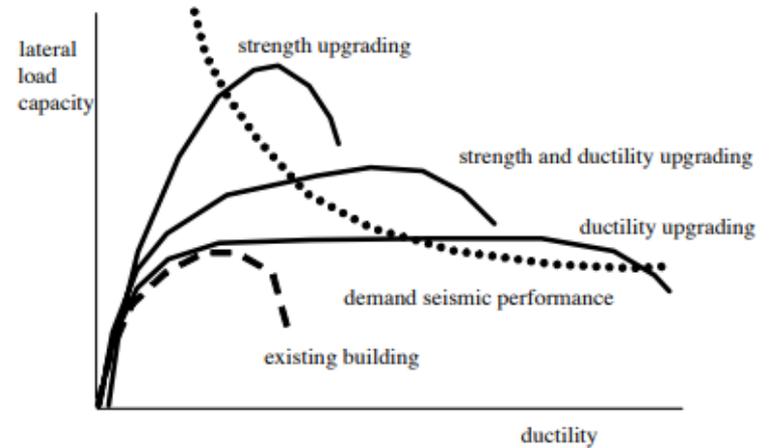


Figure TN.2 Concept of seismic retrofit

L' ESOSCHELETRO SISMICO

INTRODUZIONE

English Version, 1st

Standard

for Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Buildings, 2001

Guidelines

for Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings, 2001

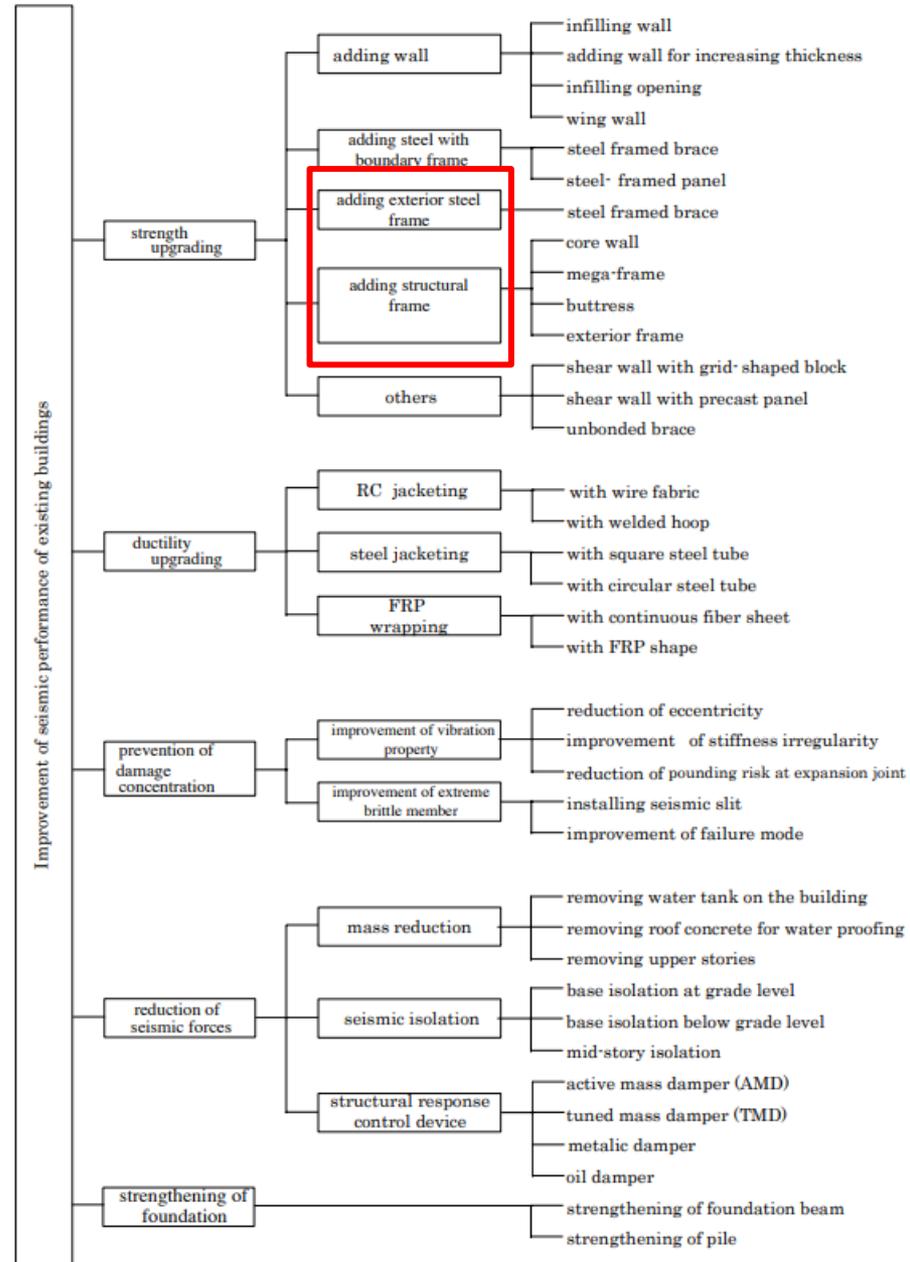
and

Technical Manual

for Seismic Evaluation and Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings, 2001

Translated by :
Building Research Institute

Published by :
The Japan Building Disaster Prevention Association



L' ESOSCHELETRO SISMICO

INTRODUZIONE

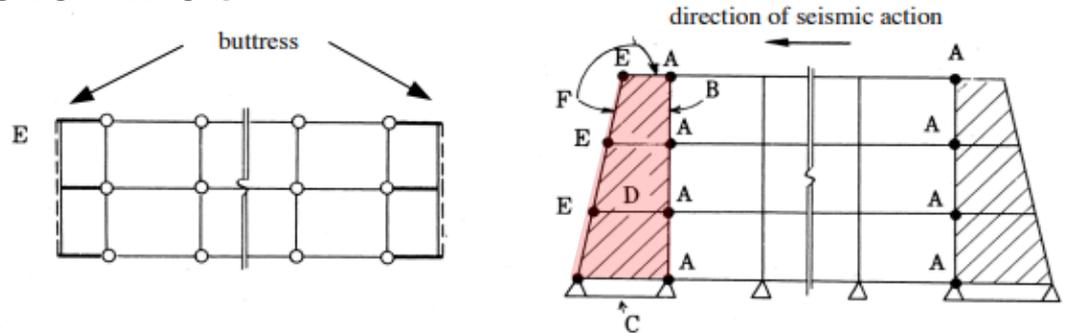


Figure TN.43 Examples of appropriately located buttress

(quoted from the figure on page 228 in the commentary of 3.6.2 of the Guidelines of 2001 Japanese version)

3.6.2 Adding buttress

(1) Outline

This strengthening method mainly aims to increase lateral strength of building by constructing new buttress connecting with exterior frames of a building.

(2) Performance objectives

The main objective of the new buttress shall be improving seismic performance due to increase in lateral strength of the building.

However, when ductile performance can be expected in ~~the~~ new buttress, both strength and ductility of a building can be improved.

(3) Planning

This strengthening method is suitable for buildings holding large space with important function difficult to be strengthened inside, or susceptible to overturning or severe damage, but those having spaces wide enough to add buttress around them. In general, the buttress shall be arranged to connect with existing structural frames at both ends of the building and at all floor levels. See the translators' note 43.

L' ESOSCHELETRO SISMICO

INTRODUZIONE

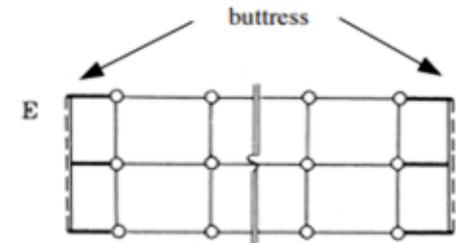
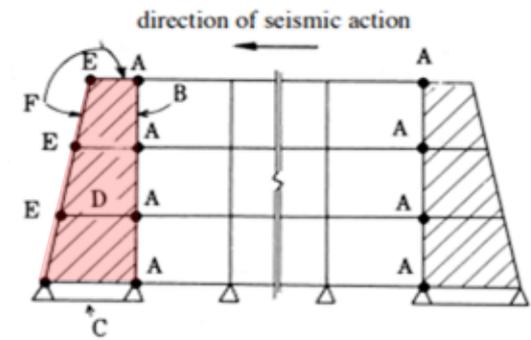
(4) Construction method and structural details

(a) Construction method

- (i) The butress shall be arranged symmetrically at both ends of the building in the direction where strengthening is required.
- (ii) The butress shall have columns on its both ends and beams in each floor level.
- (iii) In case that two or more buttresses are arranged on the same end of a building, lateral link elements such as beams and slabs shall be arranged between them.
- (iv) The corner columns of the existing building shall be also butress columns. Connection between the corner columns and butress walls and between existing beams and butress beams shall be carefully detailed to be strong enough against actions.

(b) General structural detail

- (i) In case adding new butress, pre-loading or supporting pile shall be applied to avoid uneven settlement.
- (ii) Foundation beam shall be constructed under the butress, and connected firmly with the existing foundation or the foundation beam.
- (iii) The connection at butress beams and existing beams shall be detailed to resist tensile actions expected in the design.
- (iv) The vertical connections between butress wall and existing column shall be detailed to resist shear actions expected in the design.
- (v) Wall thickness of the butress shall be not less than 150mm, and its wall reinforcement ratio shall be not less than 0.2%.



L' ESOSCHELETRO SISMICO

INTRODUZIONE

3.6.3 Adding spatial frame

(1) Outline

This strengthening method mainly aims to increase lateral strength of building by constructing new spatial frame connecting with exterior frames of a building.

(2) Performance objectives

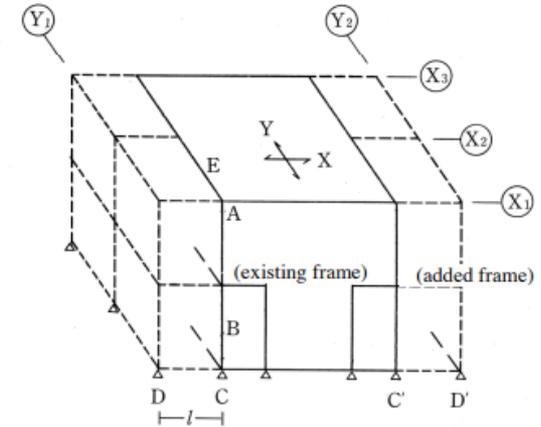
The main objective of the retrofit by adding spatial frame is to increase lateral strength. This method may contribute to the ductility improvement of a building when the ductility of existing frame is also upgraded.

(3) Planning

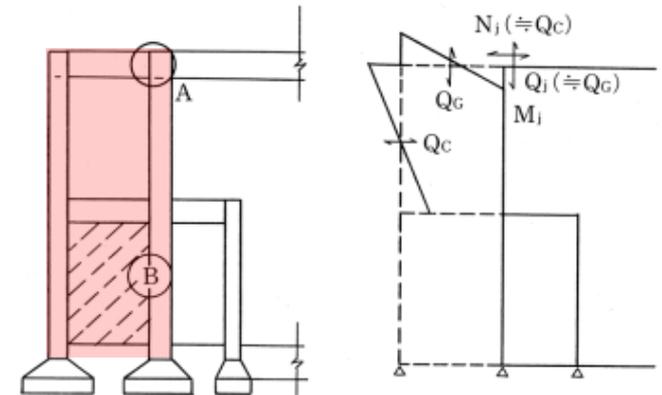
This strengthening method is suitable for buildings which can not be strengthened inside since it has functionally-important space and so on, and those with a few structural members such as single-span frames.

However, it is necessary that enough spaces should be provided around the building if this strengthening method is applied.

The spatial frame shall be arranged with good balance in plane and in elevation, and connected with existing structural frames in general, at both ends of the building. The structural detail of the connection between added frames and existing building, and the influence of increased weight due to added frames, in addition to the structural detail of each part of the spatial frame shall be carefully studies. See the translators' note 44.



(a) example of location of added frame (indicated by broken line)



(b) beam-column connection (A)
wall-column connection (B)

(c) stresses acting on the connection A

Figure TN.44 Example of adding spatial frame

(quoted from the figure on page 232 in the commentary of 3.6.3 of the Guidelines of 2001 Japanese version)

L' ESOSCHELETRO SISMICO

INTRODUZIONE

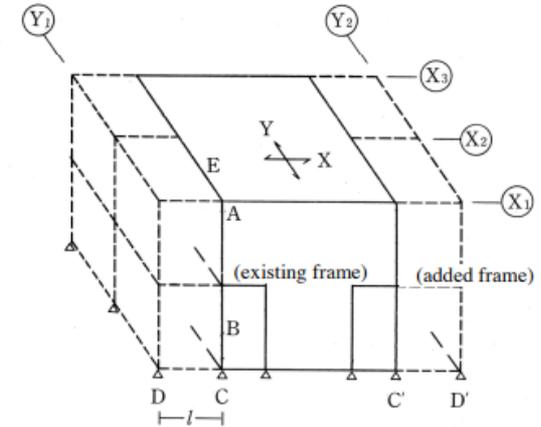
(4) Construction method and structural details

(a) Issues to be investigated

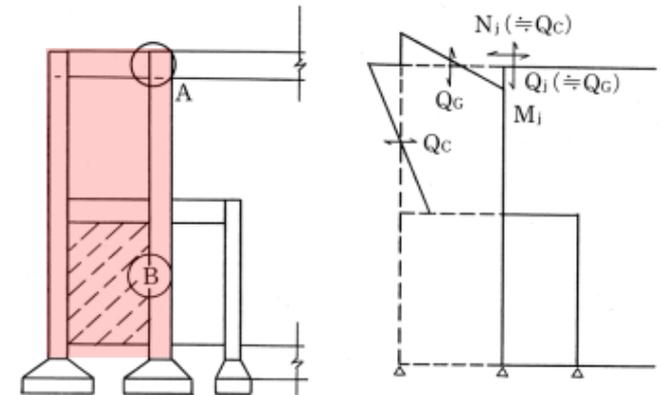
- (i) Construction method of foundation to decrease in settlement of added spatial frame and influence of the settlement on the structural strength.
- (ii) Effects of retrofit on existing frame.
- (iii) Stiffness, strength and ductility of each part of added spatial frame.
- (iv) Strength and detail of the connection including slab between added spatial frame and existing frame.
- (v) In-plane shear force transfer between new and existing slab.

(b) Structural detail

- (i) The center of each column and floor level of added special frame shall lie on the same line of existing frame.
- (ii) In connecting the beam of the added spatial frame with existing frame, re-bars located at four corners in a new beam shall be securely connected to those in existing beam by welding or equivalently effective methods. They shall also be designed to effectively transfer the acting shear forces including out-of-plane shear force.
- (iii) Frictional resistance piles, in general, shall not be applied to the spatial frame foundation.



(a) example of location of added frame (indicated by broken line)



(b) beam-column connection (A)
wall-column connection (B)

(c) stresses acting on the connection A

Figure TN.44 Example of adding spatial frame

(quoted from the figure on page 232 in the commentary of 3.6.3 of the Guidelines of 2001 Japanese version)

Standard

for Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Buildings, 2001

Guidelines

for Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings, 2001

and

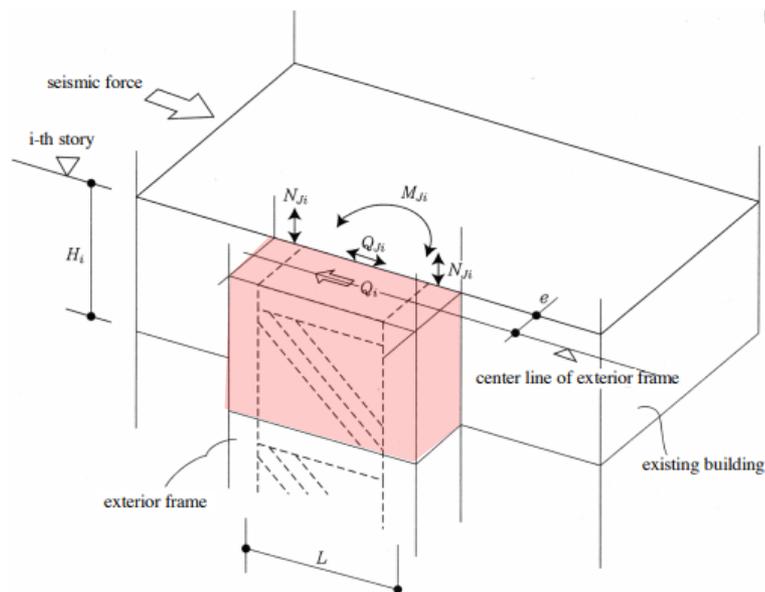
Technical Manual

for Seismic Evaluation and Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings, 2001

Translated by:
Building Research InstitutePublished by:
The Japan Building Disaster Prevention Association

L' ESOSCHELETRO SISMICO

INTRODUZIONE



$$Q_{Ji} = Q_i - Q_{i+1}$$

$$M_{Ji} = Q_{Ji} \times e$$

$$N_{Ji} = Q_i \times \left(\frac{H_i}{L} \right) \times \left(\frac{K_o}{K_o + K_F} \right)$$

where,

- Q_i : lateral shear force of exterior frame (i-th story)
- Q_{Ji} : lateral shear force of joint (i-th story)
- M_{Ji} : moment of joint (i-th story)
- N_{Ji} : axial force of joint (i-th story)
- e : lateral distance between center of exterior frame and joint
- K_o : axial stiffness of existing column adjacent to the column of exterior frame
- K_F : axial stiffness of column of exterior frame
- H_i : story height (i-th story)
- L : span of exterior frame

Figure TN.46 Stresses acting on the joint between exterior frame and existing building
(quoted from the figure on page 237 in the commentary of 3.6.4 of the Guidelines of 2001 Japanese version)

L' ESOSCHELETRO SISMICO

MATERIALI

- **Calcestruzzo:** principalmente per la realizzazione di setti.
- **Acciaio:** materiale più utilizzato per questa tipologia di intervento, principalmente per la praticità di costruzione e messa in opera. Vantaggi principali:
 - leggerezza
 - resistenza
 - reversibilità
 - rapidità trasporto
 - semplicità posa in opera

Gli esoscheletri, se non protetti da un involucro a fini energetico/architettonici, sono esposti agli agenti atmosferici.



Vanno adeguatamente progettati dal punti di vista della durabilità.

L' ESOSCHELETRO SISMICO

MATERIALI

- **Acciai inossidabili e leghe di alluminio**
 - maggiore durabilità, anche in ottica life cycle
 - costosi
- **Comuni acciai per impiego strutturale**
 - Scelta del materiale *legata all'aspetto strutturale*: nel caso si adottino sistemi a comportamento non dissipativo, è conveniente adottare acciai S355. Nel caso in cui siano previsti degli elementi dissipativi, in linea con l'approccio progettuale del *capacity design*, è possibile differenziare i materiali. Ad esempio può essere utilizzato un acciaio ad alto grado (S355 o maggiore) per le parti sovra-resistenti e un acciaio di grado minore (S275 o minore) per le parti che dovranno plasticizzare e garantire la dissipazione energetica.
 - Protezione del materiale nei confronti della corrosione.

L' ESOSCHELETRO SISMICO

MATERIALI



Sistemi duplex

Metodo diffuso per la protezione dell'acciaio dalla corrosione: sfrutta i benefici della **zincatura a caldo** e della **verniciatura**.

1) Zincatura a caldo

trattamento anticorrosivo dell'acciaio ottenuto immergendo i manufatti in un bagno di zinco fuso dopo una serie di pretrattamenti.



Produce una reazione metallurgica durante la quale si ha la formazione di uno strato protettivo costituito da una serie di strati di leghe di Fe-Zn. Non è quindi la semplice applicazione di uno strato protettivo, come può essere la verniciatura, in quanto nella zincatura si ha una reazione chimica.

La zincatura a caldo è caratterizzata da **due fasi principali**:

- la preparazione della superficie dell'acciaio
- zincatura

L' ESOSCHELETRO SISMICO

MATERIALI



Sistemi duplex

Metodo diffuso per la protezione dell'acciaio dalla corrosione: sfrutta i benefici della **zincatura a caldo** e della **verniciatura**.

1) Zincatura a caldo

2) Verniciatura

Con uno strato di verniciatura si ottiene una **protezione ulteriore della superficie zincata**. Il rivestimento organico si frappone ad **evitare il contatto diretto con l' ambiente corrosivo** e l' erosione degli agenti atmosferici, mantenendo così intatto lo spessore del rivestimento di zinco sottostante. Questa condizione permane fino a quando la vernice esplica la sua azione protettiva, cioè fino a quando non si deteriora a causa del degrado dovuto all' invecchiamento o per danneggiamenti meccanici, distaccandosi dal substrato.

L' ESOSCHELETRO SISMICO

SCHEMI STRUTTURALI

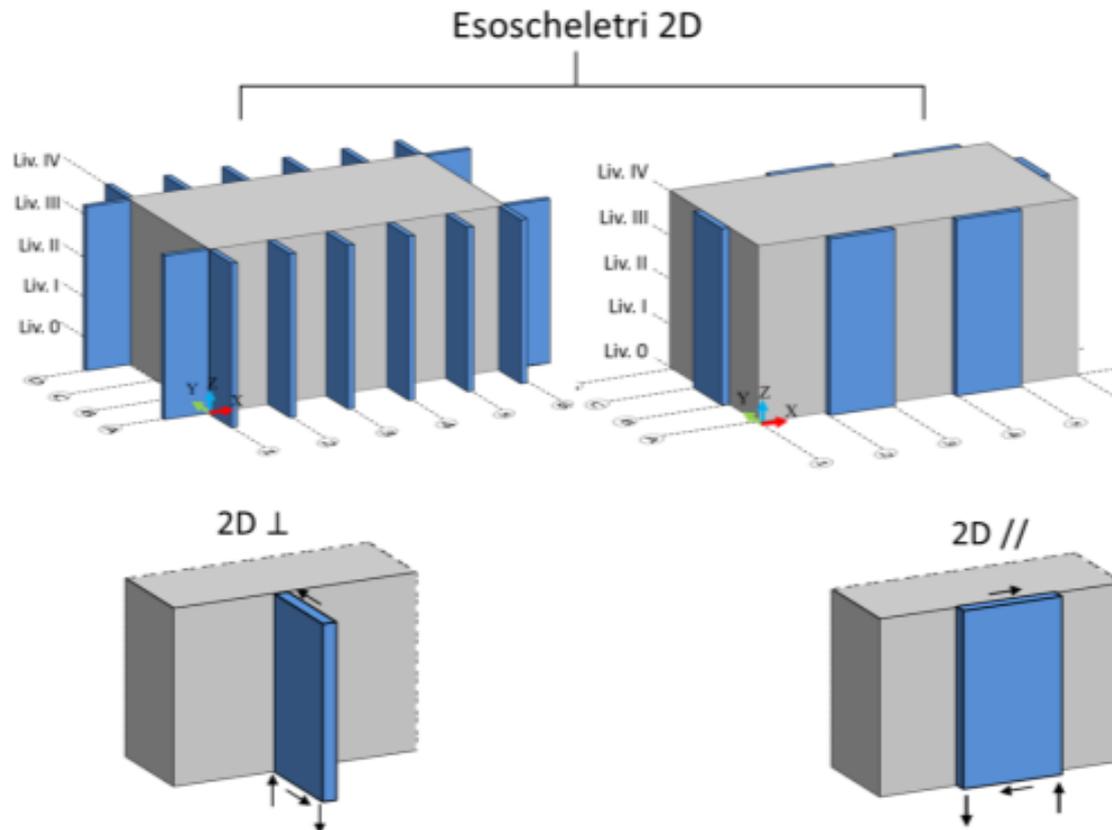
PRINCIPALI SCHEMI STRUTTURALI



L' ESOSCHELETRO SISMICO

SCHEMI STRUTTURALI

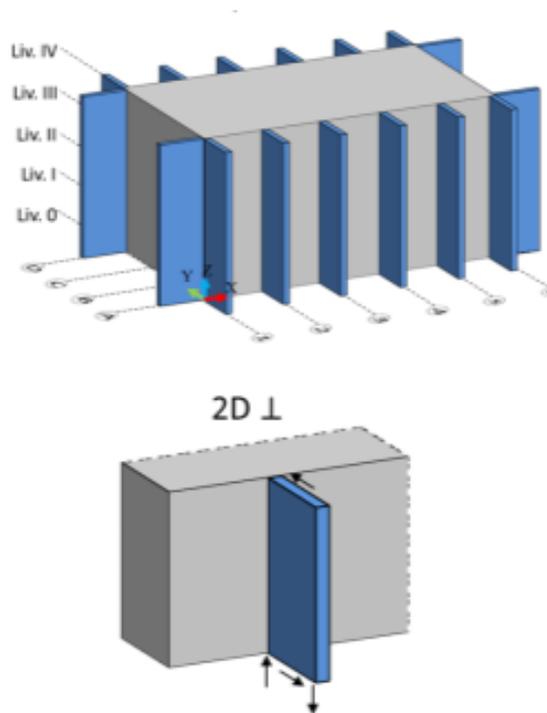
Sistemi a comportamento piano



L' ESOSCHELETRO SISMICO

SCHEMI STRUTTURALI

Sistemi a comportamento piano

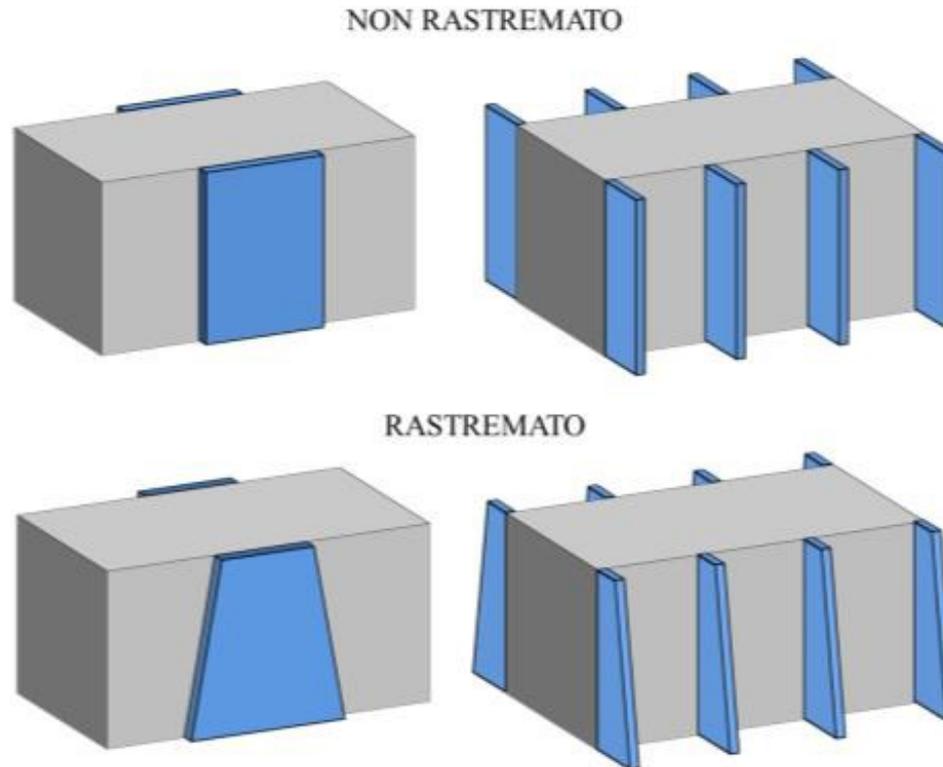


- Possono regolarizzare la risposta
- Si prestano ad essere industrializzati
- Link rigidi o dissipatori
- Altezze limitate

L' ESOSCHELETRO SISMICO

SCHEMI STRUTTURALI

Sistemi a comportamento piano

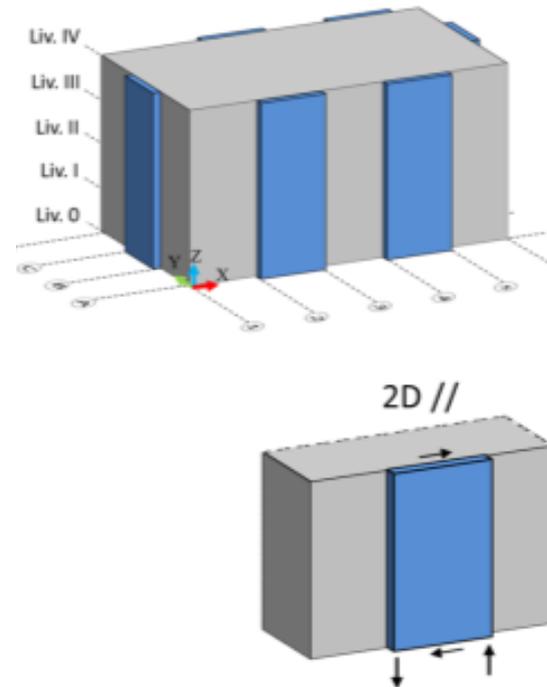


L' ESOSCHELETRO SISMICO

SCHEMI STRUTTURALI

Sistemi a comportamento piano

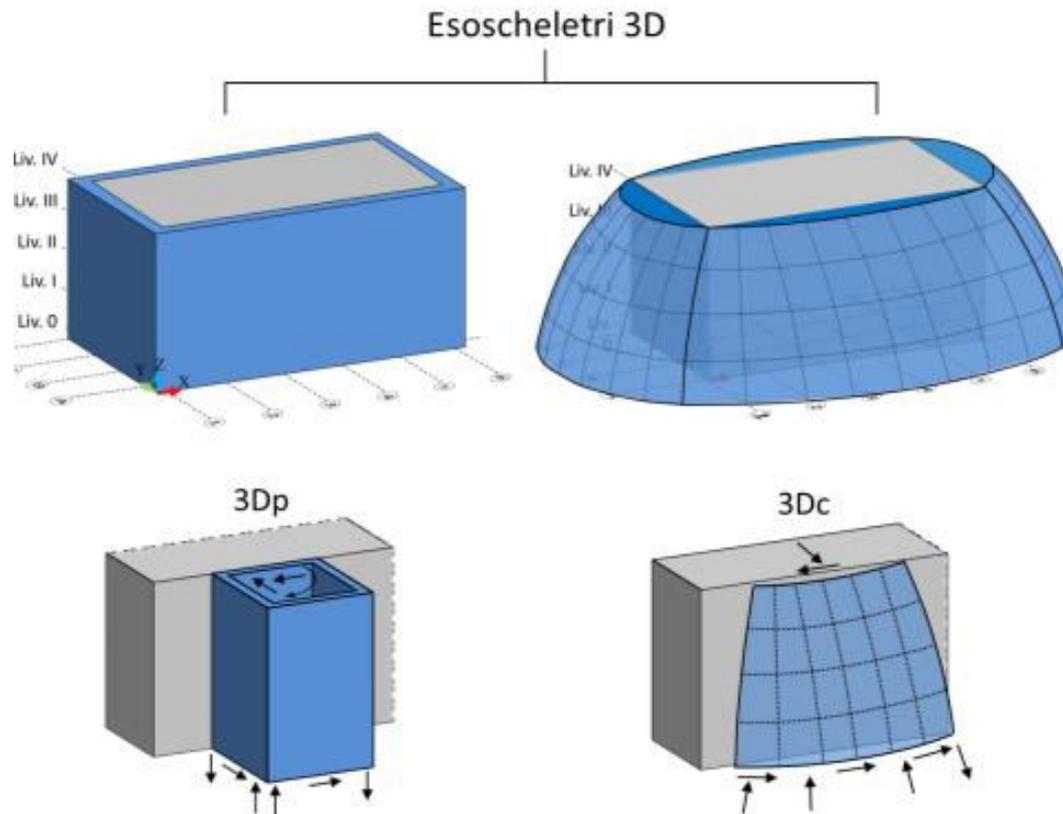
- Disposte parallelamente alla facciata
- Possono avere una larghezza maggiore
- Necessità di sistemi per il trasferimento delle forze a livello di piano



L' ESOSCHELETRO SISMICO

SCHEMI STRUTTURALI

Sistemi a comportamento spaziale



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI

1995



Telegraph-Channing Garage
(Berkeley, California-USA)

1994



Auditorium HPH oh ETH
(Zurich, Switzerland)

2014



Palazzina Uffici Magneti
Marelli (Crevalcore, Italia)

1985



Matsuya Ginza Center
(Tokyo, Giappone)

1980



Hospital
Ángeles Clínica Londre
(Città del Messico, Messico)



1990



Applied Chemistry and
Chemical Engineering Building
(Sendai, Giappone)

Mappa di pericolosità sismica mondiale – PGA con probabilità di superamento del 10% in 50 anni

L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥



PALAZZINA UFFICI NELLO STABILIMENTO MAGNETI MARELLI DI CREVALCORE

- Costruita nel 1973-1974, senza subire modifiche sostanziali nel tempo.
- Danneggiata durante le due scosse di terremoto dell'Emilia del 2012.
- Distanza epicentrale I evento => ca. 20 km
- Distanza epicentrale II evento => ca. 17 km



- Danni strutturali in corrispondenza dei corpi scala
- Lesioni tamponamenti esterni dovute a compressione contro i pilastri
- Lesioni su circa il 70% dei tramezzi murari
- Lesioni sulle pannellature esterne in cca
- Fenomeni di martellamento sulle pannellature esterne adiacenti la passerella di collegamento con l'edificio produttivo.

L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥



PALAZZINA UFFICI NELLO STABILIMENTO MAGNETI MARELLI DI CREVALCORE

- **12 telai in CA** ad interasse di 5m;
- Pilastri 40x40 cm (30x30 ultimo piano);
- Solai in latero cemento (travetti e pignatte) alti 16 cm + 2cm di rasatura di tipo non rigido in quanto **privi di soletta collaborante**;
- I **pilastri del 1° piano sono disassati** rispetto a quelli sottostanti di una lunghezza pari a 80 cm.



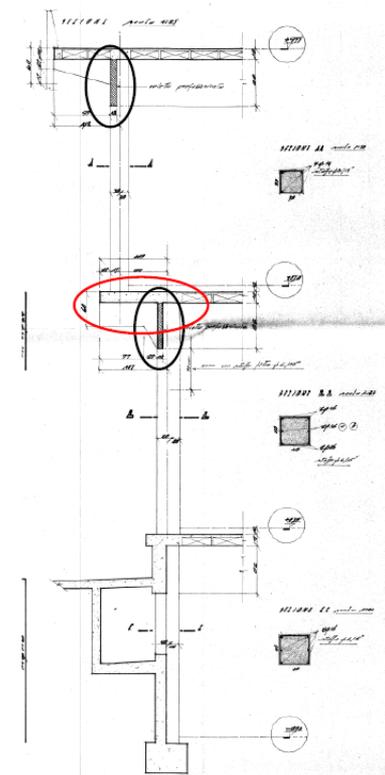
L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥



PALAZZINA UFFICI NELLO STABILIMENTO MAGNETI MARELLI DI CREVALCORE

- Per un sisma in **direzione longitudinale** alla struttura gli **elementi resistenti sono limitati**.
- Progettata per **solli carichi verticali**, con **schema piano ripetuto 12 volte** senza precise soluzioni in direzione longitudinale al fabbricato.
- I **solai non sono rigidi** e reagiscono per l'aliquota ad essi spettante in base all'area di influenza delle masse partecipanti.
- Vulnerabilità sismica => **20% della prestazione richiesta** per una nuova costruzione.



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥



PALAZZINA UFFICI NELLO STABILIMENTO MAGNETI MARELLI DI CREVALCORE

Approccio progettuale:

- Affidare alle strutture esistenti la funzione statica per le quali sono state progettate => carichi verticali;
- Creazione di un esoscheletro d'acciaio, fondato su **micropali valvolati**, sismoresistente al 100% dell'azione di progetto.
- Modifica del grado di vincolo alla base dei pilastri tramite la creazione di cerniere tipo Mesnager.
- Dati gli ingombri limitati per le strutture esterne => **struttura in acciaio dissipativa** con $q = 4$ che rispetti GdR. Strutture in elevazione e fondazioni più contenute.



L' ESOSCHELETRO SISMICO

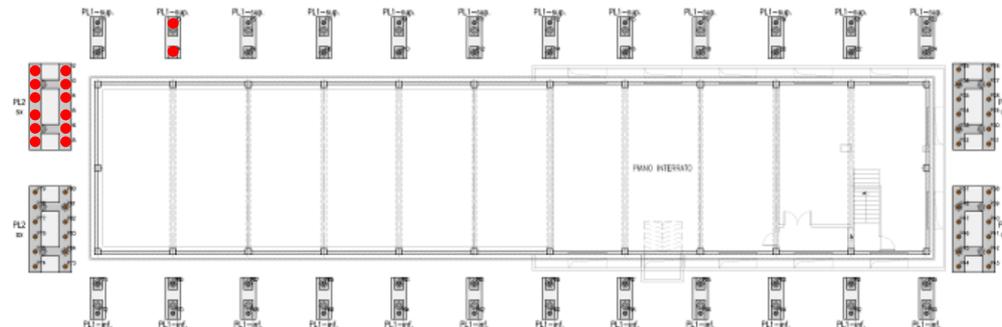
ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥



PALAZZINA UFFICI NELLO STABILIMENTO MAGNETI MARELLI DI CREVALCORE

Approccio progettuale:

- I nuovi sistemi sismo-resistenti sono stati **dimensionati anche in funzione dello SLD**, assumendo come limite di **spostamento di interpiano per le colonne esistenti 0.5%**.
- Pannellature rigide e contropareti in laterizio => **sostituzione con elementi più flessibili** e meno soggetti a danneggiamenti.
- Nuove scale metalliche più leggere all'interno.
- **Plinti su pali** per le sollecitazioni da sisma => micropali trivellati, diametro 250 con valvole nel tratto finale



L' ESOSCHELETRO SISMICO

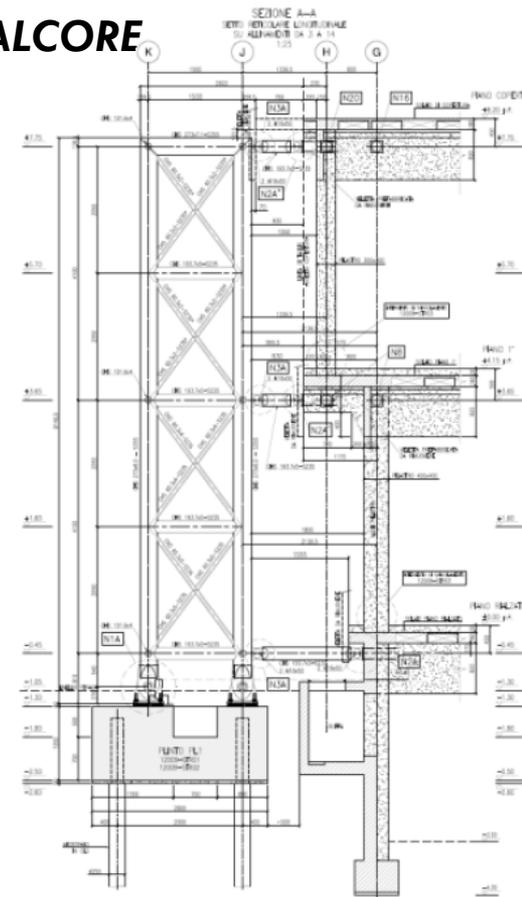
ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥



PALAZZINA UFFICI NELLO STABILIMENTO MAGNETI MARELLI DI CREVALCORE

Strutture

- Tralicci d'acciaio di tipo dissipativo disposti secondo le due direzioni ortogonali;
- Elementi **zincati a caldo e verniciati in officina**;
- **Tubi tondi** => **resistenze assialsimmetriche** per l'instabilità data dalla elevata compressione sulle colonne;
- Tralicci => possono **dissipare sia come telaio** sia come **struttura a controventi concentrici** grazie alla formazione del meccanismo tipo Vierendeel fra colonne e traversi e di quello tipo diagonale tesa attiva dei controventi a croce di S. Andrea;



L' ESOSCHELETRO SISMICO

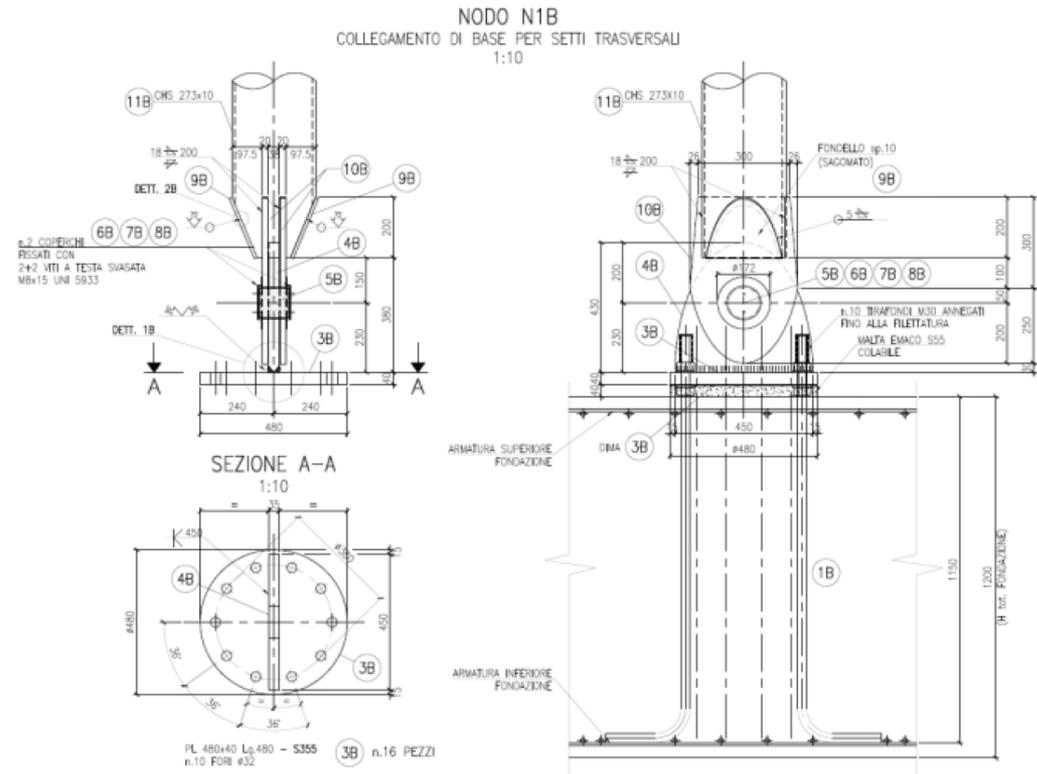
ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥



PALAZZINA UFFICI NELLO STABILIMENTO MAGNETI MARELLI DI CREVALCORE

Strutture

- Sistemi di puntoni e piccole reticolari piane collegate alle travi principali e alle colonne per rendere il piano rigido => sgravare i solai da azioni di piano parassite e redistribuire le forze sismiche.
- Alla base => **cerniere perfette** a perno: ciascun setto ha una direzione specifica di lavoro.
- I **setti sono stabilizzati in senso trasversale al loro piano** con controventi a croce di S. Andrea.
- Tirafondi in aderenza in acciaio B450C



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥



PALAZZINA UFFICI NELLO STABILIMENTO MAGNETI MARELLI DI CREVALCORE



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥

1) Interventi effettuati sulla scuola:

- realizzazione di **contrafforti in acciaio con relative fondazioni** in cemento armato;
- inserimento localizzato di un sistema di **controventi di piano all'intradosso** di alcune porzioni della copertura;
- creazione di un **telaio irrigidente sul fronte** dell'ingresso dell'edificio;
- Irrigidimento della struttura in cemento armato dell'androne (travi e pilastri) all'interno della struttura;
- creazione di un **telaio irrigidente sul retro** dell'edificio;

2) Interventi effettuati sulla palestra:

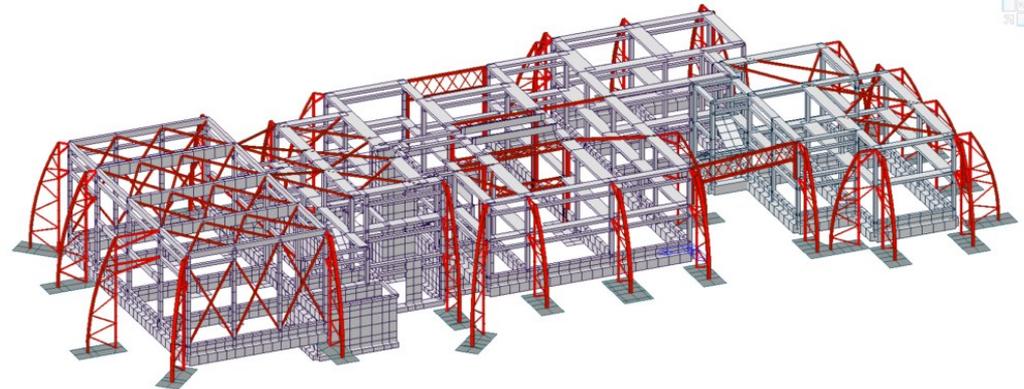
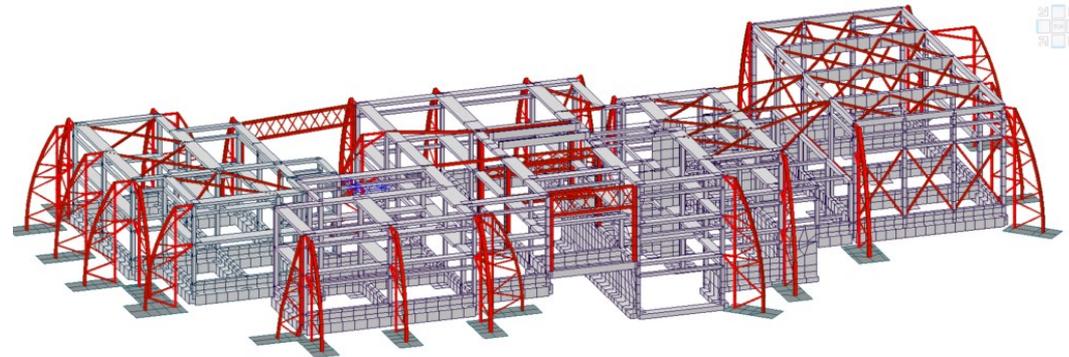
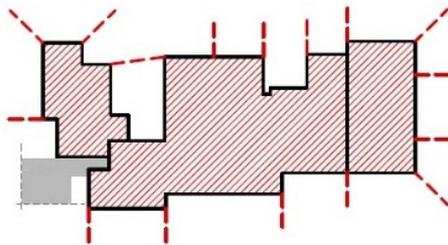
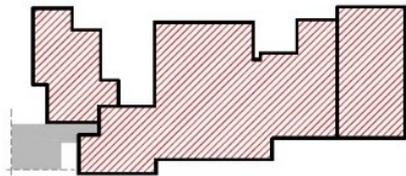
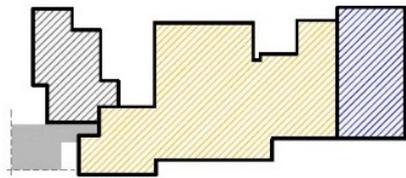
- realizzazione di contrafforti in acciaio con relative fondazioni in cemento armato;
- rinforzo delle travi in cemento armato in copertura mediante l'inserimento di profili metallici;
- **inserimento di un sistema di controventi di piano all'intradosso della copertura** in modo tale da conferire alla struttura un comportamento scatolare;
- irrigidimento della struttura mediante l'inserimento di un sistema di **controventi di parete**;
- collegamento della scuola con la palestra sempre mediante l'inserimento di profilati metallici.



Plesso Scolastico "I.C. Cecrope Barilli"
di Basilicogioiano

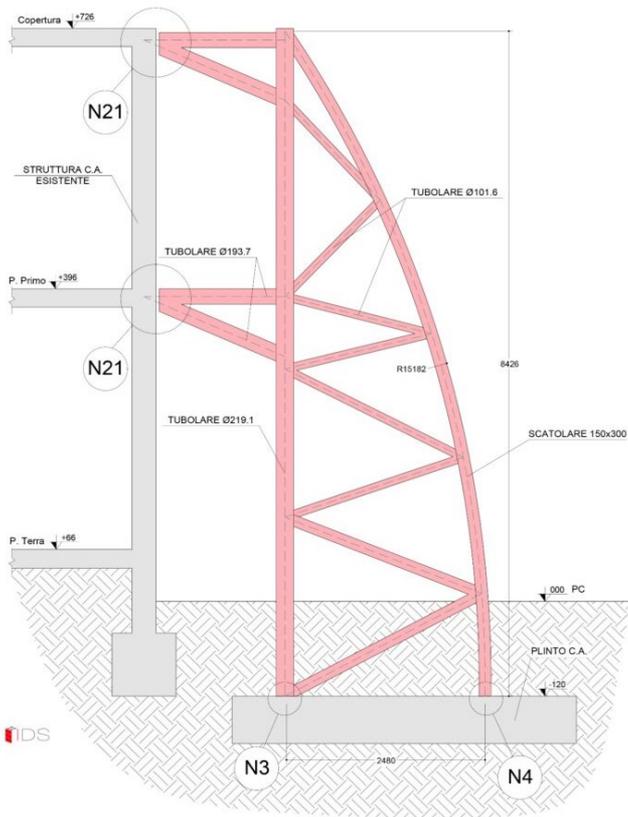
L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥

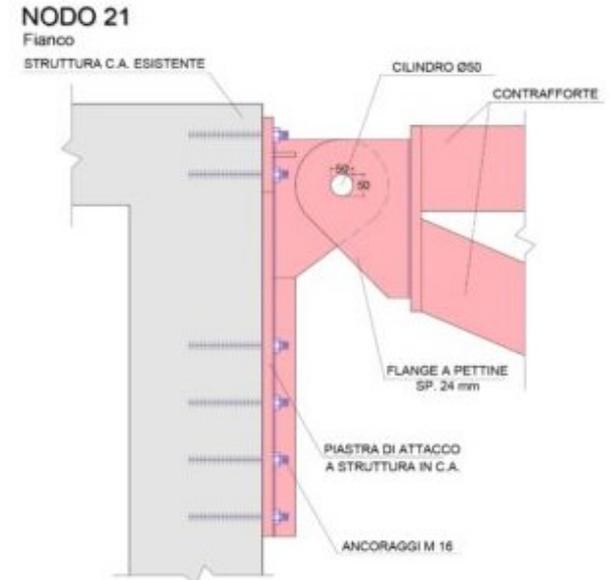
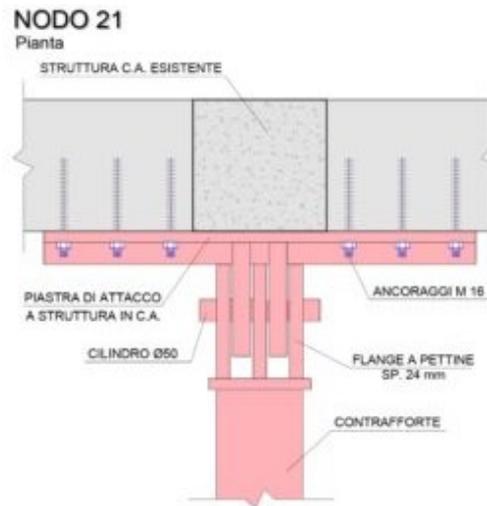


L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥



Plesso Scolastico "I.C. Cecrope Barilli"
di Basilicogiano



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥

Plesso Scolastico "I.C. Cecrope Barilli"
di Basilicogoiano



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥



La Scuola Primaria "La Tina"

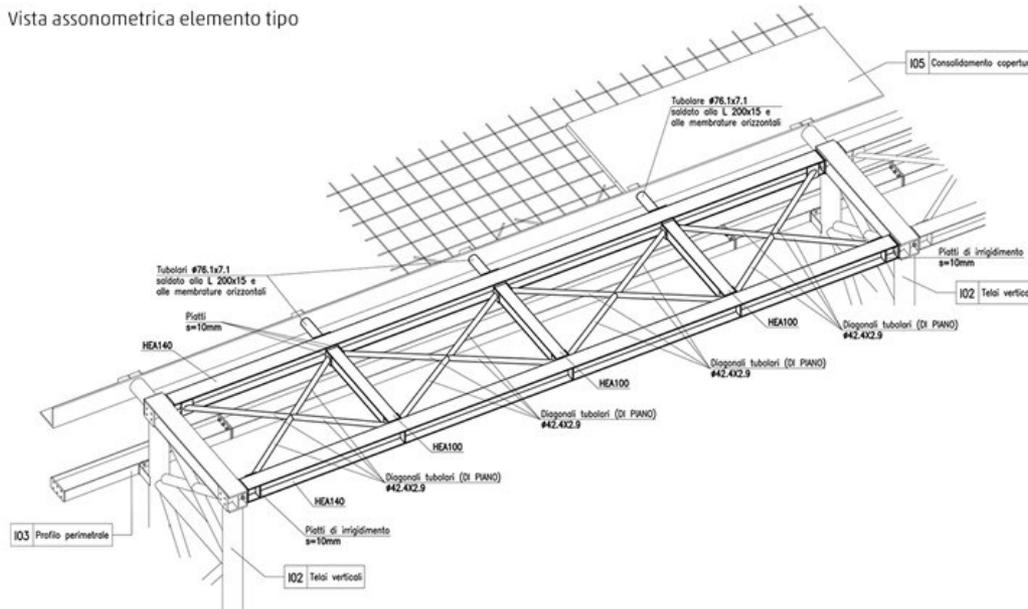
L'intervento più rilevante ha mirato ad un **incremento della resistenza globale** mediante l'inserimento di un nuovo sistema simoresistente verticale, costituito da **telai in acciaio**, che lasciasse **agli elementi strutturali esistenti la sola funzione di sostenimento dei carichi verticali**; allo stesso scopo sono stati realizzati opportuni sistemi di controventamento orizzontale in grado di garantire una **cerchiatura rigida a livello dell'impalcato di copertura** e una **migliore distribuzione dei carichi orizzontali**.

Un altro intervento significativo è stato quello di alleggerire e consolidare il solaio di copertura mediante la rimozione di ghiaia, guaina e massetto esistenti, il getto di una nuova soletta armata alleggerita e la realizzazione di una contro copertura.

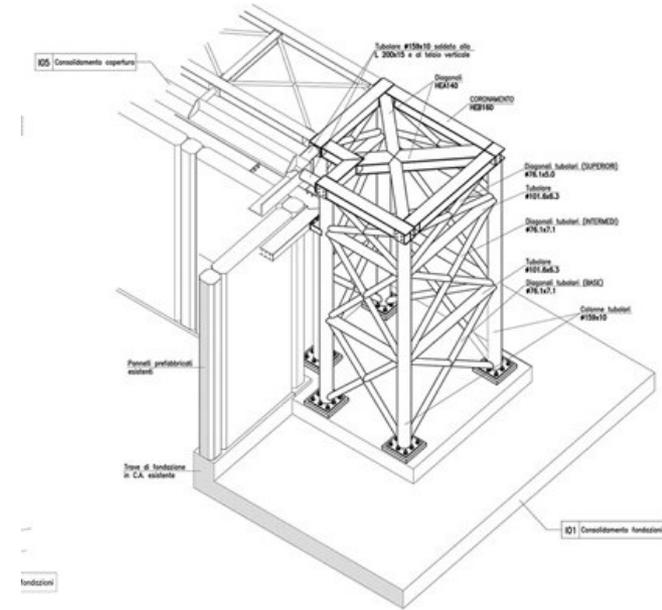
L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥

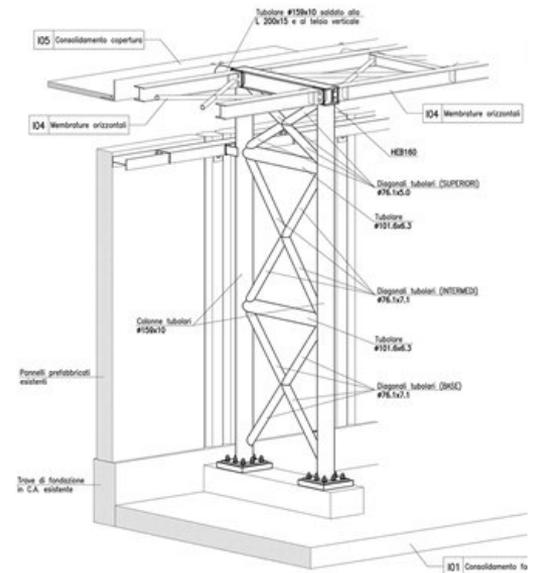
Vista assonometrica elemento tipo



Vista assonometrica telai d'angolo



Vista assonometrica telaio singolo



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥

Scuola Saffi (Santarcangelo di Romagna)



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥

- Irregolarità in pianta ed in elevazione
- Pilastri poco staffati, sia per il taglio che per il confinamento
- Plinti prefabbricati di piccole dimensioni
- Impalcati posti a piani diversi con formazione di meccanismi di pilastro tozzo
- Travi monolitiche di notevole altezza (2m) appoggiate su forcelle debolmente armate
- Appoggi senza vincoli, quindi con funzionamento ad attrito



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥

- Realizzazione di **nuove strutture metalliche esterne** con funzione sismo-resistente in grado di supportare tutta l'azione sismica di progetto;
- **Rinforzo ed irrigidimento degli impalcati interni dell'edificio** tramite strutture metalliche
- Completamento dei **rinforzi dei nodi della struttura in CA** e **rinforzi locali nelle zone critiche** con rischio di rottura a taglio.
- Collegamento dell'edificio alle nuove strutture esterne tramite **link dissipativi**.



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥

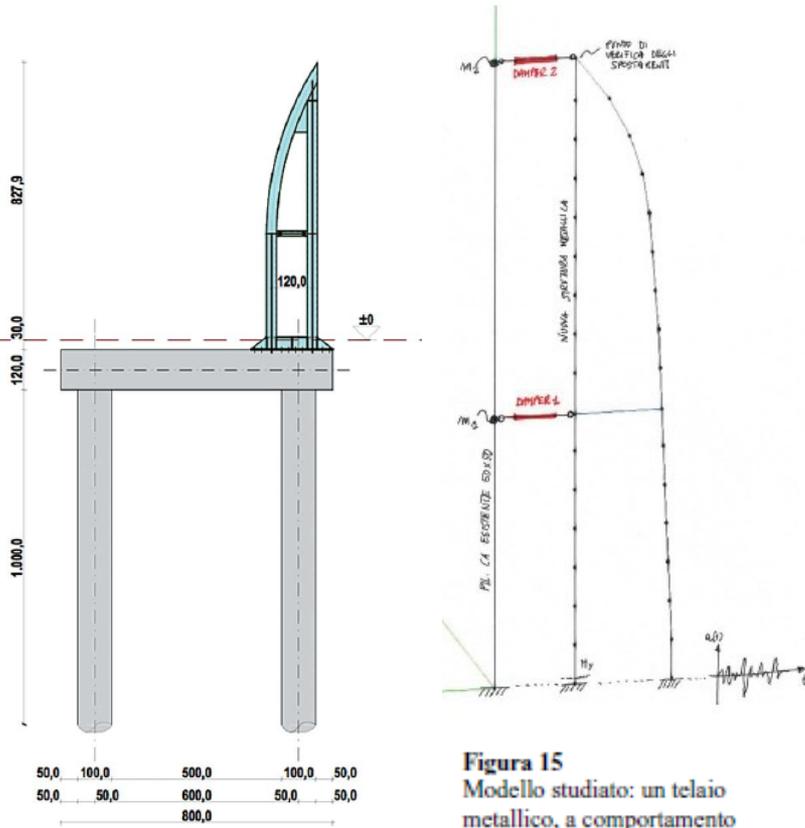


Figura 15
Modello studiato: un telaio metallico, a comportamento elastico, collegato al pilastro esistente in CA con elementi damper.

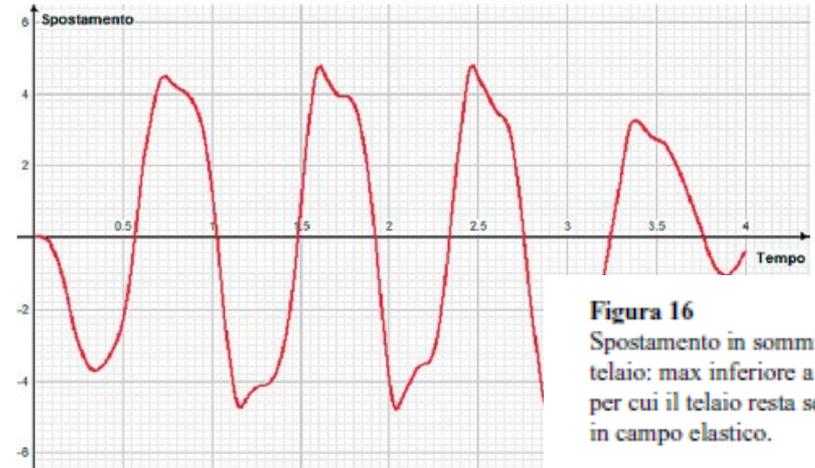


Figura 16
Spostamento in sommità del telaio: max inferiore a 4,5 cm, per cui il telaio resta sempre in campo elastico.

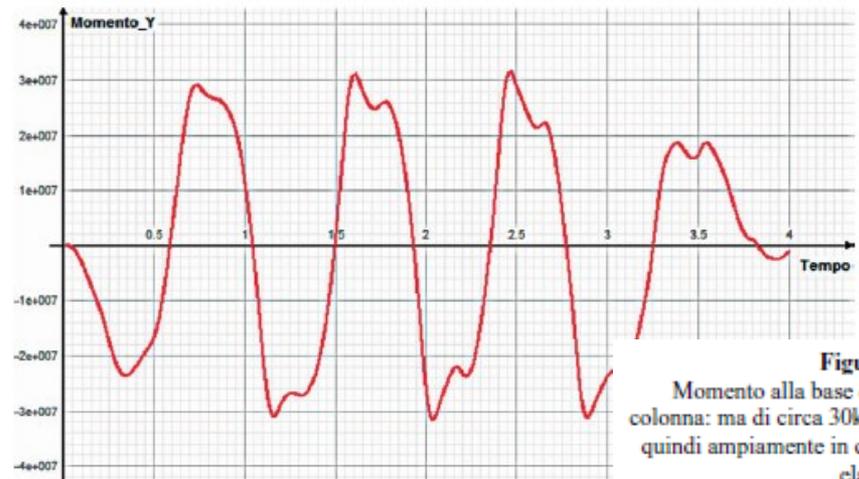


Figura 17
Momento alla base di una colonna: ma di circa 30kN*m, quindi ampiamente in campo elastico.

L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D ⊥



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D II

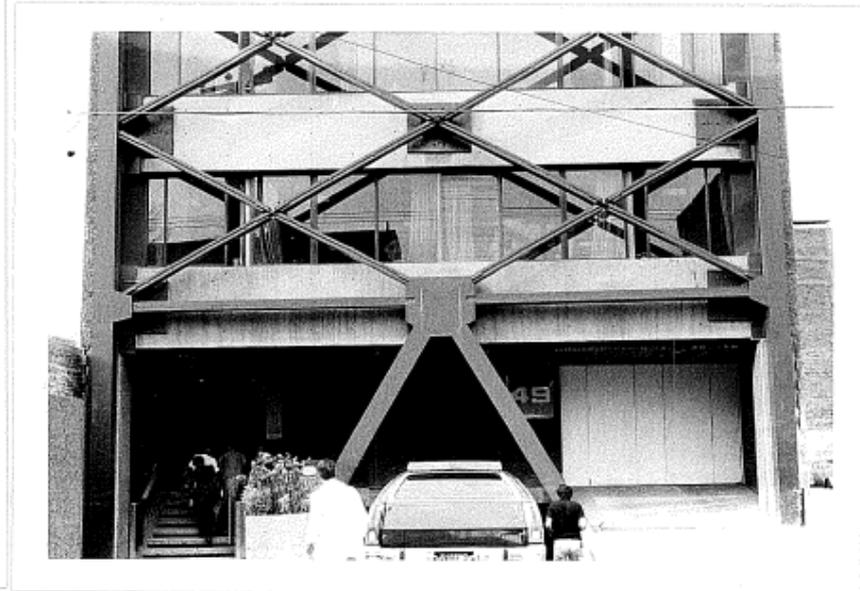
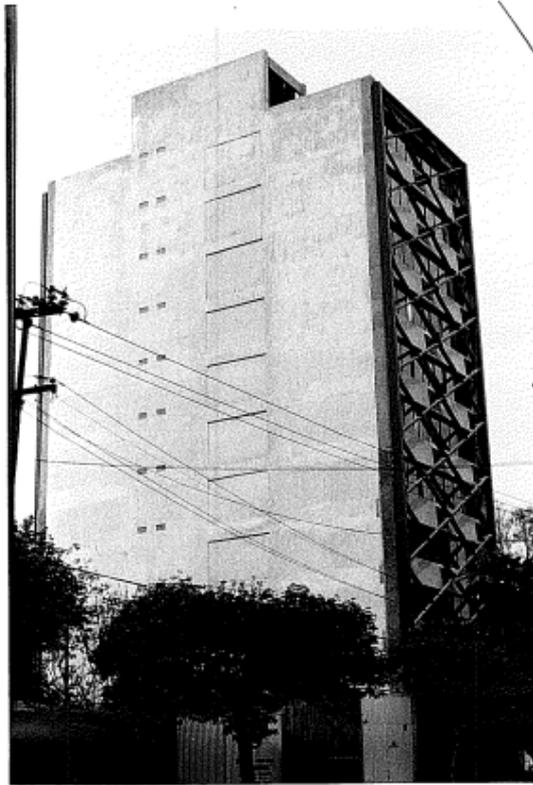


Fig. 1.3.5 Durango 49, Mexico City; steel bracing retrofitting

L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D

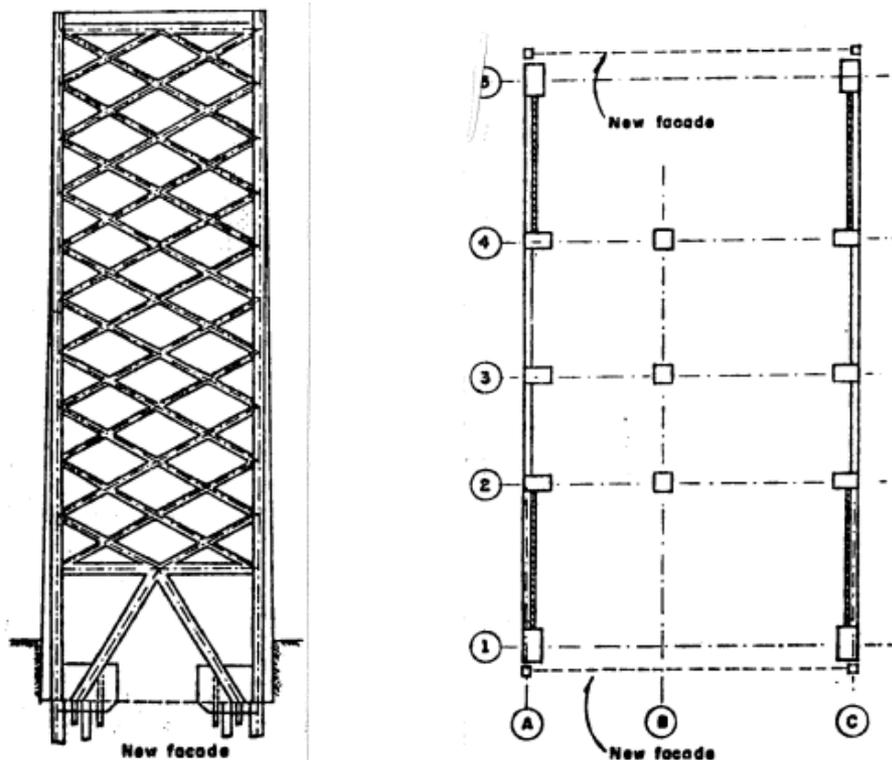


Fig. 1.3.6 Durango 49, plan and elevation [3]

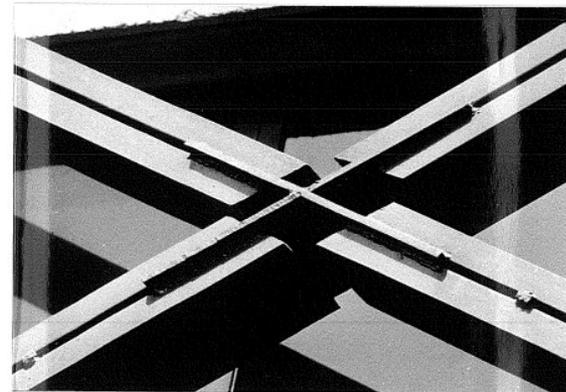
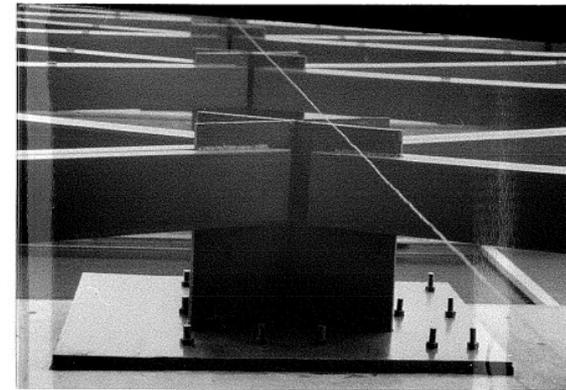


Fig. 1.3.7 Durango 49, connections

L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D

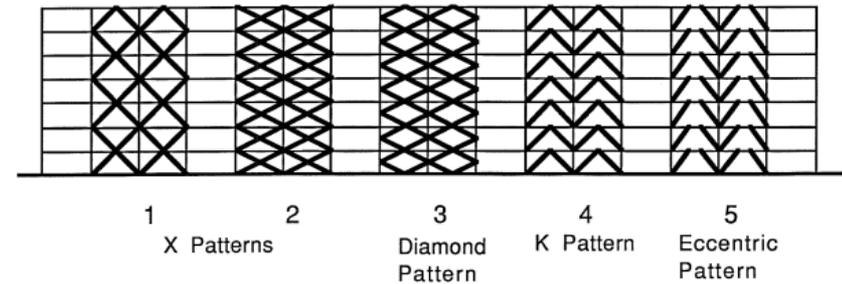


Fig. 3.1.1 Bracing patterns

1-2) Sono i più comuni per la loro **semplicità e facilità di esecuzione**. Lo schema 1 è più efficiente data l'inclinazione a circa 45° dei controventi \Rightarrow maggiore forza e rigidezza. Ha solitamente dei costi di realizzazione inferiori e meno occupazione delle finestre.

3) Le connessioni sono a metà pilastro e metà trave. Riduce la lunghezza libera di inflessione delle colonne, ma **introduce forze orizzontali parassite**. Solitamente la connessione è più difficoltosa. Maggiore visibilità nelle pareti.

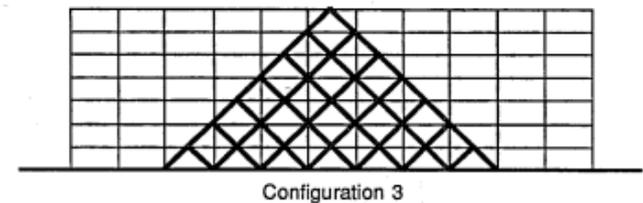
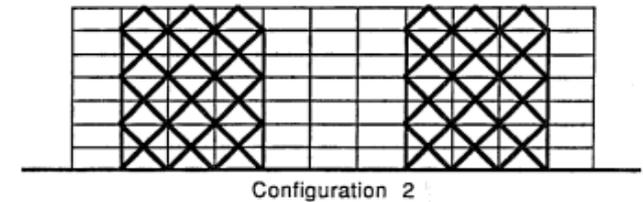
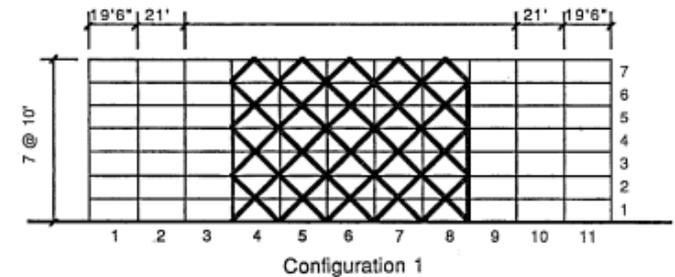
4) Le diagonali sono solitamente inclinate con lo stesso angolo e hanno la stessa lunghezza libera di inflessione. Se il carico nelle due diagonali è differente (es. una snervata e una instabilizzata), viene introdotta una **forza verticale nella mezzera della trave**.

5) Il **link centrale di collegamento** è **particolarmente efficiente nella dissipazione energetica**. Tuttavia, negli interventi di retrofit non è consigliato in quanto **le travi originali in calcestruzzo non possono essere utilizzare per sviluppare link a taglio**. Risulta necessario proteggere le travi con elementi di acciaio, ma così viene meno il vantaggio dell'intervento.

L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D

In molti casi non è necessario estendere l'esoscheletro all'intera facciata. Il progettista ha la possibilità di scegliere la disposizione più opportuna.



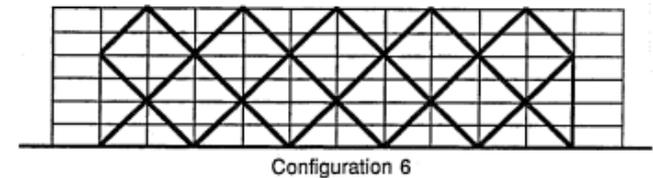
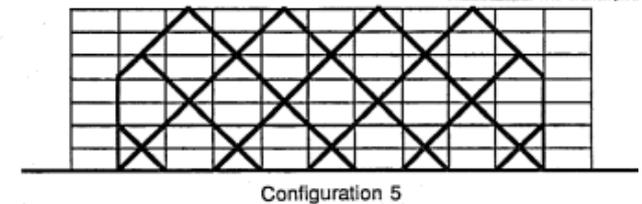
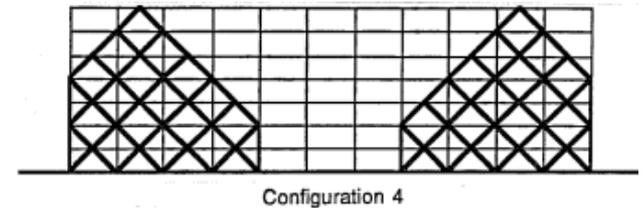
L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D||

Configurazione 4: coniuga i benefici della configurazione 2 e 3.

Configurazione 5: comporta una distribuzione migliore della forza rispetto, ad esempio, alla configurazione 1. Di contro, le forze orizzontali introducono al secondo, quarto e sesto piano un carico assiale sulle colonne rendendo così necessario anche un rinforzo di queste ultime.

VERIFICARE L' EFFETTO DELL'ESOSCHELETRO SULLA STRUTTURA ESISTENTE.



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D

Scuola Fogazzaro - Piovene Rocchette



L' ESOSCHELETRO SISMICO

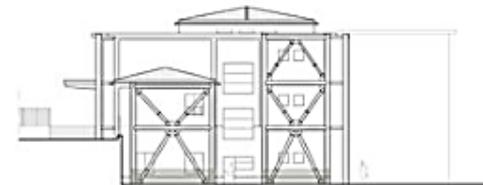
ESEMPI REALIZZATIVI 2D II

Scuola Fogazzaro - Piovene Rocchette



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D



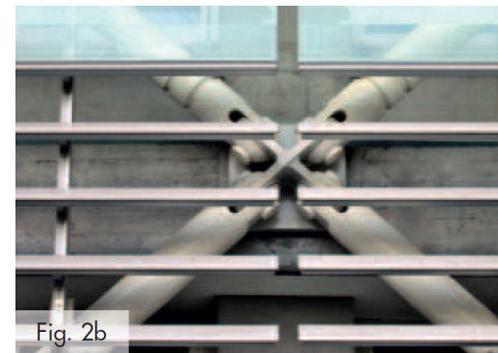
L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 2D II

Fig. 1
Esempi di consolidamento
di edifici in c.a. esistenti
mediante controventi in
facciata (Berkeley, Stati
Uniti): (a) University Hall; (b)
garage multi-piano.



Fig. 2
Esempio di consolidamento
di edifici in c.a. esistenti
mediante controventi in
facciata (Istituto di
Tecnologia dell'Università di
Tokyo, Giappone): (a) vista
della facciata; (b) dettaglio
costruttivo.



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 3D

Liceo Varano di Camerino



L'edificio, situato nel centro della città di Camerino (MC), è stato realizzato negli anni '60 e da allora ospita il Liceo Classico e Scientifico "Varano". Il fabbricato è composto da **due corpi di fabbrica staticamente indipendenti**; entrambi sono realizzati con struttura in c.a. caratterizzata da telai con travi emergenti e pilastri di forma romboidale ovvero ruotati di 45° rispetto alla direzione dei telai. Vista la particolare geometria degli elementi strutturali, **i telai di entrambi i corpi sono classificabili come "shear type"**, ossia telai con travi estremamente più rigide dei pilastri il che comporta una maggior vulnerabilità di questi ultimi per effetto delle azioni sismiche. Il progetto prevede **la solidarizzazione degli impalcati di piano dei due corpi di fabbrica e la realizzazione di n. 2 torri sismo-resistenti dissipative**. I lavori di adeguamento sismico del Liceo sono stati completati in tempi brevi, circa 7 mesi, e senza interrompere le attività scolastiche

L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 3D

Liceo Varano di Camerino

Nell'ipotesi semplificativa di deformata trasversale lineare (δ costante), l'energia dissipata vale:

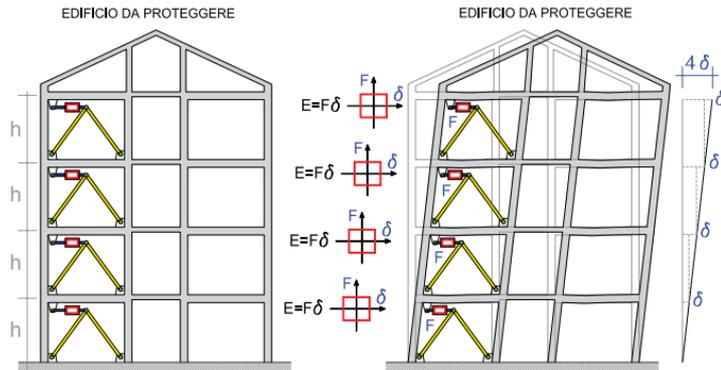


Figura 2
Controventi dissipativi all'interno delle maglie dei telai.

$$E_{ft} = F\delta \cdot (1 + 1 + 1 + 1) = 4F\delta$$

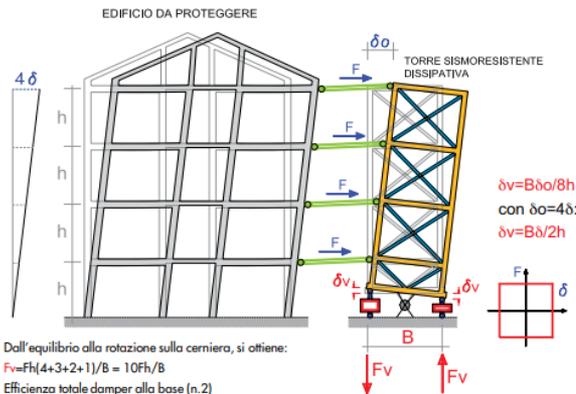


Figura 3
Torri dissipative.

$$E_{ft} = 2 \cdot 10FB\delta / (B2h) = 10F\delta$$

Dal confronto dei due sistemi di protezione sismica degli edifici, emerge che **il sistema a torri, per un edificio di quattro piani, ha un'efficienza, in termini di energia dissipata e quindi di protezione sismica, 2.5 volte superiore rispetto a quella di un sistema tradizionale.**

L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 3D

Liceo Varano di Camerino

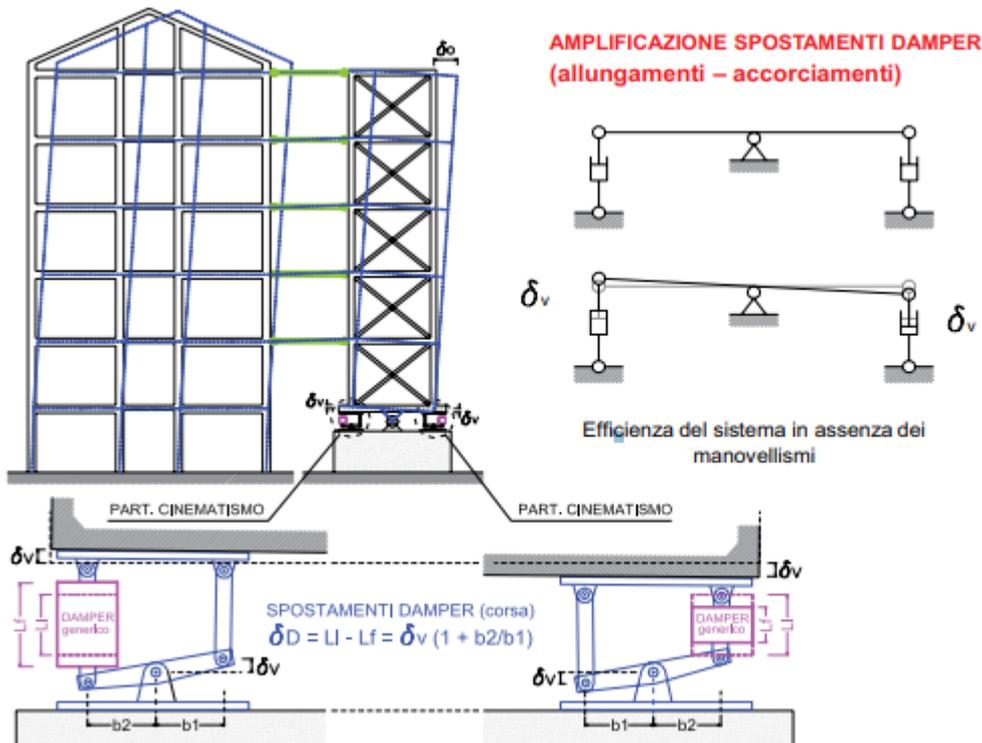


Figura 4
Il manovellismo alla base delle torri.

L'efficienza del sistema proposto è garantita non solo dalla **rigidezza delle torri**, ma anche dal manovellismo utilizzato alla base delle torri per il collegamento delle stesse ai dissipatori. Il sistema meccanico di manovellismo introdotto alla base di ogni torre ha la **funzione di amplificare gli spostamenti δ_v** , così da ottenere un miglioramento generalizzato dell'efficienza dell'intervento con torri dissipative (Figura 4). **A parità di spostamento in sommità δ_o** , con il sistema di manovellismo si ottiene uno spostamento sul dispositivo δ_v di gran lunga superiore a quello ottenuto in assenza di manovellismo. I dispositivi sono attivi sia a trazione che a compressione

L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 3D

Liceo Varano di Camerino

L'organizzazione planimetrica dei dispositivi è studiata in modo da garantire la massima efficienza al sistema. Per ottenere il massimo valore di spostamento δ i dissipatori vengono **disposti in senso radiale** sul perimetro esterno della torre, in modo da risultare efficaci per ogni movimento oscillatorio della torre.

Il ricentrimento del sistema torre-edificio è garantito dalla forza di richiamo che l'edificio esistente può trasmettere grazie all'energia potenziale elastica immagazzinata.

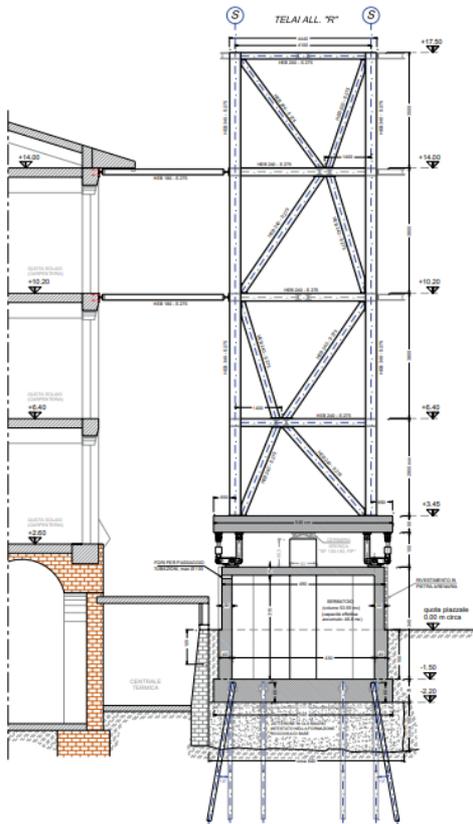
L'applicazione del sistema a torri dissipative sismo-resistenti presenta **numerosi vantaggi** rispetto alle tecniche convenzionali di adeguamento sismico, quali:

- **incremento sostanziale della capacità delle strutture esistenti nei confronti delle azioni sismiche**, che si traduce in un notevole abbattimento sia degli spostamenti che delle accelerazioni, preservando così non solo la struttura, ma anche i componenti non strutturali (murature, infissi, controsoffitti, impianti, ecc..) e le attrezzature, sensibili sia agli spostamenti che alle accelerazioni;
- **contenimento degli spostamenti orizzontali** fino a pervenire a soluzioni strutturali in grado di fronteggiare i terremoti previsti dalle norme allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) mantenendo la struttura in campo elastico e quindi senza importanti danneggiamenti ed interruzioni d'uso;
- la disposizione ottimale delle torri in pianta consente di regolarizzare il comportamento delle strutture in situazione sismica;
- la creazione alla base di ciascuna torre, di una **zona completamente dedicata alla dissipazione di energia**;
- la piena rispondenza ai **criteri di reversibilità** dell'intervento.

L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 3D

Liceo Varano di Camerino



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 3D

Liceo Varano di Camerino

Figura 23
Confronto deformate SLO
ante e post intervento- analisi
modali lineari.

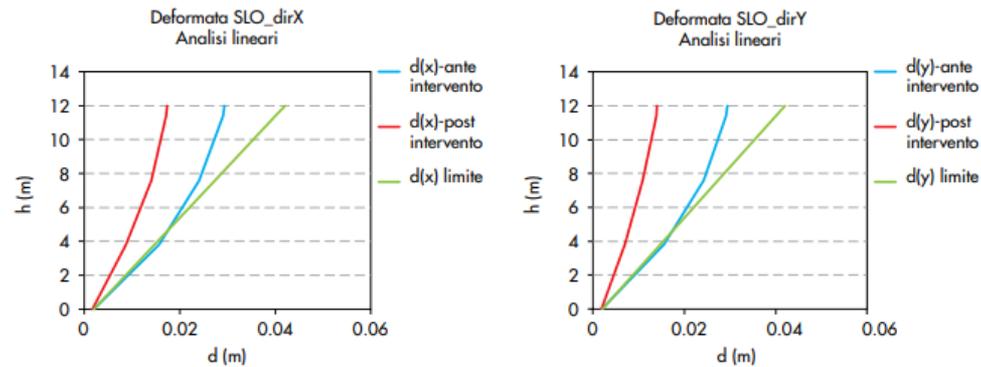
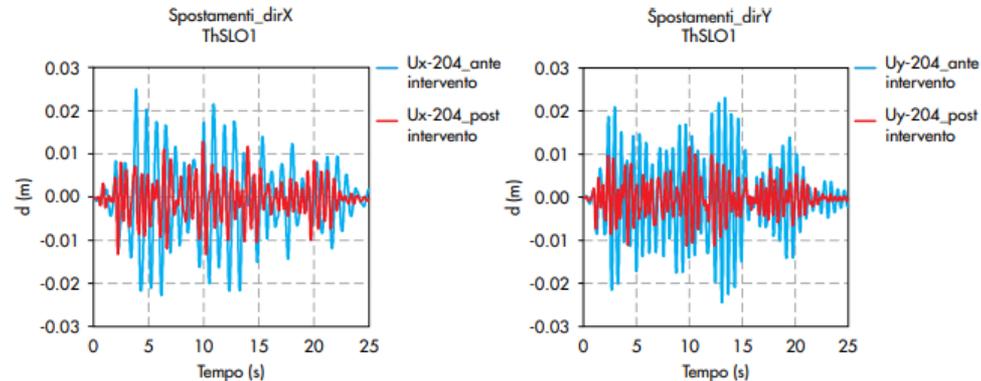


Figura 24
Confronto spostamenti ante
e post intervento nodo
sommitale 204 - caso di
analisi non lineare
"Th SLO1".



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 3D

Liceo Varano di Camerino

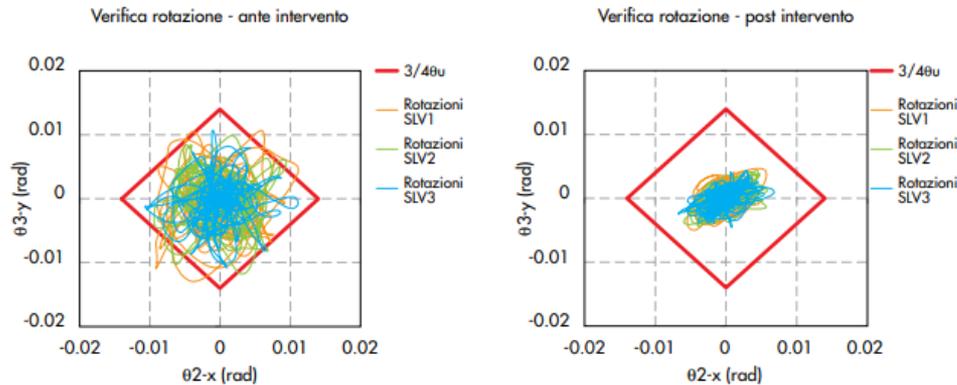
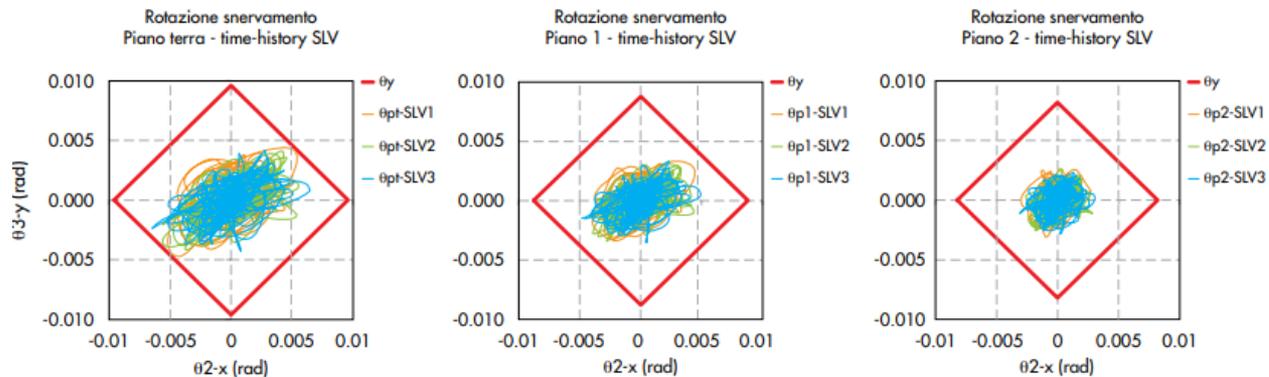


Figura 25
Confronto delle rotazioni allo SLV (ottenute con le tre terne di accelerogrammi SLV1, SLV2, SLV3) con il valore $\frac{3}{4} \cdot \theta_u$ - ante e post intervento.

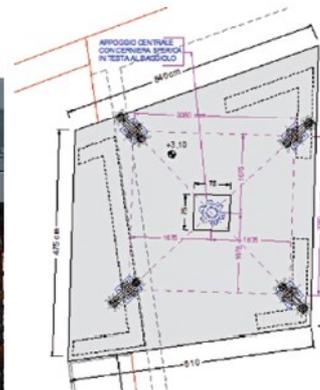
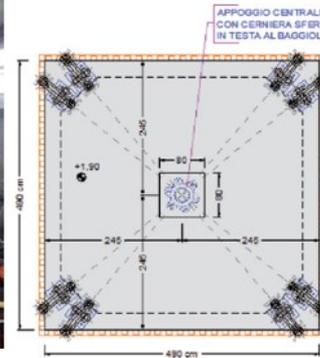
Figura 26
Confronto delle rotazioni allo SLV post intervento con il valore γ - prima, seconda e terza elevazione fuori terra corpo A.



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI 3D

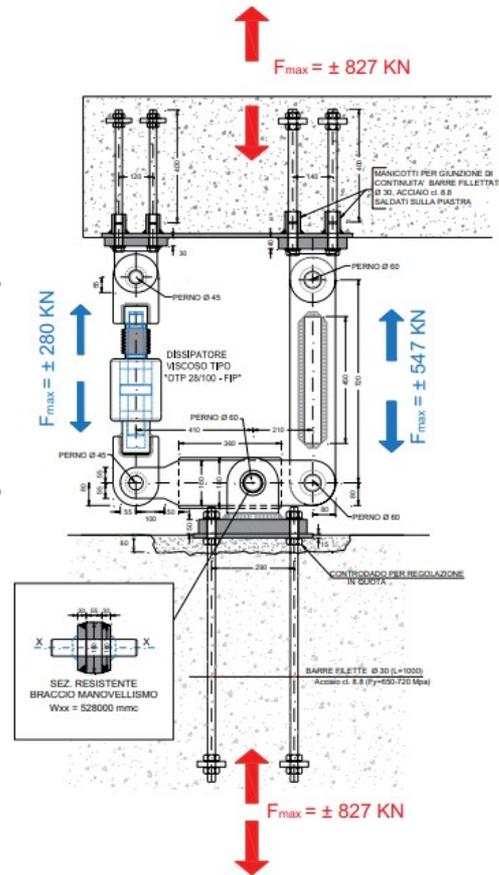
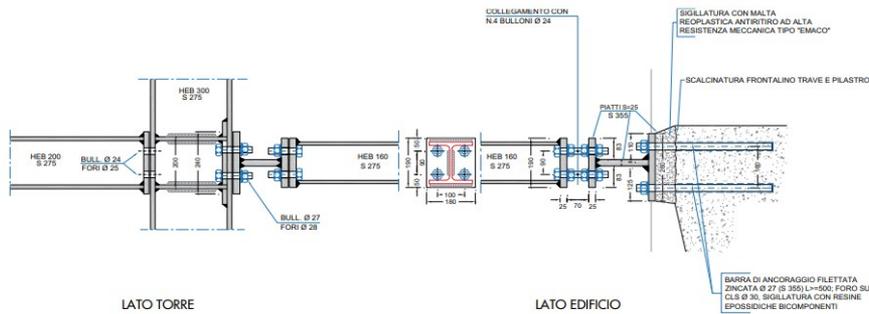
Liceo Varano di Camerino



L' ESOSCHELETRO SISMICO

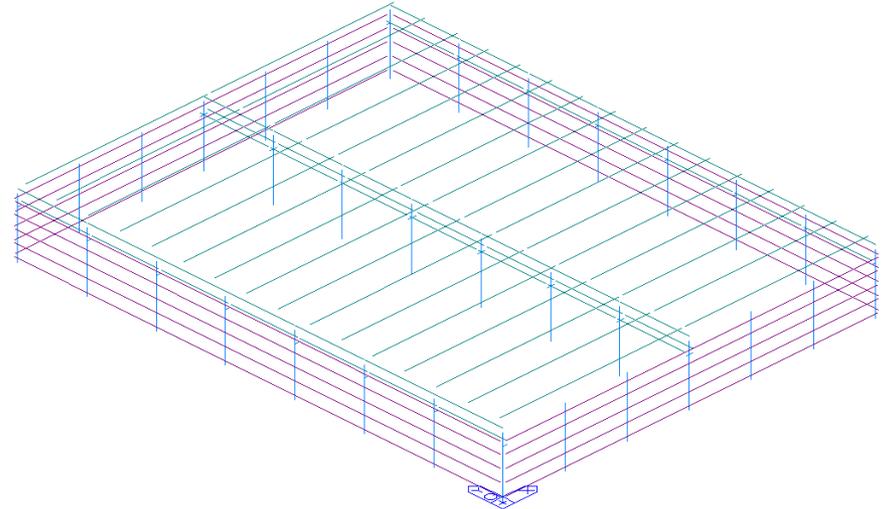
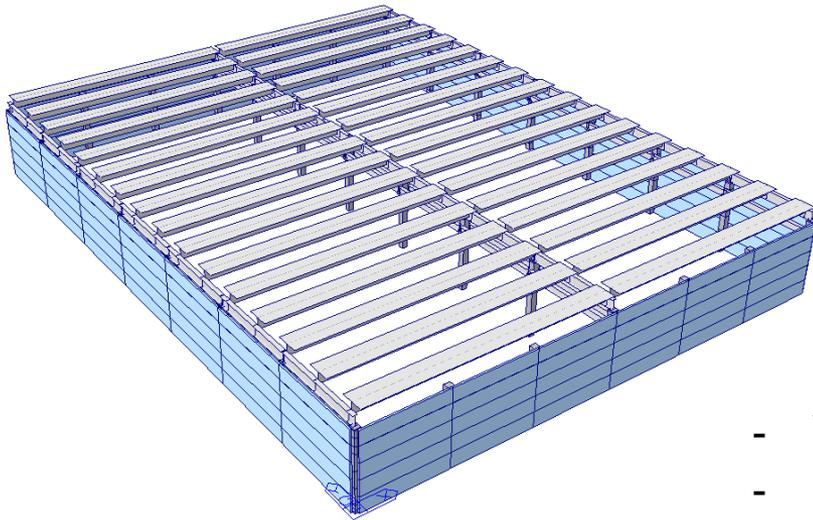
ESEMPI REALIZZATIVI 3D

Liceo Varano di Camerino



L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI



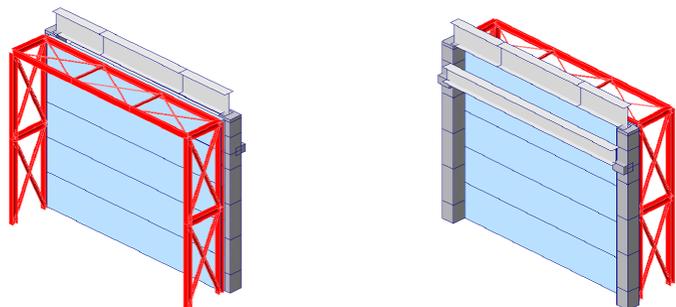
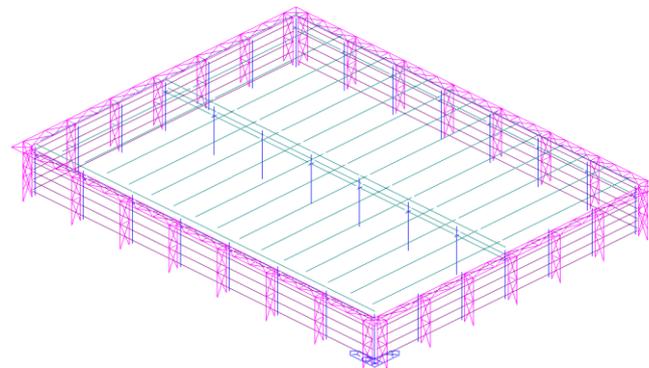
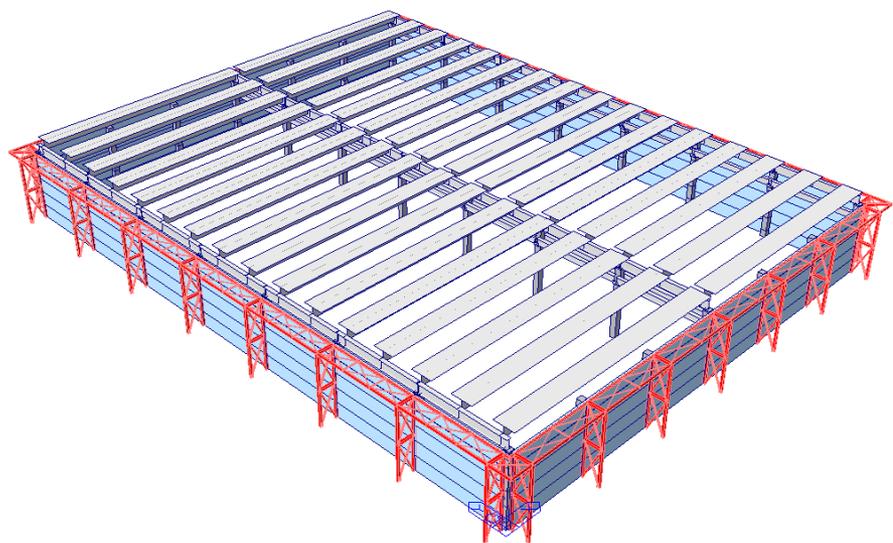
- Valutazione stato esistente
- Retrofit sismico basato su esoscheletro esterno

Gli elementi orizzontali sono costituiti da travi appoggiate in sommità ai pilastri e da elementi di copertura disposti trasversalmente a queste; in assenza di getti in opera integrativi al di sopra degli elementi di copertura, gli orizzontamenti non possono ritenersi rigidi nel loro piano ed è perciò necessario modellare ogni singolo elemento.

L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI

La soluzione scelta prevede la realizzazione di un sistema esterno composto di aste in acciaio irrigidite da opportuni controventi; tale sistema ha l'obiettivo di introdurre degli ulteriori elementi rigidi verticali tali da aiutare la struttura esistente a resistere all'azione sismica.

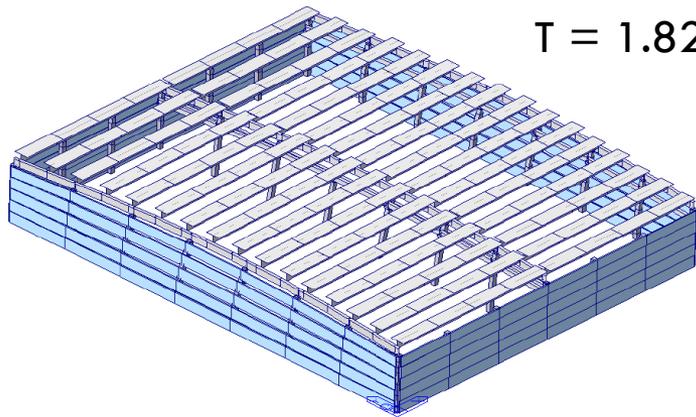


Adeguamento

Telaio in acciaio tipo S355 realizzato con due pilastri HEA280 posti esternamente all'altezza dei pilastri; tali pilastri vengono irrigiditi in sommità e a metà altezza con un profilo HEA280 e controventi realizzati con 2 profili ad L 100x150x12 mm. La copertura esterna è costituita da una reticolare di profondità 2.00 m circa e profili principali tipo UPN320, di luce pari a circa 11.00 m, irrigiditi da due traversi IPE120 lungo la trave e controventi realizzati con profilo ad L 45x4 mm.

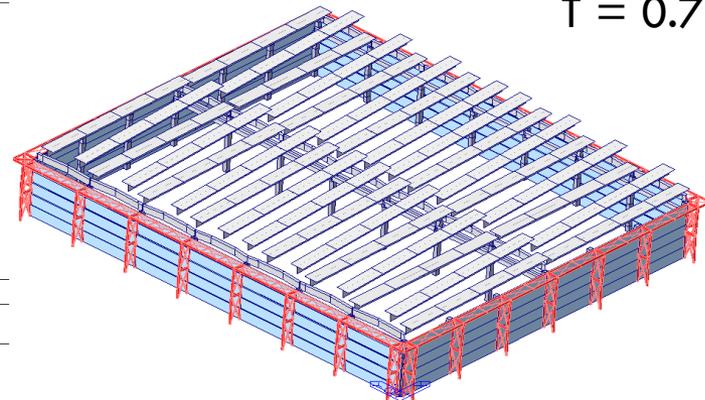
L' ESOSCHELETRO SISMICO

ESEMPI REALIZZATIVI



T = 1.82 sec.

```
midas Gen
POST-PROCESSOR
VIBRATION MODE
-----
FREQUENCY
(CYCLE/SEC)
0.546938
NATURAL PERIOD
(SEC)
1.823861
MPM(%)
DX= 59.102644
DY= 0.000032
EZ= 0.000000
FX= 0.000004
FY= 28.783853
FZ= 0.000209
MODE 1
MAX : 715
MIN : 8
UNIT: kh,m
VIEW-DIRECTION
X:-0.612 z
Y:-0.612
Z: 0.500
```



T = 0.79 sec.

```
midas Gen
POST-PROCESSOR
VIBRATION MODE
-----
FREQUENCY
(CYCLE/SEC)
1.256237
NATURAL PERIOD
(SEC)
0.796028
MPM(%)
DX= 45.960778
DY= 0.000000
EZ= 0.000000
FX= 0.000000
FY= 26.939261
FZ= 0.000482
MODE 1
MAX : 712
MIN : 8
UNIT: kh,m
VIEW-DIRECTION
X:-0.612 z
Y:-0.612
Z: 0.500
```

Rispetto allo stato di fatto, l'analisi agli autovalori indica che la struttura principale risulta fortemente irrigidita