



SEMINARIO ECOSISMABONUS: TECNICHE ED OPPORTUNITÀ

PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER EDIFICI ESISTENTI

Prof. Ing. Giuseppe Andrea FERRO
Ordinario di Scienza delle Costruzioni
Direttore Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica
Politecnico di Torino
Membro del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici



**POLITECNICO
DI TORINO**
Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

TERREMOTO DI AMATRICE (2016)



**POLITECNICO
DI TORINO**

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



PERDITE ECONOMICHE per sismi: dal 1970 al 2016

Costo medio annuale di **3 miliardi di € dal 2002**

Anno	Luogo	Magnitudo	Perdite stimate (miliardi di €)	Vittime
2016	Centro Italia	6.2	4.0	292
2012	Emilia Romagna	6.0 & 5.8	12.787	26
2009	Abruzzo	6.3	2.737	308
2002	Molise	5.9	1.015	30
1997	Umbria	6.1	2.556	12
1980	Irpinia	6.9	25.378	2914
1976	Friuli	6.5 & 6.0	16.377	922

(Swiss Re, Moody's investors Service)



POLITECNICO
DI TORINO

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



SCOMPOSIZIONE ECONOMICA DEL DANNO

Uffici → 82 %

Hotel → 87 %

Ospedali → 92 %

Quota parte non legata ai danni alle strutture

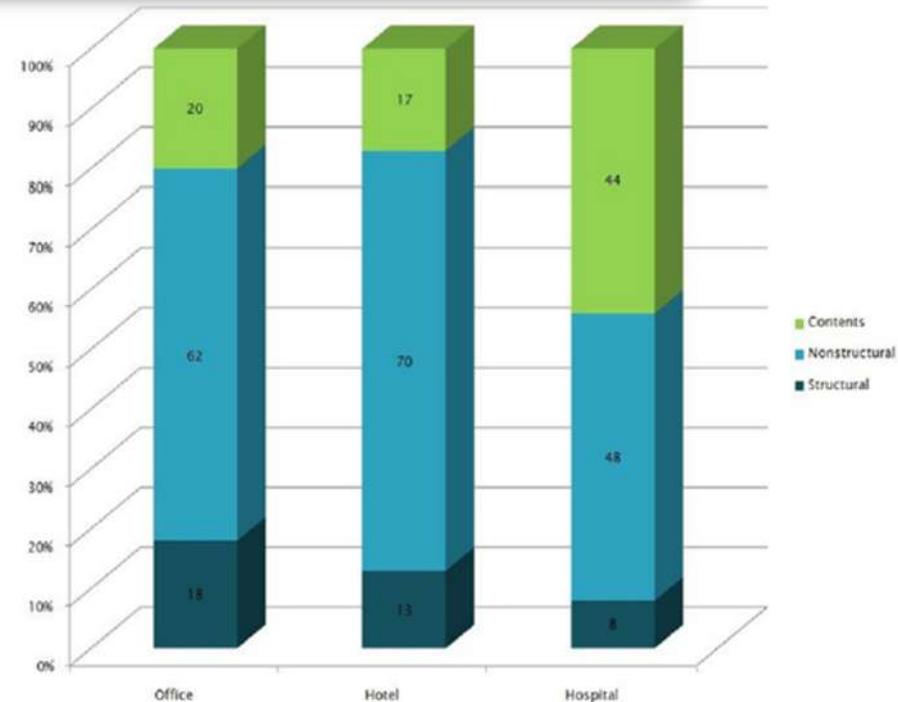
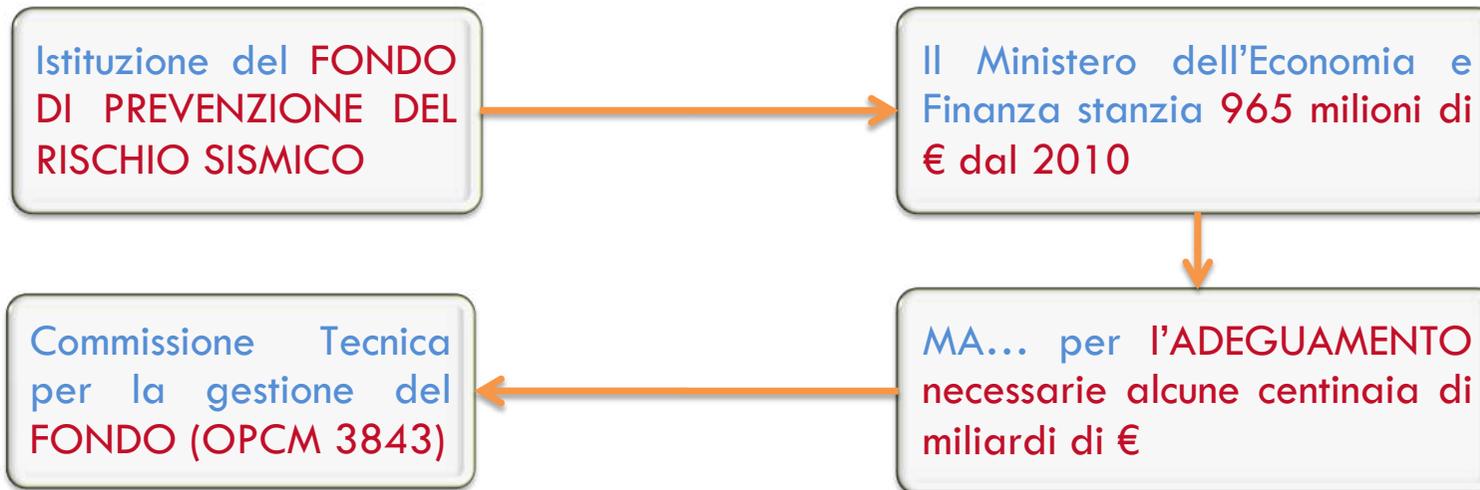


Figura 1: Onere di investimento tipico per edifici del terziario [Fema E-74]

VALUTAZIONE E RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO



- In Italia, è necessario gestire RISORSE LIMITATE nella maniera più appropriata
- Gli interventi di PREVENZIONE DEL RISCHIO SISMICO ben si coniugano con il miglioramento dell' ISOLAMENTO TERMOACUSTICO

RIDUZIONE RISCHIO SISMICO



MIGLIORAMENTO ISOLAMENTO

INTERVENTI DI RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO

- Le norme tecniche per le costruzioni (NTC) individuano tre tipologie di intervento:

RIPARAZIONE o RAFFORZAMENTO LOCALE

- Intervento su elementi isolati che comporta un miglioramento delle condizioni

MIGLIORAMENTO

- Intervento volto a conseguire un LIVELLO DI SICUREZZA GLOBALE superiore a quello attuale

ADEGUAMENTO

- Intervento volto a conseguire un LIVELLO DI SICUREZZA ANTISISMICA SUPERIORE O UGUALE a quello per le nuove costruzioni

- Il livello MINIMO di sicurezza antisismica da raggiungere con un intervento è però ancora oggetto di dibattito



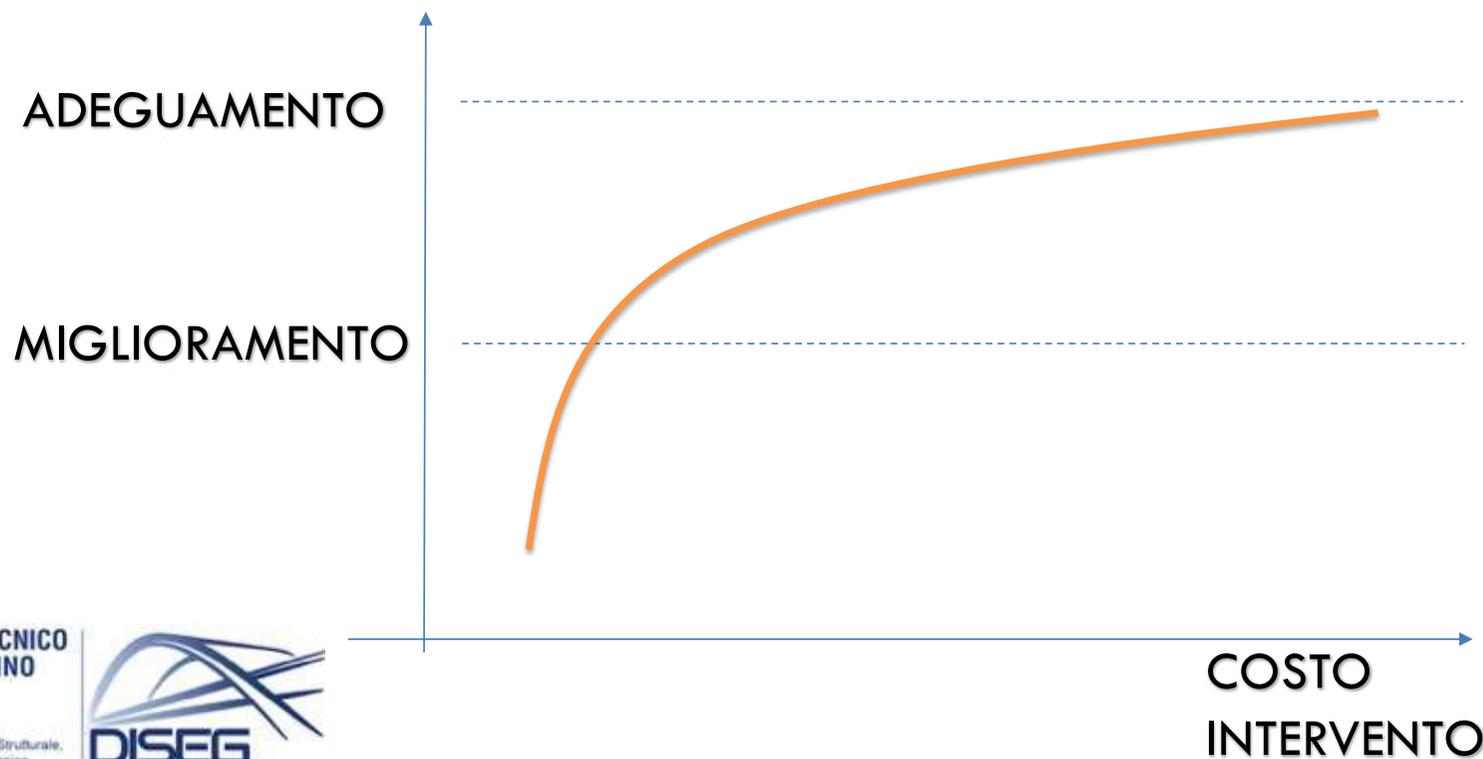
POLITECNICO
DI TORINO

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica

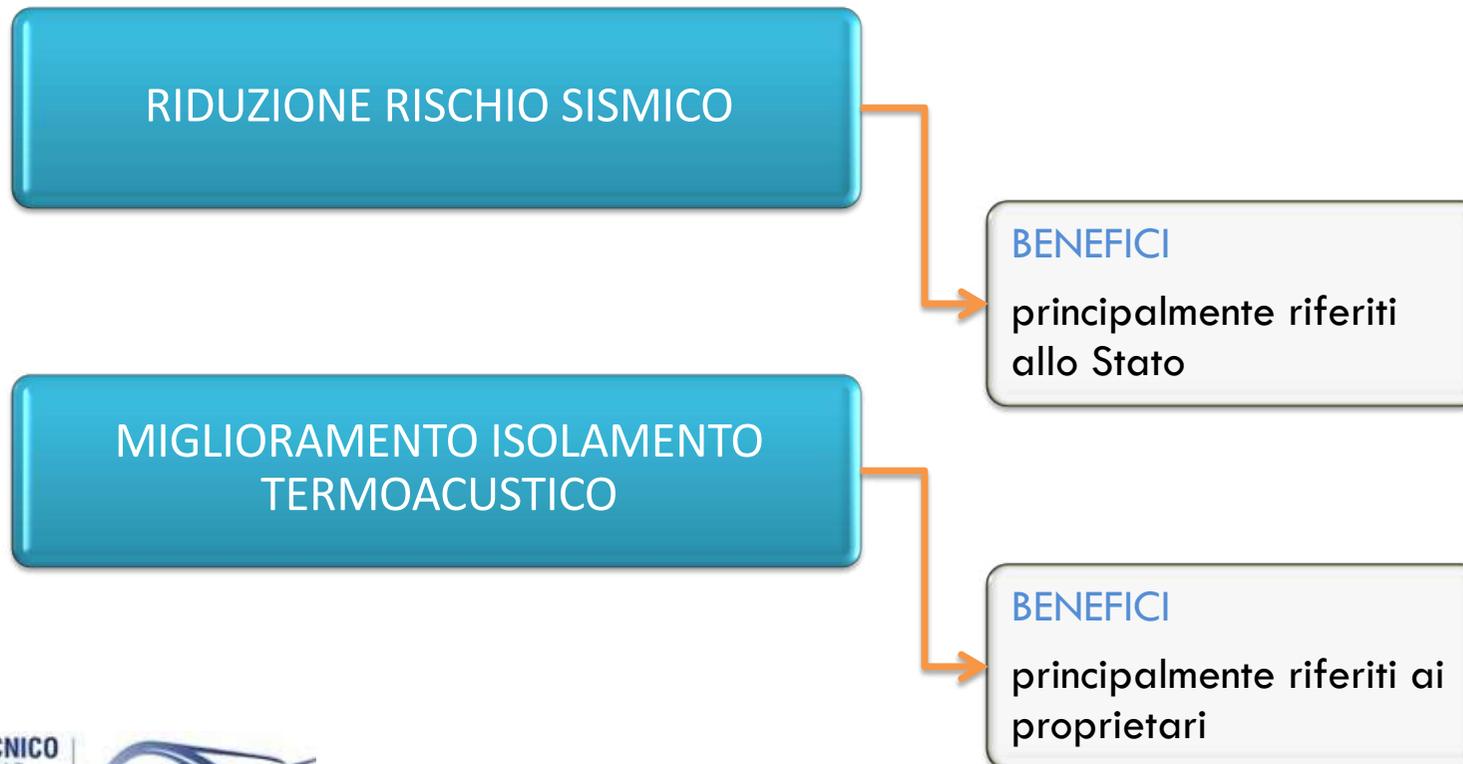


INTERVENTI DI RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO

- L'aumento del **LIVELLO DI SICUREZZA ANTISISMICA** presenta una legge a soglie. A parità di **CIFRA INVESTITA** di intervento, al ridursi della **VULNERABILITÀ**, si riduce l'ulteriore **RIDUZIONE CONSEGUIBILE**



VALUTAZIONE E RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO



RISCHIO SISMICO

$$R = P \times V \times E$$

PERICOLOSITÀ

- Valutazione della probabilità di eccedenza in un certo periodo di riferimento di un valore prefissato di un PARAMETRO DI INPUT SIGNIFICATIVO

VULNERABILITÀ

- Danni attesi a seguito di un sisma al raggiungimento di determinati livelli dei parametri di risposta della struttura

ESPOSIZIONE ECONOMICO SOCIALE

- Stima dei Costi DI RICOSTRUZIONE (RC) somma dei Costi INDIRETTI (fermo macchine,...) e DIRETTI (ricostruzione)
- Perdite SOCIALI (vite umane, beni culturali)



POLITECNICO
DI TORINO

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



LA PROTEZIONE PASSIVA



**POLITECNICO
DI TORINO**

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

ASSESSMENT AND RETROFITTING OF BUILDINGS

Existing buildings, including constructions of quite recent completion, are generally seismically deficient, in terms of both safety and economic protection, as systematically and dramatically demonstrated by all recently occurred seismic events.



Courtesy of *Stephanos E. Dritsos*



POLITECNICO
DI TORINO

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

PROTEZIONE STRUTTURALE

Per motivi di convenienza economica si accetta che, per effetto del sisma di progetto, la struttura subisca delle deformazioni inelastiche.

La moderna filosofia di progettazione antisismica prevede che la resistenza alle azioni sismiche sia fornita dalle sole forze elastiche che si possono sviluppare nelle strutture

SI PREVIENE IL COLLASSO

MA SI ACCETTANO DANNI STRUTTURALI ANCHE PESANTISSIMI !!!

Si accetta l'idea di una struttura che, danneggiandosi, riduce la sua rigidezza e dunque riduce la sua risposta sismica ossia il concetto di **protezione tramite autopassivazione**



POLITECNICO
DI TORINO

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



Nei sistemi di controllo passivo **speciali dispositivi**, specificamente predisposti allo scopo e opportunamente collocati nella struttura, ne **modificano le caratteristiche di rigidezza** e/o le **capacità dissipative** in senso favorevole ottenendone la riduzione della risposta dinamica alle azioni del sisma.

I dispositivi agiscono **passivamente**, nel senso che non hanno bisogno di una sorgente esterna di energia per funzionare; essi esercitano sulla struttura forze di tipo reattivo che si sviluppano in risposta al moto della stessa. (Ciampi, 2002)



POLITECNICO
DI TORINO

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

PROTEZIONE STRUTTURALE

Per un sistema elasto-plasto-viscoso il principio di D'Alembert si esprime in termini energetici integrando l'equazione di equilibrio dinamico tra l'istante iniziale del sisma ed un generico istante t:

$$\int_0^u [m\ddot{u}(t)] du + \int_0^u [c\dot{u}(t)] du + \int_0^u [f(u, \dot{u} | t)u(t)] du = - \int_0^u [m\ddot{x}(t)] du$$
$$E_C + E_D + E_P = E_I$$

- E_C Energia Cinetica del sistema dovuta al suo movimento relativo rispetto al terreno
- E_I Energia in Ingresso
- E_P Energia di deformazione elastica (Energia Potenziale Elastica)
- E_D Energia dissipata

E_D rappresenta la quota parte dell'energia di ingresso dissipata nella struttura ed è dovuto a due contributi:

- Energia dissipata per Viscosità o E_v
- Energia dissipata per duttilità μ o E_μ



POLITECNICO
DI TORINO

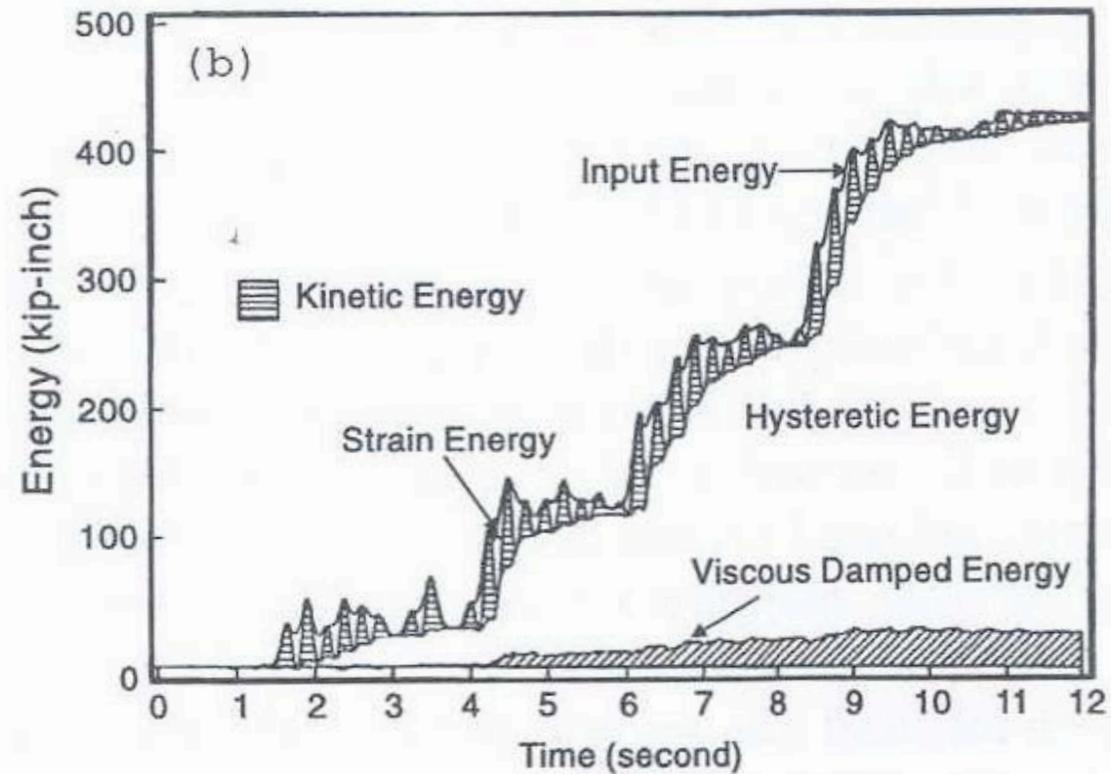
Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



Il bilancio energetico diviene dunque :

$$E_C + E_V + E_\mu + E_P = E_I$$

Uang e Bertero (1986) lo hanno diagrammato in funzione del tempo



Con gli strumenti analitici e tecnologici attuali è possibile garantire una **migliore protezione** delle strutture nei confronti delle azioni dinamiche.

Per ridurre il danneggiamento della struttura occorre limitare l'energia E_{μ} richiesta al sistema.

$$E_C + E_V + E_{\mu} + E_P = E_I$$

La **filosofia della protezione strutturale** consiste nel limitare la richiesta di energia E_{μ} e a tal fine è inevitabile considerare la **reale natura dinamica** dei fenomeni fisici.

La moderna idea di “**ANTISISMICO**” è dunque quella di una struttura che riduce E_I oppure aumenta E_V o E_μ o tutti e due

I moderni metodi di protezione strutturale possono di conseguenza essere divisi in 3 gruppi + un quarto qui presentato:

1. ISOLAMENTO ANTISISMICO (riduce E_I)
2. DISSIPAZIONE (aumenta E_D)
3. CONTROLLO ATTIVO (E SEMI-ATTIVO)
4. ESTERNALIZZAZIONE – ESOSCHELETRO (riduce E_P)

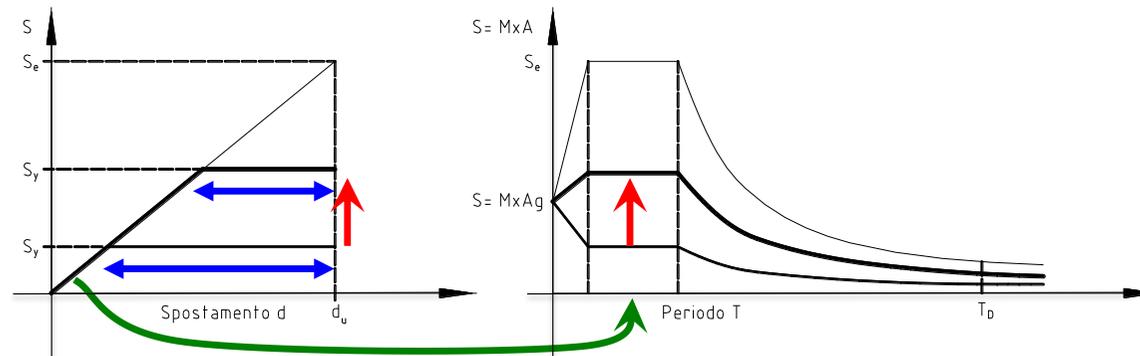
Ognuno di questi metodi concorre a ridurre i termini E_C e E_P che sono quelli cui corrisponde il danno strutturale, operando in maniera diversa sui termini dell'equazione di bilancio energetico.



PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

DIVERSITÀ TRA LE TECNICHE

Le diverse tecniche di protezione operano in maniera diversa per aumentare la sicurezza degli edifici.



Progettazione in termini di duttilità strutturale

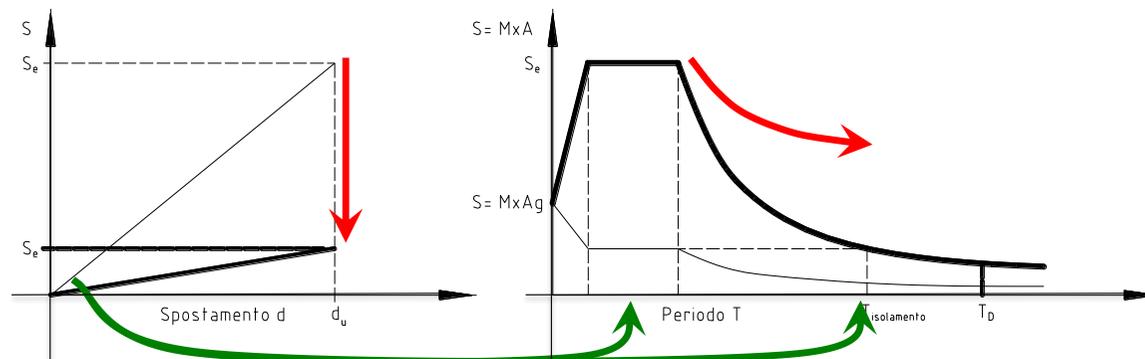
Minore è la capacità in termini di duttilità, maggiore è la resistenza richiesta.

Elevate capacità di duttilità consentono elevate riduzioni della resistenza alle sollecitazioni sismiche.

PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

DIVERSITÀ TRA LE TECNICHE

L'isolamento antisismico riduce le sollecitazioni aumentando il periodo proprio



Progettazione in termini di isolamento antisismico

Modificando il periodo della struttura si riesce ad ottenere la stessa riduzione di sollecitazioni **mantenendo la struttura in campo elastico**.



POLITECNICO
DI TORINO

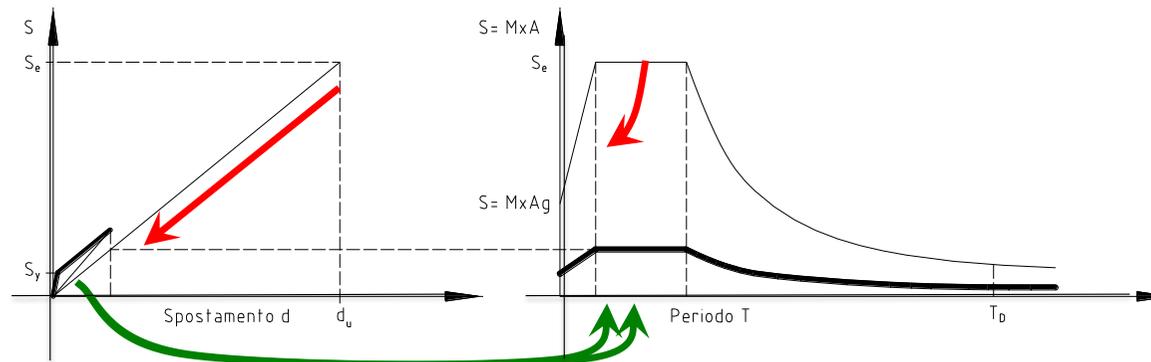
Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

DIVERSITÀ TRA LE TECNICHE

La dissipazione riduce le sollecitazioni aumentando la capacità dissipativa della struttura.



Progettazione in termini di dissipazione

Poiché i dissipatori e la struttura lavorano **“in parallelo”** solo una parte delle sollecitazioni interessa la struttura.

Modificando la capacità dissipativa si riesce ad ottenere la stessa riduzione di sollecitazioni **mantenendo la struttura in campo elastico**.



PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

DIVERSITÀ TRA LE TECNICHE

L'isolamento antisismico e la dissipazione passiva sono due tecniche di protezione che prevedono interventi molto diversi sugli edifici esistenti.

Nell'isolamento antisismico, gli isolatori sono collocati alla base dell'edificio o della parte di edificio da proteggere perché devono **limitare l'energia in ingresso** per la struttura (sono montati “**in serie**” alla struttura)

Nella dissipazione passiva, i dissipatori sono collocati all'interno dell'edificio o all'esterno (**esoscheletri**) della parte di edificio da proteggere perché devono **sottrarre alla struttura parte dell'energia in ingresso e dissiparla** (funzionamento “**in parallelo**”)

Questa diversità di comportamento condiziona il comportamento meccanico dei dispositivi utilizzati, gli **isolatori** ed i **dissipatori**.

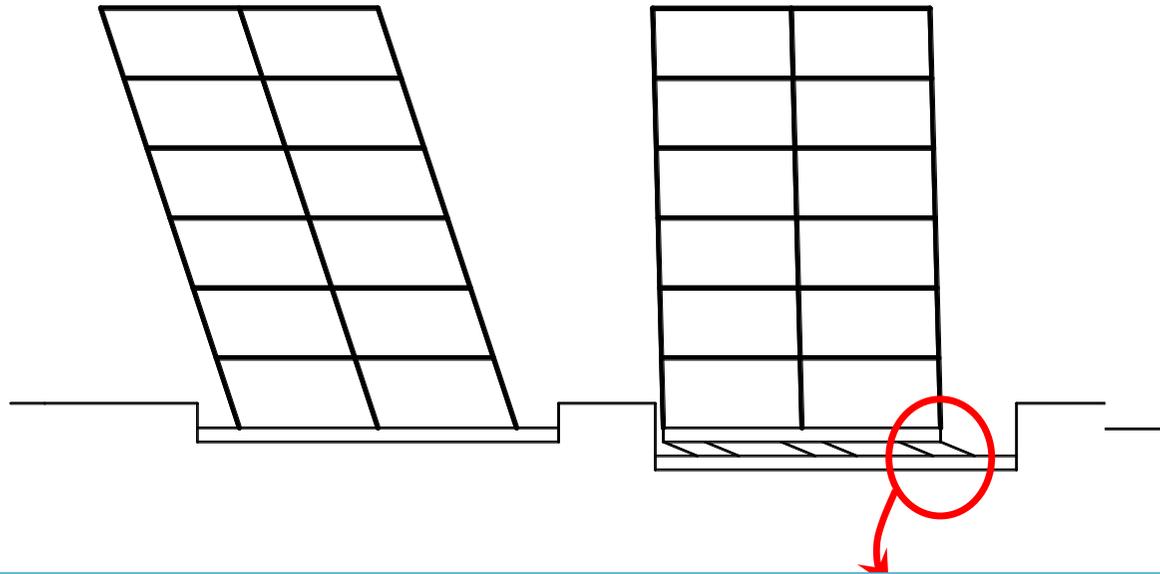


POLITECNICO
DI TORINO

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica

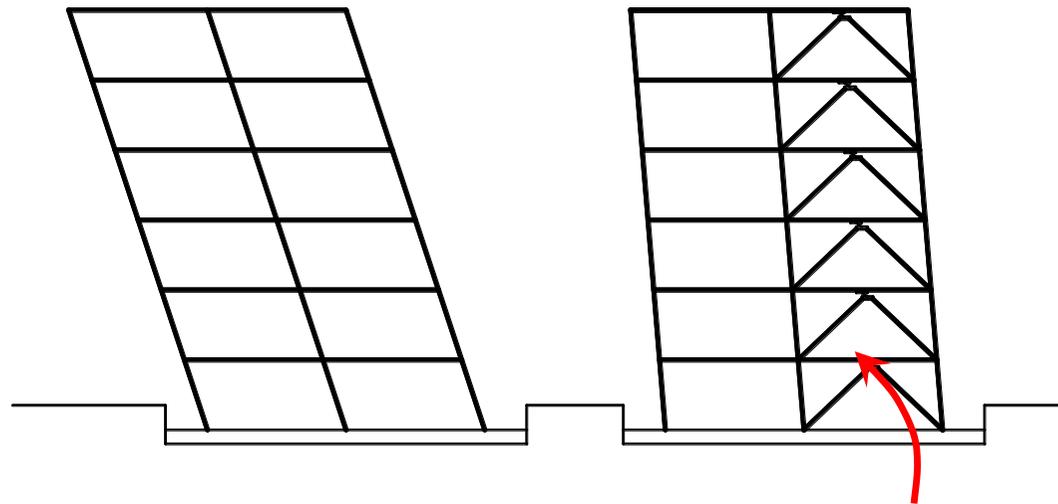


OSCILLAZIONI DI UN EDIFICIO A BASE FISSA ED ISOLATO



Nelle oscillazioni della struttura si deformano soprattutto gli isolatori mentre la struttura rimane quasi al suo posto e subisce piccole deformazioni.

OSCILLAZIONI DI UN EDIFICIO A BASE FISSA E CON DISSIPATORI



Nelle oscillazioni della struttura si deformano anche i dissipatori che nella deformazione dissipano parte dell'energia fornita dal terremoto.

L'ISOLAMENTO ANTISISMICO

A fronte della maggiore consapevolezza delle prestazioni degli edifici, sono sempre più utilizzate tecniche di protezione sismica cosiddette “innovative”, tra le quali l'isolamento antisismico.

L'isolamento antisismico consiste nel collocare la struttura su dispositivi dotati di capacità portante (isolatori) estremamente flessibili.

Gli isolatori hanno lo scopo di “disconnettere” la struttura dal terreno, in modo tale da limitare l'energia trasmessa durante un terremoto.

La limitata quantità di energia trasmessa alla struttura può essere ulteriormente ridotta utilizzando dispositivi ausiliari capaci di dissiparne una parte (dissipatori).

Operando in questa maniera si riescono a ridurre sensibilmente le sollecitazioni negli elementi strutturali (a tal punto da poter evitare qualunque tipo di danneggiamento sotto il terremoto di progetto) e negli oggetti portati.



**POLITECNICO
DI TORINO**

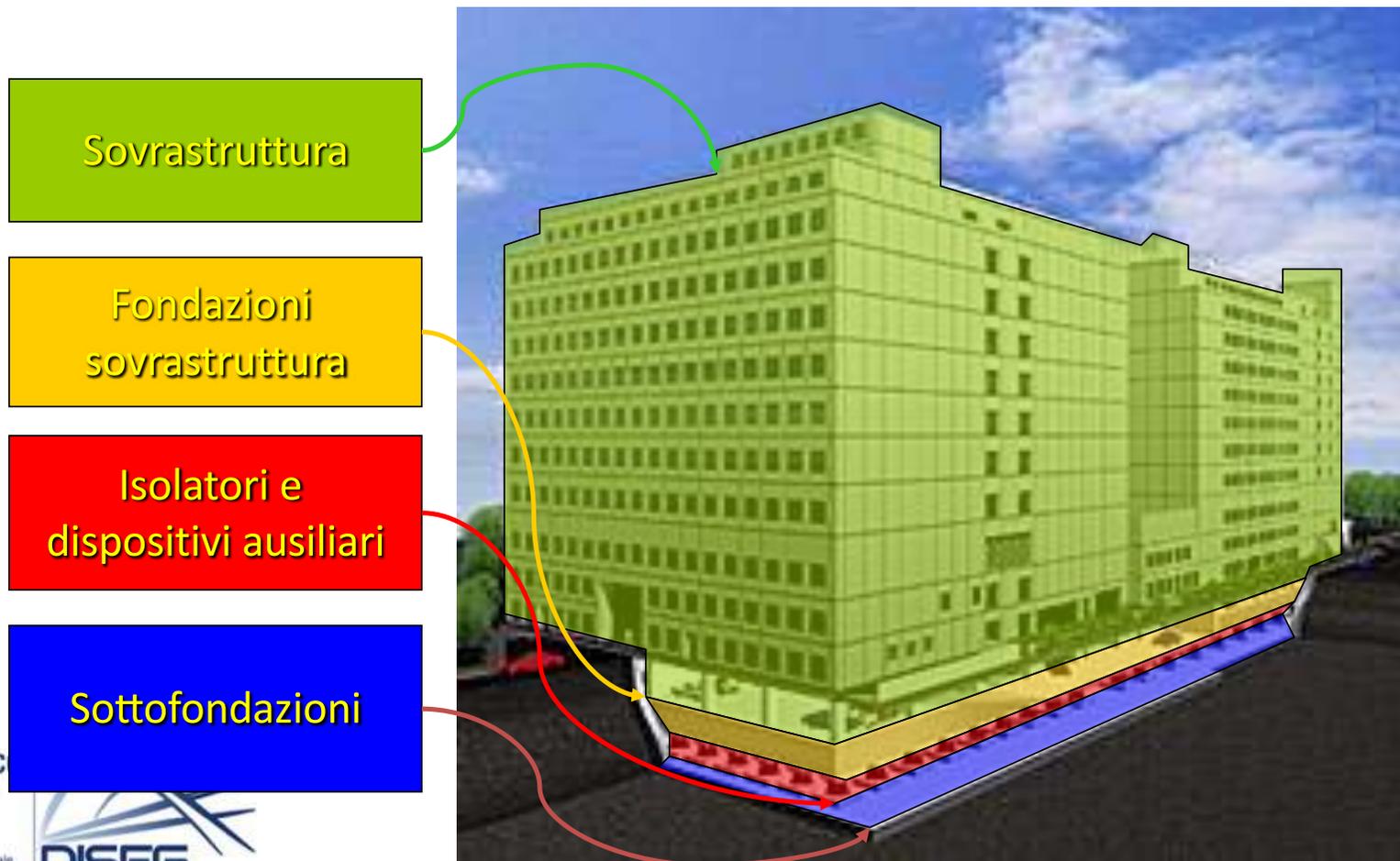
Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

L'ISOLAMENTO ANTISISMICO

SCHEMA DI SISTEMA D'ISOLAMENTO

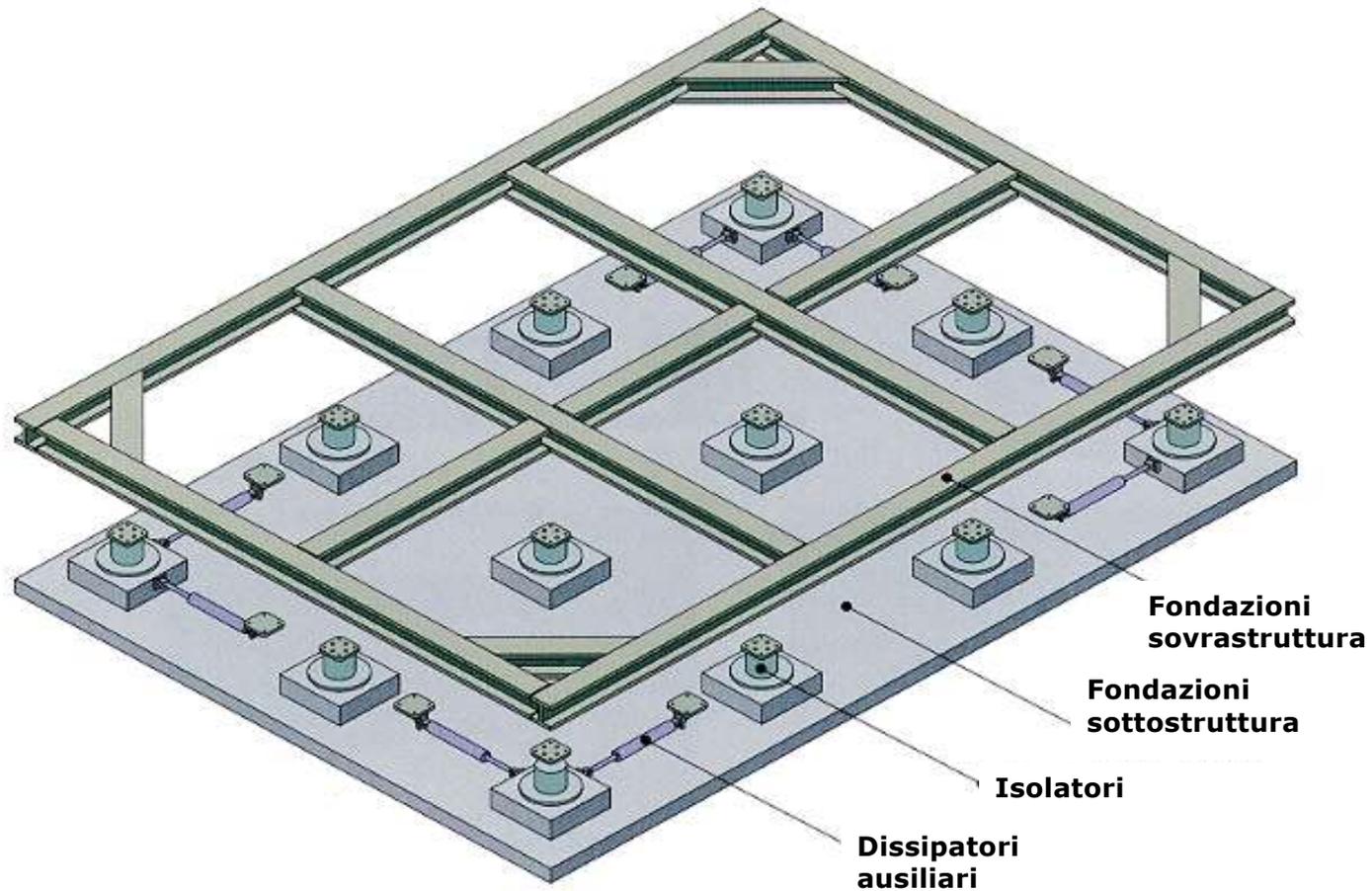


POLITECNICO
DI TORINO

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



SCHEMA DI SISTEMA D'ISOLAMENTO



PROBLEMATICHE ANNESSE ALL'ISOLAMENTO ANTISISMICO

L'isolamento non è efficace quando la struttura ha un **elevato periodo di oscillazione**.

Isolamento efficace, il “**grado d'isolamento**” dell'edificio

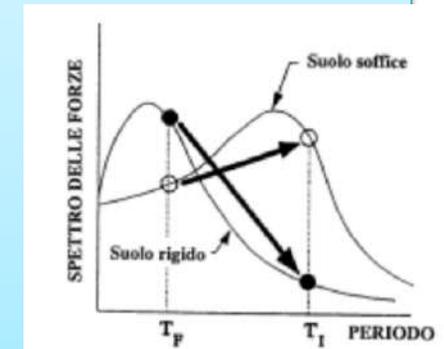
GI = $T_{\text{isolata}}/T_{\text{base fissa}}$ deve risultare almeno pari a **3**.

Questa tecnica non è efficace per **particolari condizioni geologiche** (Città del Messico) per le quali i maggiori contenuti di energia rilasciata dal terremoto sono su periodi elevati.

Per l'utilizzo su edifici esistenti le difficoltà maggiori sono relative alla:

- **realizzazione della sottostruttura;**
- **riduzione dell'eccentricità** tra baricentro delle masse e delle rigidezze;
- **separazione da edifici adiacenti.**

Per garantire una protezione migliore conviene dotare il sistema di una certa **capacità dissipativa**.



DISSIPAZIONE PASSIVA

DISSIPAZIONE PASSIVA

I dissipatori devono essere collocati **all'interno della struttura** e collegati ad essa per mezzo di elementi strutturali (**controventi**) molto rigidi.

La progettazione di un sistema di controventi dissipativi è in generale un **processo iterativo complesso**. Oltre alla scelta delle caratteristiche di dissipazione (e quindi dei dispositivi da utilizzare) occorre determinare le seguenti caratteristiche del sistema di protezione:

- la **disposizione** in pianta ed in elevazione dei controventi
- la **forma** dei controventi
- la **rigidezza** dei controventi



POLITECNICO
DI TORINO

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



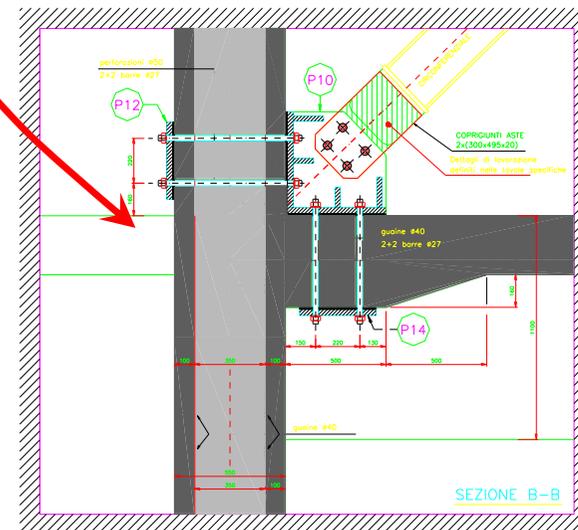
PROBLEMATICHE ANNESSE ALLA DISSIPAZIONE PASSIVA

La dissipazione comporta un **intervento più drastico** sull'edificio che può comportare il cambiamento delle configurazione architettonica dell'edificio.

I maggiori problemi sono nella **realizzazione dei collegamenti** tra i controventi e la struttura.

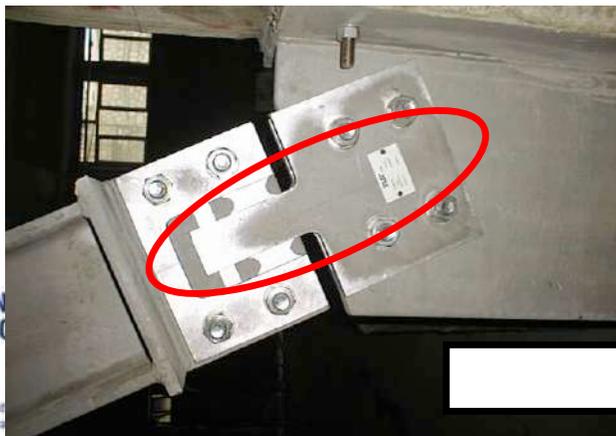
La comprensione dell'interazione tra struttura e dissipatori non è immediata.

Ha il vantaggio di essere una tecnica sempre efficace, per qualunque tipo di edificio e di terremoto, anche se errori di progettazione e di realizzazione possono compromettere irrimediabilmente il buon funzionamento del sistema di dissipazione.



DISSIPAZIONE PASSIVA

Scuola media Domiziano Viola (Potenza)



I controventi dissipativi



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica

I dispositivi d'isolamento hanno la funzione di **creare una discontinuità strutturale** tra la sovrastruttura e la sottostruttura, che è direttamente connessa al terreno.

Lo scopo è di **limitare il trasferimento del movimento orizzontale del suolo** (le componenti orizzontali del terremoto) **alla sovrastruttura** (le componenti verticali continuano a trasmettersi).

L'isolamento si ottiene se, **nei confronti degli spostamenti orizzontali**, i **dispositivi d'isolamento** sono **molto più flessibili** di sovrastruttura e sottostruttura.

N.B. Se i dispositivi potessero avere rigidità nulla, si creerebbe una disconnessione perfetta tra sovrastruttura e sottostruttura: il movimento orizzontale del suolo non si trasferirebbe per nulla alla sovrastruttura.



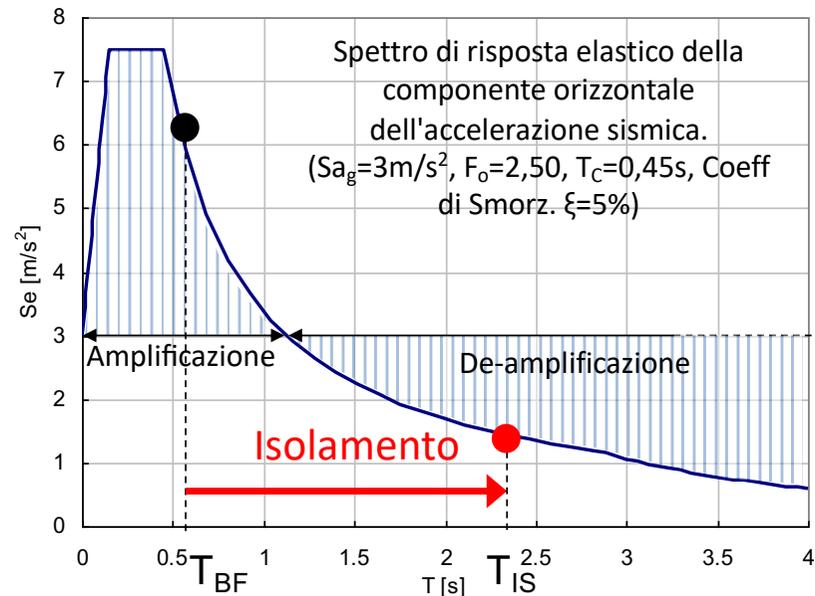
PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

ISOLAMENTO SISMICO – REQUISITI NEI CONFRONTI DELLE AZIONI SISMICHE

L'isolamento è efficace nei confronti delle azioni sismiche se a T_{IS} sono associate **basse accelerazioni** nello spettro di risposta di sito.

T_{BF} periodo fondamentale struttura a Base Fissa
 T_{IS} periodo fondamentale struttura Isolata

$$T_{IS} \geq 2\pi \sqrt{\frac{M_{IS}}{K}}$$



Criterio progettuale

L'isolamento può ritenersi **realmente efficace** quando $S_e(T_{IS})$ sia almeno $\leq 0,5 S a_g$ (per **SLV**).



POLITECNICO
DI TORINO

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



MODELLAZIONE DINAMICA DI ESOSCHELETRI
PER LA PROTEZIONE SISMICA DI EDIFICI ESISTENTI



**POLITECNICO
DI TORINO**

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

Concept

BERKELEY, CALIFORNIA



Stato dell'Arte – Applicazioni

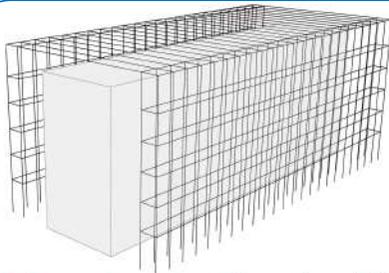
MAGNETI MARELLI – INTERVENTO DI ADEGUAMENTO SISMICO SULLA PALAZZINA UFFICI



Palazzina Uffici post sisma 2012
stato iniziale pre intervento



Palazzina Uffici post sisma 2012
ultimazione lavori



L' ESOSCHELETRO INTELLIGENTE

Motivazioni:

retrofit energetico/estetico/sismico di un edificio esistente

Obiettivo:

Modellazione dinamica (preliminare) per applicazioni sismiche

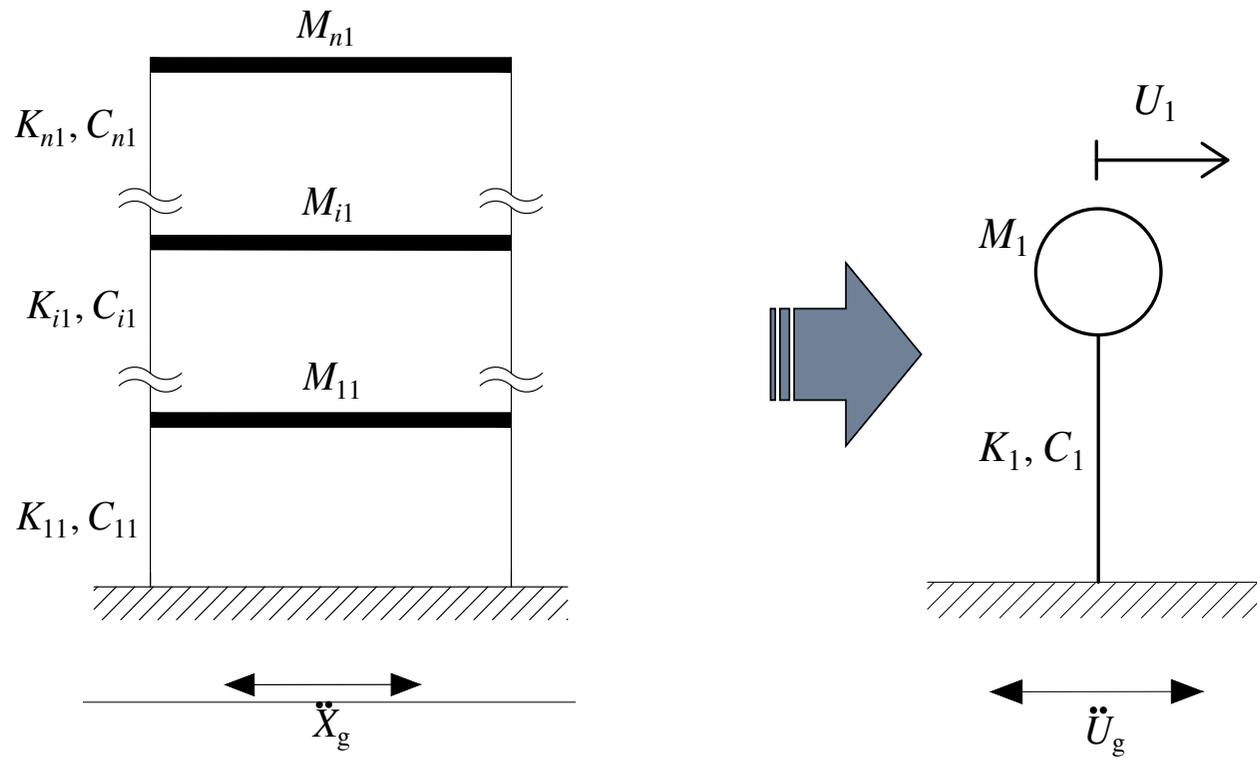


POLITECNICO
DI TORINO

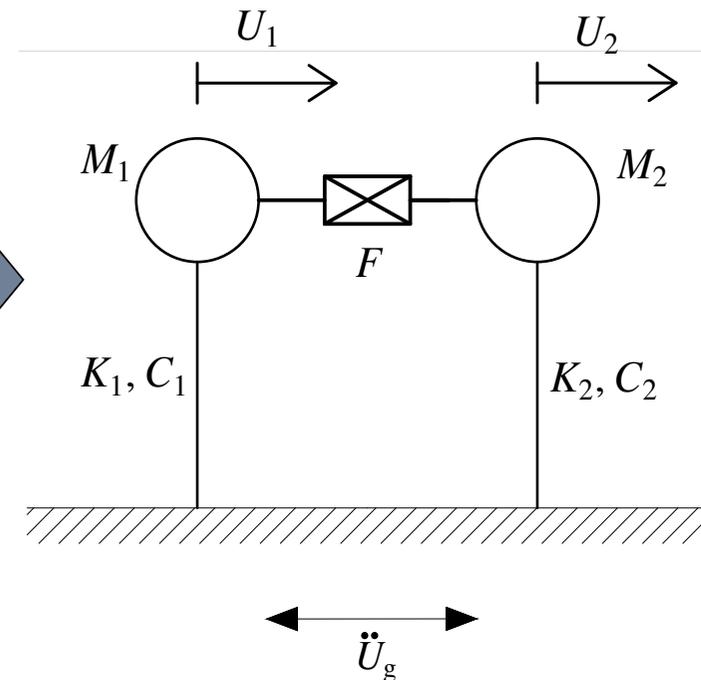
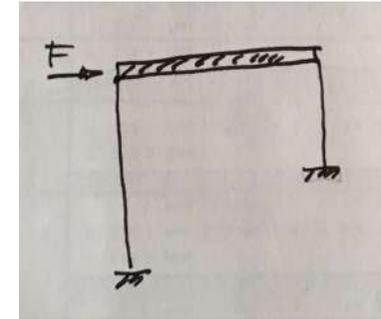
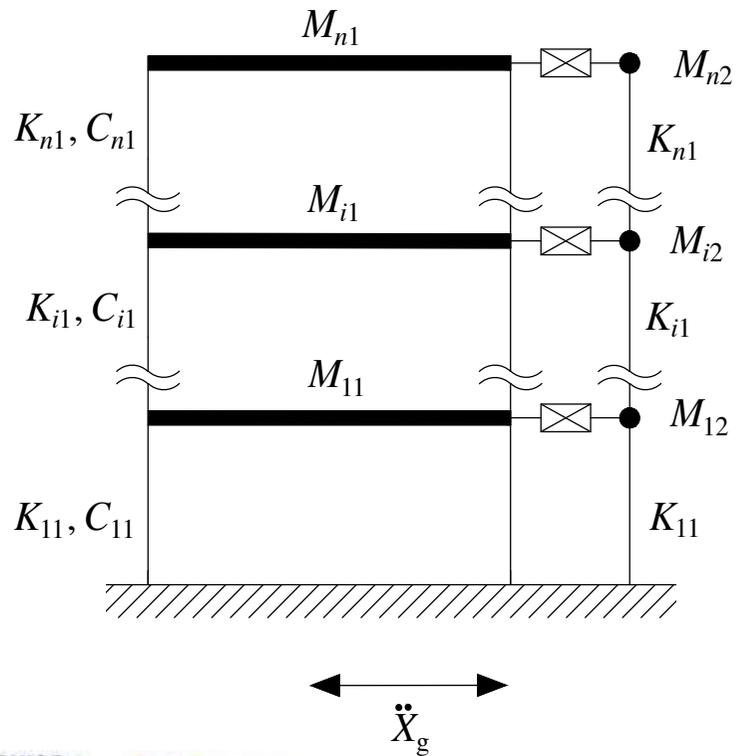
Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



MODELLAZIONE DINAMICA: STRUTTURA NON CONTROLLATA



MODELLAZIONE DINAMICA: STRUTTURA CONTROLLATA



COLLEGAMENTO STRUTTURA - ESOSCHELETRO: MODELLI REOLOGICI

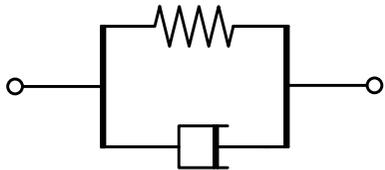
□ Hooke



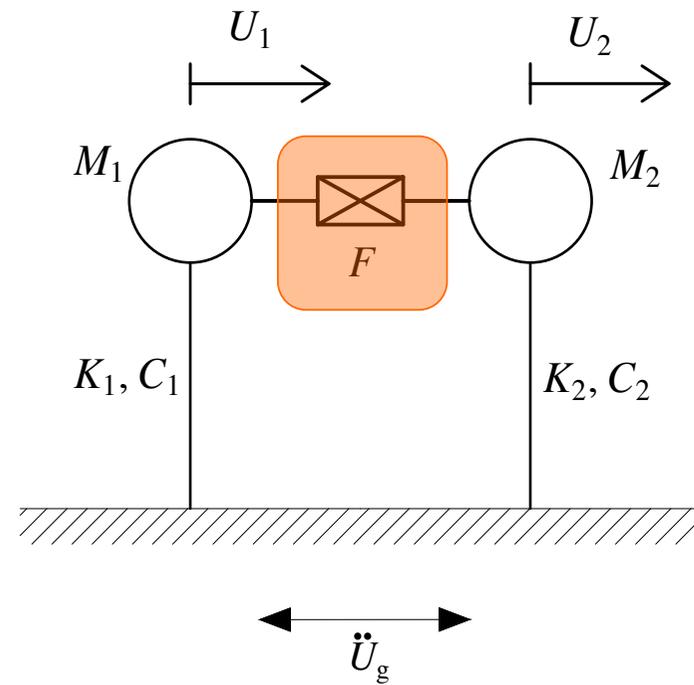
□ Newton



□ Kelvin-Voigt



□ Link rigido

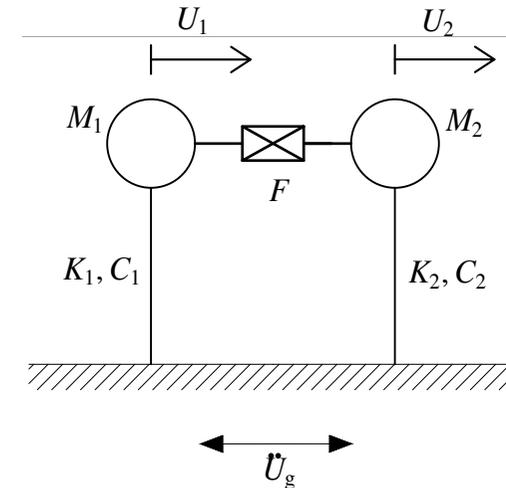


MODELLO 1+1-DOF

$$\ddot{u}_1 + 2\zeta_1\dot{u}_1 + u_1 = -\ddot{u}_g + f$$

$$\mu\ddot{u}_2 + 2\zeta_2\alpha\mu\dot{u}_2 + \alpha^2\mu u_2 = -\mu\ddot{u}_g - f$$

- Hooke $f = \beta_k(u_2 - u_1)$
- Newton $f = \beta_c(\dot{u}_2 - \dot{u}_1)$
- Kelvin-Voigt $f = \beta_k(u_2 - u_1) + \beta_c(\dot{u}_2 - \dot{u}_1)$



$$\zeta_1 = \frac{C_1}{2\sqrt{K_1 M_1}} \quad \mu = \frac{M_2}{M_1} \quad \beta_k = \frac{K}{M_1 \Omega_1^2}$$

$$\zeta_2 = \frac{C_2}{2\sqrt{K_2 M_2}} \quad \alpha = \frac{\Omega_2}{\Omega_1} \quad \beta_c = \frac{C}{M_1 \Omega_1}$$

Parametri
adimensionali

MODELLO 1+1-DOF

$$\ddot{u}_1 + 2\zeta_1\dot{u}_1 + u_1 = -\ddot{u}_g + f$$

$$\mu\ddot{u}_2 + 2\zeta_2\alpha\mu\dot{u}_2 + \alpha^2\mu u_2 = -\mu\ddot{u}_g - f$$

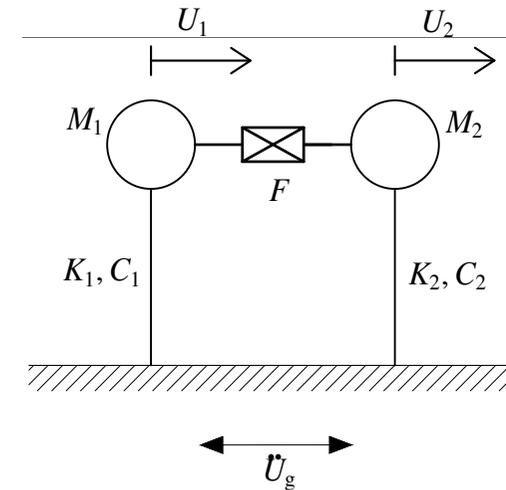
- Hooke $f = \beta_k(u_2 - u_1)$
- Newton $f = \beta_c(\dot{u}_2 - \dot{u}_1)$
- Kelvin-Voigt $f = \beta_k(u_2 - u_1) + \beta_c(\dot{u}_2 - \dot{u}_1)$

$$\zeta_1 = \frac{C_1}{2\sqrt{K_1M_1}}$$

$$\zeta_2 = \frac{C_2}{2\sqrt{K_2M_2}}$$

$$\mu = \frac{M_2}{M_1} \quad \beta_k = \frac{K}{M_1\Omega_1^2}$$

$$\alpha = \frac{\Omega_2}{\Omega_1} \quad \beta_c = \frac{C}{M_1\Omega_1}$$



Parametri di progetto

COLLEGAMENTO RIGIDO: RISPOSTA IN FREQUENZA

Equazione del moto

$$(1 + \mu)\ddot{u}_1 + (2\zeta_1 + 2\zeta_2\alpha\mu)\dot{u}_1 + (1 + \alpha^2\mu)u_1 = -(1 + \mu)\ddot{u}_g$$

Risposta stazionaria al moto alla base armonico di frequenza $\omega = \Omega/\Omega_1$

$$H_{u_1/\ddot{u}_g}(i\omega) = -\frac{1 + \mu}{1 + \alpha^2\mu + i\omega(2\zeta_1 + 2\zeta_2\alpha\mu) - \omega^2(1 + \mu)}$$

$$H_{\ddot{u}_{a1}/\ddot{u}_g}(i\omega) = 1 + \frac{\omega^2(1 + \mu)}{1 + \alpha^2\mu + i\omega(2\zeta_1 + 2\zeta_2\alpha\mu) - \omega^2(1 + \mu)}$$



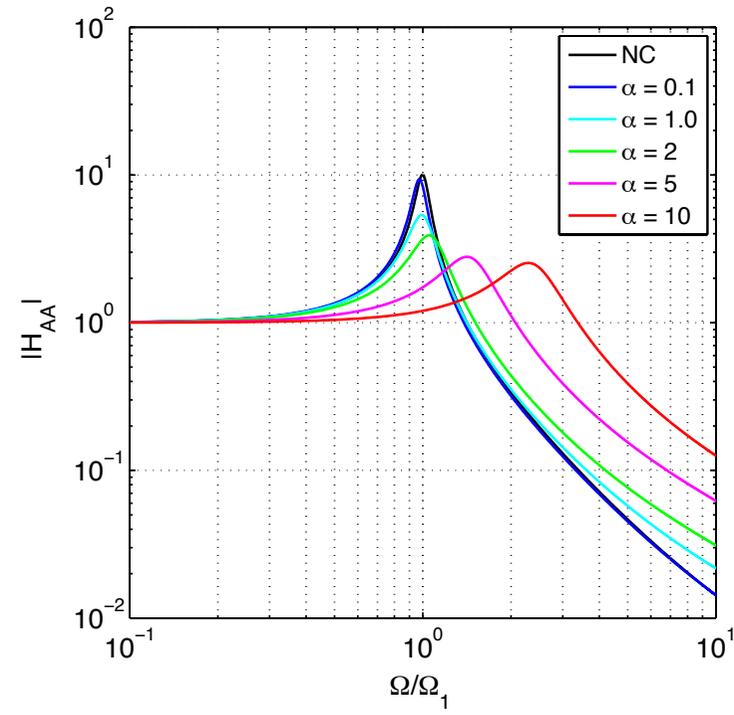
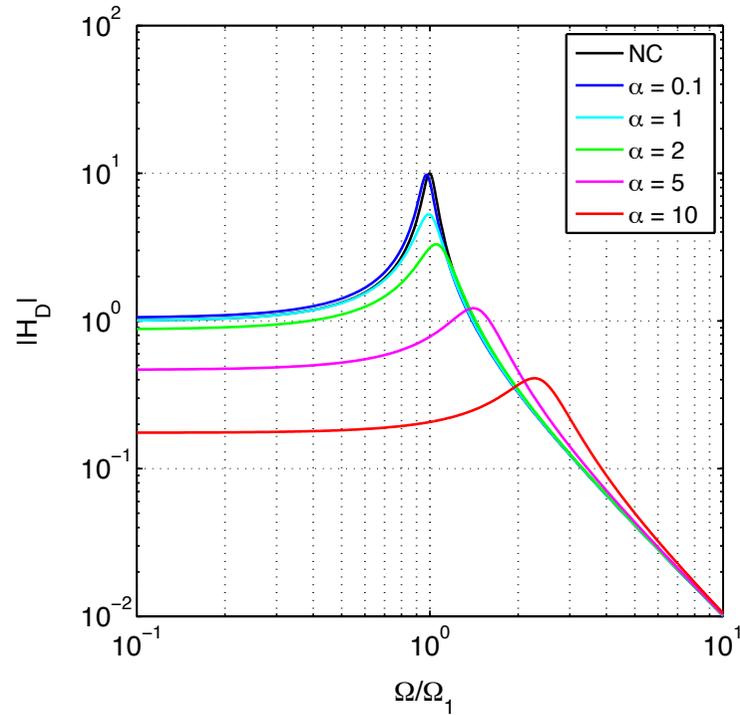
**POLITECNICO
DI TORINO**

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



COLLEGAMENTO RIGIDO: RISPOSTA IN FREQUENZA (2)

$\mu = 0.05, \zeta_1 = 5\%, \zeta_2 = 5\%$



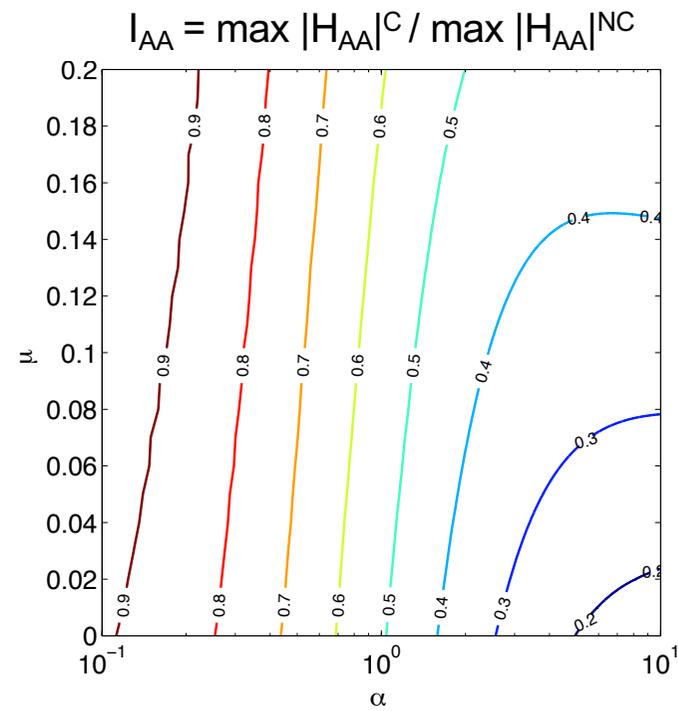
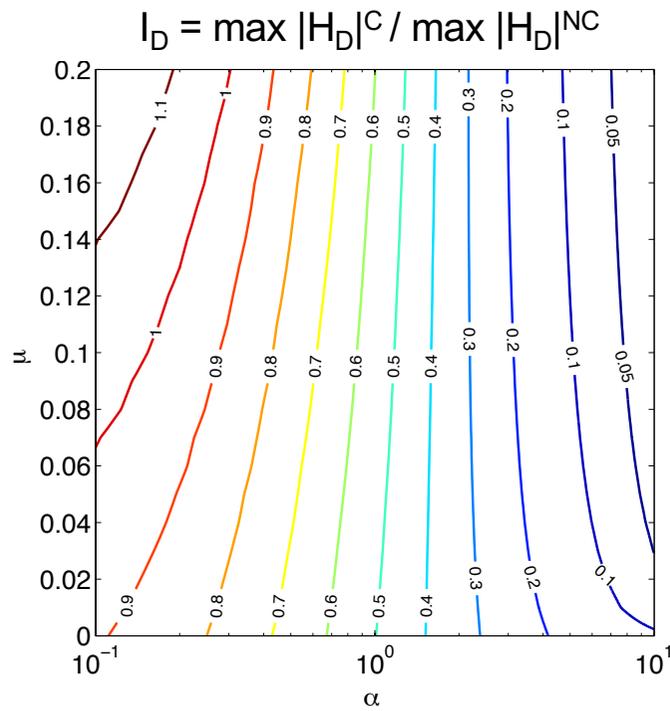
POLITECNICO
DI TORINO

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



COLLEGAMENTO RIGIDO: RISPOSTA IN FREQUENZA (3)

$$\zeta_1 = 5\%, \zeta_2 = 5\%$$

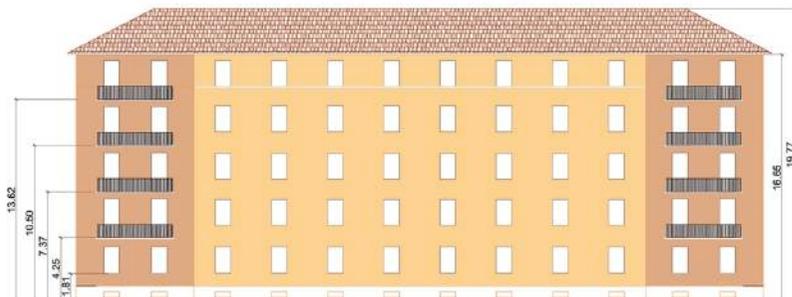


PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

CASO STUDIO: L' ESOSCHELETRO INTELLIGENTE



PROSPETTO OVEST

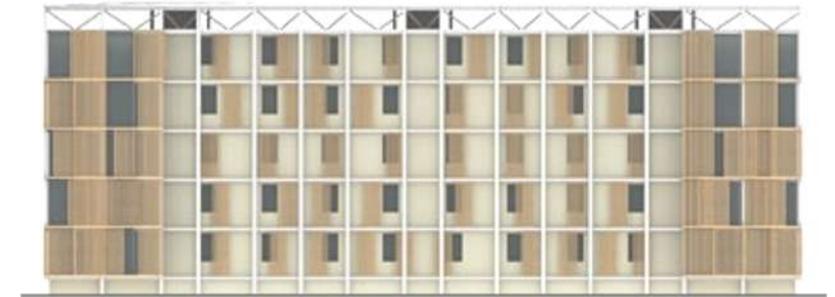


PROSPETTO EST

- 1 RIMOZIONI**
copertura esistente
balconi esistenti
- 2 CAPPOTTO**
isolamento termico pareti
rifacimento copertura
- 3 GABBIA**
funzione strutturale
funzione contenitiva
- 4 SERRE**
accumulo termico
aumento volumetria abitazioni
comfort termo-igrometrico
- 5 SCHERMATURE SOLARI MOBILI**
protezione solare
comfort termo-igrometrico
- 6 ASCENSORI**
accessibilità
- 7 COPERTURA PV**
prestazioni energetiche
dell'edificio



PROSPETTO OVEST



PROSPETTO EST



POLITECNICO
DI TORINO

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI



**POLITECNICO
DI TORINO**

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica

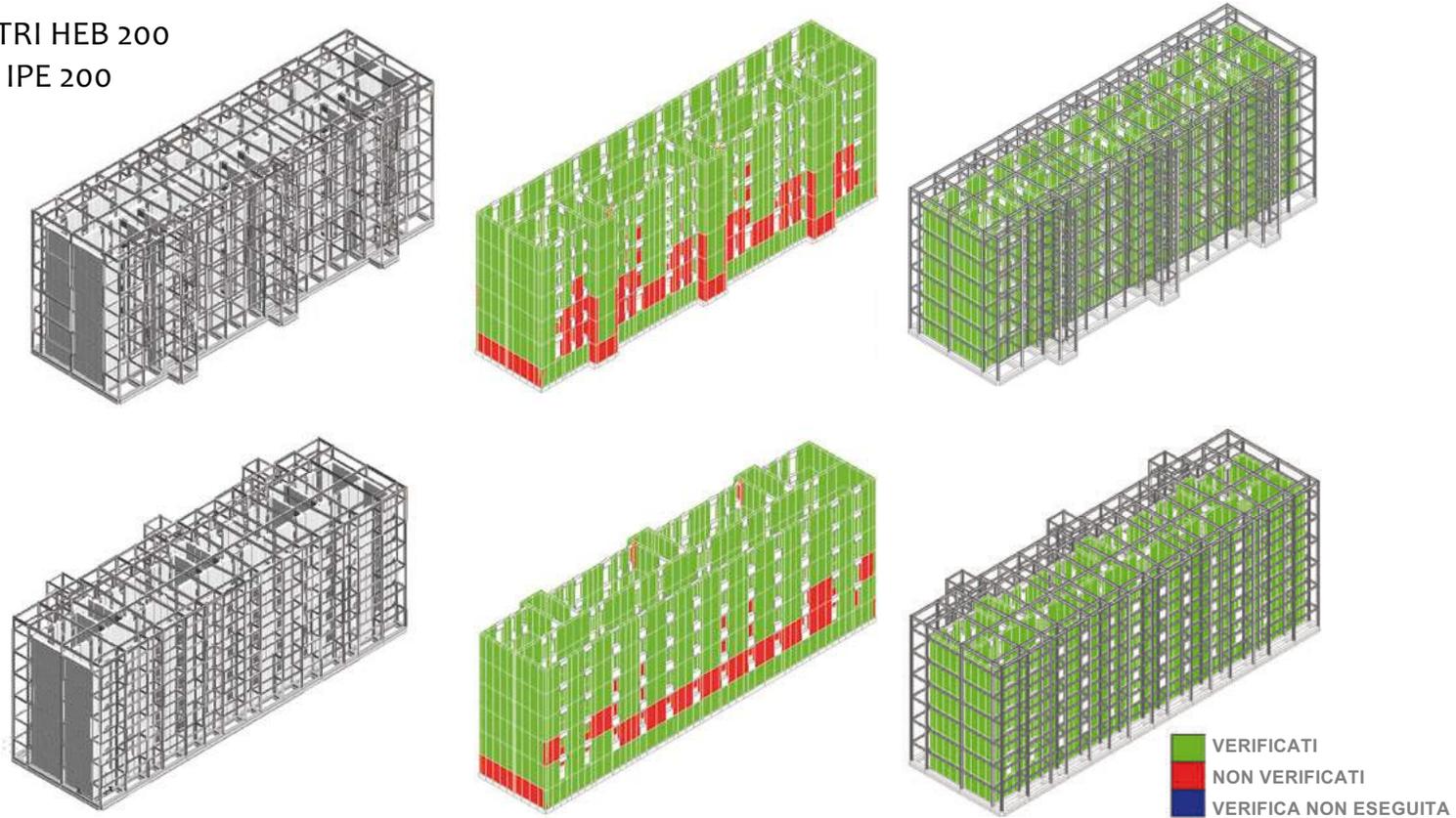


PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

CASO STUDIO: SITO TORINO (PGA = 0.022g)

PILASTRI HEB 200

TRAVI IPE 200



POLITECNICO
DI TORINO

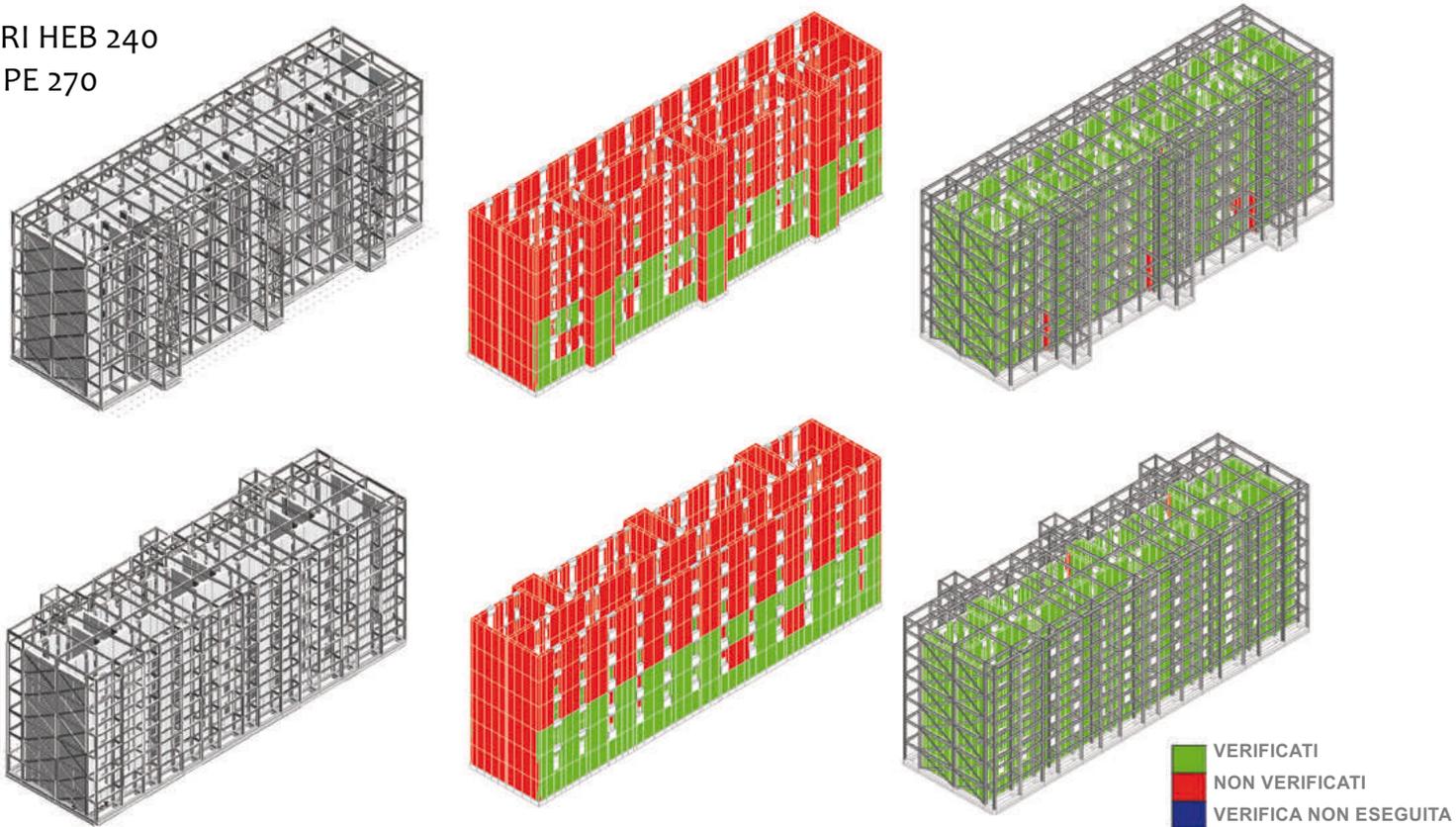
Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

CASO STUDIO: SITO MESSINA (PGA = 0.061g)

PILASTRI HEB 240
TRAVI IPE 270



POLITECNICO
DI TORINO

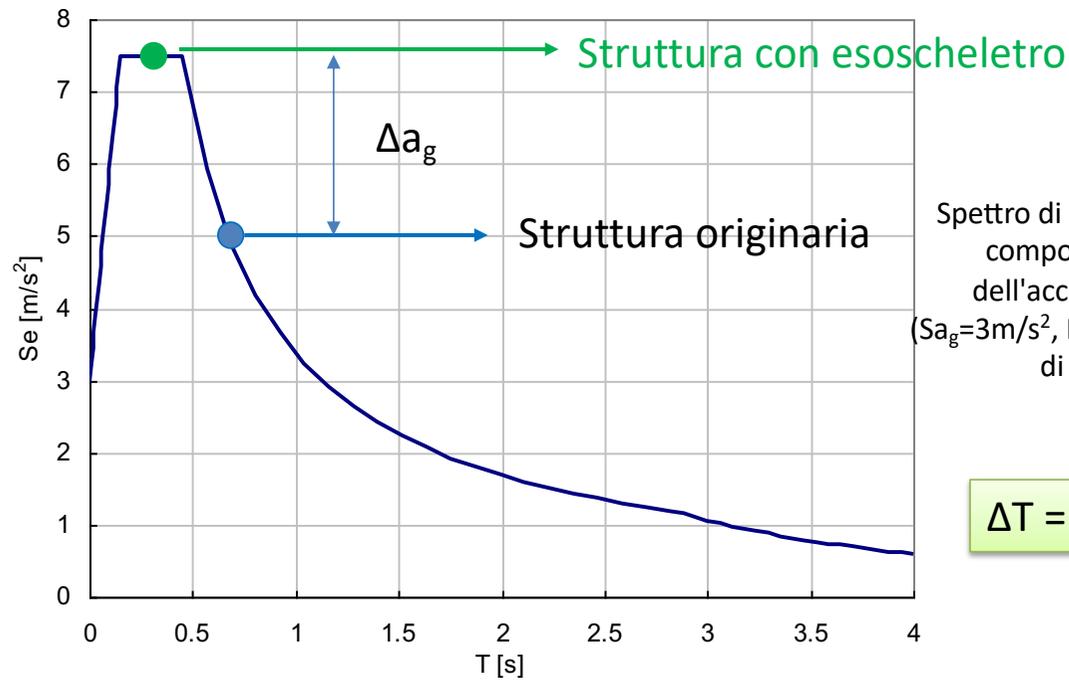
Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

ESOSCHELETRO – REQUISITI NEI CONFRONTI DELLE AZIONI SISMICHE

L'introduzione dell'esoscheletro comporta un incremento della rigidità globale della struttura nel suo insieme. Ciò porta ad un incremento di azione sismica globale, ma l'aliquota assorbita dalla struttura esistente si riduce per l'alta rigidezza dell'esoscheletro.



Spettro di risposta elastico della componente orizzontale dell'accelerazione sismica.
($Sa_g=3m/s^2$, $F_o=2,50$, $T_c=0,45s$, Coeff di Smorz. $\xi=5\%$)

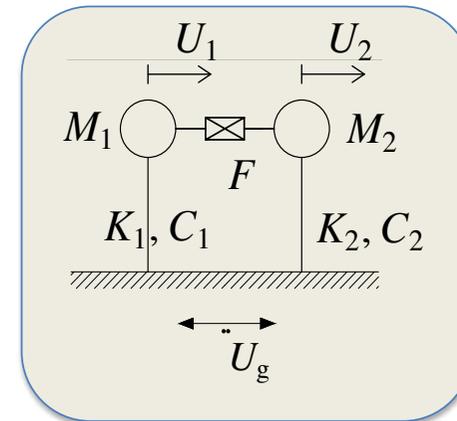
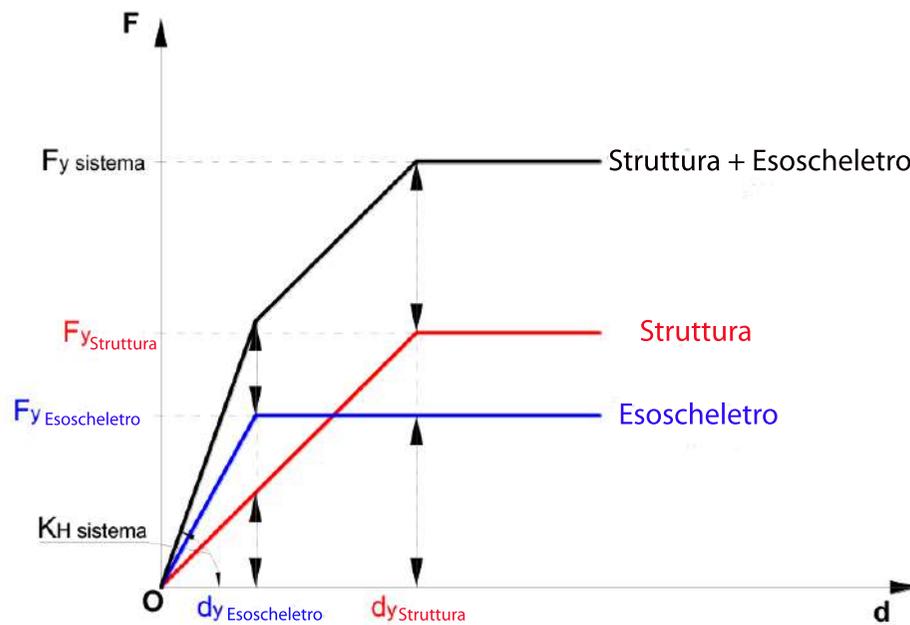
$$\Delta T = M_t \times \Delta a_g$$

Per essere efficace, l'esoscheletro deve essere sufficientemente **rigido** e **resistente** in modo da poter **prendere su di sé una parte significativa delle forze sismiche orizzontali** gravanti sulla costruzione.

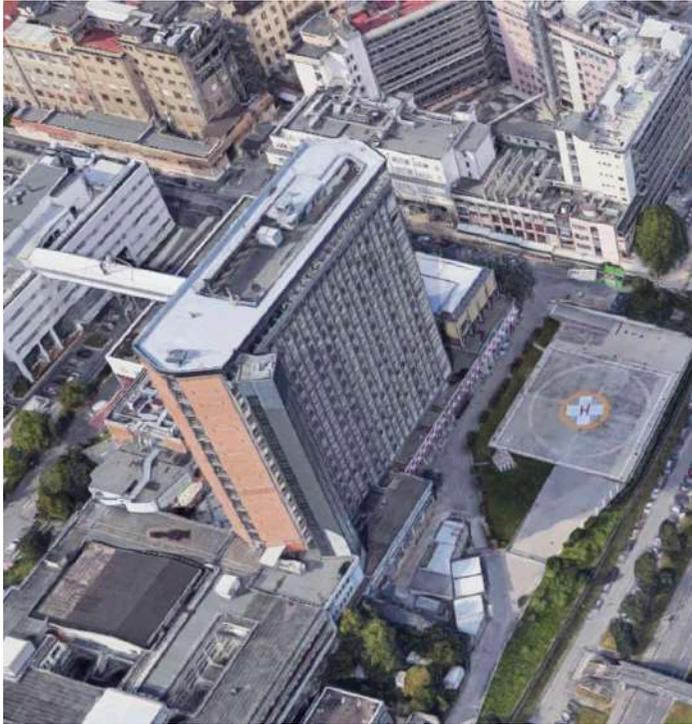
PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

ESOSCHELETRO – COMPORTAMENTO MECCANICO

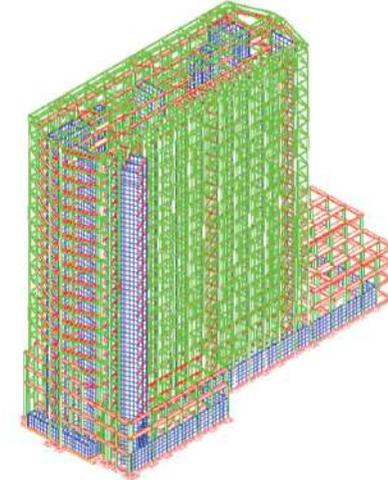
L'esoscheletro incrementa dunque rigidezza, resistenza e capacità dissipativa della costruzione esistente: il comportamento statico incrementale è il seguente



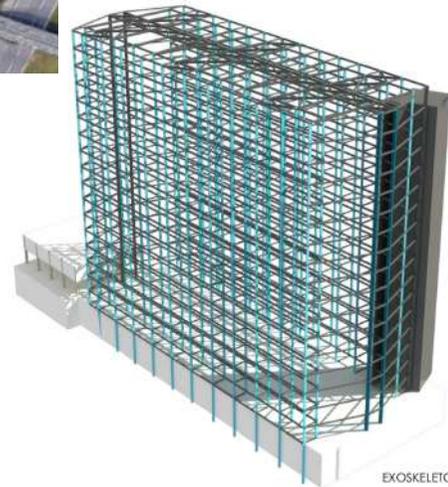
PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI



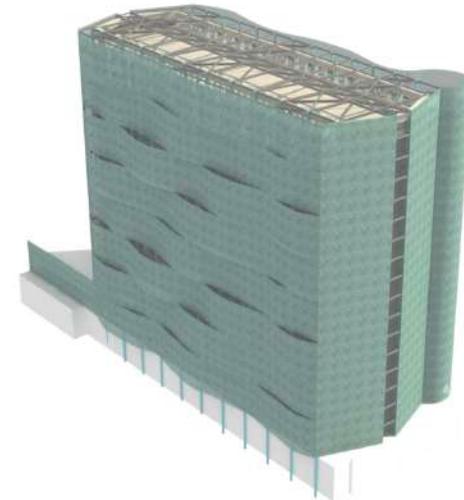
VERIFICATION OF THE STEEL EXOSKELETON



The new steel beams and pilars that constitute the exoskeleton are all



EXOSKELETON



3D MODEL



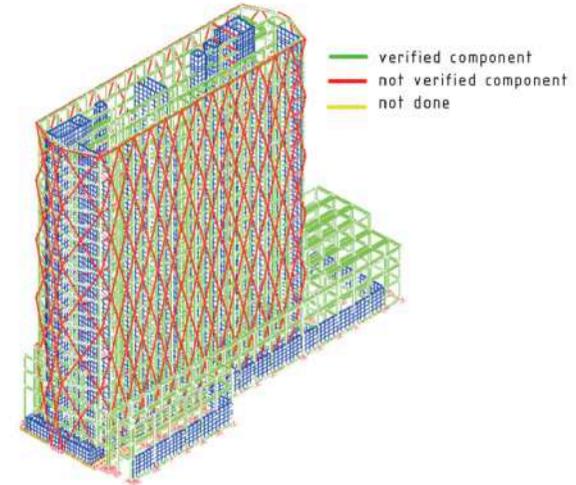
**POLITECNICO
DI TORINO**

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

VERIFICATION OF THE CONCRETE STRUCTURE



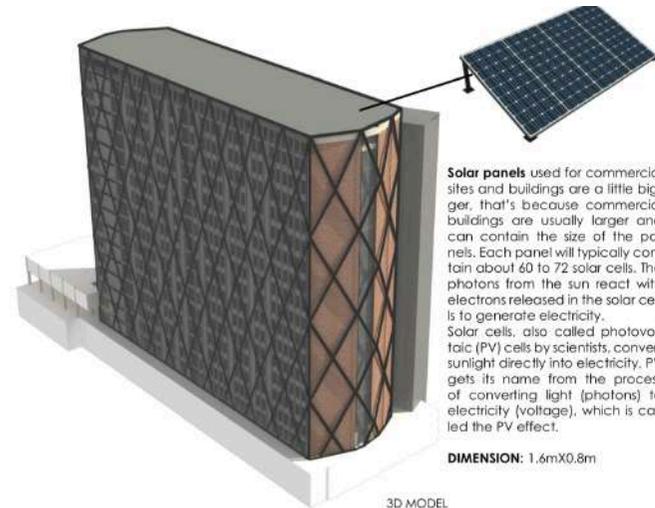
— verified component
— not verified component
— not done

The original beams in reinforced concrete are now verified due to the exoskeleton.



Diagrid structures tend to bulge in plan as the diagonal modules compress under gravity load, creating circumferential and radial forces in the perimeter and radial floor framing members, respectively, at nodal levels and corresponding stresses in the diaphragm slabs.

DIAGRID



Solar panels used for commercial sites and buildings are a little bigger, that's because commercial buildings are usually larger and can contain the size of the panels. Each panel will typically contain about 60 to 72 solar cells. The photons from the sun react with electrons released in the solar cells to generate electricity. Solar cells, also called photovoltaic (PV) cells by scientists, convert sunlight directly into electricity. PV gets its name from the process of converting light (photons) to electricity (voltage), which is called the PV effect.

DIMENSION: 1.6mX0.8m

3D MODEL



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica



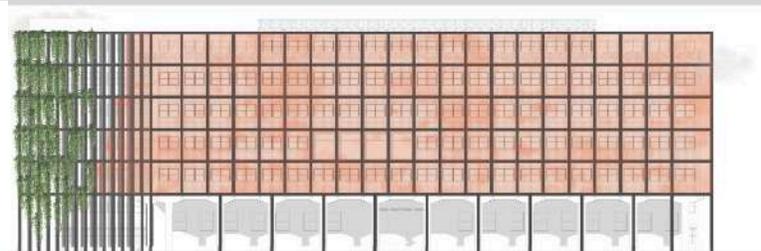
PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

PLANS AND ELEVATION WITH EXOSKELETON - SCALE 1:200

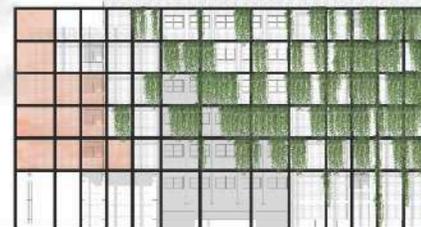
3



View from piazza San Giovanni



FRONT FROM SAN GIOVANNI SQUARE



FRONT FROM VIA DELLA BASILICA



FRONT FROM VIA PORTA PALATINA



FRONT FROM VIA IV MARZO



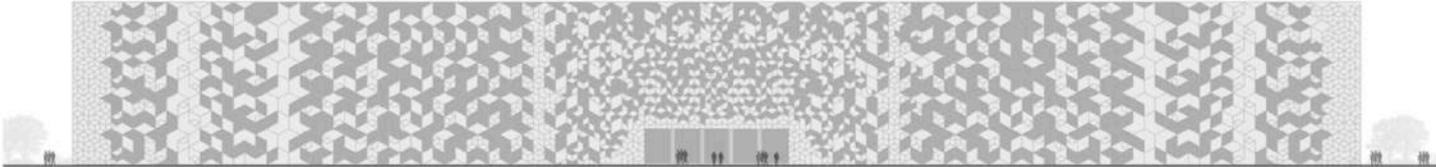
**POLITE
DI TOR**

Dipartimento
di Ingegneria
Edile e Geotecnica

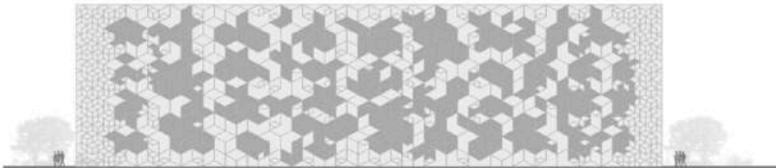
DISCO

PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

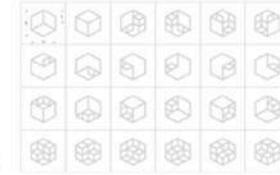
SOUTH EAST FACADE 1:200



SOUTH WEST FACADE 1:200



MODULE TYPES USED IN THE FACADE

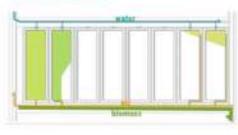
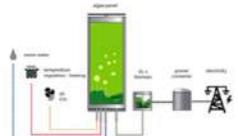


ALGAE FACADE

Bioreactive algae facade is a sustainable facade alternative that generates clean energy. The algae facade system is composed of a thin layer of algae culture on a substrate. The algae facade system is installed on the facade of the building. The algae facade system is composed of a thin layer of algae culture on a substrate. The algae facade system is installed on the facade of the building. The algae facade system is composed of a thin layer of algae culture on a substrate. The algae facade system is installed on the facade of the building.

Because microalgae absorb straight radiation can also be used on domed roofing structure. The cell density inside the bioreactor depends on available light and the resulting algae biomass. When there is more straight radiation, more algae grows - providing more shading for the building.

Algae facade produces O₂ through the photosynthesis process.



SMOKE-EATING FACADE

A new construction material could make the concrete jungle function a lot more like the natural world. The facade is a thin layer of smoke-eating material. The smoke-eating material is installed on the facade of the building. The smoke-eating material is composed of a thin layer of smoke-eating material on a substrate. The smoke-eating material is installed on the facade of the building.

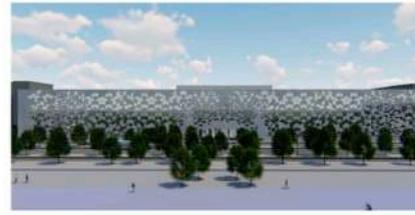
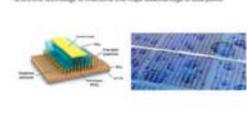
The facade is a thin layer of smoke-eating material. The smoke-eating material is installed on the facade of the building. The smoke-eating material is composed of a thin layer of smoke-eating material on a substrate. The smoke-eating material is installed on the facade of the building.



PERVOC SOLAR CELLS

A pervoc cell, or pervolucite cell, is a photovoltaic cell that converts the energy of light into electricity. The pervoc cell is a thin layer of pervolucite material. The pervoc cell is installed on the facade of the building. The pervoc cell is composed of a thin layer of pervolucite material on a substrate. The pervoc cell is installed on the facade of the building.

The pervoc cell is a thin layer of pervolucite material. The pervoc cell is installed on the facade of the building. The pervoc cell is composed of a thin layer of pervolucite material on a substrate. The pervoc cell is installed on the facade of the building.



PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

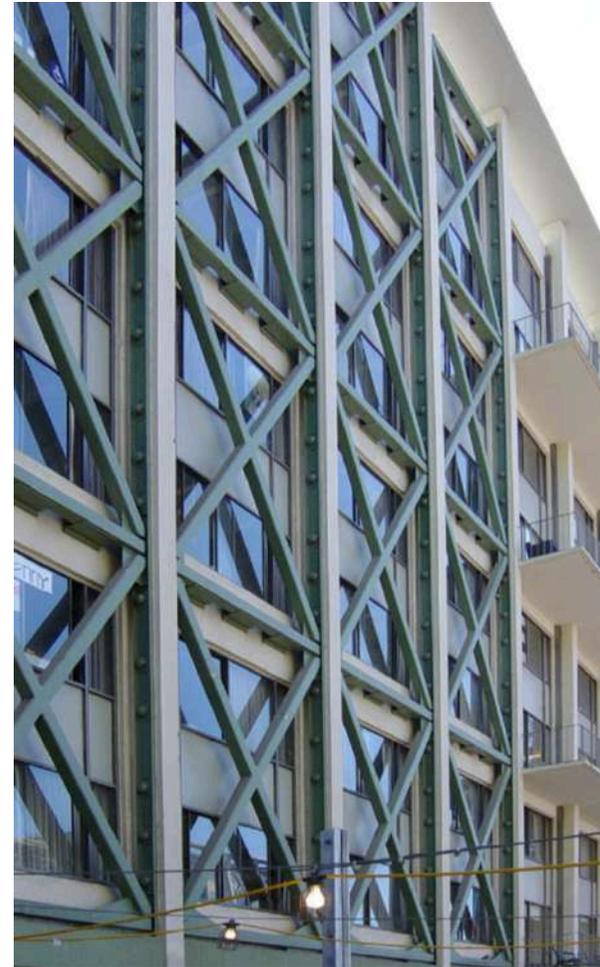


**POLITECNICO
DI TORINO**

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

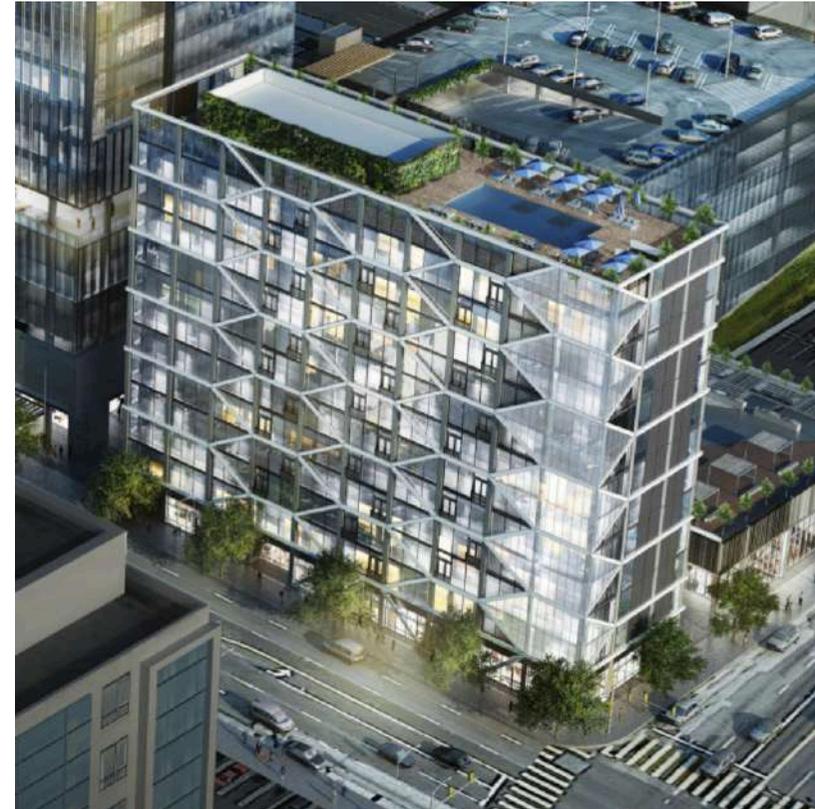


**POLITECNICO
DI TORINO**

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI



**POLITECNICO
DI TORINO**

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



PROTEZIONE PASSIVA INNOVATIVA PER STRUTTURE ESISTENTI

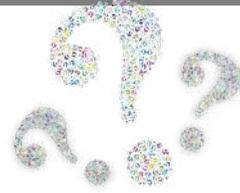


**POLITECNICO
DI TORINO**

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



The issue to solve



Main critical aspects of existing structures:

- ✘ 61% of the Italian housing stock has already exceeded its designed **lifespan of 50 years** and more than a half of it was built **without** considering **seismic design principles** and **energy consumption** (ISTAT census, 2011);
- ➔ need for **safety assessment** and **structural vulnerability** analysis
- ✘ more than a third of total **greenhouse gas emissions** derives from them (Document for E2B European Initiative, 2012);



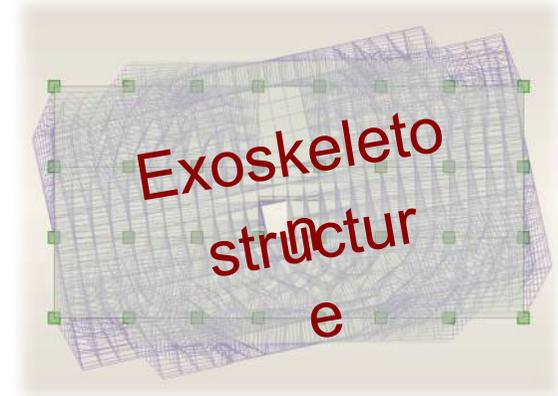
The aim of the present research is the assessment of **seismic performances** of steel exoskeleton structures and the way they succeed in **controlling earthquake induced vibrations** of existing reinforced concrete buildings



What is the solution?



A **self-supporting structural system** put in the exterior part of an existing construction which is linked to. The chosen connection also represents the way the inner building can unload itself giving the stresses to the steel external frame, that is essentially designed to **protect** the first one.



- ✓ Restoration of the designed lifetime and **capability to bear seismic loads** aiming at protecting the existing frame structure against its damage during earthquake actions
- ✓ Reduction of business downtime and **no need of residents' relocation** thanks to the operative processes that are done from the outside
- ✓ Enhancement of economic and environmental effectiveness of the resulting system by updating the structure to the current **sustainable needs**
- ✓ A new aesthetic shape and additional housing or public spaces can be provided



POLITECNICO
DI TORINO

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



Primary building



A **flat complex** located in Via Castalgomberto, 35 - Turin (Italy)

It is an isolated reinforced concrete building composed by nine stories over the basement whose heights are equal to 3.27 m, except for the pilotis level that reaches 5.07 m; floor plans are characterized by a quite regular shape with ground dimensions of almost 27.50 m x 16.20 m.

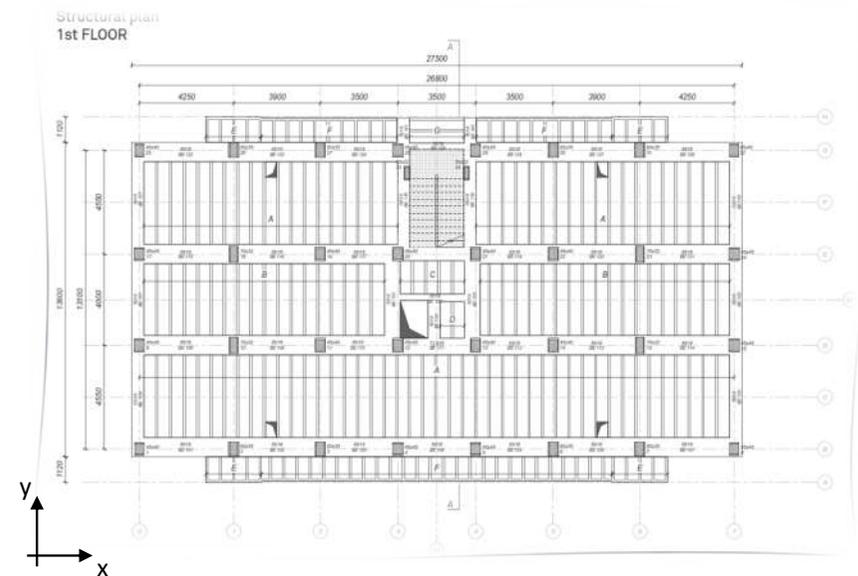


1957 -
1959



50 years!

today



POLITECNICO
DI TORINO

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



Coupled system: existing building and exoskeleton structure

Before...



...after



The two structures are connected by **rigid links** on the full height: they work separately towards the same goal



The exoskeleton has enabled to make a more **regular** floor plan giving a rectangular shape to the structure

Comparing the outcomes

Modal properties

Mode	Primary structure				Coupled system			
	Ω [rad/s]	T [s]	M_x [%]	M_y [%]	Ω [rad/s]	T [s]	M_x [%]	M_y [%]
1	3.270	1.910	0.00	78.67	4.400	1.420	0.00	79.97
2	3.460	1.810	0.83	0.00	6.530	0.960	83.33	0.00
3	3.520	1.790	79.22	0.00	9.170	0.680	0.01	0.00
4	9.300	0.680	0.00	11.52	16.020	0.390	0.00	12.45
5	9.740	0.650	0.54	0.00	20.480	0.310	10.25	0.00
6	9.800	0.640	11.13	0.00	28.020	0.220	0.00	0.00
7	16.200	0.390	0.00	4.04	28.590	0.220	0.00	3.84
8	16.520	0.380	3.60	0.00	32.740	0.190	3.25	0.00
9	16.710	0.380	0.13	0.00	38.390	0.160	0.00	1.11
10	22.370	0.280	0.00	2.05	42.910	0.150	1.24	0.00

Frequency



The 1st mode goes through a **rise** of 34% and the 3rd one becomes three times higher

Period

It rapidly reduces from the original building to the coupled system due to a structural **stiffening**



The 2nd mode becomes **translational** and torsional effects go to the 3rd one, thanks to the regularisation given by the exoskeleton



Modes



POLITECNICO DI TORINO

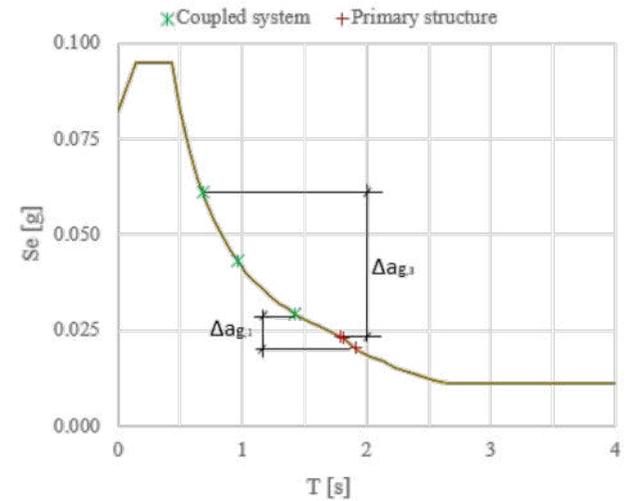
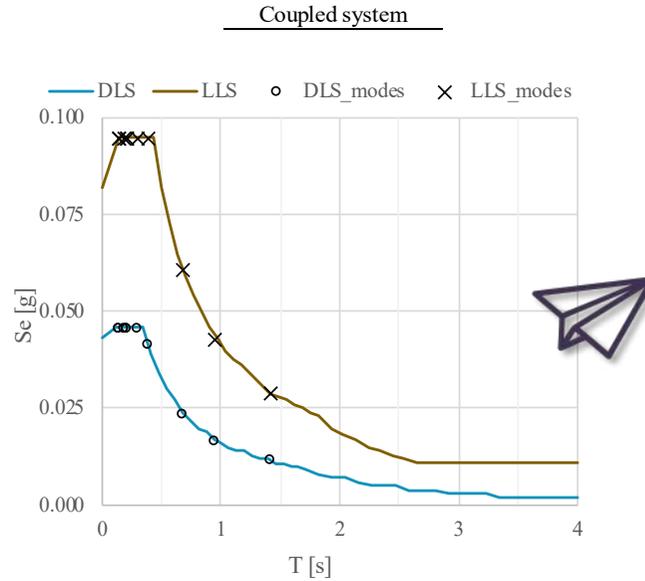
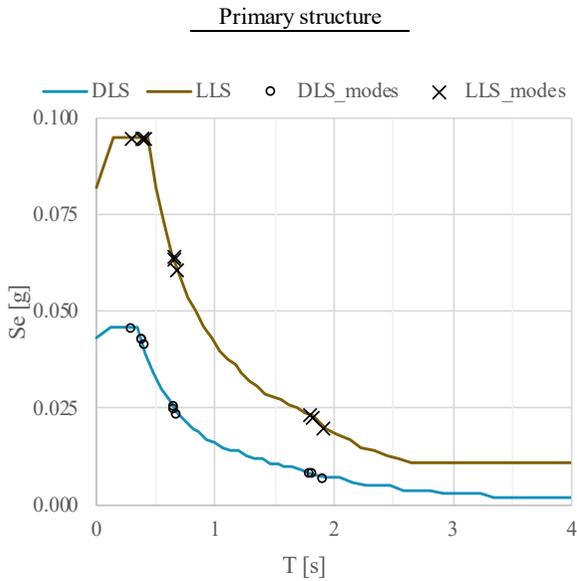
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica



Comparing the outcomes

Elastic pseudo-acceleration response spectra

Elastic pseudo-acceleration response spectrum for the top three vibration modes in Life-safety LS



$T [s]$

$a_g [g]$

Mode	$\Delta a_{g,i}$ variation
1	43%
2	87%
3	160%



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica



Comparing the outcomes

Peak floor displacements and inter-storey drift ratios, DLS

Level	Primary structure				Coupled system			
	U_x [m]	U_y [m]	Δ_x [‰]	Δ_y [‰]	U_x [m]	U_y [m]	Δ_x [‰]	Δ_y [‰]
1	0.003	0.003	0.7	0.6	0.002	0.003	0.4	0.5
2	0.006	0.006	0.9	0.9	0.004	0.005	0.6	0.8
3	0.010	0.009	0.9	1.0	0.006	0.007	0.5	0.7
4	0.013	0.012	0.9	0.9	0.007	0.010	0.5	0.7
5	0.016	0.015	0.9	0.9	0.009	0.012	0.4	0.6
6	0.018	0.018	0.8	0.9	0.010	0.014	0.4	0.6
7	0.021	0.020	0.7	0.8	0.011	0.016	0.3	0.6
8	0.022	0.022	0.5	0.6	0.012	0.018	0.3	0.6
9	0.023	0.024	0.4	0.4	0.013	0.019	0.2	0.5

Displacements generally **decrease** reaching the maximum at the top, where U_x reduces by 46%



Values are fully less than the limit of $dU_i/h_i = 0.005$ (NTC 2018), so verifications have been validated

Comparing the outcomes

Peak floor displacements and relating profiles, LLS

Level	Primary structure		Coupled system	
	U_x [m]	U_y [m]	U_x [m]	U_y [m]
1	0.009	0.008	0.005	0.007
2	0.017	0.016	0.010	0.013
3	0.025	0.025	0.014	0.019
4	0.033	0.033	0.019	0.025
5	0.041	0.041	0.022	0.030
6	0.048	0.048	0.026	0.035
7	0.054	0.055	0.028	0.040
8	0.059	0.060	0.031	0.045
9	0.062	0.064	0.032	0.049

X-direction

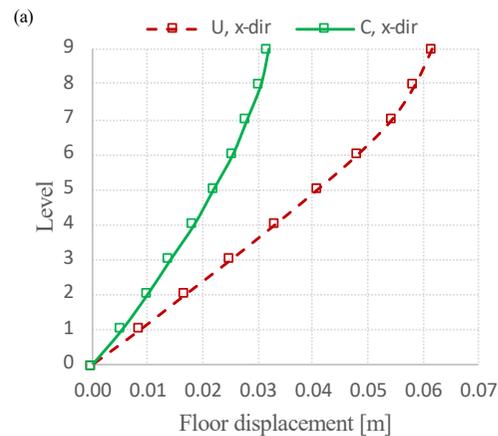
The retrofitted structure achieves a considerable **reduction** in displacements at the top level passing from 0.062 m to 0.032 m:

- 48.10%

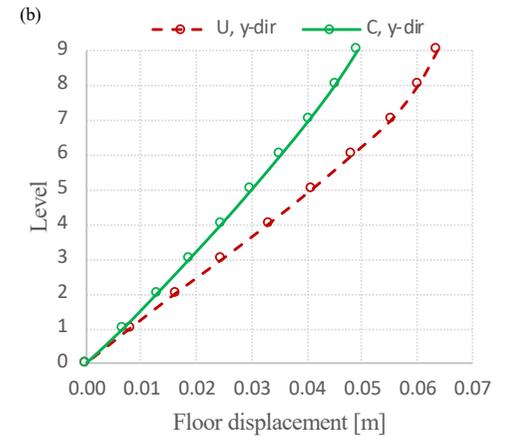
Uncontrolled structure (U)

Coupled system (C)

Profiles of floor displacements along both x- and y-axis:



(a) x-direction



(b) y-direction

Comparing the outcomes

Base shears, LLS

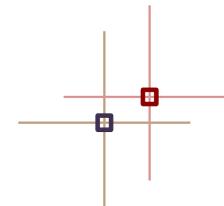
Values of mass, stiffness and frequency have increased



base shears **grow** from the existing building to the coupled system

V_b [kN]	Primary structure	Coupled system
x-dir	1520.40	3465.99
y-dir	1370.13	2457.67

At the top level, center of **gravity** and center of **stiffness** of the coupled system remain close:



	x [m]	y [m]
G (x,y)	13.51	6.55
K (x,y)	13.50	6.55

Thanks to the connections, the exoskeleton bears the additional forces reducing those that act just on the primary structure

Exoskeleton structure

Steel statement

cost of material and working tasks



Total mass [kg]	Steel price [€/kg]	Total price [€]	Gross area/floor [m²]	Floor no. [-]	Gross area [m²]	Adjustment price [€/m²]
185,521	4.00	742,084	445.50	9	4009.50	185.08



This is an excellent result!



all the steel elements used



total amount of money for the structural adjustment

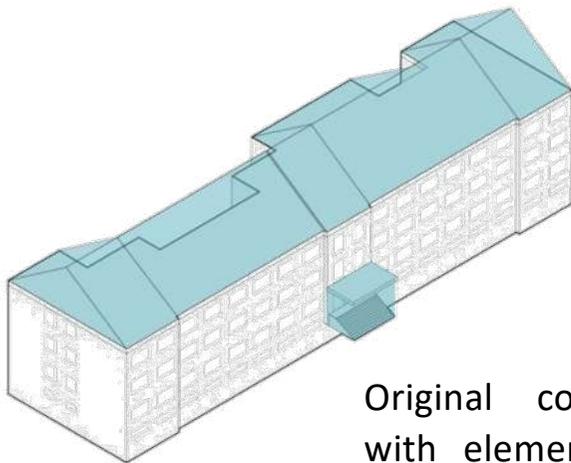


surfaces of the structure

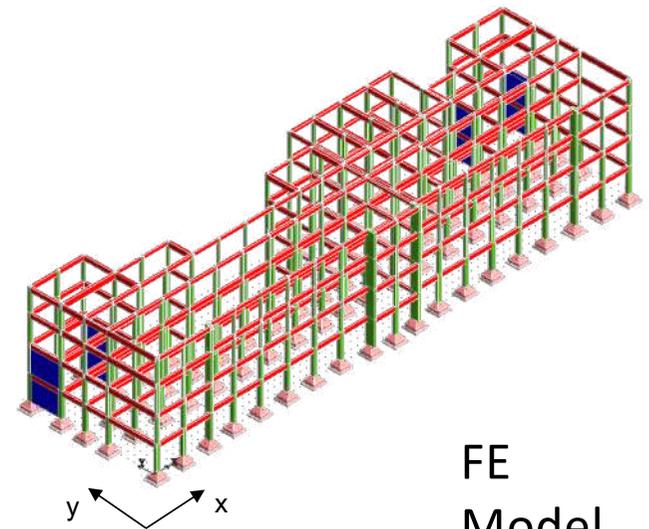
Primary building

De Amicis-Ruffini school located in Bordighera (IM, Italy)

It is an isolated reinforced concrete building composed by three stories over the basement, irregular floor plans and it reaches the dimensions of almost 75 m x 20 m



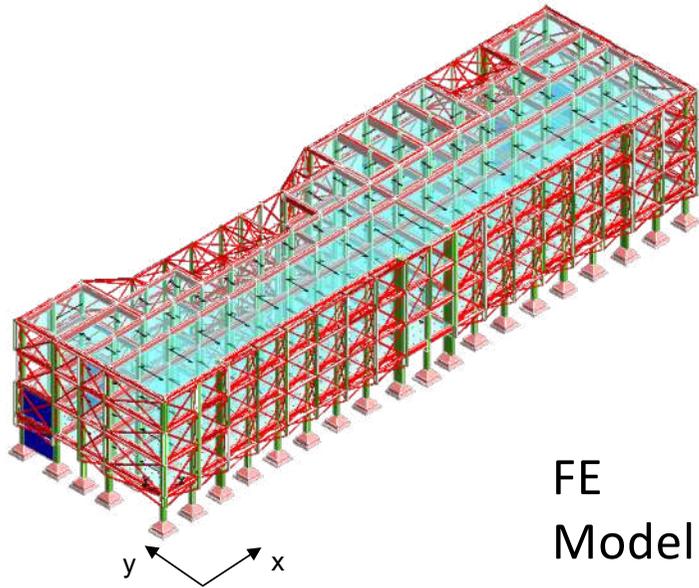
Original construction with elements to be removed before the introduction of the exoskeleton



FE Model

Coupled system: existing building and exoskeleton structure

It consists of two structures connected by a rigid link that work separately towards the same goal; the exoskeleton is rigidly fixed to the ground level

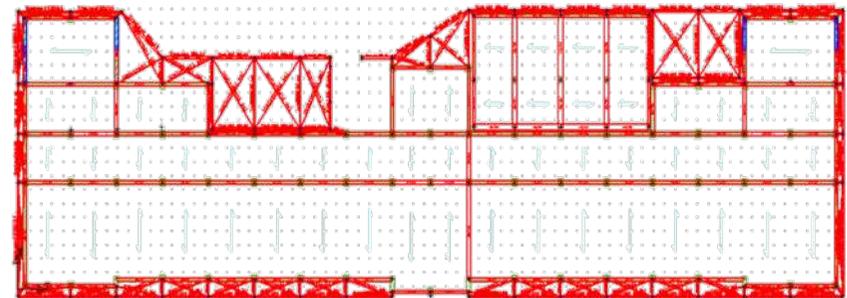


FE
Model

Circular sections like $\Phi 50$ and $\Phi 120$ as well as HEA100, HEA180, HEA200, HEB300 create the external structure



It has enabled to make a more regular floor plan, as it is shown here referring to the first level:



Comparing the outcomes

Modal properties

Mode	Primary structure				Coupled system			
	Ω [rad/s]	T [s]	M_x [%]	M_y [%]	Ω [rad/s]	T [s]	M_x [%]	M_y [%]
1	8.119	0.774	0.03	74.92	21.483	0.292	0.05	71.99
2	9.213	0.682	14.64	3.89	26.364	0.238	77.35	0.05
3	9.569	0.657	66.85	0.58	31.035	0.202	0.13	0.02
4	21.247	0.296	0.02	9.05	53.536	0.117	0.02	19.68
5	23.656	0.266	0.02	7.53	57.922	0.108	14.88	0.04
6	25.519	0.246	14.27	0.00	65.321	0.096	0.07	0.59
7	42.349	0.148	1.93	0.00	75.869	0.083	3.52	0.03
8	43.707	0.144	0.11	0.12	78.785	0.080	0.09	3.36
9	47.536	0.132	0.00	1.82	86.378	0.073	0.00	0.43
10	56.716	0.111	2.13	0.00	86.939	0.072	3.89	0.02
11	78.745	0.080	0.00	2.08	113.130	0.056	0.00	3.73
12	88.707	0.071	0.00	0.00	129.367	0.049	0.01	0.05

The first mode goes through a rise of 164% in frequency and the period almost reduces to one-third

Frequency of the second translational mode upsurges of 186% and period drops down to 0.238 s

Rotational mode nearly cancels when the exoskeleton is introduced

It highlights that the external structure has reached the greatest possible planar regularity

Comparing the outcomes

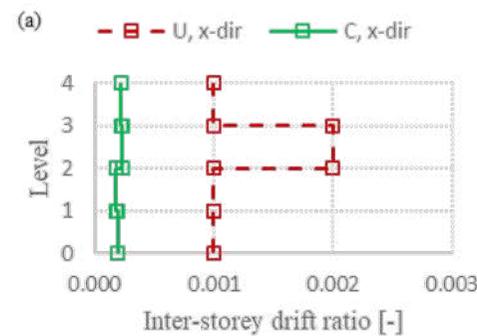
Peak floor displacements and inter-storey drift ratios, DLS

Level	Primary structure				Coupled system			
	U_x [m]	U_y [m]	Δ_x [‰]	Δ_y [‰]	U_x [m]	U_y [m]	Δ_x [‰]	Δ_y [‰]
1	0.005	0.005	1.3	1.4	0.001	0.001	0.2	0.3
2	0.008	0.008	0.9	0.8	0.001	0.002	0.2	0.2
3	0.014	0.015	1.6	1.7	0.002	0.003	0.2	0.3
4	0.018	0.020	1.2	1.6	0.003	0.004	0.2	0.3

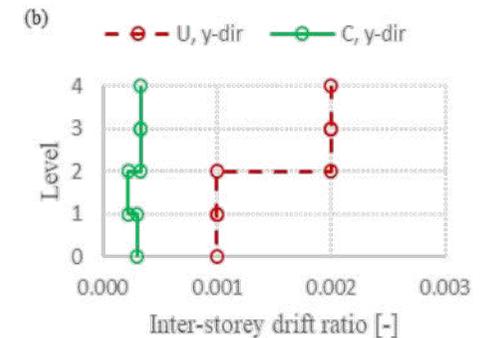
At the top, displacements U_x and U_y decreased at least by 80% along both directions

Values are fully less than $dU_i/h_i = 0.005$ (NTC 2018), so verifications have been validated.

While the ratio of the primary structure (U) fluctuates from a third and one-fifth less than the limit, the ratio referred to the coupled system (C) is at most a twentieth of 5‰.



(a) x-direction



(b) y-direction

Comparing the outcomes

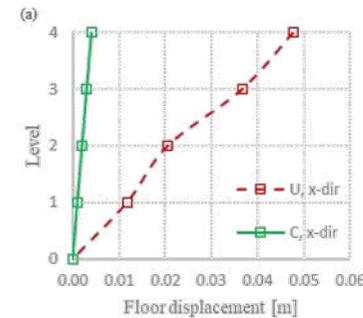
Peak floor displacements and relating profiles, LLS

Level	Primary structure		Coupled system	
	U_x [m]	U_y [m]	U_x [m]	U_y [m]
1	0.012	0.013	0.001	0.002
2	0.021	0.021	0.003	0.004
3	0.037	0.038	0.005	0.007
4	0.048	0.053	0.006	0.009

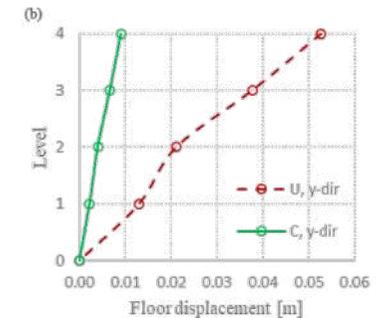
Profiles of floor displacements for the primary structure (U) and the coupled system (C) along both x- and y-axis:

Along x-direction, the retrofitted structure achieves a huge reduction in displacements at the top level passing from 0.048 m to 0.006 m
 ➔ it is equal to -87.50%

In the transverse (y) direction, it decreases by 83%



(a) x-direction



(b) y-direction

Comparing the outcomes

Stiffness

Seismic actions have been applied according to the combinations $\pm F_x \pm 0.30 F_y \pm \xi$, $\pm F_y \pm 0.30 F_x \pm \xi$ where $\xi = 5\%$ represents the viscous damping. Sizes of the exoskeleton structural elements looked at:

- stiffness ratio between the retrofitted system and the existing building;
- planar regularisation in order to minimise the eccentricity, that is created between the gravity center and stiffness center, to reduce torsional effects due to earthquake actions.

“Under horizontal actions, full contribution to stiffness and to resistance of the secondary elements cannot exceed 15% of the same contribution of primary elements” (NTC 2018)

Direction	Primary structure	Coupled system	Ratio
	k_{prim} [t/m]	k_{syst} [t/m]	k_{syst} / k_{prim} [-]
$F_x + 0.30 F_y + \xi$	24514	171919	7.01
$F_y - 0.30 F_x - \xi$	16453	112320	6.83

It means that the stiffness of the coupled system must be at least 85% of the total

➔ stiffness ratio must overtake 6.66

Two examples with the relating results

Comparing the outcomes

Peak shear forces and base shears, LLS

Level	Primary structure		Coupled system	
	V_x [kN]	V_y [kN]	V_x [kN]	V_y [kN]
1	6428.80	6114.20	12841.50	11915.10
2	5676.70	5378.30	11776.60	11009.70
3	4189.70	4078.50	8962.80	8861.10
4	1913.50	1980.60	4593.50	4808.60

V_b [kN]	Primary structure		Coupled system		
	Total	Primary	Exoskeleton	Total	
x-dir	6428.80	1729.00	11112.50	12841.50	
y-dir	6114.20	1655.00	10260.10	11915.10	

Mass, stiffness and frequencies have grown



shear forces **increase** from the existing building to the coupled system



The connection starts working since the forces merely acting to the primary structure are significantly reduced compared to those belonging to the primary construction



POLITECNICO
DI TORINO

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



Comparing the outcomes

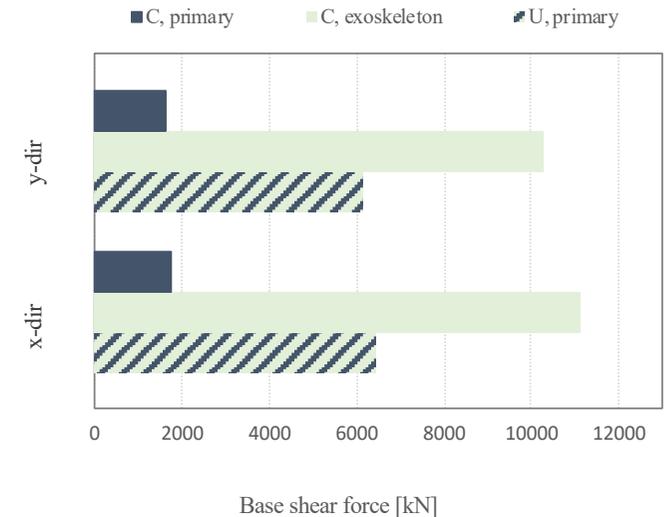
Base shears, LLS

Total base shear increases from 6114.20 kN to 11915.10 kN in y-direction and from 6428.80 kN to 12841.50 kN in longitudinal (x) direction; an evident reduction in shear force is highlighted for the **existing component** of the coupled system that goes from 6114.20 kN to 1655.00 kN in y-direction and from 6428.80 kN to 1729.00 kN in x-direction

➡ it is more than three times lower, so **the primary building just gets almost a quarter of the seismic actions** than it currently happens



The **exoskeleton** manages to unload the primary building from total shear force of **more than 86%** along each direction



Exoskeleton structure

Steel statement

All the steel sections employed

Section	Structural element	Steel	Unit area [cm ²]	Total area [m ²]	Total length [m]	Mass [kg]
HEB 200	column	s275	53.83	462.77	407.37	17214.37
HEB 300	column	s275	149.08	432.75	250	29256.56
HEA 100	link	s275	21.23	132.76	238.94	3982.07
HEA 180	beam	s275	43.51	936.47	921.27	31467.02
Φ50	vertical bracing	s275	19.63	356.34	2269.67	34983.42
Φ120	vertical bracing	s235	113.10	373.08	992.25	88093.35
Φ50	horizontal bracing	s275	19.63	227.63	1824.98	28129.22
Total						233126.01

This is an encouraging result with respect to the estimated cost of almost 800 €/m² for a traditional adjustment of an existing building

Considering 4 €/kg as the cost of steel (inclusive of material and working tasks), the total amount of money stands at 932,504 €

➡ 155.42 €/m²



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica



Conclusions

Pros and cons of the retrofitted system:

- ✓ **floor displacements** reduce of about 40% for both Damage and Life-safety Limit States;
 - ✗ due to an increase in mass and stiffness, there is a rise of **frequencies**;
 - ✓ a more effective behaviour occurs along **x-direction**, because it is stiffer than the transverse (y) one;
 - ✓ **cost of operations** is fully lower than the price required by a standard adjustment; 
 - ✓ the **preservation** of the existing building avoids both demolition and heavy reconstruction works;
- the overall dimensions of this solution are nearly limited to the **perimeter** of the primary construction, given that it just needs a practical distance to put the exoskeleton foundations beyond the existing ones.



The exoskeleton structure is an effective method to solve the problem of **seismic adjustment for existing constructions** giving also the chance to gain new energetic and aesthetic features



POLITECNICO
DI TORINO

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica

