

OSSERVATORIO APPALTI PROVINCIA DI MODENA

**"MIGLIORAMENTO SISMICO DI EDIFICI:  
NUOVE TENDENZE DI INTERVENTO E  
INTRODUZIONE ALLA RISPOSTA SISMICA"**

MODENA  
22 novembre 2018

Antonio Perretti

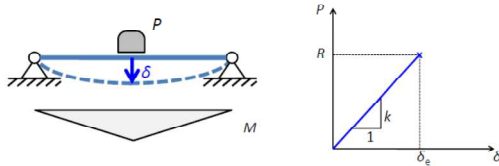
PARTE II

1

Glossario minimo di ingegneria sismica  
-Interventi esterni non convenzionali  
Isolamento sismico

2

Glossario minimo di ingegneria sismica

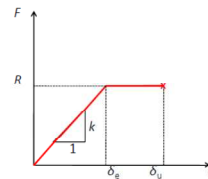


Il progetto è basato solo sulla resistenza

R	Resistenza
k	Rigidezza
μ	Duttilità

Glossario minimo di ingegneria sismica

Rigidezza-Resistenza-Duttilità

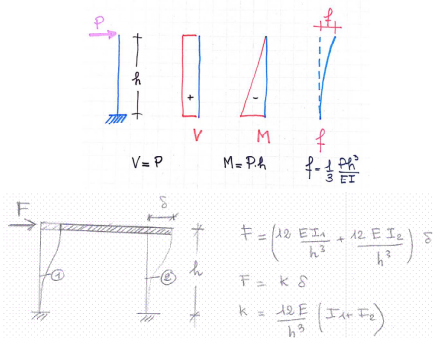


Fattore di duttilità  
 $\mu = \delta_u / \delta_e \geq 1$

Elementi di progettazione sismica

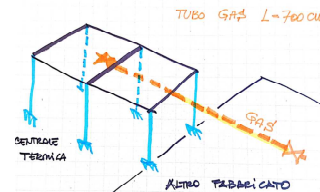
Resistenza	R
Rigidezza	k
Duttilità	μ

Glossario minimo di ingegneria sismica



Glossario minimo di ingegneria sismica

6 pilastri /  $30 \times 30 \text{ cm} / I = 3570 \text{ cm}^4$   
 TUBO GAS  $L = 700 \text{ cm}$



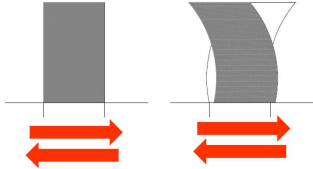
CENTRALE	E	I	H	K	PIL n.	TOTALE K
TERMICA	30000	675000000	3500	5667,638	6	34005,83
	N/mm <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup>	mm	N/mm	n.	N/mm
TUBO GAS	E	A	L	K	TUBI N.	TOTALE K
	210000	4320	7000	39600	1	39600
	N/mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	mm	N/mm	n.	N/mm

K=EA/L

## Glossario minimo di ingegneria sismica

### AZIONE SISMICA

Lo scuotimento del terreno (traslazioni orizzontali e verticali) attraverso le fondazioni imprime agli edifici degli spostamenti con conseguenti deformazioni.



Il sisma non è una forza, la sua entità sugli edifici varia in funzione di alcuni parametri da cui gli edifici sono caratterizzati.

## Glossario minimo di ingegneria sismica

Caratterizzazione dell'azione sismica:  
Il movimento del terreno può danneggiare un edificio a causa di **forze d'inerzia che nascono per effetto della vibrazione della massa dell'edificio stesso**.

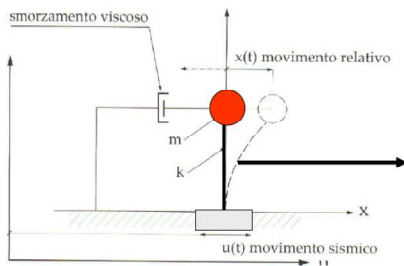
Forza d'inerzia:  $F = m \cdot a$

L'entità delle forze a cui è sottoposto l'oggetto sono funzione dell'accelerazione impressa dal sisma e dalla massa dell'oggetto stesso.

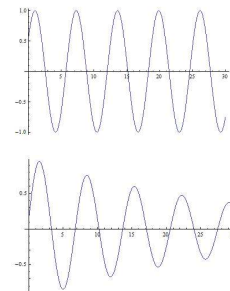


## Glossario minimo di ingegneria sismica

### Rappresentazione semplificata dell'azione e della risposta sismica



## Glossario minimo di ingegneria sismica

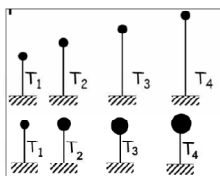


Smorzamento del 5% di quello critico

## Glossario minimo di ingegneria sismica

### Spettro di risposta

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \text{ [sec]}$$

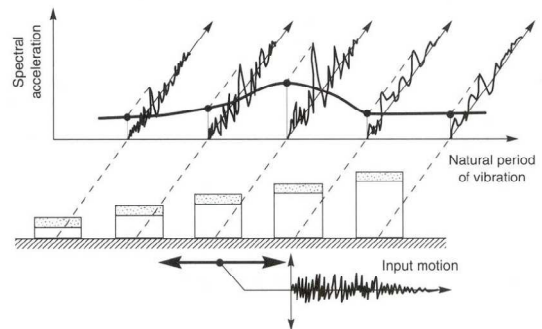


m costante, k diminuisce

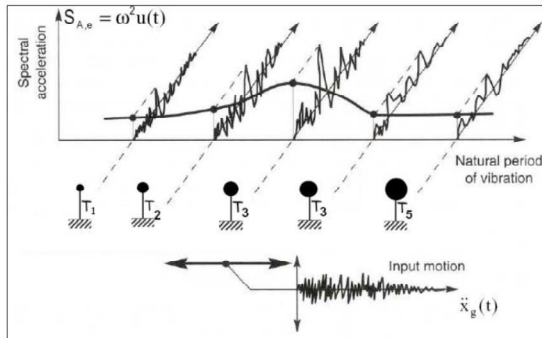
k costante, m aumenta

Fenomeno della **risonanza**: anche il terreno è caratterizzato da un periodo proprio di oscillazione. Quando il periodo proprio di oscillazione del terreno coincide o è molto prossimo a quello dell'edificio, vengono incrementate le sollecitazioni a cui l'edificio è sottoposto.

## Glossario minimo di ingegneria sismica



### Glossario minimo di ingegneria sismica



### Esempi video:

- 1- spettro elastico
- 2- senso fisico del fattore di comportamento
- 3 - risposta dinamica strutture

### Glossario minimo di ingegneria sismica

CENTRALE	E	I	H	K	PIL.n.	TOTALE K	
TERMICA	30000	675000000	3500	5667,638	6	34005,83	
	N/mm <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup>	mm	N/mm	n.	N/mm	K=12EI/L
TUBO GAS	E	A	L	K	TUBI N.	TOTALE K	
	210000	1320	7000	39600	1	39600	
	N/mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	mm	N/mm	n.	N/mm	K=EA/L

periodo telaio vano tecnico	
superficie solaio A	24 m <sup>2</sup>
peso solaio al	10 KN/m <sup>2</sup>
peso totale	240 KN
MASSA	10 KN/m <sup>2</sup> /g (9,81m/s <sup>2</sup> )*A= 24,46483 t
rigidezza telaio	34006 N/mm
periodo T	0,168524 s

### Glossario minimo di ingegneria sismica

#### Lo spettro di risposta elastica

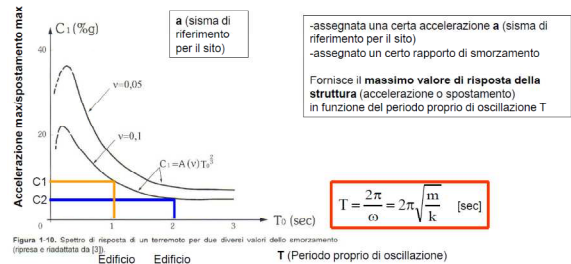


Figura 1-19. Spettro di risposta di un terremoto per due diversi valori dello smorzamento (ipotesi e normalizzata da [2]).

### Glossario minimo di ingegneria sismica



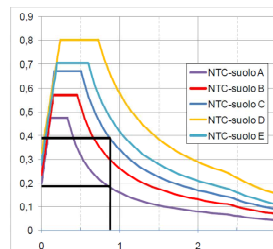
Amplificazione locale S



Influenza dell'altezza del fabbricato Z

### Glossario minimo di ingegneria sismica

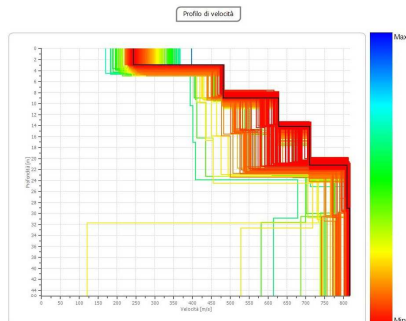
$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$



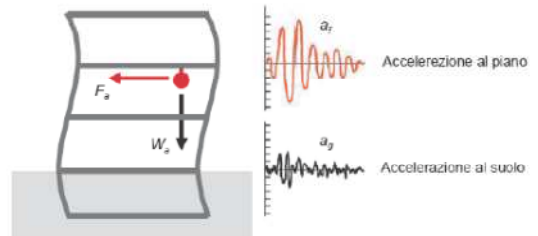
- A terreni molto rigidi
- B Depositi molto addensati (sabbie ghiaie molto addensate, argille molto consistenti)
- C Depositi mediamente addensati (sabbie, ghiaie mediamente addensate, argille mediamente consistenti)
- D Depositi scarsamente addensati (granulari sciolti o poco addensati o coesivi da poco a mediamente consistenti)
- E terreni costituiti da strati superficiali alluvionali o dei tipi C o D (sp < 20m), su substrato rigido

## Glossario minimo di ingegneria sismica

### Caratterizzazione del suolo secondo le NTC2018

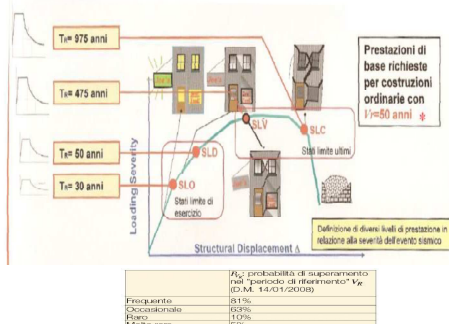


## Glossario minimo di ingegneria sismica

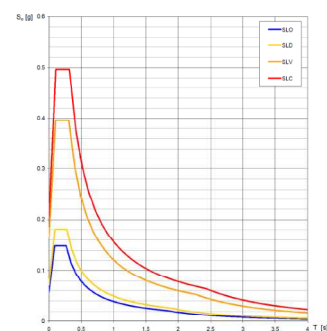


## Glossario minimo di ingegneria sismica

### Definizione dell'evento sismico di riferimento: es.1

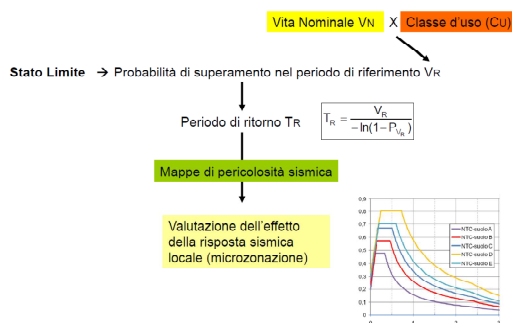


## Glossario minimo di ingegneria sismica



## Glossario minimo di ingegneria sismica

### NTC 2008: Verifica agli Stati Limite



## Glossario minimo di ingegneria sismica

### Definizione dell'input sismico

- Sisma ⇒ accelerazione nella struttura ⇒ forze d'inerzia sulla struttura ( $F = ma$ )
- Il modello di riferimento per l'azione sismica è dato dallo spettro di risposta elastico (diagramma che riporta, in funzione del periodo proprio, l'accelerazione assoluta massima su una struttura elastica lineare ad un GDL soggetta a sisma)

Forza d'inerzia su una struttura elastica lineare dovuta al sisma

$$F = m S_d(T)$$

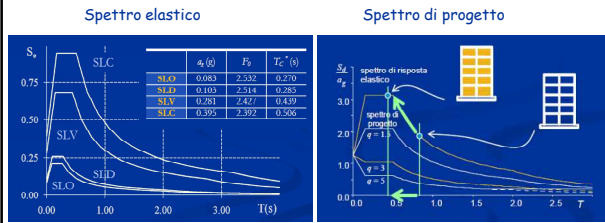
Periodo proprio

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gk}}$$

Parametri che definiscono lo spettro

- $a_g$  = accelerazione massima del terreno (dipende da sito, stato limite, classe d'uso)
- $F_0$  = massima amplificazione dello spettro
- $T_c$  = periodo di inizio del tratto a velocità costante
- S = fattore dipendente dal tipo di suolo

## Glossario minimo di ingegneria sismica



## Tecniche "non convenzionali" di progettazione

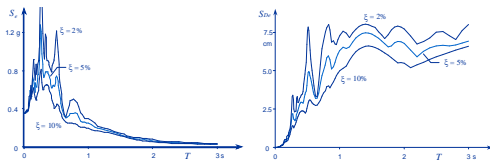
Obiettivo - migliorare la prestazione delle strutture a tutti i livelli di rischio:

- riducendo l'interruzione d'uso delle attività
- riducendo le accelerazioni al fine di minimizzare i danni agli oggetti contenuti nelle costruzioni
- riducendo il danno agli elementi strutturali e non-strutturali

26

## Tecniche "non convenzionali" di progettazione

Si può discutere il problema a partire dagli spettri di risposta (in termini di accelerazione o di spostamento)



27

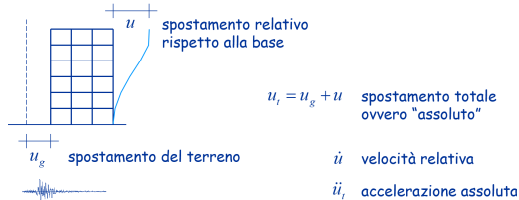
## Tecniche "non convenzionali" di progettazione

Se ne può discutere anche in termini energetici

- Il terremoto è trasmissione di energia
- Quanta energia "entra" nella struttura? (dipende dalle sue caratteristiche dinamiche)
- In che modo viene dissipata questa energia?

28

## Equazione del moto (equilibrio dinamico)



Equilibrio dinamico:

$$m \ddot{u}_t + c \dot{u} + f_s = 0$$

forza d'inerzia      smorzamento viscoso      forza di richiamo

29

## Equazione di bilancio energetico (in termini assoluti)

- Energia = lavoro = forza per spostamento

$$m \ddot{u}_t + c \dot{u} + f_s = 0$$

$$\int_0^{t_0} m \ddot{u}_t \, du + \int_0^{t_0} c \dot{u} \, du + \int_0^{t_0} f_s \, du = 0$$

$$du = du_t - du_g$$

$$\int_0^{t_0} m \ddot{u}_t \, du = \int_0^{t_0} m \ddot{u}_t (du_t - du_g) = \int_0^{t_0} m \ddot{u}_t \, du_t - \int_0^{t_0} m \ddot{u}_t \, du_g$$

$$\int_0^{t_0} m \ddot{u}_t \, du_t = \int_0^{t_0} m \frac{d\dot{u}_t}{dt} \, du_t = \int_0^{t_0} m \dot{u}_t \, d\dot{u}_t = \frac{1}{2} m \dot{u}_t^2 (t_0)$$

30

### Equazione di bilancio energetico (in termini assoluti)

- Energia = lavoro = forza per spostamento

$$m \ddot{u}_t + c \dot{u} + f_s = 0$$

$$\int_0^{t_0} m \ddot{u}_t \, du + \int_0^{t_0} c \dot{u} \, du + \int_0^{t_0} f_s \, du = 0$$

$$\frac{1}{2} m \dot{u}_t^2 - \int_0^{t_0} m \ddot{u}_t \, du + \int_0^{t_0} c \dot{u} \, du + \int_0^{t_0} f_s \, du = 0$$

$$\int_0^{t_0} m \ddot{u}_t \, du = \frac{1}{2} m \dot{u}_t^2 + \int_0^{t_0} c \dot{u} \, du + \int_0^{t_0} f_s \, du$$

31

### Equazione di bilancio energetico (in termini assoluti)

- Energia = lavoro = forza per spostamento

$$\int_0^{t_0} m \ddot{u}_t \, du = \frac{1}{2} m \dot{u}_t^2 + \int_0^{t_0} c \dot{u} \, du + \int_0^{t_0} f_s \, du$$

$E_{i,a}$  energia di ingresso assoluta  
lavoro della forza d'inerzia per lo spostamento del terreno

32

### Equazione di bilancio energetico (in termini assoluti)

- Energia = lavoro = forza per spostamento

$$\int_0^{t_0} m \ddot{u}_t \, du = \frac{1}{2} m \dot{u}_t^2 + \int_0^{t_0} c \dot{u} \, du + \int_0^{t_0} f_s \, du$$

$E_{k,a}$  energia cinetica assoluta  
al termine dell'evento sismico la struttura si ferma e la sua energia cinetica si annulla

33

### Equazione di bilancio energetico (in termini assoluti)

- Energia = lavoro = forza per spostamento

$$\int_0^{t_0} m \ddot{u}_t \, du = \frac{1}{2} m \dot{u}_t^2 + \int_0^{t_0} c \dot{u} \, du + \int_0^{t_0} f_s \, du$$

$E_v$  energia viscosa

34

### Equazione di bilancio energetico (in termini assoluti)

- Energia = lavoro = forza per spostamento

$$\int_0^{t_0} m \ddot{u}_t \, du = \frac{1}{2} m \dot{u}_t^2 + \int_0^{t_0} c \dot{u} \, du + \int_0^{t_0} f_s \, du$$

$E_s$  energia di richiamo

se il comportamento della struttura è elastico lineare ( $f_s = k u$ ) al termine dell'evento sismico lo spostamento è nullo e l'energia di richiamo si annulla

se il comportamento non è lineare questa energia è dissipata per comportamento isteretico (si indica con  $E_h$ )

35

### Equazione di bilancio energetico (in termini assoluti)

- Energia = lavoro = forza per spostamento

$$\int_0^{t_0} m \ddot{u}_t \, du = \frac{1}{2} m \dot{u}_t^2 + \int_0^{t_0} c \dot{u} \, du + \int_0^{t_0} f_s \, du$$

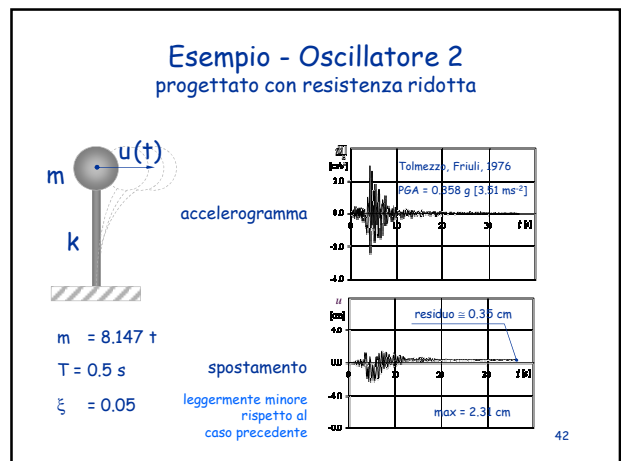
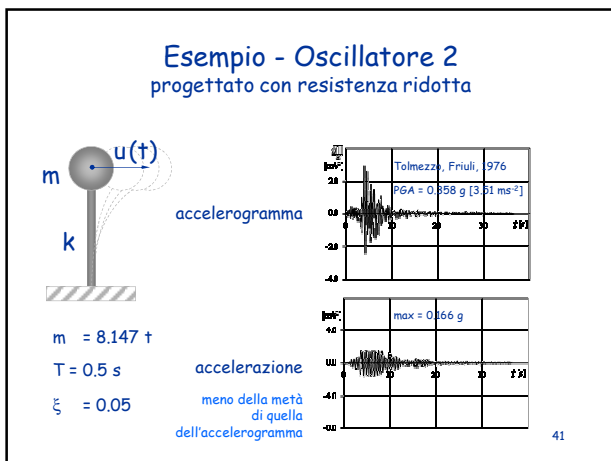
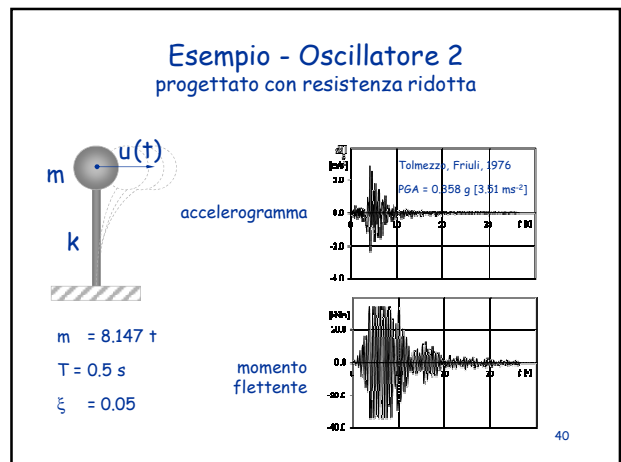
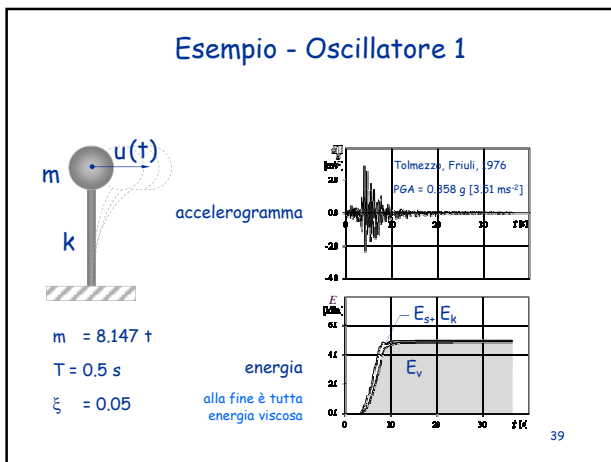
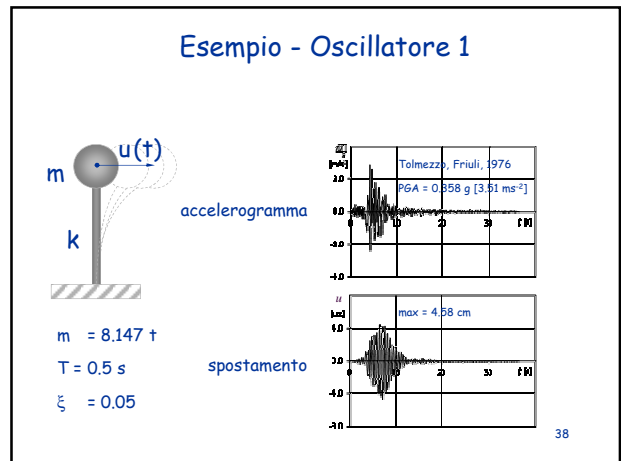
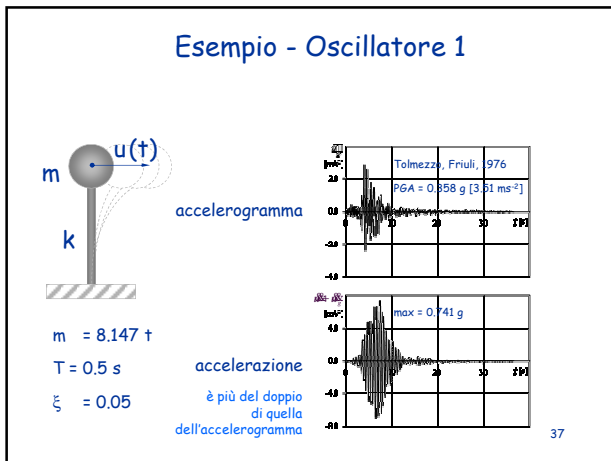
$$E_{i,a} = E_{k,a} + E_v + E_s$$

- Al termine dell'evento sismico:

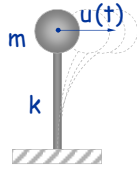
$$E_{i,a} = E_v + E_h$$

L'energia in ingresso è dissipata come energia viscosa o energia isteretica

36

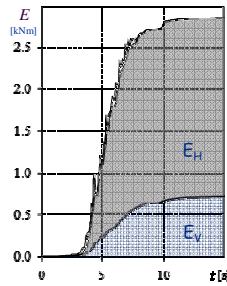


### Esempio - Oscillatore 2 progettato con resistenza ridotta



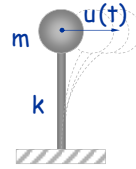
$m = 8.147 \text{ t}$   
 $T = 0.5 \text{ s}$   
 $\xi = 0.05$

energia  
 è prevalentemente  
 energia isteretica



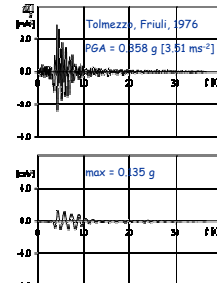
43

### Esempio - Oscillatore 3 elastico, ma con periodo più alto



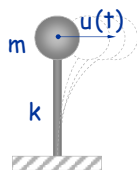
$m = 73.32 \text{ t}$   
 $T = 1.5 \text{ s}$   
 $\xi = 0.05$

accelerogramma  
 accelerazione  
 meno della metà  
 di quella  
 dell'accelerogramma



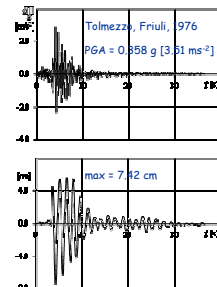
44

### Esempio - Oscillatore 3 elastico, ma con periodo più alto



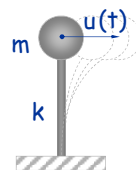
$m = 73.32 \text{ t}$   
 $T = 1.5 \text{ s}$   
 $\xi = 0.05$

spostamento  
 aumentato rispetto  
 al caso  $T=0.5 \text{ s}$



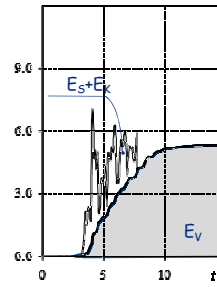
45

### Esempio - Oscillatore 3 elastico, ma con periodo più alto



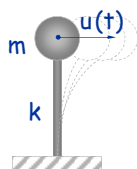
$m = 73.32 \text{ t}$   
 $T = 1.5 \text{ s}$   
 $\xi = 0.05$

energia  
 alla fine è tutta  
 energia viscosa



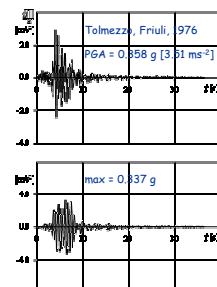
46

### Esempio - Oscillatore 3 periodo 0.5 s ma smorzamento più alto



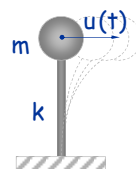
$m = 8.417 \text{ t}$   
 $T = 0.5 \text{ s}$   
 $\xi = 0.15$

accelerazione  
 leggermente minore  
 di quella  
 dell'accelerogramma



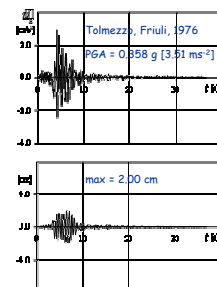
47

### Esempio - Oscillatore 3 periodo 0.5 s ma smorzamento più alto



$m = 8.417 \text{ t}$   
 $T = 0.5 \text{ s}$   
 $\xi = 0.15$

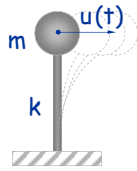
spostamento  
 leggermente minore  
 rispetto al  
 caso  $\xi=0.05$



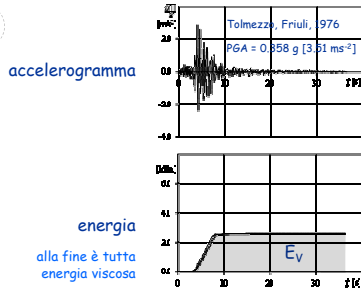
48



### Esempio - Oscillatore 3 periodo 0.5 s ma smorzamento più alto



$m = 8.417 \text{ t}$   
 $T = 0.5 \text{ s}$   
 $\xi = 0.15$



49

### Quali interventi possibili?

Progettazione tradizionale:

- Forze ridotte mediante  $q$ , ma questo comporta forte danneggiamento

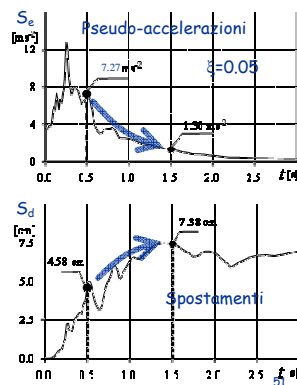
Possibili alternative "innovative":

- Usare elementi che si danneggino, molto duttili, ma sostituibili
- Aumentare il periodo proprio della struttura
- Aumentare lo smorzamento

50

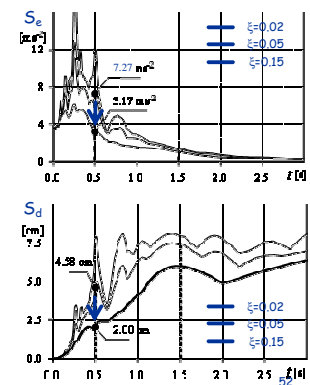
alternative?

aumento  
del periodo  
di vibrazione



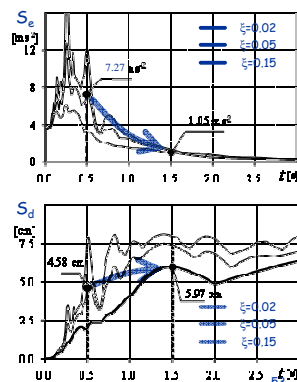
alternative?

aumento  
dello  
smorzamento



alternative?

aumento  
del periodo  
di vibrazione  
+  
aumento  
dello  
smorzamento



### Modi per intervenire

- Il miglioramento delle prestazioni sismiche delle strutture può essere ottenuto attraverso il controllo della risposta:

1. ➡ CONTROLLO PASSIVO
2. ➡ CONTROLLO ATTIVO
3. ➡ CONTROLLO SEMI-ATTIVO

54

## Controllo passivo

- Un sistema di controllo passivo è progettato per influenzare la risposta strutturale senza che le proprie caratteristiche siano modificate nel corso dell'evento sismico (ovvero il sistema passivo subisce la risposta sismica e non modifica le proprie caratteristiche al variare della risposta sismica della struttura)
- I sistemi di controllo passivo non richiedono alcuna fonte di energia esterna per il loro funzionamento.

55

## Controllo attivo

- Un sistema di controllo attivo è progettato per:
- monitorare lo stato di una struttura ad un determinato istante
  - processare questa informazione
  - applicare, in breve tempo, un insieme di azioni tali da modificare questo stato nel modo desiderato

Un sistema di controllo attivo è costituito da tre componenti:

- Un sistema di monitoraggio in grado di rilevare lo stato di risposta della struttura e di registrare le informazioni mediante un sistema di acquisizione
- Un sistema di controllo che riceve i dati dal sistema di monitoraggio e decide sulle contromisure da applicare
- Un sistema attuatore che fisicamente applica le contromisure alla struttura

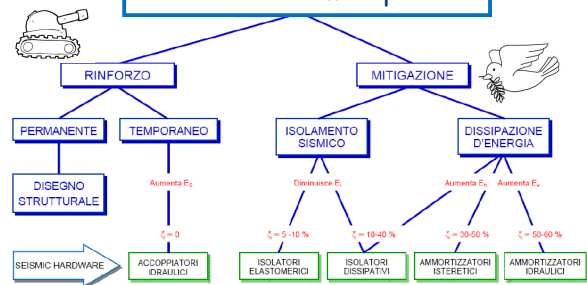
56

## Controllo semiattivo

- I dispositivi semiattivi possono essere visti come dispositivi passivi controllabili
- Ad esempio, dissipatori oleodinamici con fluido magnetoreologico, in grado di variare le proprie caratteristiche meccaniche, in particolare la viscosità, al variare del campo magnetico in cui si trovano immersi. Il campo magnetico può essere agevolmente modificato controllando una corrente di bassa potenza che passa in circuiti elettrici opportunamente collocati attorno al dispositivo. Altri esempi sono dispositivi controllabili ad attrito e dispositivi a rigidità variabile

57

## Protezione sismica passiva

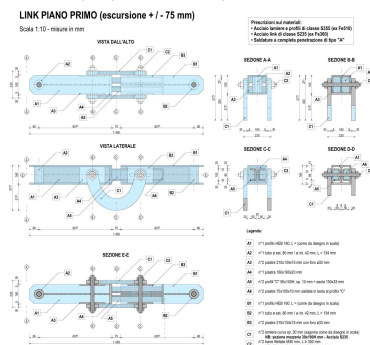


58

## Miglioramento Sismico Centro Sociale Rio Saliceto studio CPR -Novellara (RE)



## Dissipatori a falce di luna (disp. dipendenti dallo spostamento)



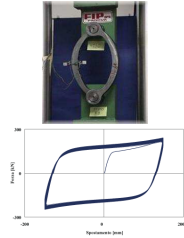
#### Dissipatori isteretici in acciaio

I dissipatori isteretici in acciaio sfruttano la plasticizzazione di elementi in acciaio di forma opportuna, progettata per garantire un comportamento ciclico stabile.

Gli elementi a falce di luna e a piolo sono i più usati per i ponti, mentre i dissipatori isteretici assiali ad instabilità impedita (BRAD®) sono i più usati come controventi dissipativi negli edifici.

Per i ponti, i dissipatori isteretici in acciaio possono essere combinati con dispositivi di vincolo dinamico.

Cicli isteretici sperimentali di un dissipatore isteretico in acciaio con elementi a falce di luna.



## ISOLAMENTO ALLA BASE

- È un sistema di controllo passivo, che interviene principalmente aumentando il periodo proprio della struttura, ma anche aumentando lo smorzamento
  - L'aumento del periodo riduce notevolmente le sollecitazioni nella struttura, ma aumenta di molto gli spostamenti
  - L'aumento di smorzamento riduce ulteriormente le sollecitazioni ma soprattutto limita l'aumento degli spostamenti

62

### Isolamento alla base (intuitivo)



Monastero di Santa Catalina ad Arequipa (XVI secolo) - LIMA.  
Fondazioni realizzate con uno strato isolante di sabbia e sassi profondo all'incirca 1 m, che permetteva alla struttura di assestarsi senza subire danni

63

### Isolamento alla base (intuitivo)



Cittadella della Casbah, Algeri

64

### Come vengono ridotti/eliminati i danni nelle strutture sismicamente isolate?

- Riduzione delle forze sismiche nella sovrastruttura
- ↓
- Comportamento essenzialmente elastico della sovrastruttura (assenza di danno strutturale)

Inoltre:

- Riduzione delle accelerazioni sismiche nella sovrastruttura (e quindi dei danni al contenuto)
- Riduzione degli spostamenti di interpiano nella sovrastruttura (e quindi dei danni agli elementi non strutturali)

65

### Convenienza nell'adozione dell'isolamento alla base

Maggiormente efficace:

- Strutture su suolo rigido
- Strutture con basso periodo fondamentale di vibrazione (edifici di bassa altezza)

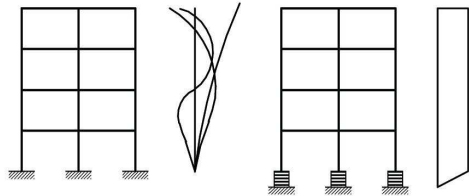
Meno efficace:

- Strutture su suolo soffice (o in prossimità di faglie attive)
- Strutture con alto periodo fondamentale di vibrazione (edifici di elevata altezza, ma anche edifici di altezza media ma con struttura debole)

66

## L'isolamento sismico

Il principio dell'isolamento sismico è tanto più vantaggioso quanto più, agendo sulla differenza di rigidezza tra la struttura e il sistema di isolamento (conci di gomma armata), rende la risposta dinamica del sistema generico  $M$ - $DOF$  affine a quella di un oscillatore semplice  $S$ - $DOF$ . Questo vale a dire che i fattori di partecipazione dei modi superiori sono trascurabili e il moto della struttura soprastante il sistema di isolamento può essere considerato quasi traslatorio.

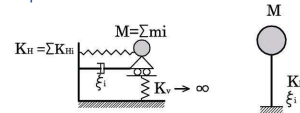


Edificio a base fissa e a base mobile - deformate modali

67

## L'isolamento sismico

Il principio dell'isolamento sismico è tanto più vantaggioso quanto più, agendo sulla differenza di rigidezza tra la struttura e il sistema di isolamento (conci di gomma armata), rende la risposta dinamica del sistema generico  $M$ - $DOF$  affine a quella di un oscillatore semplice  $S$ - $DOF$ . Questo vale a dire che i fattori di partecipazione dei modi superiori sono trascurabili e il moto della struttura soprastante il sistema di isolamento può essere considerato quasi traslatorio.



Altra verifica da effettuare per poter applicare il calcolo lineare è quella del rapporto tra rigidezza verticale e orizzontale degli isolatori che deve risultare  $K_V/K_H > 800$ .

68

## L'isolamento sismico

### Lo smorzamento

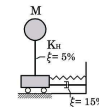
La verifica del sistema di isolamento deve essere condotta utilizzando lo spettro di risposta elastico e considerando il valore corrispondente al coefficiente di smorzamento viscoso del sistema di isolamento. Gli isolatori elastomerici più diffusi sono realizzati con 3 tipi di mescole: morbida, media, dura; in genere per mescole morbide e medie si ha uno smorzamento del 10% mentre per mescole dure del 15%.

Ma quale sia lo smorzamento ottimale è difficile definirlo; al crescere dello smorzamento si riducono le accelerazioni trasmesse, ma se questo valore diventa troppo elevato significa che l'azione frenante trasmessa dai dispositivi aumenta e, di conseguenza, si rischia di perdere l'ipotesi di corpo rigido e quindi l'ipotesi di base, che assimila l'edificio multipiano ad un oscillatore semplice, rischia di non essere più veritiera.

69

## L'isolamento sismico

Attenzione alla differenziazione dello smorzamento tra sovrastruttura e sistema di isolamento. Un telaio in c.a. ordinario (MRF) ha uno smorzamento del 5% di quello critico, mentre il sistema di isolamento può superare anche il 15%.



Modello elementare - isolatori e massa edificio

L'interferenza tra i due sistemi e i relativi smorzamenti cresce al diminuire del rapporto di rigidezza del telaio e del sistema di isolamento e questa è un'altra ragione per avere la sovrastruttura molto rigida rispetto agli isolatori e tendere al moto del corpo rigido.

70

## L'isolamento sismico

La verifica della sovrastruttura deve essere condotta utilizzando lo spettro di progetto allo SLU che si ottiene, come detto in precedenza, introducendo il fattore di struttura  $q \sim 1.15$ ; inoltre per tener conto della riduzione delle accelerazioni spettrali dovute allo smorzamento prodotto dal sistema di isolamento, le norme, in analogia all'EC8, per  $T \geq 0.8Tis$ , consente di ridurre le ordinate spettrali mediante un fattore (con  $\eta \geq 0.55$ )

Poiché lo smorzamento varia in base alla mescola si ha:

Per $\xi=10\%$	$\eta=0.816$	(mescola morbida)
Per $\xi=15\%$	$\eta=0.690$	(mescola normale)
Per $\xi=20\%$	$\eta=0.632$	(mescola dura)

Avere a disposizione un elevato smorzamento è un vantaggio se visto solo dal punto di vista dinamico, ma da quello ingegneristico applicato si perde l'essenza del principio dell'isolamento, quello di trasformare una struttura dinamicamente complessa in un oscillatore semplice. In funzione della distribuzione delle rigidità della struttura, l'incremento eccessivo dello smorzamento può avere un duplice effetto: diminuisce le accelerazioni spettrali ma al contempo può provocare un incremento dei fattori di partecipazione dei modi elevati. Quest'ultimo effetto è quello meno desiderato in quanto anche le considerazioni fatte circa il predimensionamento sono inficiate dal peso dei modi superiori.

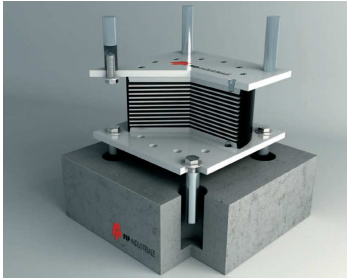
71

## Esempi di applicazioni

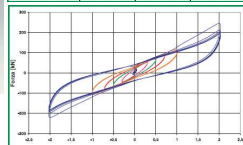
(progetto di massima approccio quasi manuale)

72

## ISOLATORI ELASTOMERICI serie SI



PROPRIETÀ	MISCELA		
	MORBIDA (SOFT - S)	NORMALE (NORMAL - N)	DURA (HARD - H)
Durezza (Shore A)	40	60	75
Modulo di elasticità tangenziale $G_{90}$ a $\gamma = 1$ (MPa)	0,4	0,8	1,4
Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente $\xi$ a $\gamma = 1$ (%)	10 / 15	10 / 15	10 / 15



Tipico diagramma isteretico di un isolatore elastomerico ottenuto in prove dinamiche ad ampiezza crescente.

## L'isolamento sismico

Estratto dal catalogo FIP

### SPOSTAMENTO 250 mm

SI-S	V	F <sub>el</sub>	K <sub>el</sub>	K <sub>el</sub>	D <sub>el</sub>	h <sub>el</sub>	h	H	Z	W
SI-S 000103	30	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
SI-S 000104	35	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400
SI-S 000105	40	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
SI-S 000106	45	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
SI-S 000107	50	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
SI-S 000108	55	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200
SI-S 000109	60	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
SI-S 000110	65	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600
SI-S 000111	70	2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800
SI-S 000112	75	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
SI-S 000113	80	3200	3200	3200	3200	3200	3200	3200	3200	3200
SI-S 000114	85	3400	3400	3400	3400	3400	3400	3400	3400	3400
SI-S 000115	90	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600
SI-S 000116	95	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800
SI-S 000117	100	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000

SI-N	V	F <sub>el</sub>	K <sub>el</sub>	K <sub>el</sub>	D <sub>el</sub>	h <sub>el</sub>	h	H	Z	W
SI-N 000118	30	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
SI-N 000119	35	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400
SI-N 000120	40	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
SI-N 000121	45	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
SI-N 000122	50	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
SI-N 000123	55	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200
SI-N 000124	60	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
SI-N 000125	65	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600
SI-N 000126	70	2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800
SI-N 000127	75	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
SI-N 000128	80	3200	3200	3200	3200	3200	3200	3200	3200	3200
SI-N 000129	85	3400	3400	3400	3400	3400	3400	3400	3400	3400
SI-N 000130	90	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600
SI-N 000131	95	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800
SI-N 000132	100	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000

SI-H	V	F <sub>el</sub>	K <sub>el</sub>	K <sub>el</sub>	D <sub>el</sub>	h <sub>el</sub>	h	H	Z	W
SI-H 000133	30	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
SI-H 000134	35	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400
SI-H 000135	40	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
SI-H 000136	45	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
SI-H 000137	50	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
SI-H 000138	55	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200
SI-H 000139	60	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
SI-H 000140	65	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600
SI-H 000141	70	2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800
SI-H 000142	75	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
SI-H 000143	80	3200	3200	3200	3200	3200	3200	3200	3200	3200
SI-H 000144	85	3400	3400	3400	3400	3400	3400	3400	3400	3400
SI-H 000145	90	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600
SI-H 000146	95	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800
SI-H 000147	100	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000

- Legenda**
- V: Capacità di carico massima (carico statico e dinamico) in kN/m²
  - F<sub>el</sub>: Capacità di carico elastica (carico statico e dinamico) in kN/m²
  - K<sub>el</sub>: Rigidezza elastica in kN/m
  - D<sub>el</sub>: Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente (%)
  - h<sub>el</sub>: Altezza elastica in mm
  - h: Altezza totale in mm
  - H: Altezza totale in cm
  - Z: Coefficiente di riduzione sismica
  - W: Coefficiente di riduzione sismica

## Esempio - 1

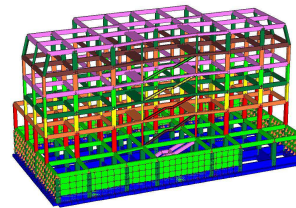
Contratto di quartiere - Alloggi - parcheggio di via Lazzaretto - ACIREALE (CT)



75

## L'isolamento sismico

ACIREALE  
Contratto di quartiere - Alloggi - parcheggio di via Lazzaretto



L'edificio è ubicato nel comune di Acireale, in provincia di Catania, che è zona sismica Z = 2; dal punto di vista geologico il terreno di fondazione è classificato come suolo B.

Il fabbricato è costituito da 5 piani fuori terra e un piano cantinato. La struttura è realizzata in c.a. ed è provvisto di un sistema di Isolamento Alla Base realizzato mediante isolatori elastomerici disposti tra il piano cantinato, denominato sottostruttura, e il piano terra che, insieme agli altri impalcati, costituisce la sovrastruttura.

76

## L'isolamento sismico

### Calcolo delle masse strutturali

Il periodo della struttura a base fissa è  $T_f = 0.54s$ ; l'efficacia del sistema di isolamento è tanto maggiore quanto più alto è il rapporto tra il periodo della struttura isolata e il periodo della struttura a base fissa; in genere è bene che questo rapporto sia dell'ordine di 2.5-3

Piano terra	7500	mq	0,8	t/mq	=	6000	t	
Piano 1	5800	mq	0,8	t/mq	=	4640	t	
Piano 2	5800	mq	0,8	t/mq	=	4640	t	
Piano 3	5800	mq	0,8	t/mq	=	4640	t	
Piano 4	5800	mq	0,8	t/mq	=	4640	t	
Copertura	4700	mq	0,8	t/mq	=	3760	t	
Massa totale della sovrastruttura :							28320	t

La massa della struttura  $M = 2840t$  Periodo struttura a base fissa  $T_f = 0.54s$

Supponendo di voler ottenere  $T_{is} = 2.5s$  per la struttura isolata alla base:

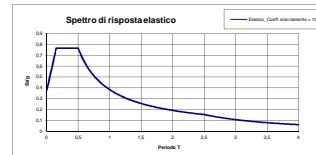
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \quad \text{da cui:} \quad K = \frac{M}{\left(\frac{T_{is}}{2\pi}\right)^2} = \frac{2840}{\left(\frac{2.5}{2\pi}\right)^2} = 17939 \text{ KN/m}$$

$K = 17.90 \text{ KN/mm}$  rigidezza orizzontale massima del sistema di isolamento

77

## L'isolamento sismico

### Predimensionamento del sistema di isolamento



Il valore dello spostamento di progetto si ottiene dal rapporto tra il tagliante agente alla quota del sistema di isolamento, relativo all'applicazione dello spettro elastico, e la rigidezza del sistema stesso:

$$T_{is} = 2.5s \quad \Rightarrow \quad S_e(T) = 0.15g \text{ accelerazione spettrale}$$

$$S_{Dn}(T) = \frac{S_e(T) \cdot M}{K_{el}} = \frac{0.15 \cdot 9.81 \cdot 2840}{17939} \cdot 10^{-2} = 23.3 \text{ cm}$$

78

## L'isolamento sismico

### Scelta dell'isolatore

La scelta del tipo o dei tipi di isolatori da disporre è condizionata sia dal carico verticale agente che dalla necessità di ridurre al minimo l'eccentricità tra il baricentro delle masse della struttura e il baricentro delle rigidezze del sistema di isolamento al fine di eliminare fastidiosi momenti torcenti che potrebbero compromettere l'efficacia del sistema di protezione sismica. Anche per ragioni economiche, anziché disporre due tipi di isolatori, vengono disposti sia isolatori elastomerici che dispositivi a scorrimento caratterizzati da rigidezza orizzontale trascurabile, detti slitte.

- Caso 1: 8 isolatori + 37 slitte:

La rigidezza orizzontale di ciascun isolatore deve essere superiore a  $K_i = 2.24 \text{ KN/mm}$

	V kN	F <sub>sd</sub> kN	K <sub>o</sub> kN/mm	K <sub>v</sub> kN/mm	D <sub>o</sub> mm	t <sub>o</sub> mm	h mm	H mm	Z mm	W kg
SI-S 1000/140	7670	22590	2.24	2658	1000	140	236	316	1050	1402
SI-N 700/130	5490	11370	2.37	2013	700	130	216	276	750	575
SI-H 550/126	4220	9820	2.64	1753	550	126	217	267	600	338

Supponendo di scegliere l'isolatore SI-N 700/130  
 $K_e = 2.37 \text{ KN/mm} \times 8 \text{ isolatori} = 18.96 \text{ KN/mm}$   
 $T_{is} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} = 2.43 \text{ s} \Rightarrow Se(T) = 0.16g$   
 $S_{Dv}(T) = \frac{S_e(T) \cdot M}{K_{vis}} = \frac{0.16 \cdot 9.81 \cdot 2840}{18960} \cdot 10^{-2} = 23.5 \text{ cm}$  79

## L'isolamento sismico

### Calcolo della rigidezza verticale dell'isolatore

La rigidezza verticale deve essere elevata per sostenere i carichi verticali, in particolare il rapporto  $K_v/K_e > 800$ .

Modulo di elasticità tangenziale	G =	1.4	Mpa
Diámetro	D =	700	mm
Area dello strato di gomma	A =	384845	mm <sup>2</sup>
Fattore di forma primario	S =	12	
Spessore totale degli strati di gomma	T <sub>e</sub> =	130	mm
Modulo elastico	E <sub>c</sub> =	6x6x5 <sup>2</sup> = 1209.6	N/mm <sup>2</sup>
Rigidezza verticale	$K_v = \frac{E_c \cdot A}{t_e}$	3580.84	KN/mm

S è il fattore di forma primario  $S = \frac{R}{2r}$

Per limitare la deformabilità verticale degli isolatori S non deve essere minore di 12

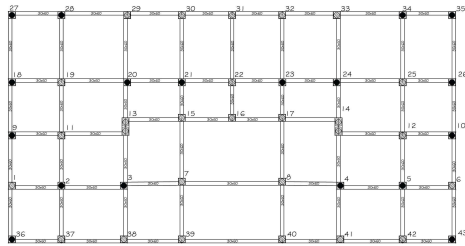
$$\frac{K_v}{K_e} = \frac{3580.84}{2.37} = 1510.90s$$

80

## L'isolamento sismico

### Scelta dell'isolatore per l'edificio di Acireale

Sono stati disposti 18 isolatori e 27 slitte  
 La disposizione dei dispositivi è la seguente:



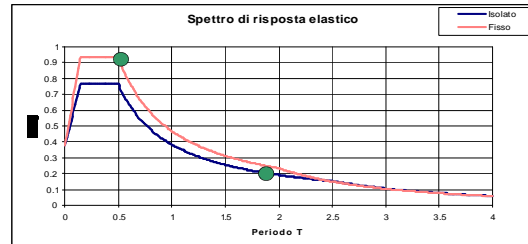
● Isolatore SI-H 500/126

○ Slitta

81

## L'isolamento sismico

Risultati dell'analisi dinamica (spettro molto semplificato)



Isolata	T <sub>1</sub> = 1.81s	M <sub>s</sub> = 0.00%	M <sub>v</sub> = 100.0%
	T <sub>2</sub> = 1.80s	M <sub>s</sub> = 100.0%	M <sub>v</sub> = 0.00%
Fissa	T <sub>1</sub> = 0.54s	M <sub>s</sub> = 0.00%	M <sub>v</sub> = 58.0%
	T <sub>2</sub> = 0.51s	M <sub>s</sub> = 68.0%	M <sub>v</sub> = 0.00%

82

## L'isolamento sismico

Acireale - Contratto di quartiere - Alloggi parcheggio di via Lazzaretto



83

## L'isolamento sismico

Contratto di quartiere - Alloggi parcheggio di via Lazzaretto





## ESEMPIO 2

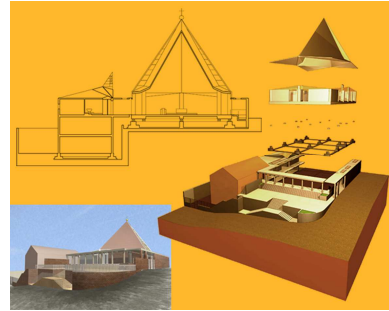
Chiesa B.V.M. del Carmelo a Catania



85

## L'isolamento sismico

Chiesa B.V.M. del Carmelo a Catania

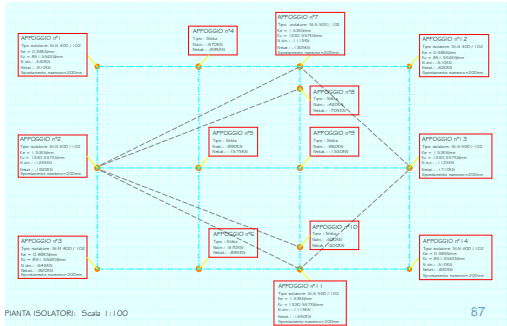


86

## L'isolamento sismico

Il sistema di isolamento - posizionamento isolatori e slitte

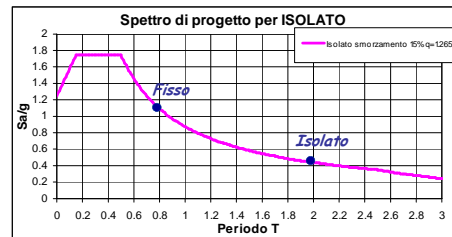
- Si dispongono:
- 4 isolatori SI-N 500/102
  - 4 isolatori SI-N 400/102
  - 6 Slitte



87

## L'isolamento sismico (spettro molto semplificato)

Periodo struttura a base fissa  $T_f \approx 0.80s$   $\Rightarrow$  Periodo struttura isolata  $T_{is} = 2.00s$



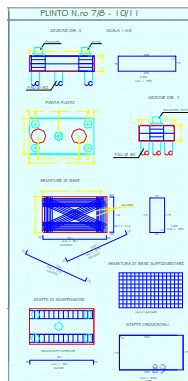
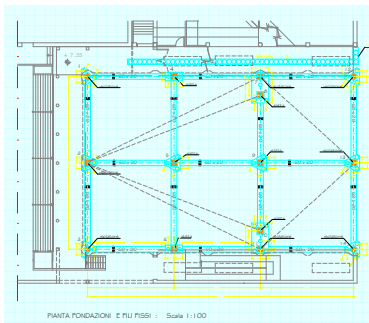
$S_e(T) = 0.11g$  accelerazione spettrale  
 $K_{is} = 10.04 \text{ KN/mm}$  rigidezza del sistema di isolamento

Calcolo dello spostamento di progetto  $S_{dis}(T) = \frac{S_e(T) \cdot M}{K_{dis}} = 10.9 \text{ cm}$

88

## L'isolamento sismico

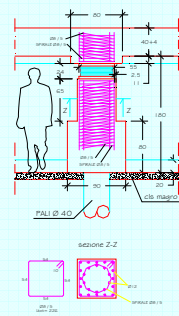
Chiesa B.V.M. del Carmelo a Catania



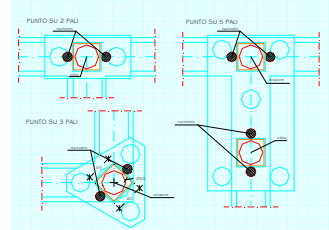
## L'isolamento sismico

Chiesa B.V.M. del Carmelo a Catania

ARMATURA DI FRETTAGGIO  
Scala 1:20



POSIZIONAMENTO MARTINETTI PER IL SOLLEVAMENTO: Scala 1:20



90

## L'isolamento sismico

Chiesa B.V.M. del Carmelo a Catania



## L'isolamento sismico

Chiesa B.V.M. del Carmelo a Catania



92

## ESEMPIO 3 (caso studio)

Edificio in c.a. costruito a Catania nel 1962  
Progetto di adeguamento sismico mediante Isolamento alla base

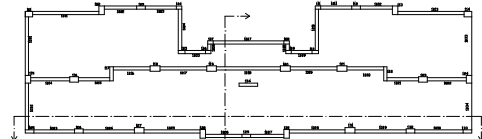


93

## L'isolamento sismico

Edificio in c.a. costruito a Catania nel 1962  
Progetto di adeguamento sismico mediante Isolamento alla base

Il fabbricato presenta una pianta rettangolare allungata con un asse di simmetria nella direzione trasversale, anche se tra le due parti ci sono lievissime differenze strutturali; le dimensioni in pianta sono di 40,65 x 10,9 E' costituito da 8 piani di cui uno scantinato.

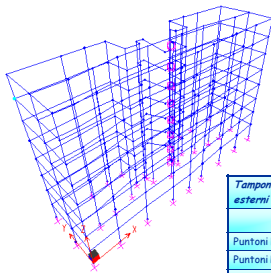


Carpenteria 1° impalcato

94

## L'isolamento sismico

Edificio in c.a. costruito a Catania nel 1962  
Progetto di adeguamento sismico mediante Isolamento alla base

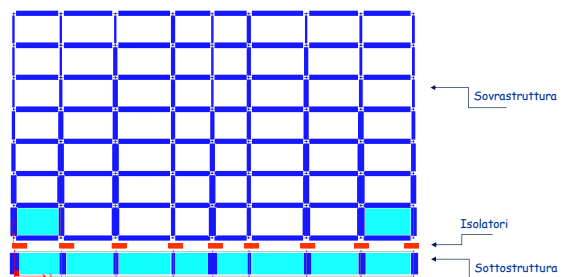


Studiati 5 modelli:  
Telaio MRF  
Puntoni Forati  
Puntoni Pieni  
Pannelli Forati  
Pannelli Pieni

Tamponamenti esterni	Tramezzi interni	$T_1^*$ (s)	$T_1^*$ (s)	$T_1^{*m}$ (s)
		1.90	0.78	1.18
Puntoni Forati	Puntoni Forati	1.27	0.74	0.90
Puntoni Pieni	Puntoni Pieni	0.97	0.53	0.67
Pannelli Forati	Pannelli Forati	0.95	0.54	0.66
Pannelli Pieni	Pannelli Pieni	0.78	0.38	0.56
Pannelli Pieni	Puntoni Forati	0.77	0.69	0.52

## L'isolamento sismico

Edificio in c.a. costruito a Catania nel 1962  
Progetto di adeguamento sismico mediante Isolamento alla base



96



## L'isolamento sismico

Edificio in c.a. costruito a Catania nel 1962  
Progetto di adeguamento sismico mediante Isolamento alla base

Confronto tra la struttura isolata e a base fissa

	$T_1^f$ (s)	Partecipazione	$T_1^i$ (s)	Partecipazione
Base Fissa	0.69	76%	0.77	66.2%
Isolato	2.20	92%	2.20	99.6%

$$T_{iso}/T_f = 3.2$$

$$T_{iso}/T_f = 2.8$$

Elevati rapporti  $T_{iso}/T_f$

Partecipazione quasi totale delle masse



*La struttura si comporta come un corpo rigido*

97