



**ENEA**

AGENZIA NAZIONALE  
PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA  
E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

# IL MIGLIORAMENTO SISMICO DEGLI EDIFICI STORICI: SICUREZZA E CONSERVAZIONE

Ing. Paolo Clemente, PhD



**PREVENZIONE E RIDUZIONE  
DEL RISCHIO SISMICO  
PER LA SICUREZZA DEL TERRITORIO**  
**10 APRILE - 14,30/19,30 - LANCIANO**  
**BPER AUDITORIUM GENNARO PAONE**



ORDINE DEGLI  
INGEGNERI  
DELLA PROVINCIA  
DI CHIETI

# SICUREZZA E PREVENZIONE SISMICA

## Pericolosità sismica

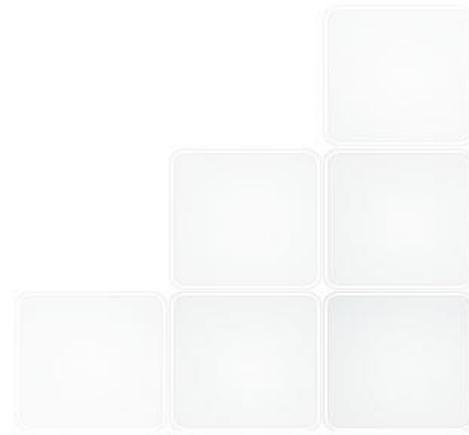
- Azioni sismiche sulle costruzioni
- Amplificazione locale
- Zone a sismicità molto bassa

## Vulnerabilità sismica

- Vita nominale
- Fattore di comportamento

## Applicazione di moderne tecnologie

- Isolamento sismico edifici esistenti
- Isolamento sismico edifici d'interesse storico-artistico



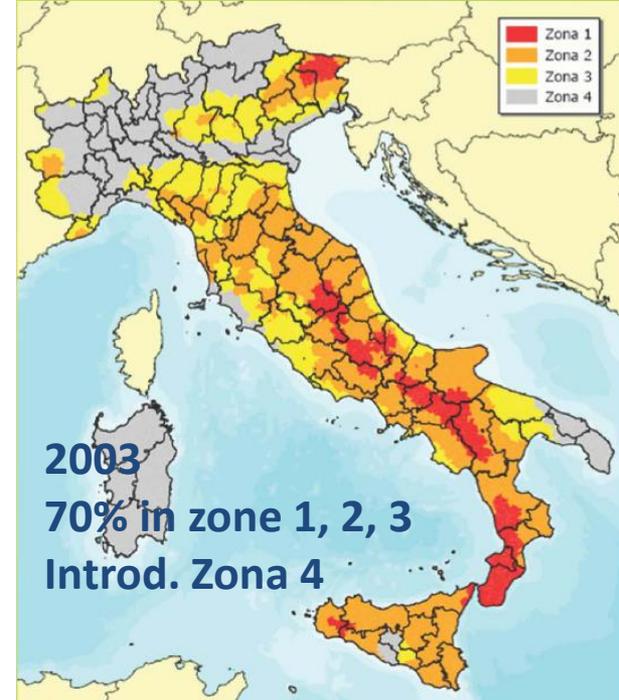
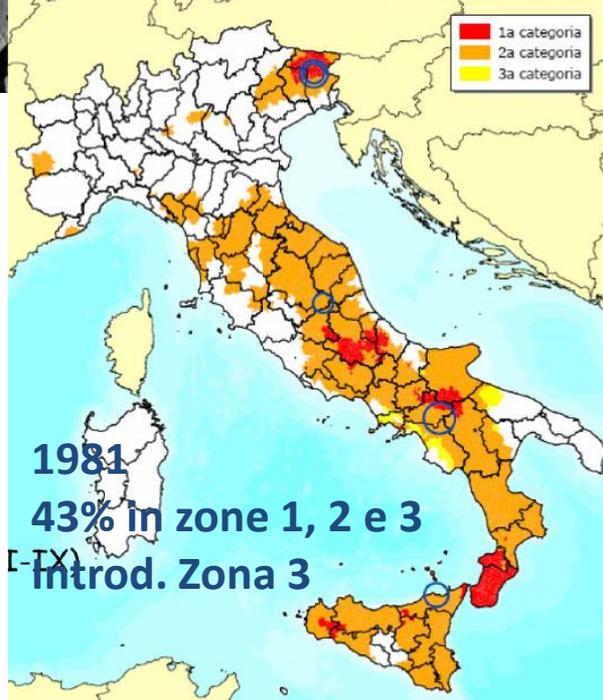
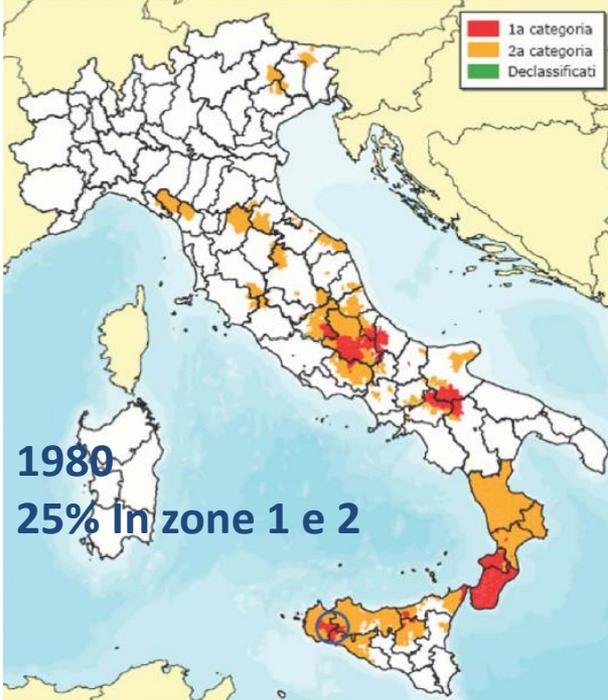
# CLASSIFICAZIONE SISMICA



1908

Terremoto di Messina e Reggio Calabria

Nuove zone classificate solo a seguito di un terremoto



2008: definizione puntuale dei parametri di pericolosità. Scompaiono le zone



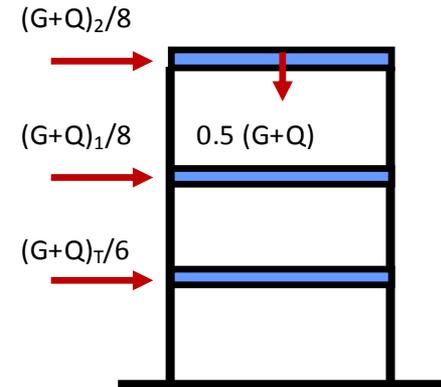
Avezzano - Qui sorgeva l'Albergo Roma

# NORME TECNICHE

**D.L. 5 novembre 1916 (TU) n. 1526**

forze statiche simulanti l'azione sismica

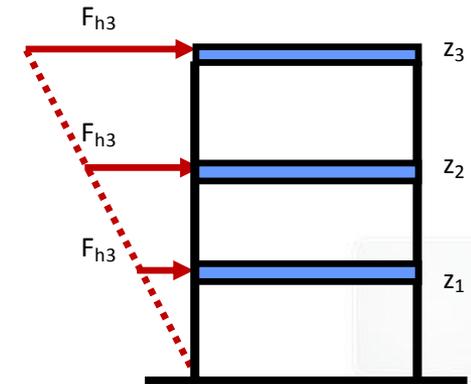
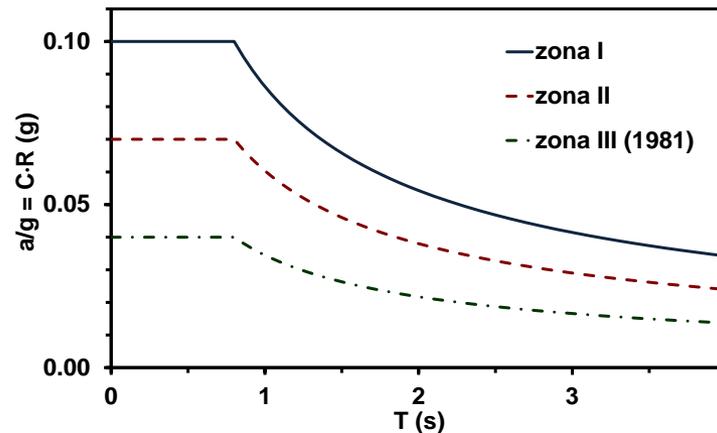
(G = carichi permanenti,  
 Q = carichi variabili)



**D.M. LL.PP. 03/03/1975**

**Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche**

Prima normativa di moderna concezione (a seguito della Legge 2 febbraio 1974, n. 64, Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche)



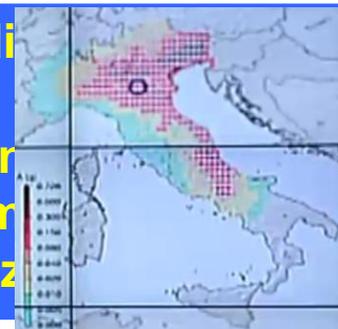
$$F_{hi} = C \cdot R \cdot \varepsilon \cdot \beta \cdot \gamma_i \cdot W_i$$

**63.8% delle abitazioni in Italia costruito prima del 1971** (dati ISTAT)

non rispondono, nominalmente, a criteri di sicurezza sismica

# PREVISIONE DEI TERREMOTI

| Interv.            | Tempo                           | Utilità  | Commenti   |
|--------------------|---------------------------------|--|--|
| <b>Brevis-simo</b> | <b>pochi sec/min</b>            | <b>early warning per impianti RIR, treni AV, ...</b>                             | <b>Possibile ma non utile in Italia</b>  |
| <b>Breve</b>       | <b>poche ore ÷ qualche mese</b> | <b>preparare le risorse per emergenza e l'evacuazione</b>                        | <b>Al momento non siamo in grado di fare ciò</b>   |
| <b>Medio</b>       | <b>qualche anno</b>             | <b>individuare aree dove intervenire prioritariamente per ridurre il rischio</b> | <b>Esperimenti di aree di grandi tempi lunghi, non utilizzabili al momento per scopi di protezione</b> |
| <b>Lungo</b>       | <b>decine di anni</b>           | <b>ridurre vulnerabilità e esposizione, preparare le popolazioni</b>             | <b>Le mappe di pericolosità ci danno questa informazione</b>   |



Per salvare vite umane

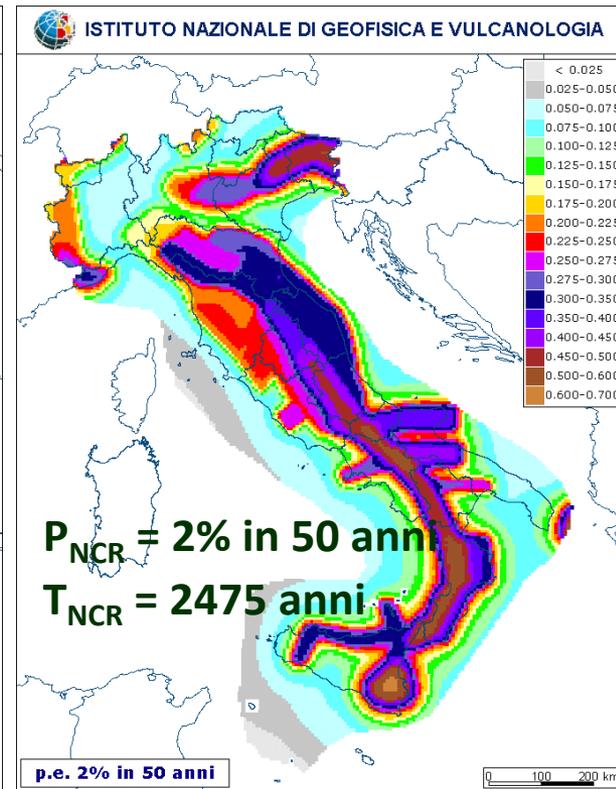
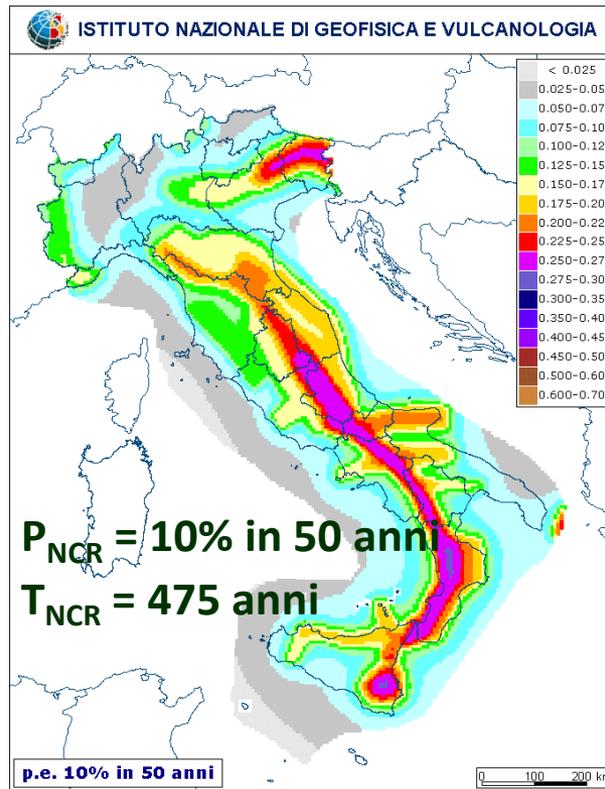
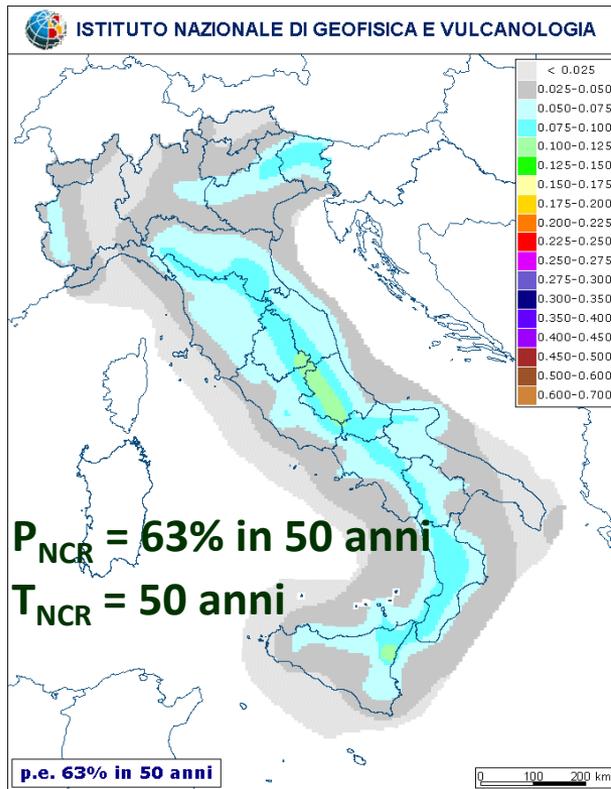


costruire edifici antisismici

# PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE

PGA: per ciascun sito in funzione della prob. di superamento  $P_{NCR}$  in 50 anni

$P_{NCR}$  è correlata al periodo di ritorno  $T_{NCR}$

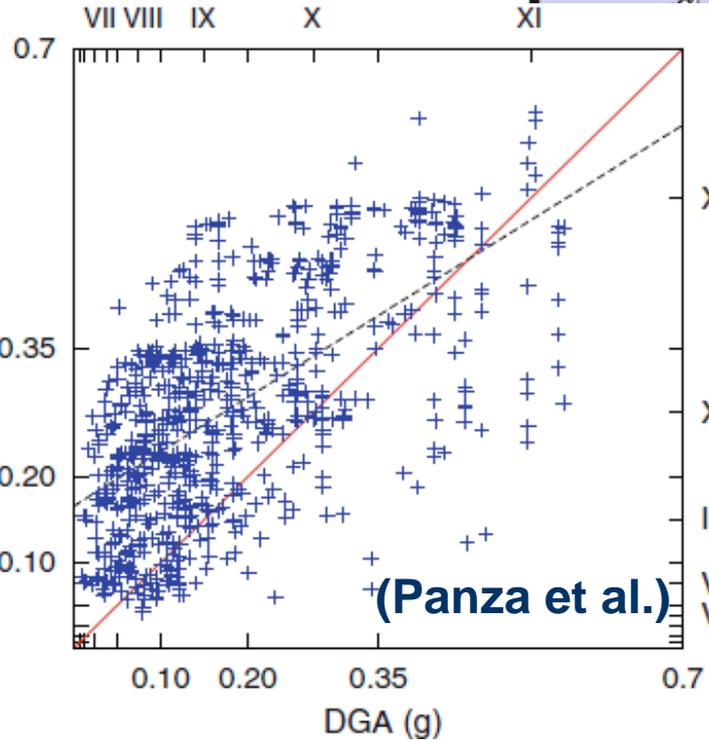
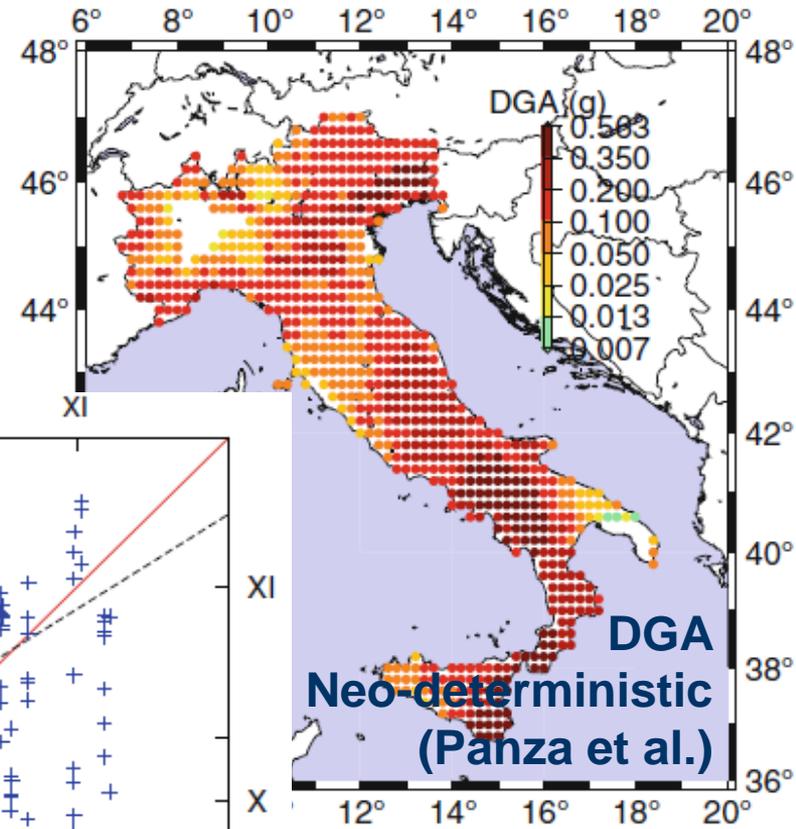
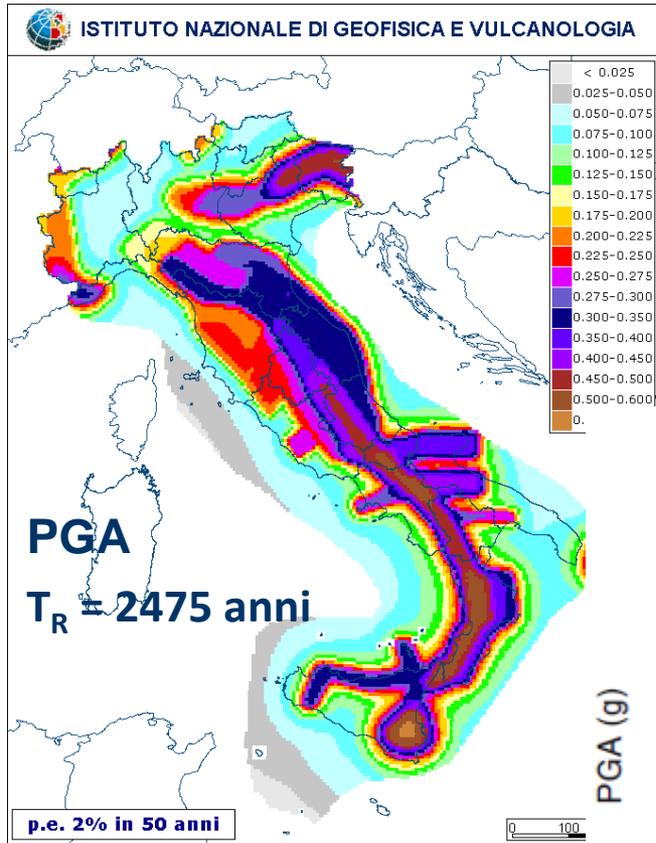


PSHA: insieme di mappe ciascuna per un  $T_{NCR} \leq 2475$  anni ( $P_{NCR} \geq 2\%$ )

Tempo di osservazione  $T_0$  dovrebbe essere  $\gg T_{NCR}$ : ma  $T_0 = 1000 \div 2000$  anni

L'estrapolazione a periodi maggiori tiene conto delle incertezze

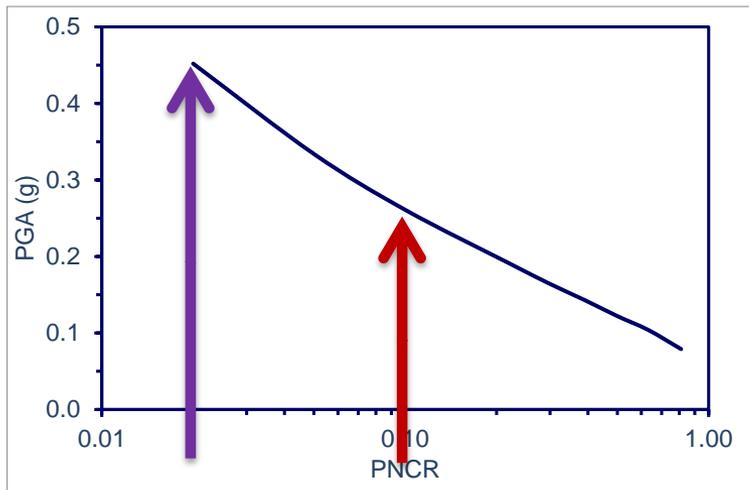
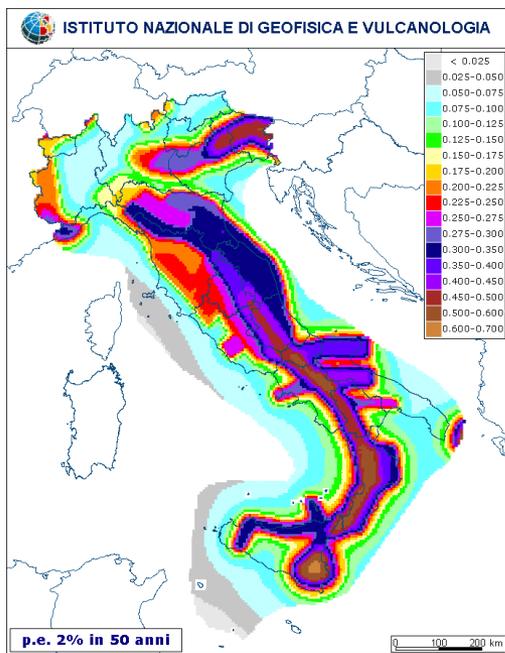
# PGA - DGA



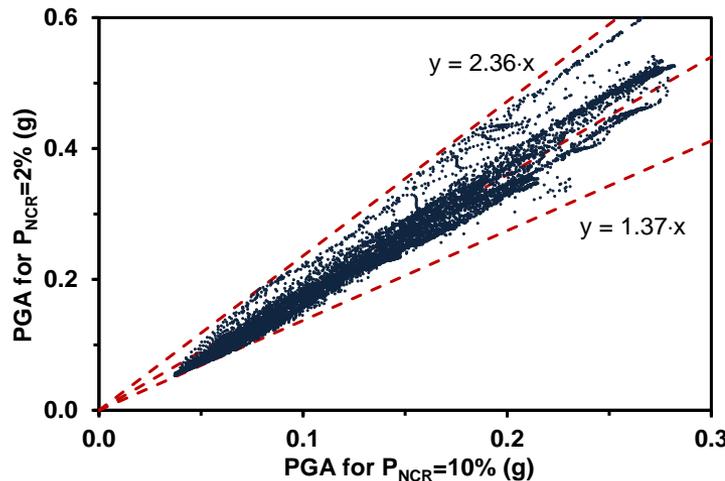
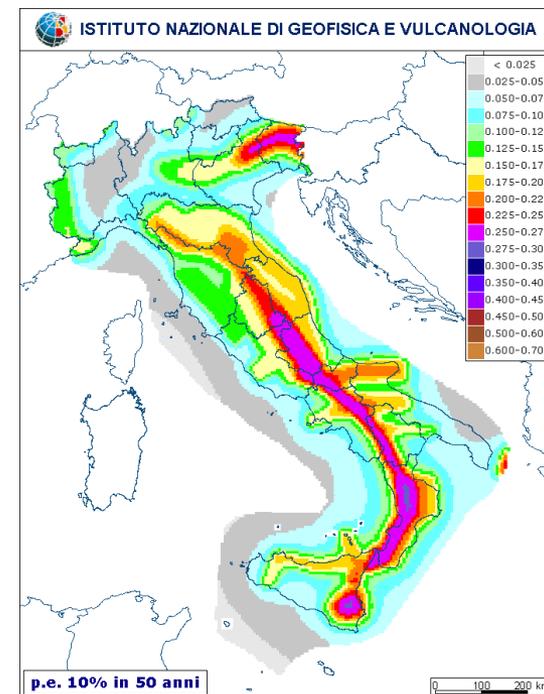
Quasi ovunque  
**PGA > DGA**

# TERREMOTO DI PROGETTO

$P_{NCR} = 2\%$  in 50a



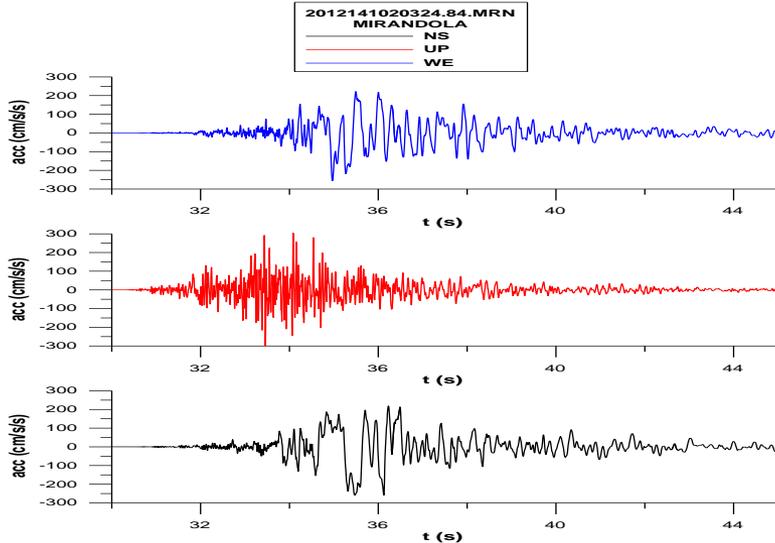
$P_{NCR} = 10\%$  in 50a



**Scelta ingegneristica:**  
**Scelta politica:**

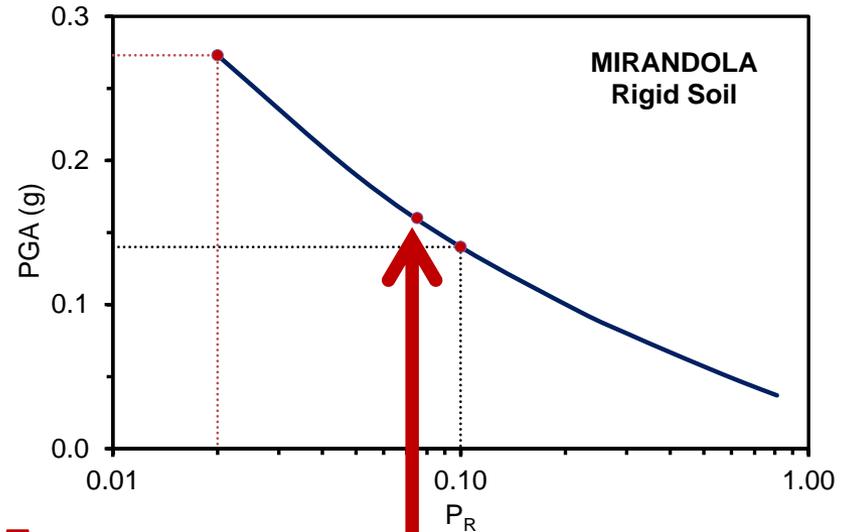
comportamento strutturale e duttilità  
 quanto possiamo investire sulla nostra sicurezza?

# IL “PICCO DELLA MIRANDOLA”



**PGA = 0.265g in superficie**

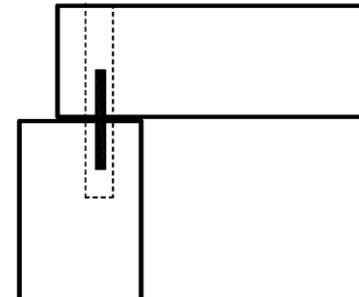
**S = 1.7**



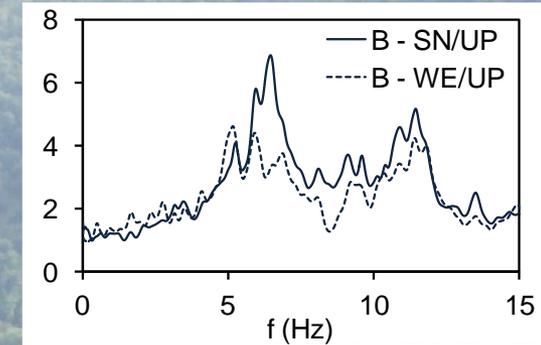
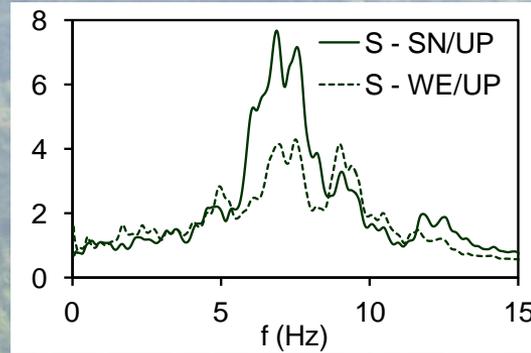
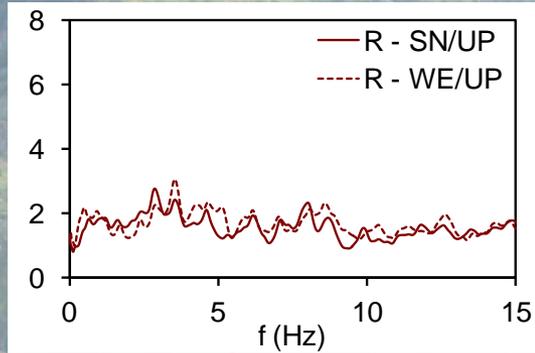
**PGA = 0.16g al bedrock**



- Edifici esistenti: non antisismici
- Edifici industriali: labili per azioni orizzontali



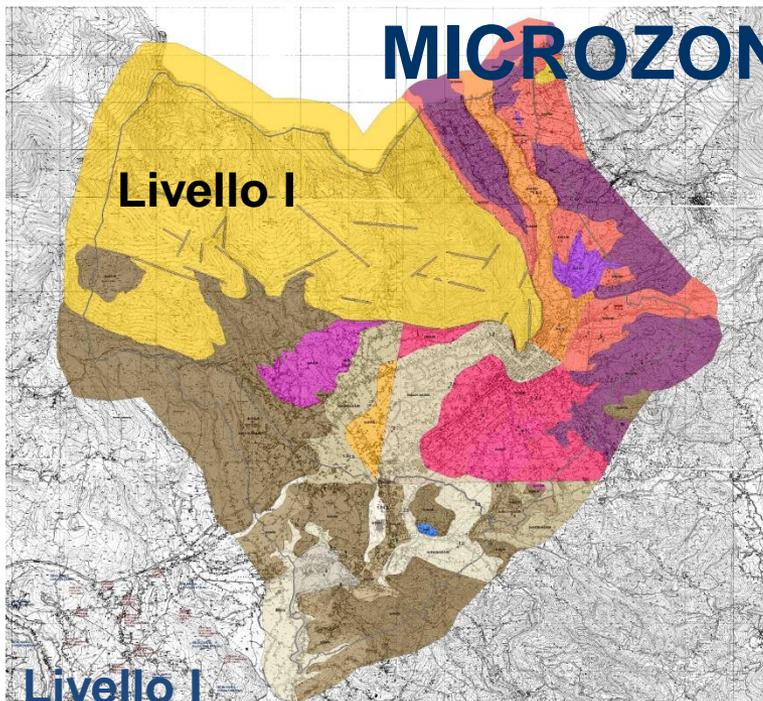
# RISPOSTA SISMICA LOCALE



**Ai 3 siti si hanno differenti risposte allo stesso evento sismico**

**Array velocimetrico a Belmonte Castello (FR): Receiver Functions di registrazioni di aftershocks del sisma dell'Aquila, 2009**

# MICROZONAZIONE SISMICA



## Definizione MOPS:

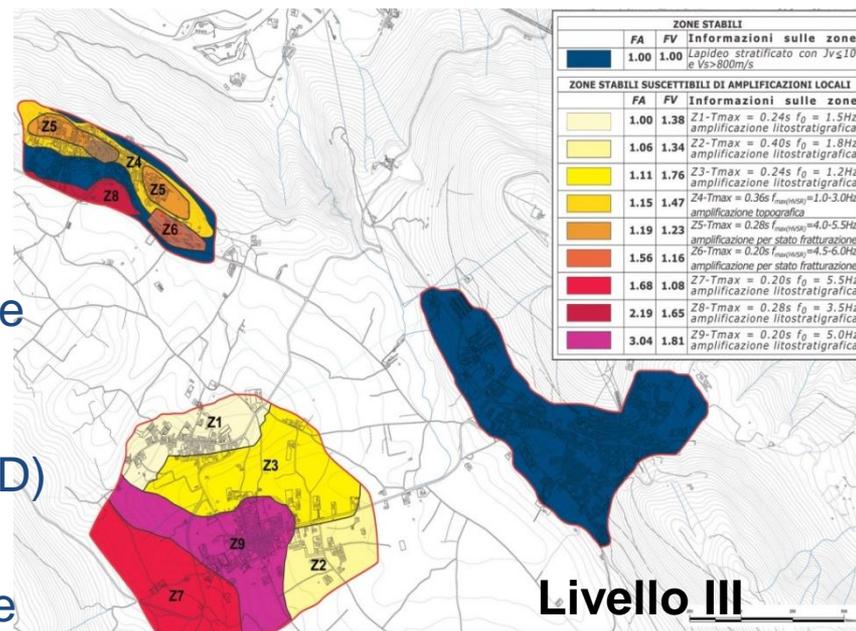
microzone omogenee in prospettiva sismica (amplificative e non)

- Scelta siti per nuovi impianti
- Definizione priorità di intervento sugli esistenti

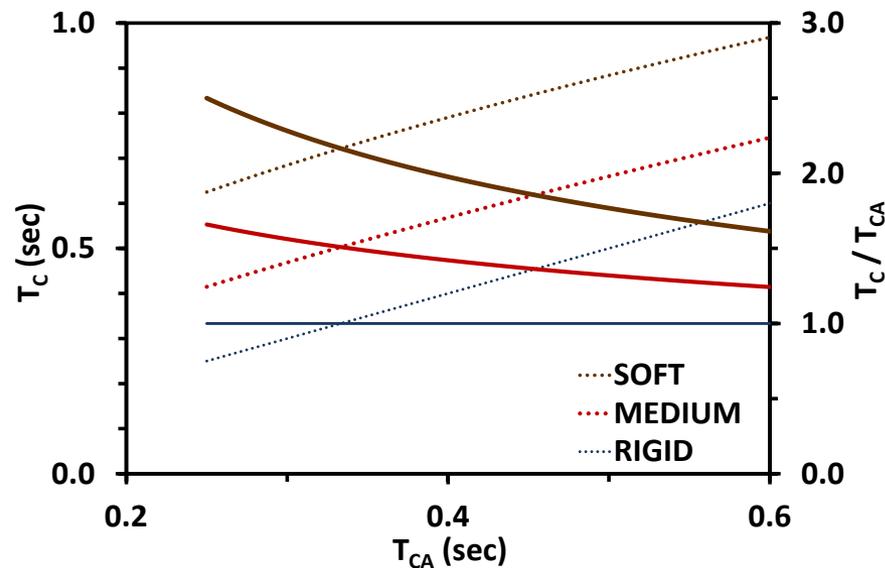
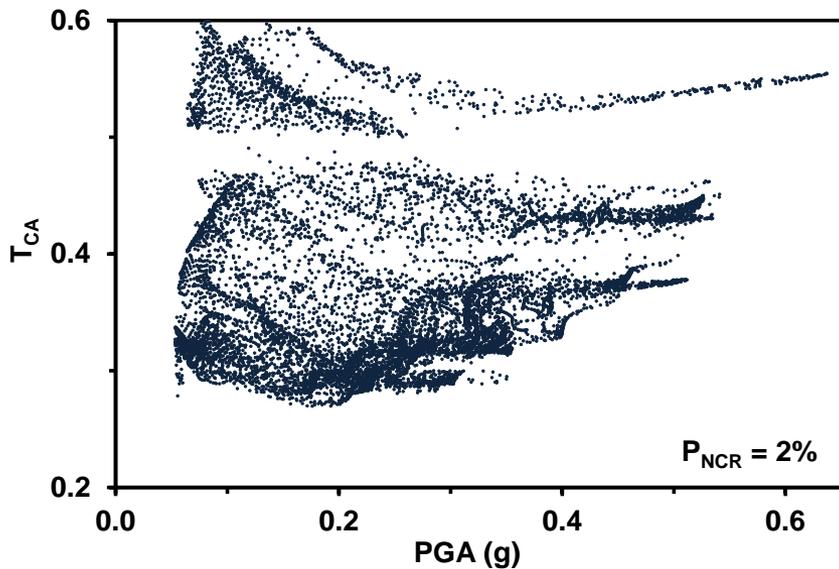
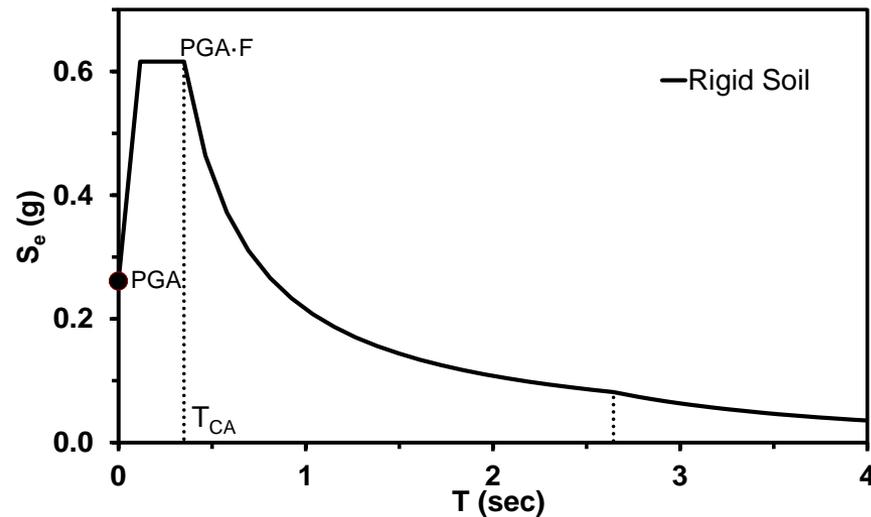
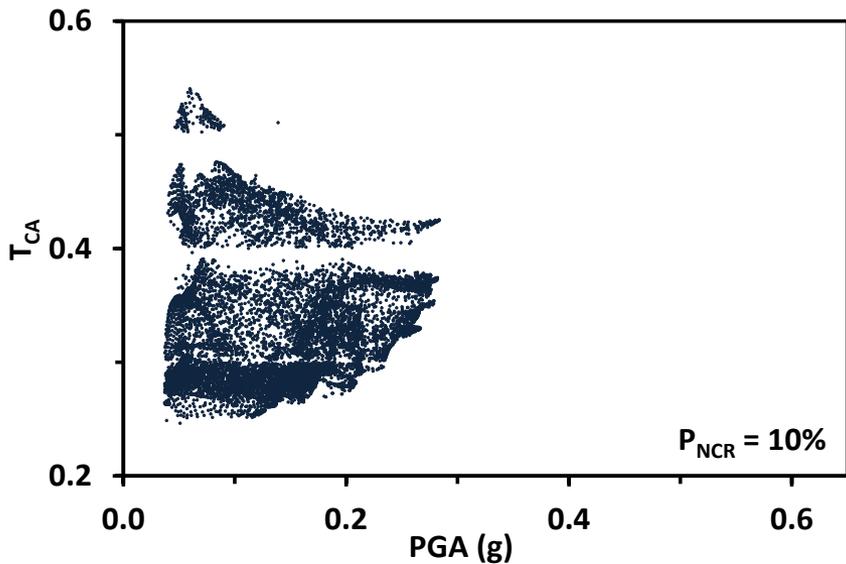
- Zone instabili
- Zone stabili (pianeggianti,  $V_{S30} > 800$  m/s)
- Zone stabili ma suscettibili di amplificazione

**Livello II:** coefficienti di amplificazione attraverso abachi (situazioni semplici 1D)

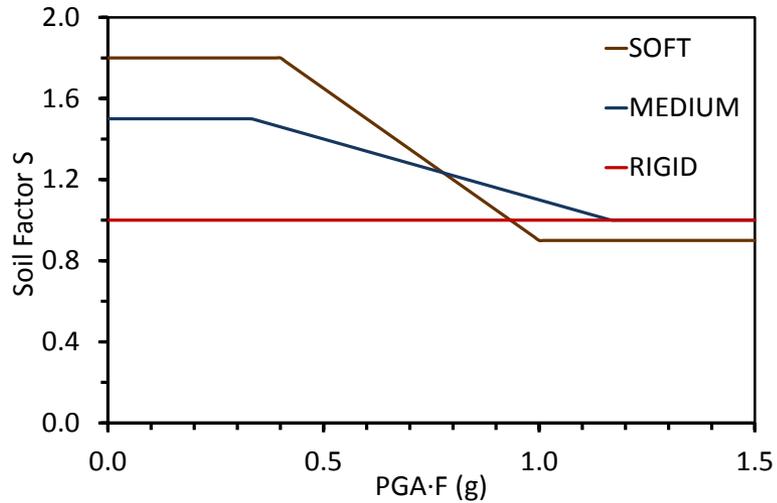
**Livello III:** coefficienti di amplificazione attraverso misure in sito e modellazione



# EFFETTI LOCALI: $T_{CA} - T_C$

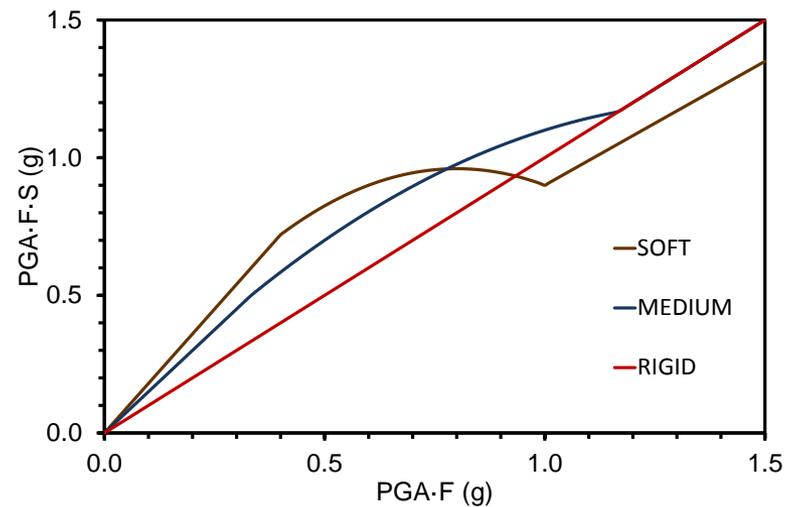


# EFFETTI LOCALI: S

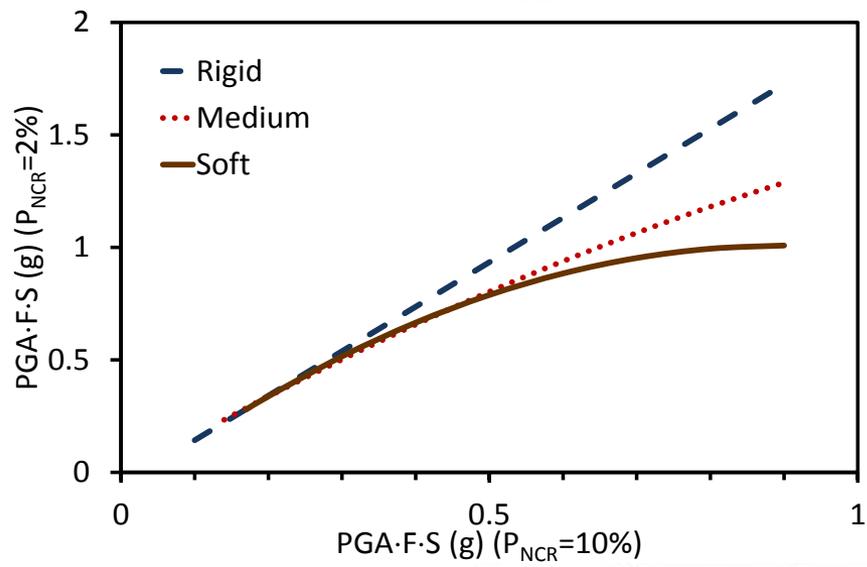
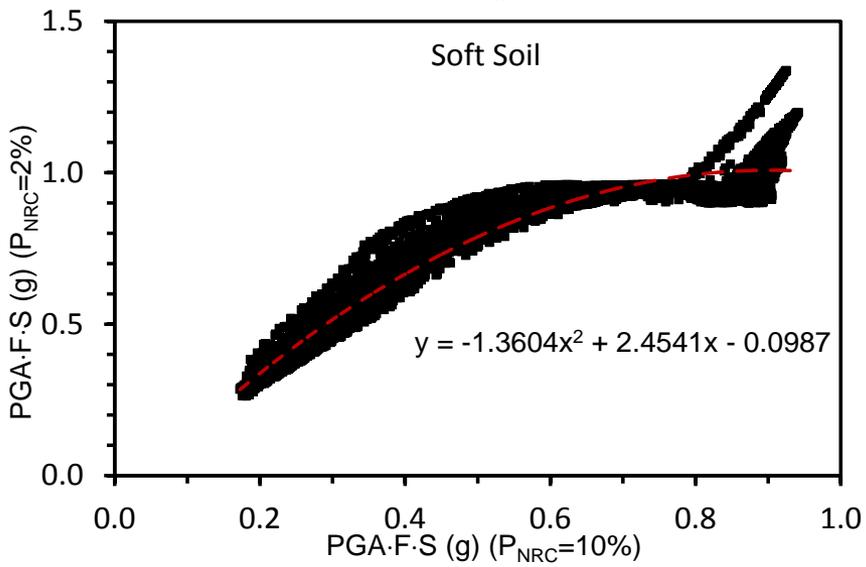
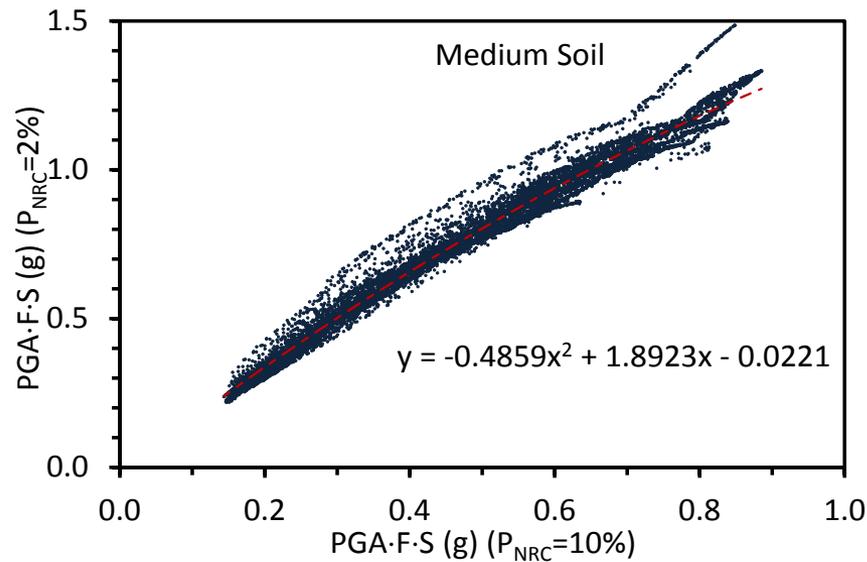
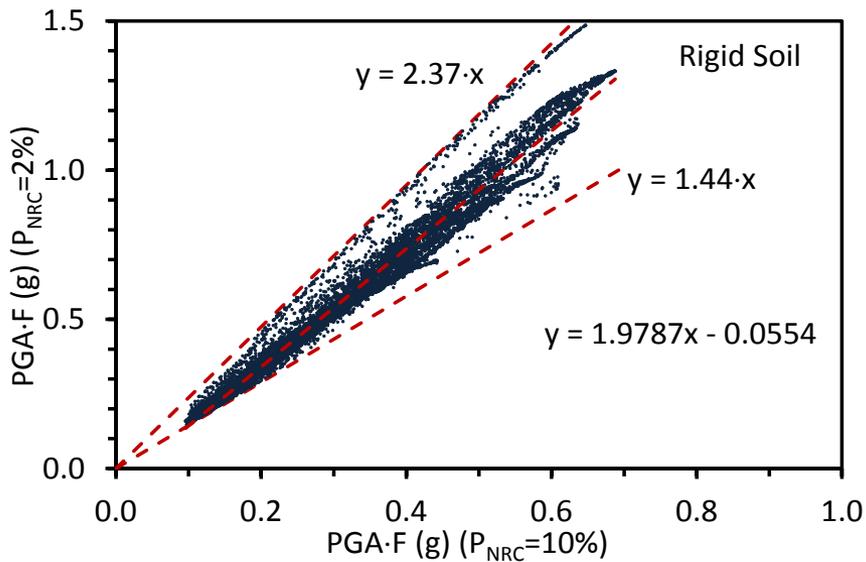


$PGA \rightarrow PGA \cdot S$

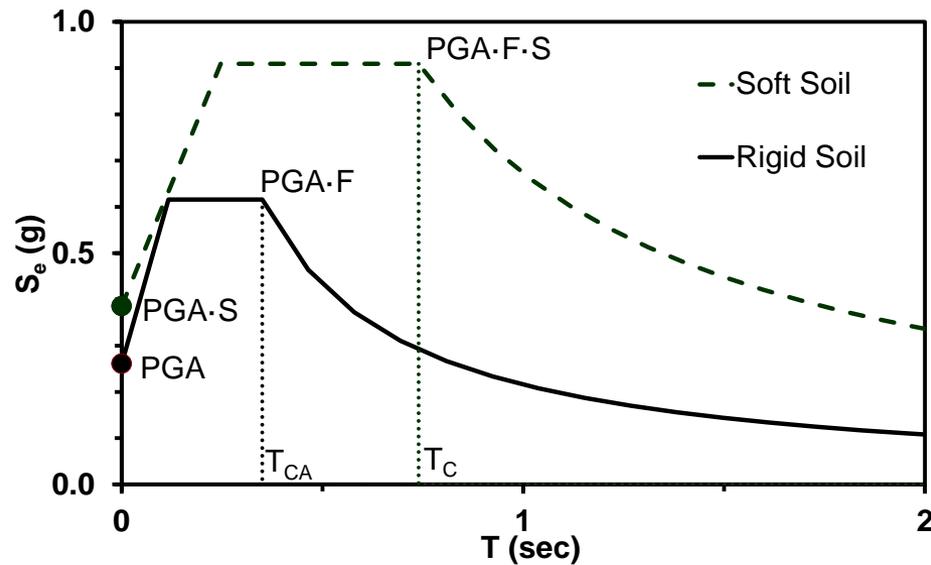
$PGA \cdot F \rightarrow PGA \cdot F \cdot S$



# PGA · F · S



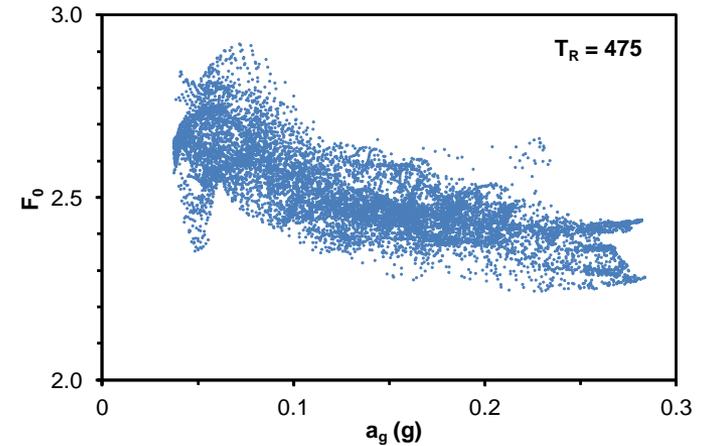
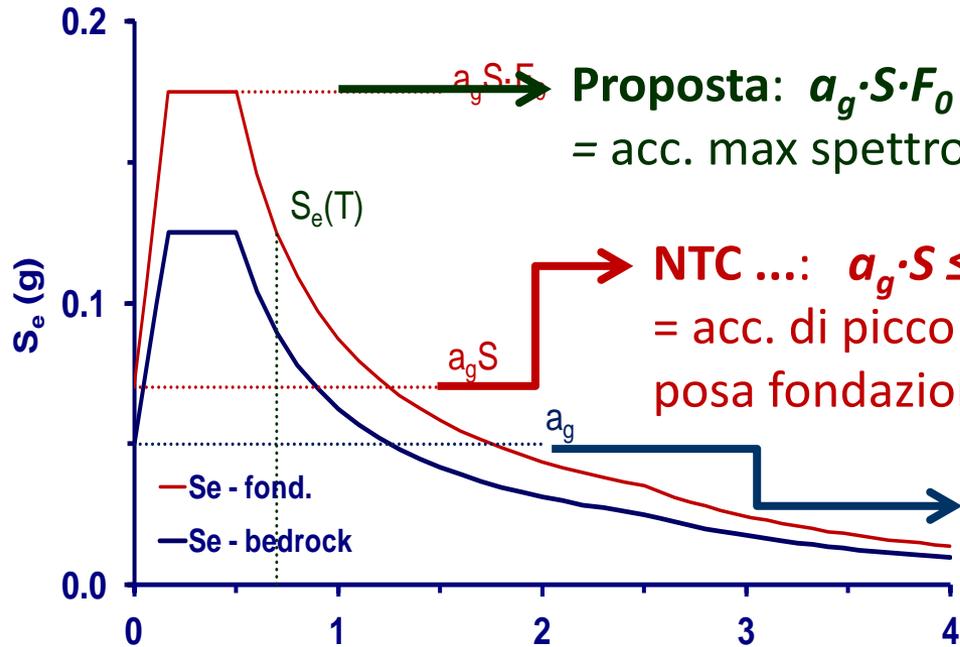
## EFFETTI LOCALI: S



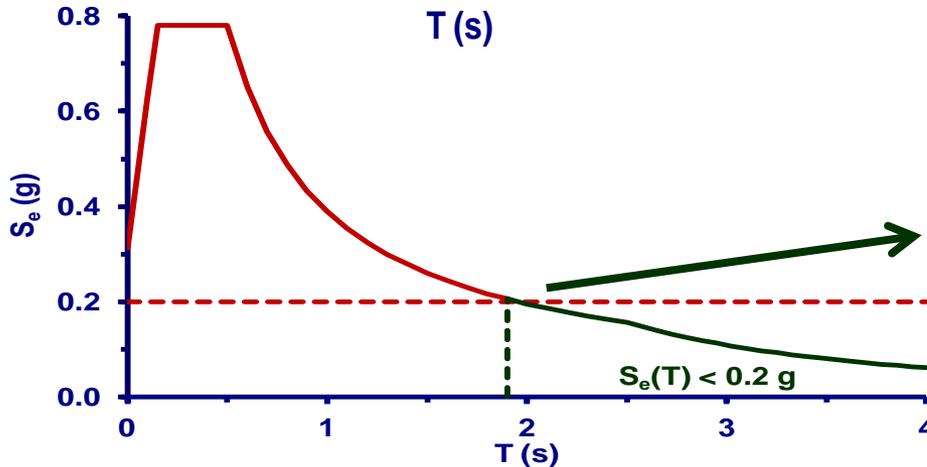
### Effetti locali

- determinano ampie variazioni del moto al suolo
- **tali variazioni possono essere molto più significative** delle differenze tra PGA e DGA

# ZONE A SISMICITÀ MOLTO BASSA

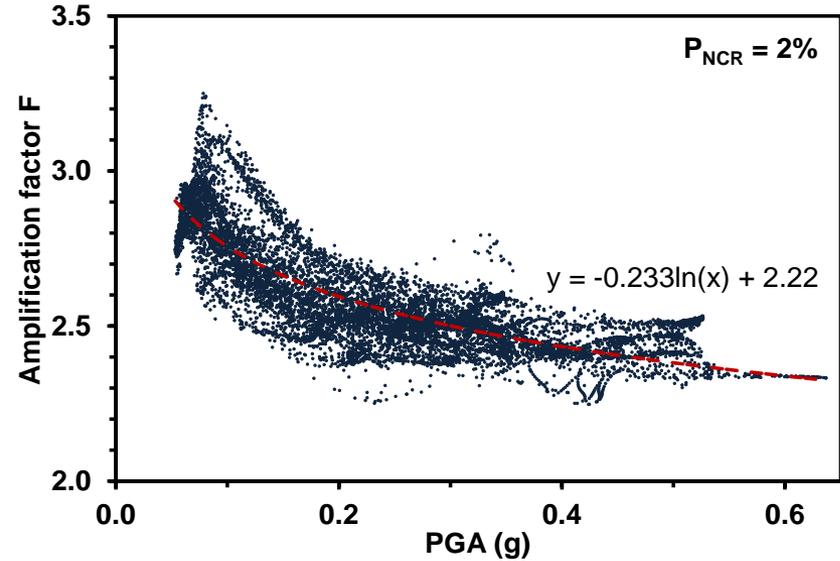
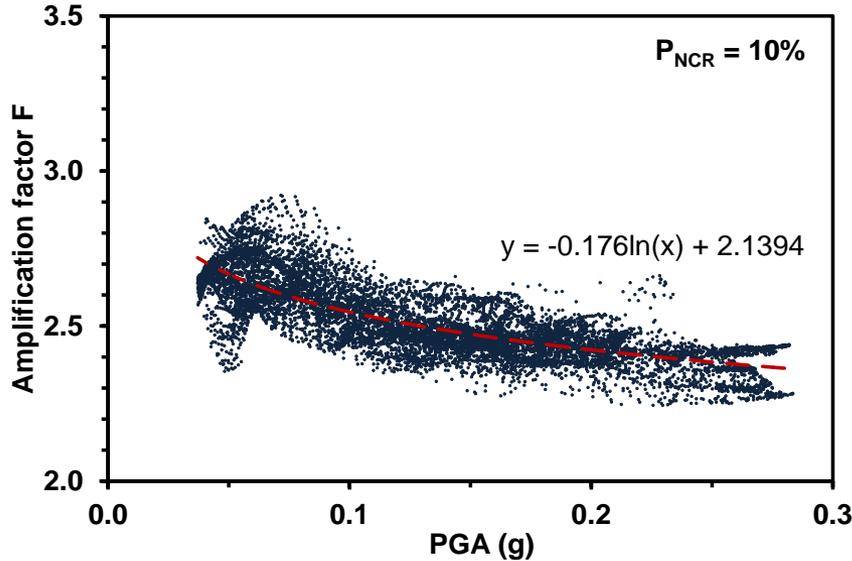


**NTC 2008:  $a_g \leq 0.05 g$  ( $P_{NCR}=10\%$ )**  
 = acc. di picco al bedrock



**Strutture poco sensibili ai terremoti al sito:  $S_e(T) \leq 0.20g$**   
 (dipende anche dalla struttura e vale soprattutto per strutture isolate)

# ZONE A SISMICITÀ MOLTO BASSA: F



Valori riferiti a  $P_{NCR} = 2\%$

$a_g \leq 0.10 g$  ( $P_{NCR} = 2\%$ ) = acc. di picco al bedrock

$a_g \cdot S \leq 0.15 g$  = acc. di picco al piano posa fondazioni

$a_g \cdot S \cdot F_0 \leq 0.40 g$  = acc. max spettro

$S_e(T) \leq 0.40g$  = dipende dalla struttura

# TERREMOTO DI PROGETTO

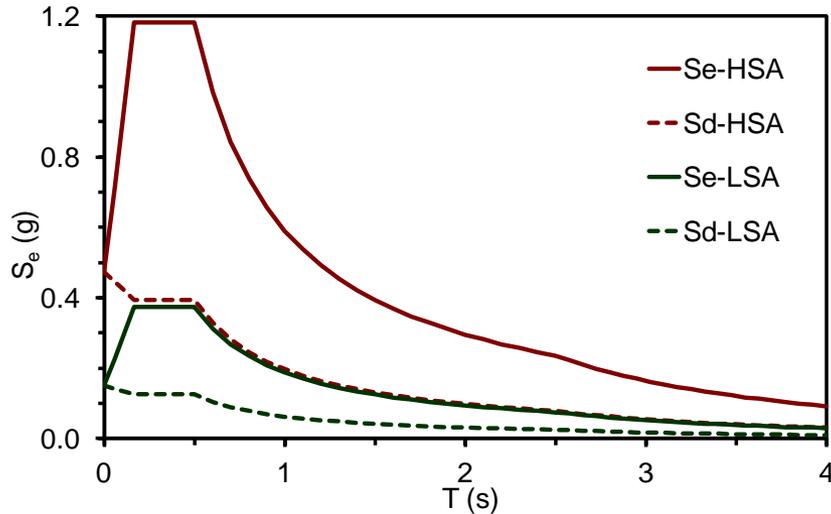
Intensità sismica ( $T_{NCR}$ ) correlata a:

- **Vita nominale  $T_L$**
- **Importanza della struttura** (i.e., alle conseguenze di un suo collasso)
  - **Fattore di importance  $\gamma_1$  PGA** (eurocodice)
  - **Fattore d'uso  $C_u$**  che amplifica la vita nominale  $T_L$  (norme italiane)

Considerazioni:

- ❖ **Vita nominale:** è un concetto architettonico relativo alla idoneità della struttura di svolgere le funzioni per cui è stata progettata
- ❖ **Sicurezza:** non deve dipendere da  $T_L$
- ❖  $T_L = 50 - 100$  anni: è comparabile o maggiore dell'attesa di vita delle persone
- ❖  $T_L$  è già correlata all'importanza di una struttura (es. ponti di grande luce)

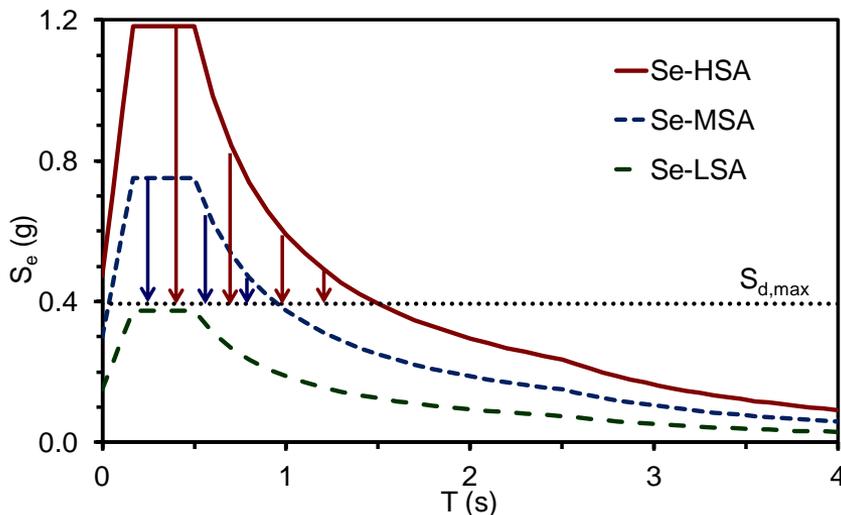
# DUTTILITÀ



Non è possibile progettare in campo elastico in zone ad elevata sismicità (HSA)  $\rightarrow q$

$$S_d(\text{HSA}) > S_e(\text{LSA})$$

In zone a bassa sismicità (LSA) si può progettare senza affidarsi alla duttilità



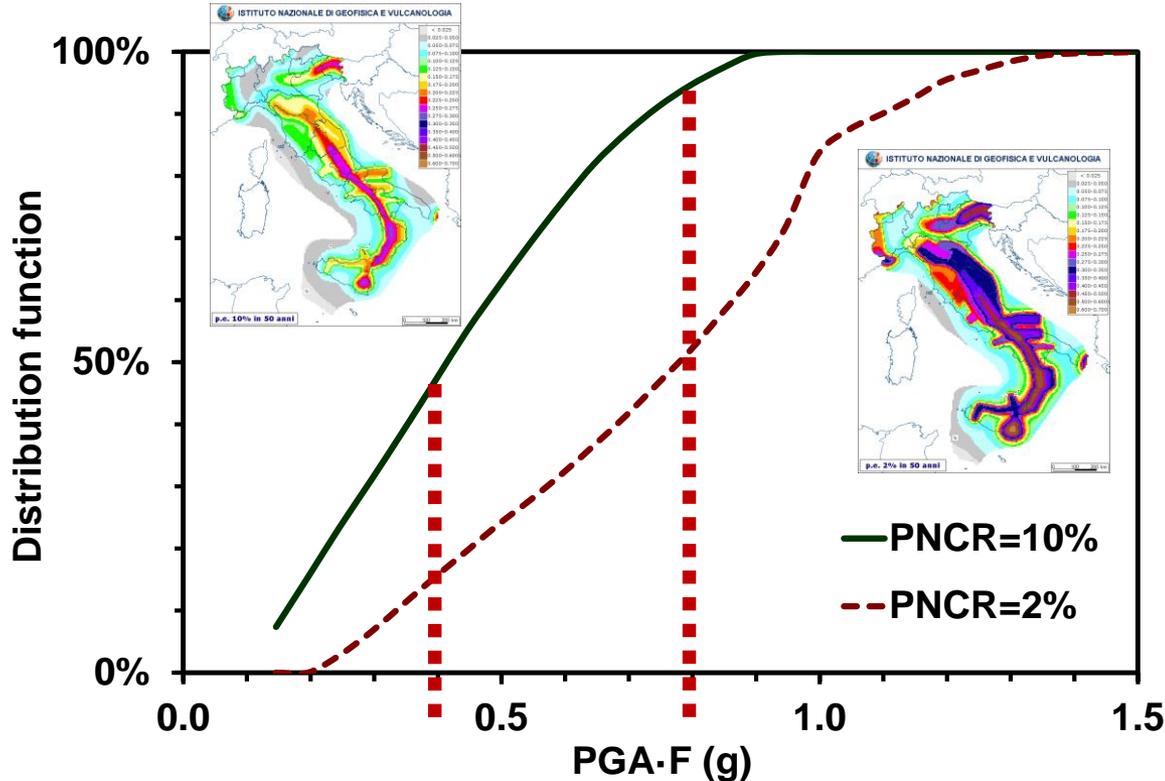
**Fissato  $S_{d,max}$  (=0.4g)**

(valore massimo accettabile, sulla base di considerazioni economiche e di funzionalità)

$$\text{se } S_e > S_{d,max} \rightarrow S_d = S_{d,max}$$

con  $q = S_e / S_{d,max}$  minimo necessario

# STATI LIMITE E FATTORE DI COMPORTAMENTO



Proposta:

**SLU:**

$P_{NCR} = 2\%$  in 50 anni  
 (ovunque)

**SLD:**

$S_e = S_{e,max}$   
 = f (materiali e tipologia)

**Obiettivo:** SLD con  $P_{NCR} = 10\%$  in 50 anni  $\rightarrow q_{max} \approx 2$

**Zona ad altissima sismicità:** limiti sulle dimensioni e/o moderne tecnologie

# EDIFICI STORICI

- Progettati senza tener conto della azioni sismiche
- Vulnerabili anche ad azioni sismiche moderate
- Caratterizzati da:
  - Forma irregolare, sia in pianta che in elevazione
  - Connessioni non efficaci tra le pareti
  - Solai non rigidi nel loro piano
  - Fondazioni superficiali
- Adeguamento sismico delicato:
  - Grado di sicurezza elevato per la presenza di numerosi turisti
  - Preservare caratteristiche originali, identità e valore storico



# COME VALUTARE LA SICUREZZA ?

**La valutazione non può basarsi su un  
semplice esame visivo**

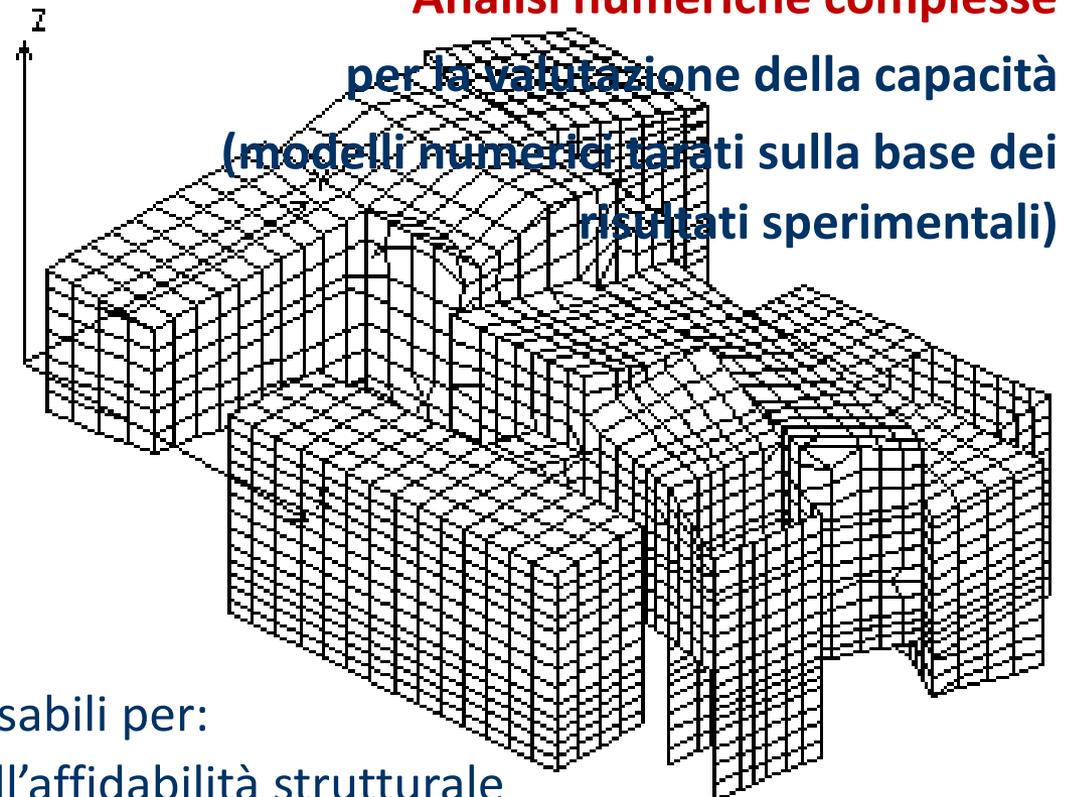


**Analisi sperimentali**

- sui materiali (effettive resistenze)



- sulle strutture (effettivo comportamento statico e dinamico)



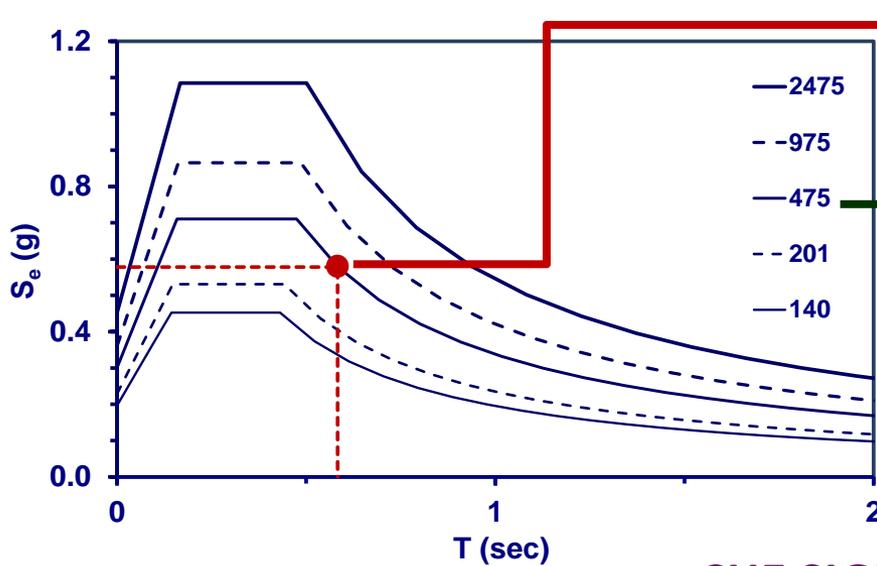
**Analisi numeriche complesse  
per la valutazione della capacità  
(modelli numerici tarati sulla base dei  
risultati sperimentali)**

**Operazioni costose** ma indispensabili per:

- Diagnosi: valutazione dell'affidabilità strutturale
- Terapia: definizione degli eventuali interventi

# VITA NOMINALE DI UN EDIFICIO STORICO

Procediamo al contrario:



Capacità sismica  $\rightarrow S_e (T)$

Spettro per tale punto e, quindi,  $T_{NCR}$  del sisma che metterebbe in crisi la struttura

da  $T_{NCR}$ , fissato  $C_U$ , deduciamo  $T_L$

CHE SIGNIFICA ????

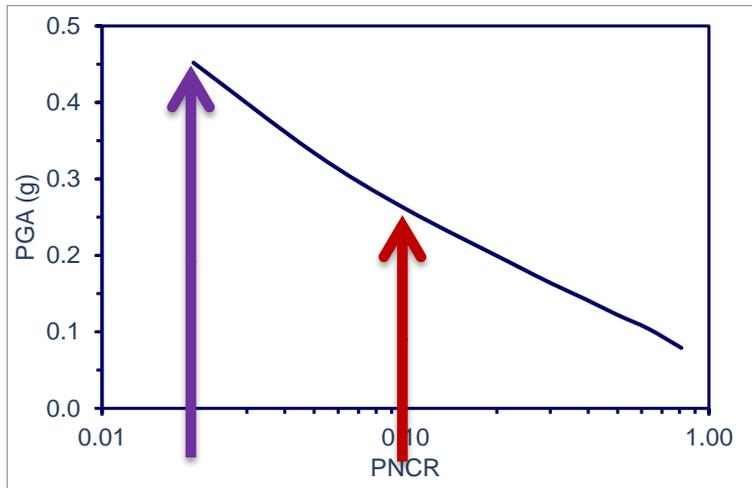
Supponiamo  $T_L = 30$  anni:

**Caso A:** nei prossimi 30 anni si verifica un terremoto distruttivo  $\rightarrow$  la natura avrà accorciato la vita all'edificio

**Caso B:** nei prossimi 30 anni la struttura non subisce danni né degrado  $\rightarrow$  si prolunga la vita per altri 30 anni e così via fino al verificarsi del caso A

ASSURDO !!!

# ADEGUAMENTO O MIGLIORAMENTO ?



## Miglioramento sismico

aumento della capacità sismica rispetto allo status quo

## Adeguamento sismico

conferimento della capacità sismica prevista per le nuove costruzioni (concetto relativo alle attuali norme per le costruzioni)

**Miglioramento** (in % di adeguamento) → Non soddisfacente se < 100%

**Adeguamento** (alle norme attuali) → Non garantisce la sicurezza

**Edifici esistenti** →  $T_L$  ridotta ???

# TECNICHE TRADIZIONALI E INNOVATIVE

## Tecniche tradizionali non adatte per adeguamento sismico edifici storici:

- Incremento di resistenza e duttilità
- Irreversibili
- Materiali diversi e incompatibili
- Concezione strutturale originaria
- Possono solo evitare il collasso
- Non possono evitare gravi danni

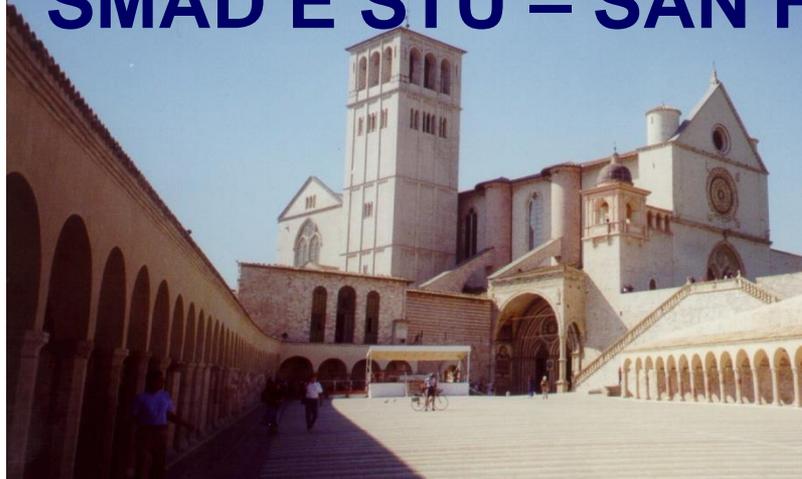


## Le moderne tecnologie, invece:

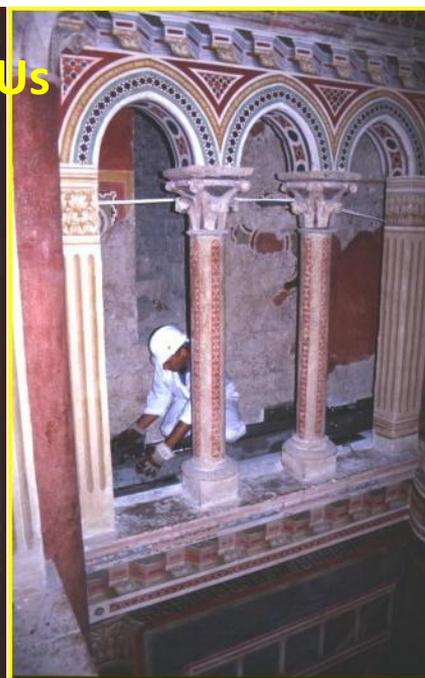
- Riduzione azione sismica
- No danni anche per eventi violenti
- Scarsa interferenza con la struttura

Paolo Clemente – Il miglioramento sismico degli edifici storici: sicurezza e conservazione

# SMAD E STU – SAN FRANCESCO DI ASSISI (1999)



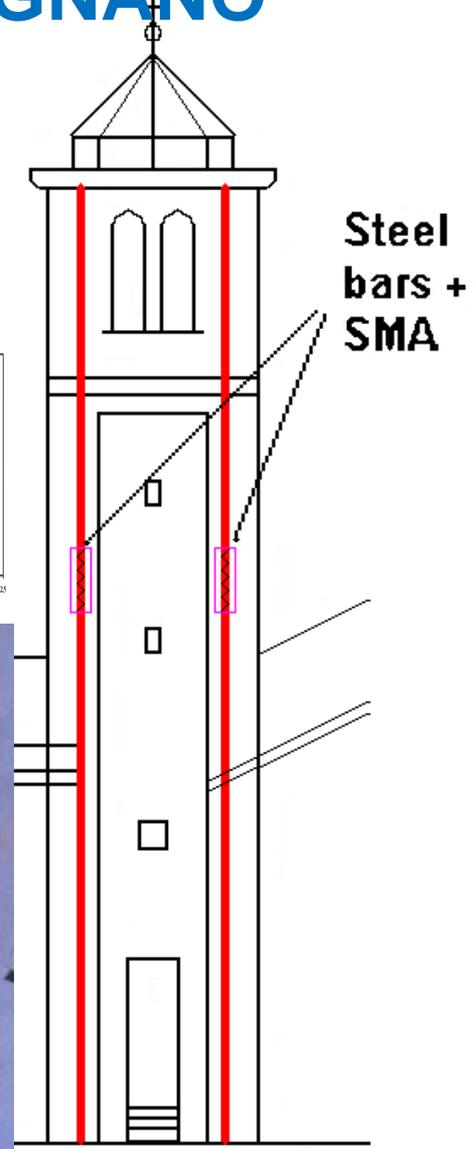
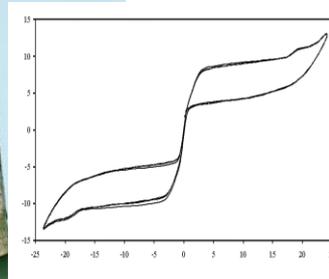
34 STUs



47 SMADs

# CAMPANILE DI S. GIORGIO IN TRIGNANO

Gravemente danneggiato dal sisma di Reggio Emilia del 1996

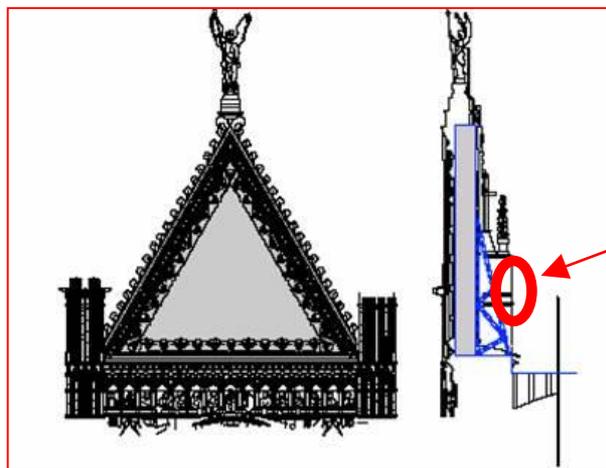


# DISSIPAZIONE DI ENERGIA



**Santa Maria di Collemaggio a L'Aquila: dissipatori elasto-plastici in copertura**

**Duomo di Siena: dissipatori viscosi per impedire il ribaltamento della facciata**



# RETROFIT DI EDIFICI STORICI CON ISOLAMENTO SISMICO

**Salt Lake City & County Bldg. (1894)  
retrofit in 1989, 447 LRBs & LDRBs,  
cost=4.4 MUS\$**



**Wellington Parliament, built in 1921 (retrofit with  
LRBs in 1992-93)**

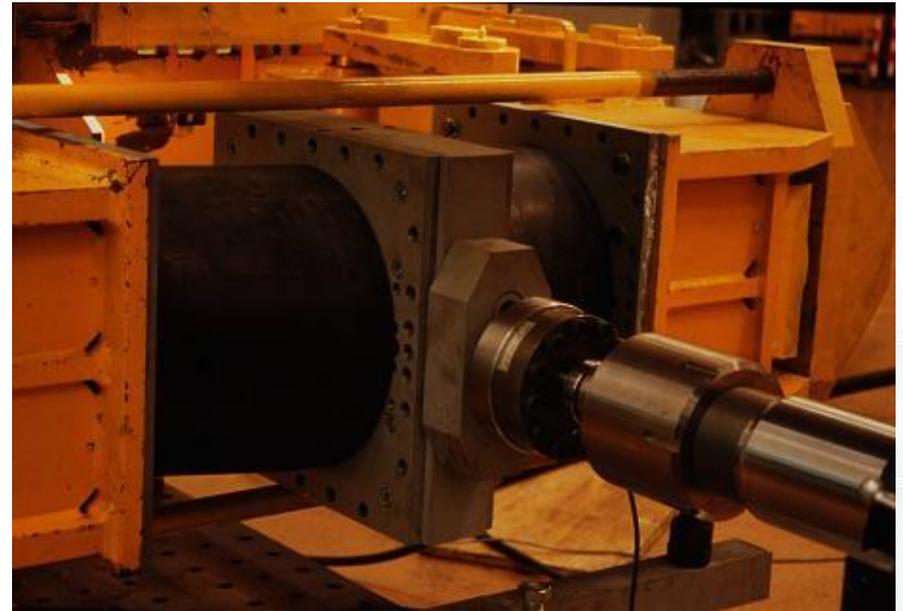
**Asian Art Museum, San  
Francisco (HDRBs)**



**National Western Art Museum  
(Le Corbusier), Tokyo  
Retrofit with sub-foundation (1999)  
1<sup>st</sup> retrofit of museums with I.S.)**

# AKROTIRI EXCAVATIONS, SANTORINI ISLAND, GREECE

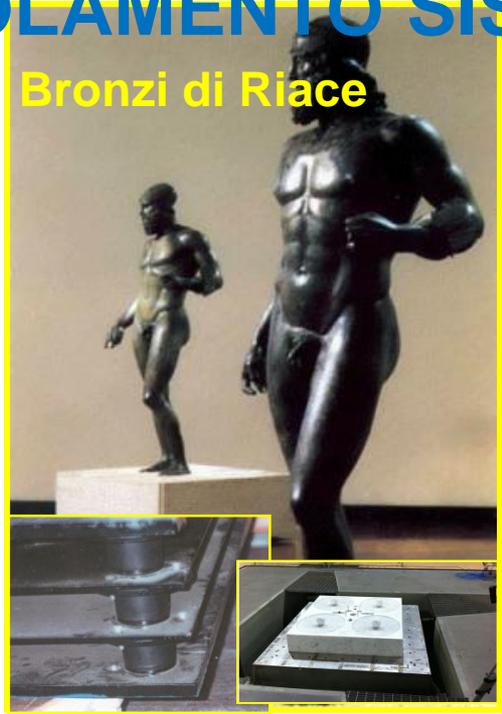
Spatial structure (11,800 m<sup>2</sup>) supported by 94 steel columns on 94 LRBs (2003)



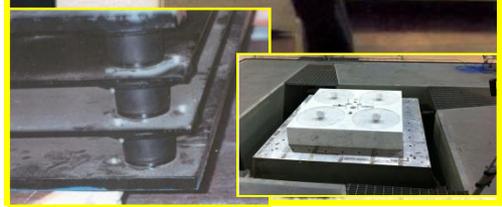
# ISOLAMENTO SISMICO DI STATUE



Imperatore Germanico, Perugia



Bronzi di Riace



Satiro Danzante di Mazara del Vallo



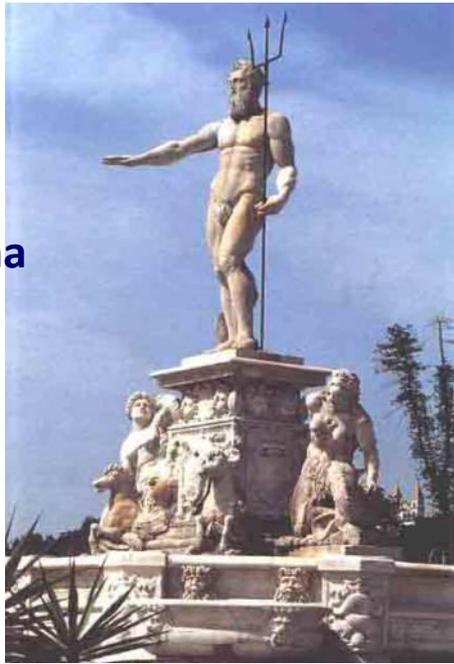
Guerriero di Capestrano (G8 Summit, 2009, L'Aquila)



Copie di Scilla e Nettuno, Messina



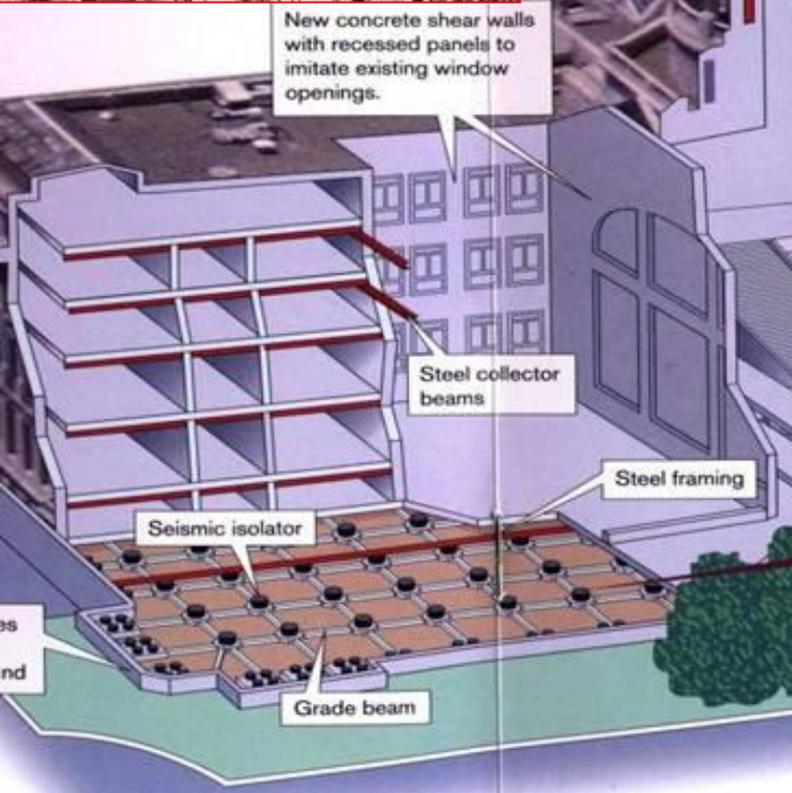
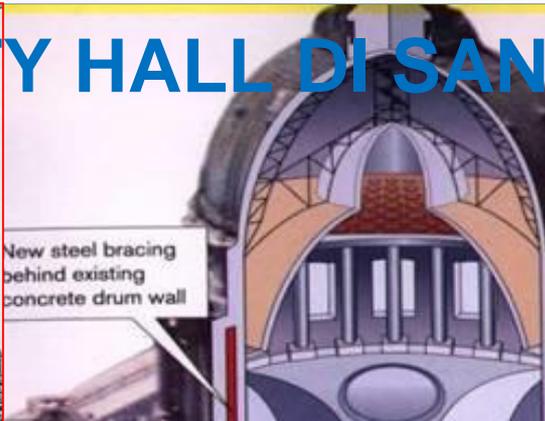
SMAD + SD



Statua in China

**Paolo Clemente – Il miglioramento sismico degli edifici storici: sicurezza e conservazione**

# CITY HALL DI SAN FRANCISCO

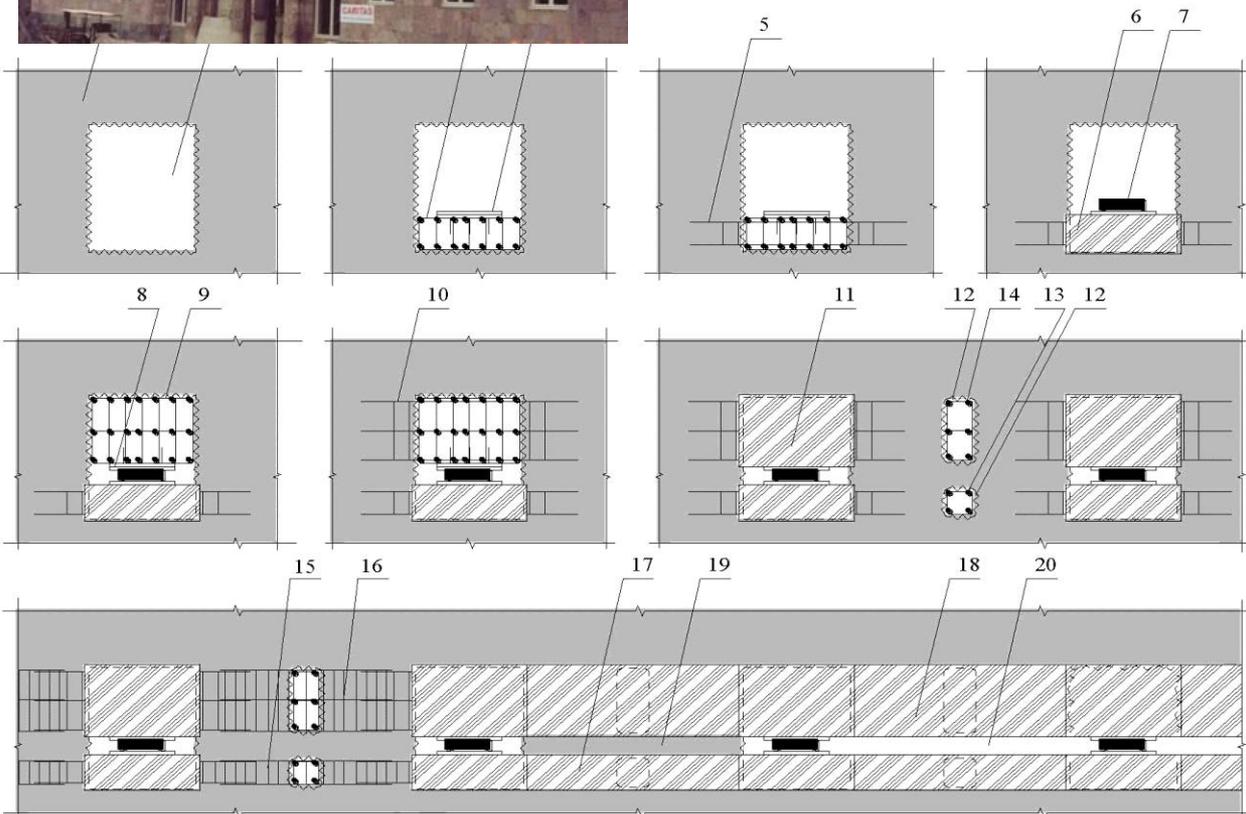


**Distrutta dal terremoto del 1906**  
**Ricostruita nel 1912**  
**Danneggiata dal sisma di Loma Prieta del 1989**  
**Retrofit, 2000 (530 LRB, 62 SD)**

# EDIFICIO SCOLASTICO A VANADZOR, ARMENIA



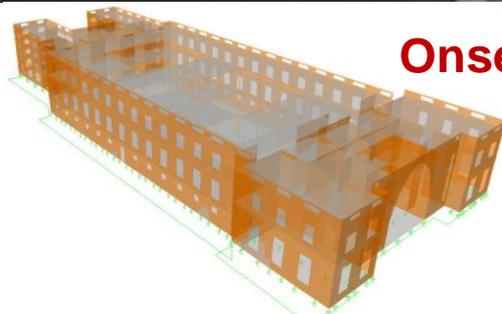
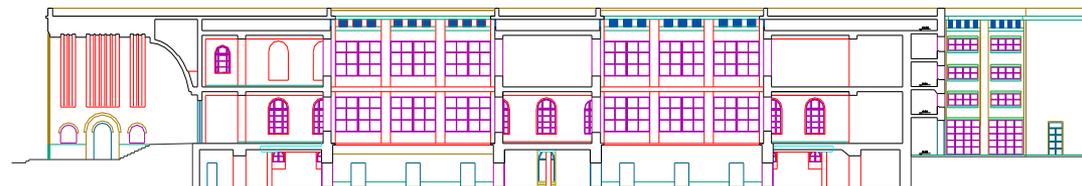
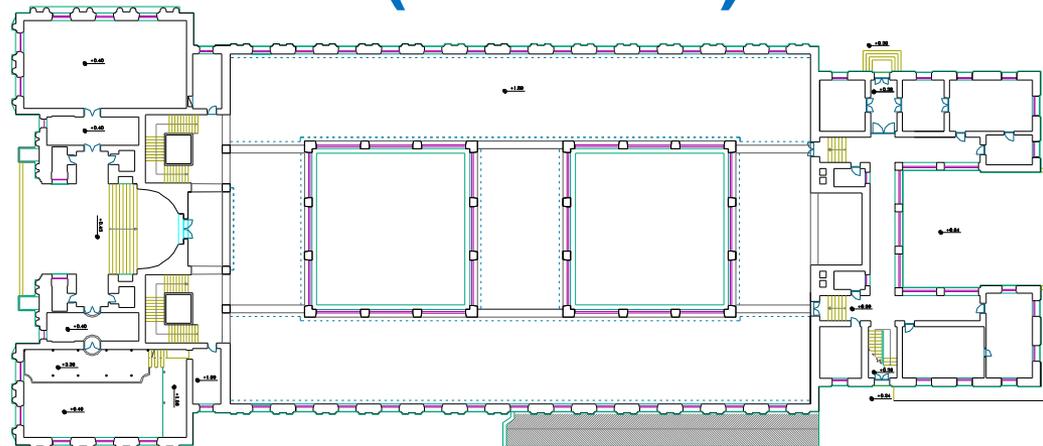
**Edificio in muratura di 4 piani**  
**Retrofit con "Medium Damping Rubber Bearings"**  
**2002**  
 (courtesy prof. M. Melkumyan)



# IRAN BASTAN MUSEUM (TEHRAN)

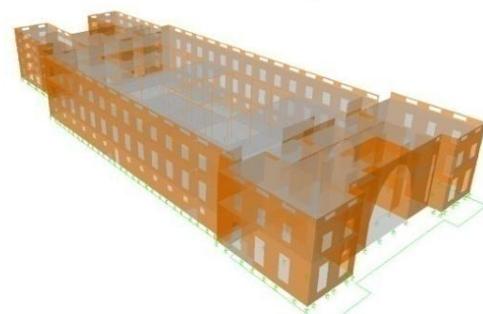


P. Clemente,  
 A. Santini,  
 M.G. Ashtiany



**Onset of damage**

$$a_{gi} = 0.024g$$

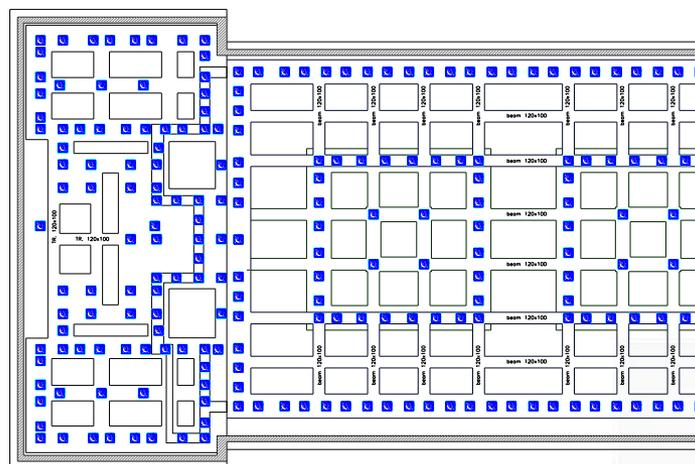


**Collapse**

$$a_{gi} = 0.24 g$$

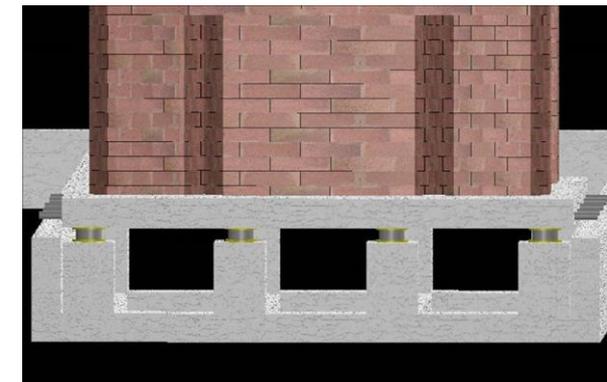
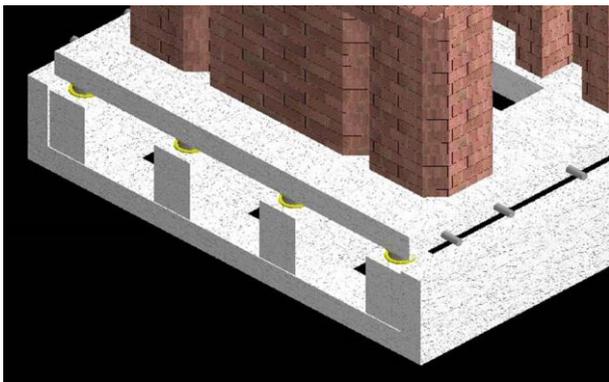
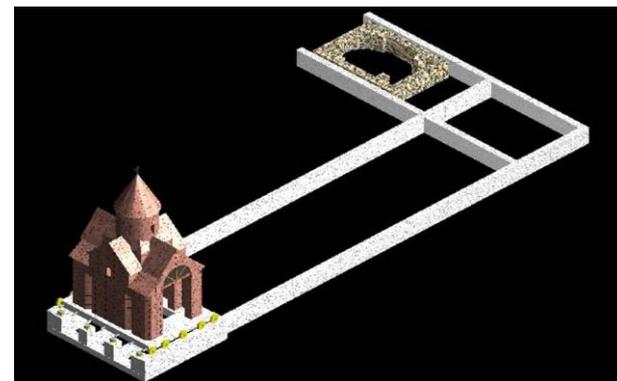
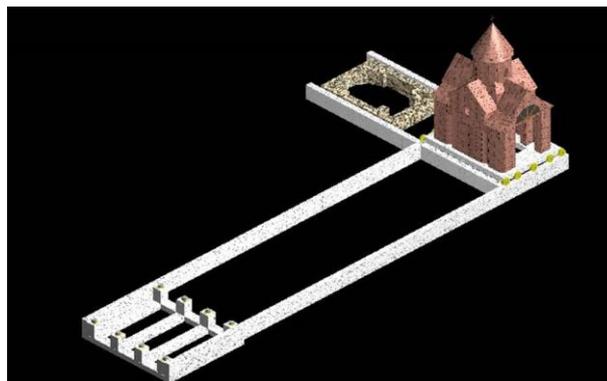
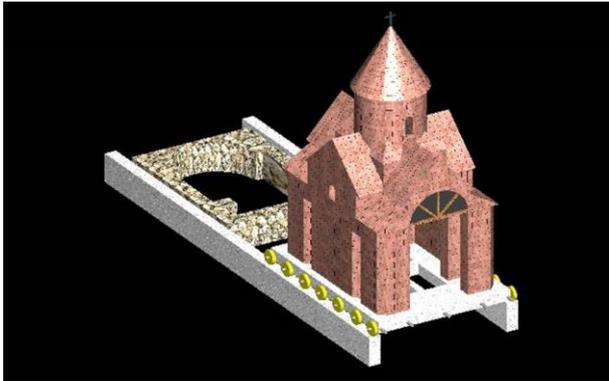
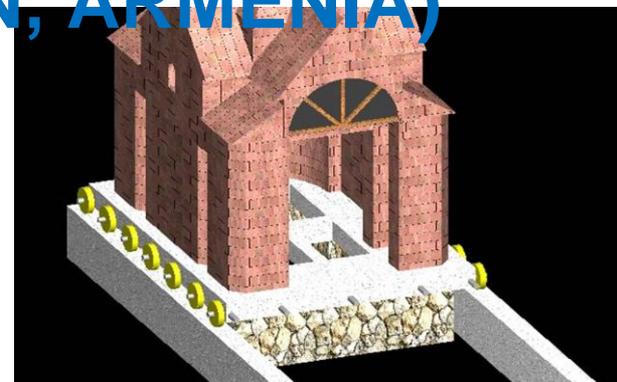
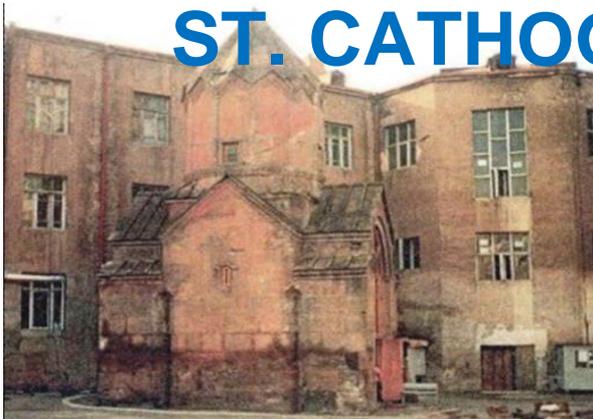
**PGA**

$$a_g = 0.5 g$$

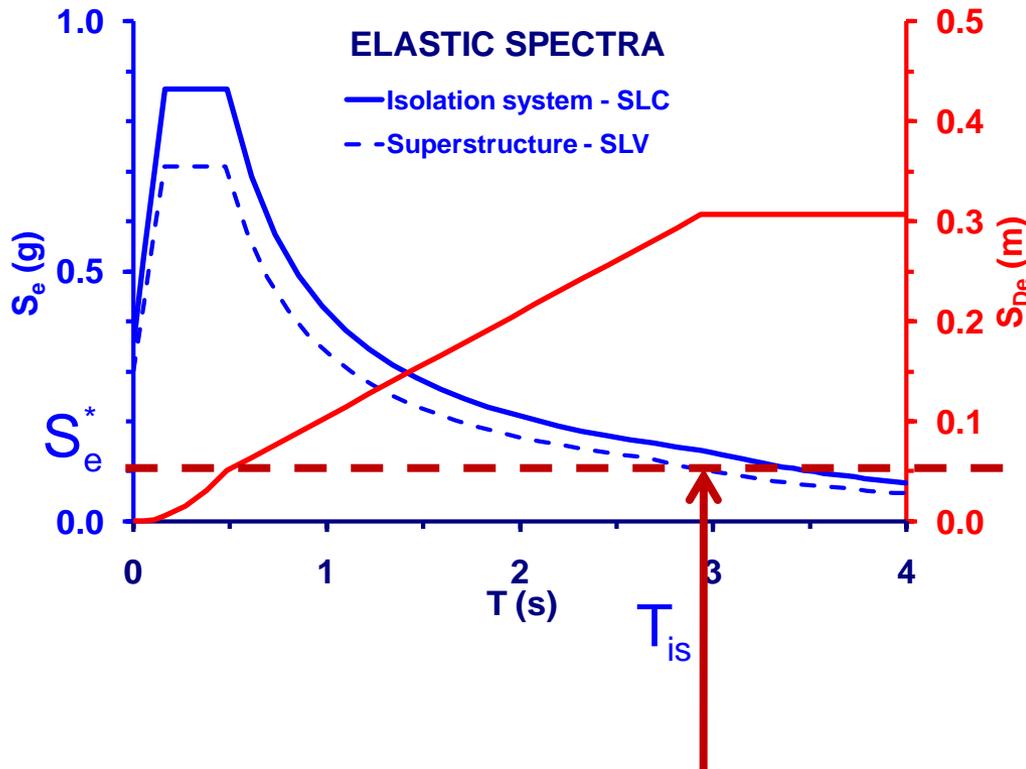


**Paolo Clemente – Il miglioramento sismico degli edifici storici: sicurezza e conservazione**

# ST. CATHOGHIKEH (YEREVAN, ARMENIA)



# PROGETTO PRELIMINARE: $T_{is}$



Sistema di isolamento: **SLC**

Sovruttura: **SLV (q=1.5)**

Fondazione: **SLV (q=1)**

$S_e^*$  = corrisponde all'azione sismica che la sovrastruttura consolidata è in grado di sopportare in campo elastico

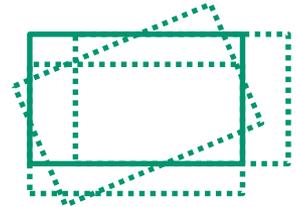
$T_{is}$  = corrisponde a  $S_e^*$  nello spettro SLV, ma deve anche garantire

- Disaccoppiamento tra moto edificio e terreno
- Spostamento compatibile con il gap disponibile

$$T_{is} \gg T_{bf}$$

# PROGETTO PRELIMINARE: $K_e$

**Modello:** scatola rigida con molle orizzontali  
 Sistema 3 DOF (2 traslazioni + 1 rotazione)



**Obiettivo:** primi 2 modi traslazionali nelle 2 direzioni principali  
 HRDB: disposti in modi che  $G_{K_{esi}} \approx G_{massa}$   
 CSS: sempre  $G_{K_{esi}} \approx G_{massa}$

**M** = massa totale sovrastruttura

$$T_{is} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{M}{K_{esi}}}$$

$K_{esi}$  = rigidezza orizzontale sistema di isolamento

$T_{is}$  = periodo fondamentale edificio isolato

HDRB: rigidezza singolo isolatore

$$K_e = \frac{K_{esi}}{n}$$

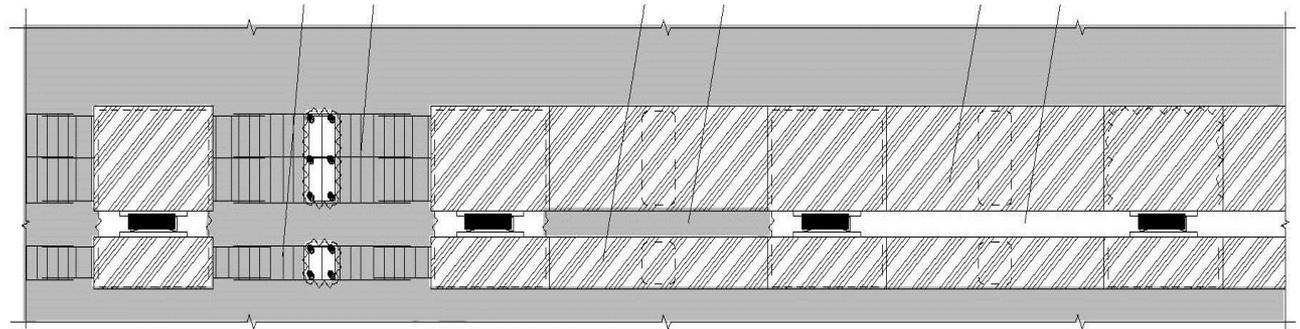
$$T_{is} = 2\pi \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d}\right)g}}$$

CSS: raggio dispositivi

# ISOLAMENTO SISMICO IN FONDAZIONE

## Inserimento dei dispositivi:

- Nelle pareti del piano terra
- Al di sotto delle fondazioni



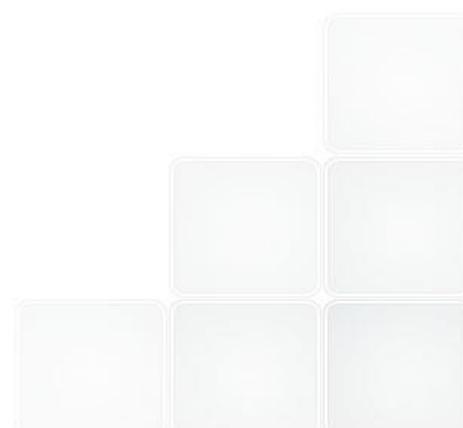
## Tale soluzione:

- Richiede lavori tradizionali
- Non è onerosa economicamente

## Ma presenta i seguenti svantaggi:

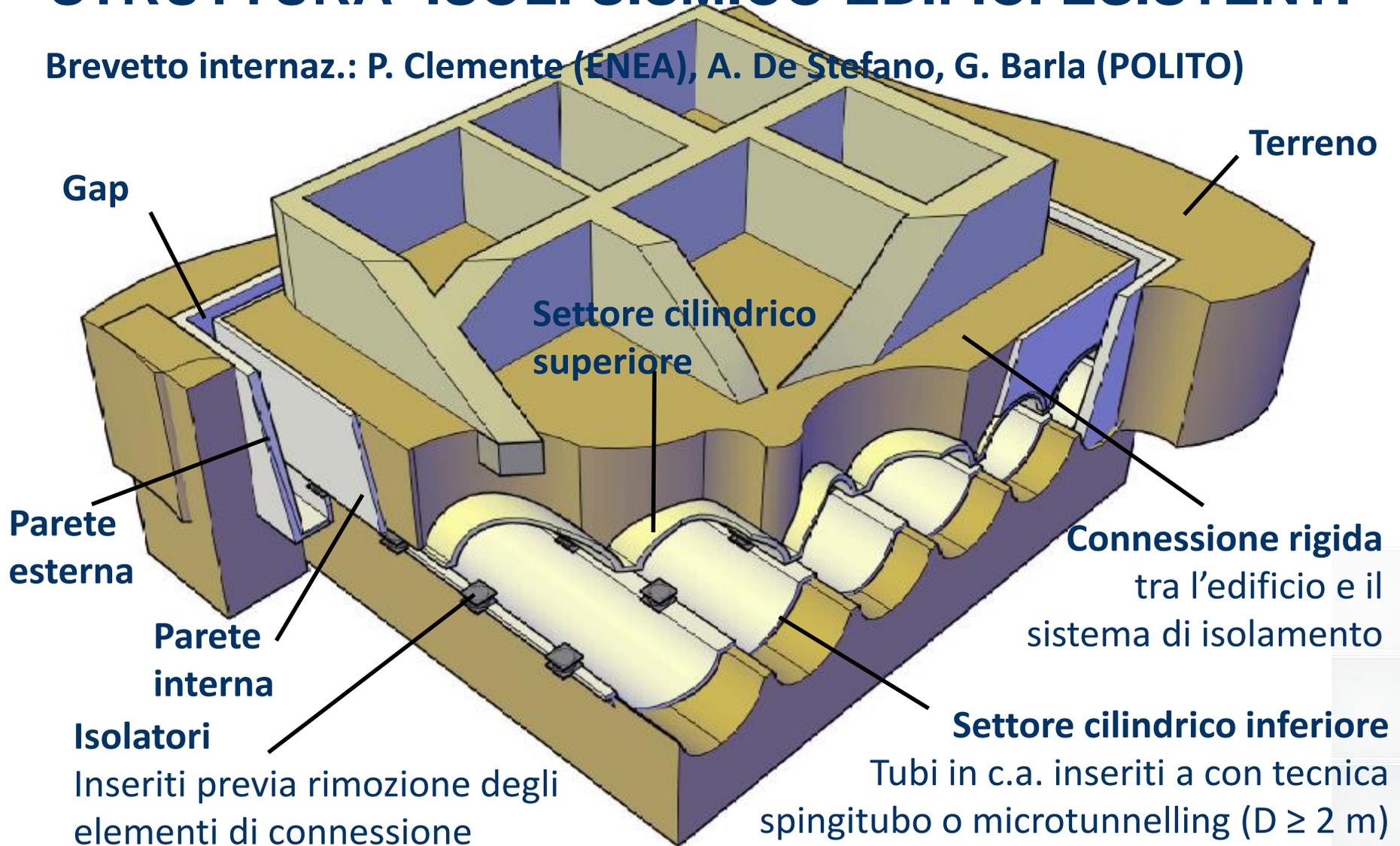
- Modifiche in fondazione
- Non è reversibile

**Non sempre applicabile in edifici storici**

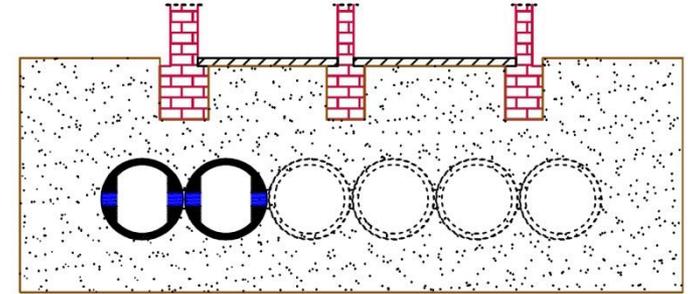
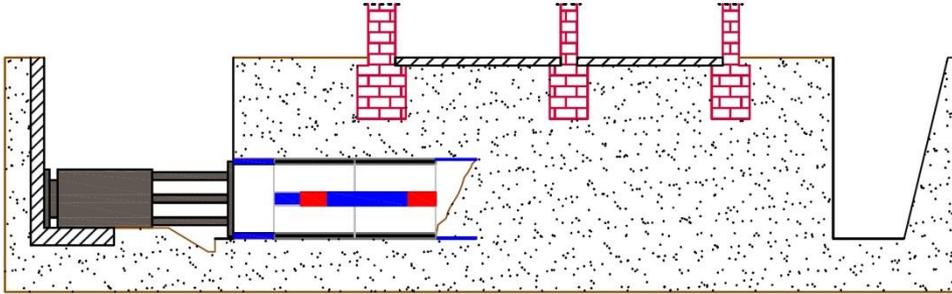


# STRUTTURA ISOL. SISMICO EDIFICI ESISTENTI

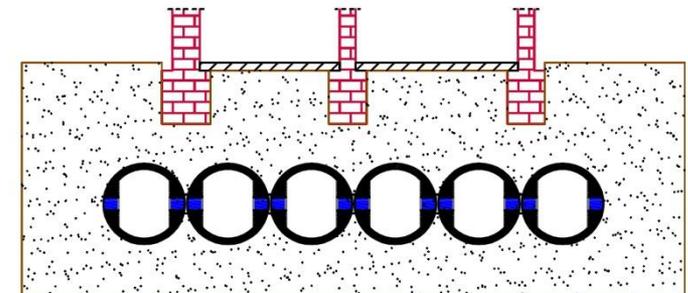
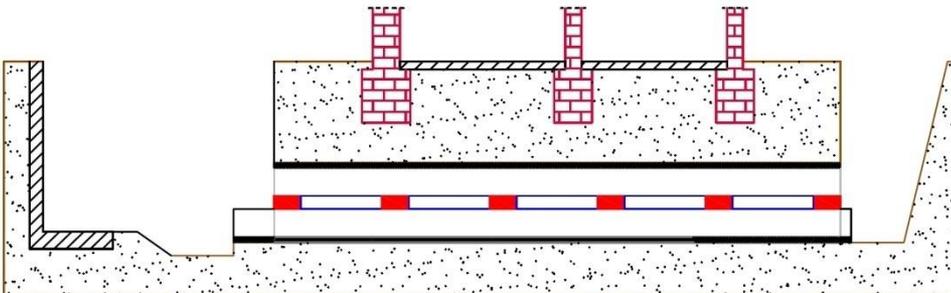
Brevetto internaz.: P. Clemente (ENEA), A. De Stefano, G. Barla (POLITO)



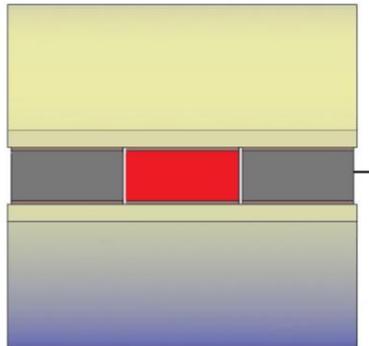
## SISEB: INSERIMENTO DEI TUBI



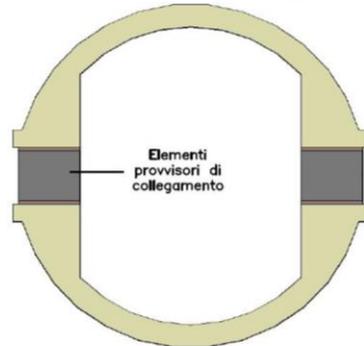
- Scavo trincea
- Inserimento tubi mediante spingitubo o micro-tunnelling (no dig techniques – diametro tubi  $\geq 2$  m, per consentire l'ispezione)



## SISEB: TUBI



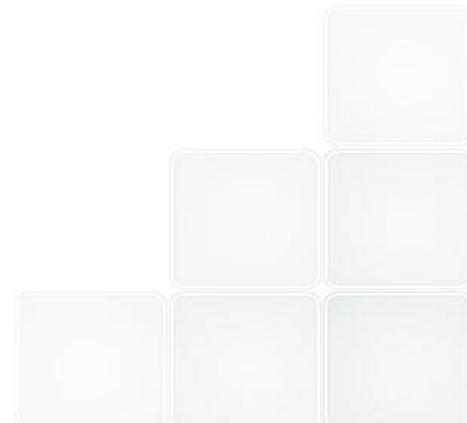
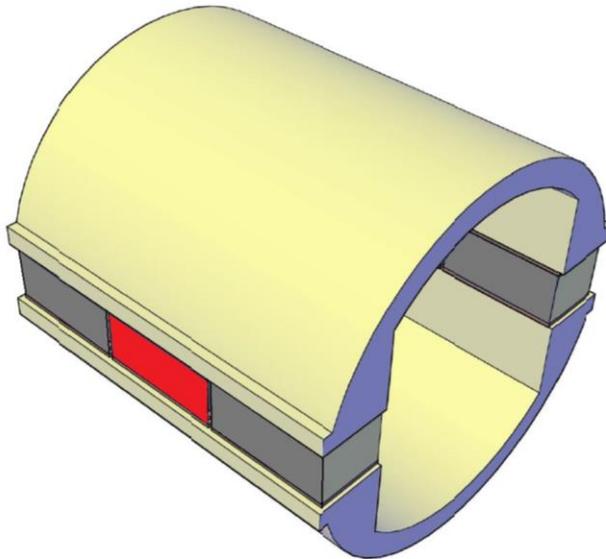
Elementi  
provvisori di  
collegamento



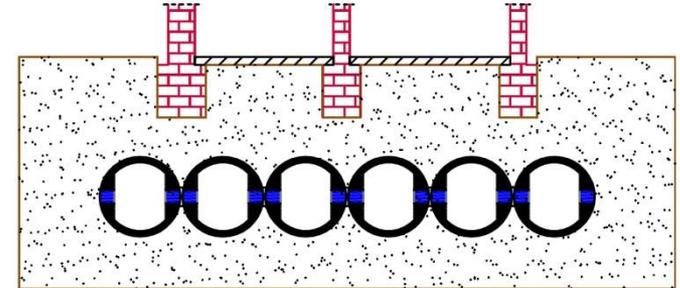
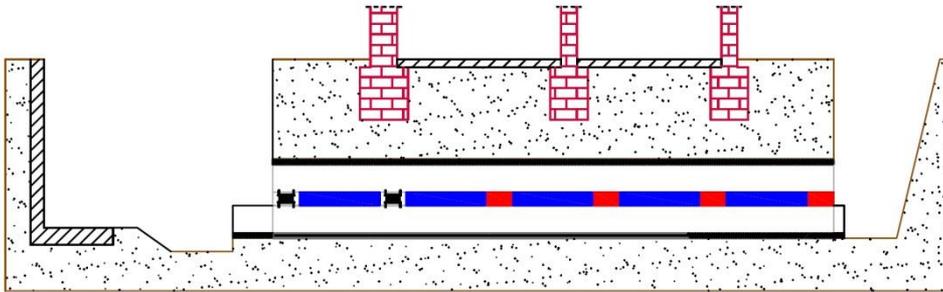
Elementi  
provvisori di  
collegamento

- Forma particolare
- Composti da settori corcolari inferiori e superiori connessi mediante elementi removibili:

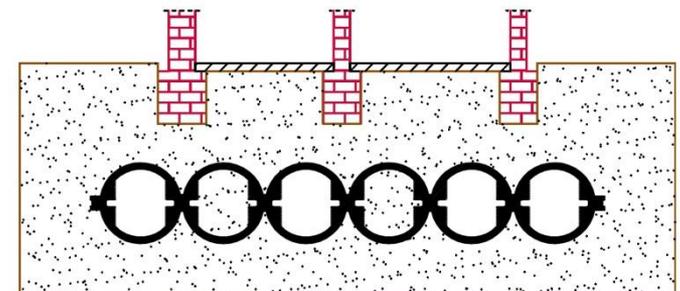
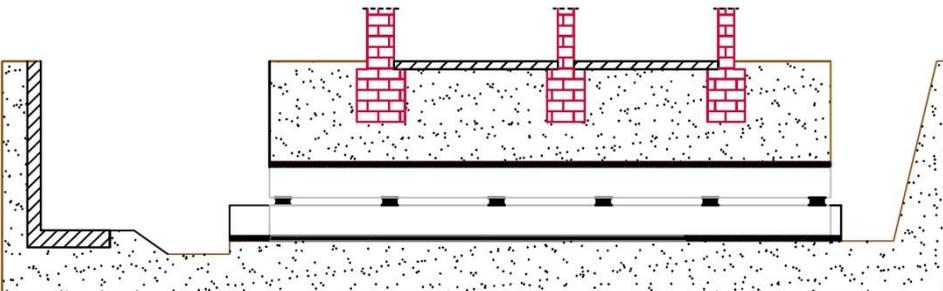
- **Elementi rossi: sostituiti dagli isolatori**
- Elementi grigi: da rimuovere



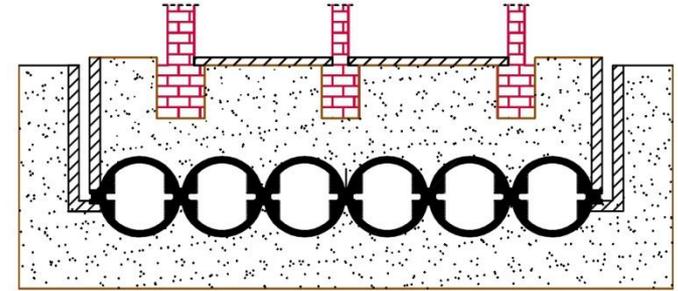
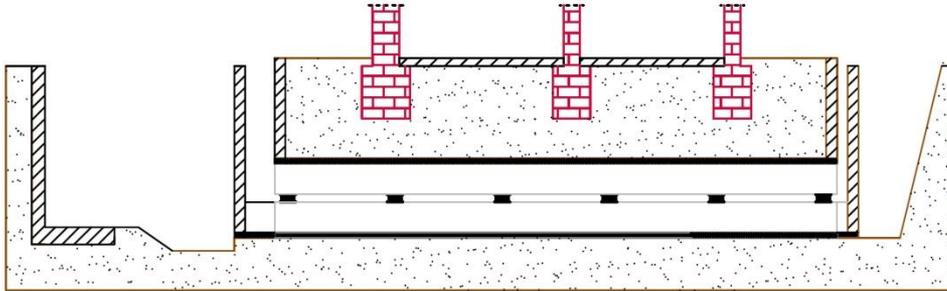
## SISEB: ISOLATORI



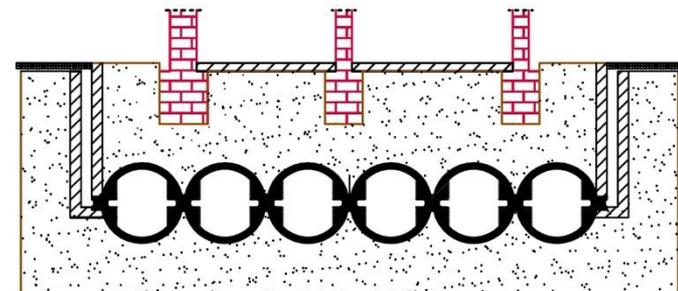
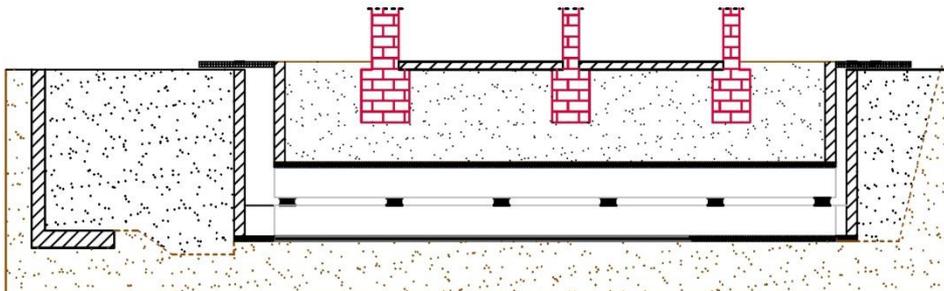
- **Rimozione elementi rossi**
- **Connessione tubi adiacenti con elementi in c.a. o acciaio**
- **Posizionamento dei dispositivi di isolamento**
- **Rimozione elementi grigi**



## SISEB: PARETI



- Pareti verticali
- Irrigidimento terreno (da fare eventualmente prima per lavorare in sicurezza) o connessioni rigide tra edificio e sistema di isolamento



# CASE STUDY: PALAZZO MARGHERITA (PM)

Attenzione a:      **Vibrazioni indotte**  
                                 **Cedimenti del suolo**

- ✓ **Caratterizzazione dinamica**
- ✓ **Miglioramento sismico convenzionale per sopportare almeno 0.05g**
- ✓ **Isolamento sismico**



Paolo Clemente – Il miglioramento sismico degli edifici storici: sicurezza e conservazione

# PALAZZO MARGHERITA: PLANIMETRIA



# PALAZZO MARGHERITA: DANNI

**Deck  
collapsed**



**Tower**



**Stairs**



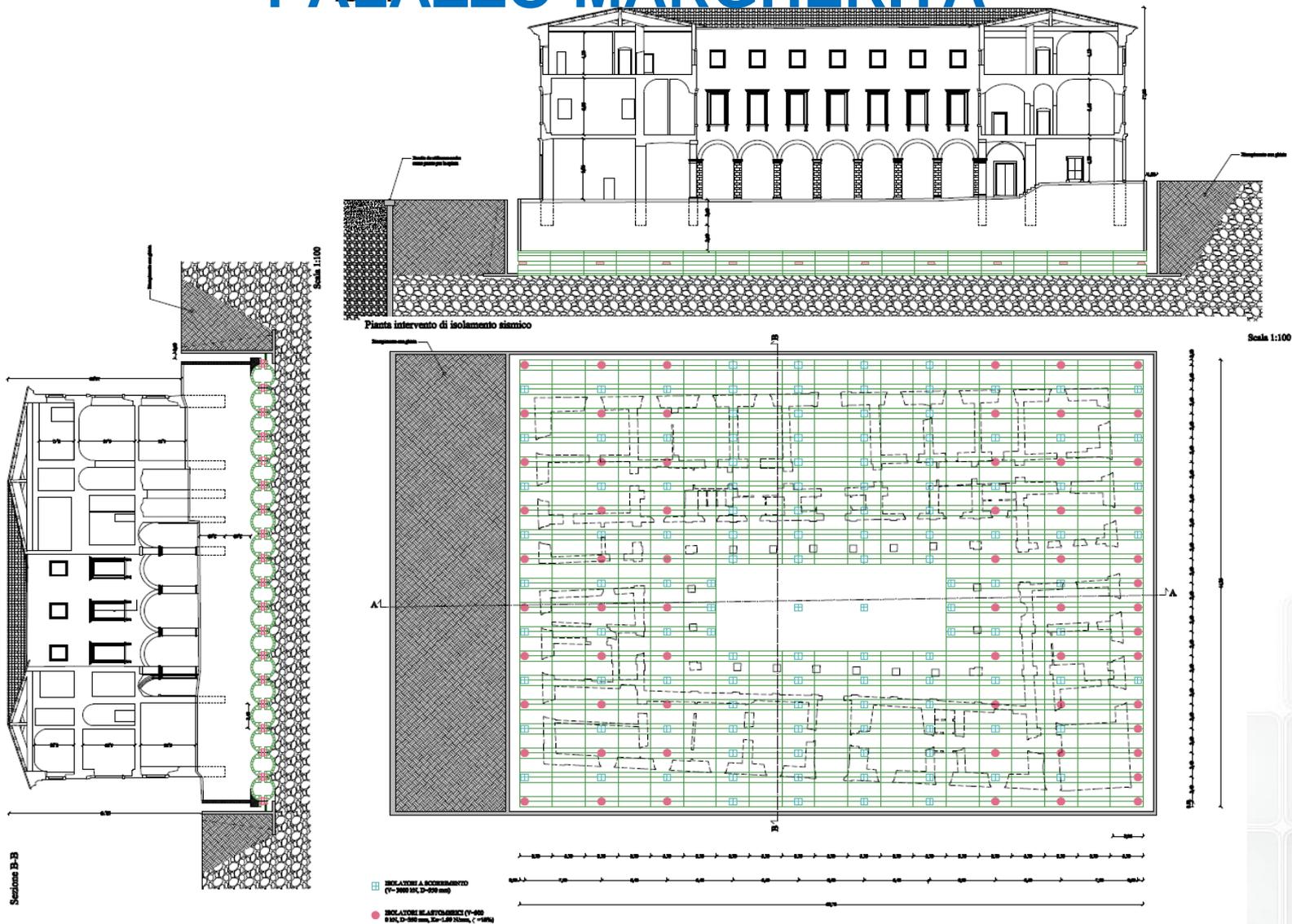
**Overturnig of external  
wall**



**Shear collapse**



# PALAZZO MARGHERITA

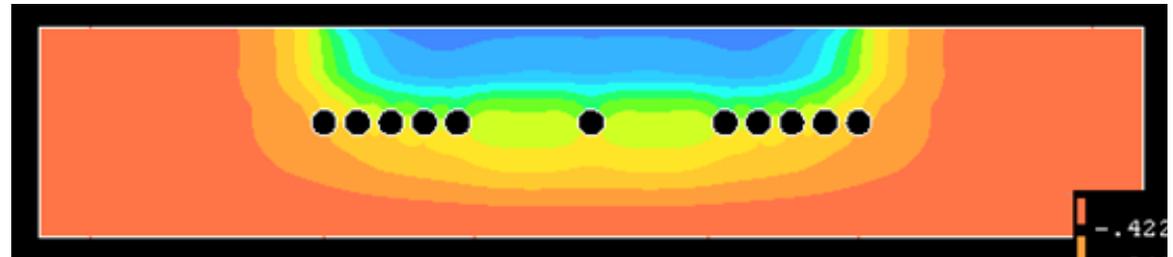


# CEDIMENTI

$\lambda = 0.4 - H/D = 3.5$  ( $H$  = profondità asse tubo,  $D$  = diametro tubo)

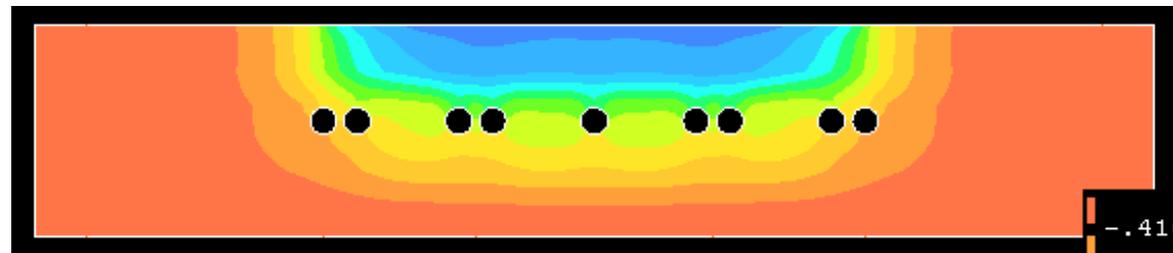
➤ **Strategia 1**

➤ Settlement = 6.8 mm



➤ **Strategia 2**

➤ Settlement = 5.6 mm



**$H/D$  maggiori:** minori cedimenti ma costi più elevati

**Tecnologie per contrastare i cedimenti:** esistono e sono consolidate ma costose

# CONCLUSIONI

## ➤ Nuovo sistema di isolamento sismico per edifici esistenti

- Piattaforma isolante al di sotto delle fondazioni
- Edificio non modificato anche nei piani interrati
- Tunnel utilizzabili per passaggio pedonale o parcheggio

## ➤ Applicazioni

- Edifici di interesse storico artistico
- Centri storici: aggregati edilizi complessi
- Impianti chimici e nucleari (edifici con tubazioni e altro)

# PREVENZIONE = INFORMAZIONE



**EDIFICIO NON  
ANTISISMICO**



**Edifici non adeguati:**

- **No scuole**
- **No ospedali**
- **No edifici strategici**

**Edifici vecchi (non storici):**

- **Demilizione e ricostruzione**