

Giornata di Studio

Rischio sismico e prevenzione: scuole, ospedali ed altre strutture strategiche

Lunedì 18 maggio 2026

Aula Magna del Campus di Matera, Università degli Studi della Basilicata

via Lanera, n. 20, 75100 Matera

Organizzatori:



Con il Patrocinio di:



LARES ITALIA



Strategie tradizionali e tecnologie moderne di protezione sismica

Alfonso Vulcano



*Già Professore Ordinario di “Tecnica delle costruzioni”
Università della Calabria (Rende, CS) - Dipartimento di Ingegneria Civile*

Membro della Commissione Sismica GLIS-ANTEL

PROTEZIONE SISMICA

(Riduzione vulnerabilità / rischio)



**STRATEGIE
TRADIZIONALI**
(es., edifici in c.a.)

Resistenza / Duttilità



**TECNOLOGIE
MODERNE**
(isolamento/dissipazione)

Riduzione effetti sismici

EVOLUZIONE DELLA NORMATIVA SISMICA ITALIANA

I generazione

Regio Decreto n. 193 del 18 aprile 1909
Regio Decreto Legge n. 1526 del 5 novembre 1916
Regio Decreto Legge n. 431 del 13 marzo 1927
Regio Decreto Legge n. 640 del 25 marzo 1935
Legge n. 1684 del 25 novembre 1962

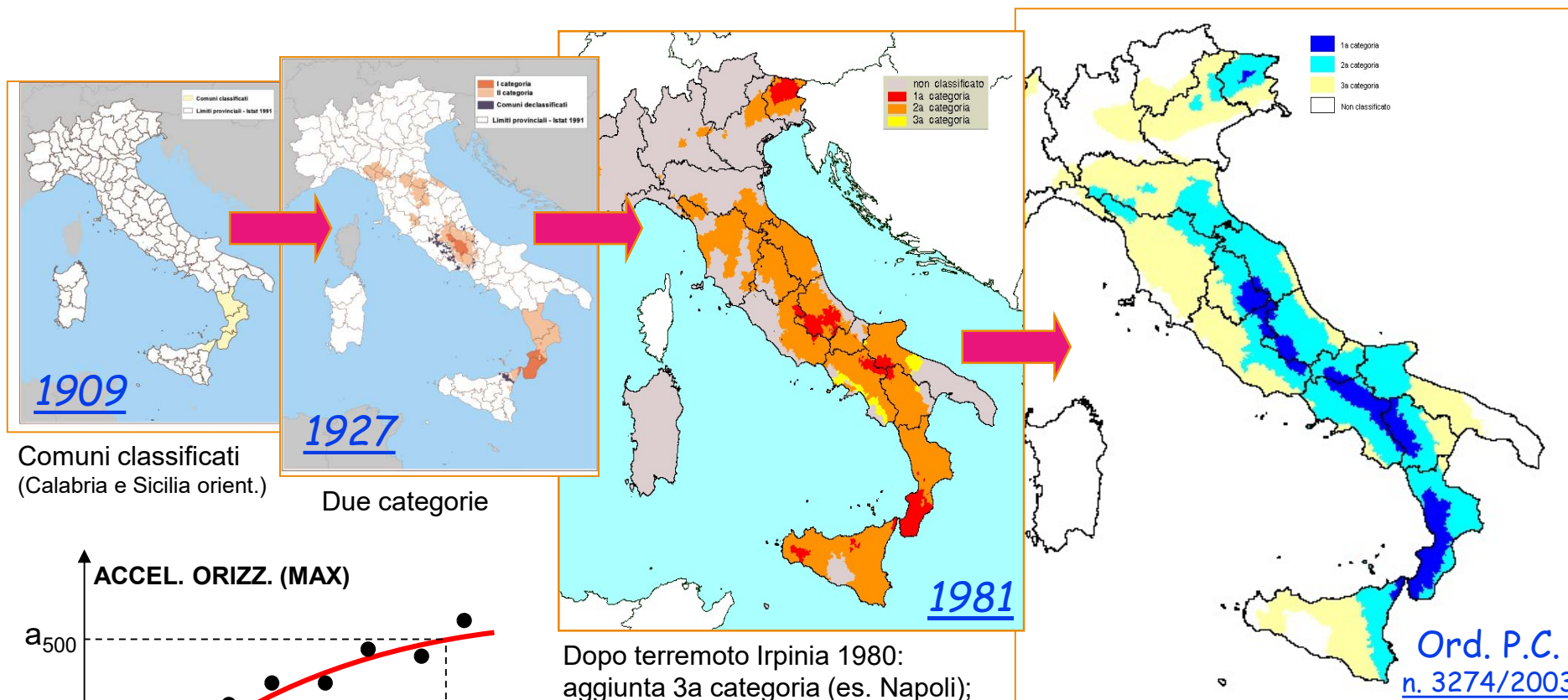
II generazione

Legge n. 64 del 2 febbraio 1974
Decreto Ministeriale 3 marzo 1975
Decreto Ministeriale 3 giugno 1981
Decreto Ministeriale 19 giugno 1981
Decreto Ministeriale 24 gennaio 1986

III generazione

Decreto Ministeriale 16 gennaio 1996
Ord.P.C.M. n. 3274- 20/03/2003
Ord.P.C.M. n. 3431-03/05/2005
Norme Tecniche per le Costruzioni 14/01/2008
(Istruzioni, Circolare 02/02/2009 n. 617, C.S.LL.PP.)
Aggiornamento N.T.C. 17/01/2018
(Istruzioni, Circolare 21/01/2019 n. 7, C.S.LL.PP.)

PERICOLOSITA' SISMICA (alcune tappe nella definizione della zonazione)

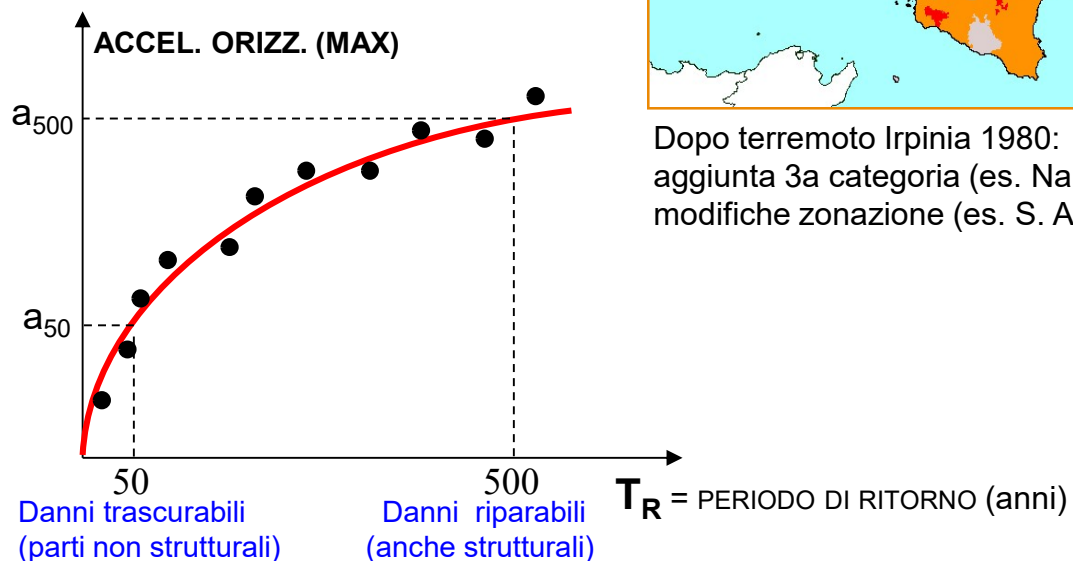


1909
Comuni classificati
(Calabria e Sicilia orient.)

1927
Due categorie

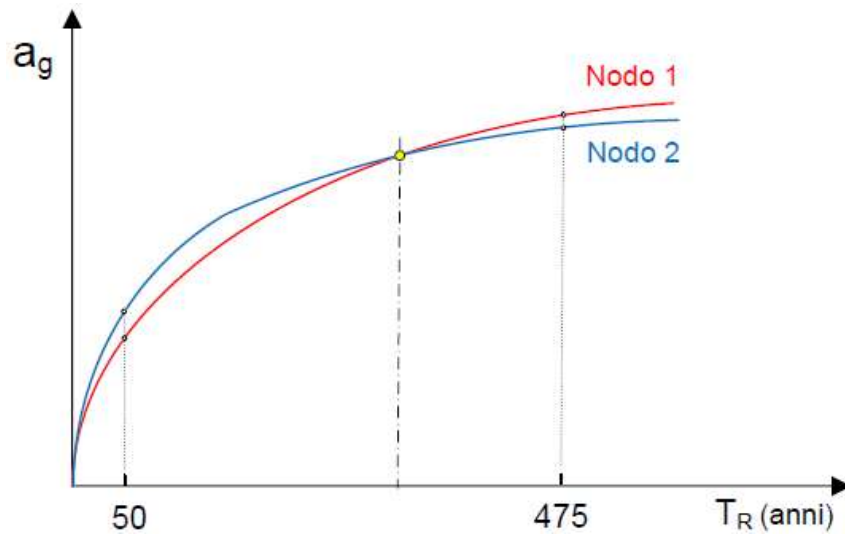
1981
Dopo terremoto Irpinia 1980:
aggiunta 3a categoria (es. Napoli);
modifiche zonazione (es. S. Angelo L.)

Ord. P.C.
n. 3274/2003



Aggiornamento zonazione:

zona	accelerazione orizzontale con probabilità di superamento pari al 10 % in 50 anni [a _g /g]
1	> 0,25
2	0,15-0,25
3	0,05-0,15
4	<0,05



$$V_R = V_N \cdot C_U \rightarrow T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{V_R})}$$

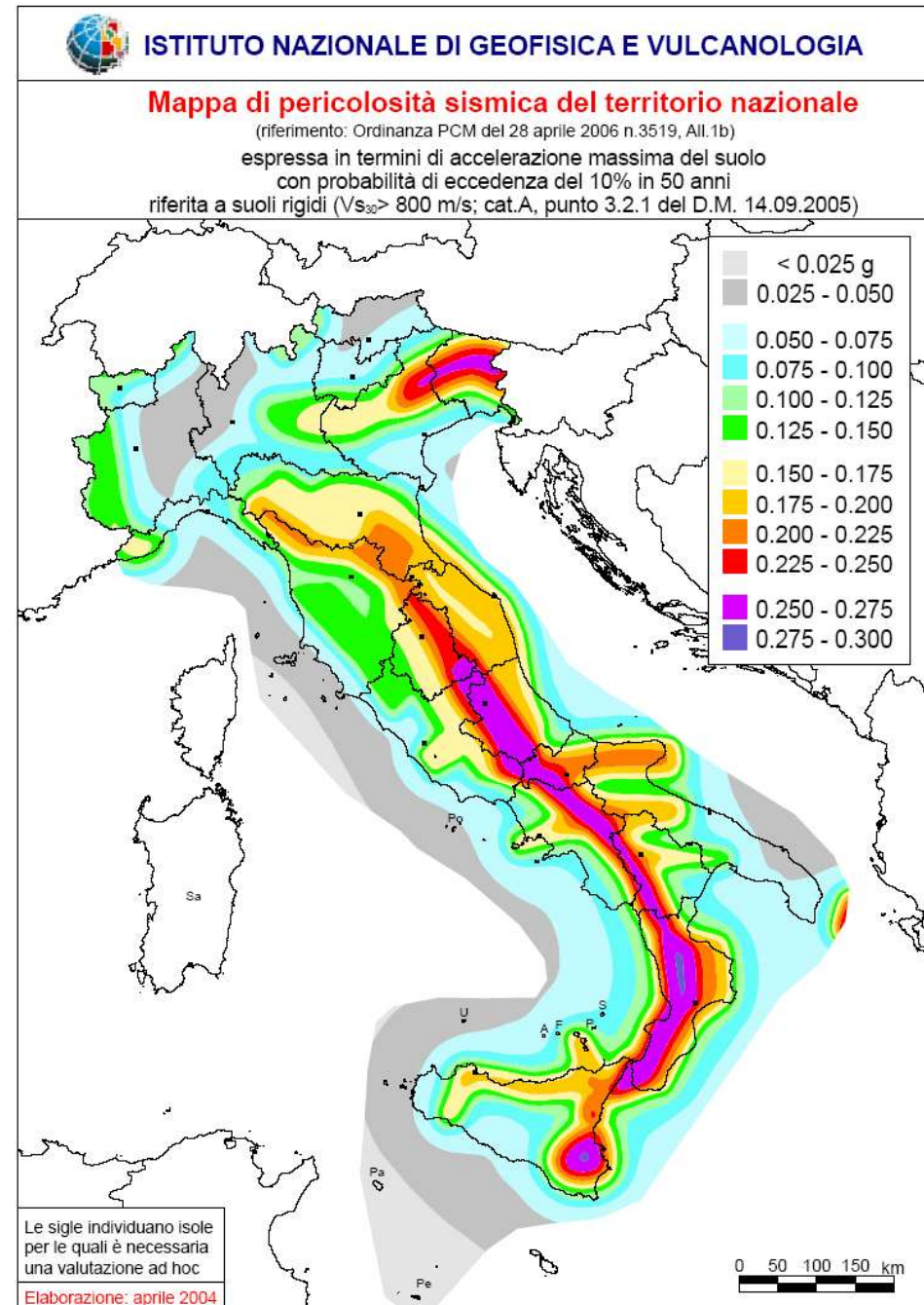
V_R = Periodo di riferimento

V_N = Vita nominale

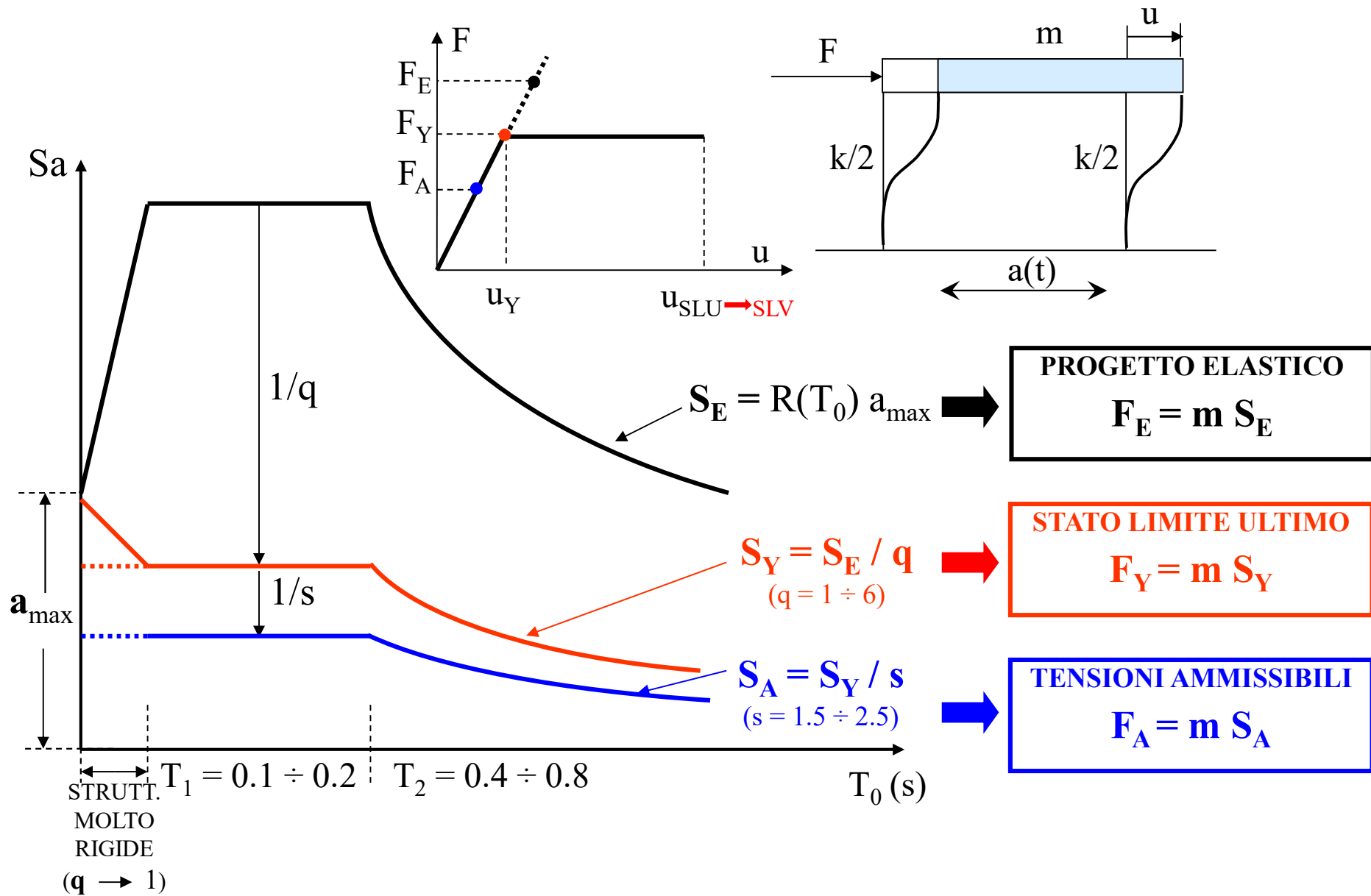
C_U = Coeff. d'uso (0,7; 1; 1,5; 2)

T_R = Periodo di ritorno

P_{V_R} = Probabilità di superamento

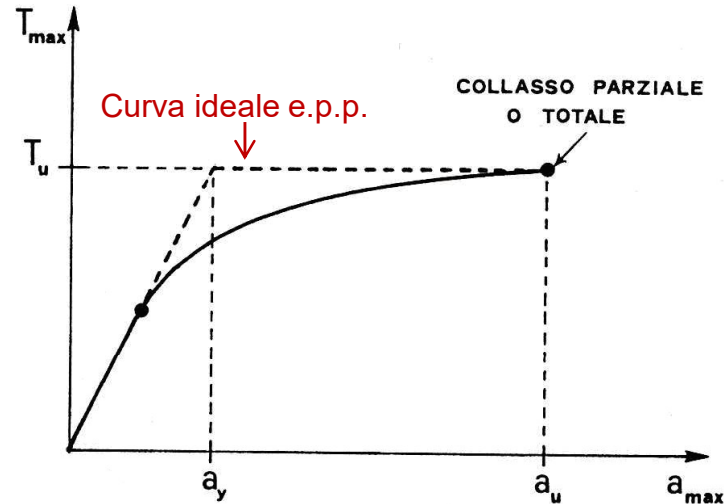
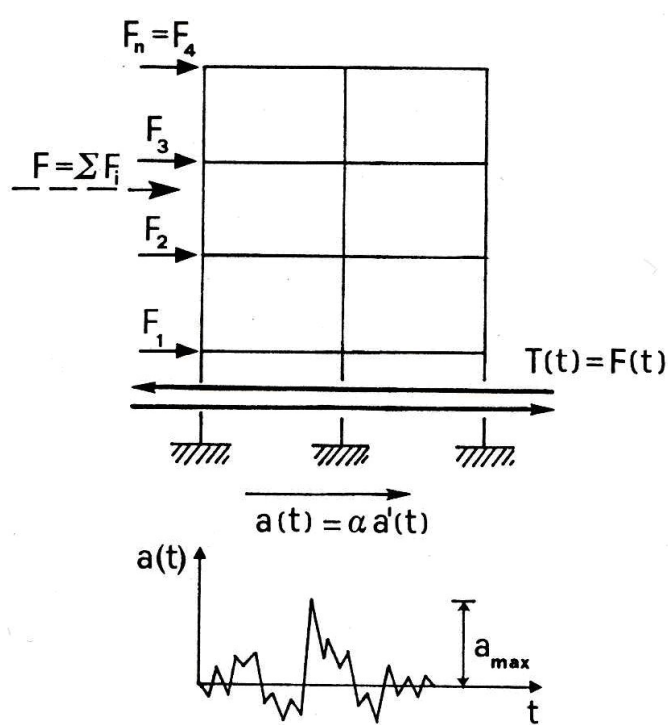


CRITERI PROGETTUALI CONVENZIONALI



FATTORE DI COMPORTAMENTO (STRUTTURA)

Sistemi a più gradi di libertà



$$q = a_u / a_y$$



$$q = S_a(u) / S_a(y)$$

a_u = picco di accelerazione al suolo che produce lo SLU (es. SLV)
 a_y = picco di accelerazione al suolo cui corrisponde il limite elastico

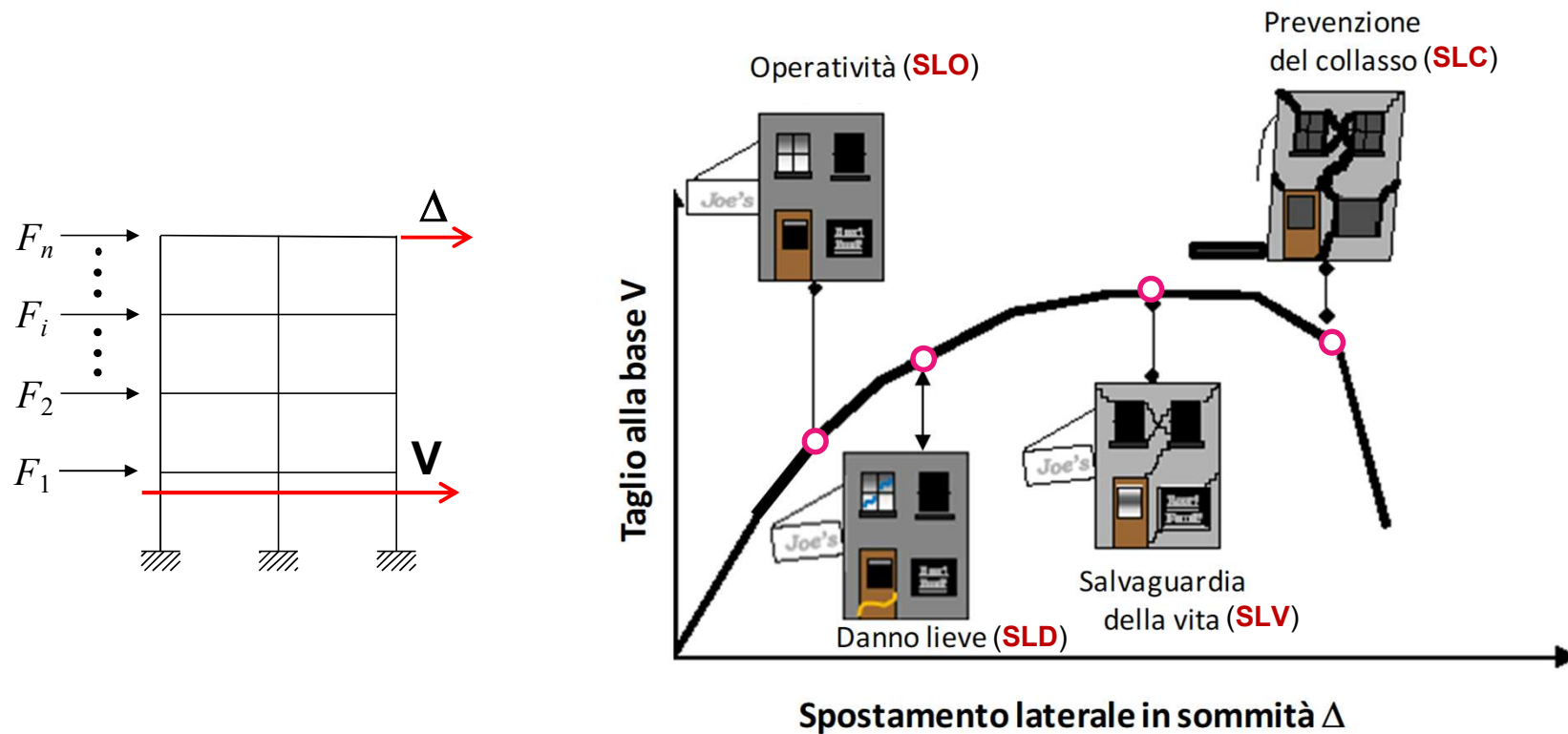
“Performance Concept” in FEMA-273 and ATC-40

FEMA (Federal Emergency Management Agency – U.S.A.)

ATC (Applied Technology Council – California, U.S.A.)



NTC 2008 2018



D.M. 17/01/2018

STATI LIMITE DI ESERCIZIO

STATI LIMITE ULTIMI

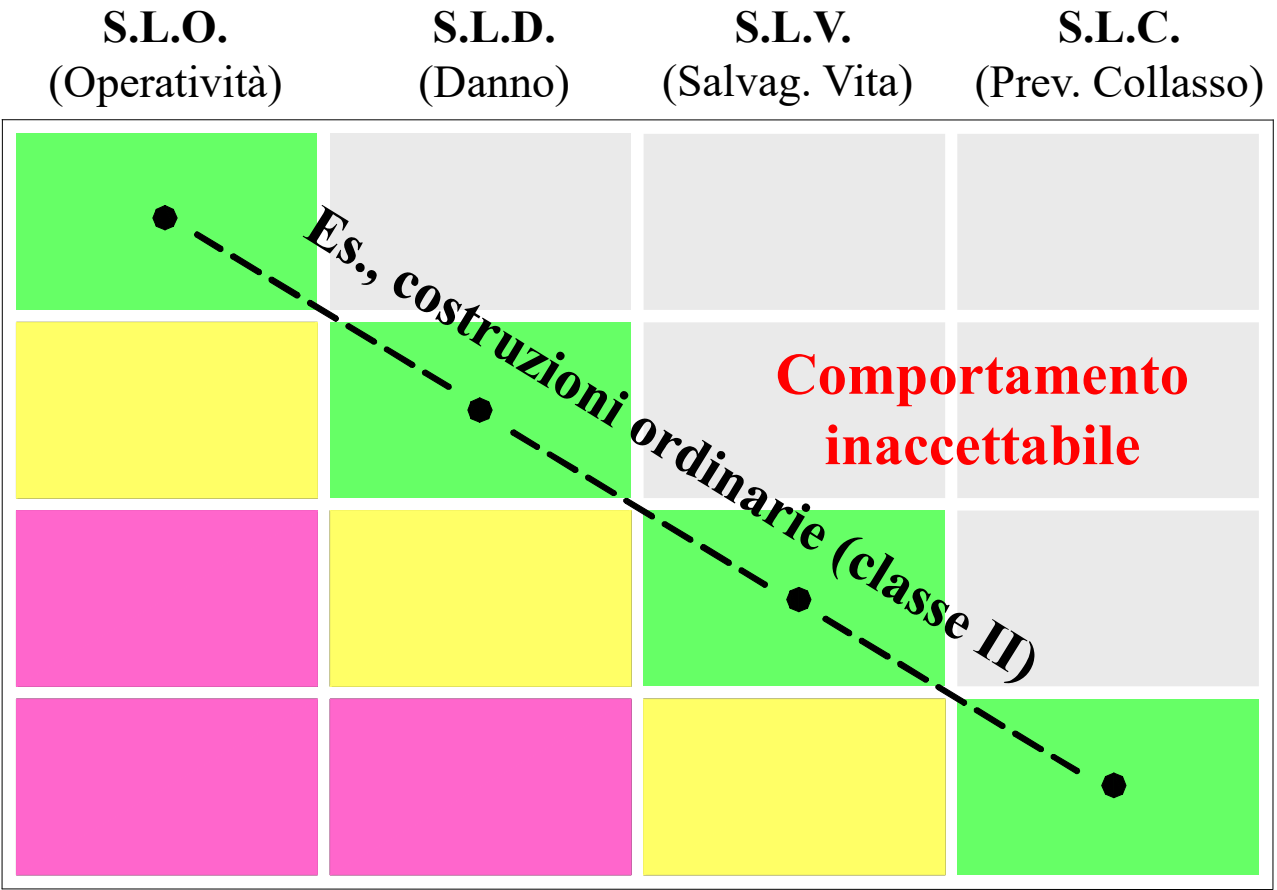
**PROBABILITA' DI SUPERAMENTO, P_{VR}
(PERIODO DI RIFERIMENTO, V_R)**

81%
(es., $T_R = 30$ a.)

63%
(es., $T_R = 50$ a.)

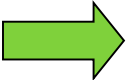
10%
(es., $T_R = 475$ a.)

5%
(es., $T_R = 975$ a.)



(es. $V_N =$ vita nominale = 50 a.)
(es., $C_U =$ coeff. d'uso = 1)

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

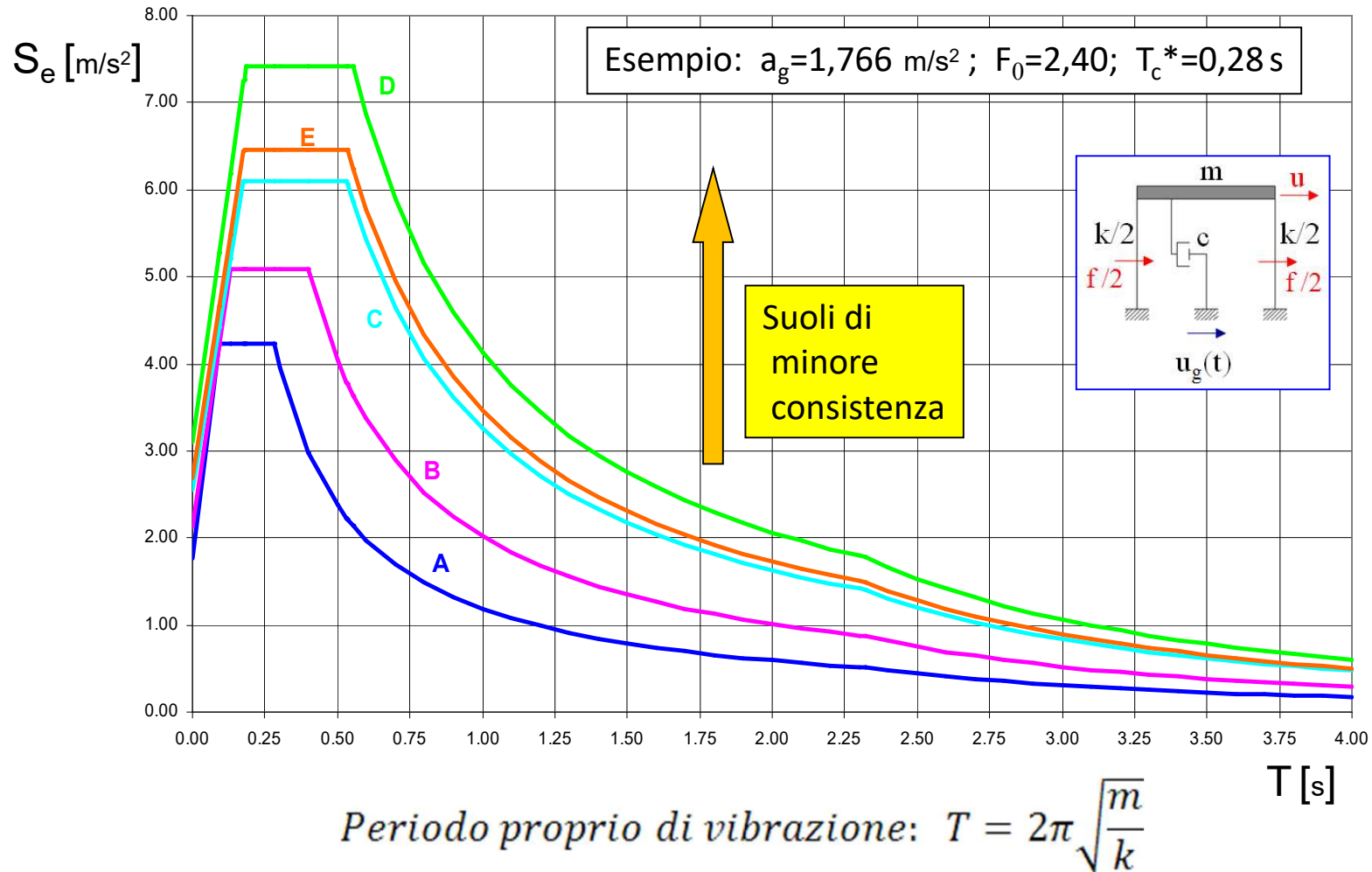


$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - P_{V_R})}$$

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C_U	0,7	1,0	1,5	2,0

SPETTRI ELASTICI DI PROGETTO (NTC 2008...2018)

PER CATEGORIE DI SOTTOSUOLO ($\xi=5\%$)



7.4. COSTRUZIONI DI CALCESTRUZZO

NTC 2018

7.4.1. GENERALITÀ

Nel caso di comportamento strutturale non dissipativo, la capacità delle membrane deve essere valutata in accordo con le regole di cui al § 4.1, senza nessun requisito aggiuntivo, a condizione che in nessuna sezione si superi il momento resistente massimo in campo sostanzialmente elastico, come definito al § 4.1.2.3.4.2. Per i nodi trave-pilastro di strutture a comportamento non dissipativo si devono applicare le regole di progetto relative alla CD “B” contenute nel § 7.4.4.3.

.....

Nel caso di comportamento strutturale dissipativo, la struttura deve essere concepita e dimensionata in modo tale che, sotto l'azione sismica relativa allo SLV, essa dia luogo alla formazione di un meccanismo dissipativo stabile fino allo SLC, nel quale la dissipazione sia limitata alle zone a tal fine previste. La capacità delle membrane e dei collegamenti deve essere valutata in accordo con le regole di cui dal § 7.1 al § 7.3, integrate dalle regole di progettazione e di dettaglio fornite dal § 7.4.4 al § 7.4.6.

.....

FATTORE DI COMPORTAMENTO (D.M. 17/01/2018)

$$\text{Limite superiore (SLV): } q_{\text{lim}} = q_0 \times K_R$$

q_0 = valore massimo del fattore di comportamento

Dipende da:

- livello di duttilità attesa (CD "A" o CD "B")
- tipologia strutturale
- rapporto α_u/α_1 (α_u : meccanismo; α_1 : prima plasticizzazione)

K_R = fattore riduttivo (dipende dalle caratteristiche di regolarità in altezza)

= 1 per costruzioni regolari in altezza

= 0,8 per costruzioni non regolari in altezza

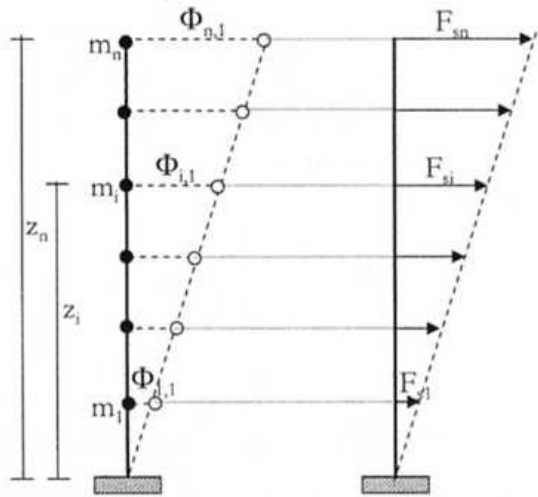
Tab. 7.3.II – Valori massimi del valore di base q_0 del fattore di comportamento allo SLV per diverse tecniche costruttive ed in funzione della tipologia strutturale e della classe di duttilità CD

Tipologia strutturale	q_0	
	CD "A"	CD "B"
Costruzioni di calcestruzzo (§ 7.4.3.2)		
Strutture a telaio, a pareti accoppiate, miste (v. § 7.4.3.1)	$4,5 \alpha_u/\alpha_1$	$3,0 \alpha_u/\alpha_1$
Strutture a pareti non accoppiate (v. § 7.4.3.1)	$4,0 \alpha_u/\alpha_1$	3,0
Strutture deformabili torsionalmente (v. § 7.4.3.1)	3,0	2,0
Strutture a pendolo inverso (v. § 7.4.3.1)	2,0	1,5
Strutture a pendolo inverso intelaiate monopiano (v. § 7.4.3.1)	3,5	2,5

METODI DI ANALISI (“Comportamento elastico-lineare”)

Strutture a più gradi di libertà

Analisi lineare statica



$$F_i = F_h \cdot z_i \cdot \frac{W_i}{\sum_j z_j W_j}$$

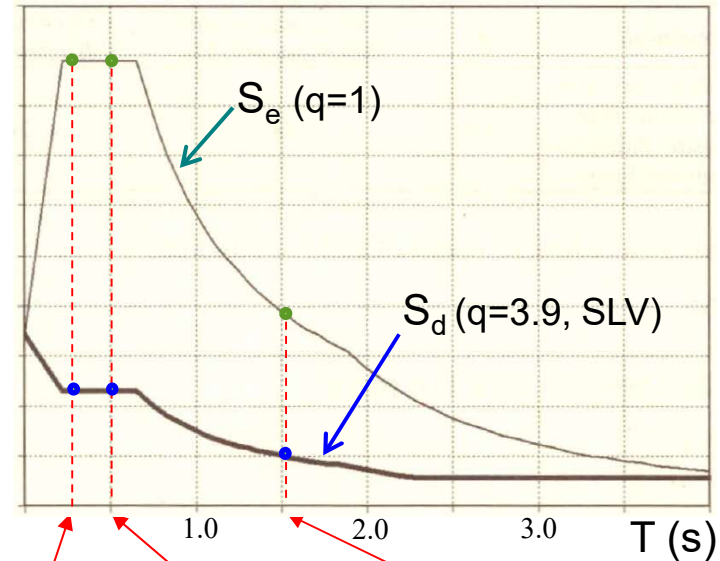
$$F_h = S_d(T_1) W \lambda / g$$

$$\lambda = 0,85 \text{ se } T_1 < 2T_C$$

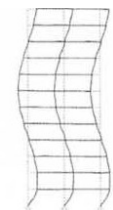
(costruzione con almeno tre orizzontamenti)

$$\lambda = 1,0 \text{ in tutti gli altri casi}$$

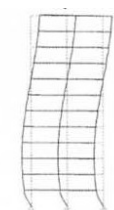
Analisi lineare “dinamica”



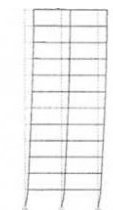
Modo III



Modo II



Modo I



Esempio: $T_3=0.27 \text{ s}$

$T_2=0.50 \text{ s}$

$T_1=1.52 \text{ s}$

$M_3 / M_T = 2\%$

$M_2 / M_T = 9\%$

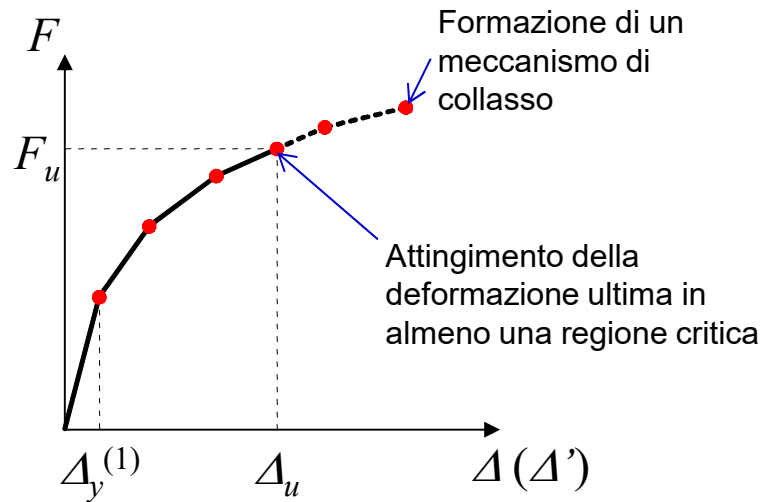
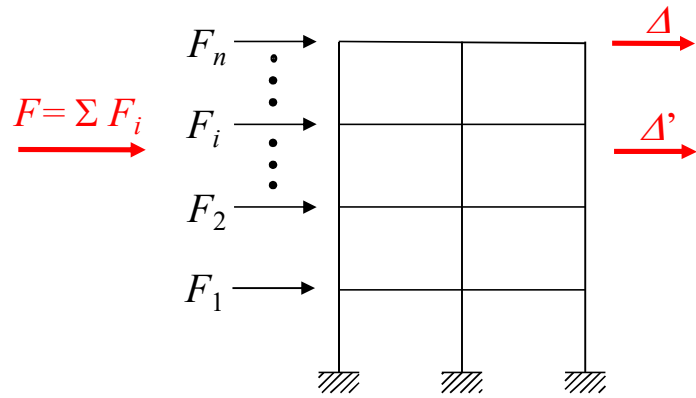
$M_1 / M_T = 87\%$

$V_3 = 0.02 Sa_3 W$

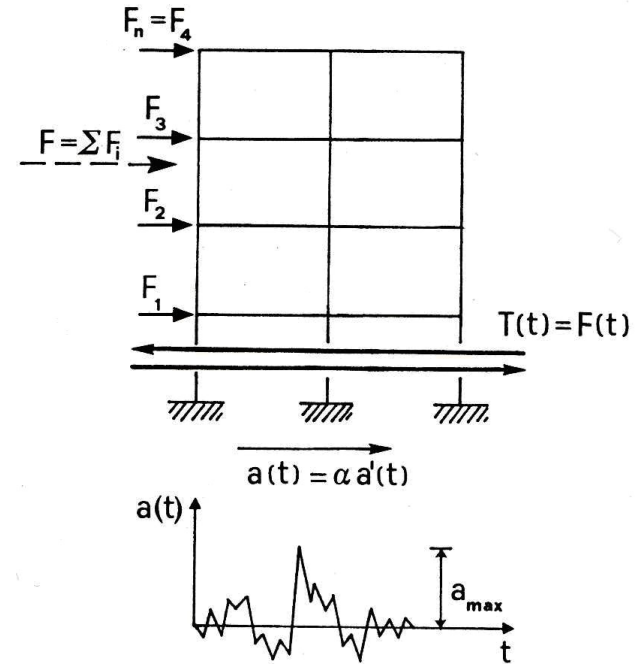
$V_2 = 0.09 Sa_2 W$

$V_1 = 0.87 Sa_1 W$

Analisi non lineare statica ("push-over")



Analisi non lineare dinamica ("al passo")



OBIETTIVI PROGETTUALI

Comportamento strutturale dissipativo

- Adeguata distribuzione delle plasticizzazioni (“regolarità strutturale”)



- Evitare concentrazioni di plasticizzazione e comportamenti anomali (“gerarchia delle resistenze”)

- Evitare rotture fragili



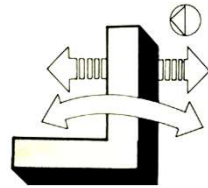
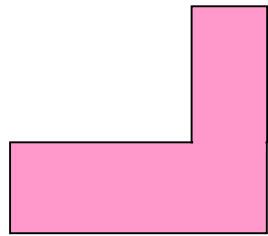
- Adeguato livello di duttilità locale (dettagli costruttivi)

REGOLARITA' GERARCHIA RESISTENZE

SFAVOREVOLI

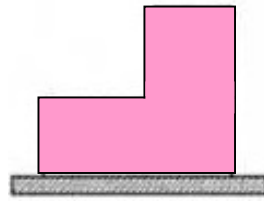
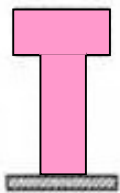
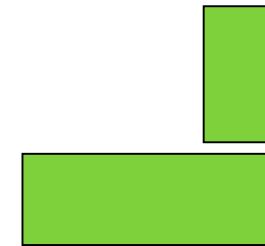
CONFIGURAZIONI

FAVOREVOLI

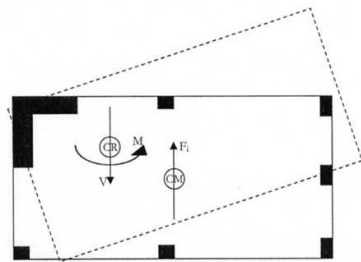
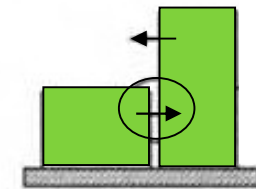
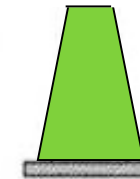


Forme
architettoniche:

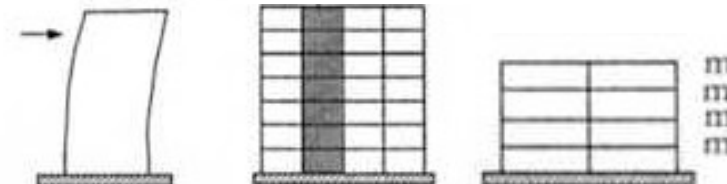
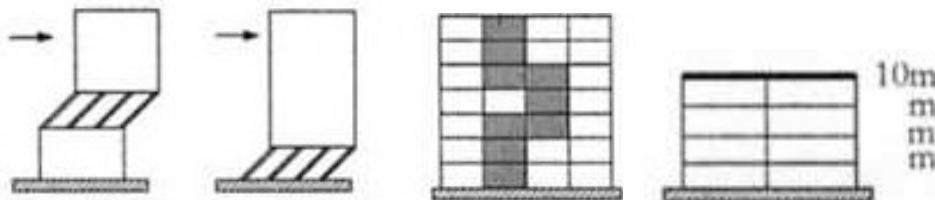
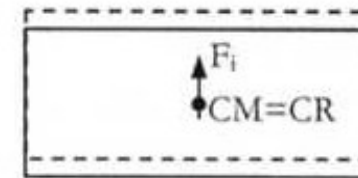
in pianta



in elevazione



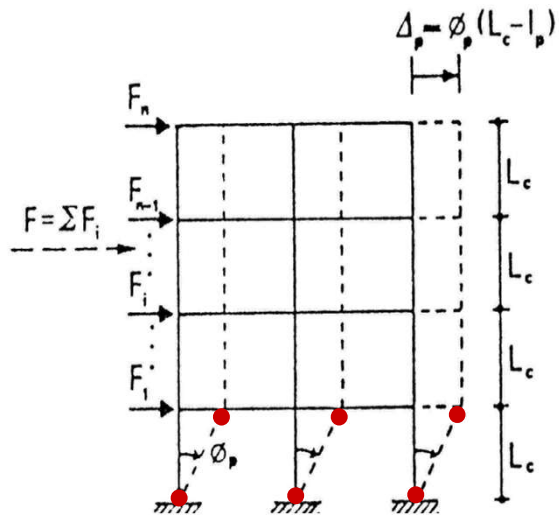
Variazioni di massa
e di rigidezza



MECCANISMI TIPICI DI PLASTICIZZAZIONE (COLLASSO)



“Pilastrini deboli - Travi forti”

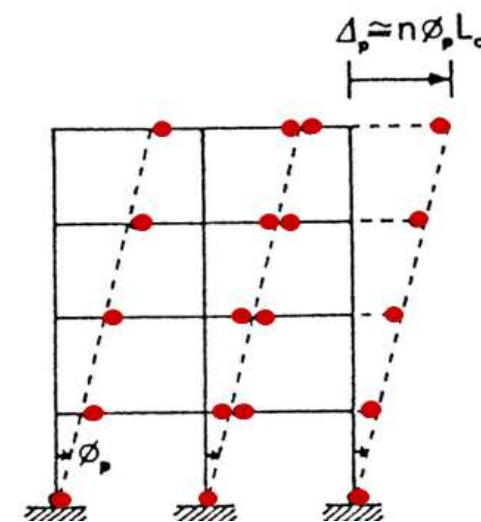


Sfavorevole:

- concentrazione di plasticizzazione
- minore capacità dissipativa
- maggiore richiesta di duttilità locale



“Pilastrini forti - Travi deboli”



Preferibile:

- diffusione della plasticizzazione
- maggiore capacità dissipativa
- minore richiesta di duttilità locale

GERARCHIA DELLE RESISTENZE (TRAVE-PILASTRO)

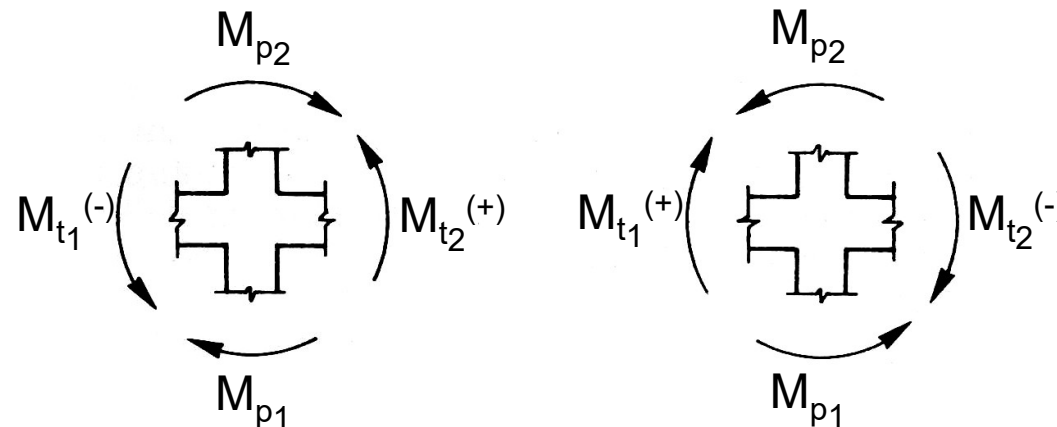
Momenti flettenti ultimi agenti

NTC 17-1-2018

$$\sum M_{c,Rd} \geq \gamma_{Rd} \cdot \sum M_{b,Rd}$$

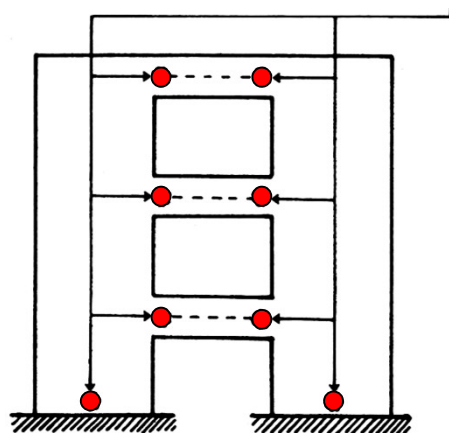
↑
pilastro

↑
trave



γ_{RD} =fattore di sovraresistenza=1,3 (Tab. 7.2.I, c.a. gettato in opera)

Potenziati "regioni critiche"

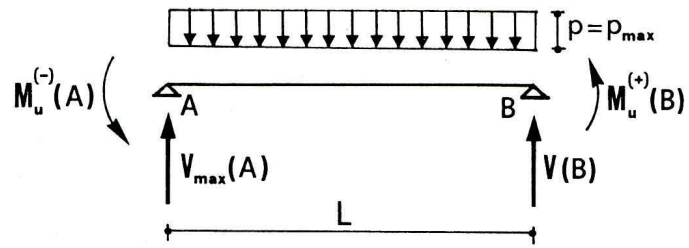


Zone di formazione delle "cerniere plastiche" in pareti accoppiate in c.a.
("Pilastri forti – Travi deboli")

ROTTURE FRAGILI

ROTTURA (FRAGILE) A TAGLIO DI ELEMENTI TOZZI

Trave

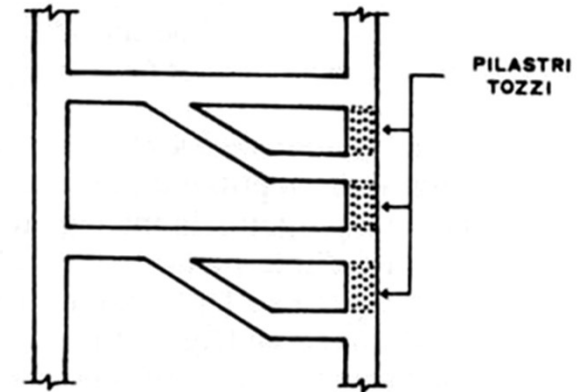


$$V_u(A) \geq pL/2 + \gamma_{Rd} (|M_u^{(-)}(A)| + M_u^{(+)}(B))$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{CD''A''}: 1,20 \\ \text{CD''B''}: 1,10 \end{array} \right.$$

NTC 17-1-2018

Pilastro



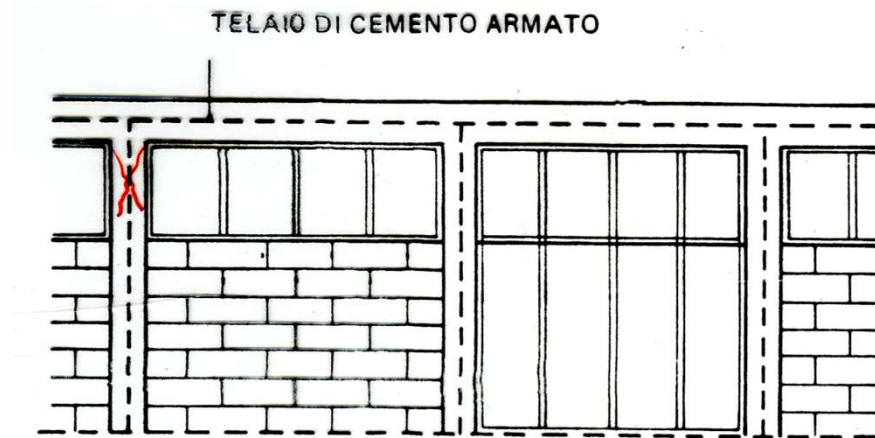
$$p = 0$$

$$\gamma_{Rd} \left\{ \begin{array}{l} \text{CD''A''}: 1,30 \\ \text{CD''B''}: 1,10 \end{array} \right.$$

Armature diagonali nelle regioni critiche

INFLUENZA DELLE TAMPONATURE

Tamponatura interrotta



“Pilastro tozzo” (rottura fragile a taglio)



“Pilastro snello”
(rottura a flessione)



Danneggiamento nodo d'estremità

La fessura diagonale evidenzia una **crisi a taglio del nodo di estremità**. Lo svergolamento della barra longitudinale manifesta la totale assenza di staffe nel nodo e nei primi 20-30 cm dell'estremità superiore della colonna.

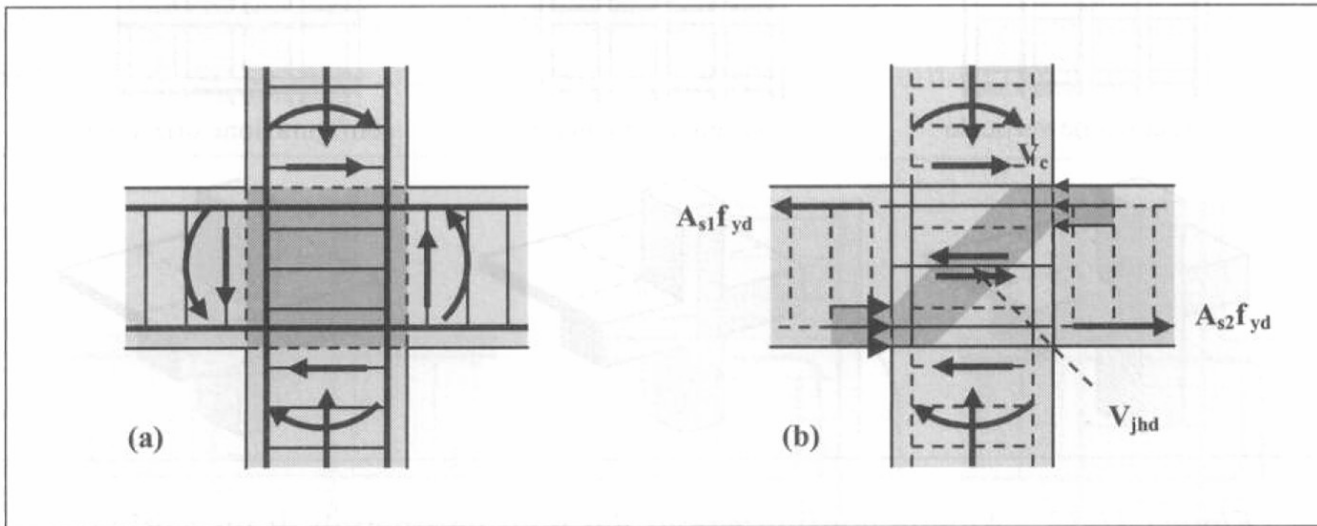
Foto di P. Ricci e G.M. Verderame



Danneggiamento nodo d'estremità

L'assenza di staffe nel nodo comporta lo **svergolamento della barre longitudinali del pilastro**, l'espulsione del copriferro causato dall'ancoraggio delle barre longitudinali della trave ortogonale.

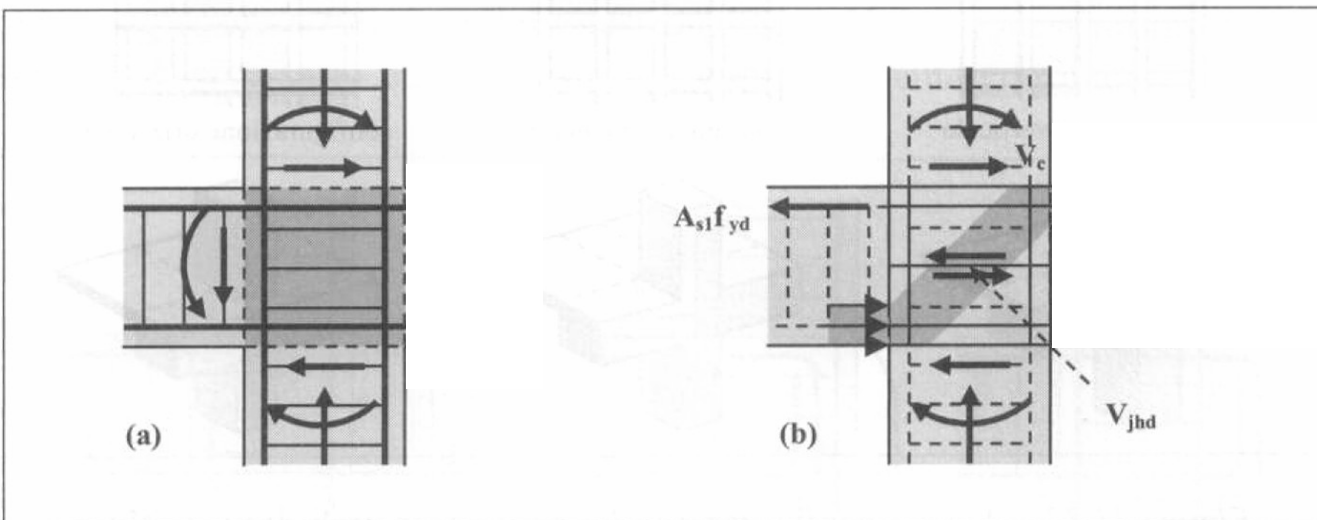
Foto di P. Ricci e G.M. Verderame



**Nodo
interno**

$$V_{jbd} = \gamma_{Rd} (A_{s1} + A_{s2}) f_{yd} - V_c \text{ per nodi interni} \quad (7.4.6)$$

$$V_{jbd} = \gamma_{Rd} \cdot A_{s1} \cdot f_{yd} - V_c \text{ per nodi esterni} \quad (7.4.7)$$



**Nodo
esterno**

DANNI DELLE TAMPONATURE (Fragilità, Dissipazione energia)



Terremoto dell'Aquila, 6 aprile 2009



Bow-window:
Espulsione delle tamponature per mancanza di collegamenti verticali.

Terremoto Irpino-Lucano (S. Angelo dei lombardi), 23 novembre 1980

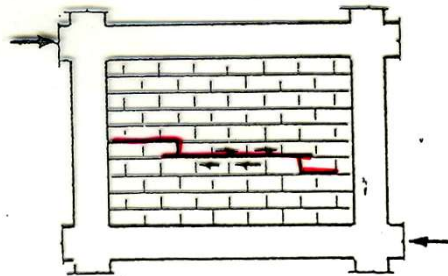
TAMPONATURE

Meccanismi di rottura (fragile)

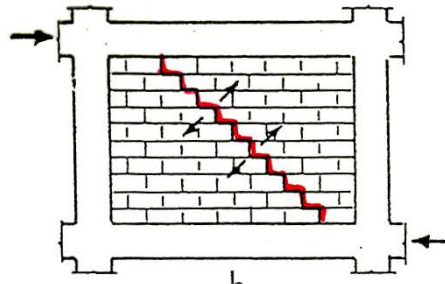
Nel piano

Fuori piano

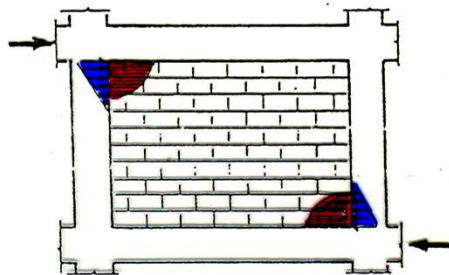
Rottura per scorrimento orizzontale



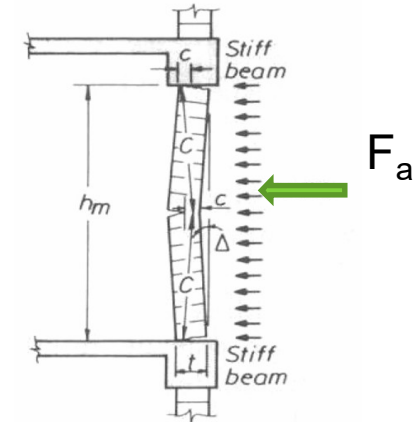
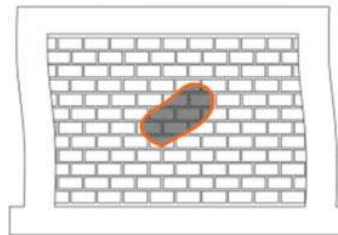
Rottura diagonale per trazione



Rottura per schiacciamento locale degli spigoli



Rottura per schiacciamento al centro del pannello



NTC 2018:

$$F_a = (S_a W_a) / q_a$$

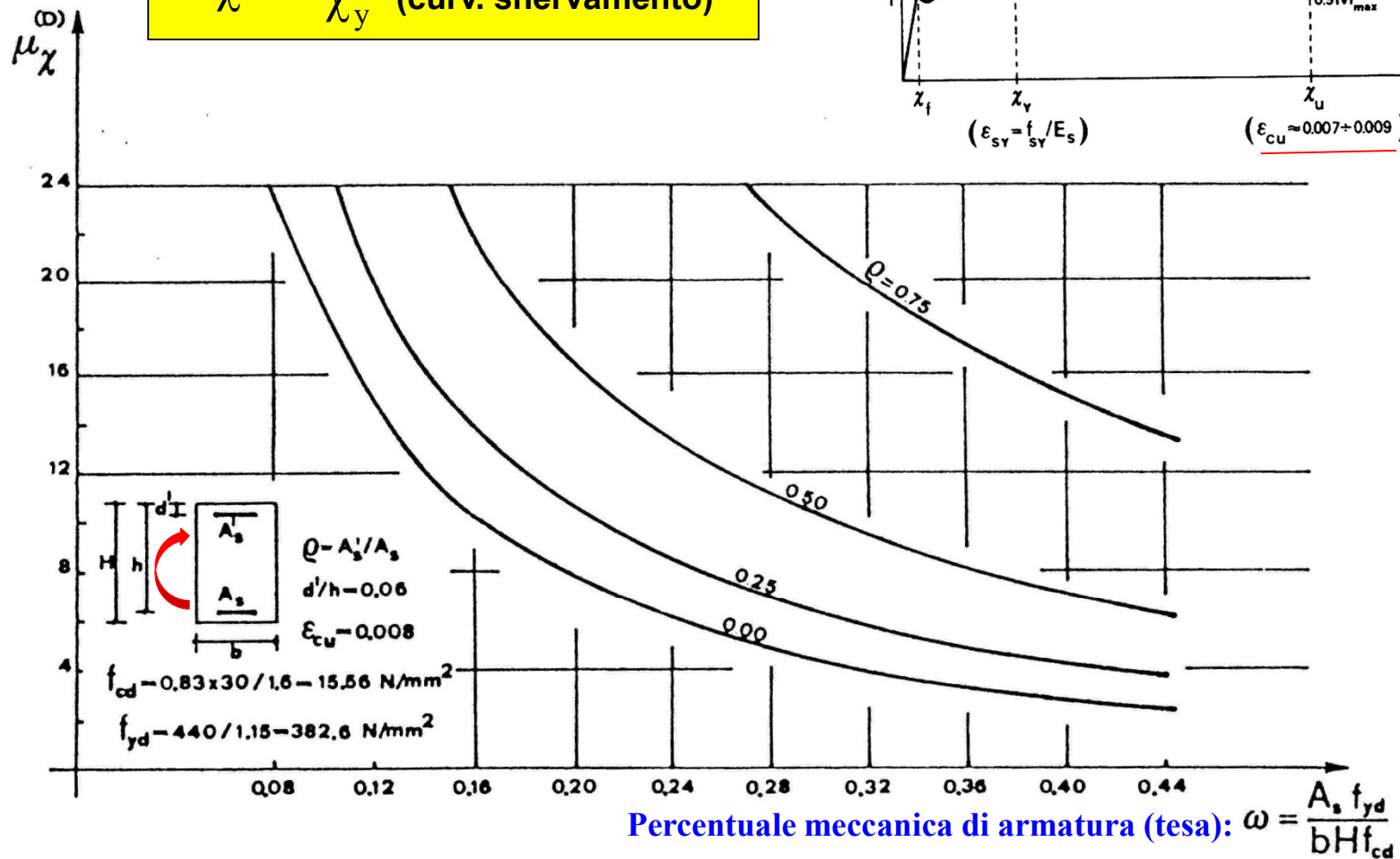
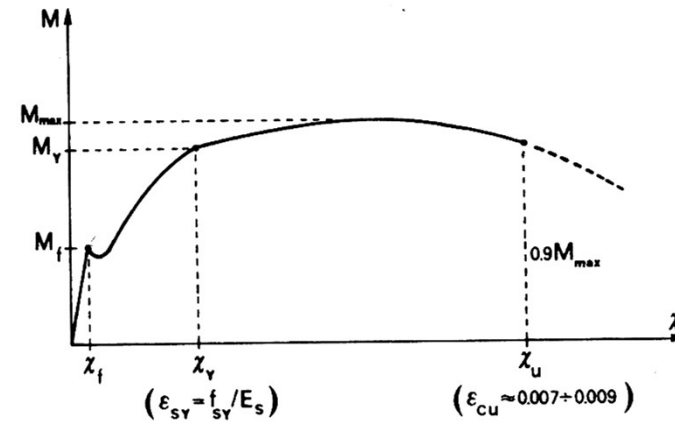
$$S_a = \frac{S a_g}{g} \left[1.5 \left(1 + \frac{z}{H} \right) - 0.5 \right]$$

➔ Limitare spostamenti relativi di piano

DUTTILITA' LOCALE

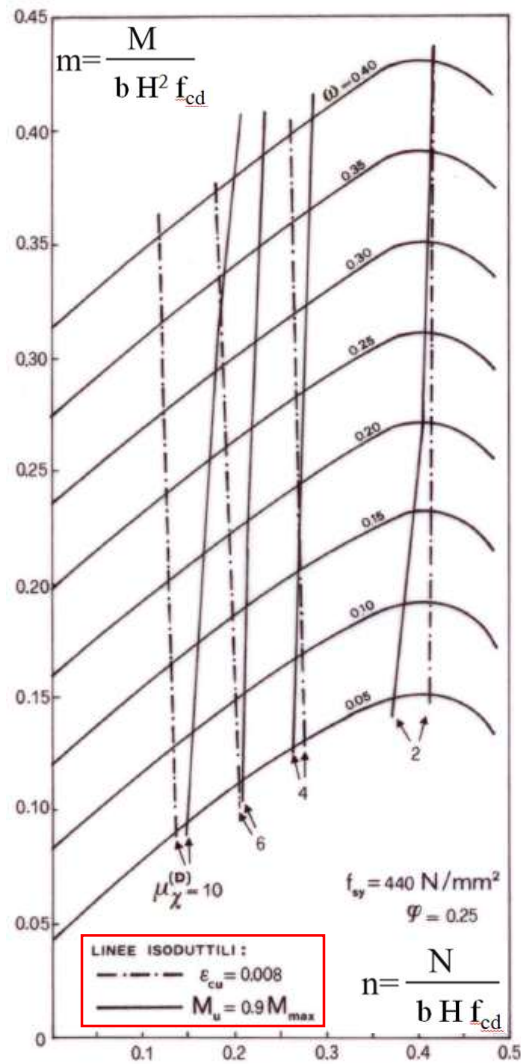
DUTTILITA' LOCALE - Sezione rettangolare semplicemente inflessa (trave)

$$\mu_{\chi} = \frac{\chi_u \text{ (curvatura ultima)}}{\chi_y \text{ (curv. snervamento)}}$$

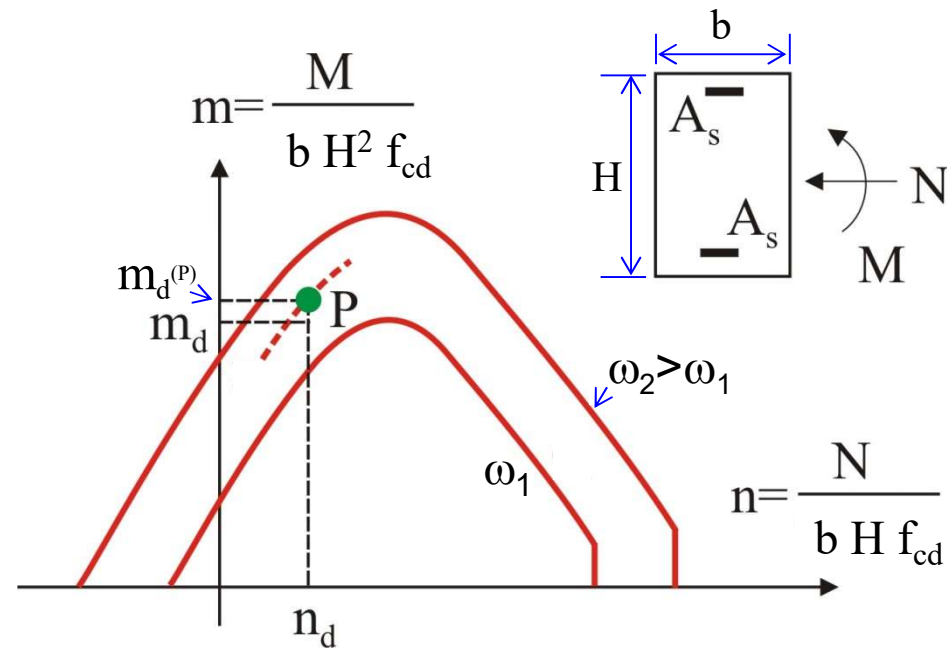


DUTTILITA' LOCALE

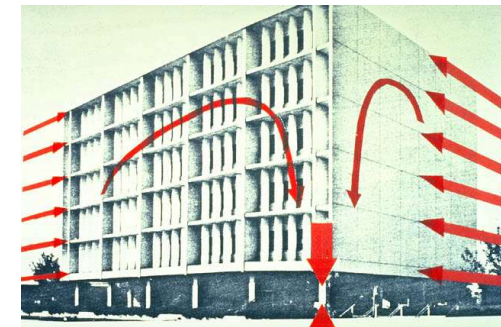
Sezione rettangolare presso-inflessa (pilastro)



(Benato, Giannini, Giuffrè, Masiello, Menegotto, 1979)

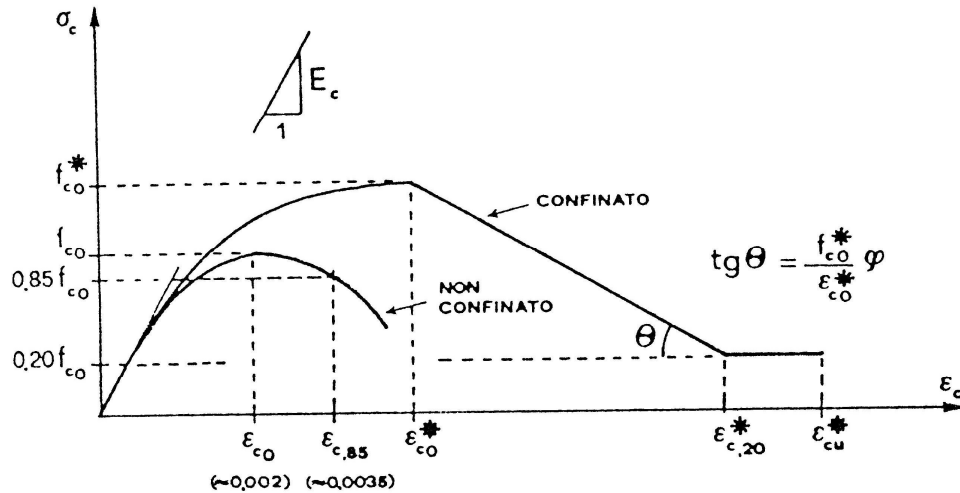


$\omega = A_s f_{sd} / b H f_{cd}$ percentuale meccanica di armatura (tesa)

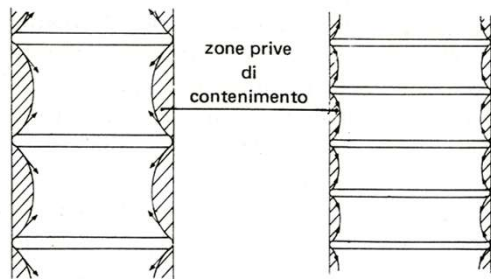


DUTTILITA' LOCALE

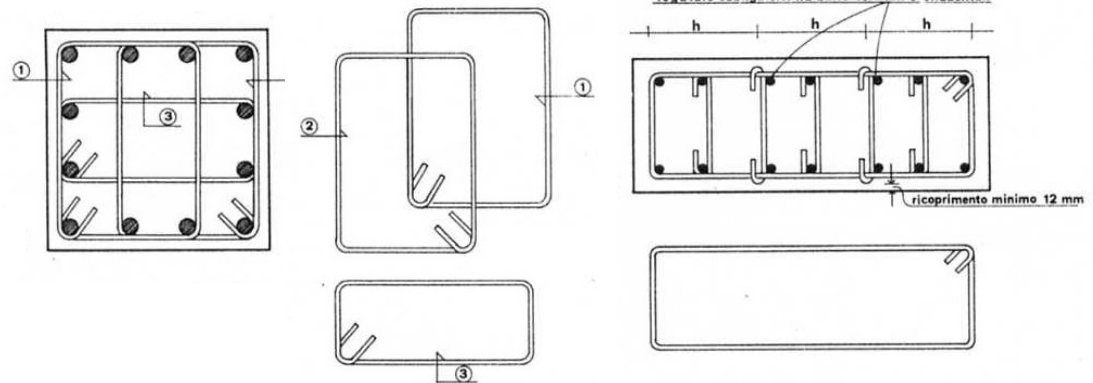
Influenza della staffatura: confinamento del calcestruzzo



Carenza di staffatura nella regione critica



SEZIONI VERTICALI, CON DIVERSI INTERASSI



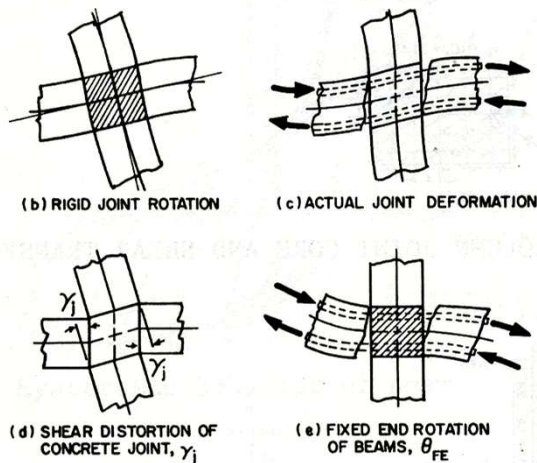
ADERENZA E ANCORAGGIO ARMATURE



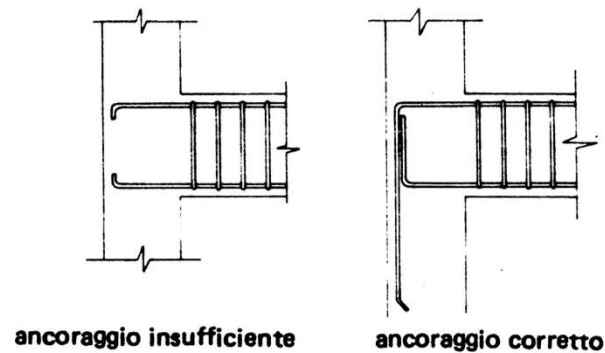
Inadeguata connessione
tra pila e fondazione di un viadotto

Terremoto di San Fernando (California), 1971

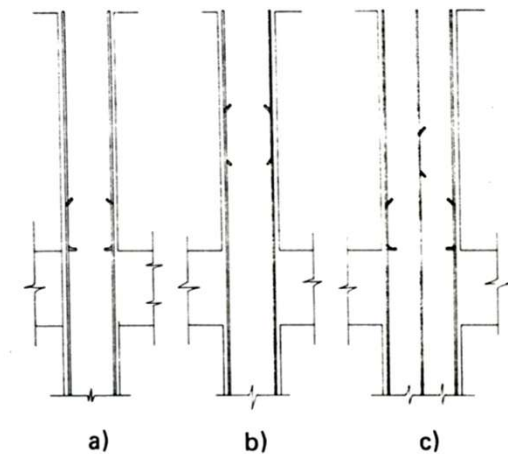
Strutture intelaiate in c.a.



Nodo interno

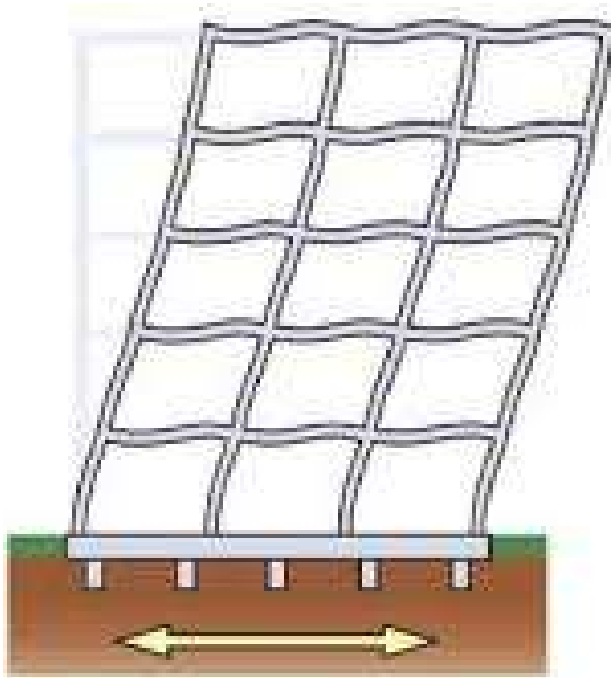


Nodo esterno

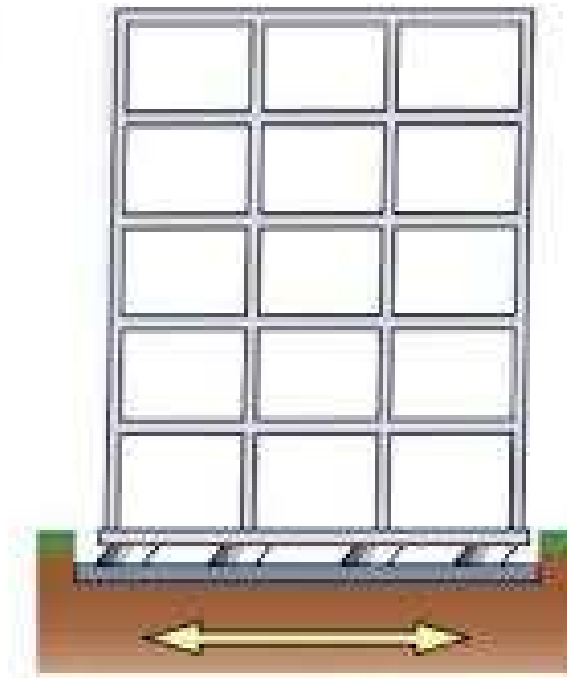


Pilastri

ISOLAMENTO



BASE FISSA



BASE ISOLATA



Isolatore elastomerico



Isolatore a "pendolo scorrevole"

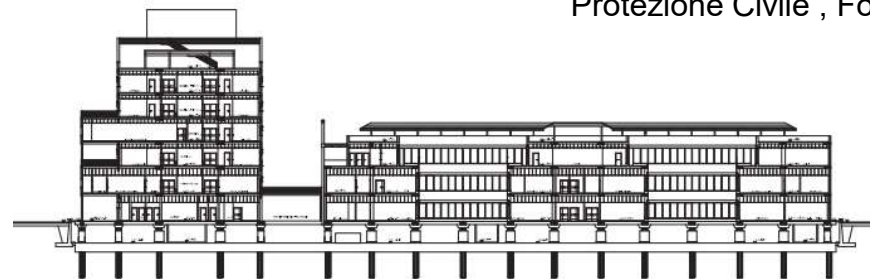
ISOLAMENTO SISMICO (Alcune applicazioni)



Caserma VV.FF., Napoli



Protezione Civile , Foligno (PG)



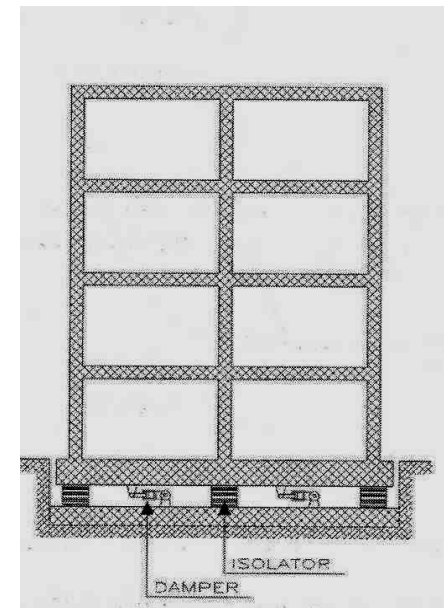
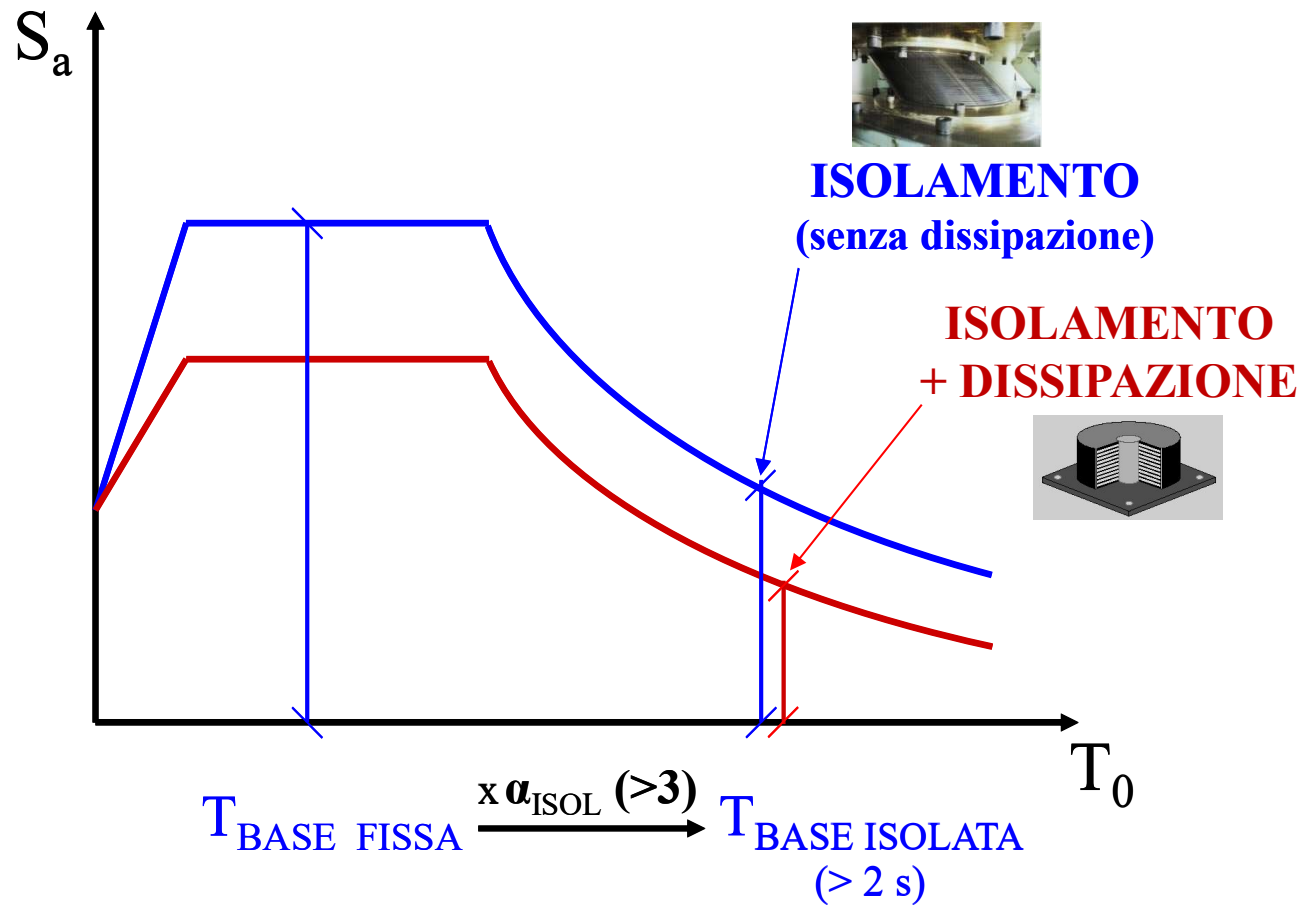
Ospedale del Mare, Napoli

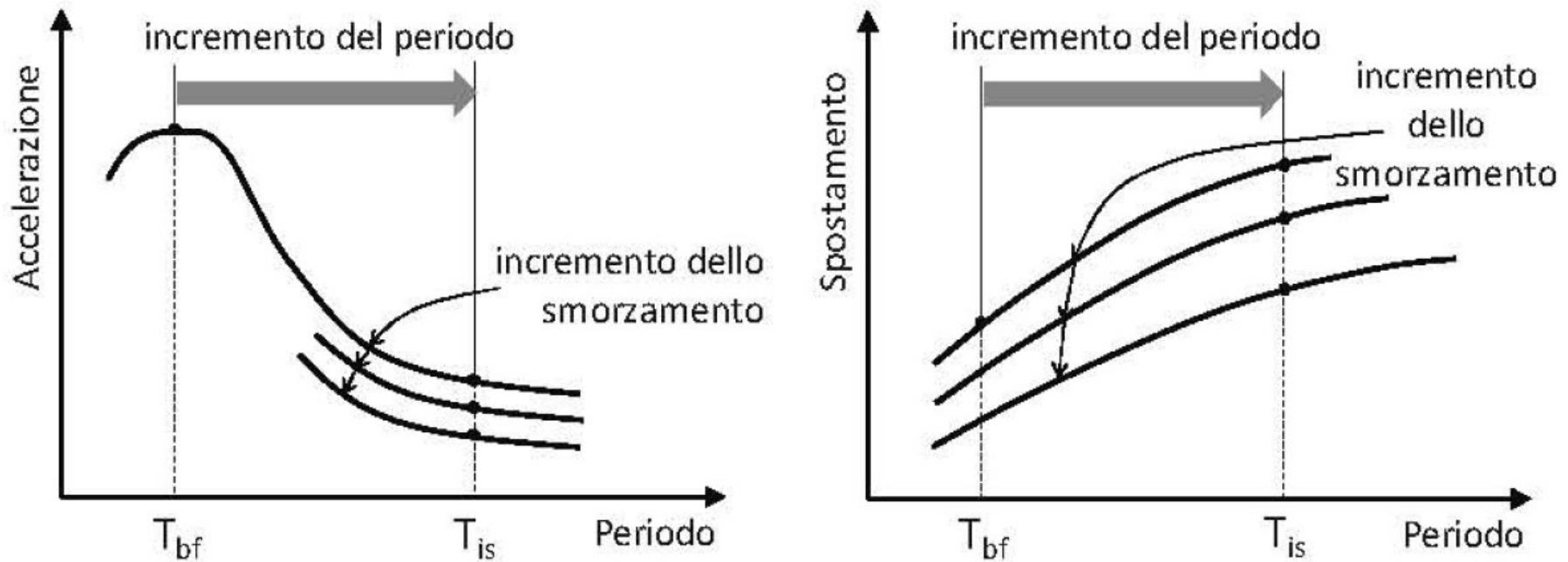


Ricostruzione Scuola Elementare,
San Giuliano di Puglia (CB)



ISOLAMENTO E DISSIPAZIONE





(a) *Incremento del periodo (e dissipazione)*

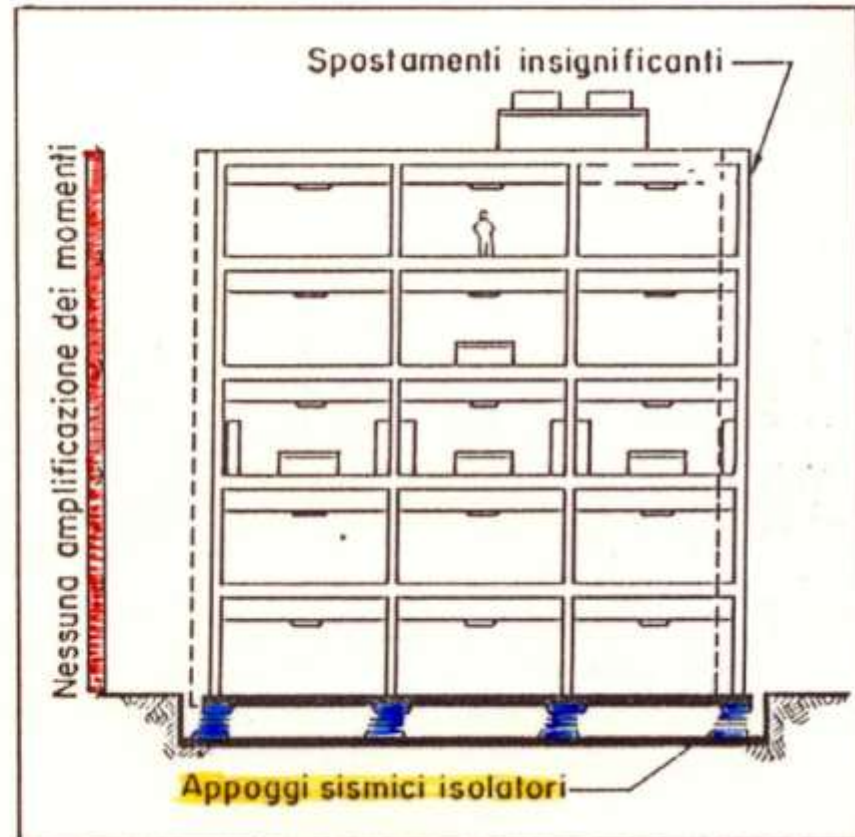
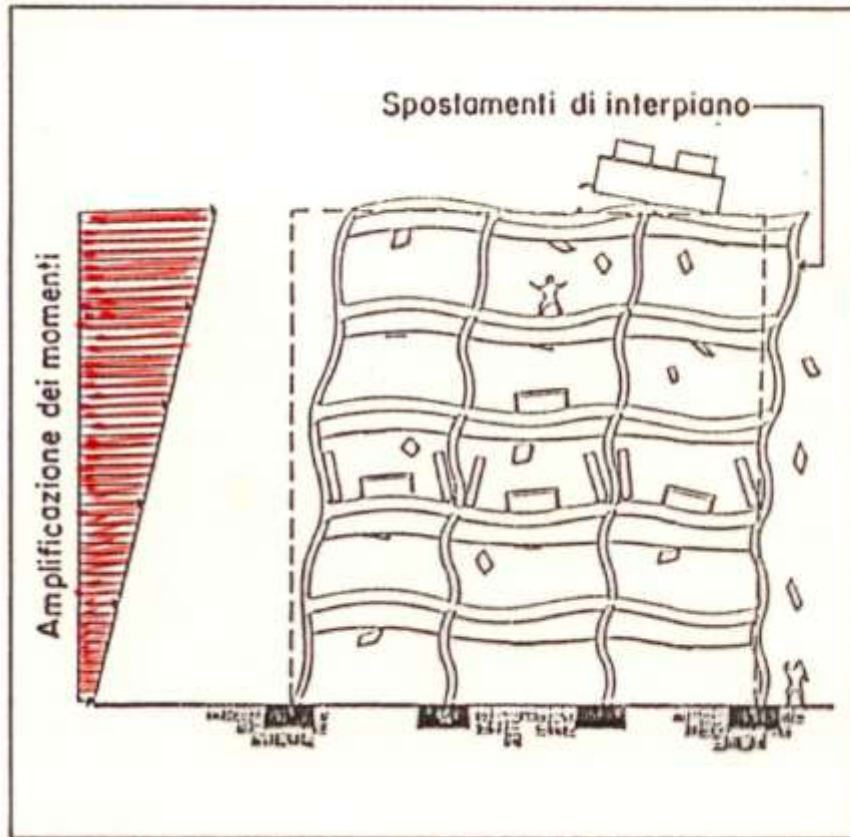
N.B. L'incremento dello smorzamento (ξ) riduce lo spostamento, ma se eccessivo ($\xi > 20-30\%$) può pregiudicare gli effetti favorevoli dell'isolamento sulla sovrastruttura (per es., producendo, nel caso di un edificio, un incremento degli spostamenti relativi di piano della sovrastruttura).

BASE FISSA vs. BASE ISOLATA

Rigidezza isolatori

$$K_{iso} = 4\pi^2 m / T_{iso}^2$$

(approssimazione sovrastruttura rigida)

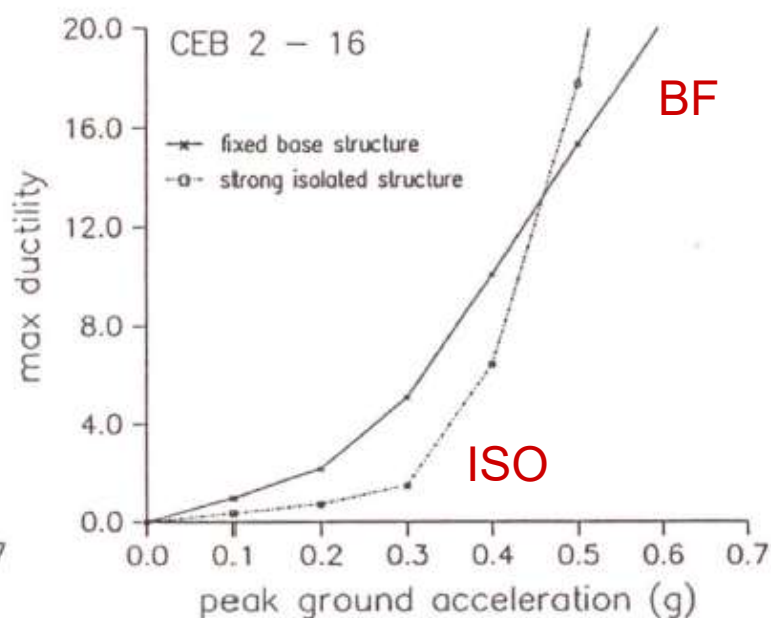
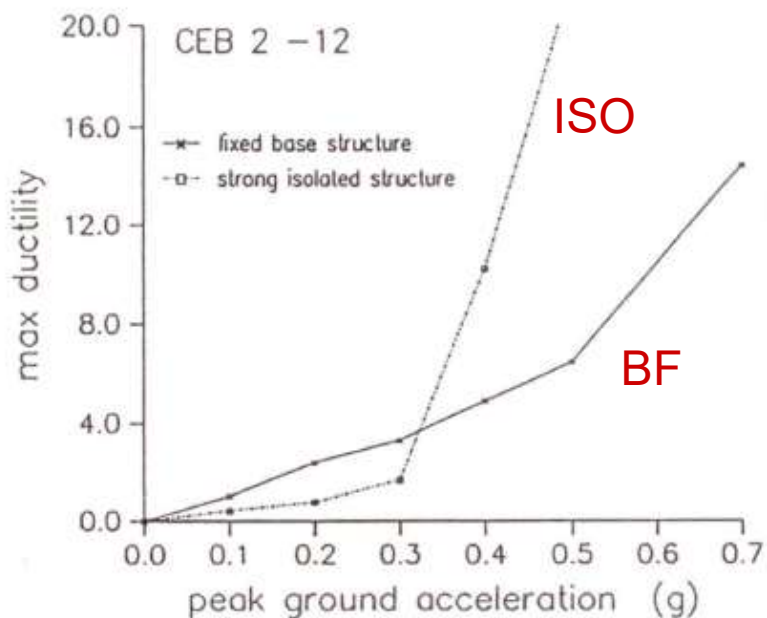
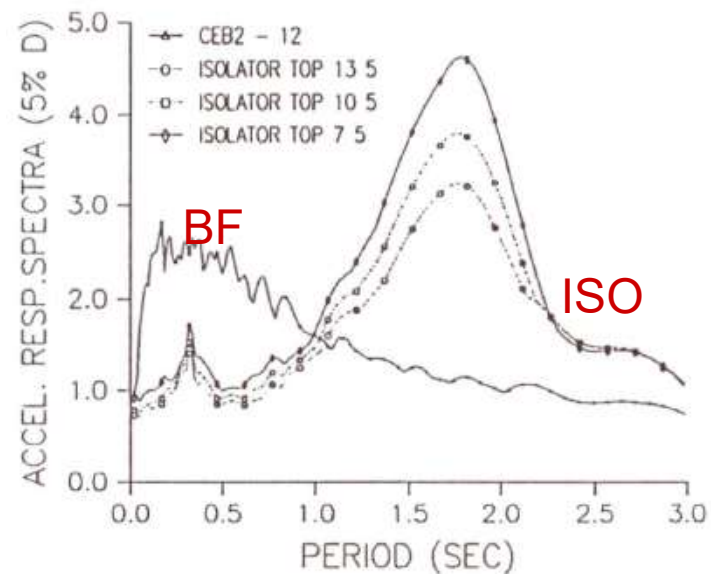
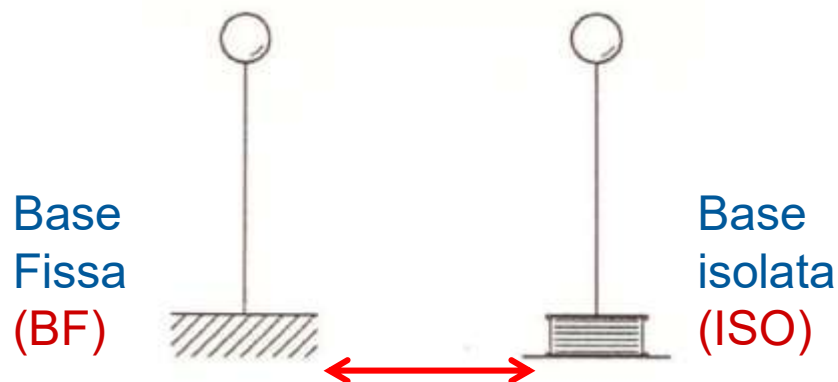


Per terremoti di notevole intensità (SLV o SLC):

Danni estesi (problemi operatività) ↩

↪ Danni trascurabili (operatività)

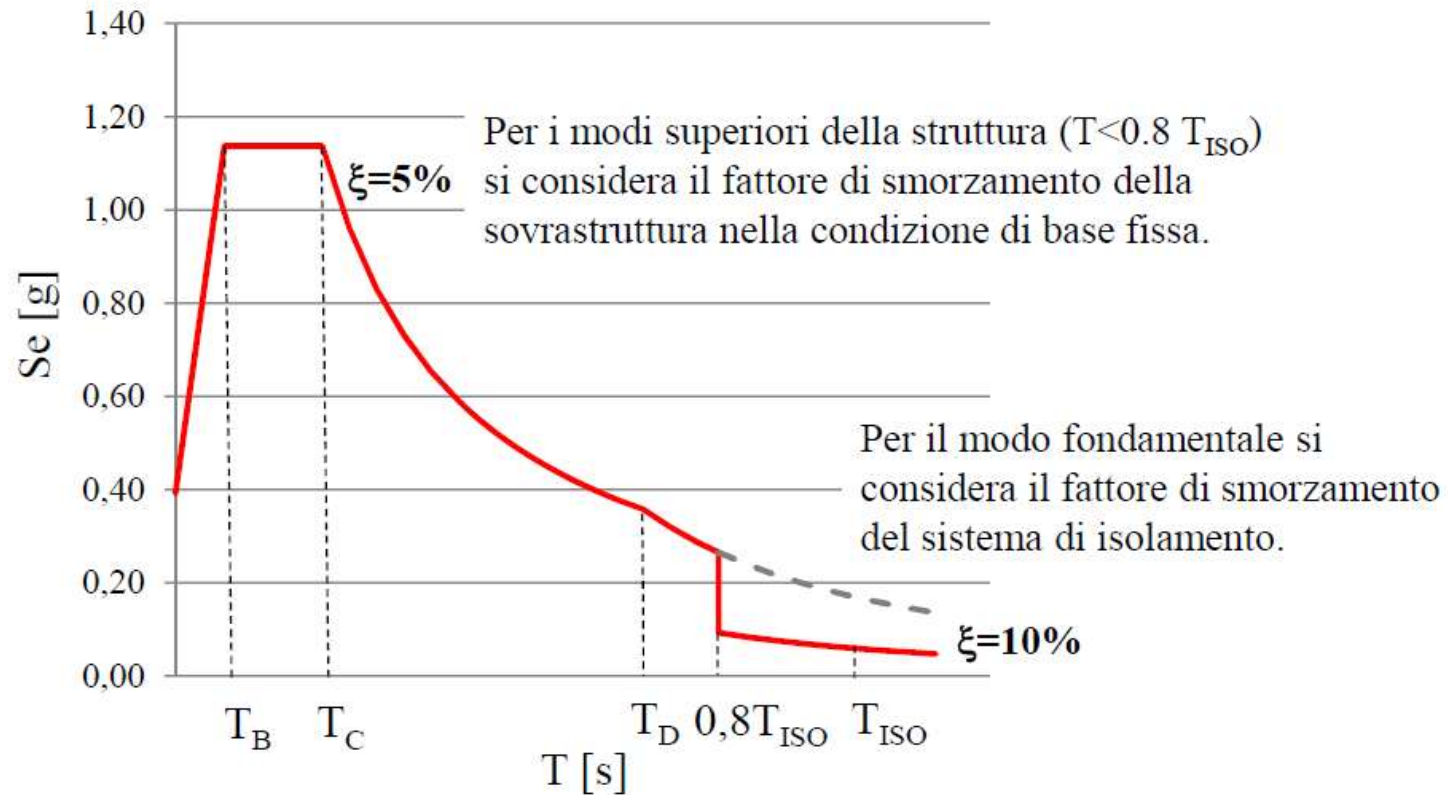
CONFRONTO BASE FISSA / ISOLATA



N.B. Effetto filtro: analogia con suolo deformabile

F. Vestroni, A. Vulcano, G. Di Pasquale (1991)

SPETTRO DI PROGETTO



Progetto del sistema di isolamento

(SLC, $q=1$)

$$F = MS_e(T_{ISO}, \xi_{ISO})$$

M: massa totale della sovrastruttura

Progetto della sovrastruttura

(SLV, $q=1.5$)

$$f_j = m_j S_e(T_{ISO}, \xi_{ISO}) / q$$

m_j : massa del livello j-esimo

(Cortesia prof. Fabio Mazza)

DISSIPAZIONE SUPPLEMENTARE DI ENERGIA

SISTEMI PASSIVI PER LA DISSIPAZIONE SUPPLEMENTARE DI ENERGIA

■ DISSIPATORI

- AD ATTRITO (FR)
- ELASTO-PLASTICI (plasticizzazione metalli) (YL)
- (FLUIDO-) VISCOSI (VS)
- VISCOELASTICI (VE)



■ “TUNED MASS DAMPERS” (TMD)

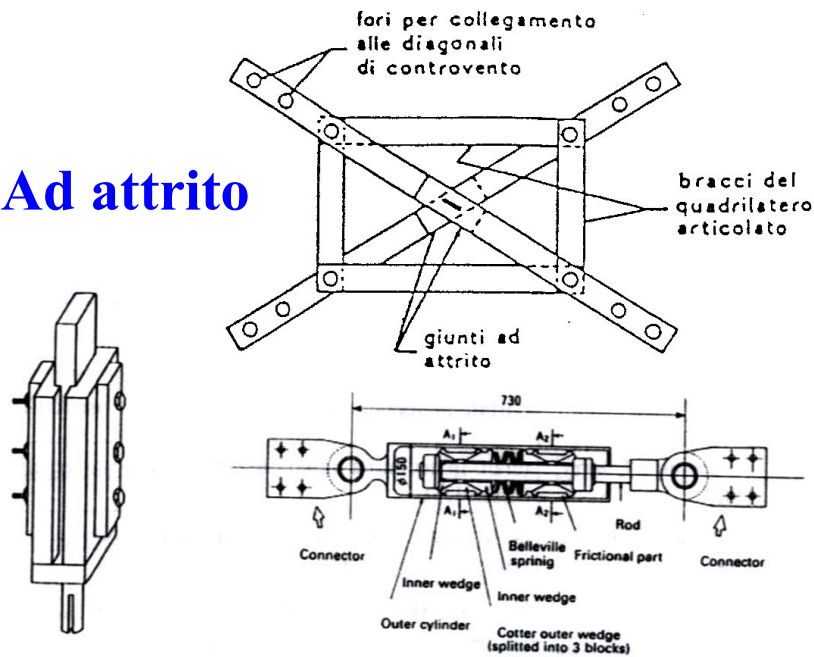
■ “TUNED LIQUID DAMPERS” (TLD)

■ MATERIALI INTELLIGENTI

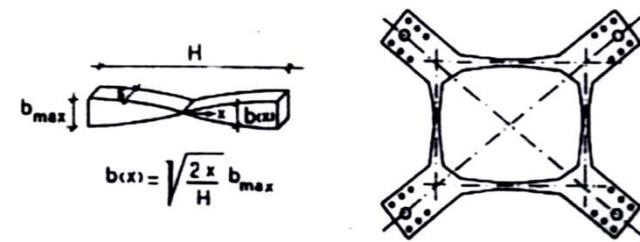
- LEGHE A MEMORIA DI FORMA (SMA)
- PIEZOELETTRICI (PZ)
- FLUIDI ELETTROREOLOGICI (ER)
- FLUIDI MAGNETOREOLOGICI (MR)

TIPOLOGIE DI DISSIPATORI (alcuni esempi)

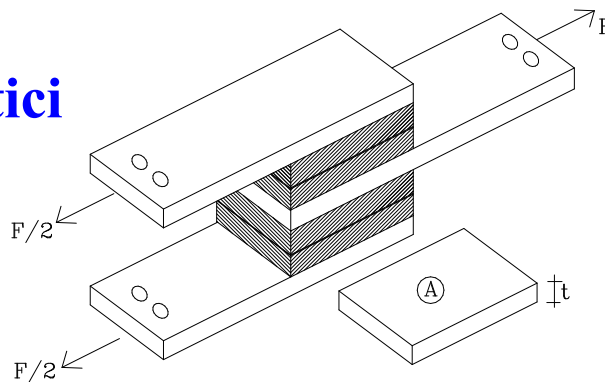
Ad attrito



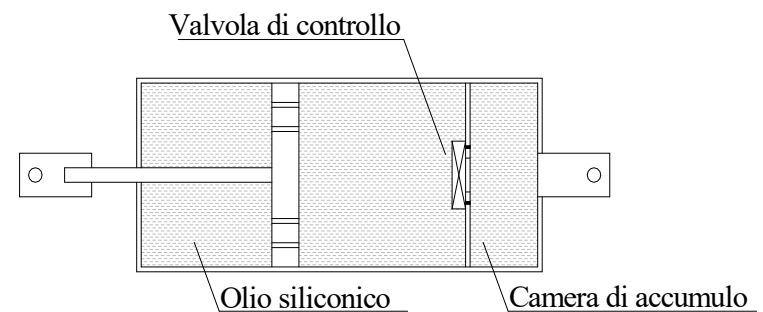
Elasto-plastici (plasticizzazione metalli)



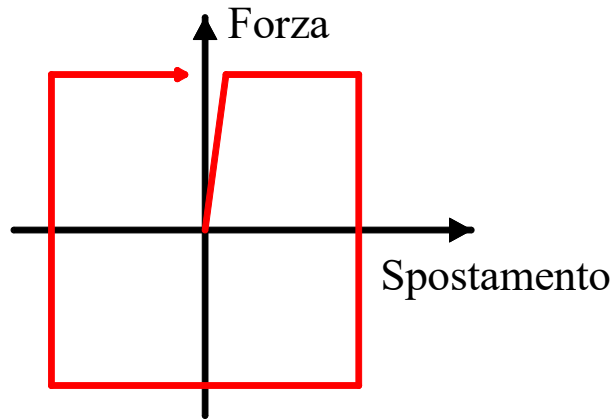
Viscoelastici



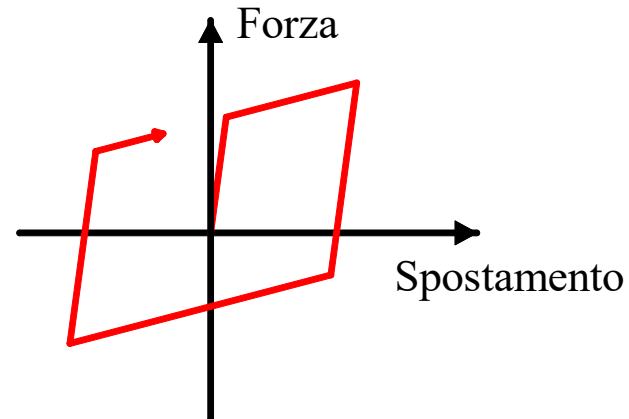
Viscosi



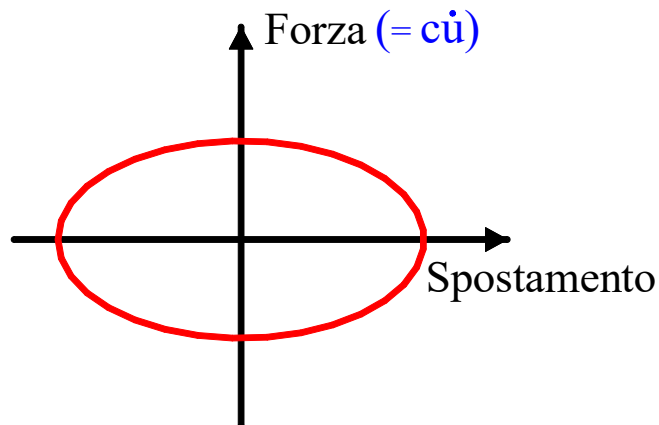
RISPOSTA DI DISSIPATORI



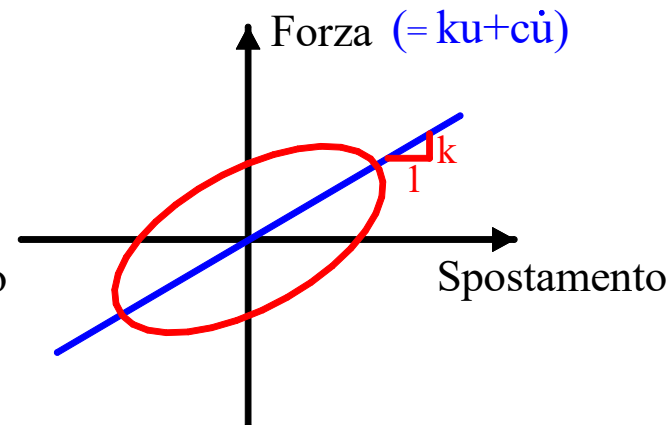
Dissipatori ad attrito



Dissipatori elasto-plastici
(plasticizzazione metalli)

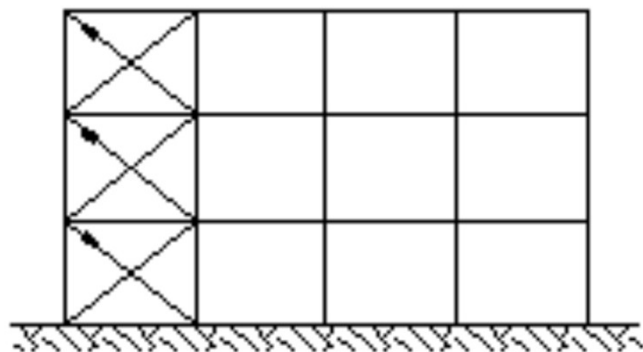


Dissipatori viscosi

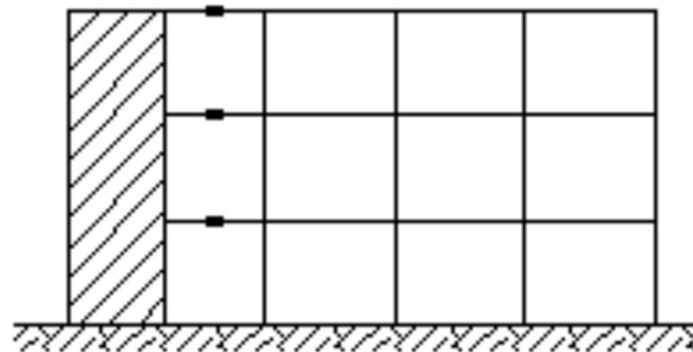


Dissipatori viscoelastici

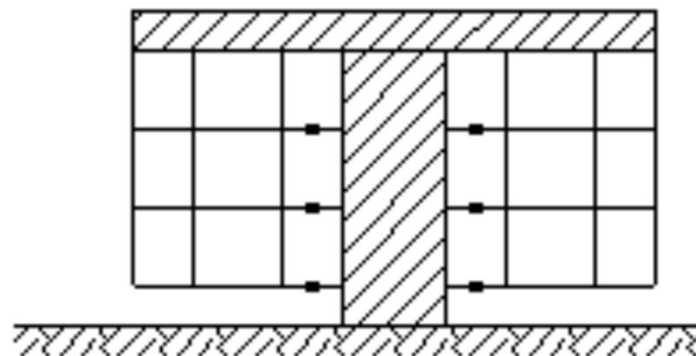
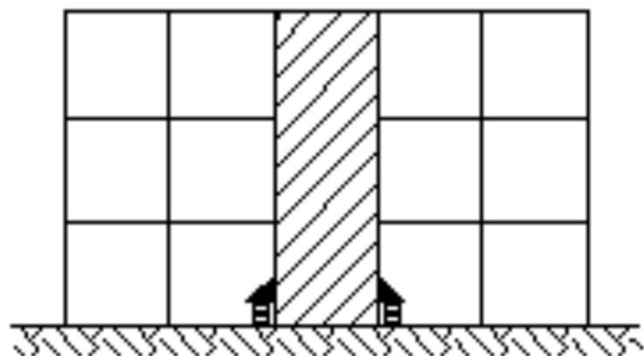
DISPOSIZIONE DI DISPOSITIVI DISSIPATIVI



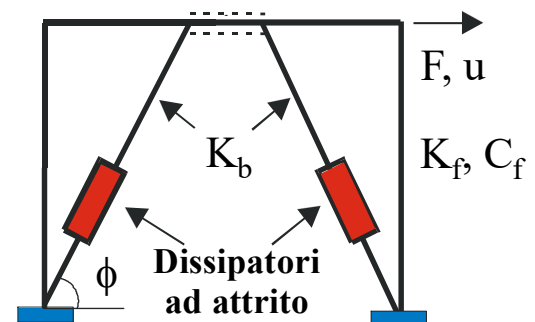
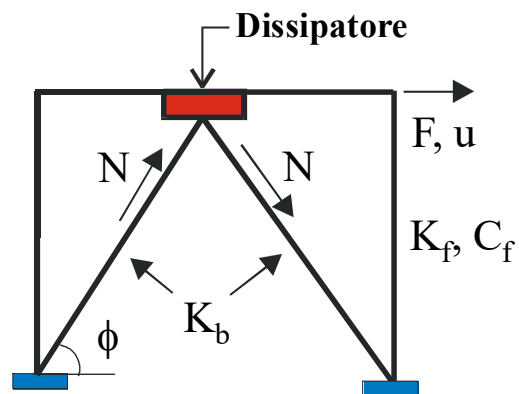
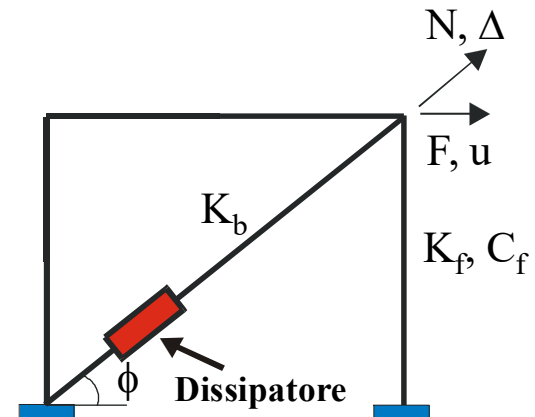
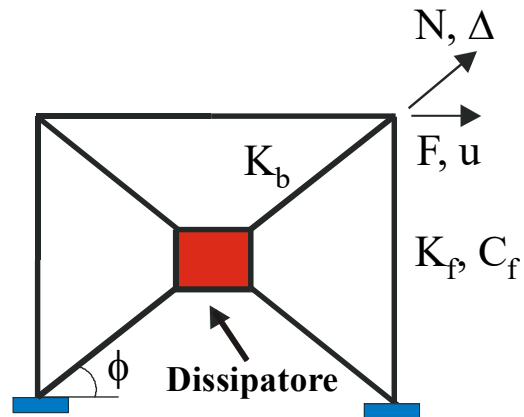
Controventi dissipativi



← Parete interna o esterna (*esoscheletro*)



SCHEMI DI CONTROVENTI DISSIPATIVI



CONTROVENTI DISSIPATIVI (Alcune applicazioni, adeguamento sismico)



Scuole Domiziano Viola e La Vista, Potenza

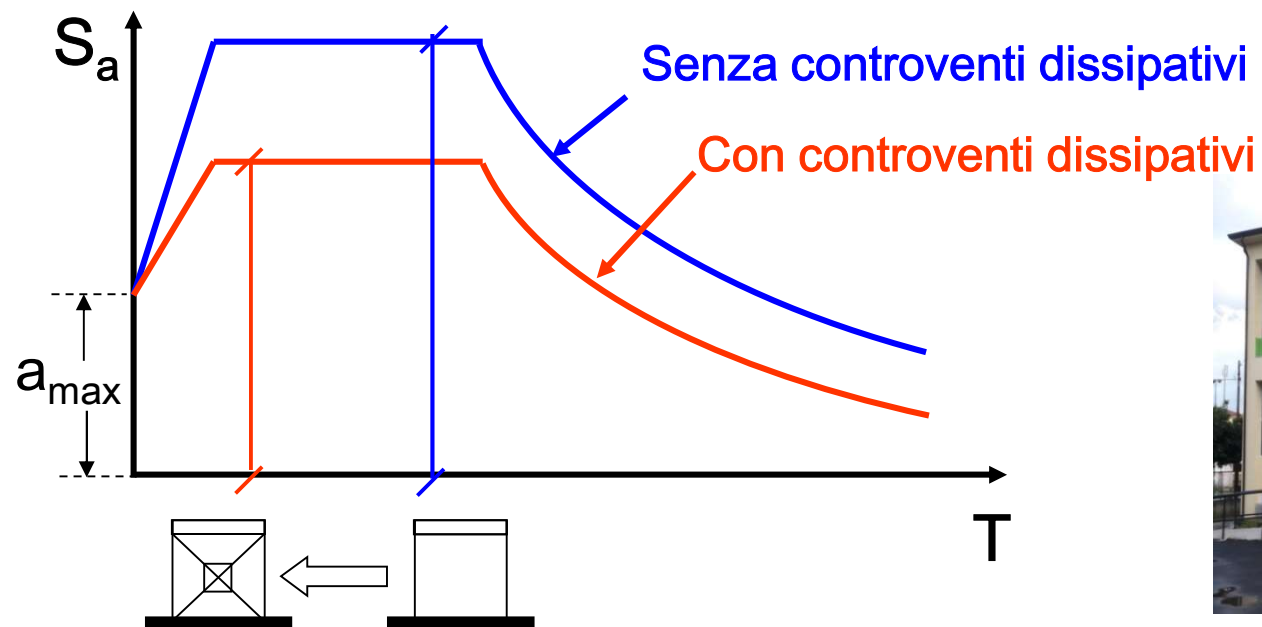


Scuola Media Gentile-Fermi, Fabriano (AN)



Scuola Elementare, Soverato (CZ)

DISSIPAZIONE SUPPLEMENTARE DI ENERGIA

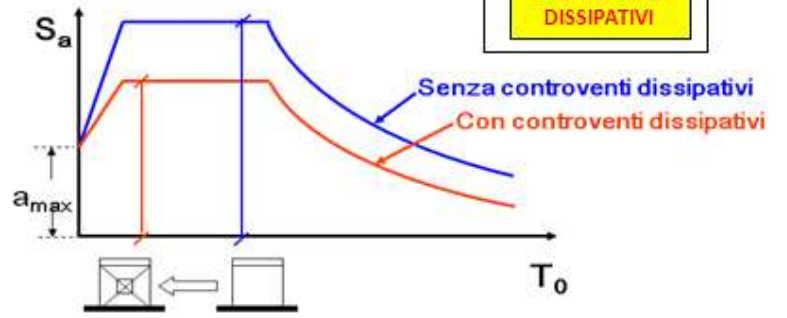
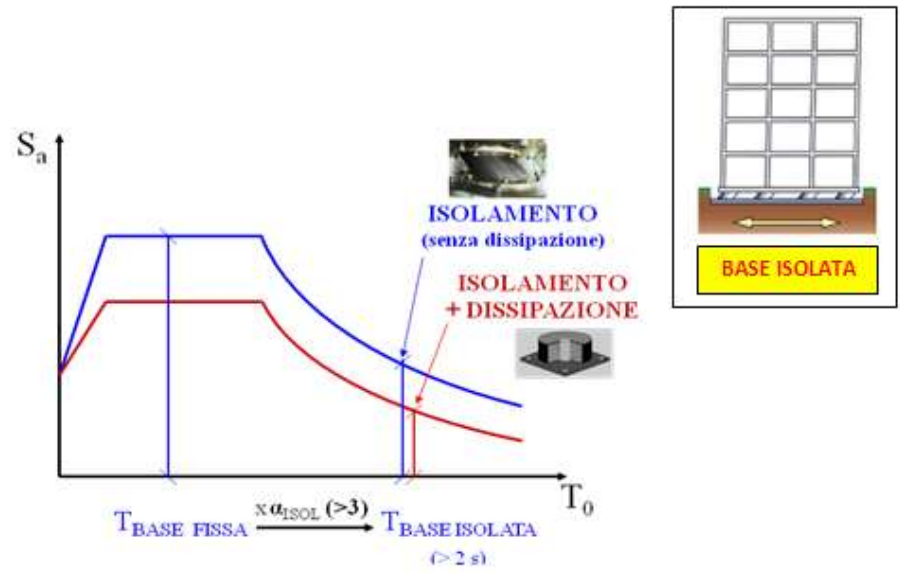
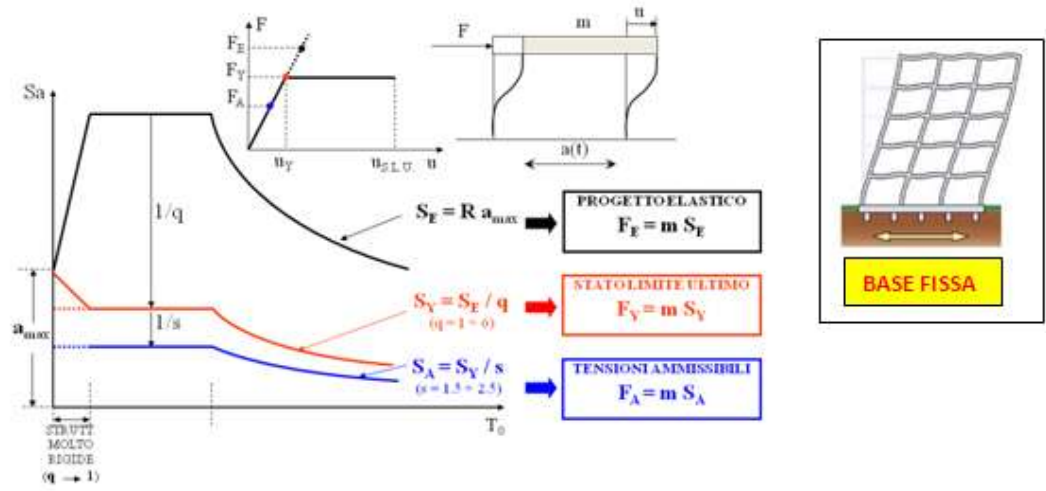


- Incremento di rigidezza → riduzione periodo vibrazione; assorbimento di una parte delle azioni sismiche; variazione degli sforzi normali (pilastri e travi).
- Incremento capacità dissipativa → riduzione azioni sismiche e spostamenti.

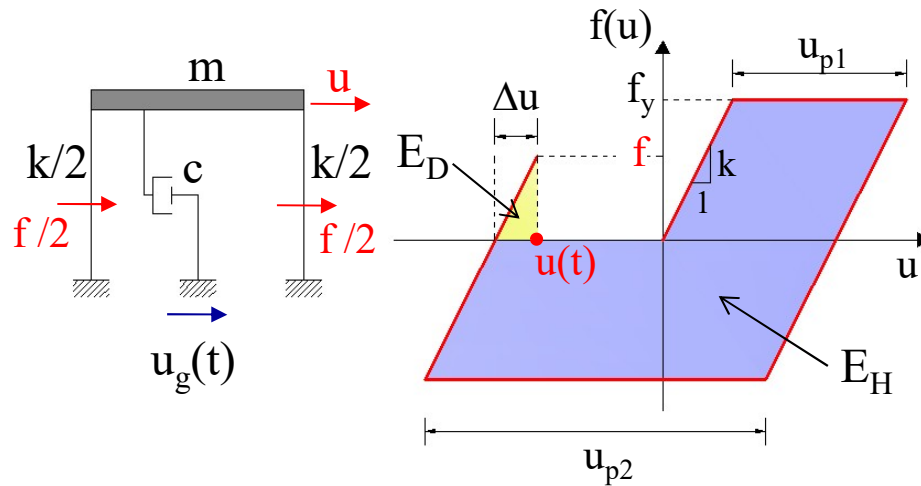
Dissipatori ad attrito / elasto-plastici: l'attivazione dei dissipatori dovrebbe precedere lo snervamento della struttura intelaiata (ma possibili danni delle tamponature).

Dissipatori viscosi / visco-elastici: attivazione anche per basse intensità sismiche (dissipatori fluido-viscosi pressurizzati a matrice siliconica: bassa rigidezza; preminente capacità dissipativa).

RIEPILOGO



EQUAZIONE DEL MOTO IN TERMINI DI FORZE / ENERGIE



In campo elastico:

$$E_D(t) = k \int_0^{u(t)} u(t) du = \frac{1}{2} k u^2(t)$$

In campo inelastico:

$$E_D(t) + E_H(t) = \frac{1}{2} k \Delta u^2(t) + f_y \sum_i |u_{pi}|$$

$$m \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + k u(t) = -m \ddot{u}_g(t)$$

(in campo elastico)

↓
 $f(t)$ (in campo elasto-plastico)

Integrando nel tempo i contributi elementari dei lavori delle forze (inerzia, viscosa, risposta elasto-plastica) per lo spostamento elementare du , si ottiene l'equazione in termini di energia:

$$E_I(t) = E_D(t) + E_H(t) + E_C(t) + E_V(t)$$

(in campo elasto-plastico)

↑ ↑ ↑ ↑ ↑
ingresso def. elastica isteretica cinetica diss. viscosa

CONFRONTO EQUAZIONE DEL MOTO IN TERMINI DI ENERGIA

ingresso def. elastica isteretica cinetica diss. viscosa

$$E_I(t) = E_D(t) + E_H(t) + E_C(t) + E_V(t)$$

Danni (duttilità)

**(SISTEMI
CONVENZIONALI)**

$$E_I(t) = E_D(t) + E_H(t) + E_C(t) + E_V(t)$$

Riduzione

=0 (o limitata)

(ISOLAMENTO)

$$E_I(t) = E_D(t) + E_H(t) + E_C(t) + E_V(t) + E_S(t)$$

=0 (o limitata)

Incremento
dissipazione

**(DISSIPAZIONE
SUPPLEMENTARE)**

Grazie per l'attenzione!