

1980  
novembre  
2010

30° anniversario

Centro Studi PLINIVS  
Università di Napoli



# A trent'anni dal Terremoto dell'80 La Prevenzione del Rischio Sismico tra Memoria e Innovazione

Potenza, Venerdì, 19 Novembre 2010  
Università degli Studi della Basilicata

---

**La valutazione della vulnerabilità: dalle DPM  
basate sui dati rilevati nel sisma'80 agli  
attuali approcci numerico meccanici.**

**Domenico Liberatore<sup>1</sup>, Giulio Zuccaro<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Università di Roma "La Sapienza"

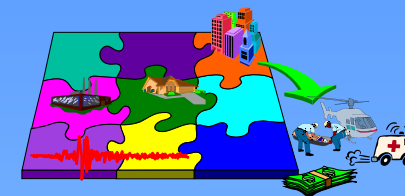
<sup>2</sup> Università di Napoli "Federico II"



1980  
novembre  
2010

30° anniversario

# Per pianificare o gestire occorre .....



1. Comprendere al meglio i **fattori che influenzano** la risposta delle strutture e della popolazione ai fenomeni pericolosi potenzialmente presenti nella regione.
2. Prevedere scenari credibili a **scala territoriale e/o urbana** con riferimento all'azione dei singoli fenomeni pericolosi.
3. Evidenziare le **criticità** emergenti sul territorio in modo da:
  - **pianificare** in tempo di pace
  - **suggerire** ed attuare misure di mitigazione
  - **gestire** in emergenza

Conoscenza e  
Capacità di previsione

**Per tutte queste attività occorre conoscere la  
vulnerabilità degli elementi a rischio**

# Vulnerabilità

**La vulnerabilità è definita come la probabilità di un elemento a rischio (i.e. Edificio) a subire un certo livello di danno conseguente ad un evento pericoloso (i.e. sisma) di assegnata intensità.**

**In particolare le funzioni di vulnerabilità forniscono relazioni tra la **Tipologia** dell'elemento a rischio - **l'Intensità** dell'evento pericoloso e il **Livello di danno**.**

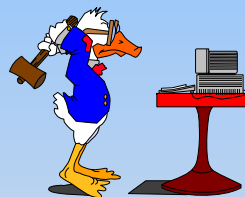
**Le funzioni di vulnerabilità si riferiscono a classi di edifici cui si attribuisce una analoga risposta comportamentale sotto l'azione dell'evento pericoloso.**



## Vulnerabilità osservata

- Metodologie su base probabilistica e/o statistica
- Studio dei fattori di vulnerabilità
- Metodologie su base storica

Si interpreta empiricamente il comportamento degli edifici di una certa categoria attraverso lo studio del danno osservato sugli stessi in occasione di passati terremoti



## Vulnerabilità calcolata

Viene definito il comportamento previsto sulla base di modelli teorici

Le previsioni del danno sono formulate in base a calcoli analitici per la determinazione della risposta sismica dell'edificio e dello stato tensionale e deformativo che le corrisponde

- Simulazioni numeriche del comportamento della struttura
- Sperimentazioni in campo o in laboratorio



## Classificazione dei metodi per la valutazione delle curve di vulnerabilità

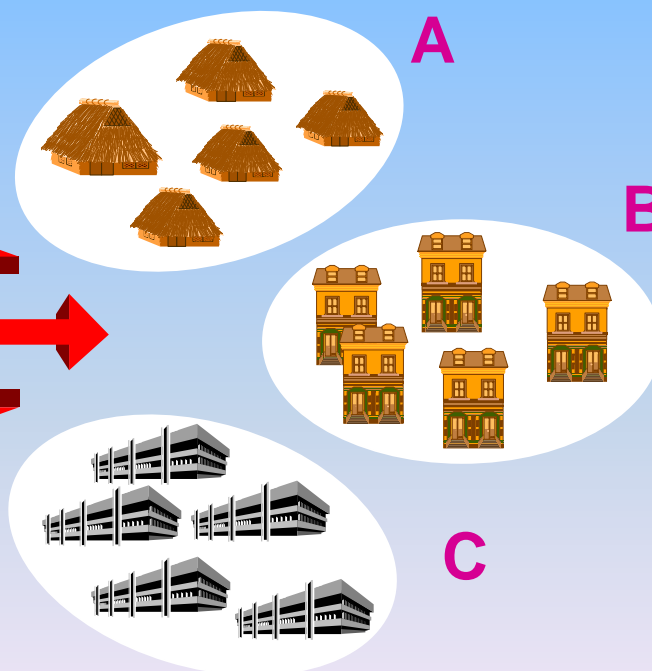
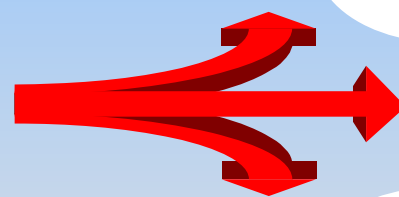
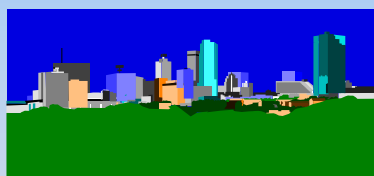
- **Curve di Vulnerabilità empiriche (osservata)**
  - **Curve di Vulnerabilità basate sul giudizio esperto**
  - **Curve di Vulnerabilità analitiche (calcolata)**
  - **Curve di Vulnerabilità ibride (osservata e calcolata)**
-

# Vulnerabilità osservata

## Elaborazione statistica dei dati rilevati

L'analisi sull'edificio ci consente di attribuirlo ad una classe tipologica, il cui comportamento rispetto ad un'azione sismica di una certa entità è statisticamente noto a priori, in quanto derivato dall'elaborazione statistica dei danni causati da terremoti passati agli edifici.

- **Attribuzione della costruzione ad una Classe di Vulnerabilità**



Alla classe tipologica viene associata una funzione di vulnerabilità.



**Matrici di probabilità di danno**



1980  
novembre  
2010

30° anniversario

# Vulnerabilità osservata

## Elaborazione statistica dei dati rilevati



## Le Classi di Vulnerabilità

### MSK '76:

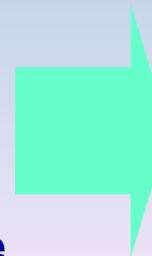
**A - Costruzioni in pietra naturale, costruzioni rurali, case in mattoni crudi o con malta di argilla, case in argilla o limo**

**B - Costruzioni in muratura ordinaria, in grossi blocchi, muratura con telai in legno, strutture in pietra squadrata**

**C - Costruzioni in cemento armato intelaiate o a pannelli, costruzioni in legno ben realizzate, (costruzioni in muratura di ottima qualità)**

### EMS '98:

- sviluppo della classificazione MSK
- introdotte le classi D,E ed F differenziando il livello di protezione sismica del c.a. e la muratura armata



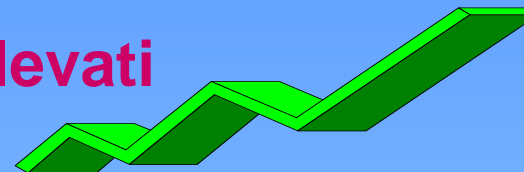
Type of Structure	Vulnerability Class					
	A	B	C	D	E	F
MASONRY	●					
	●	—				
	—	●				
			—	●		
	—	●	—			
			—	●	—	
				—	●	—
REINFORCED CONCRETE (RC)			—	●	—	
			—		●	—
				—		●
			—	●	—	
			—		●	—
STEEL				—		●
				—	●	—
				—	●	—
WOOD			—	●	—	

**Tecniche di attribuzione Classi (Progetto Save, 2004)**



# Vulnerabilità osservata

## Elaborazione statistica dei dati rilevati



### Matrici di Probabilità di Danno

Ad ogni tipologia viene associata una matrice di probabilità di danno, i cui termini definiscono la probabilità di osservare (frequenza) un certo livello di danno per una data intensità

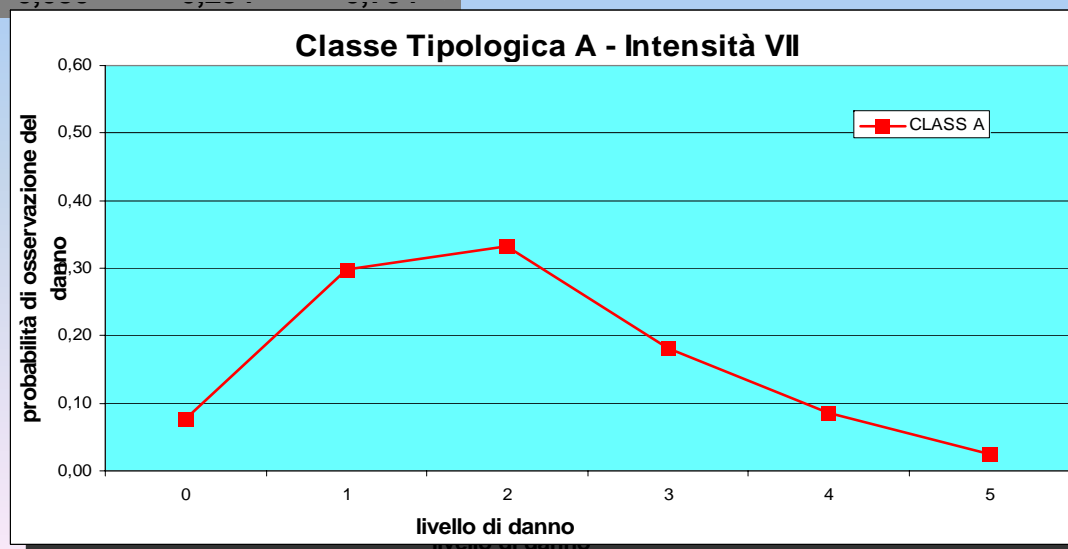
Intensità	Livello di danno					
	0	1	2	3	4	5
VI	0,188	0,373	0,296	0,117	0,023	0,002
VII	0,064	0,234	0,344	0,252	0,092	0,014
VIII	0,002	0,020	0,108	0,287	0,381	0,202
IX	0,0	0,001	0,017	0,111	0,372	0,498
X	0,0	0,0	0,002	0,030	0,234	0,734

Matrice di Probabilità di Danno per la tipologia A



$V_{khi}$   
 Probabilità che un determinato livello di danno  $K$  si attinga per la tipologia  $h$  a fronte di un evento di intensità  $i$

$$P[d_k | I, T]$$



1980  
novembre  
2010

30° anniversario

## Vulnerabilità osservata

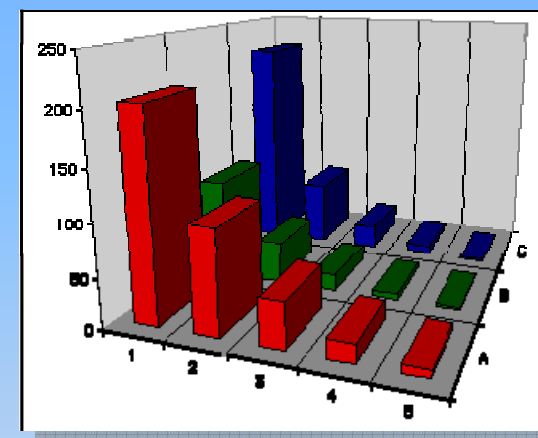
Elaborazione statistica dei dati rilevati

### L'esperienza dell'Irpinia

# Vulnerabilità

Un esempio di valutazione della vulnerabilità attraverso l'approccio delle Matrici di Probabilità di Danno è stato per la prima volta sperimentato in Italia a seguito del terremoto dell'Irpinia dell'80.

Utilizzando i dati di un'indagine estesa a 36.000 edifici di 41 comuni tra i più danneggiati dal sisma del 23 novembre 1980, un gruppo di ricercatori (Braga, Dolce, Liberatore, 1982) ha ottenuto le DPM riferite alle tipologie edilizie più diffuse identificate nel contesto del terremoto Irpino.



Prima importante stima di vulnerabilità del nostro paese

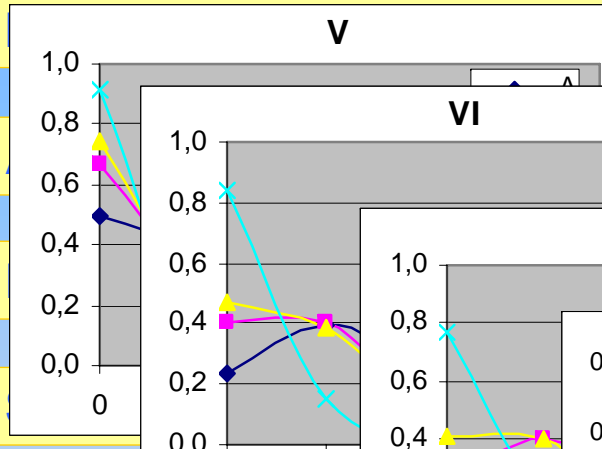
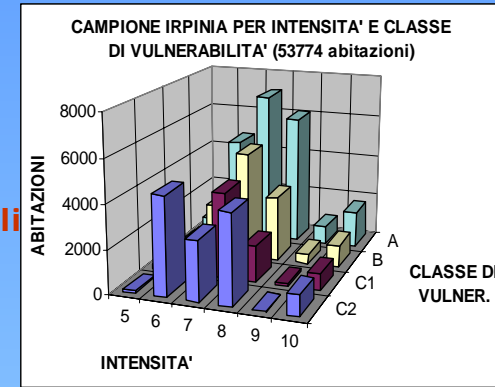
1980  
novembre  
2010

30° anniversario

# Elaborazione statistica dei dati rilevati

Analisi statistica di campioni di edifici con diverse tipologie di schede dopo eventi sismici

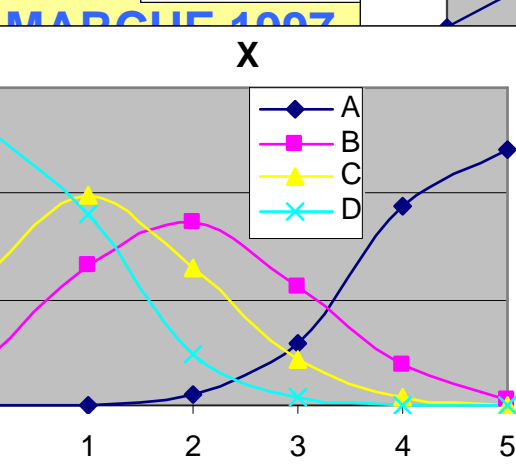
Progetto SAVE – Task 1: Inventario e vulnerabilità degli edifici residenziali del territorio nazionale; mappe di rischio e perdite socio economiche.



(scheda Irpinia '80)

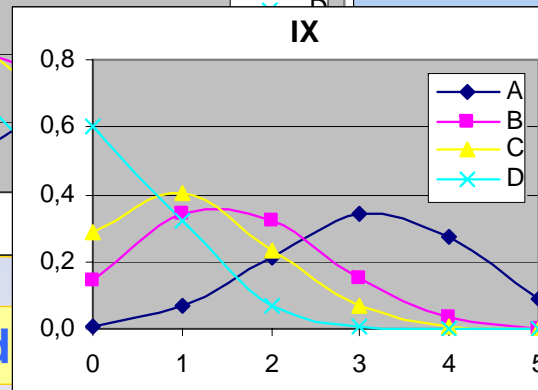
(scheda Abruzzo '84)

(scheda D 9/86)



(scheda Marche 1997)

(scheda AeDes 5/2000)



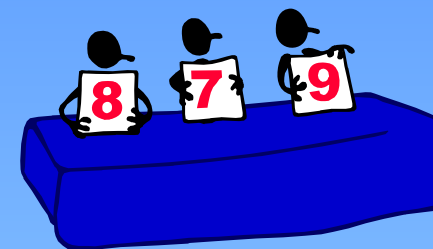
Successivi aggiornamenti delle matrici di probabilità del danno dall'80 ad oggi:

- Di Pasquale et al. '96, '05
- Dolce, 2003
- GdL SSN-DPC, '02
- Bernini et al. '07
- Lagomarsino et al. '07
- Zuccaro et al. 2000, '04

**DB**  
**DANNO**

## Analisi di II livello - studio dei fattori di vulnerabilità

Edificio come organismo la cui vulnerabilità può essere descritta attraverso **sintomi** (organizzazione sistema resistente, resistenza globale, degrado, etc.).



L'idea di base è quella di attribuire ad ogni edificio un **indice di vulnerabilità  $I_V$** , stabilito, secondo certe regole, sulla base di indicatori che


- non sono più interpretati come i lineamenti di una fisionomia tipologica, ma piuttosto
- sono interpretati come sintomi di un'idoneità della costruzione a sopportare i terremoti

# Studio dei fattori di vulnerabilità

## La determinazione dell'indice di vulnerabilità



**Pesi** Ad ogni parametro viene assegnato un peso  $p_i$  in relazione all'influenza che esso ha sul comportamento sismico globale.

PARAMETRO	PESO $p_i$ 
Tipo ed organizzazione del sistema resistente	1.00
Qualità del sistema resistente	0.25
Resistenza convenzionale	1.50
Posizione edificio e fondazioni	0.75
Strutture orizzontali	Variabile
Configurazione planimetrica	0.50
Configurazione in elevazione	Variabile
Distanza massima tra le murature	0.25
Strutture d copertura	Variabile
Elementi non strutturali	0.25
Stato di fatto	1.00

Il prodotto del punteggio  $w_i$  per il relativo peso  $p_i$  fornisce l'indice numerico parziale per il singolo parametro.



**Indice di vulnerabilità**

$$I_V = \sum w_i p_i$$

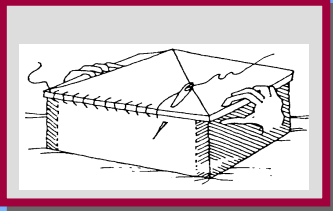


L'indice di vulnerabilità  $I_V$  è una misura convenzionale e relativa della propensione al danneggiamento ed è pertanto utilizzabile immediatamente solo a fini euristici

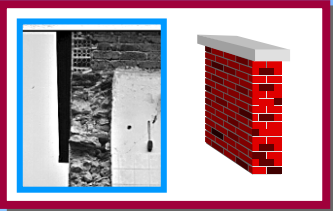
l'indice di vulnerabilità non fornisce una valutazione del danno atteso per un dato livello di severità della scossa sismica

# Studio dei fattori di vulnerabilità

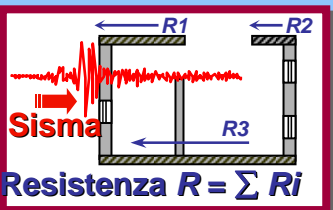
Organizzazione  
Comportamento scatolare



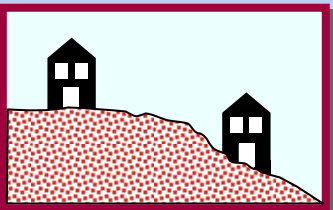
Qualità



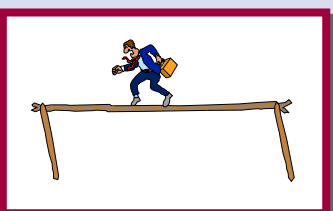
Res. convenzionale



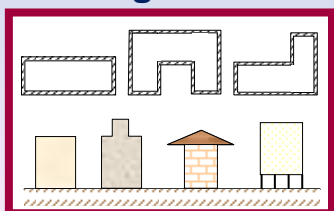
Posizione edificio



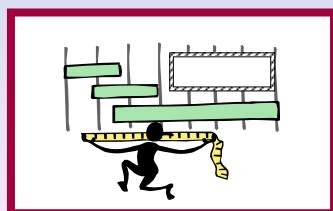
Orizzontamenti



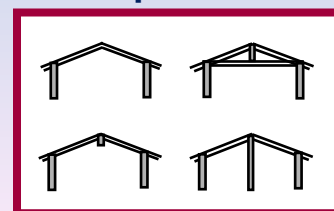
Configurazione



Dist. max murature



Coperture



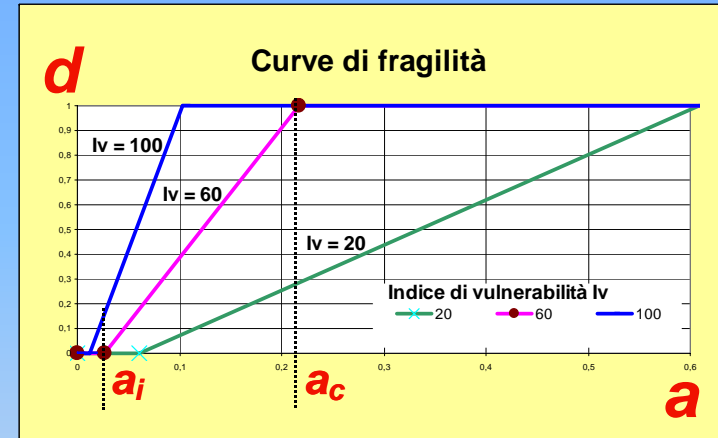
El. non strutturali



$a_i$  Accelerazione che produce l'inizio del danno

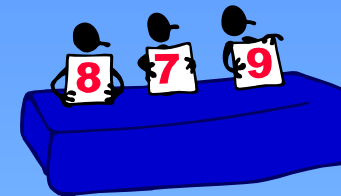
$a_c$  Accelerazione che produce il collasso  
 $a_i, a_c = f(I_v)$

Indice di vulnerabilità  
 $I_v$



$d = f(a)$

# Studio dei fattori di vulnerabilità



## Le curve di fragilità



I valori di  $a_i$  e  $a_c$ , per ciascun  $I_V$ , sono stati ottenuti per via empirica, attraverso correlazioni tra  $I_V$  e danno osservato  $d$  in edifici danneggiati dal sisma del Friuli (1976) e dell'Abruzzo (1984)



$$d = \begin{cases} 0 & a < a_i \\ (a - a_i) / (a_c - a_i) & a_i \leq a \leq a_c \\ 1 & a > a_c \end{cases}$$

Dalle elaborazioni empiriche di cui sopra, per  $a_i$ ,  $a_c$  sono state proposte le seguenti espressioni

(Corsanego 1986, Grandori 1976, 1982):

$$a_i = \alpha_i \exp(-\beta_i \cdot I_V)$$

$$a_c = (\alpha_c + \beta_c \cdot I_V^\gamma)^{-1}$$



$$a_i, a_c = f(I_V)$$

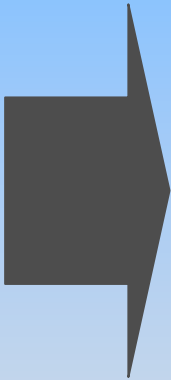
$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_i = 0.08000 \\ \beta_i = 0.01950 \\ \alpha_c = 1.00000 \\ \beta_c = 0.00191 \\ \gamma = 1.80000 \end{array} \right.$$

(Guagenti, Petrini 1989)

# Studio dei fattori di vulnerabilità

## Osservazioni

- ◆ L'indice di vulnerabilità è una *misura convenzionale e relativa* della propensione al danneggiamento ed è pertanto utilizzabile immediatamente solo a fini euristici.
- ◆ Consente di confrontare gli edifici e di stabilire delle graduatorie



**La natura statistica del metodo di valutazione impone di assumere le dovute cautele allorché si fa un uso puntuale dei valori di vulnerabilità**



### Applicazioni:

Campagne di raccolta dati su edifici strategici in varie regioni (Toscana, Emilia Romagna, .....)  
Campagne di raccolta dati nell'ambito di progetti LSU su edifici strategici, scuole e residenziali





## Metodi analitici

- I metodi analitici fanno affidamento sulla **modellazione strutturale e valutazione analitica** della attitudine degli edifici ad essere danneggiati da un terremoto di intensità assegnata
- la **classificazione degli edifici** è basata su **parametri selezionati ( $X_i$ )** che si suppone abbiano una chiara influenza sul **comportamento sismico** e sono tenuti in conto in maniera adeguata nel processo di modellazione dell'edificio
- i diversi metodi analitici per ricavare curve di vulnerabilità per edifici in Cemento Armato (CA) dipendono dalla **disponibilità dei parametri di modello** (qualità dell'inventario degli edifici).
- consentono un **approccio quantitativo** diretto alla valutazione del rischio



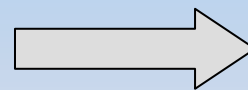
## Approccio quantitativo

Il rischio sismico per un edificio (o una classe di edifici) è la probabilità di accadimento di un evento per cui la struttura (o la classe) non rispetta le prestazioni stabilite, ad esempio lo SLU

$$P_f = P \left[ Z(\bar{X}) \leq 0 \right] = P \left[ C(\bar{X}) \leq D(\bar{X}) \right]$$

**Capacità strutturale**                      **Domanda sismica**

Aspetti  
fenomenologici  
connessi al danno  
strutturale



Z funzione stato limite

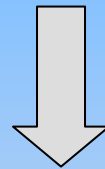
Condizione di "failure" per  $Z \leq 0$



## Approccio quantitativo per la valutazione del rischio

$$P_f = P\left[Z(\bar{X}) \leq 0\right] = P\left[C(\bar{X}) \leq D(\bar{X})\right]$$

Valutazione di  $P[C \leq D]$  in forma chiusa o approssimata



È necessario separare la risposta strutturale dalla caratterizzazione probabilistica della domanda [Cornell 2004]

$$P[C \leq D] = \sum_a P[C \leq D | IM = a] \cdot P[IM = a]$$

**Fragilità (analisi di vulnerabilità)**

**Prob. Seismic  
Hazard Analysis**



## Approccio quantitativo per la valutazione del rischio

$$P[C \leq D] = \sum_a P[C \leq D | IM = a] \cdot P[IM = a]$$

**C e D sono entrambe variabili aleatorie e per la loro valutazione e confronto esistono diversi metodi**

- per la valutazione di C si possono utilizzare approcci semplificati, tipo analisi per meccanismi (Calvi, 1999; Glaister and Pinho, 2003, Cosenza et al. 2005) o analisi di pushover (Rossetto et al., 2005; Iervolino et al., 2007; Polese et al., 2008)
- avendo a disposizione una curva di capacità (linearizzata nel caso di analisi per meccanismi, o derivante da analisi di pushover) la domanda D può essere valutata con il metodo dello Spettro di Capacità: con “sovrasmorzamento” (Freeman, 1998) oppure con spettri inelastici (Fajfar, 1999)

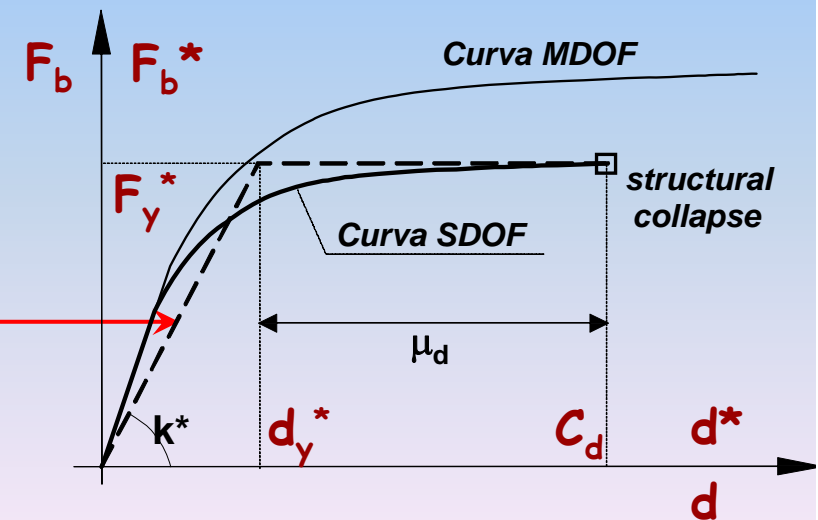
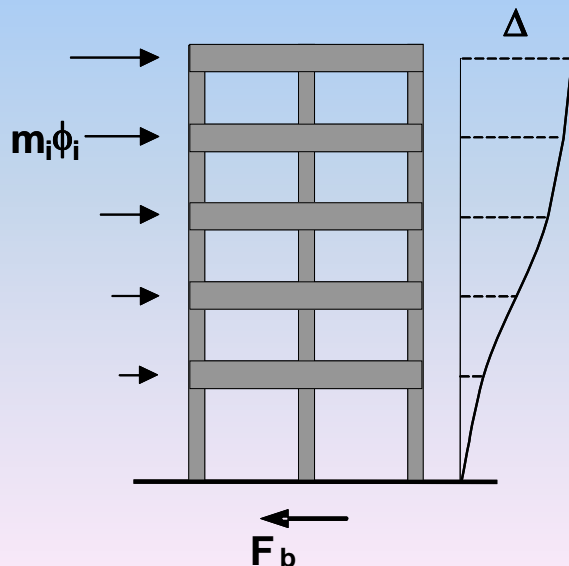


## Metodo dello Spettro di Capacità (CSM)

La norma italiana fa riferimento al metodo dello Spettro di Capacità con spettri inelastici effettuando la seguente trasformazione della curva di pushover: **pushover MDOF → pushover SDOF**

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \Phi_i}{\sum m_i \Phi_i^2} \quad F^* = \frac{F_b}{\Gamma} \quad d^* = \frac{d_c}{\Gamma}$$

$$k^* = \frac{F_y^*}{d_y^*} \quad T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{k^*}}$$



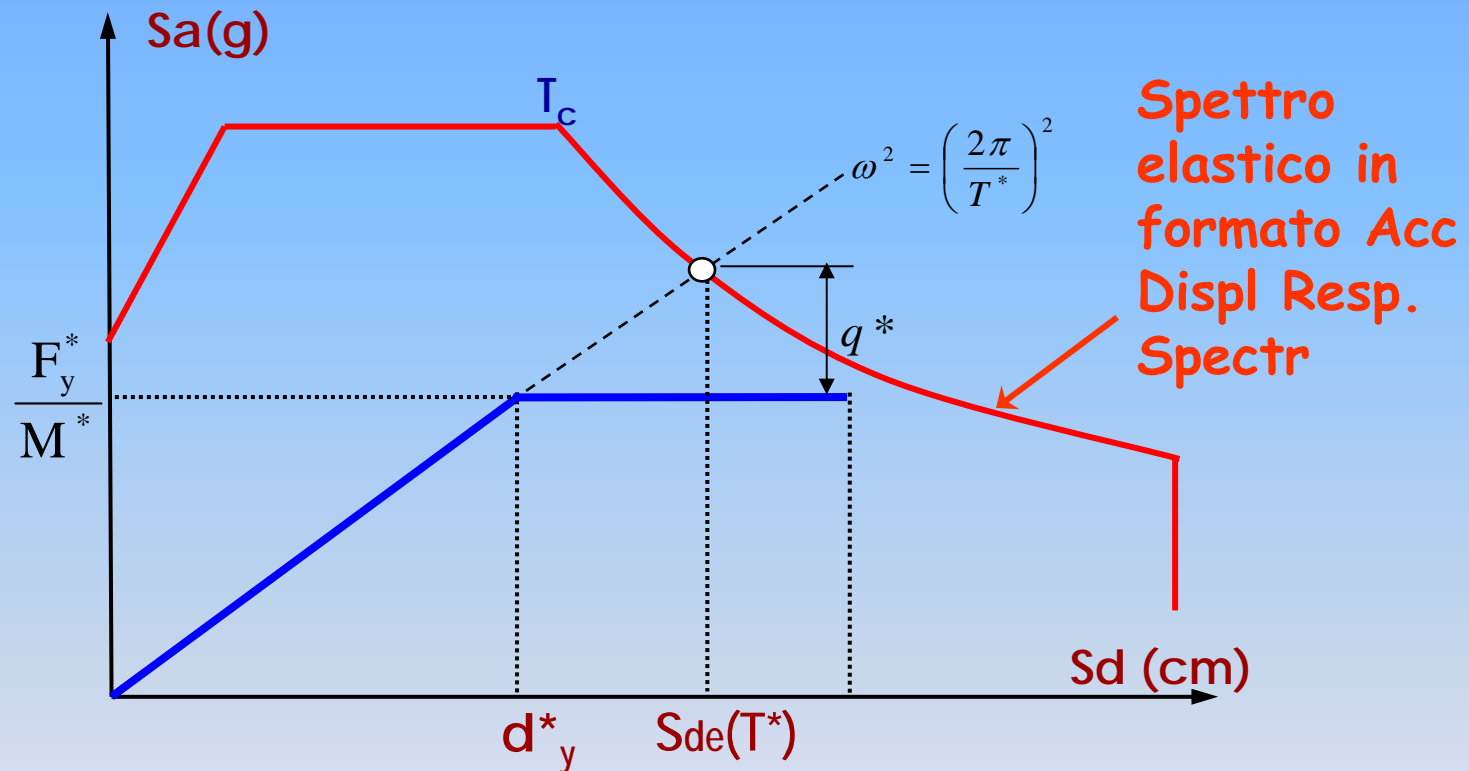
**Bilineare  
equivalente**

Courtesy of MARIA POLESE - DIST



## Metodo dello Spettro di Capacità (CSM)

Ed in seguito ricavando la domanda trasformando la curva di capacità  $\rightarrow$  in spettro di capacità



$$T^* < T_c$$

$$d_{\max}^* = \frac{d_{e,\max}^*}{q^*} \left[ 1 + (q^* - 1) \frac{T_c}{T^*} \right] \geq d_{e,\max}^*$$

$$T^* > T_c$$

$$d_{\max}^* = d_{e,\max}^* = S_{De}(T^*)$$



## Calcolo della vulnerabilità

Valutazione della probabilità di “failure” per ogni valore dell’intensità sismica

$$Z(\bar{X}) = C_d - S_{d,e}(T) C_R$$

Capacità di spostamento

domanda di spostamento (elastica)

Fattore di modifica (elastico → plastico)

La probabilità di failure è valutata come la probabilità che la funzione stato limite  $Z$  sia negativa

$$P_f = \iiint I[C_d(X) - S_{de}(X)C_R] f_x(X) f_{\varepsilon r}(\varepsilon r) f_{\varepsilon_{IM}}(\varepsilon_{IM})$$

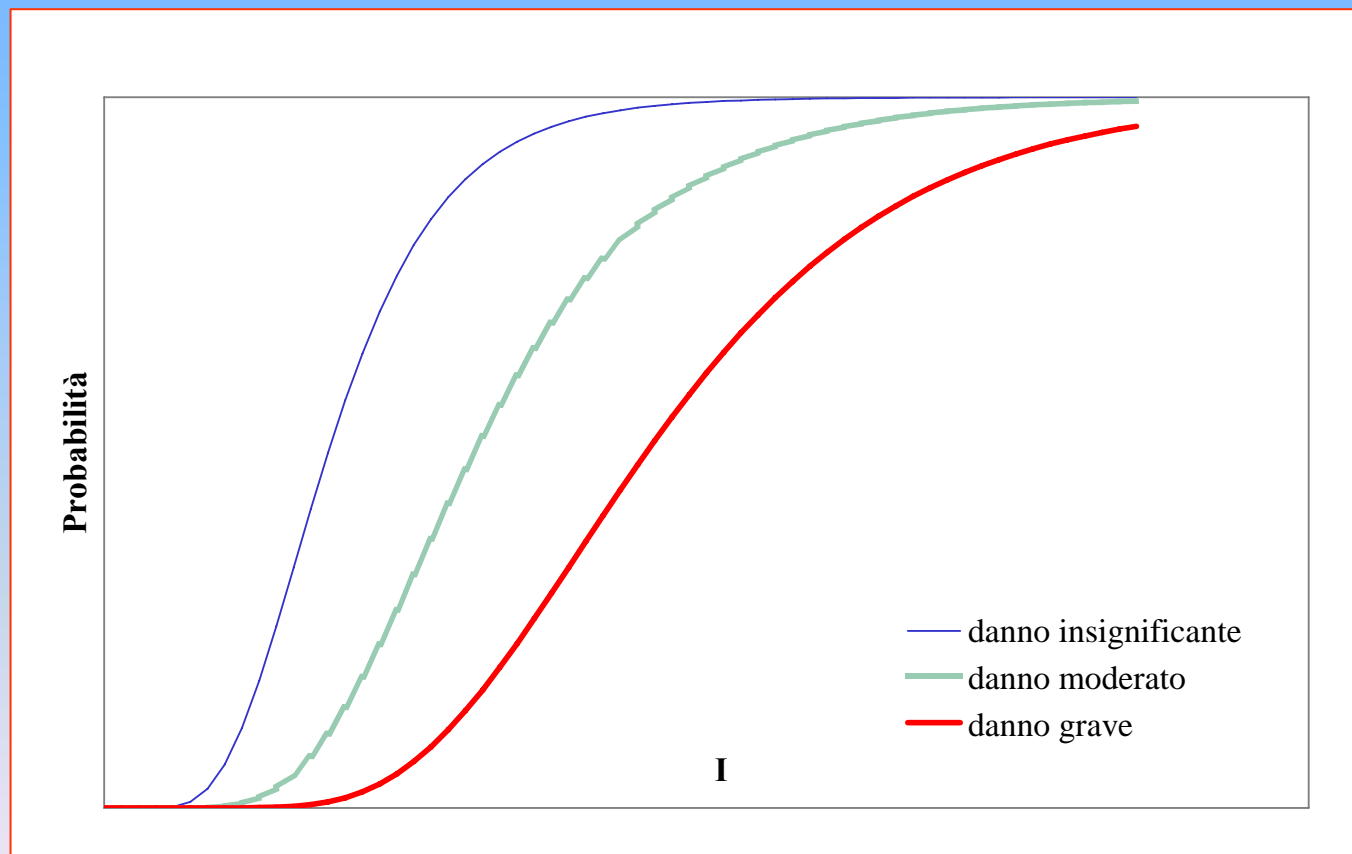
L’integrale si può valutare con una tecnica di simulazione (es. Montecarlo)



30° anniversario

## Calcolo della fragility

Ripetendo il calcolo al variare dell'intensità (in termini di PGA oppure di domanda elastica in spostamento  $S_d$ ) e per diversi stati limite si ottengono le curve di fragilità per la classe di edifici esaminata

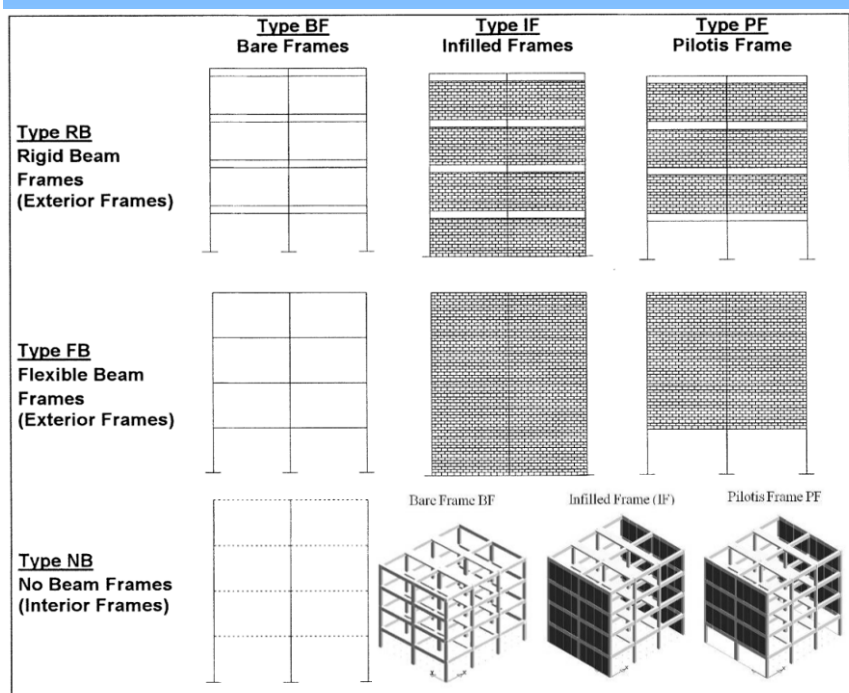




# Vulnerabilità di edifici in C.A. progettati a carico verticale (Masi et al)

## Costruzione del modello strutturale : geometria

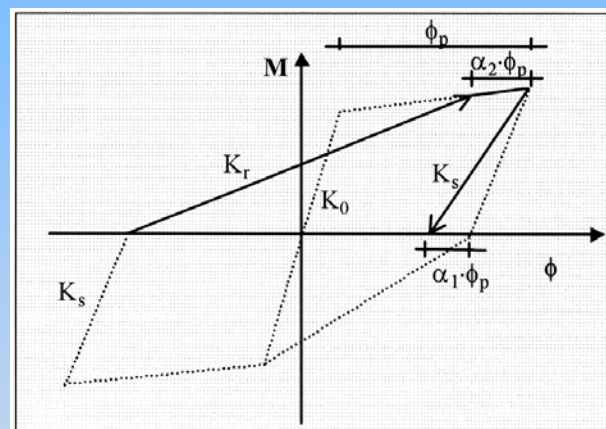
- individuazione di tipologie ricorrenti
- Individuazione delle caratteristiche strutturali ricorrenti negli edifici esistenti in C.A. realizzati prima della classificazione sismica
- Modellazione delle caratteristiche geometriche e meccaniche (progetto simulato secondo le norme e le consuetudini dell'epoca)



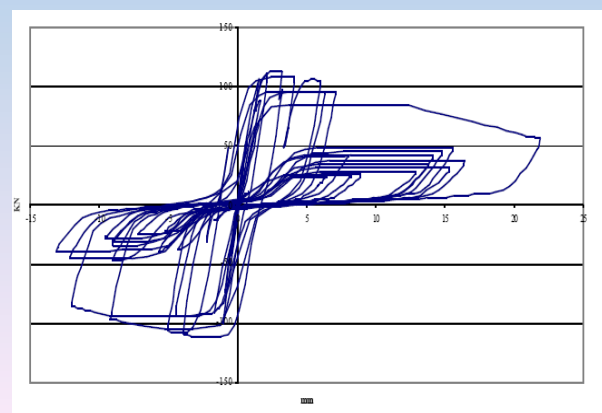
— RB    - - - - NB    ■ FB

## Costruzione del modello strutturale : risposta

- definizione delle caratteristiche del calcestruzzo e dell'acciaio
- definizione della risposta in campo elastico ed anelastico, individuazione delle caratteristiche isteretiche (degrado progressivo della risposta)
- modellazione meccanica del contributo delle tamponature in campo elastico ed anelastico



modello di degrado della rigidezza nel ciclo di isteresi il degrado è descritto attraverso i parametri  $\alpha_1$  ed  $\alpha_2$



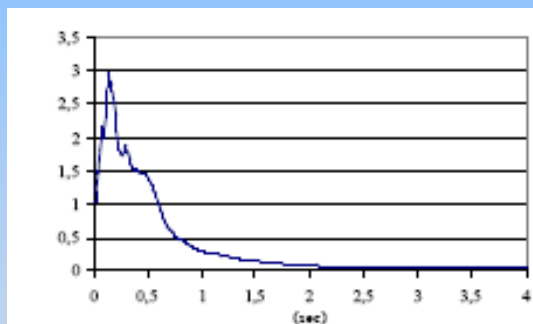
legame forza-spostamento per un pannello di muratura sottoposto a carichi ciclici

## Scelta di un parametro rappresentativo dell'intensità di scuotimento

- parametri di picco (PGA, PGV, PGD)
- parametri integrali ( $I_A$ ,  $I_H$  etc)
- Parametri spettrali

## Scelta del set di accelerogrammi da utilizzare nell'analisi

- accelerogrammi simulati
- accelerogrammi naturali
- accelerogrammi scalati



PGA [g]	t <sub>1</sub> [sec]	t <sub>2</sub> [sec]	t <sub>3</sub> [sec]	t <sub>tot</sub> [sec]	t <sub>d</sub> [sec]	A <sub>I</sub> [cm/sec]
0.05	2.6	10	2	14.6	11.5	5.7
0.1	2.6	10	2	14.6	11.5	22.7
0.15	3.3	12.5	2.5	18.3	14	60.4
0.2	4	15	3	22	18	141.5
0.25	4.6	17.5	3.5	25.6	21	265.3
0.3	5.3	20	4	29.3	24	413.5
0.35	6	22.5	4.5	33	26.5	664.2

La scelta degli accelerogrammi da utilizzare è effettuata tenendo conto delle caratteristiche di picco, integrali e spettrali.

## ANALISI NON LINEARE SUI DIVERSI MODELLI

## Individuazione di classi tipologiche e corrispondenti curve di vulnerabilità

PGA [g]	AI [cm/s]	Frames with Rigid Beams						Frames with Flexible Beams						Frames with No Beams	
		BF-RB		IF-RB		PF-RB		BF-FB		IF-FB		PF-FB		BF-NB	
		Ld		Ld		Ld		Ld		Ld		Ld		Ld	
		med	max	med	max	med	max	med	max	med	max	med	max	med	Max
0.05	5	1-2	2	0	1	2	2-3	2	2-3	0	1-2	2	3	2	2-3
0.1	15	2	2-3	1	1-2	2-3	3	2	3	1-2	1-2	2-3	3	3	3
0.15	27	2	2-3	1-2	1-2	2-3	3	2-3	3	1-2	2	3	3-4	3	4
0.2	41	2	3	1-2	2	3	3-4	2-3	3-4	1-2	2	3	4	3	4
0.25	57	2-3	3	1-2	2	3	3-4	2-3	3-4	1-2	2	3	4	3	4-5
0.3	75	3	3	2	2	3	4	3	4	2	2	3	4-5	3-4	5
0.35	95	3	3-4	2	2	3	4	3	4	2	2	3-4	5	3-4	5

Figure 9. Mean and maximum damage degrees with natural accelerograms.

Structural Type	Vulnerability Class					
	A	B	C	D	E	F
R/C Frames with No or Low Earthquake Resistant Design (L-ERD)						
R/C Frames with Medium Earthquake Resistant Design (M-ERD)						
R/C Frames with High Earthquake Resistant Design (H-ERD)						

- Most likely vulnerability class
- Probable range
- Range of less probable, exceptional cases

Figure 10. Vulnerability classes for framed R/C buildings according to EMS98.

Table VI. Mean and maximum values of damage degrees  $L_d$  of the examined structural types computed by applying natural accelerograms

I_EMS	Frames with rigid beams						Frames with flexible beams						Frames with no beams	
	BF-RB		IF-RB		PF-RB		BF-FB		IF-FB		PF-FB		BF-NB	
	Ld		Ld		Ld		Ld		Ld		Ld		Ld	
	med	max	med	max	med	max	med	max	med	max	med	max	med	max
V	1-2	2	0	1	2	2-3	2	2-3	0	1-2	2	3	2	2-3
VI	2	2-3	1	1-2	2-3	3	2	3	1-2	1-2	2-3	3	3	3
VII	2	2-3	1-2	1-2	2-3	3	2-3	3	1-2	2	3	3-4	3	4
VIII	2-3	3	1-2	2	3	3-4	2-3	3-4	1-2	2	3	4	3	4-5
VIII-IX	3	3-4	2	2	3	4	3	4	2	2	3-4	5	3-4	5

## Scelta di un parametro rappresentativo del livello di danno

- Taglio normalizzato alla base **NBS** (rapporto fra il taglio massimo alla base e la massa totale dell'edificio)
- Spostamento massimo di interpiano rapportato all'altezza **ID**
- Domanda di duttilità nelle travi e nei pilastri **RDB** e **RDC** valutata come massima o media di piano

## Definizione dei livelli di danno e dei corrispondenti valori dei parametri

$L_d$	Definition (EMS98)	$DC_{max}$ $DB_{max}$	$RDC_{max}$	$RDB_{max}$	$DC_{s,max}$ $DB_{s,max}$	$RDC_{s,max}$	$RDB_{s,max}$	$ID$ [%]
0	SD = null NSD = null	<1	–	–	–	–	–	<0.1
1	SD = null NSD = slight	$\leq 1$	–	–	<1	–	–	0.1–0.25
2	SD = slight NSD = moderate	–	0.1–0.4	0.2–0.5	–	<0.1	<0.2	0.25–0.5
3	SD = moderate NSD = heavy	–	0.4–0.8	0.5–1	–	0.1–0.4	0.2–0.5	0.5–1.0
4	SD = heavy NSD = very heavy	–	>0.8	>1	–	0.4–0.8	0.5–1	1.0–1.5
5	Destruction	–	–	–	–	>0.8	>1	>1.5

(SD = Structural Damage, NSD = Non Structural Damage)

## Risultati dell'analisi espressi in funzione del parametro di scuotimento (es. PGA)

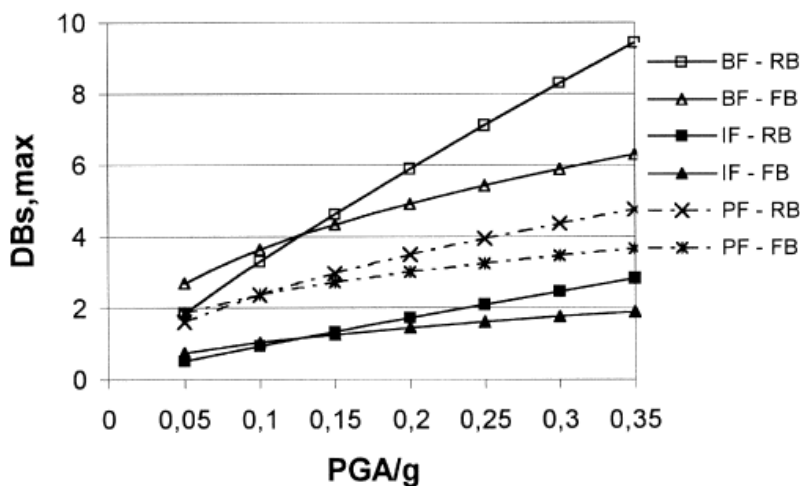


Figure 7b. Ductility demand on beams  $DB_{s,max}$  vs PGA/g for natural accelerograms.

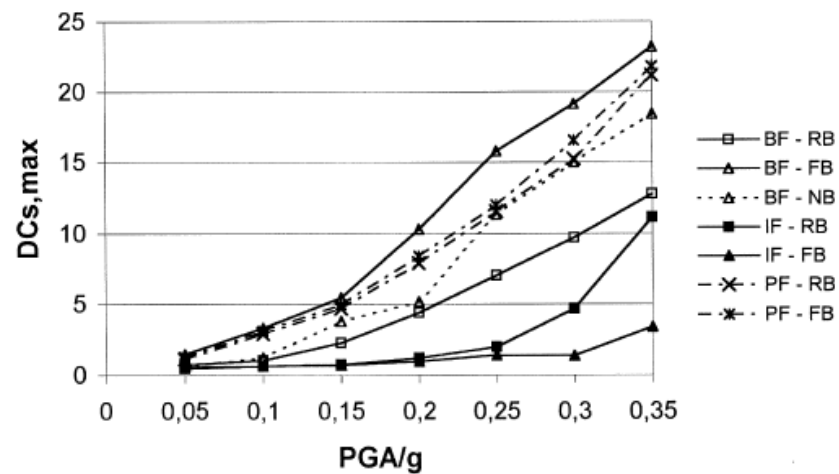


Figure 6a. Ductility demand on columns  $DC_{s,max}$  vs PGA/g for artificial accelerograms.

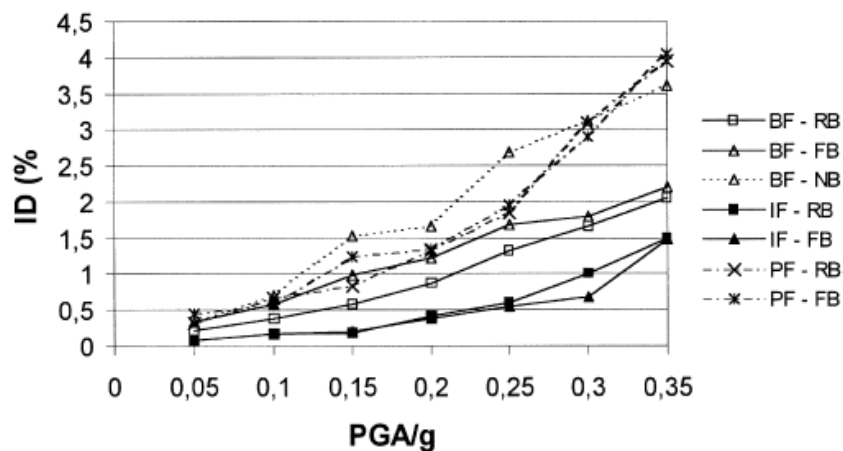


Figure 5a. Interstorey drift  $ID$  (%) vs PGA/g for artificial accelerograms.

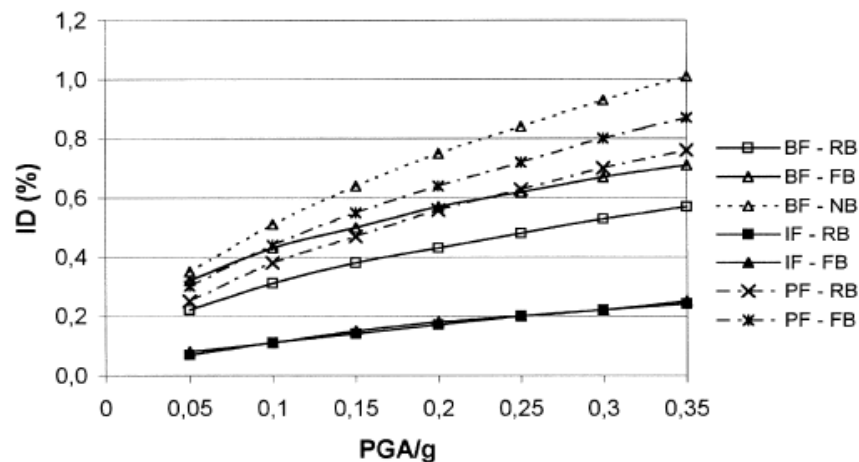


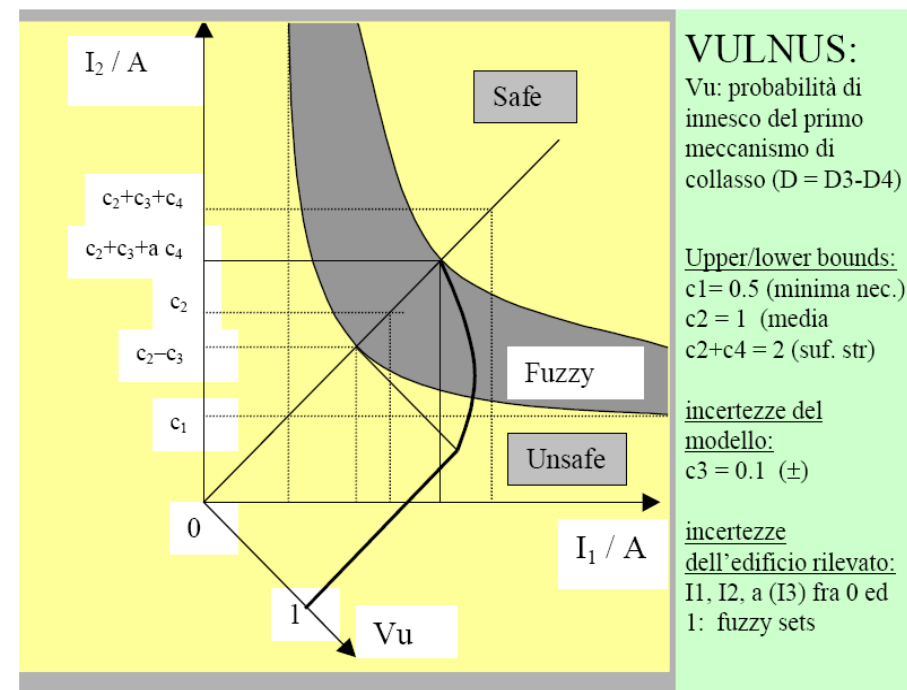
Figure 5b. Interstorey drift  $ID$  (%) vs PGA/g for natural accelerograms.

## Vulnerabilità calcolata con metodi basati su meccanismi di collasso

- Dall'osservazione delle caratteristiche tipologiche si individuano i meccanismi di collasso potenzialmente attivabili
- Si calcola per ogni meccanismo il moltiplicatore dei carichi che causa l'attivazione.
- Si risale al valore di scuotimento corrispondente.

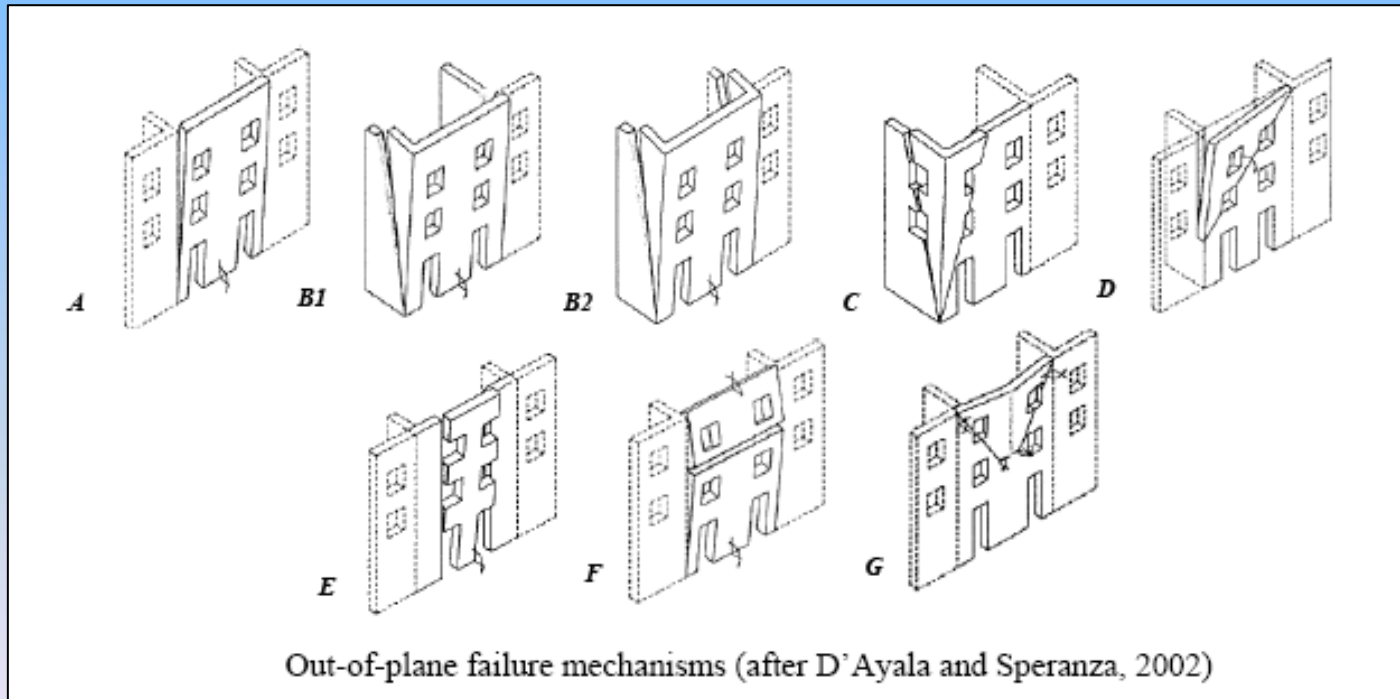
### VULNUS (A. Bernardini)

- $I_1$  : rapporto fra resistenza a taglio nel piano del sistema murario e peso totale dell'edificio (accelerazione critica/g);
- $I_2$  : accelerazione critica/g riferita alla resistenza fuori del piano (rottura o ribaltamento) della più debole parete esterna; si valuta sommando la resistenza di strisce murarie verticali (vincolate ai solai) e orizzontali (vincolate ai muri trasversali);
- $I_3$  : somma pesata e normalizzata fra 0 ed 1 di "punteggi" di 7 fattori parziali di vulnerabilità;
- $A$  : media sull'edificio dell'accelerazione assoluta delle masse (PGA);

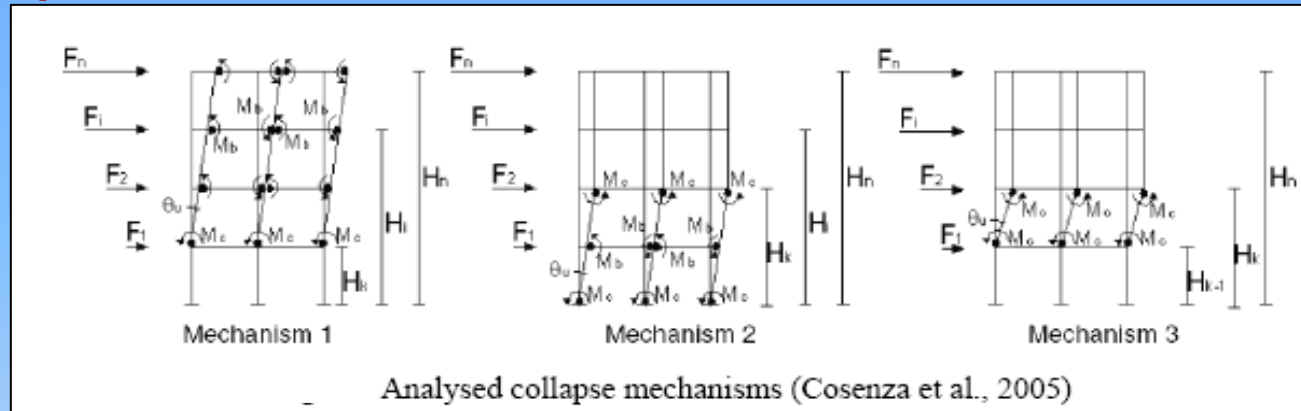


## **FaMIVE - Failure Mechanism Identification and Vulnerability Evaluation (D'Ayala- Speranza, 2002)**

- Individuati una serie di probabili meccanismi, il moltiplicatore di collasso viene calcolato mediante una procedura statica equivalente.
- Il meccanismo caratterizzato dal moltiplicatore più basso viene considerato il più probabile.



## Meccanismi di collasso per telai in C.A. (Cosenza et al, 2005)



Lo spostamento ultimo in sommità  $\Delta_{ui}$  è funzione della rotazione ultima  $\theta_u$

$$\Delta_{u,1} = \theta_u (H_n - H_k)$$

$$\Delta_{u,2} = \theta_u H_k$$

$$\Delta_{u,3} = \theta_u (H_k - H_{k-1})$$

$$C_{b,i} = \frac{V_{b,i}}{W}; \quad (\text{drift}_u)_i = \frac{\Delta_{u,i}}{H_n}$$

La capacità sismica è data dal minimo fra i coefficienti  $C_{b,i}$  (taglio alla base normalizzato) cui corrisponde lo spostamento di interpiano ( $\text{drift}_u$ )<sub>i</sub> di innesco meccanismo.

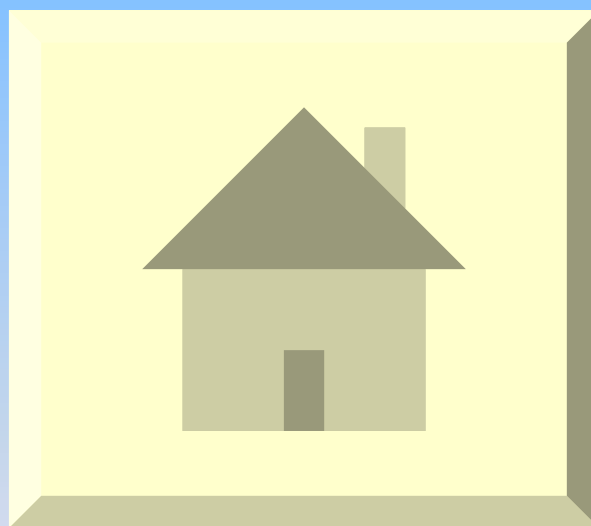


1980  
novembre  
2010

30° anniversario

# Metodo Ibrido

Vulnerabilità osservata (SAVE) e  
Calcolata (meccanismi meccanici)





## Considerazioni conclusive

### Curve di vulnerabilità empiriche

#### ➤ CARATTERISTICHE

Basate su rilievi post-sisma; più realistiche

#### ➤ LIMITI

Molto specializzate ad una particolare zona sismo-tettonica, geotecnica ed ambiente costruito;

I dati osservazionali usati sono tendenzialmente scarsi e molto concentrati per danni lievi e basse intensità sismiche;

Spesso vi sono errori nella classificazione degli edifici;

Si aggregano danni dovuti a diversi terremoti

---



# Curve di vulnerabilità basate sul giudizio esperto

## ➤ CARATTERISTICHE

**Basate sull'opinione di esperti;**

**Le curve si possono ricavare facilmente includendo tutti i fattori**

## ➤ LIMITI

**L'affidabilità delle curve dipende dalla esperienza individuale dell'esperto consultato;**

**Nelle previsioni di vulnerabilità dell'esperto sono intrinsecamente considerate tipologie strutturali locali, configurazioni tipiche, dettagli costruttivi e materiali utilizzati nella sua zona**

---



## Curve di vulnerabilità analitiche

### ➤ CARATTERISTICHE

Basate su distribuzione di danni simulate analiticamente;

Variabilità ridotta e affidabilità aumentata per la valutazione della vulnerabilità di diverse strutture

### ➤ LIMITI

Notevole onere computazionale e limiti nella possibilità di modellazione;

La scelta del metodo di analisi, le ipotesi, la pericolosità sismica ed i modelli di danno influenzano le curve e si è visto che causano notevoli discrepanze nella valutazione del rischio

---



## Curve di vulnerabilità ibride

### ➤ CARATTERISTICHE

Compensano la scarsità di dati osservazionali, la soggettività del giudizio esperto e le carenze di modellazione delle procedure analitiche;

Modificano le relazioni analitiche o quelle basate sul giudizio esperto grazie a dati osservazionali e/o risultati sperimentali.

### ➤ LIMITI

Per la corretta valutazione delle curve di vulnerabilità e la valutazione della loro affidabilità è necessario fare riferimento a diversi tipi di dati

---

1980  
novembre  
2010

30° anniversario

La comunità  
scientifica

continua a lavorare e...



..... grazie a voi per l'attenzione