

Corso di aggiornamento  
Progettazione strutturale  
e Norme Tecniche per le Costruzioni

### Verifica sismica di edifici esistenti in c.a.

5 - Aspetti generali (accelerazione sismica).  
Prima valutazione di massima

Imola  
16-18 maggio 2013  
Aurelio Ghersi

### Valutazione della vulnerabilità di un edificio esistente

- Occorre determinare quale valore dell'accelerazione di picco al suolo porta al raggiungimento del limite di resistenza (o di deformazione plastica) della struttura
  - Si tratta di una analisi deterministica, non probabilistica
  - Rientra nell'ambito della valutazione della sicurezza (NTC 08, punto 8.3), come meglio specifico nella Circolare (punto C8.3)
- Occorre fare riferimento solo allo stato limite ultimo (SLV oppure SLC)

NTC 08, punto 8.3

### Evoluzione del concetto di protezione sismica

Performance based design

Tendenza della normativa:

Più livelli di prestazione

- Evitare il crollo
- Evitare perdite di vite umane
- Consentire un rapido ripristino dell'operatività
- Mantenere l'operatività

associati a diversi livelli di intensità sismica

Normativa americana FEMA  
Norme Tecniche per le Costruzioni 2008

### Livelli di prestazione Ovvero Stati Limite da rispettare

Stati Limite di Esercizio Non richiesto per edifici esistenti  
NTC 08, punto 8.3

Stato Limite di Operatività - SLO

Danni estremamente modesti agli elementi non strutturali, tali da non compromettere in alcun modo la funzionalità dell'edificio

Stato Limite di Danno - SLD

Danni modesti agli elementi non strutturali e quasi nulli a quelli strutturali. L'utilizzo dell'opera dopo il sisma dovrebbe essere consentito, anche se alcune funzionalità potrebbero risultare compromesse

Danno Limitati, DL nell'OPCM 3431  
Damage Limitation, DL nell'EC8-3

NTC 08, punto 3.2.1

### Livelli di prestazione Ovvero Stati Limite da rispettare

Stati Limite Ultimi

Stato Limite di salvaguardia della Vita - SLV

Significativi danni agli elementi strutturali e non strutturali. Esiste ancora un consistente margine nei confronti del collasso. La funzionalità dell'edificio è compromessa

Danno Severo, DS nell'OPCM 3431  
Significant Damage, SD nell'EC8-3

Stato Limite di prevenzione del Collasso - SLC

La capacità dell'edificio di portare azioni orizzontali e verticali è compromessa. L'uso dell'edificio dopo l'evento sismico comporterebbe un sensibile livello di rischio

Collasso, CO nell'OPCM 3431  
Near Collapse, NC nell'EC8-3

NTC 08, punto 3.2.1

### Livelli di intensità sismica

Sono legati alla "vita di riferimento"  $V_R$   
della struttura

- Per le nuove costruzioni la vita nominale è 50

Livello	Probabilità di superamento	Periodo di ritorno *
Frequente	81% in $V_R$ anni	30 anni
Occasionale	63% in $V_R$ anni	50 anni
Raro	10% in $V_R$ anni	475 anni
Estremamente raro	5% in $V_R$ anni	975 anni

SLV

SLC

NTC 08, punto 3.2.1

\* Per  $V_R = 50$  anni

### Vita di riferimento e livelli di intensità sismica

- La bozza 2013 delle NTC riduce la vita nominale per le costruzioni esistenti (30 anni anziché 50) e quindi riduce le azioni sismiche da sopportare

Livello	Probabilità di superamento	Periodo di ritorno *
Frequente	81% in $V_R$ anni	18 anni
Occasionale	63% in $V_R$ anni	30 anni
Raro	10% in $V_R$ anni	285 anni
Estremamente raro	5% in $V_R$ anni	585 anni

SLV

SLC

Bozza NTC 13, punto 2.4.1

\* Per  $V_R = 30$  anni

### Vita di riferimento e livelli di intensità sismica

- Questo porterebbe ad una significativa riduzione dell'accelerazione sismica di riferimento

Parametri di pericolosità Sismica					
"Stato Limite"	$T_r$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_a$ [-]	$T^*_c$ [s]	
Operatività	30	0.071	2.421	0.270	
Danno	50	0.089	2.414	0.280	
Salvaguardia Vita	475	0.222	2.384	0.320	
Prevenzione Collasso	975	0.285	2.391	0.332	



Parametri di pericolosità Sismica					
"Stato Limite"	$T_r$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_a$ [-]	$T^*_c$ [s]	
Operatività	30	0.071	2.421	0.270	
Danno	285	0.184	2.366	0.309	
Salvaguardia Vita	585	0.239	2.384	0.324	
Prevenzione Collasso	585	0.239	2.384	0.324	

Località: Spoleto, via di Villa Redenta

-17%

... ma per il momento sembra che la nuova versione delle NTC sia bloccata

### Valutazione preliminare delle caratteristiche di sollecitazione con procedimenti semplificati

### Modalità operative

- Stimare la rigidezza dei pilastri
  - Usare formule semplificate (linee guida della Basilicata, suggerimenti di A. Ghersi)
- Determinare le forze sulla struttura con analisi statica
  - Fare il calcolo a meno del periodo  $T$ , non noto
- Determinare il periodo proprio  $T$  della struttura (formula di Rayleigh) e le forze conseguenti
- Ripartire il taglio tra i pilastri in proporzione alle rigidezze e determinare il moltiplicatore del sisma che porta al limite di resistenza a taglio
- Stimare i momenti flettenti e determinare il moltiplicatore del sisma che porta al limite a flessione

### 1. Rigidezze dei pilastri Linee guida della Basilicata

- Valutare le rigidezze dei pilastri

$$k_i = c \frac{EI}{h^3}$$

$c = 9$  in presenza di travi emergenti  
 $c = 6$  in presenza di travi a spessore  
 $c = 3$  in assenza di travi

### 1. Rigidezze dei pilastri Indicazioni di A. Ghersi

- Valutare le rigidezze solo dei pilastri "che contano"
- Ridurre la rigidezza per tener conto delle travi

Dal secondo piano in su

$$k_r = \frac{12 E \sum I_p}{h_r^3 \left( 1 + \frac{l_{media}}{h_r} \frac{\sum I_p}{\sum I_t} \right)}$$

Al primo piano

$$k_r = \frac{12 E \sum I_p}{h_r^3 \left( 1 + 0.5 \frac{l_{media}}{h_r} \frac{\sum I_p}{\sum I_t} \right)}$$

### 1. Rigidezze dei pilastri

Indicazioni di A. Ghersi

- In alternativa, valutare le rigidezze di ciascun pilastro, riducendola per tener conto delle travi

$$k_i = \frac{12 E I_{p,i}}{h_r^3} \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left( \frac{E I_{p,i}/h_r}{E I_{t,sup}/L_t} + \frac{E I_{p,i}/h_r}{E I_{t,inf}/L_t} \right)}$$

### 2. Forze da analisi statica

- Calcolare le forze  $F_{j,i}$  con formule per analisi statica (a meno di T)

$$F_k = 0.85 W_k z_k \frac{\sum_i W_i}{\sum_i W_i z_i} S_e(T_i) \quad \text{con } S_e(T_i)=1$$

- Calcolare tagli di piano e spostamenti relativi

$$V_p = \sum_{j=p}^n F_j \quad u_{rel,p} = \frac{V_p}{K_p} \quad K_p = \sum k_i$$

- Calcolare spostamenti assoluti

$$u_p = \sum_{j=1}^p u_{rel,j}$$

### 3. Determinare il periodo proprio e le forze conseguenti

- Stimare il periodo con la formula di Rayleigh

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n m_j u_j^2}{\sum_{j=1}^n F_j u_j}} \quad \text{E quindi } a_g$$

### 4. Ripartire il taglio e verificare i pilastri

- Ripartire il taglio di piano in base alla rigidezza

$$V_i = V_p \frac{k_i}{K_p}$$

- Effettuare la verifica a taglio, valutando per quale aliquota dell'azione sismica la verifica è soddisfatta

### 5. Valutare il momento flettente e verificare travi e pilastri

- Il procedimento è stato già più volte descritto (dal taglio al momento flettente nei pilastri e da questo a quello delle travi)
- Effettuare la verifica a flessione, valutando per quale aliquota dell'azione sismica la verifica è soddisfatta

Esempio

# Rilievo dell'edificio

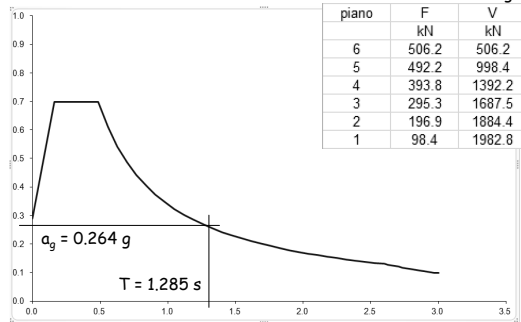
vedi file Excel "Analisi semplificata"

Nota: i valori sono riferiti all'intero edificio. Nel seguito data la simmetria si considererà solo mezzo edificio

$$F_k = 0.85 W_k z_k \frac{\sum_i W_i}{\sum_i W_i z_i} S_e(T_i) \quad \text{con } S_e(T_i)=1$$
$$u_{rel,p} = \frac{V_p}{K_p} \quad u_p = \sum_{j=1}^p u_{rel,j}$$
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n m_j u_j^2}{\sum_{j=1}^n F_j u_j}}$$
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n m_j u_j^2}{\sum_{j=1}^n F_j u_j}}$$

### 3. Determinare il periodo proprio e le forze conseguenti

- Si ha:



### 4. Ripartire il taglio e verificare i pilastri

- Ripartire il taglio di piano in base alla rigidezza

$$V_i = V_p \frac{k_i}{K_p}$$

- Si ottiene ad esempio  $V_{12} = 1884.4 \times \frac{24.46}{71.04} = 648.9 \text{ kN}$

piano	2								
		pil	b	h	k	n	k	pil	VEd
			cm	cm					
pilastri	a	1, 17, 20	30	30	5.28	3	15.85	1, 17, 20	140.2
	b	18, 19	30	30	1.76	2	3.52	18, 19	46.7
	c	9	30	40	12.52	1	12.52	9	332.2
	d	12	30	50	24.46	1	24.46	12	648.9
	e	2,3,4,10,11	50	30	2.94	5	14.68	2,3,4,10,11	77.9
							71.04		

### 4. Ripartire il taglio e verificare i pilastri

- Effettuare la verifica a taglio, valutando per quale aliquota dell'azione sismica la verifica è soddisfatta

Resistenze da usare:

per verifiche del comportamento "fragile" di una singola sezione :

$$\frac{f_m}{FC \gamma_M}$$

per verifiche del comportamento globale "duatile" di una struttura :

$$\frac{f_m}{FC}$$

### Livelli di conoscenza e fattori di confidenza

Livello di Conoscenza	Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione oppure rilievo ex-novo completo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e limitate verifiche in-situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e limitate prove in-situ	Analisi lineare statica o dinamica	1.35
LC2		Disegni costruttivi incompleti con limitate verifiche in situ oppure estese verifiche in-situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali con limitate prove in-situ oppure estese prove in-situ	Tutti	1.20
LC3		Disegni costruttivi completi con limitate verifiche in situ oppure esauritive verifiche in-situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto con estese prove in situ oppure esauritive prove in-situ	Tutti	1.00

I fattori di confidenza sono ulteriori coefficienti di sicurezza

### Valori delle resistenze da utilizzare riepilogo (con FC=1.2)

Valori sperimentali:

- Per il calcestruzzo  $f_{cm} = 19 \text{ MPa}$
- Per l'acciaio  $f_{ym} = 420 \text{ MPa}$

Valori di riferimento, da usare per rotture "duatili":

- Per il calcestruzzo  $f_{cm}/FC = 15.83 \text{ MPa}$  (x0.85 ove necessario)
- Per l'acciaio  $f_{ym}/FC = 350 \text{ MPa}$

Valori di calcolo, da usare per rotture "fragili":

- Per il calcestruzzo  $f_{cm}/FC / \gamma_c = 10.56 \text{ MPa}$  (x0.85 ove necessario)
- Per l'acciaio  $f_{ym}/FC / \gamma_s = 304.3 \text{ MPa}$

Valori incrementati, da usare quando necessario:

- Per il calcestruzzo  $f_{cm} \times FC = 22.8 \text{ MPa}$  (x0.85 ove necessario)
- Per l'acciaio  $f_{ym} \times FC = 504 \text{ MPa}$

### 4. Ripartire il taglio e verificare i pilastri

- Effettuare la verifica a taglio, valutando per quale aliquota dell'azione sismica la verifica è soddisfatta

- Si utilizzano le usuali formule di verifica, con i valori di resistenza innanzi definiti

$$V_{Rd,s} = 0.9 d \frac{A_{st}}{s} f_y \cot \theta$$

$$V_{Rd,max} = 0.9 b d \alpha_c f'_c \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta}$$

#### 4. Ripartire il taglio e verificare i pilastri

- Effettuare la verifica a taglio, valutando per quale aliquota dell'azione sismica la verifica è soddisfatta

##### Esempio

sezione 30x30, staffe Ø6/20

$$V_{Rd,s} = 0.9 \times 26 \times \frac{0.566}{20} \times 304 \times 2.5 \times 10^{-1} = 50.3 \text{ kN}$$

sezione 30x50, staffe Ø6/20

$$V_{Rd,s} = 0.9 \times 46 \times \frac{0.566}{20} \times 304 \times 2.5 \times 10^{-1} = 89.1 \text{ kN}$$

#### 4. Ripartire il taglio e verificare i pilastri

- Effettuare la verifica a taglio, valutando per quale aliquota dell'azione sismica la verifica è soddisfatta

##### Esempio

piano	2			
pil	VEd	VRds	p	1/p
1, 17, 20	140.2	50.3	2.78	35.9%
18, 19	46.7	50.3	0.93	107.7%
9	332.2	69.7	4.77	21.0%
12	648.9	89.1	7.29	13.7%
2,3,4,10,11	77.9	50.3	1.55	64.6%

$$\rho = \frac{V_{Ed}}{V_{Rd}}$$

Il rapporto tra effetto del sisma e resistenza indica di quanto si deve ridurre il sisma (o l'aliquota di sisma che può essere portata)

#### 4. Ripartire il taglio e verificare i pilastri

- Il valore più alto di  $\rho$  (o il più piccolo di  $1/\rho$ ) indica quale accelerazione sismica può essere portata dalla struttura prima che avvenga la rottura a taglio

Nell'esempio:

$$\rho_{\max} = 7.29$$

$$(1/\rho)_{\min} = 13.7\%$$

Nota: questo valore può essere moltiplicato per un fattore di struttura piccolo (quanto? forse 1.5?)

piano	4				
pil	VEd	VRds	p	1/p	
1,8,12,17,20	189.8	50.3	3.77	26.5%	
adn	63.3	50.3	1.26	79.5%	
piano	3				
pil	VEd	VRds	p	1/p	
1,9,17,20	182.2	50.3	3.62	27.6%	
18, 19	69.7	50.3	1.21	82.9%	
12	432.0	69.7	6.20	16.1%	
2,3,4,10,11	81.0	50.3	1.61	62.1%	
piano	2				
pil	VEd	VRds	p	1/p	
1, 17, 20	140.2	50.3	2.78	35.9%	
18, 19	46.7	50.3	0.93	107.7%	
9	332.2	69.7	4.77	21.0%	
12	648.9	89.1	7.29	13.7%	
2,3,4,10,11	77.9	50.3	1.55	64.6%	
piano	1				
pil	VEd	VRds	p	1/p	
17	92.0	50.3	1.83	54.7%	
20	122.6	50.3	2.44	41.0%	
18, 19	46.9	50.3	0.91	121.1%	
1	218.0	69.7	3.13	32.0%	
9	425.9	89.1	4.78	20.9%	
12	735.9	108.4	6.79	14.7%	
2,3,4,10,11	61.3	50.3	1.22	82.1%	

#### 4. Ripartire il taglio e verificare i pilastri

- È importante, in questa fase, valutare la massima resistenza a flessione dei pilastri (con i valori incrementati) ed il massimo taglio che potrà aversi di conseguenza nei pilastri
  - Se questo valore è inferiore alla resistenza a taglio il pilastro non arriverà mai a rottura per taglio



Questa considerazione potrebbe essere molto utile per esprimere un giudizio sulla struttura

Nota: ho approfondito questo aspetto nella presentazione successiva

#### 5. Valutare il momento flettente e verificare travi e pilastri

- Non è riportato



Una valutazione delle resistenze di travi e pilastri può fornire utili indicazioni sul fattore di struttura  $q$  da utilizzare

Nota: ho approfondito questo aspetto nella presentazione successiva

#### Stesso procedimento con rigidezze calcolate secondo A. Ghersi

- Le elaborazioni sono riportate nel file Excel "Analisi semplificata AG"
- Come si può vedere da quei numeri (che qui non riporto) i risultati sono molto vicini a quelle che verranno mostrati più avanti, ottenuti partendo dall'analisi modale