

Corsi di aggiornamento
Progettazione strutturale
e Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni

9. Vulnerabilità e rischio sismico di edifici esistenti in c.a.

12 – Risposta sismica: analisi lineare - controllo
speditivo della duttilità

Villa Redenta, Spoleto, 22-24 novembre 2018
Aurelio Ghersi

Eurocodice 8 e NTC 2018

- Nell'Eurocodice 8, parte 3, è chiaramente definita una duplice possibilità per analisi lineare:
 - Analisi lineare con fattore di struttura
che richiede una verifica in termini di resistenze, sia per elementi duttili che elementi fragili
 - Analisi lineare (con spettro elastico)
che richiede una verifica in termini di deformazione plastica
(e controllo di resistenza per gli elementi fragili)

Eurocodice 8

prospetto 4.3

Valori delle proprietà dei materiali e criteri di analisi e di verifica della sicurezza

		Modello Lineare (LM)		Modello non lineare		Approccio con il fattore q	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo $8e/m$)	Duttile	Accettabilità del modello lineare (per la verifica dei valori $\rho_i = D_i/C_i$):		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.	Dall'analisi.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.
		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.				
		Ispezioni (se LM è accettato):					
	Fragile	Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.		In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.		
		Verifiche (se LM è accettato):					
		Se $\rho_i \leq 1$: dall'analisi.					
	Se $\rho_i > 1$: dall'equilibrio con la resistenza di e/m duttili. Si usano i valori medi delle proprietà moltiplicati per CF.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.					

NTC 2008 e relativa circolare

- La Circolare 2009 chiariva bene cosa si intende per analisi lineare con spettro elastico e controllo in termini di deformazione plastica
 - In essa c'è una tabella analoga al prospetto 4.3 dell'Eurocodice 8, parte 3 (ma priva della colonna relativa all'approccio con fattore di struttura q)

NTC 2018 e relativa circolare

- Nella Circolare 2018 (bozza) non esiste più la tabella innanzi citata
- Il riferimento all'approccio lineare con spettro elastico è estremamente sintetico e poco comprensibile

Analisi statica lineare con spettro elastico

Nel caso di analisi lineare con spettro elastico, lo spettro di risposta da impiegare è quello elastico di cui al § 3.2.3 delle NTC eseguendo l'analisi e la verifica secondo quanto previsto nel § 7 per le costruzioni non dissipative.

Che senso ha il riferimento a costruzioni non dissipative?

Analisi lineare con spettro elastico e controllo in termini di deformazioni plastiche

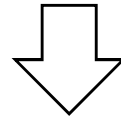
- Qualunque cosa dica la normativa italiana, è possibile usare una analisi lineare per valutare il comportamento della struttura in termini di deformazioni plastiche
- Lo si presenta qui come "valutazione speditiva" nel senso che, viste le approssimazioni, ha senso usarlo per un calcolo semplice che fornisca indicazioni di larga massima

Controllo della duttilità con analisi lineari?

- Ipotezziamo che il punto di flesso del momento flettente nei pilastri sia a metà pilastro
 - Plausibile per travi rigide e resistenti, che portano alla plasticizzazione degli estremi del pilastro
 - Meno vero per travi deformabili e meno resistenti, che si plasticizzano prima dei pilastri
- Ipotezziamo che la rotazione dei nodi sia trascurabile rispetto alla rotazione alla corda
 - Plausibile quando si plasticizzano abbastanza presto entrambi gli estremi di tutti i pilastri, con meccanismo di piano

Controllo della duttilità con analisi lineari?

- Ipotizziamo che il punto di flesso del momento flettente nei pilastri sia a metà pilastro
- Ipotizziamo che la rotazione dei nodi sia trascurabile rispetto alla rotazione alla corda



- In questo modo si può ragionare in termini di spostamento relativo δ_r tra gli impalcati (drift) perché $\delta_r = \theta h$
- Stimare in questo modo la domanda di duttilità è cautelativo (ma può esserlo troppo)
- Stimare in questo modo la capacità di duttilità dei pilastri è molto semplice

Questo vale anche per analisi non lineari

Domanda di spostamento per SLV

spettro elastico - direzione x

- Spostamenti relativi, includendo eccentricità e 30% sisma ortogonale
 - Modello base

telai x		spostamento relativo massimo								
n	y		1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.15		10.853	19.985	22.367	21.905	22.753	22.516	18.597	11.010
2	6		10.482	18.715	21.155	20.512	22.260	21.873	17.478	10.091
3	9.85		11.003	19.492	22.302	21.665	24.342	23.549	18.371	10.543

- Modello con rigidezza ridotta

telai x		spostamento relativo massimo								
n	y		1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.15		13.492	25.967	29.285	28.357	28.504	27.261	22.104	13.117
2	6		13.183	24.698	27.998	26.869	28.071	26.675	21.001	12.180
3	9.85		13.926	25.932	29.638	28.471	30.661	28.755	22.185	12.829

Domanda di spostamento per SLV

spettro elastico - direzione y

- Spostamenti relativi, includendo eccentricità e 30% sisma ortogonale
 - Modello base

n	y		1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.15		15.347	32.433	39.270	41.471	46.289	44.853	35.307	23.946
2	6.75		13.986	29.802	36.123	38.255	42.422	41.444	32.718	22.280
3	13.5		12.623	27.167	32.969	35.031	38.546	38.020	30.119	20.606
4	15		12.473	26.918	32.696	34.779	38.192	37.758	29.941	20.511
5	16.5		12.623	27.167	32.969	35.031	38.546	38.020	30.119	20.606
6	23.25		13.986	29.802	36.123	38.255	42.422	41.444	32.718	22.280
7	29.85		15.347	32.433	39.270	41.471	46.289	44.853	35.307	23.946

- Modello con rigidezza ridotta

n	y		1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.15		19.786	43.090	52.605	55.235	59.620	55.901	43.388	29.571
2	6.75		17.889	39.280	48.089	50.684	54.420	51.377	39.967	27.353
3	13.5		15.985	35.453	43.553	46.107	49.192	46.824	36.523	25.115
4	15		15.752	35.031	43.086	45.669	48.650	46.401	36.219	24.950
5	16.5		15.985	35.453	43.553	46.107	49.192	46.824	36.523	25.115
6	23.25		17.889	39.280	48.089	50.684	54.420	51.377	39.967	27.353
7	29.85		19.786	43.090	52.605	55.235	59.620	55.901	43.388	29.571

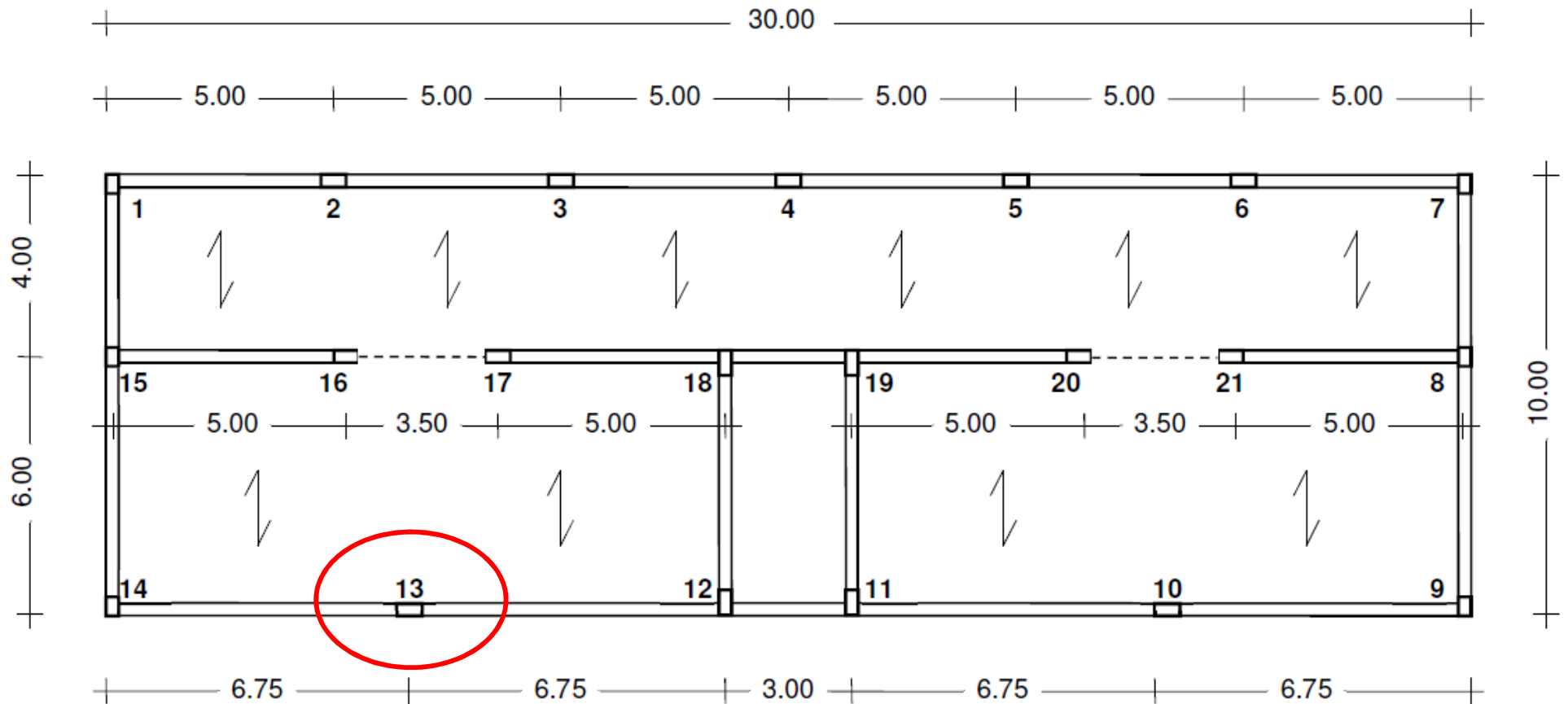
Capacità di spostamento per SLV

- La tensione media nei pilastri è in genere un po' inferiore a quella stimata nel dimensionamento (5.95 MPa)
 - Pochi pilastri sono leggermente sottodimensionati e lavorano ad una tensione media fino a 6.8 MPa
 - Ai due piani superiori i pilastri lavorano a tensioni più basse
- A parità di tensione media la capacità deformativa è minore per i pilastri con altezza di sezione maggiore
- A parità di sezione la capacità deformativa è minore per i pilastri con tensione media maggiore

Capacità di spostamento per SLV

direzione x

- Si è preso come riferimento il pilastro 13 (perimetrale, bordo inferiore) perché è quello che ha dimensioni maggiori ed anche tensione media maggiore



Capacità di spostamento per SLV

direzione x

- Si è preso come riferimento il pilastro 13 (perimetrale, bordo inferiore) perché è quello che ha dimensioni maggiori ed anche tensione media maggiore
- Si è applicata la formulazione sperimentale ricavata da studi di Panagiotakos e Fardis (Circolare NTC18, equazione C8.7.2.1)
- Si è utilizzato il valore medio delle resistenze diviso per FC
 $f_{cm}/FC = 15.83 \text{ MPa}$ $f_{ym}/FC = 361.9 \text{ Mpa}$
 - Si è ottenuto:

		ordine	1	2	3	4	5	6	7	8
	σ media	[MPa]	6.08	5.99	5.86	5.70	5.47	5.13	4.56	2.28
	spo SLV	[mm]	24.9	26.6	28.7	31.2	34.5	38.9	45.4	54.0

Giudizio su capacità deformativa per SLV direzione x

- I valori di capacità sono stato confrontati con la domanda

		ordine	1	2	3	4	5	6	7	8
	σ_c media	[MPa]	6.08	5.99	5.86	5.70	5.47	5.13	4.56	2.28
	spo SLV	[mm]	24.9	26.6	28.7	31.2	34.5	38.9	45.4	54.0
n	y		1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.15		13.492	25.967	29.285	28.357	28.504	27.261	22.104	13.117
2	6		13.183	24.698	27.998	26.869	28.071	26.675	21.001	12.180
3	9.85		13.926	25.932	29.638	28.471	30.661	28.755	22.185	12.829

- Si è valutato il rapporto tra capacità e domanda

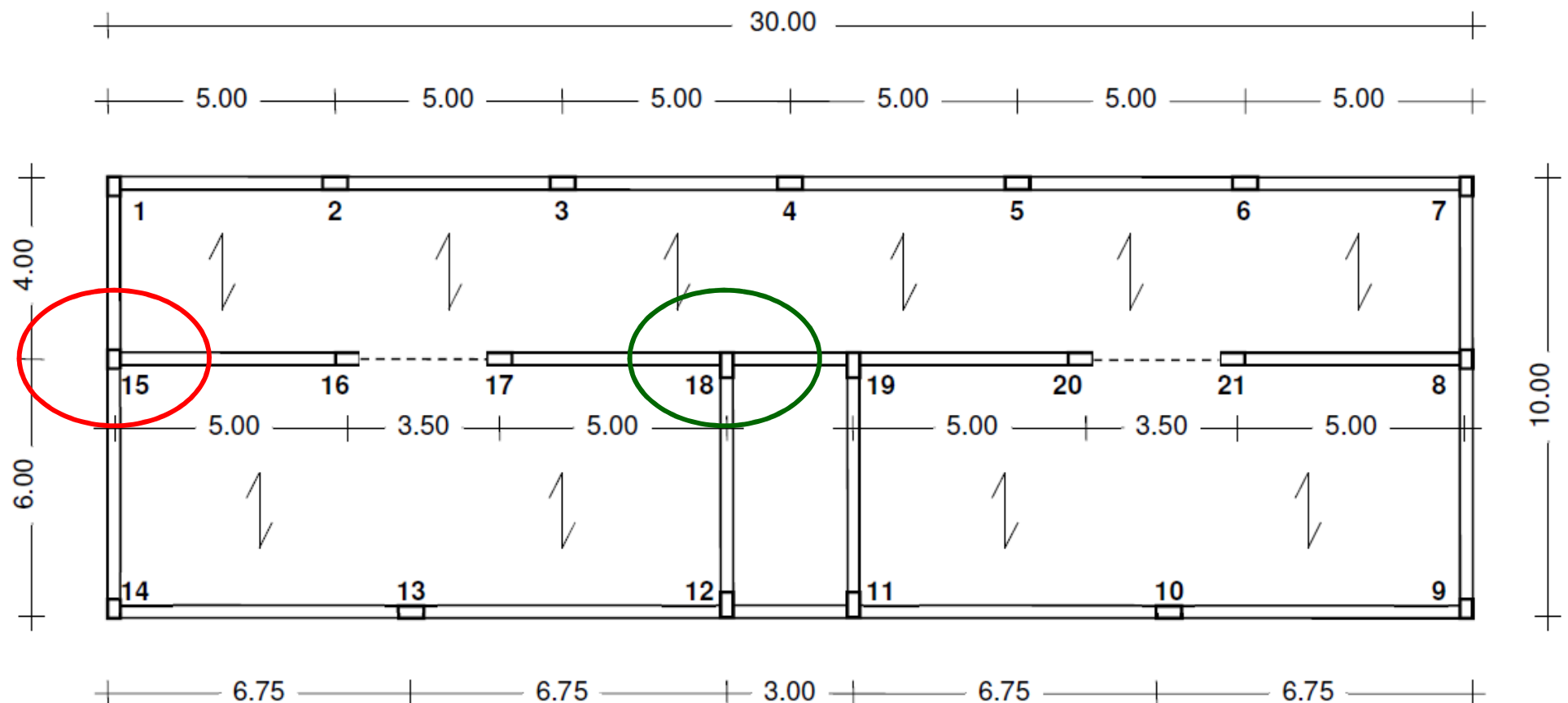
	rapporto		1.788	1.027	0.968	1.097	1.125	1.353	2.045	4.206
--	----------	--	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

In direzione x la struttura ha una capacità di poco inferiore alla domanda

Capacità di spostamento per SLV

direzione y

- Si è preso come riferimento il pilastro 15 (perimetrale) perché ha spostamenti maggiori (ma anche il 18 che ha dimensioni maggiori e tensione media maggiore)



Capacità di spostamento per SLV

direzione y

- Si è preso come riferimento il pilastro 15 (perimetrale) perché ha spostamenti maggiori (ma anche il 18 che ha dimensioni maggiori e tensione media maggiore)
- Si è applicata la formulazione sperimentale ricavata da studi di Panagiotakos e Fardis (Circolare NTC18, equazione C8.7.2.1)
- Si è utilizzato il valore medio delle resistenze diviso per FC
 $f_{cm}/FC = 15.83 \text{ MPa}$ $f_{ym}/FC = 361.9 \text{ Mpa}$
 - Si è ottenuto:

pilastro 15		ordine	1	2	3	4	5	6	7	8
	sc media	[MPa]	5.59	5.70	5.86	6.11	6.52	4.89	3.26	1.63
	spo SLV	[mm]	29.3	31.2	33.5	36.1	39.1	44.3	50.1	56.7

pilastro 18		ordine	1	2	3	4	5	6	7	8
	sc media	[MPa]	6.76	6.76	6.76	6.76	6.76	6.76	4.50	2.25
	spo SLV	[mm]	25.1	26.8	28.8	31.3	34.4	38.4	45.6	54.1

Giudizio su capacità deformativa per SLV direzione y

- I valori di capacità sono stato confrontati con la domanda

pilastro 15		ordine	1	2	3	4	5	6	7	8
	sc media	[MPa]	5.59	5.70	5.86	6.11	6.52	4.89	3.26	1.63
	spo SLV	[mm]	29.3	31.2	33.5	36.1	39.1	44.3	50.1	56.7
pilastro 18		ordine	1	2	3	4	5	6	7	8
	sc media	[MPa]	6.76	6.76	6.76	6.76	6.76	6.76	4.50	2.25
	spo SLV	[mm]	25.1	26.8	28.8	31.3	34.4	38.4	45.6	54.1
n	y		1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.15		19.786	43.090	52.605	55.235	59.620	55.901	43.388	29.571
2	6.75		17.889	39.280	48.089	50.684	54.420	51.377	39.967	27.353
3	13.5		15.985	35.453	43.553	46.107	49.192	46.824	36.523	25.115
4	15		15.752	35.031	43.086	45.669	48.650	46.401	36.219	24.950
5	16.5		15.985	35.453	43.553	46.107	49.192	46.824	36.523	25.115
6	23.25		17.889	39.280	48.089	50.684	54.420	51.377	39.967	27.353
7	29.85		19.786	43.090	52.605	55.235	59.620	55.901	43.388	29.571

Giudizio su capacità deformativa per SLV direzione y

- I valori di capacità sono stato confrontati con la domanda

pilastro 15		ordine	1	2	3	4	5	6	7	8
	sc media	[MPa]	5.59	5.70	5.86	6.11	6.52	4.89	3.26	1.63
	spo SLV	[mm]	29.3	31.2	33.5	36.1	39.1	44.3	50.1	56.7
pilastro 18		ordine	1	2	3	4	5	6	7	8
	sc media	[MPa]	6.76	6.76	6.76	6.76	6.76	6.76	4.50	2.25
	spo SLV	[mm]	25.1	26.8	28.8	31.3	34.4	38.4	45.6	54.1
n	y		1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.15		19.786	43.090	52.605	55.235	59.620	55.901	43.388	29.571
2	6.75		17.889	39.280	48.089	50.684	54.420	51.377	39.967	27.353
3	13.5		15.985	35.453	43.553	46.107	49.192	46.824	36.523	25.115

- Si è valutato il rapporto tra capacità e domanda

pil.15	rapporto		1.481	0.725	0.636	0.654	0.656	0.792	1.155	1.917
pil.18	rapporto		1.571	0.756	0.662	0.678	0.699	0.820	1.248	2.153

In direzione y la struttura ha una capacità pari al 64% della domanda

Giudizio su capacità deformativa per SLV

- L'Eurocodice 8 e la Circolare 2009 indicano limiti alla possibilità di usare l'analisi lineare per un giudizio in termini di deformazioni
- La motivazione è che quando la struttura va ampiamente in campo plastico la previsione degli spostamenti relativi di interpiano perde validità
- Il limite imposto dalla Circolare 2009 era:
rapporto $\rho_{\max} / \rho_{\min}$ tra tutti i $\rho > 2$ non superiore a 2.5
in sostanza $\rho_{\max} < 5$
- Controllando i valori di ρ ottenuti (rivalutando la resistenza con il valore medio) si trova come limite di accettabilità circa 0.45 dell'azione sismica

Giudizio su capacità deformativa per SLV

- L'analisi speditiva ha mostrato che la struttura ha una capacità deformativa abbastanza buona
- Arrivando al 45% dell'azione sismica prevista nel sito, la capacità deformativa non è ancora superata
 - Oltre tale limite non è corretto esprimere un giudizio
 - Se lo si facesse, si arriverebbe al 64% dell'azione sismica prevista per sisma y, al 97% dell'azione sismica prevista per sisma x
- Bisogna però ricordare che l'analisi lineare con fattore di struttura ha portato alla conclusione che si potrebbe avere rottura fragile per il 36% dell'azione sismica prevista nel sito, per sisma x