VERIFICA DI EDIFICI ESISTENTI IN CEMENTO ARMATO

Catania, 25 giugno – 2 luglio 2019

09 – Analisi lineare, verifica in termini di deformazioni

Docente del corso

AURELIO GHERSI

Corso organizzato da: FONDAZIONE DELL'ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI CATANIA

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
    (oltre al controllo di resistenza per gli elementi fragili)

Eurocodice 8

		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):					
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.				
	Fragile	Verifiche (se LM è accettato):			In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.	In conformità alla sezione pertinente della EN 1998-1:2004.	
		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 2019 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 casi di analisi lineare con spetto elastico, lo spettro di risposta da impiegare è quello elastico di cui al punto 3.2.3 delle NTC eseguendo l'analisi e la verifica secondo quanto previsto nel capitolo 7 per le costruzioni non dissipative

Circolare 2019, punto C8.7.2.2.1

Questa frase non ha quasi senso e non sembra proprio riferirsi al tipo di analisi citato nella Circolare 2009 e nell'Eurocodice 8.3

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

Analisi lineare con spettro elastico

e controllo in termini di deformazioni plastiche

		Modello Lineare (LM)	
		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 resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.
		Ispezioni (se LM è accettato):	
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.
	Fragile	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.

Limiti di accettabilità basati sulla dispersione dei valori di ρ

Verifica in termini di deformazione

Verifica in termini di resistenza per gli elementi fragili

Analisi lineare con spettro elastico

e controllo in termini di deformazioni plastiche

		Modello Lineare (LM)	
		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 resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.
		Ispezioni (se LM è accettato):	
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.
	Fragile	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.

Limiti di accettabilità basati sulla dispersione dei valori di ρ

La motivazione è che quando la struttura và ampiamente in campo plastico la previsione degli spostamenti relativi di interpiano perde validità

Limite per Circolare 2009: rapporto ρ_{max}/ρ_{min} tra tutti i $\rho > 2$ non superiore a 2.5; in sostanza $\rho_{max} < 5$

Nella Circolare 2019 si parla genericamente di limiti per analisi statica lineare

Analisi lineare con spettro elastico

e controllo in termini di deformazioni plastiche

		Modello Lineare (LM)	
		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 resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.
		Ispezioni (se LM è accettato):	
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.
	Fragile	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.

Verifica in termini di deformazione

Questa è la vera particolarità di questo tipo di analisi

Analisi lineare con spettro elastico

e controllo in termini di deformazioni plastiche

		Modello Lineare (LM)	
		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 resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.
		Ispezioni (se LM è accettato):	
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.
	Fragile	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.

Determinare il valore massimo del taglio a partire dal momento (valutato con resistenza incrementata) può garantire che non si abbiano mai problemi di taglio

Verifica in termini di resistenza per gli elementi fragili

Controllo della duttilità

con analisi lineari

Capacità:

- Ipotizziamo 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
- Ipotizziamo 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

Capacità:

- 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

$\Downarrow$

- 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 capacità di duttilità:

- È in genere cautelativo (ma può esserlo troppo)
- È molto semplice per i pilastri
- Non lo si può fare per le travi (che però in genere non danno problemi)

Questo vale anche per analisi non lineari

Controllo della duttilità

con analisi lineari

Domanda:

- Ipotizziamo che gli spostamenti relativi di interpiano che si hanno con un'analisi lineare siano gli stessi che si avrebbero con un'analisi non lineare
  - Abbastanza plausibile per lo spostamento massimo, in testa al telaio
  - Meno vero per lo spostamento relativo, specialmente se la struttura tende a collassare con un meccanismo di piano

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

D_{max}

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

D_{max}

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

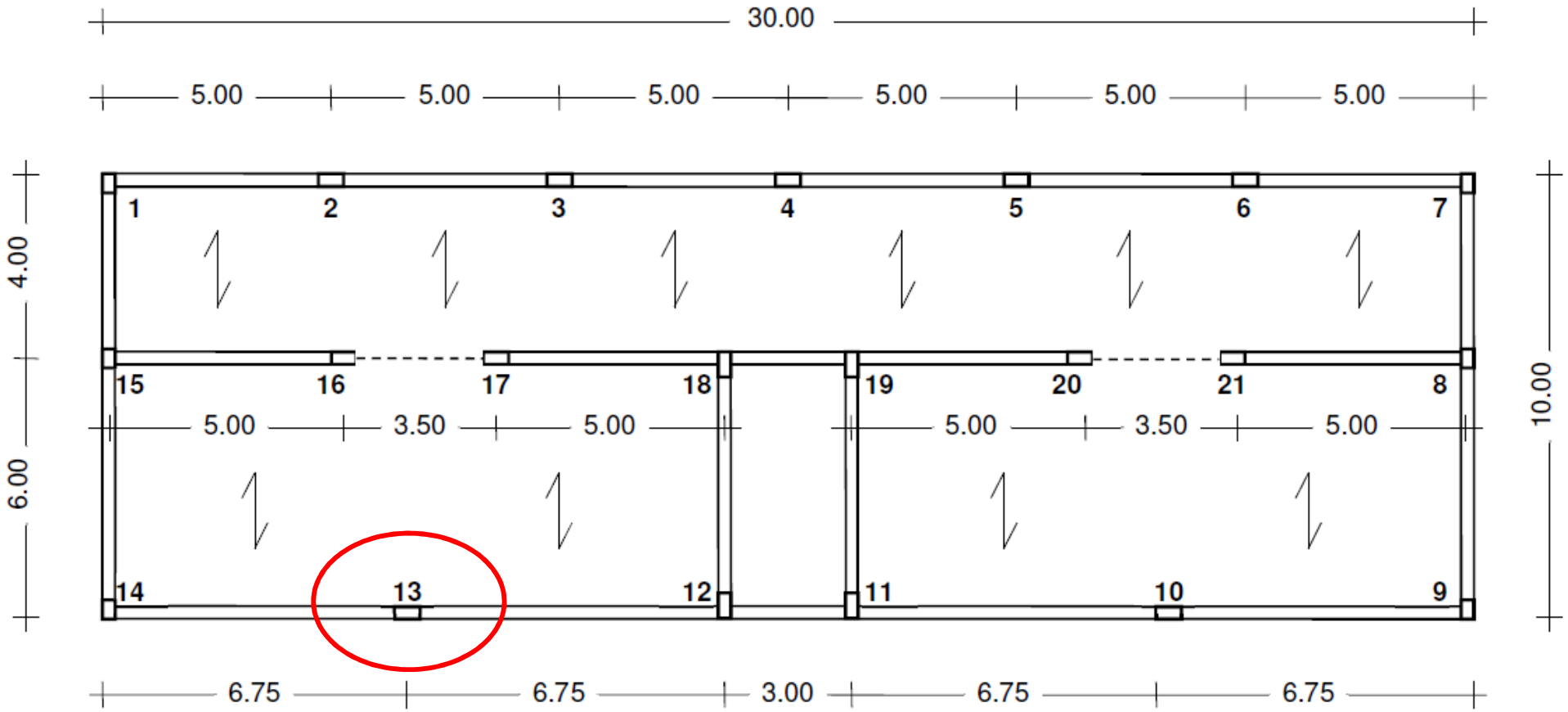
Capacità di spostamento per SLV

- 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
  $f_{cm}/FC = 15.83$ MPa $\qquad f_{ym}/FC = 361.9$ Mpa
  - Si è ottenuto:

		ordine	1	2	3	4	5	6	7	8
	σc 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
	σc 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
						C				
n	y		1	2 D	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

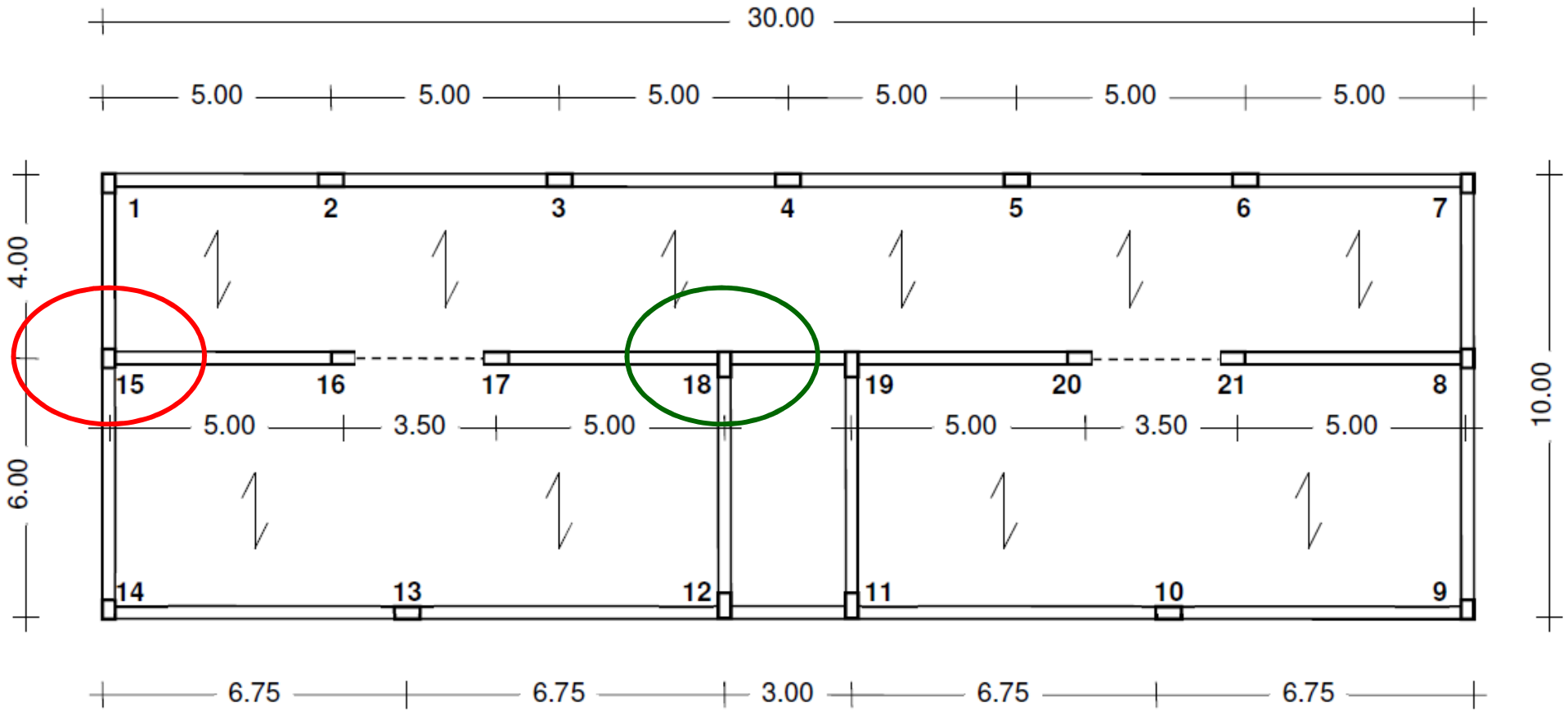
	rapporto		1.788	1.027	0.968	1.097	1.125	1.353	2.045	4.206

In direzione x la struttura ha una capacità di poco inferiore alla domanda, quindi la struttura in direzione x potrebbe quasi sopportare il sisma per SLV

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
  $f_{cm}/FC = 15.83$ MPa $\qquad f_{ym}/FC = 361.9$ 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
						C				
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
						C				
n	y		1	2 D	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
					D					

- 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

Nota: in questa direzione la struttura è molto deformabile.
Possono essere rilevanti gli effetti del secondo ordine (P-delta)?

Giudizio su capacità deformativa per SLV

- Il limite imposto dalla Circolare 2009 era:
  rapporto ρ_{max}/ρ_{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