

Corso di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura

Progetto di costruzioni in zona sismica
A.A. 2025/2026

20 – COMPORTAMENTO 3D E COMBINAZIONI DI CARICO

Francesca Barbagallo, Università degli Studi di Catania

Comportamento 3D

Comportamento 3D e modellazione delle azioni

1. Occorre tener conto delle incertezze relative alla effettiva posizione del centro di massa (i carichi variabili possono essere distribuiti in maniera non uniforme)

→ eccentricità accidentale

2. Occorre tener conto dell'effetto contemporaneo delle diverse componenti dell'azione sismica

→ criteri di combinazione delle componenti

Eccentricità accidentale

“Per tenere conto della variabilità spaziale del moto sismico, nonché di eventuali incertezze nella localizzazione delle masse, deve essere attribuita al centro di massa un'eccentricità accidentale rispetto alla sua posizione quale deriva dal calcolo”

“Per i soli edifici ed **in assenza di più accurate** determinazioni l'eccentricità accidentale in ogni direzione non può essere considerata inferiore a 0.05 volte la dimensione dell'edificio misurata perpendicolarmente alla direzione di applicazione dell'azione sismica.
Detta eccentricità è assunta costante, per entità e direzione, su tutti gli orizzontamenti”

Eccentricità accidentale

Le NTC chiedono di tener conto di due aspetti attraverso l'eccentricità accidentale

Variabilità spaziale del moto sismico:

Le onde sismiche si propagano con velocità elevata ma non infinita; quindi raggiungono punti diversi dell'edificio in istanti diversi (sfasamento delle accelerazioni)

Questo aspetto non è rilevante per gli edifici

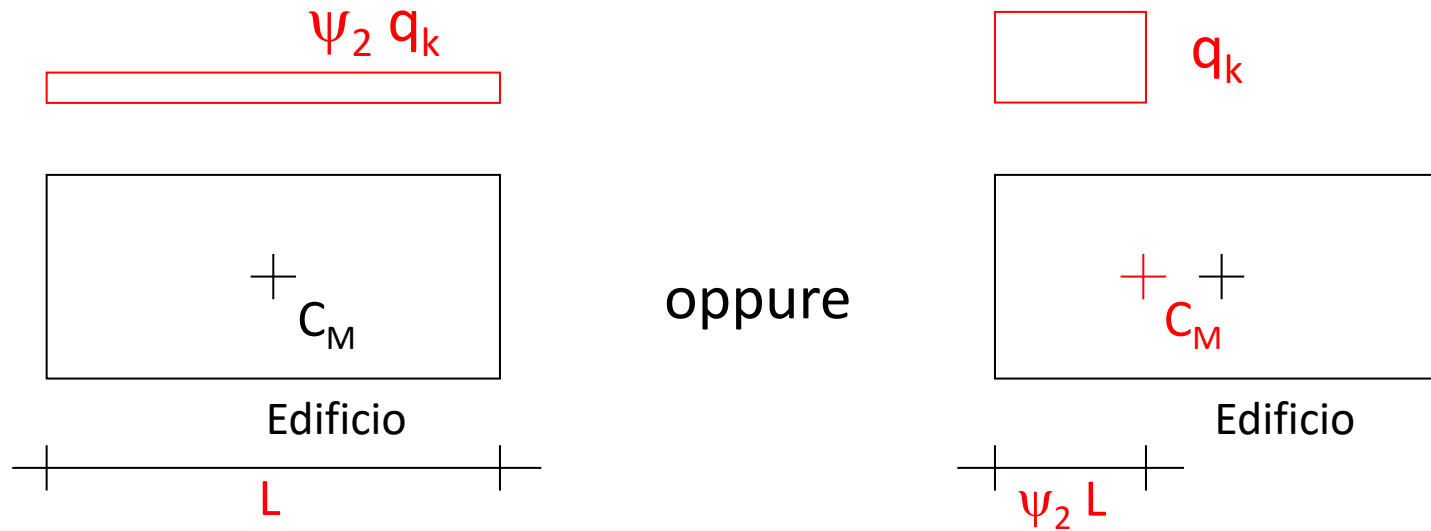
Incertezze:

Incertezze nella localizzazione delle masse

Questo aspetto è rilevante per gli edifici

Incertezze nella localizzazione delle masse

L'aliquota di carichi variabili presente in occasione del sisma potrebbe non essere uniformemente distribuita nell'edificio

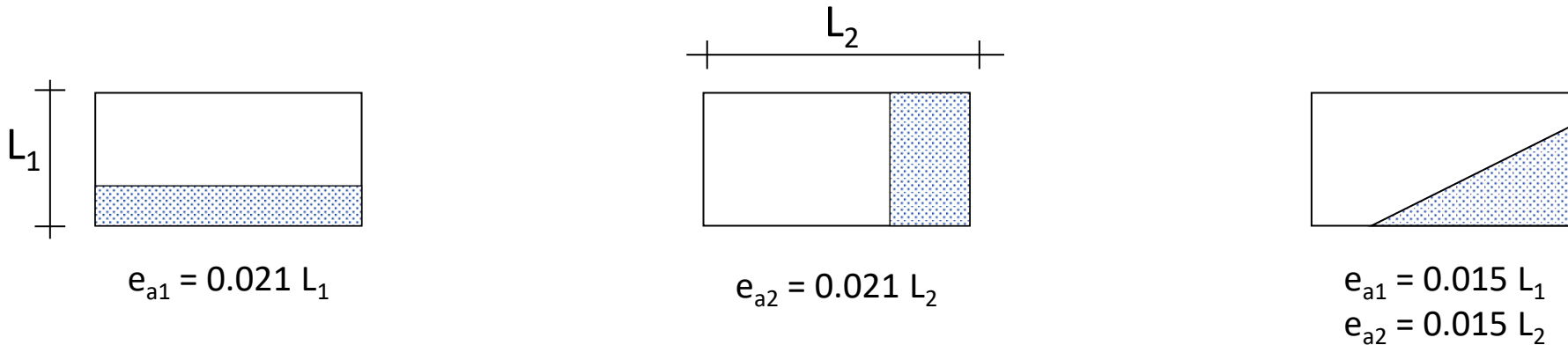


Il centro di massa deve quindi essere spostato di una quantità detta “eccentricità accidentale”

Eccentricità accidentale

Perché il 5%?

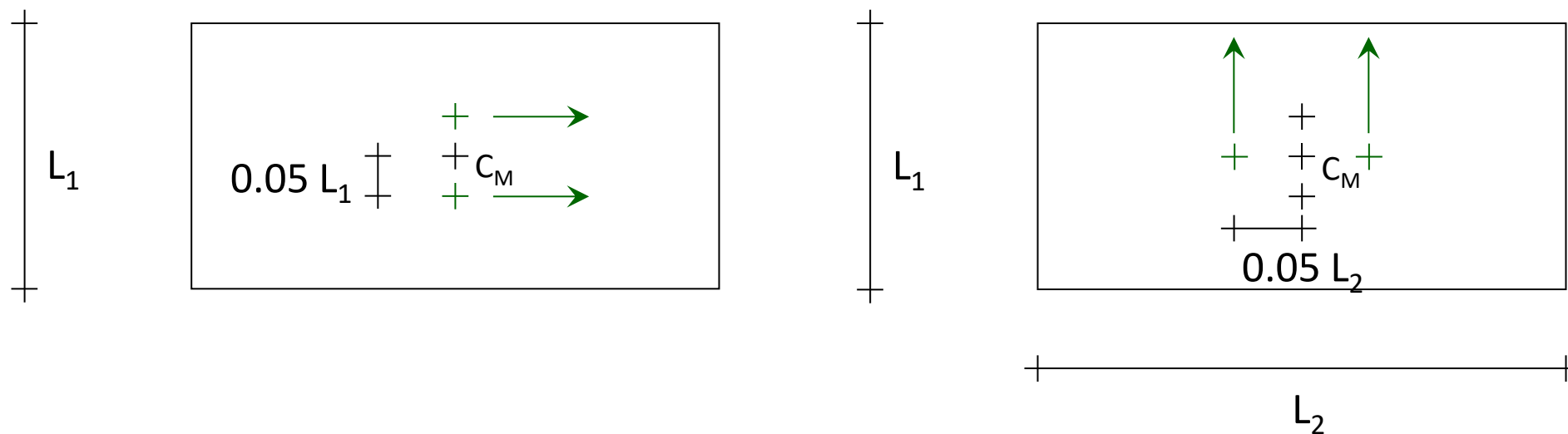
Se si applica il carico variabile massimo su un'area pari a ψ_2 x area totale si ottiene un'eccentricità nettamente minore



Il valore 0.05 è maggiore, per tener conto di:

- amplificazione della rotazione per effetti dinamici
- rotazione per lo sfasamento dell'onda sismica da un estremo all'altro dell'edificio

Eccentricità accidentale



Aumentano le combinazioni di carico

Eccentricità accidentale come tenerne conto?

Considerando le forze statiche applicate al centro di massa spostato di e_a

Solo se uso l'analisi statica

oppure

Effettuando più volte l'analisi modale, considerando il centro di massa spostato di una quantità pari a e_a

Non è del tutto corretto

ovvero

Considerando l'effetto di coppie pari alle forze statiche per l'eccentricità e_a

Eccentricità accidentale

come tenerne conto?

Considerando l'effetto di coppie pari alle forze statiche per l'eccentricità e_a

Questo approccio è da preferire perché:

- riduco il numero di schemi base di calcolo da controllare
- giudico più facilmente l'effetto della eccentricità accidentale
- evito di accentuarne l'effetto (l'eccentricità e_a è già amplificata per tener conto di effetti dinamici)

Combinazione delle componenti

Le componenti orizzontali e verticali del sisma agiscono simultaneamente

Esse però non sono correlate
(i massimi si raggiungono in istanti diversi)

Come combinarle?

Criterio generale:

Sommare

- gli effetti massimi di una componente dell'azione
- il 30% dei massimi prodotti dalle altre componenti

Combinazione delle componenti

Criterio generale:

Sommare

- gli effetti massimi di una componente dell'azione
- il 30% dei massimi prodotti dalle altre componenti

Esempio: sisma prevalente x $\Rightarrow E_x + 0.3E_y + \cancel{0.3E_z}$

L'EC8 considera questa come una possibile alternativa, ma suggerisce anche:

Combinare gli effetti come SRSS $\sqrt{E_x^2 + E_y^2 + \cancel{E_z^2}}$ Salvo casi particolari non si considera la componente z del sisma

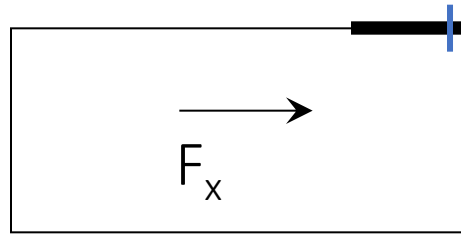
Componente verticale

Se ne tiene conto solo per:

- Elementi con luce maggiore di 20 m
- Solai precompressi di luce superiore a 8 m
- Sbalzi di luce superiore a 4 m
- Elementi spingenti
- Pilastri in falso
- Edifici con piani sospesi

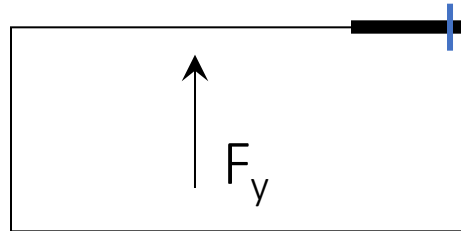
Travi

Azione in una direzione più 30% di azione nell'altra



edificio

$$M = 230 \text{ kNm}$$



edificio

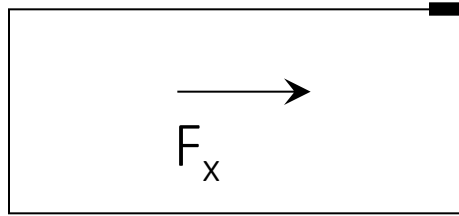
$$M = 50 \text{ kNm}$$

causato dalla
rotazione

$$\begin{aligned} M_{Ed} &= 230 + 0.3 \times 50 = \\ &= 245 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Pilastri

Stesso criterio,
ma occorre tener conto
della direzione del sisma prevalente

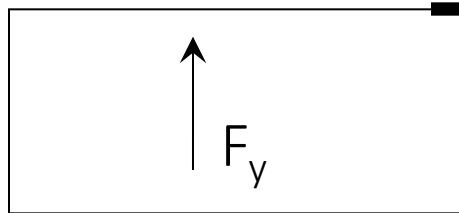


edificio

$$M_y = 280 \text{ kNm}$$

$$M_x = 45 \text{ kNm}$$

causato dalla
rotazione

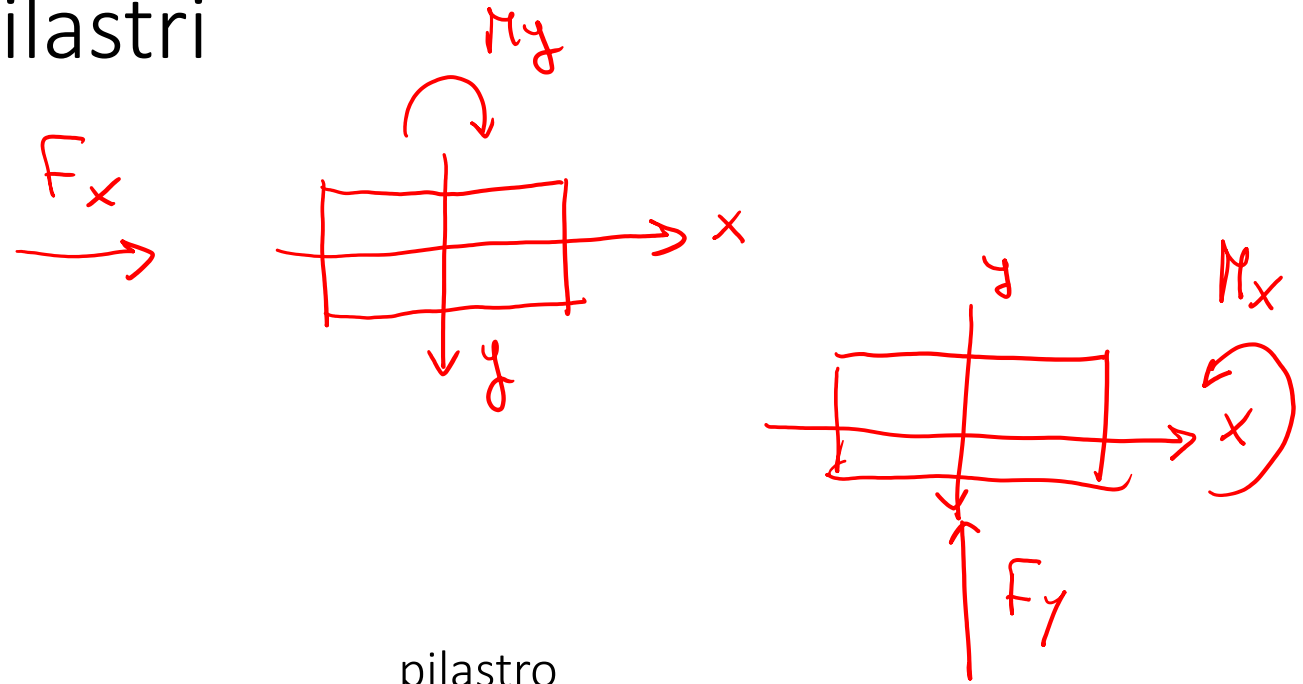


edificio

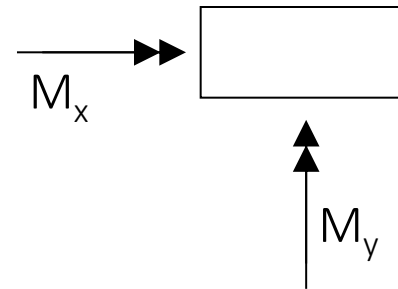
$$M_y = 50 \text{ kNm}$$

causato dalla rotazione

$$M_x = 105 \text{ kNm}$$

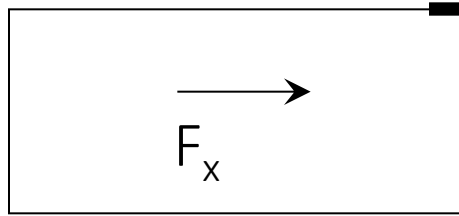


pilastro



Pilastri

Stesso criterio,
ma occorre tener conto
della direzione del sisma prevalente

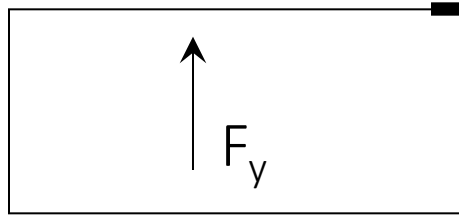


edificio

$$M_y = 280 \text{ kNm}$$

$$M_x = 45 \text{ kNm}$$

causato dalla
rotazione



edificio

$$M_y = 50 \text{ kNm}$$

causato dalla rotazione

$$M_x = 105 \text{ kNm}$$

Sisma prevalente in
direzione x

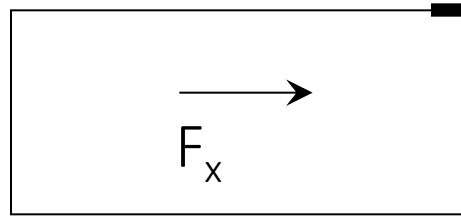
$$\begin{aligned} M_{Ed,y} &= 280 + 0.3 \times 50 = \\ &= 295 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{Ed,x} &= 45 + 0.3 \times 105 = \\ &= 77 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Verifica a presso-
flessione deviata

Pilastri

Stesso criterio,
ma occorre tener conto
della direzione del sisma prevalente

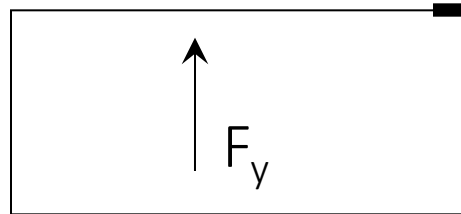


edificio

$$M_y = 280 \text{ kNm}$$

$$M_x = 45 \text{ kNm}$$

causato dalla
rotazione



edificio

$$M_y = 50 \text{ kNm}$$

causato dalla rotazione

$$M_x = 105 \text{ kNm}$$

Sisma prevalente in
direzione y

$$M_{Ed,y} = 50 + 0.3 \times 280 =$$
$$= 134 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,x} = 105 + 0.3 \times 45 =$$
$$= 119 \text{ kNm}$$

Verifica a presso-
flessione deviata

Combinazioni di carico

Analisi da eseguire

Necessità di:

- Distinguere tra carichi verticali in assenza di sisma (maggiori) e in presenza di sisma (minori)
- Tener conto dell'eccentricità accidentale
- Combinare l'effetto delle diverse componenti del sisma

Quindi:

- Un numero di schemi da calcolare molto alto

Quanti?

Quante combinazioni di carico?

In assenza di sisma:

- Schema base, col carico verticale massimo ($g_d + q_d$) su tutte le campate di trave
- Eventuali altri schemi col carico variabile a scacchiera

Nota: l'effetto del carico variabile a scacchiera può essere stimato in maniera approssimata

- Eventuale effetto del vento

Quante combinazioni di carico?

In presenza di sisma:

- 1 • carico verticale con valore ridotto ($g_k + \psi_2 q_k$) su tutte le campate di trave
- 2 • forze sismiche (statiche o modali) in direzione x / y
- 4 • verso delle forze sismiche: positivo / negativo
- 8 • eccentricità accidentale: positiva / negativa
- 16 • forze in una direzione più 0.3 forze nell'altra direzione, prese col segno: positivo / negativo
- 32 • eccentricità nell'altra direzione: positiva / negativa

Azione sismica principale	segno	eccentricità	Azione sismica secondaria	eccentricità	N° comb.
E_x	+	$+ e_y$	$+ 0.3 E_y$	$+ e_x$	1
				$- e_x$	2
			$- 0.3 E_y$	$+ e_x$	3
				$- e_x$	4
		$- e_y$	$+ 0.3 E_y$	$+ e_x$	5
				$- e_x$	6
			$- 0.3 E_y$	$+ e_x$	7
				$- e_x$	8
	-	$+ e_y$	$+ 0.3 E_y$	$+ e_x$	9
				$- e_x$	10
			$- 0.3 E_y$	$+ e_x$	11
				$- e_x$	12
		$- e_y$	$+ 0.3 E_y$	$+ e_x$	13
				$- e_x$	14
			$- 0.3 E_y$	$+ e_x$	15
				$- e_x$	16
E_y	+	$+ e_x$	$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	17
				$- e_y$	18
			$- 0.3 E_x$	$+ e_y$	19
				$- e_y$	20
		$- e_x$	$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	21
				$- e_y$	22
			$- 0.3 E_x$	$+ e_y$	23
				$- e_y$	24
	-	$+ e_x$	$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	25
				$- e_y$	26
			$- 0.3 E_x$	$+ e_y$	27
				$- e_y$	28
		$- e_x$	$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	29
				$- e_y$	30
			$- 0.3 E_x$	$+ e_y$	31
				$- e_y$	32

Tante combinazioni di carico...

Come gestirle?

Risultati dettagliati degli schemi base, più **involuppo dei risultati** di tutte le combinazioni di carico?

Dai risultati di ciascuno schema base posso capire il comportamento della struttura

L'involuppo mi fornisce il giudizio complessivo

Schemi base
suggeriti:

1. carichi verticali max (senza sisma)
2. carichi verticali min (con sisma)
3. forze in direzione x (statiche o modali)
4. forze in direzione y (statiche o modali)
5. eccentricità accidentale per forze in dir. x
6. eccentricità accidentale per forze in dir. y

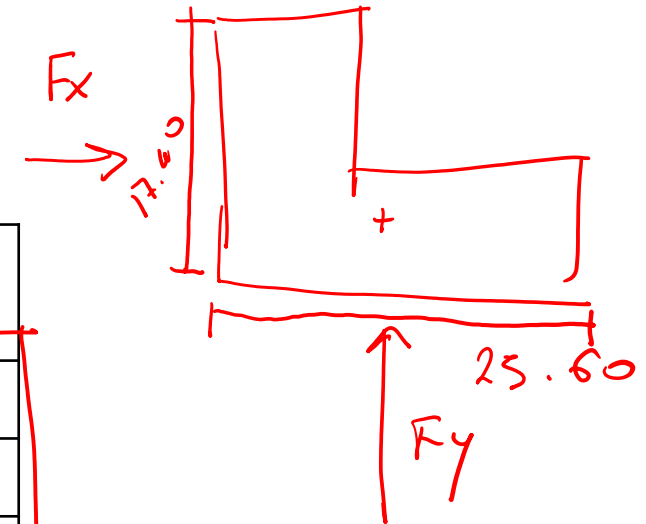
coppie (statiche) ⇐

Tante combinazioni di carico...

Come gestirle?

Forze e coppie utilizzate 

	Direzione x T = 0.565 s			Direzione y T = 0.548 s		
ordine	F [kN]	e [m]	M[kNm]	F [kN]	e [m]	M[kNm]
5	696.5	0.87	605.9	718.1	1.28	919.2
4	569.1	0.87	495.1	586.8	1.28	751.1
3	430.0	0.87	374.1	443.3	1.28	567.5
2	299.4	0.87	260.5	308.7	1.28	395.1
1	141.6	0.87	123.2	146.0	1.28	186.9



- Per sisma x: $L=17.40$ - $e = 0.05 \times 17.40 = 0.87$ m
- Per sisma y: $L=25.60$ - $e = 0.05 \times 25.60 = 1.28$ m