

Università di Trieste
Dipartimento di Ingegneria e Architettura

Corso di
Progettazione e riabilitazione
Sismica delle Strutture

Modulo 2: Riabilitazione strutturale in zona sismica

ANALISI CINEMATICA LINEARE

Prof. Ing. Natalino Gattesco

PREMESSA

Per scongiurare l'attivazione di possibili meccanismi di collasso locale riguardanti singoli elementi murari, a valle di un'analisi globale dell'edificio, si eseguono specifiche verifiche basate sull'equilibrio limite di queste porzioni di edificio.

Per alcuni tipi di edificio caratterizzati da una mancanza di comportamento d'insieme (*comportamento globale*), si eseguono solo una serie di verifiche locali riguardanti i potenziali cinematismi che si possono attivare. Ad esempio rientrano in queste tipologie gli edifici di culto, che non sono in grado di esprimere un comportamento scatolare.

La verifica di questi meccanismi locali di corpo rigido può essere eseguita in termini di accelerazione (**approccio cinematico lineare**) o di spostamento (**approccio cinematico non lineare**).

ANALISI LIMITE

I metodi dell'analisi limite con approccio cinematico si articola nei seguenti passi:

- a) Individuazione del meccanismo di dissesto
- b) Valutazione del moltiplicatore orizzontale dei carichi α_0 che comporta l'attivazione del meccanismo
- c) **Determinazione della curva $\alpha-d_c$ (essendo d_c lo spostamento di un punto di controllo della catena cinematica – baricentro delle masse) fino all'annullamento della forza sismica orizzontale**
- d) **Trasformazione della curva così ottenuta nella curva di capacità che esprime l'accelerazione spettrale a in funzione dello spostamento d di un oscillatore non lineare equivalente a 1GDL.**
- e) **Esecuzione delle verifiche di sicurezza, attraverso il controllo della compatibilità degli spostamenti e/o delle resistenze richiesti alla struttura.**

ANALISI CINEMATICA LINEARE

Si basa sulla valutazione dell'azione orizzontale che è in grado di attivare il cinematismo (*operazioni a), b) ed e) della pagina precedente*)

La verifica consiste nel confronto tra l'accelerazione necessaria per attivare il cinematismo e la massima accelerazione al suolo corrispondente allo stato limite di interesse, opportunamente ridotta, nel caso di verifica allo SLV, attraverso il fattore di comportamento q

Per il fattore di comportamento q si assume, di norma, un valore pari a 2.

ANALISI CINEMATICA NON LINEARE

Richiede la determinazione dell'azione orizzontale che la struttura è progressivamente in grado di sopportare all'evolversi del meccanismo.

La curva che rappresenta l'andamento esprime il valore del moltiplicatore α in funzione dello spostamento d_c di un punto di riferimento del sistema, e deve essere tracciata fino all'annullamento di ogni capacità di sopportare azioni orizzontali $\alpha=0$.

Essa può essere trasformata nella curva di capacità di un sistema equivalente a 1GDL, sulla quale può essere individuata la capacità di spostamento ultimo del meccanismo;

La verifica consiste nel confronto tra lo spostamento richiesto dall'azione sismica e quello corrispondente al raggiungimento dello SLV.

ANALISI CINEMATICA LINEARE

Il metodo consiste nel:

- individuare quali sconnessioni sono presenti o possono formarsi
- individuare parti di muratura a comportamento monolitico
- **individuare** quindi quali **cinematismi** sono **possibili**
- **il moltiplicatore dei carichi orizzontali che porta ad una perdita di equilibrio del sistema (innesco del cinematismo) è il moltiplicatore di collasso**
- **confrontare** tale valore **con l'accelerazione di riferimento**

Operativamente il **problema** è quello di **individuare tutti i meccanismi di collasso possibili**, ovvero quelli a cui corrispondono i valori più piccoli dei moltiplicatori di collasso

ANALISI CINEMATICA LINEARE

Il moltiplicatore dei carichi che porta al collasso si determina applicando il Principio dei Lavori Virtuali, in termini di spostamenti:

$$\boxed{L_e = L_i} \quad \alpha_o \left(\sum_{i=1}^n P_i \delta_{x,i} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j \delta_{x,j} \right) - \sum_{i=1}^n P_i \delta_{y,i} - \sum_{k=1}^o F_k \delta_k = L_{fi}$$

- n è il numero di tutte le forze peso applicate ai diversi blocchi della catena cinematica;
- m è il numero di forze peso non direttamente gravanti sui blocchi le cui masse, per effetto dell'azione sismica, generano forze orizzontali sugli elementi della catena cinematica, in quanto non efficacemente trasmesse ad altre parti dell'edificio;
- o è il numero di forze esterne, non associate a masse, applicate ai diversi blocchi;
- P_i è la generica forza peso applicata (peso proprio del blocco, applicato nel suo baricentro, o un altro peso portato);
- P_j è la generica forza peso, non direttamente applicata sui blocchi, la cui massa, per effetto dell'azione sismica, genera una forza orizzontale sugli elementi della catena cinematica, in quanto non efficacemente trasmessa ad altre parti dell'edificio;

L_{fi} è il lavoro totale di eventuali forze interne (allungamento di una catena; scorrimento con attrito in presenza di ammorsamento tra i blocchi del meccanismo, dovuto a moti relativi traslazionali o torsionali; deformazione nel piano di solai o coperture collegate ma non rigide).

ANALISI CINEMATICA LINEARE

Moltiplicatore carichi orizzontali

$$\alpha_o \left(\sum_{i=1}^n P_i \delta_{x,i} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j \delta_{x,j} \right) - \sum_{i=1}^n P_i \delta_{y,i} - \sum_{k=1}^o F_k \delta_k = L_{fi}$$

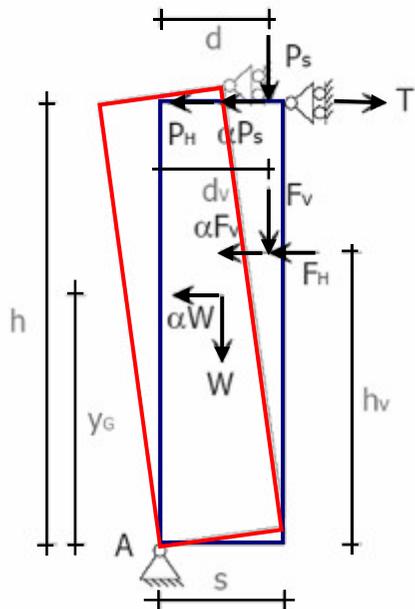
Accelerazione spettrale che attiva il meccanismo

$$a_0 = \frac{\alpha_o \sum_{i=1}^{n+m} P_i}{M^* FC}$$

$$M^* = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i} \right)^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2}$$

$$a_o = \alpha_o \cdot g$$

$$q = 2$$



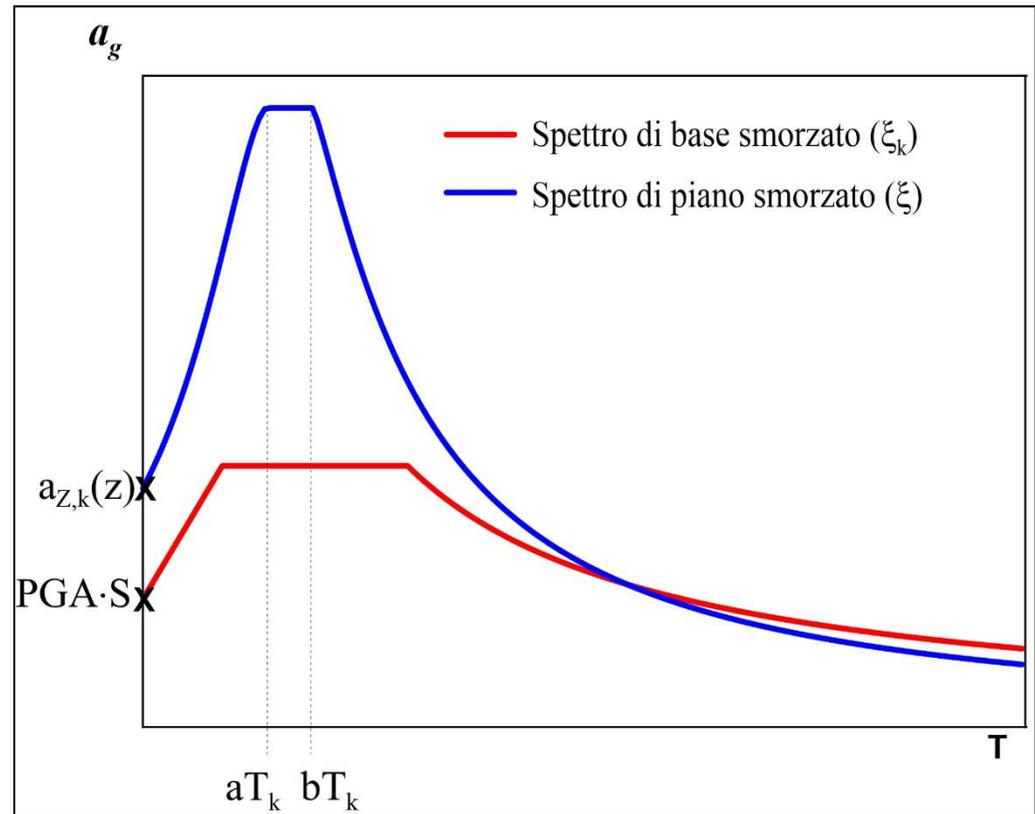
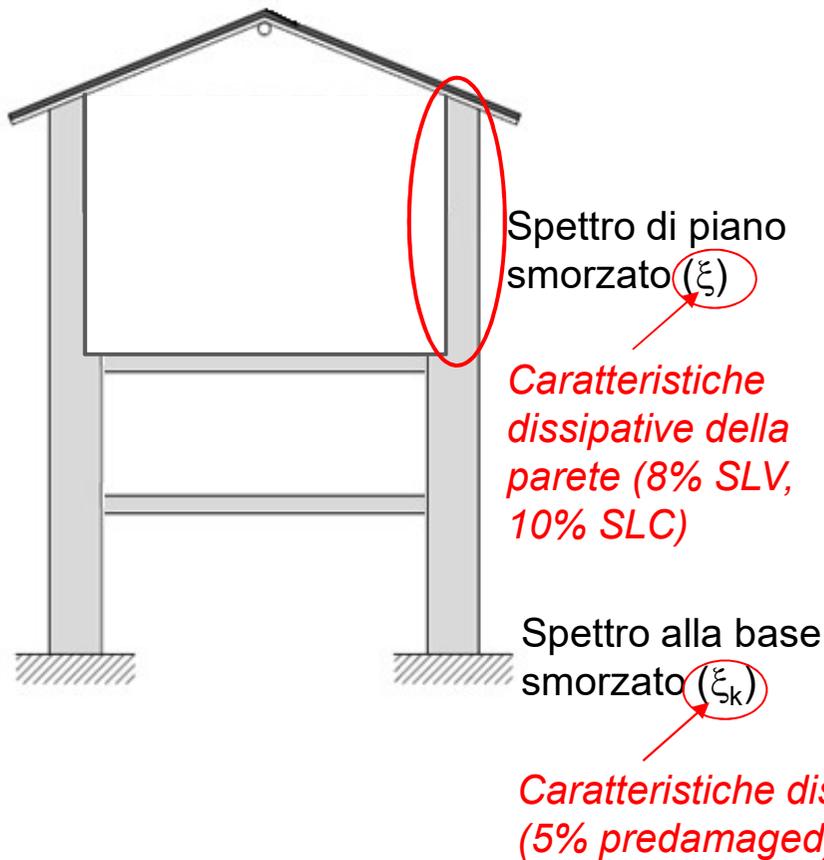
$$a_0 \geq \begin{cases} \frac{a_g \cdot S}{q} & \text{Elemento a terra} \\ \frac{S_e(T_1) \cdot \frac{z}{H} \cdot \gamma}{q} & \text{Elemento alla quota } z \end{cases}$$

$$\gamma = \frac{3N}{2N+1}$$

Coefficiente di partecipazione modale

AMPLIFICAZIONE SPETTRALE

Per tener conto dell'amplificazione dovuta all'eccitazione dell'edificio globale, si deve considerare lo spettro di piano.



SPETTRO DI PIANO

La valutazione della risposta sismica di pareti eccitate fuori piano è un problema piuttosto complesso, in quanto bisogna tener conto dell'interazione fra il comportamento dell'intera struttura (*pareti di taglio sollecitate nel piano*) e il comportamento fuori-piano delle pareti. Infatti, le pareti sono eccitate fuori piano dalla propria massa in risposta all'eccitazione del piano sul quale sono impostate. Si può quindi fare riferimento ad uno spettro di risposta del piano sul quale si trova la parete e da quello ricavare l'accelerazione di picco della parete fuori piano in corrispondenza del periodo proprio della parete stessa (*normalmente quello corrispondente alla prima forma modale flessionale fuori piano*).

Per costruire la forma spettrale di piano della parete, si deve innanzitutto ricavare l'accelerazione massima di piano $a_{z,k}(z)$, che, per edifici regolari con solai rigidi nel proprio piano e senza significativi problemi torsionali, può essere calcolata con la seguente formula semplificata (Circolare 21-01-2019):

$$a_z(z) = S_e(T_k, \xi_k) \cdot \frac{z}{H} \cdot \frac{3n}{2n+1} \sqrt{1 + 4 \xi_k^2}$$

SPETTRO DI PIANO

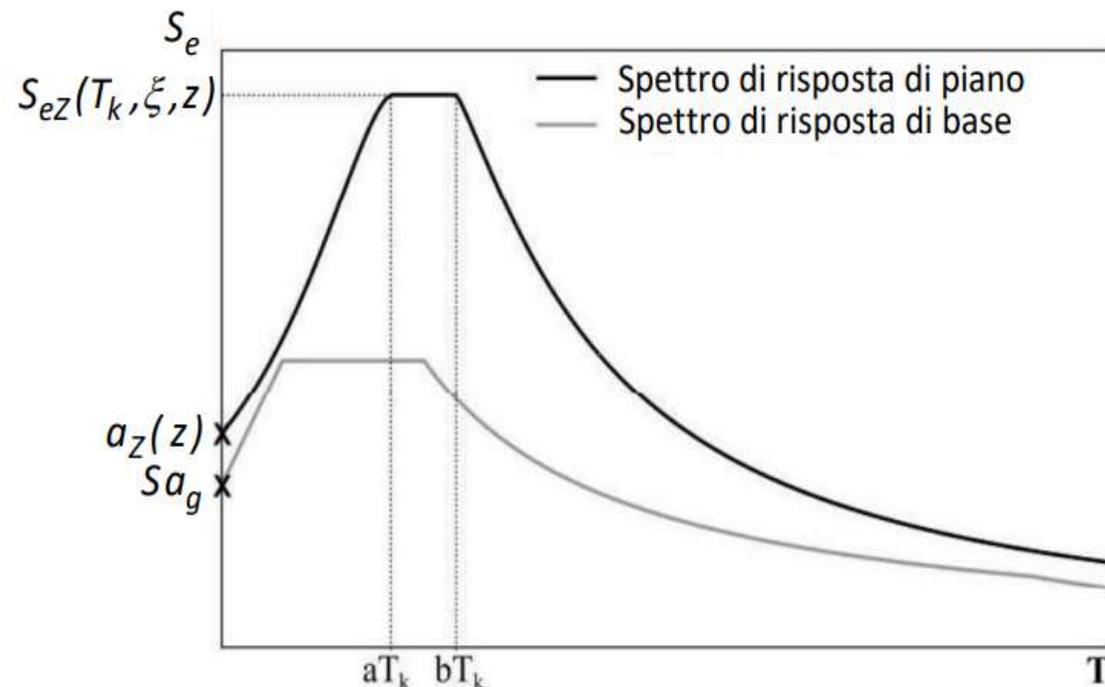
Dove $S_e(T_k, \xi_k)$ è l'accelerazione spettrale dell'edificio valutata in corrispondenza del proprio periodo fondamentale T_k e dello smorzamento relativo ξ_k , z è la quota del piano in argomento, H è l'altezza totale dell'edificio ed n è il numero di piani. Nella relazione precedente si è assunto un andamento linearmente crescente delle accelerazioni con la quota ed una distribuzione uniforme delle masse lungo l'altezza. Lo spettro di piano può essere ricavato con le relazioni:

$$S_{ez}(T, \xi, z) = \begin{cases} \frac{1.1 \xi_k^{-0.5} \eta(\xi) a_z(z)}{1 + \left[1.1 \xi_k^{-0.5} \eta(\xi) - 1 \right] \left(1 - \frac{T}{aT_k} \right)^{1.2}} & \text{per } T < aT_k \\ 1.1 \xi_k^{-0.5} \eta(\xi) a_z(z) & \text{per } aT_k \leq T < bT_k \\ \frac{1.1 \xi_k^{-0.5} \eta(\xi) a_z(z)}{1 + \left[1.1 \xi_k^{-0.5} \eta(\xi) - 1 \right] \left(\frac{T}{bT_k} - 1 \right)^{1.2}} & \text{per } T \geq bT_k \end{cases}$$

SPETTRO DI PIANO

Dove $S_{eZ}(T, \xi, z)$ è lo spettro di risposta di piano in termini di accelerazione situato a quota z , ξ è il coefficiente di smorzamento viscoso relativo alla parete, T è il periodo generico relativo alla parete, a e b sono coefficienti che definiscono l'intervallo di amplificazione massima dello spettro di piano (possono essere assunti rispettivamente pari a 0.8 e 1.1), e $\eta(\xi)$ è il fattore di smorzamento che dipende dal coefficiente viscoso secondo la relazione:

$$\eta(\xi) = \sqrt{\frac{0.1}{0.05 + \xi}}$$

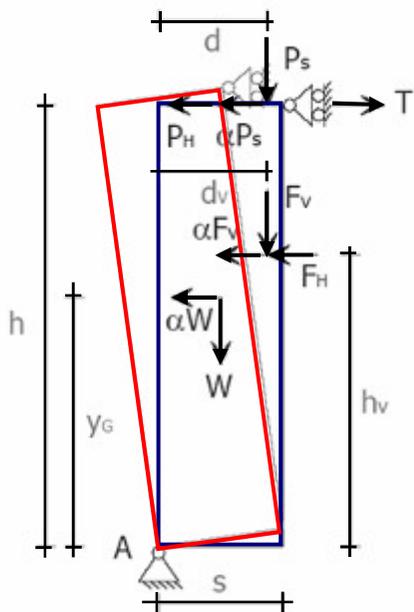


ANALISI CINEMATICA LINEARE

La verifica vista in precedenza si modifica nella seguente.

Accelerazione spettrale
che attiva il meccanismo

$$a_0 = \frac{\alpha_0 \sum_{i=1}^{n+m} P_i}{M^* FC} \quad M^* = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i} \right)^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2}$$



$$a_z = q \frac{\alpha_0 g}{e \cdot FC}$$

Elemento rigido

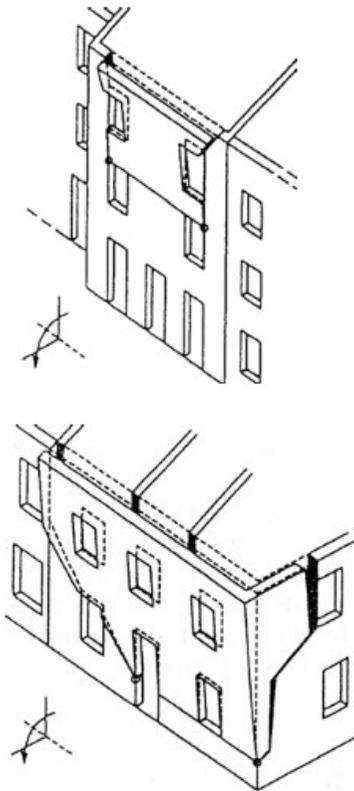
$$S_{ez}(T_0) = q \frac{\alpha_0 g}{e \cdot FC}$$

Elemento libero di
vibrare con periodo T_0

Da a_z e $S_{ez}(T_0)$ si ricava a_g che va verificato con la domanda di accelerazione del sito.

ANALISI CINEMATICA LINEARE

Meccanismo di ribaltamento di parete a un piano



DATI GEOMETRICI

s = spessore della parete
h = altezza della parete
d = distanza dal punto d'applicazione del carico del solaio dal lembo esterno
l_i = luce di influenza del solaio
L = larghezza della parete

CARICHI

γ = peso specifico della muratura
q_{si} = peso del solaio per unità di superficie
W = peso proprio della parete
P = peso solaio calcolato in base all'area d'influenza
λ = coefficiente di collasso

$$\begin{aligned}
 W &= s \cdot \gamma \cdot h \cdot L \\
 P &= q_{si} \cdot l_i \cdot L
 \end{aligned}$$

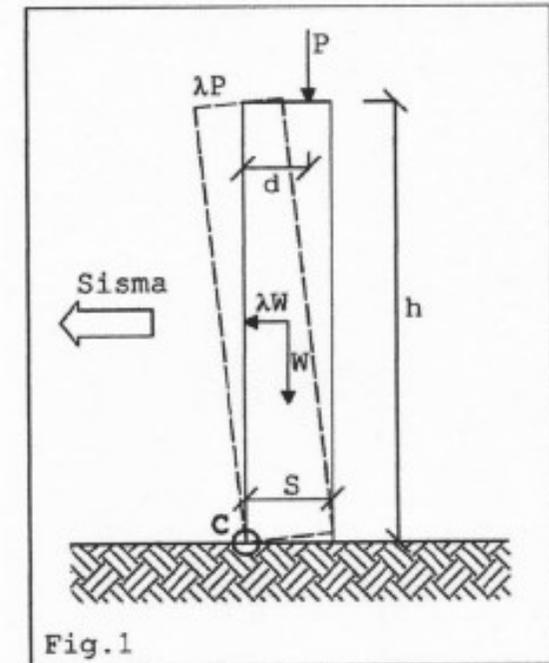
Momento stabilizzante $M_{st} = W \frac{s}{2} + Pd$

Momento ribaltante $M_r = \lambda \left(W \frac{h}{2} + Ph \right)$

Imponendo l'equilibrio si ottiene il moltiplicatore:

$$\lambda = \frac{W \frac{s}{2} + Pd}{W \frac{h}{2} + Ph}$$

$$\lambda = \alpha_0$$



ANALISI CINEMATICA LINEARE

Meccanismo di
ribaltamento di
parete di due piani

DATI GEOMETRICI

$s_{1,2}$ = spessore della parete

$h_{1,2}$ = altezza della parete

$d_{1,2}$ = distanza dal punto d'applicazione del carico del solaio dal lembo esterno

l_i = luce di influenza del solaio

L = larghezza della parete

CARICHI

γ = peso specifico della muratura

q_{si} = peso del solaio per unità di superficie

$W_{1,2}$ = peso proprio della parete

$P_{1,2}$ = peso solaio calcolato in base
all'area d'influenza

λ = coefficiente di collasso

Imponendo l'equilibrio rispetto alla cerniera C posta
alla base del muro si ottiene:

Momento stabilizzante

$$M_s = W_1 \frac{s_1}{2} + W_2 \frac{s_2}{2} + P_1 d_1 + P_2 d_2$$

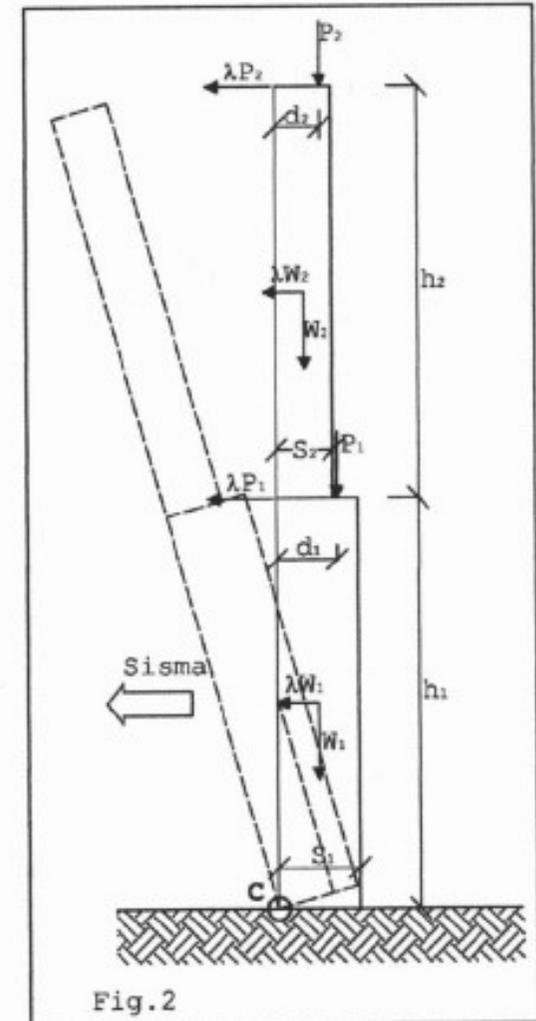
Momento ribaltante

$$M_r = \lambda \left[W_1 \frac{s_1}{2} + W_2 \left(h_1 \frac{h_2}{2} \right) + P_1 h_1 + P_2 (h_1 + h_2) \right]$$

Imponendo l'equilibrio si ottiene il moltiplicatore:

$$\lambda = \frac{W_1 \frac{s_1}{2} + W_2 \frac{s_2}{2} + P_1 d_1 + P_2 d_2}{W_1 \frac{s_1}{2} + W_2 \left(h_1 \frac{h_2}{2} \right) + P_1 h_1 + P_2 (h_1 + h_2)}$$

$$\lambda = \alpha_0$$



ANALISI CINEMATICA LINEARE

Meccanismo di ribalta-mento con cuneo

$$\lambda = \alpha_0$$

DATI GEOMETRICI

- s** = spessore della parete
h = altezza della parete
d = distanza dal punto d'applicazione del carico del solaio dal lembo esterno
l_i = luce di influenza del solaio
L = larghezza della parete

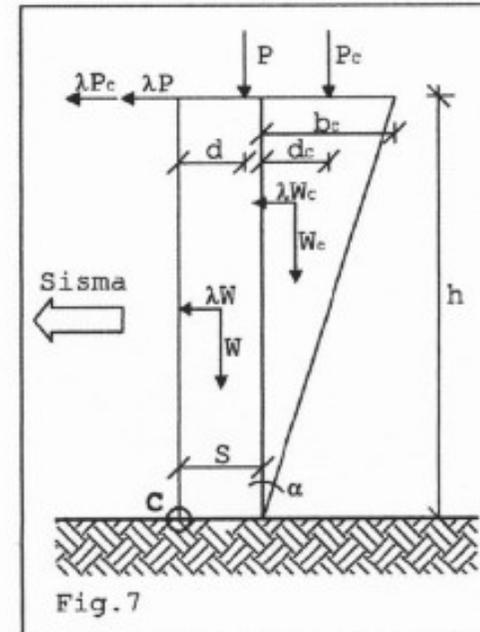
CARICHI

- γ** = peso specifico della muratura
q_{si} = peso del solaio per unità di superficie
W = peso proprio della parete
W_c = peso proprio del cuneo
P_s = peso solaio calcolato in base all'area d'influenza
λ = coefficiente di collasso

$$M_S = W \frac{s}{2} + W_c \left(s + \frac{1}{3} b_c \right) + P_c (s + d_c) + Pd$$

$$M_R = \lambda \left[W \frac{h}{2} + W_c \frac{2}{3} h + (P + P_c) h \right]$$

$$\lambda = \frac{W \frac{s}{2} + W_c \left(s + \frac{1}{3} b_c \right) + P_c (s + d_c) + Pd}{W \frac{h}{2} + W_c \frac{2}{3} h + (P + P_c) h}$$

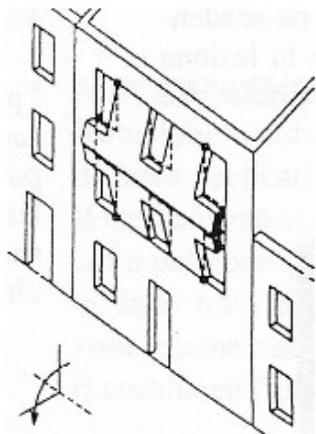


$$\alpha = 15^\circ - 30^\circ$$

ANALISI CINEMATICA LINEARE

$$\lambda = \alpha_0$$

Meccanismo di flessione verticale ad arco



GEOMETRIA

- S** = spessore della parete
- h** = altezza della parete
- h_i** = altezza dei due microelementi
- d_i** = distanza dal punto d'applicazione del carico del solaio al lembo esterno
- l_i** = luce di influenza del solaio
- L** = larghezza della parete
- dX** = spostamento in direzione X
- dY** = spostamento in direzione Y

CARICHI

- γ** = peso specifico della muratura
- q_{si}** = peso del solaio per unità di superficie
- N_i** = carico verticale dei piani superiori (nel caso di parete monopiano N_i = 0)
- N*** = carico verticale dei piani superiori più il peso del solaio (nel caso di parete monopiano N* = P_{si})
- W₁** = peso proprio del macroelemento
- W_α** = peso proprio del cuneo di distacco ($P_α = S_α \cdot \gamma \cdot H_i \cdot L_α / 2$)
- P_c** = peso proprio del cuneo
- P_{si}** = peso solaio calcolato in base all'area d'influenza
- λ** = coefficiente di collasso

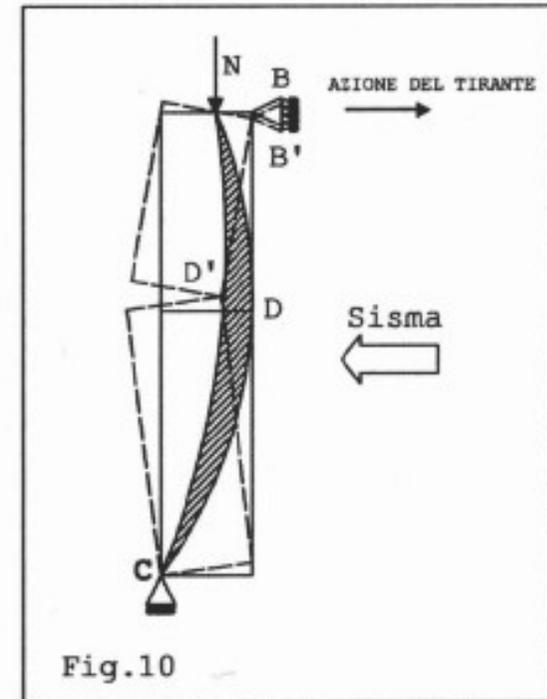


Fig.10

$$W = W_1 + W_2 \quad ; \quad W_1 = \frac{X-1}{X} W \quad ; \quad W_2 = \frac{W}{X}$$

$$W = s \cdot \gamma \cdot h \cdot L \quad ; \quad P_{si} = q_{si} \cdot l_i \cdot L \quad ; \quad ; \quad N^* = P_{si} + N_i$$

ANALISI CINEMATICA LINEARE

$$\lambda = \alpha_0$$

Meccanismo di flessione verticale ad arco

IPOTESI

- la risultante dei carichi verticali N^* è applicata a $S/2$
- la cerniera D si forma nel punto di tangenza della curva di pressione, con lembo esterno;

Si introduce la variabile X tale che

$$h_2 = \frac{h}{X};$$

$$h_1 = \frac{X-1}{X} \cdot h;$$

$$\phi h_1 = \psi \cdot h_2$$

Si impone una rotazione unitaria $\phi = 1$ alla base e si applica il P.L.V. nell'ipotesi di piccoli spostamenti.

$$d_{1x} = \frac{h}{2} \cdot \frac{X-1}{X} = d_{2x}$$

$$d_{1y} = \frac{S}{2}$$

$$d_{2y} = \frac{S}{2} \cdot (X+1) = d_{Ny}$$

P.L.V.

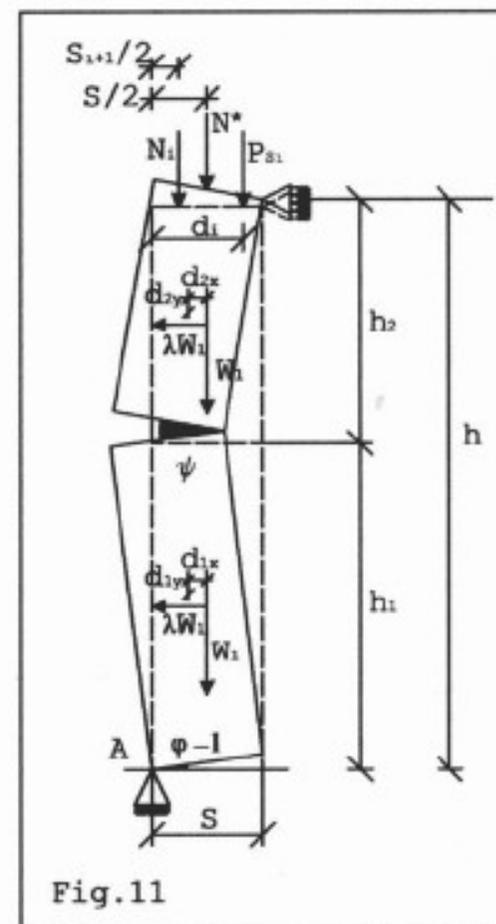
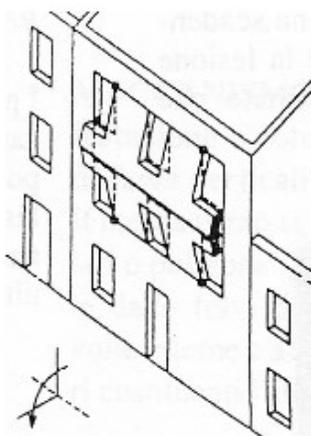


Fig. 11

ANALISI CINEMATICA LINEARE

Meccanismo di flessione verticale ad arco

$$\lambda = \alpha_0$$

$$-W_1 d_{1y} - W_2 d_{2y} - N^* d_{Ny} + \lambda \cdot W_1 d_{1x} + \lambda \cdot W_2 d_{2x} = 0$$

Si ricava $\lambda = \lambda(x)$ e si risolve il minimo della funzione.

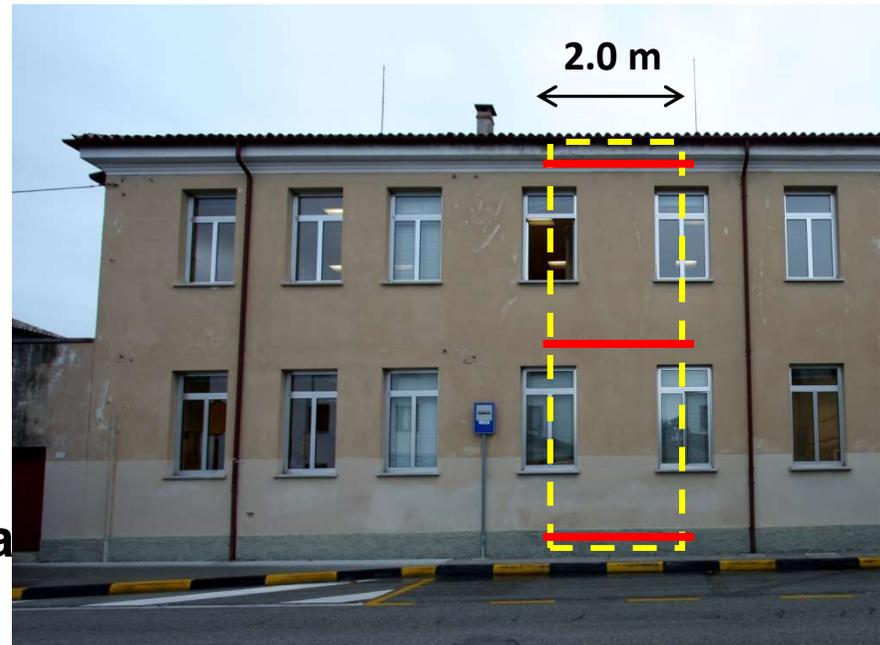
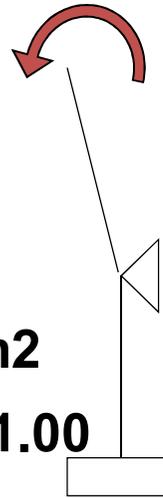
$$h_1 = \frac{h \sqrt{2 \frac{W + N^*}{N^*}}}{1 + \sqrt{2 \frac{W + N^*}{N^*}}} \quad ; \quad \lambda = \frac{S}{h_1} \left[2 + \frac{N^*}{W} \left(\frac{h}{h - h_1} + 1 \right) \right]$$

ESEMPIO DI RIBALTAMENTO

Nel caso di vincolo rigido al solaio di piano primo e copertura deformabile

Dati comuni:

- **Peso muratura: 18 kN/m³**
- **Solaio copertura: 1.85 kN/m²**
- **Sottotetto non praticabile: 1.00**
- **Altezza interpiano: 3.8 m**
- **Spessore pareti: 0.53 m 4 teste (pia
terra)**
- **Spessore pareti: 0.40 m 3 teste (piano
primo)**



Finestre 1.0x2.0 m

**Area di influenza
sottotetto e copertura
3.10x2.00 m**

ESEMPIO DI RIBALTAMENTO

Ipotesi di calcolo:

cerniera di attivazione del meccanismo sullo spigolo esterno della parete a livello del primo piano e carichi del solaio di copertura localizzati ad 1/3 dello spessore della parete.

$$\lambda = \frac{W \cdot \frac{s}{2} + P \cdot d}{W \cdot \frac{h}{2} + P \cdot h}$$

ESEMPIO DI RIBALTAMENTO

Calcolo moltiplicatore di collasso		
Peso muratura 1° piano γ_1	18.0	kN/m ³
Solaio sottotetto non praticabile p1	1.0	kN/m ²
Solaio copertura p2	1.85	kN/m ²
Spessore muro 1° piano	0.4	m
Altezza interpiano	3.8	m
Peso blocco muratura 1° piano W	41.76	kN
Peso dei solai sottotetto e copertura P	17.67	kN
Moltiplicatore critico ribaltamento	0.089	

ESEMPIO DI RIBALTAMENTO

Dati sismici		
PGA di riferimento/g	0.242	
Periodo di riferimento T_C^*	0.329	sec
Fattore di amplificazione F_0	2.437	
Categoria suolo di fondazione	B	
Coeff. di amplificazione topografica S_T	1.00	
Coefficiente C_c	1.374	
Coefficiente di amplif. Stratigrafica S_s	1.164	
Fattore di amplificazione suolo S	1.164	
Altezza totale della struttura	7.6	m
Primo periodo proprio struttura T_1	0.229	sec

ESEMPIO DI RIBALTAMENTO

Calcolo accelerazione sismica spettrale		
Massa partecipante al cinematismo M^*	5.389	kN/g
Totale pesi agenti sul blocco $W+P$	59.43	kN
Fattore di confidenza FC	1.35	
Accelerazione sismica spettrale a_0^*/g	0.074	

ESEMPIO DI RIBALTAMENTO

Massa Partecipante:

$$M^* = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i} \right)^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2}$$

Frazione di massa partecipante:

$$e^* = \frac{M^* \cdot g}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i}$$

Accelerazione spettrale:

$$a_o^* = \frac{\alpha_o \cdot \sum_{i=1}^{n+m} P_i}{M^* \cdot FC} = \frac{\alpha_o \cdot g}{e^* \cdot FC}$$

$$q = 2$$

$$\gamma = \frac{3N}{2N+1}$$

Verifica con le NTC2018:

$$a_o \geq \begin{cases} \frac{a_g \cdot S}{q} \\ \frac{S_e(T_1) \cdot \frac{z}{H} \cdot \gamma}{q} \end{cases}$$

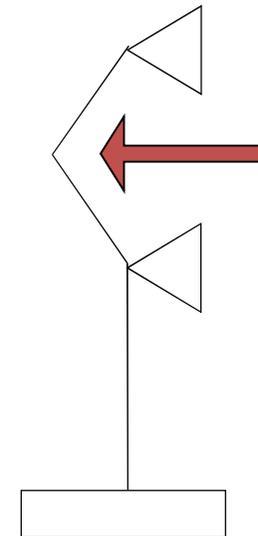
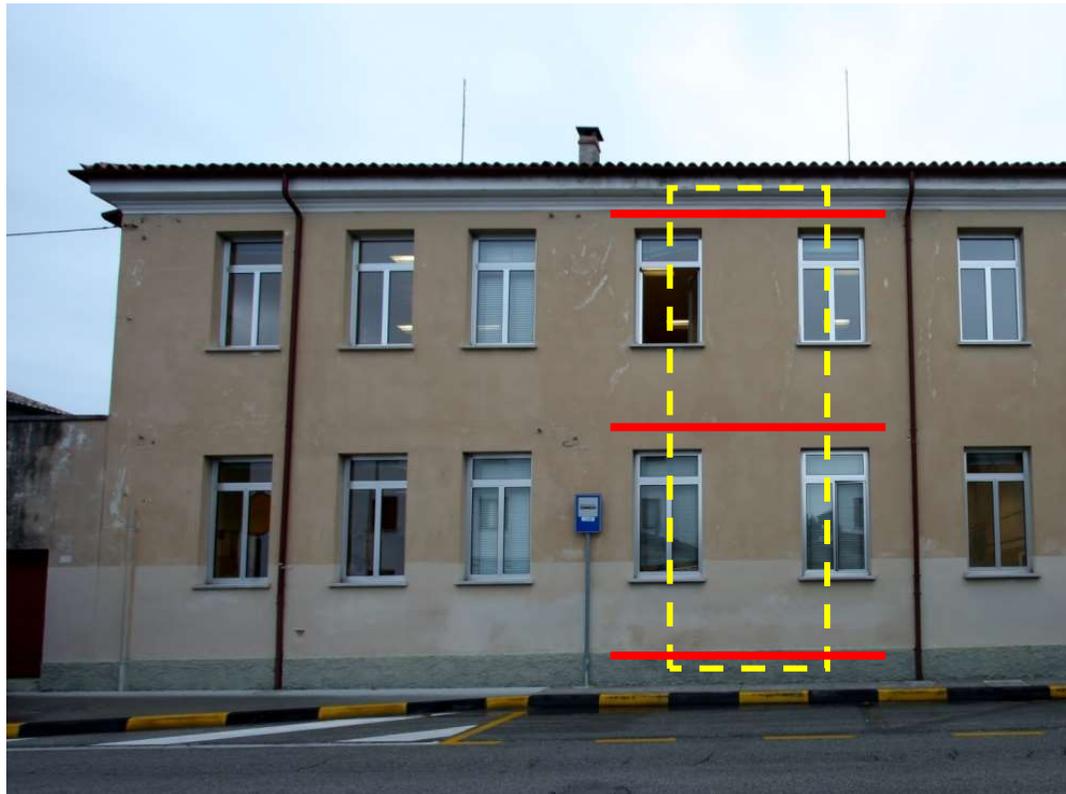
a_g resistente si ottiene esplicitandola dalla relazione

ESEMPIO DI RIBALTAMENTO

Calcolo accelerazione resistente a_{res}/g		
Quota del baricentro linee di vincolo Z	3.8	m
Primo modo di vibrare $\psi(Z)$	0.5	
Numero di piani	2	
Coefficiente di partecipazione modale γ	1.2	
Fattore di struttura q	2	
Accelerazione (C8A.4.9)	0.128	
Accelerazione (C8A.4.10)	0.087	
Accelerazione min(C8A.4.9, C8A.4.10)	0.087	
$a_{res}/g > PGA/g$	NO	

ESEMPIO DI FLESSIONE VERTICALE

Nel caso di vincolo rigido al solaio di piano primo e alla copertura per presenza di solaio rigido e ben collegato alla muratura



ESEMPIO DI FLESSIONE VERTICALE

Peso muratura: 18 kN/m³

Sottotetto non praticabile: 1.0 kN/m² (area di influenza 3.1x2.0 m)

Copertura in legno: 1.85 kN/m² (area di influenza 3.1x2.0 m)

Altezza interpiano: 3.8 m

Spessore pareti: 0.53 m 4 teste (piano terra)

Spessore pareti: 0.40 m 3 teste (piano primo)

ESEMPIO DI FLESSIONE VERTICALE

Ipotesi di calcolo:

cerniera di attivazione del meccanismo sullo spigolo esterno della parete a livello del primo piano e carichi del solaio di copertura localizzati ad 1/3 dello spessore della parete.

La posizione della cerniera intermedia viene ricavata cercando il minimo moltiplicatore dei carichi.

$$h_1 = \frac{h \sqrt{2 \frac{W + N^*}{N^*}}}{1 + \sqrt{2 \frac{W + N^*}{N^*}}} \quad ; \quad \lambda = \frac{S}{h_1} \left[2 + \frac{N^*}{W} \left(\frac{h}{h - h_1} + 1 \right) \right]$$

ESEMPIO DI FLESSIONE VERTICALE

Calcolo moltiplicatore di collasso		
Peso muratura 1° piano γ_1	18.0	kN/m ³
Solaio sottotetto non praticabile p1	1.0	kN/m ²
Solaio copertura p2	1.85	kN/m ²
Spessore muro 1° piano	0.4	m
Altezza interpiano	3.8	m
Peso blocco muratura 1° piano W	41.76	kN
Peso dei solai sottotetto e copertura P	17.67	kN
Altezza cerniera intermedia h1	2.74	m
Moltiplicatore critico ribaltamento	0.575	

ESEMPIO DI FLESSIONE VERTICALE

Dati sismici		
PGA di riferimento/g	0.242	
Periodo di riferimento T_C^*	0.329	sec
Fattore di amplificazione F_0	2.437	
Categoria suolo di fondazione	B	
Coeff. di amplificazione topografica S_T	1.00	
Coefficiente C_c	1.374	
Coefficiente di amplif. Stratigrafica S_s	1.164	
Fattore di amplificazione suolo S	1.164	
Altezza totale della struttura	7.6	m
Primo periodo proprio struttura T_1	0.229	sec

ESEMPIO DI FLESSIONE VERTICALE

Calcolo accelerazione sismica spettrale		
Massa partecipante al cinematismo M^*	5.389	kN/g
Totale pesi agenti sul blocco $W+P$	59.43	kN
Fattore di confidenza FC	1.35	
Accelerazione sismica spettrale a_o^*/g	0.479	

RELAZIONI

Massa Partecipante:

$$M^* = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i} \right)^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2}$$

Frazione di massa partecipante:

$$e^* = \frac{M^* \cdot g}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i}$$

Accelerazione spettrale:

$$a_o^* = \frac{\alpha_o \cdot \sum_{i=1}^{n+m} P_i}{M^* \cdot FC} = \frac{\alpha_o \cdot g}{e^* \cdot FC}$$

$$q = 2$$

$$\gamma = \frac{3N}{2N+1}$$

Verifica con le NTC2018:

$$a_o \geq \begin{cases} \frac{a_g \cdot S}{q} \\ \frac{S_e(T_1) \cdot \frac{z}{H} \cdot \gamma}{q} \end{cases}$$


a_g resistente si ottiene esplicitandola dalla relazione

ESEMPIO DI FLESSIONE VERTICALE

Calcolo accelerazione resistente a_{res}/g		
Quota del baricentro linee di vincolo Z	5.7	m
Primo modo di vibrare $\psi(Z)$	0.75	
Numero di piani	2	
Coefficiente di partecipazione modale γ	1.2	
Fattore di struttura q	2	
Accelerazione (C8A.4.9)	0.823	
Accelerazione (C8A.4.10)	0.375	
Accelerazione min(C8A.4.9, C8A.4.10)	0.375	
$a_{res}/g > PGA/g$	SI	