

APPENDICE A

RIFERIMENTI NORMATIVI

NTC 2018

La normativa italiana affronta il tema della progettazione della resistenza flessionale dei nodi trave-pilastro al punto 7.4.4.2.1:

“Ai fini della progettazione in capacità, per ciascuna direzione e ciascun verso di applicazione delle azioni sismiche, per ogni nodo trave-pilastro (ad eccezione dei nodi in corrispondenza della sommità dei pilastri dell’ultimo orizzontamento), la capacità a flessione complessiva dei pilastri deve essere maggiore della capacità a flessione complessiva delle travi amplificata del coefficiente γ_{Rd} , in accordo con la formula:

$$\sum M_{c,Rd} \geq \gamma_{Rd} \cdot \sum M_{b,Rd}$$

dove:

$\gamma_{Rd} = 1.3$;

$M_{c,Rd}$ è la capacità a flessione del pilastro convergente nel nodo, calcolata per i livelli di sollecitazione assiale presenti nelle combinazioni sismiche delle azioni;

$M_{b,Rd}$ è la capacità a flessione della trave convergente nel nodo.

Nella precedente equazione si assume il nodo in equilibrio ed i momenti, sia nei pilastri che nelle travi, tra loro concordi (le fibre tese alle due facce del nodo sono opposte). Nel caso in cui i momenti nel pilastro al di sopra ed al di sotto del nodo siano tra loro discordi, al primo membro dell’equazione va posto il momento maggiore in valore assoluto, mentre il minore va sommato ai momenti resistenti delle travi (si veda la Figura 1).

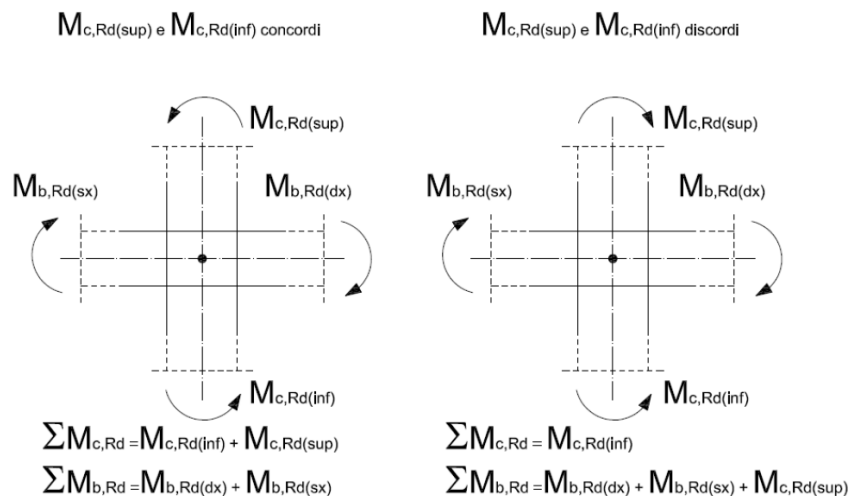


Figura 1: progettazione in capacità dei pilastri secondo NTC 2018

Il confronto capacità-domanda a pressoflessione può essere condotto in maniera semplificata eseguendo, per ciascuna direzione di applicazione del sisma, una verifica a pressoflessione retta con la capacità a flessione del pilastro ridotta del 30%.

In alternativa alla precedente equazione, basata sul confronto delle resistenze, la circolare applicativa della norma al punto C7.4.4.2.1 propone un possibile approccio alternativo basato sull'amplificazione delle sollecitazioni agenti sui pilastri attraverso un coefficiente moltiplicativo α calcolato come:

$$\alpha = \frac{\gamma_{Rd} \cdot \sum M_{b,Rd}}{\sum M_{c,Ed}}$$

in cui $M_{c,Ed}$ rappresenta il momento sollecitante del generico pilastro convergente nel nodo. Tale relazione si basa sull'ipotesi che il rapporto fra i momenti sollecitanti dei pilastri al di sopra ed al di sotto del nodo si mantenga invariato a seguito della formazione dei momenti plastici sulle travi.

La procedura di amplificazione deve essere condotta separatamente per entrambe le direzioni di applicazione del sisma utilizzando di volta in volta come momenti "deviati", da applicare nella direzione ortogonale a quella considerata, i momenti di analisi moltiplicati per il medesimo fattore α corrispondente alla direzione in esame.

Ad ogni modo, come esplicitamente riportato dalla stessa norma, lo scopo principale di entrambi gli approcci proposti non è tanto quello di escludere completamente la formazione di locali danneggiamenti in alcuni pilastri, quanto quello di scongiurare la formazione di un meccanismo di piano debole, derivante dalla contemporanea plasticizzazione di entrambe le estremità di tutte le colonne di un dato livello.

Per tale motivo la normativa impone comunque l'adozione di specifici dettagli costruttivi alle estremità di tutte le colonne primarie e secondarie di ogni livello, volti a garantire adeguata duttilità alle possibili cerniere che potranno localmente formarsi (si veda il punto 7.4.6.2.2).

EC8

La normativa europea presenta un approccio simile, anche se non del tutto identico, a quello della norma italiana. Le indicazioni relative alla progettazione della resistenza flessionale dei nodi trave-pilastro sono riportate ai paragrafi 4.4.2.3(4), 4.4.2.3(5) e 5.2.3.3(2).

"In tutti i nodi fra pilastri primari e travi primarie o secondarie di strutture a telaio con due o più piani dovrà essere rispettata la seguente relazione:

$$\sum M_{Rc} \geq 1.3 \cdot \sum M_{Rb}$$

in cui

$\sum M_{Rc}$ *è la somma delle resistenze flessionali di progetto delle colonne del nodo. Ai fini del calcolo dovrà essere considerata la resistenza minima corrispondente ai diversi sforzi normali agenti in combinazione sismica.*

$\sum M_{Rb}$ *è la somma delle resistenze flessionali di progetto delle travi incidenti nel nodo.*

La precedente espressione dovrà essere soddisfatta lungo i due piani di flessione ortogonali individuati dall'orientamento spaziale delle travi incidenti. Essa dovrà inoltre essere valida per entrambe le direzioni (positiva e negativa) dell'azione sismica considerando i momenti sui pilastri sempre in opposizione a quelli delle travi."

L'Eurocodice, a differenza di quanto visto per le NTC 2018, non propone alcuna regola per la ripartizione delle resistenze fra il pilastro superiore e inferiore, ma specifica semplicemente che i momenti sui pilastri debbano essere sempre considerati in opposizione rispetto a quelli delle travi. Non sono inoltre previste particolari indicazioni per l'applicazione della relazione lungo le due direzioni principali che può quindi avvenire in modo indipendente.

In analogia alla norma italiana, anche l'Eurocodice impone delle precise regole di dettaglio da applicare alle estremità di tutte le colonne dei diversi piani dell'edificio atte ad assicurare adeguata duttilità alle cerniere che potranno localmente formarsi in tali zone (si vedano i punti 5.4.3.2.2 e 5.5.3.2.2).

ACI 318-19

Le indicazioni contenute nella norma americana, relativamente alla progettazione della resistenza flessionale dei nodi trave-pilastro, sono molto simili a quelle fornite dalla norma europea. I paragrafi di riferimento sono il 18.7.3 ed il R18.7.3.

"Le colonne di strutture a telaio, ad eccezione delle colonne che si interrompono al dato livello e di quelle soggette ad uno sforzo normale in condizioni sismiche inferiore a $0.1 \cdot A_g \cdot f'_c$, devono soddisfare ad ogni livello la relazione:

$$\sum M_{nc} \geq 1.2 \cdot \sum M_{nb}$$

in cui

$\sum M_{nc}$ *è la somma delle resistenze flessionali nominali delle colonne del nodo, valutate in corrispondenza delle facce del nodo. Tali resistenze dovranno essere calcolate con riferimento allo sforzo normale, concorde alla direzione di applicazione del sisma, che produce la minor resistenza complessiva.*

$\sum M_{nb}$ *è la somma delle resistenze flessionali nominali delle travi incidenti nel nodo, valutate in corrispondenza delle facce del nodo.*

Le resistenze vanno sommate in modo che i momenti delle colonne siano sempre in opposizione e quelli delle travi. La precedente relazione dovrà essere soddisfatta per entrambe le direzioni definite dalle travi incidenti nel nodo.

Se tale relazione non dovesse essere rispettata in corrispondenza di un determinato nodo, la rigidità e la resistenza delle colonne corrispondenti dovranno essere trascurate durante l'analisi globale della struttura e le colonne dovranno essere conformi a quanto prescritto al 18.14 (elementi sismicamente secondari)."

Anche in questo caso la relazione proposta non è sufficiente a scongiurare la formazione di danni localizzati lungo i pilastri in elevazione e per tale ragione la normativa impone l'applicazione di precise regole di dettaglio da applicare alle estremità di tutte le colonne dei diversi livelli (si veda il punto 18.7.5).

NZS 3101

La normativa Neozelandese dedica particolare enfasi al problema della progettazione della resistenza flessionale dei nodi trave pilastro e propone due possibili approcci alternativi, definiti all'interno dell'appendice D3:

- metodo A, volto a garantire un elevato livello di protezione nei confronti della formazione di cerniere plastiche lungo tutte le colonne, ad eccezione della sezione di base delle colonne del primo livello. Vista l'elevato grado di protezione offerto, tale metodo non prevede particolari dettagli costruttivi da applicare alle estremità delle colonne a partire dal secondo livello della struttura.
- Metodo B, volto a garantire un adeguato livello di protezione contro la formazione di un meccanismo di piano soffice. Poiché tale approccio non è in grado di escludere la formazione di danneggiamenti localizzati esso è accompagnato da precise disposizioni sui dettagli costruttivi da garantire alle estremità delle colonne di ogni livello.

Il metodo A, descritto al punto D3.2, presenta diverse affinità con la procedura proposta al C7.4.4.2.2 della norma italiana. Essa prevede infatti che i momenti agenti sulle colonne siano calcolati a partire da quelli corrispondenti al modo di vibrare dominante o attraverso un'analisi statica equivalente amplificati per il coefficiente:

$$\phi_o = \frac{\sum M_{ob}}{\sum M_{Eb}}$$

in cui

$\sum M_{ob}$ è la somma dei momenti resistenti delle travi incidenti nel nodo.

$\sum M_{Eb}$ è la somma dei momenti agenti nelle travi incidenti nel nodo corrispondenti al modo di vibrare dominante o calcolati attraverso analisi statica equivalente.

I momenti così calcolati dovranno inoltre essere ulteriormente moltiplicati per un coefficiente di amplificazione dinamica, $1.3 \leq \omega \leq 1.8$, che dipende dalle caratteristiche dinamiche della struttura e per un coefficiente riduttivo $\beta \leq 1$. Il prodotto complessivo $\omega \cdot \beta$ ha un'espressione variabile ad ogni livello ma dovrà comunque risultare, per ogni nodo, maggiore o uguale a 1.3.

Per quanto riguarda l'applicazione di tali regole al caso di nodo spaziale, la normativa prevede che i momenti resistenti sulle travi possano essere raggiunti simultaneamente lungo le due direzioni principali, ma che i coefficienti moltiplicativi ω e β siano considerati, alternativamente, solo per una direzione alla volta quando l'angolo di incidenza fra i due ordini di travi sia superiore a 45°.

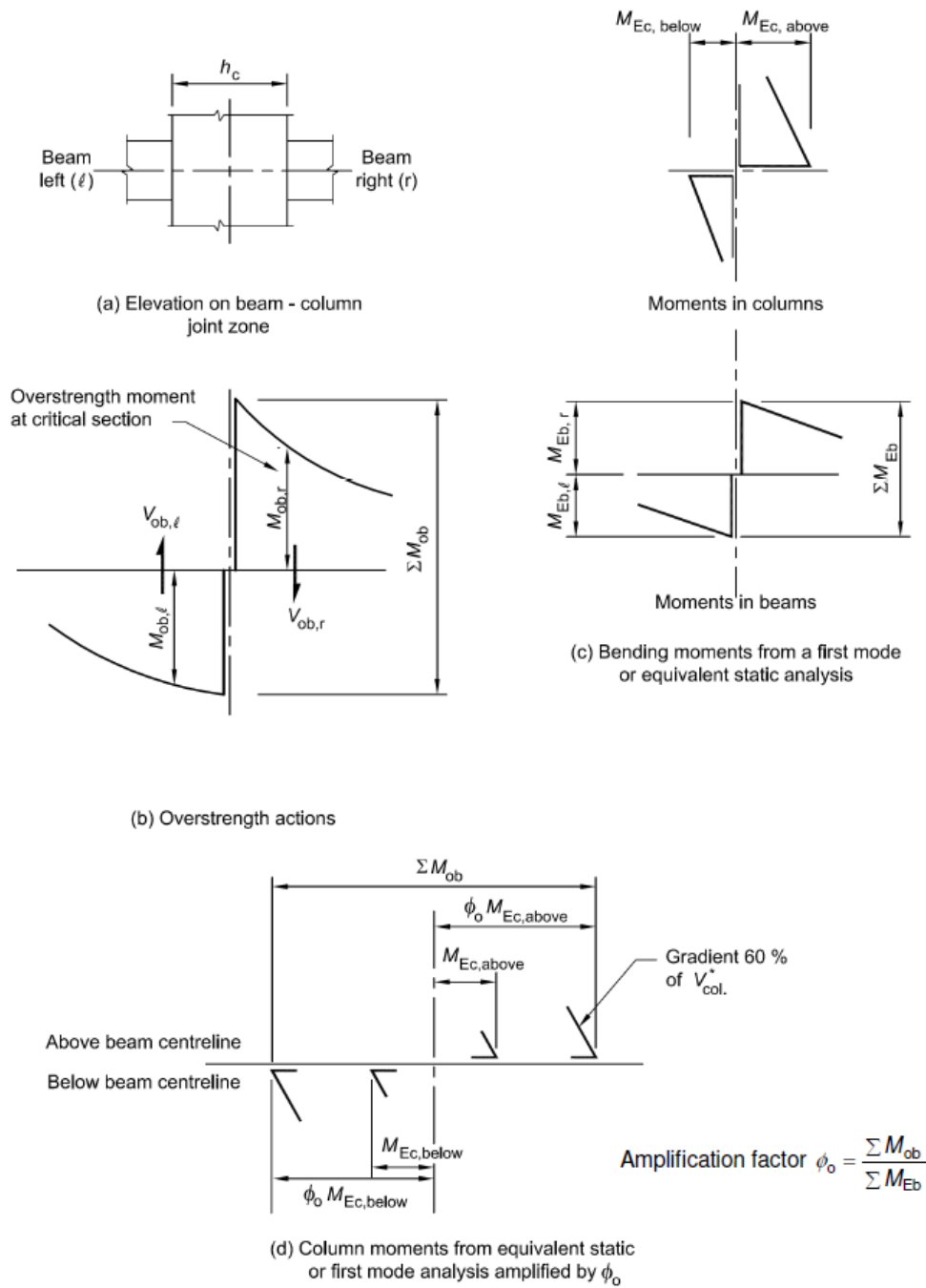


Figura 2: amplificazione dei momenti sui pilastri secondo il metodo A della norma NZS 3101

Il metodo B, descritto al punto D3.3, offre maggiore libertà di redistribuzione delle azioni sismiche sui diversi pilastri di un dato livello sulla base di semplici considerazioni di equilibrio. La procedura è sinteticamente definita dai seguenti passi:

- determinazione, per ogni piano, dei punti di flesso dei vari pilastri sulla base della deformata corrispondente al modo di vibrare principale o derivante da un'analisi statica equivalente. Se tali punti risultano sempre contenuti all'interno del piano corrispondente, il punto di flesso può arbitrariamente essere fissato dal progettista in una generica posizione all'interno dell'interpiano (tipicamente a metà di esso). In caso contrario, occorrerà calcolare la potenziale richiesta di rotazione plastica che la colonna dovrà subire a seguito di una possibile plasticizzazione.
- Calcolo dei momenti resistenti che si sviluppano alle estremità di ogni trave di un dato livello.
- Scalatura delle forze sismiche di piano, $E_{E,i}$, corrispondenti al modo dominante o derivanti da un'analisi statica equivalente mediante il fattore

$$\phi_{o,i} = \frac{\sum M_{ob,i}}{\sum M_{Eb,i}}$$

in cui

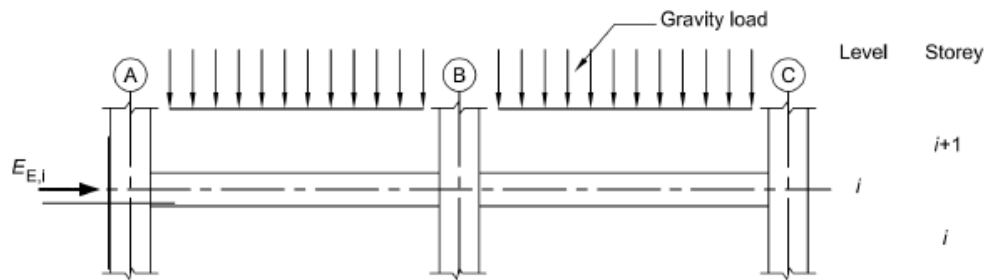
$\sum M_{ob,i}$ è la somma dei momenti resistenti di estremità di tutte le travi del piano i-esimo.
 $\sum M_{Eb,i}$ è la somma dei momenti di estremità di tutte le travi del piano i-esimo corrispondenti al modo dominante o calcolate mediante analisi statica equivalente.

- Distribuzione delle forze di piano risultanti, $E_{o,i} = \phi_{o,i} \cdot E_{E,i}$, fra i vari pilastri del dato livello.
- Calcolo dei tagli di equilibrio agenti sul pilastro superiore e inferiore di ogni nodo soggetto alla sola azione della forza esterna ad esso competente (Figura 3 (d)).
- Calcolo dei tagli di equilibrio agenti sul pilastro superiore e inferiore di ogni nodo soggetto alla sola azione dei momenti resistenti delle travi (Figura 4 (e)).
- Somma dei tagli risultanti e amplificazione degli stessi per il coefficiente $\omega \cdot \beta$.
- Determinazione dei momenti flettenti agenti sulla faccia superiore e inferiore di ogni nodo mediante moltiplicazione dei tagli sui pilastri per il braccio corrispondente.

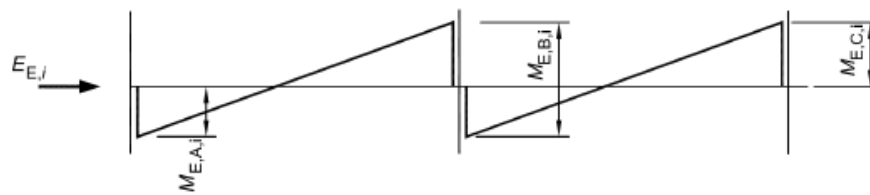
Poiché tale procedura prevede il calcolo di due diversi valori di taglio per ogni pilastro (uno derivante dall'equilibrio del piano superiore e l'altro di quello del piano inferiore) si assumerà per ogni elemento il taglio più critico.

I passaggi sopra riportati sono sintetizzati graficamente in Figura 3 ed in Figura 4.

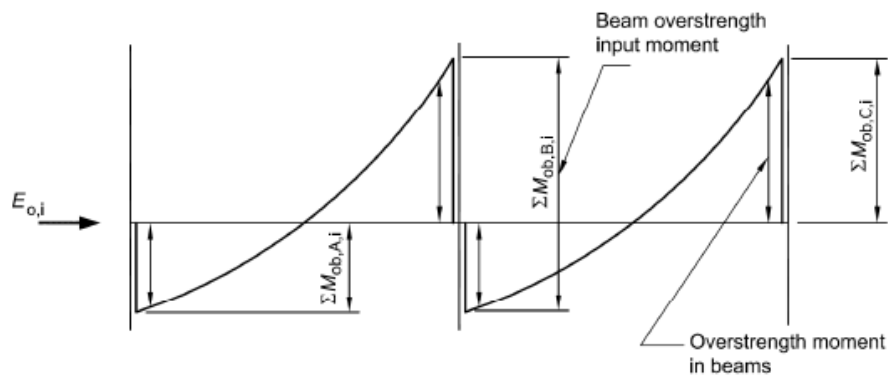
Anche in tal caso, per quanto riguarda l'applicazione di tali regole al caso di nodo spaziale, la normativa prevede che i momenti resistenti sulle travi possano essere raggiunti simultaneamente lungo le due direzioni principali, ma che i coefficienti moltiplicativi ω e β siano considerati, alternativamente, solo per una direzione alla volta quando l'angolo di incidenza fra i due ordini di travi sia superiore a 45°.



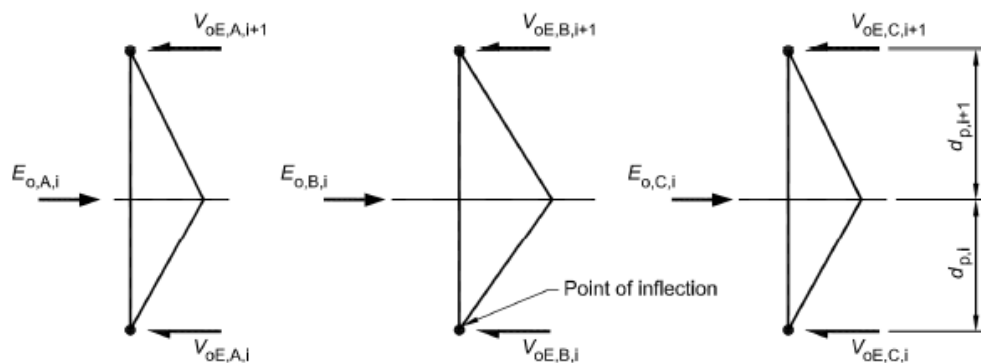
(a) Elevation level i in frame



(b) Beam moments level i due to earthquake actions

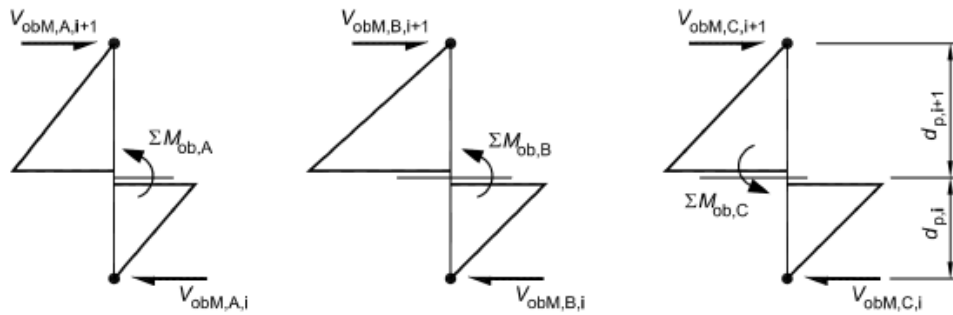


(c) Beam overstrength actions

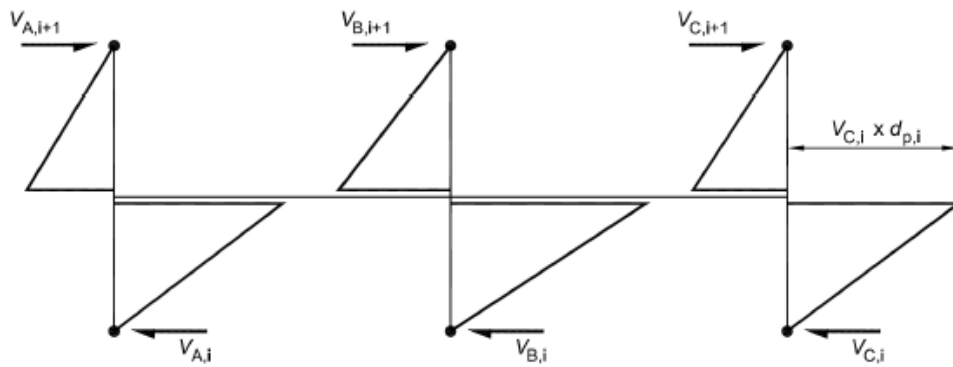


(d) Column shears and moments due to lateral force at level

Figura 3: calcolo delle azioni sui pilastri secondo il metodo B della norma NZS 3101



(e) Column shears due to beam overstrength input moments



$$V_{A,i} = \beta \omega [V_{oE,A,i} + V_{obM,A,i}]$$

(f) Resultant column moments and shears found by adding values in (d) and (e) and multiplying by dynamic magnification factor and modification factors $\omega\beta$

Figura 4: calcolo delle azioni sui pilastri secondo il metodo B della norma NZS 3101