



IL FATTORE DI STRUTTURA PER LE COSTRUZIONI IN ACCIAIO

Domenico Leone

fare sismica
 **APPUNTI**

IL FATTORE DI STRUTTURA PER LE COSTRUZIONI IN ACCIAIO

Domenico Leone

Il prof. Domenico Leone vanta un'esperienza più che trentennale nel campo della progettazione e realizzazione di strutture metalliche sia in campo industriale che infrastrutturale e civile ed è titolare del laboratorio di "Costruzione dell'Architettura" presso la facoltà di Architettura di Genova in qualità di professore a contratto.

E' consulente di azienda avendo occupato in precedenza il ruolo di Responsabile del settore di progettazione di opere in carpenteria metallica prima presso la Società Italimpianti S.p.A. e successivamente presso le Società SMSDemag e Paul-Wurth S.p.A.

Ha partecipato alla progettazione di grandi impianti industriali di produzione e trasformazione dell'acciaio e ne ha seguito la realizzazione con le imprese costruttrici e di montaggio acquisendo ampia esperienza in tutti i settori del ciclo di esecuzione delle opere metalliche.

Per il suo impegno in campo internazionale vanta ampia conoscenza delle norme di settore utilizzate in varie nazioni con particolare riguardo agli Eurocodici.

Ha esercitato ed esercita tuttora attività formativa in ambito Aziendale, Universitario, Pubblico, Privato e dell'Ordine Professionale.

È autore del libro "Eurocodice 3" edito da Sistemi Editoriali nonché di numerosi programmi di calcolo automatico dedicati sia alla progettazione di strutture in acciaio di impianti industriali che alla progettazione di componenti strutturali e di dettaglio proprie degli edifici civili e delle infrastrutture (pacchetto SAITU edito da STA DATA S.r.l.) in base agli Eurocodici ed alle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni.

La presente pubblicazione è tutelata dalla legge sul diritto d'autore e non può essere divulgata senza il permesso scritto dell'autore.

S.T.A. DATA srl
Corso Raffaello, 12 - 10126 Torino
tel. 011 6699345 www.stadata.com

Indice

Parte I	IL FATTORE DI STRUTTURA PER LE COSTRUZIONI IN ACCIAIO	4
----------------	--	----------

1 IL FATTORE DI STRUTTURA PER LE COSTRUZIONI IN ACCIAIO

1 – generalità

Questo articolo vuole essere un completamento a quanto già dettagliatamente esposto dall'Ing. Castagnone relativamente alla definizione del fattore di struttura per opere in C.A. spostando l'obiettivo sul tema delle costruzioni in acciaio dove la varietà degli schemi statici che garantiscono la stabilità globale va ben oltre il comportamento a telaio (struttura a nodi rigidi) comprendendo sistemi di controventamento di varia forma che possono interagire tra loro nelle due direzioni orizzontali dell'azione sismica.

Si possono avere strutture con telai a nodi rigidi nella direzione x del piano orizzontale e telai controventati nella direzione y. Inoltre i sistemi di controvento possono essere con elementi convergenti nei nodi a sole diagonali tese attive (sistemi a X) oppure a diagonali tese e compresse contemporaneamente reagenti o ancora a elementi non convergenti che generano link dissipativi.

Per costruzioni complesse possono coesistere più schemi statici diversi tra loro con diverso comportamento dissipativo. Di seguito si riportano alcuni esempi di strutture reali che sono state esaminate in condizioni sismiche per le quali il fattore di struttura è sicuramente diverso nelle due direzioni orizzontali e come tale va considerato nella valutazione degli effetti e quindi delle verifiche strutturali. (*"The value of the behaviour factor q may be different in different horizontal directions of the structure, although the ductility classification shall be the same in all directions."* EN 1998-1 & 3.2.2.5 3(P))

Quanto esposto nell'articolo dell'Ing. Castagnone relativamente alla definizione generale del fattore di struttura q ovvero l'effetto dissipativo della struttura che riduce lo spettro di accelerazione elastica del suolo, vale anche per le strutture in acciaio. Si vuole qui puntare l'attenzione sulla scelta più corretta del fattore q che deve essere mirata alla "composizione statica" di quegli elementi strutturali chiamati a dissipare l'energia sismica e che non sono sempre gli elementi "trave e colonna".

L'Eurocodice 8 (EN 1998-1) dà la seguente definizione del fattore di struttura q (behaviour factor) :
"q è una approssimazione del rapporto delle forze sismiche che la struttura potrebbe assorbire se la sua risposta fosse completamente elastica col 5% di smorzamento viscoso e le forze sismiche che possono essere usate nel progetto con un modello di analisi elastica convenzionale che assicuri ancora una soddisfacente risposta della struttura".

L'item 4.2.1 della norma EN1998-1 sembra appellarsi alla sensibilità dei progettisti che, per opere in zona sismica, dovrebbero attenersi ai seguenti "consigli" :

Le linee guida che governano la concezione di una struttura sono :

- *Semplicità strutturale*
- *Uniformità, simmetria e ridondanza*
- *Resistenza e rigidezza bi-direzionale*
- *Resistenza e rigidezza torsionale*
- *Comportamento a diaframma dei piani intermedi*
- *Fondazioni adeguate*

Si lascia al lettore l'approfondimento di questi concetti sotto l'item segnalato mentre vanno dette alcune cose sulla regolarità della costruzione sia in pianta che in elevazione.

Dal punto di vista sismico le costruzioni si dividono in due categorie : "regolari" e "non regolari". La distinzione ha implicazioni sui seguenti aspetti del progetto sismico ;

- Il modello strutturale può essere un modello piano semplificato o un modello spaziale
- Il metodo di analisi può essere o con spettro di risposta semplificato (metodo delle forze laterali) o modale
- **Il valore del fattore di struttura q può essere ridotto per strutture non regolari in elevazione.**

La seguente tabella dell'EC8 definisce le conseguenze della regolarità strutturale :

Table 4.1: Consequences of structural regularity on seismic analysis and design

Regularity		Allowed Simplification		Behaviour factor
Plan	Elevation	Model	Linear-elastic Analysis	(for linear analysis)
Yes	Yes	Planar	Lateral force ^a	Reference value
Yes	No	Planar	Modal	Decreased value
No	Yes	Spatial ^b	Lateral force ^a	Reference value
No	No	Spatial	Modal	Decreased value

^a If the condition of 4.3.3.2.1(2)a) is also met.

^b Under the specific conditions given in 4.3.3.1(8) a separate planar model may be used in each horizontal direction, in accordance with 4.3.3.1(8).

Il concetto di regolarità è esposto dettagliatamente nei punti 4.2.3.2 e 4-2-3-3 della EN 1998-1. In generale, la non regolarità in elevazione della costruzione richiede una riduzione del fattore di struttura q **moltiplicando per 0,8** il valore di riferimento dato dalla norma e descritto più avanti.

Per la regolarità in pianta si deve fare riferimento al punto 4.2.3.2 della EN1998-1 in cui sono riportate regole per la definizione del “centro delle rigidzze” e “suggerimenti” che è bene tenere in considerazione” nella progettazione sismica.

Per quanto riguarda la posizione del “centro delle masse” si deve fare riferimento al punto 4.3.2 della EN 1998-1 dove viene definita l'eccentricità accidentale “ e_{ai} ” delle masse di ciascun livello “i” della costruzione in cui agiscono le forze sismiche nella stessa direzione.

$$e_{ai} = \pm 0,05 \cdot L_i$$

L_i = dimensione del livelli “i” perpendicolare alla direzione dell'azione sismica

L'eccentricità delle masse produce forze amplificate sui controventi o “centri di rigidzza” laterali che possono essere definite moltiplicando gli effetti delle azioni per il fattore δ dato da :

$$\delta = 1 + 0,6 \cdot \frac{x}{L_e}$$

- x è la distanza del centro di rigidzza (controvento) dal centro delle masse in pianta ed è misurata perpendicolarmente alla direzione dell'azione sismica.
- L_e è la distanza tra i due più lontani centri di rigidzza (elementi resistenti alle forze laterali o controventi) misurata perpendicolarmente alla direzione dell'azione sismica.

Nel caso in cui l'analisi sia eseguita usando due modelli piani, uno per ciascuna direzione orizzontale, gli effetti torsionali possono essere determinati **raddoppiando l'eccentricità**

orizzontale e_{ai} e sostituendo nell'espressione di δ il coefficiente 0,6 con 1,2.

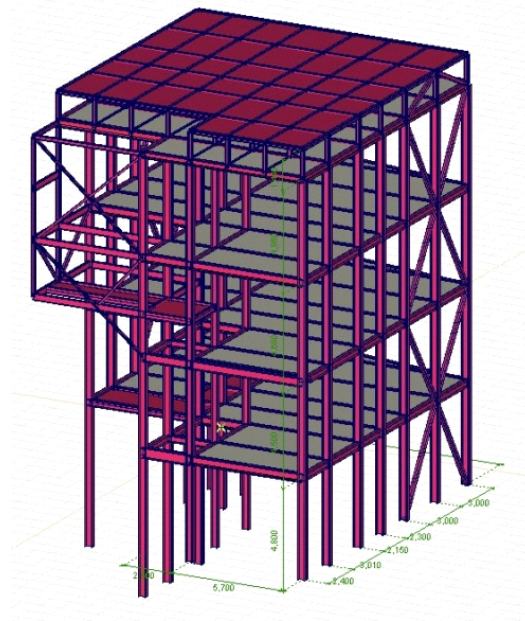
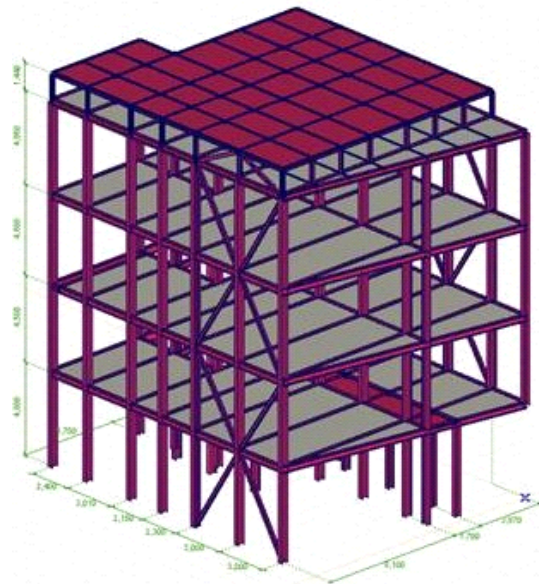
2 – elementi “non strutturali” (non-structural elements)

Per elementi che non concorrono alla formazione dello schema statico della costruzione ma sono ad essa complementari quali, parapetti, insegne, camini, serbatoi posati sopra il centro delle masse ecc la norma stabilisce un valore fisso del fattore di struttura in base alla seguente tabella :

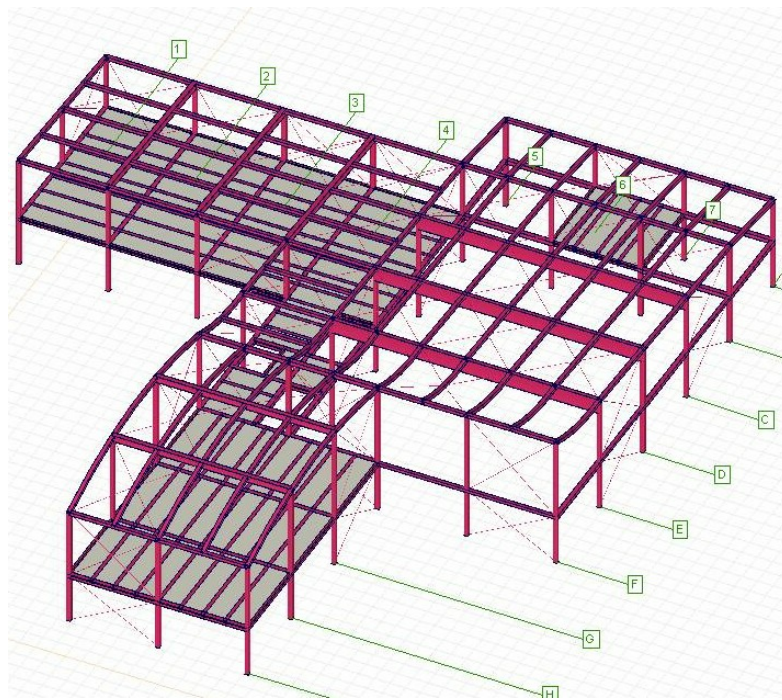
Table 4.4: Values of q_a for non-structural elements

Type of non-structural element	q_a
Cantilevering parapets or ornamentations Signs and billboards Chimneys, masts and tanks on legs acting as unbraced cantilevers along more than one half of their total height	1,0
Exterior and interior walls Partitions and facades Chimneys, masts and tanks on legs acting as unbraced cantilevers along less than one half of their total height, or braced or guyed to the structure at or above their centre of mass Anchorage elements for permanent cabinets and book stacks supported by the floor Anchorage elements for false (suspended) ceilings and light fixtures	2,0

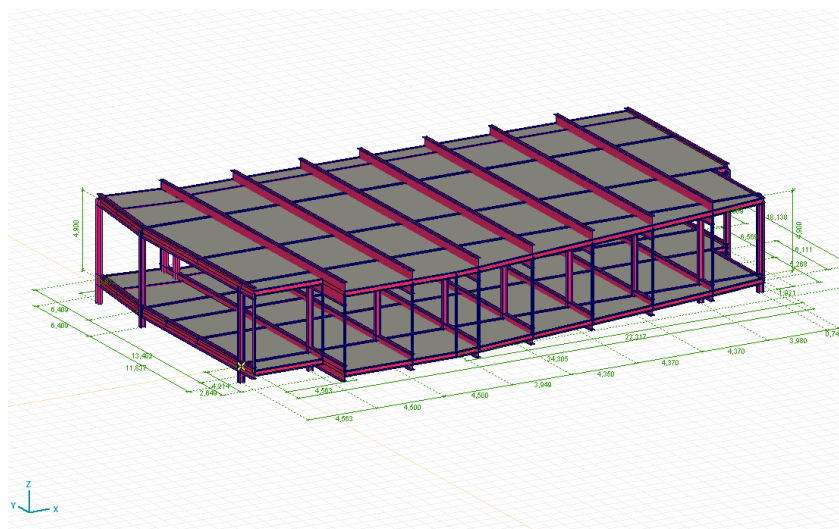
(fig. 3)

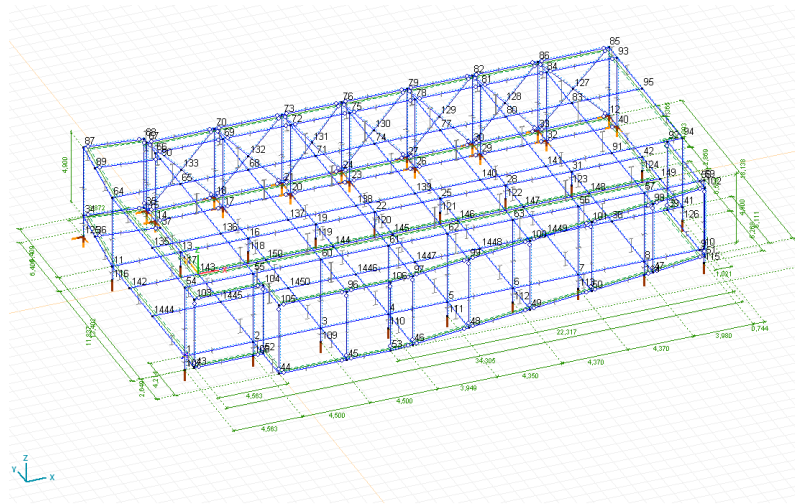


Struttura irregolare in pianta e in elevazione la cui stabilità globale è affidata interamente a sistemi di controvento a X disposti tra le colonne lungo il perimetro. (fig. 4)



Costruzione particolare con centro delle rigidità posizionato lungo **un solo lato** e costituito da controventi a X tra le colonne esterne collegate a portali con le corrispondenti colonne interne ravvicinate. Tutte le altre colonne appoggiano su supporti scorrevoli per non interagire sismicamente con sottostante struttura indipendente in C.A.
Caso di forte eccentricità delle masse. (fig. 5)





4 – fattore di struttura q

Innanzitutto bisogna distinguere il comportamento di una struttura dal punto di vista della sua capacità di dissipare energia. La norma italiana NTC 2008 individua due classi di strutture con diverso comportamento dissipativo : struttura con classe di duttilità bassa (CD B) e strutture con classe di duttilità alta (CD A).

Per le due classi di duttilità vengono definiti i limiti del fattore di struttura q in base alla seguente tabella in cui $q = k_r \cdot q_0$ (k_r è il fattore di riduzione per irregolarità in elevazione)

Tabella 7.5.III - Classe della sezione trasversale di elementi dissipativi in funzione della classe di duttilità e di q_0

Classe di duttilità	Valore di riferimento del fattore di struttura q_0	Classe di sezione trasversale richiesta
CD "B"	$2 < q_0 \leq 4$	Classe 1 o 2
CD "A"	$q_0 > 4$	Classe 1

La norma europea EN 1998-1 distingue due classi di duttilità denominate media (DCM) e alta (DCH) con le seguenti limitazioni del fattore di struttura q :

Classe di duttilità	Valore di riferimento del coefficiente di comportamento q	Classe di sezione trasversale richiesta
DCM	$1,5 < q \leq 2$	Classe 1,2 o 3
	$2 < q \leq 4$	Classe 1 o 2
DCH	$q > 4$	Classe 1

Al di là della diverse definizioni di duttilità e della possibilità offerta dalla norma europea di poter considerare strutture dissipative anche quelle con un fattore q compreso tra 1,5 e 2 è importante notare che per classe bassa (o media) di duttilità il fattore di struttura q_0 (q) è ≤ 4 con sezioni dissipative di classe 1 o 2. Per classe di duttilità alta entrambe le norme richiedono sezioni di classe 1 (comportamento plastico totale).

Ciò premesso entrambe le norme propongono tabelle che danno il valore del fattore di struttura per diverse tipologie strutturali.

Secondo NTC 2008, per le due classi di duttilità i fattori di struttura sono i seguenti :

Tabella 7.5.II – Limiti superiori dei valori di q_0 per le diverse tipologie strutturali e le diverse classi di duttilità.

TIPOLOGIA STRUTTURALE	q_0	
	CD "B"	CD "A"
a) Strutture intelaiate c) Strutture con controventi eccentrici	4	$5\alpha_u/\alpha_1$
b1) Controventi concentrici a diagonale tesa attiva b2) Controventi concentrici a V	4 2	4 2,5
d) Strutture a mensola o a pendolo inverso	2	$2\alpha_u/\alpha_1$
e) Strutture intelaiate con controventi concentrici	4	$4\alpha_u/\alpha_1$
f) Strutture intelaiate con tamponature in muratura	2	2

Mentre, secondo EC8 i valori di q sono riportati nella seguente tabella in cui l'unica non-corrispondenza si ha sulla definizione della classe di duttilità "media" piuttosto che "bassa" :

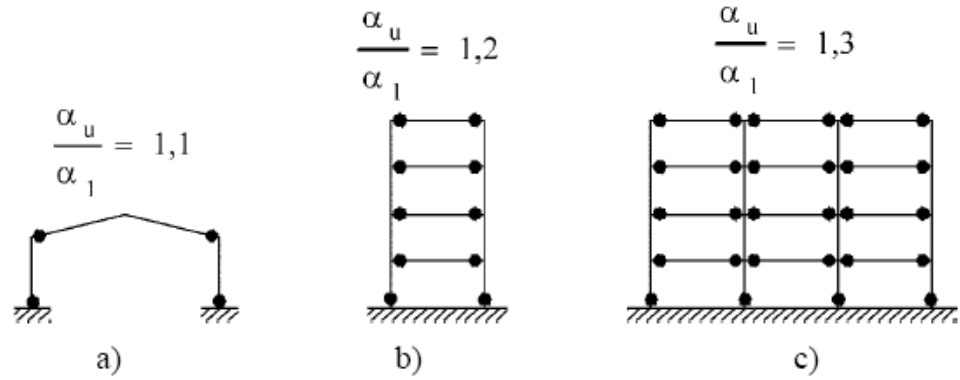
Tipologia strutturale	Classe di duttilità	
	DCM	DCH
a) Telai resistenti a flessione	4	$5\alpha_u/\alpha_1$
b) Telaio con elementi di controvento concentrici Elementi di controvento diagonali Elementi di controvento a V	4 2	4 2,5
c) Telaio con elementi di controvento eccentrici	4	$5\alpha_u/\alpha_1$
d) Pendolo capovolto	2	$2\alpha_u/\alpha_1$
e) Strutture con nuclei di calcestruzzo o pareti di calcestruzzo	Vedere sezione 5	
f) Telaio resistente a flessione con elementi di controvento concentrici	4	$4\alpha_u/\alpha_1$
g) Telaio resistente a flessione con tamponamenti Calcestruzzo non connesso o tamponamenti di muratura in contatto con il telaio Tamponamenti di calcestruzzo armato connesso Tamponamenti isolati del telaio flettente (vedere telai flettenti)	2 4	2 $5\alpha_u/\alpha_1$
	Vedere sezione 7	

Anche secondo la norma europea, per strutture non regolari in altezza, i valori di q indicati in tabella vanno moltiplicati per il fattore di riduzione 0,8 (& 6.3.2 (2))

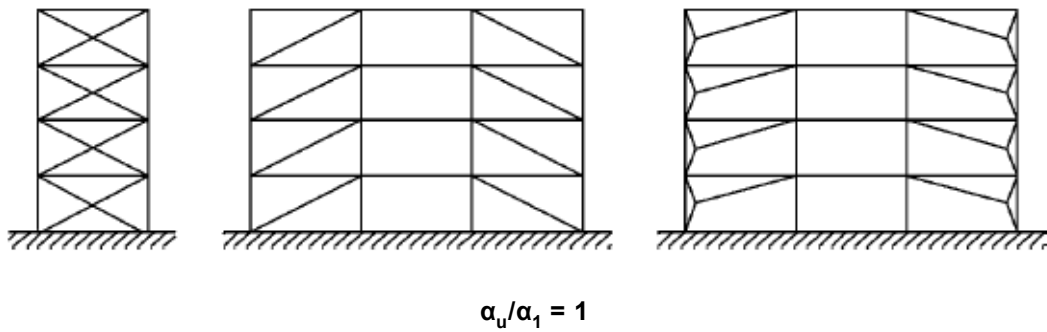
Per strutture con classe di duttilità bassa (media) il valore del fattore di struttura q_0 (q) è univocamente definito quando la parte strutturale dissipativa rientra negli schemi statici descritti. Per classe di duttilità alta il fattore di struttura non è sempre definito in modo univoco ma dipende dal rapporto α_u/α_1 ovvero tra il moltiplicatore dell'azione sismica di progetto che, a parità di tutte le altre azioni, porta alla instabilità globale della struttura (formazione di cerniere plastiche o snervamento di elementi diagonali tesi) e il moltiplicatore dell'azione sismica di progetto che, a parità di tutte le altre azioni, porta al primo raggiungimento della resistenza plastica di un qualunque elemento della struttura (formazione della prima cerniera plastica o snervamento del primo diagonale teso). Il valore di α_u può essere ottenuto da una analisi globale statica non lineare (pushover) per incrementi successivi delle forze orizzontali.

Per strutture regolari in altezza il valore del rapporto α_u/α_1 è dato dalle norme (NTC 2008 e EC8) in base ai seguenti schemi :

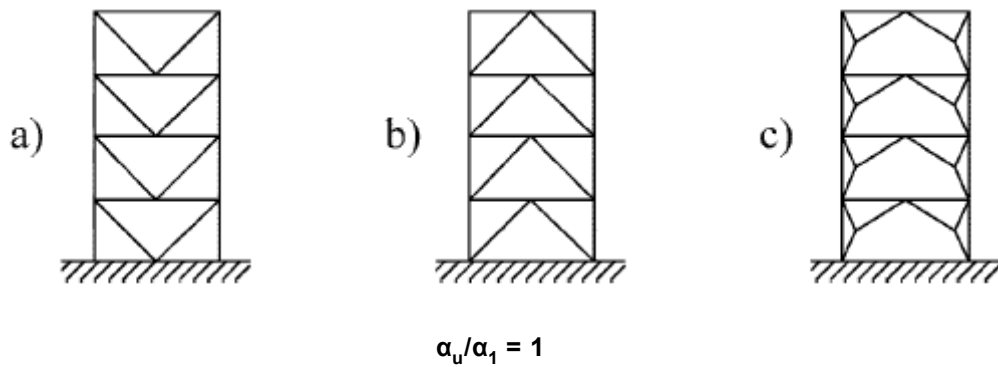
- 1) Telai resistenti a momento (zone dissipative nelle travi ed alla base delle colonne)



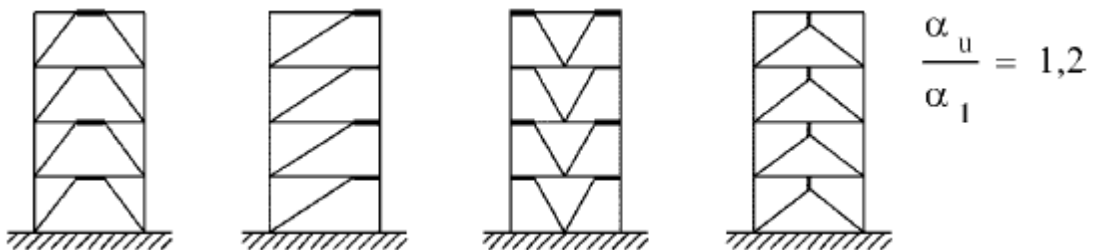
2) Telai con controventi diagonali concentrici (zona dissipativa nelle diagonali tese)



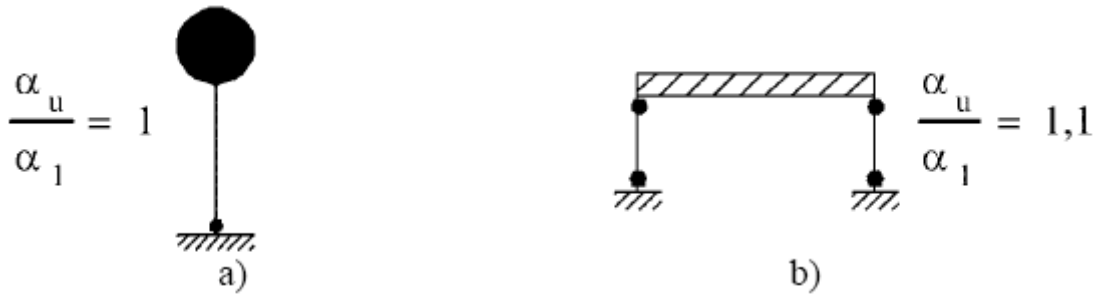
3) Telai con controventi concentrici a V (zone dissipative nelle diagonali tese e compresse)



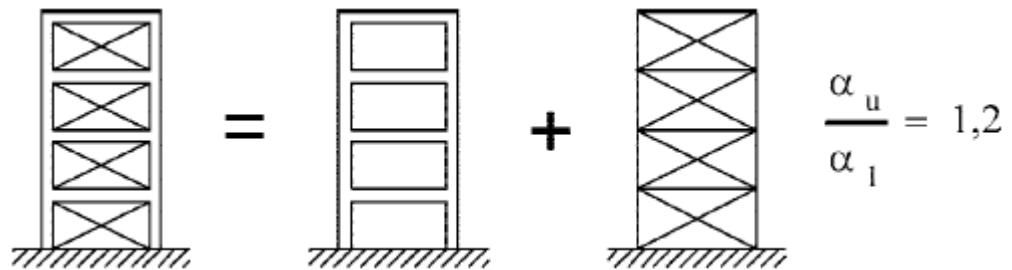
4) Telai con controventi eccentrici (zone dissipative per flessione o taglio nei tratti di collegamento (link))



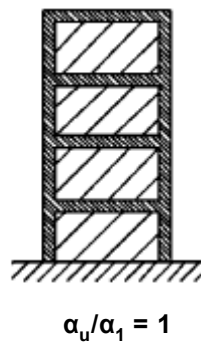
- 5) Pendolo inverso e strutture a telaio monopiano con traverzi infinitamente rigidi (zone dissipative alla base delle colonne con la limitazione (caso b) $N_{Ed} / N_{pl,Rd} \leq 0,3$)



- 6) Telai resistenti a momento combinati con controventi concentrici (zone dissipative nel telaio e nelle diagonali tese)



- 7) Telaio resistente a momento con tamponature in muratura (zone dissipative nel telaio)



Nota : telai con controventi a K (con diagonali convergenti in un nodo lungo la colonna) **non sono accettati in condizioni sismiche.**

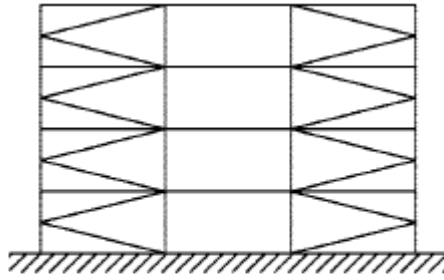


Figure 6.9: Frame with K bracings (not allowed).

Per costruzioni **non regolari in pianta**, quando non sono eseguiti calcoli specifici per la valutazione del rapporto α_u/α_1 , la norma europea propone di usare il valore medio tra **1** e quello corrispondente allo schema statico di calcolo (& 6.3.2 (4))

Possono essere usati valori più alti del rapporto α_u/α_1 se determinati con analisi globale elastica non lineare (pushover) (& 6.3.2 (5)). **Il valore massimo del rapporto α_u/α_1 non deve superare in ogni caso 1.6 (& 6.3.2 (6)).**

5 – legame fattore di struttura – duttilità

Da quanto esposto nel precedente paragrafo risulta chiaro il legame tra fattore di struttura e duttilità degli elementi dissipativi ovvero, per strutture a **bassa duttilità** ($2 < q \leq 4$) gli elementi dissipativi (travi, colonne e controventi) devono essere di **classe ≤ 2** .

Si noti la differenza tra normativa italiana ed europea; quest'ultima prevede anche un fattore di struttura **minore o uguale a 2** ovvero, per la precisione $1,5 < q \leq 2$ con classe degli elementi dissipativi **minore o uguale a 3**. Ciò significa che in base alla norma europea è possibile utilizzare in condizioni sismiche sezioni dissipative di **classe 3** (comportamento elastico) per strutture a bassa duttilità con fattore di "comportamento" (behaviour factor) $q = 2$ ovvero per elementi di controvento a V, pendolo inverso e telai con tamponatura.

In base alla norma italiana (NTC 2008) la possibilità di usare sezioni dissipative di **classe 3** per strutture a bassa duttilità con fattore di comportamento $q_0 = 2$ sembrerebbe esclusa anche se il caso $q_0 = 2$ non è contemplato nella tabella 7.5.III

Valore di riferimento del fattore di struttura q_0
$2 < q_0 \leq 4$

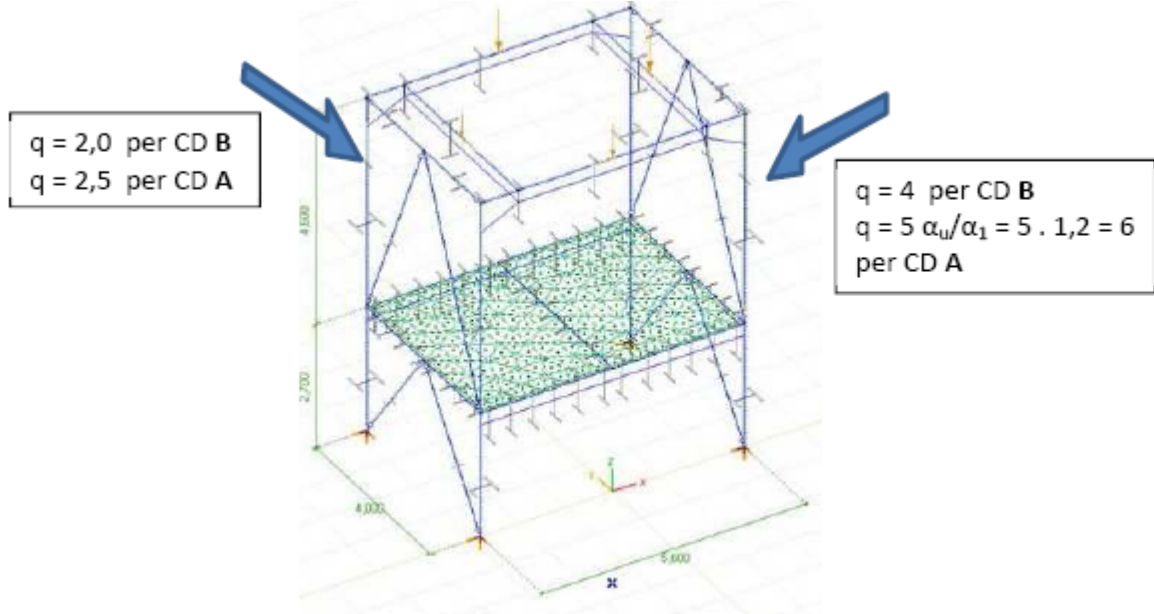
Il fattore di comportamento $q_0 = 2$ per classi di duttilità bassa è attribuito invece a strutture composte da controventi concentrici a V, strutture a "mensola" o a pendolo inverso e a strutture intelaiate con tamponature in muratura come risulta dalla tabella 7.5.II delle NTC 2008.

Per strutture ad alta duttilità con fattore di struttura q maggiore di 4 le sezioni dissipative (inflesse, tese o resistenti a taglio) devono essere di classe 1 ovvero devono consentire la completa plasticizzazione ciclica senza fenomeni di instabilità locale.

6 – esempi di attribuzione del fattore di comportamento q (behaviour factor) a strutture tipiche

Nel paragrafo 3 di questo articolo sono stati proposti alcuni esempi di strutture progettate in zona sismica per le quali è stato definito un fattore di struttura che viene di seguito giustificato.

La fig. 1 è relativa ad una torre industriale costituita, su due lati opposti, da telai a nodi rigidi e, sugli altri due, da controventi a V concentrici. La struttura è regolare in pianta e in elevazione.



Nel caso in cui la maggior parte del carico (massa sismica) sia sopportato dall'ultimo piano della torre (caso reale) e si possa ipotizzare per la stessa un comportamento a pendolo inverso (rilevabile da un'analisi modale) i fattori di struttura q possono essere assunti uguali nelle due direzioni con valore $q = 2$ sia per bassa che per alta duttilità (tabella 7.5.II - NTC 2008). E' questo il caso di strutture di sostegno di impianti industriali o silos come quello rappresentato nella seguente immagine:

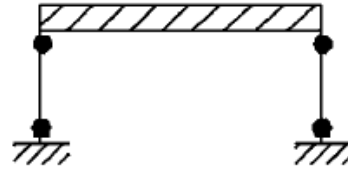


Strutture a pendolo inverso possono comunque essere equiparate a strutture resistenti a momento qualora siano costituite da più di una colonna in ciascun piano resistente e sia soddisfatta l'equazione :

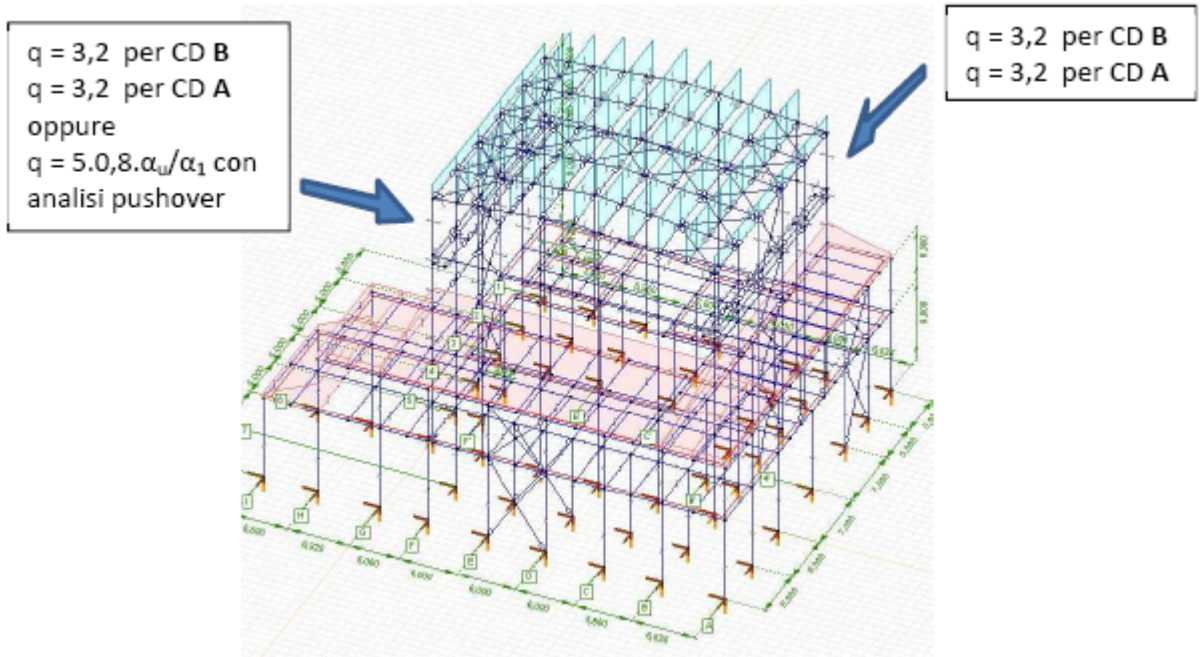
$$N_{Ed} \leq 0,3 \cdot N_{pl,Rd} \text{ per ciascuna colonna (\& 6.3.1.5 – EN 1998-1).}$$

In questo caso si può ancora assumere $q = 4$ per CD B e $q = 5 \cdot \alpha_u / \alpha_1$ per CD A

Inverted pendulum structures may be considered as moment resisting frames provided that the earthquake resistant structures possess more than one column in each resisting plane and that the following inequality of the limitation of axial force: $N_{Ed} < 0,3 \cdot N_{pl, Rd}$ is satisfied in each column.



La fig. 2 rappresenta una struttura complessa irregolare sia in pianta che in elevazione con comportamento dissipativo dipendente da schemi statici diversi nelle due direzioni orizzontali.



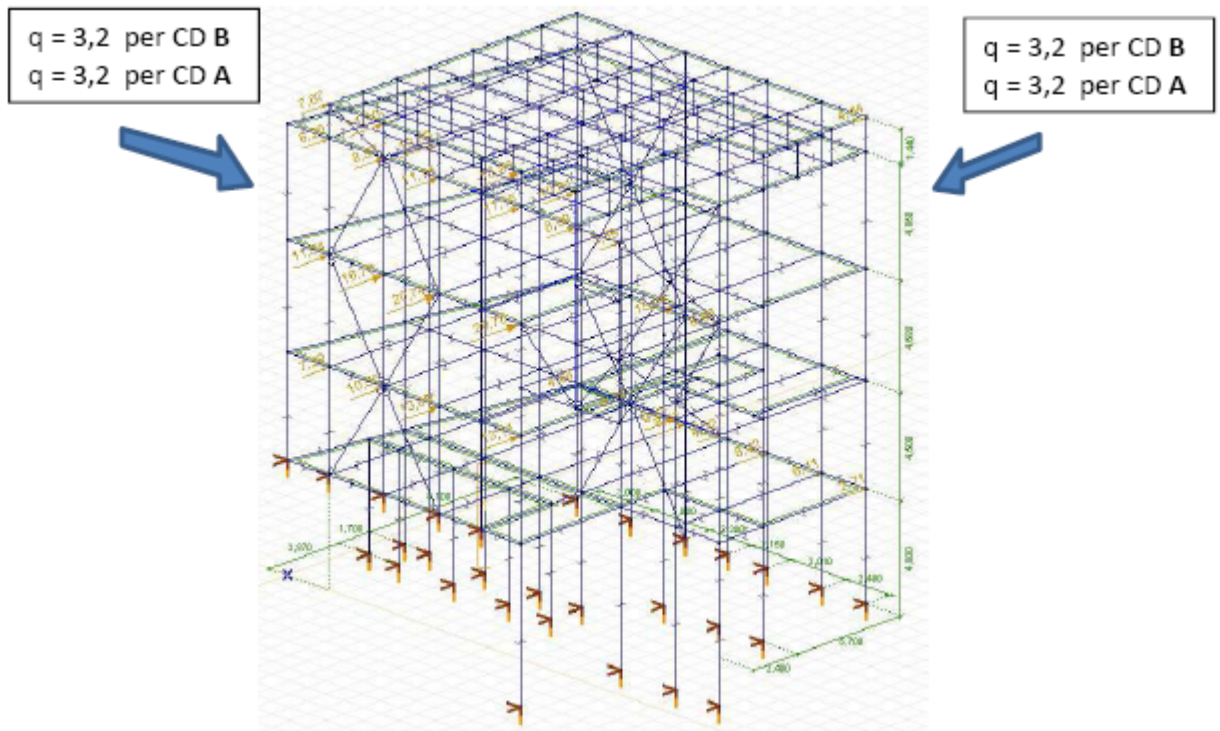
Per struttura con classe di duttilità bassa, la prevalenza di comportamento a telaio monopiano in direzione trasversale richiede un fattore di struttura $q_0 = 4$ che è lo stesso richiesto dalla norma per controventi concentrici a diagonale tesa attiva disposti tra le colonne dell'avancorpo.

In direzione longitudinale la stabilità globale è affidata ancora a sistemi di controvento concentrici a diagonale tesa attiva e quindi con l'utilizzo di un fattore di struttura $q_0 = 4$.

La non regolarità in elevazione (geometrica e di masse) richiede una riduzione del 20% del fattore di base q_0 ($q = k_r \cdot q_0$) per cui, in entrambe le direzioni si può usare per l'analisi sismica in **classe di duttilità bassa** un unico valore del fattore di costruzione $q = 3,2$.

Per l'analisi in classe di duttilità alta si potrebbe ricercare un più alto valore del fattore di struttura in direzione trasversale (comportamento a telaio prevalente) eseguendo un'analisi pushover per determinare un valore di $\alpha_U/\alpha_1 > 1$ che moltiplica il fattore base $q_0 = 5$ oppure usare il valore proposto dalla norma per telai monopiano $\alpha_U/\alpha_1 = 1,1$ tenendo presente che, la non regolarità in pianta richiederebbe di mediare tale valore con 1 (& 6.3.2 (4)). In direzione longitudinale, il sistema di controventi concentrici a diagonale tesa attiva mantiene il fattore $q = 4$ anche per classe di duttilità alta. Nel caso specifico il calcolo è stato eseguito per struttura con **classe di duttilità bassa** evitando così sia l'analisi pushover sia il rispetto della gerarchia delle resistenze **nodo-colonna-trave** pur controllando la gerarchia **colonna-trave** dei telai trasversali.

La fig. 3 rappresenta una struttura multipiano con distribuzione regolare delle masse sull'altezza. La stabilità globale è garantita da controventi concentrici a diagonale tesa attiva disposti lungo il perimetro esterno e per tutta l'altezza della costruzione.

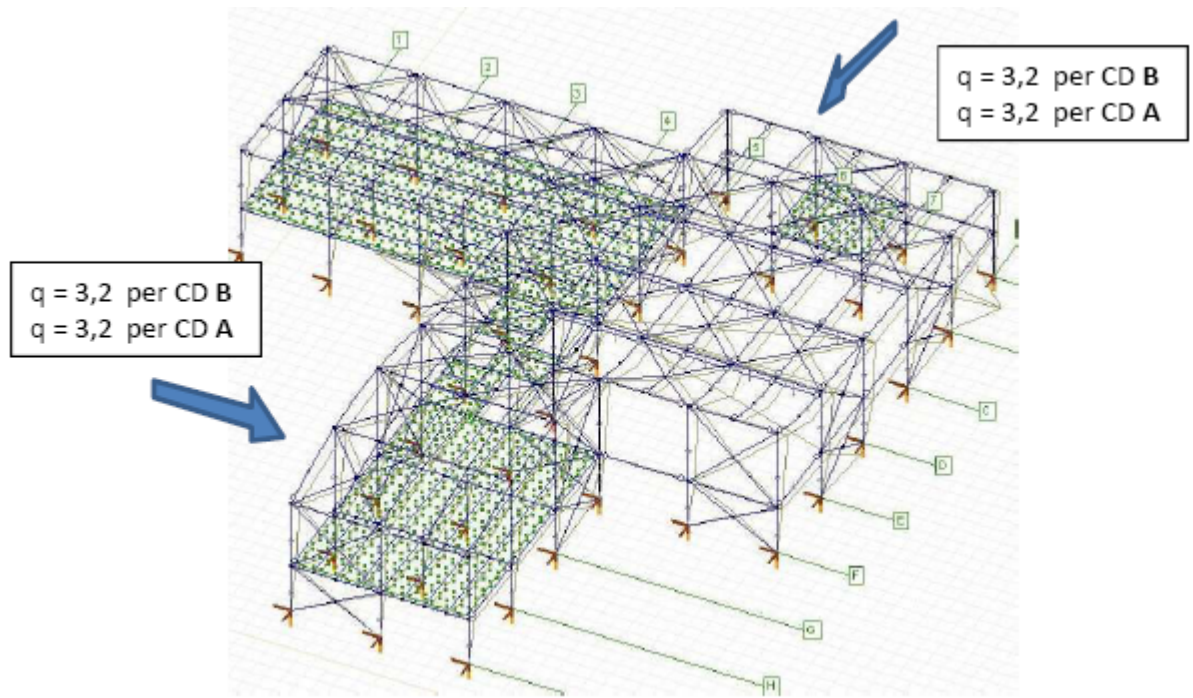


La costruzione non è regolare in altezza per la diversa geometria e rigidità dei piani. Il fattore di struttura q in entrambe le direzioni è pari a **4** sia per classe di duttilità bassa che per classe di duttilità alta ma va ridotto del 20% per tener conto della irregolarità in elevazione.

Il fattore di struttura è quindi : $q = k_r \cdot q_0 = 0,8 \cdot 4 = 3,2$

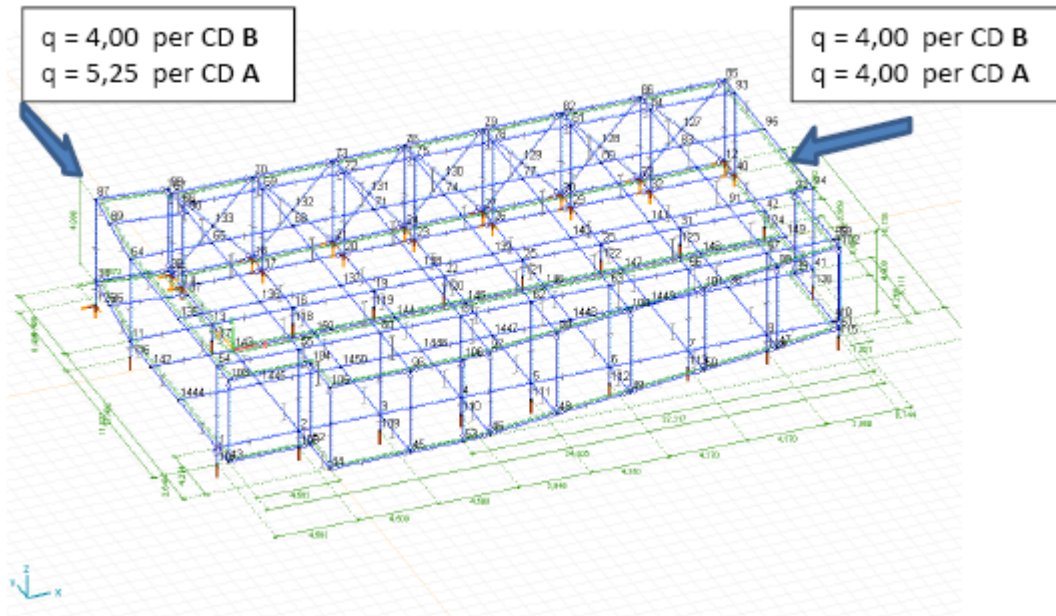
E' evidente che anche in questo caso conviene eseguire l'analisi sismica in classe di duttilità bassa evitando l'applicazione rigorosa della gerarchia delle resistenze.

La fig. 4 rappresenta una struttura irregolare sia in elevazione che in pianta la cui stabilità globale è affidata esclusivamente a sistemi di controvento concentrici a diagonale tesa attiva disposti lungo i lati esterni della costruzione. Anche in questo caso il fattore di struttura base è $q_0 = 4$ sia per classe di duttilità bassa che per classe di duttilità alta ma va ridotto del 20% per l'irregolarità in elevazione. L'irregolarità in elevazione è dovuta sia ai diversi livelli della copertura sia alla presenza di un piano intermedio esteso solo su parte della costruzione. L'irregolarità in pianta è data dalla conformazione a L con baricentri delle masse distanti dal baricentro delle rigidità di cui si dovrà tener conto nel calcolo.



La fig. 5 rappresenta una struttura monopiano regolare in altezza ma irregolare in pianta per la disposizione del centro delle rigidità solo lungo un lato e quindi distante dal centro delle masse. In direzione x la stabilità della costruzione è affidata a controventi concentrici a diagonale tesa attiva disposti lungo il lato Nord mentre in direzione y il comportamento è a telaio con travi della copertura vincolate ad una coppia di colonne ravvicinate e poste sempre lungo lo stesso lato stabilizzante. Come già accennato al punto 3 dell'articolo, l'edificio ha fondazioni fisse nel terreno roccioso solo lungo il lato Nord mentre le altre colonne poggiano su supporti scorrevoli posizionati sulla copertura di un edificio in C.A. indipendente e dimensionato solo per sopportare il carico verticale trasmesso dalla struttura in esame.

In entrambe le direzioni quindi il fattore di struttura per **classe di duttilità bassa** è $q = 4$ (controventi concentrici a diagonale tesa attiva e telai a nodi rigidi). Per classe di duttilità alta, senza eseguire un'analisi pushover, si può assumere per le azioni in direzione y un fattore di struttura $q = 5 \cdot \alpha_u / \alpha_1 = 5 \cdot (1,1+1)/2 = 5,25$ mentre per le azioni in direzione x si ha ancora $q = 4$



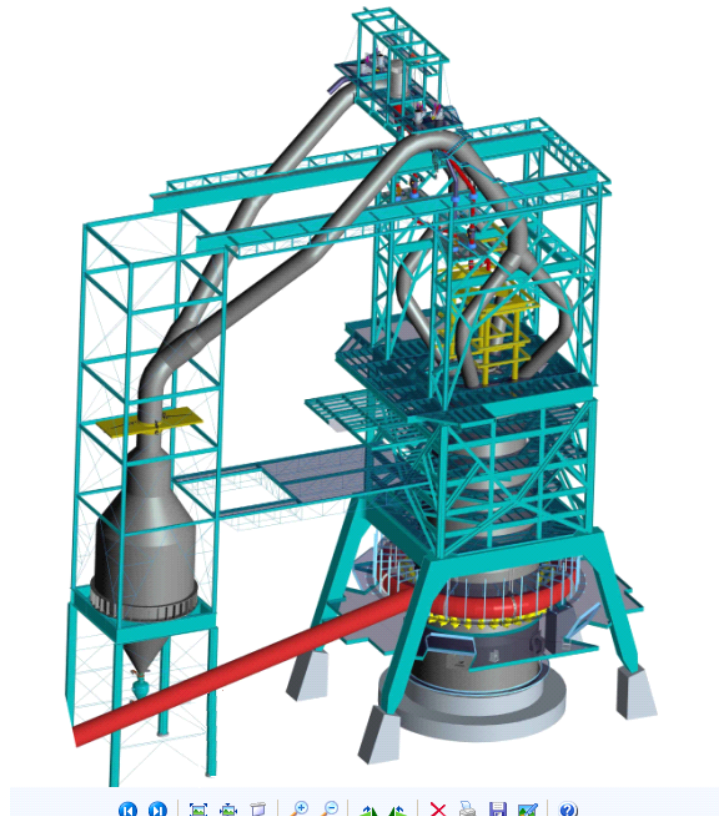
7 – casi diversi da strutture standard ; strutture "shell-type" e casi complessi

Tutto sommato i casi presentati si possono definire relativamente semplici poiché le tipologie strutturali sono individuabili negli schemi statici indicati dalle norme.

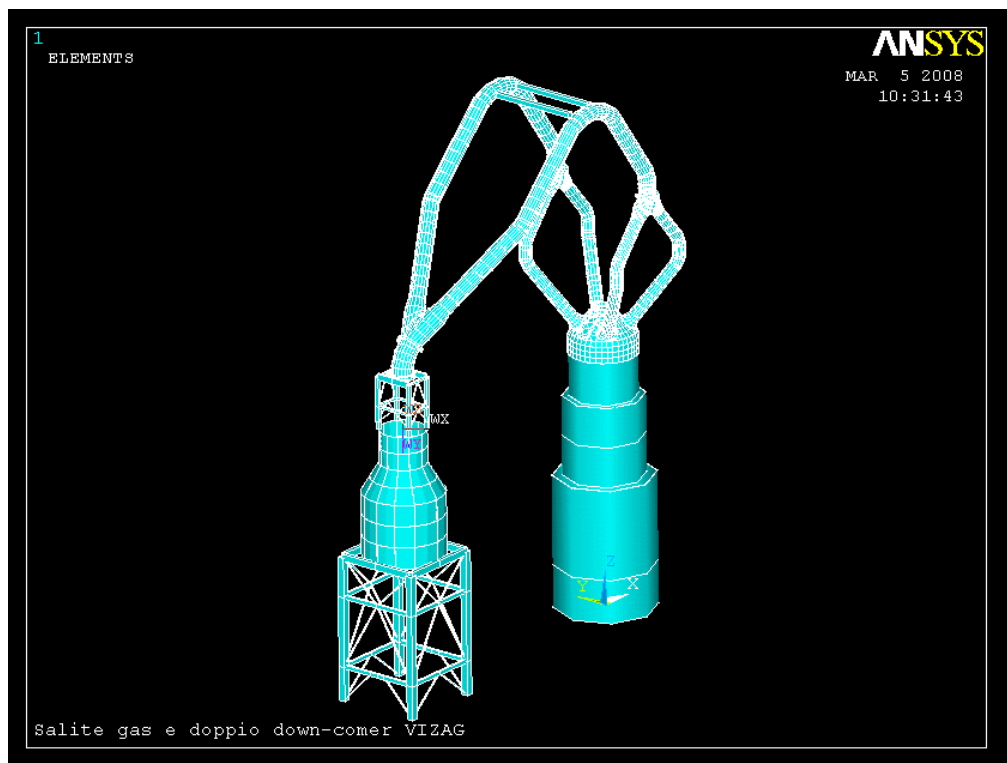
Per casi di strutture con elementi dissipativi non standard e per involucri autoportanti (sili, serbatoi, condotte fuori terra, torri di raffreddamento, torri di preriscaldamento, camini, altoforni ecc), là dove le indicazioni delle norme **EN 1998-4 (silos)** e **EN 1998-6 (ciminiere)** non sono sufficientemente esaustive per definire il fattore di struttura q , è necessario eseguire un'analisi pushover.

Generalmente sili e serbatoi a terra costituiscono strutture poco dissipative perché la parte duttile è costituita dal piatto di fondo e dagli ancoraggi. Per queste strutture il fattore q non supera il valore di 2 (item 3.4 e 4.4 - EN 1998-4). Sili e serbatoi sostenuti da strutture intelaiate o controventate possono essere equiparati al pendolo inverso con fattore di struttura $q = 2$ eventualmente incrementato del fattore 1,25 nel caso di struttura di sostegno intelaiata o controventata in modo regolare (item 3.4 (4) - EN 1998-1). Per le ciminiere il fattore di struttura $q = q_0 \cdot k_r \geq 1,5$ in cui k_r è un fattore di regolarità definito al punto 4.15.2 della EN 1998-6 ed assume valori di 0,7 o 0,8 a seconda del tipo di irregolarità (eccentricità delle masse, aperture, concentrazione delle masse nel terzo superiore) eventualmente ridotto ancora del moltiplicatore 0,9 per la coesistenza di più irregolarità. Il fattore di comportamento di base q_0 è definito al punto 6.1 della EN 1998-6 e, per camini autoportanti (shell-type structure) vale 2,5 quando le sezioni soddisfano i requisiti del punto 5.3.3 della EN 1993-1-1 per analisi globale plastica altrimenti si assume $q_0 = 1,5$.

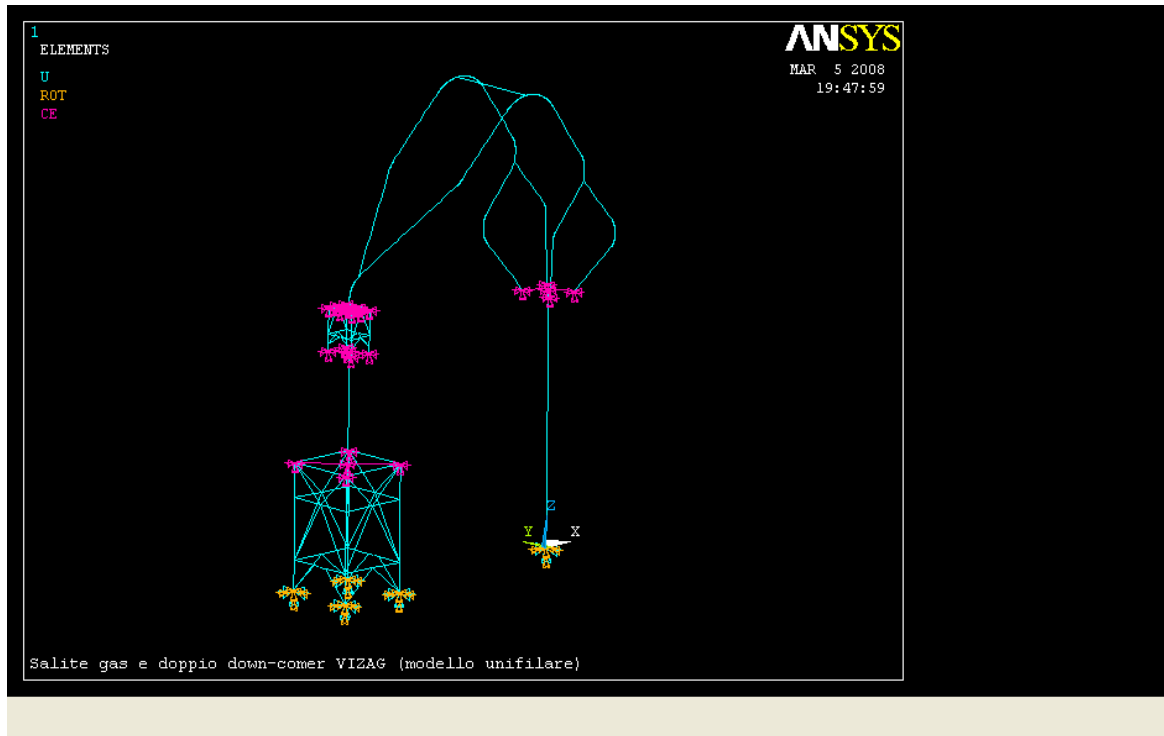
L'esempio di seguito riportato si riferisce ad un insieme di strutture "shell-type" che sono parte di un impianto industriale (altoforno) di cui si vuole conoscere il comportamento dissipativo e la classe di duttilità delle condotte gas che collegano i due involucri (altoforno e sacca a polvere).



Lo schema analizzato nella sua globalità comprende l'involucro dell'altoforno, le condotte gas e la sacca a polvere direttamente interconnessi tra loro e discretizzati con elementi finiti come di seguito rappresentato. E' evidente la difficoltà di individuare un comportamento dissipativo ed una classe di duttilità da attribuire alle condotte gas sia per la loro forma particolare sia per l'interazione che esse hanno con i due impianti collegati.

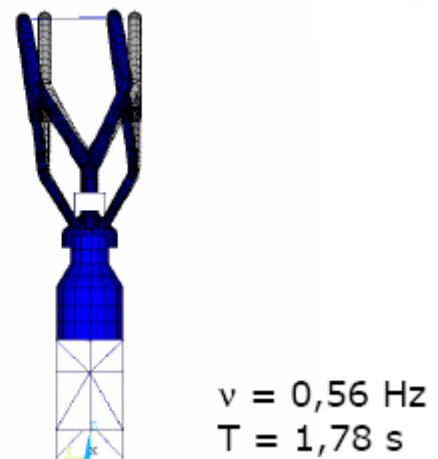
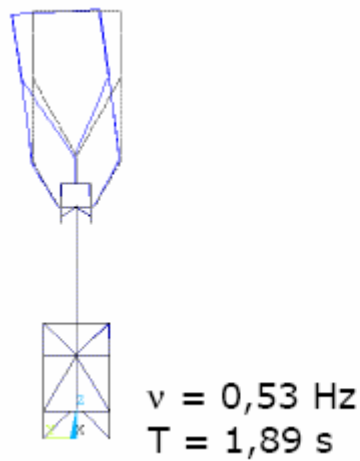


Lo schema discreto è stato analizzato anche in rappresentazione unifilare sia per poter eseguire un controllo sull'analisi modale nelle due rappresentazioni sia per poter eseguire un'analisi pushover

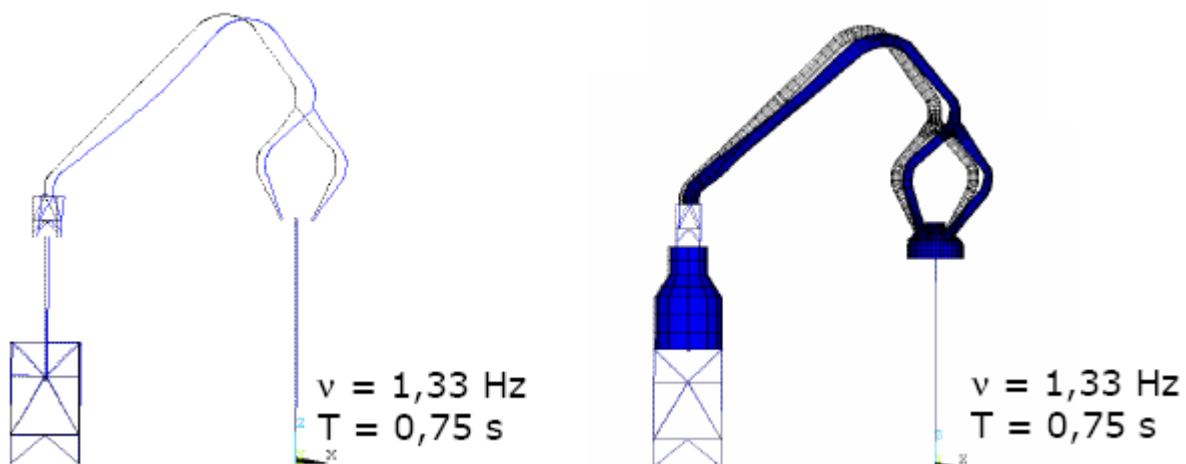


Passo 1 - Analisi modale :

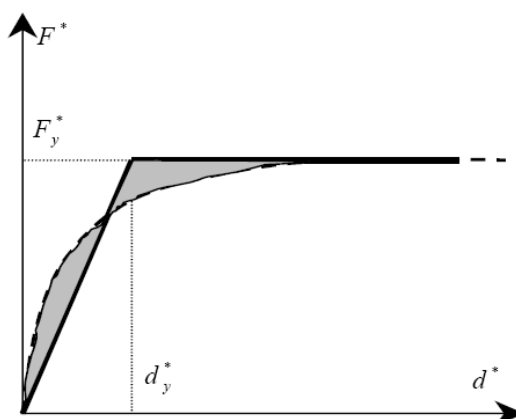
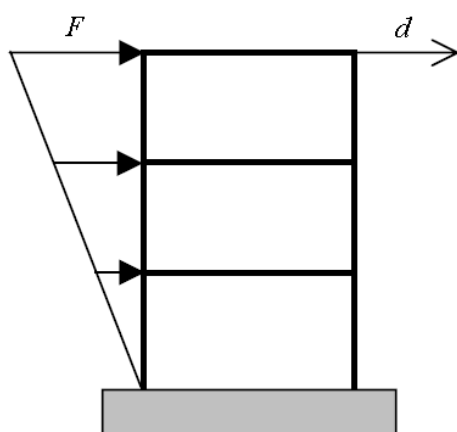
I° modo



II° modo



Passo 2 - Analisi pushover in base alla classica definizione con aumento dei carichi F e costruzione della curva forza-spostamento :



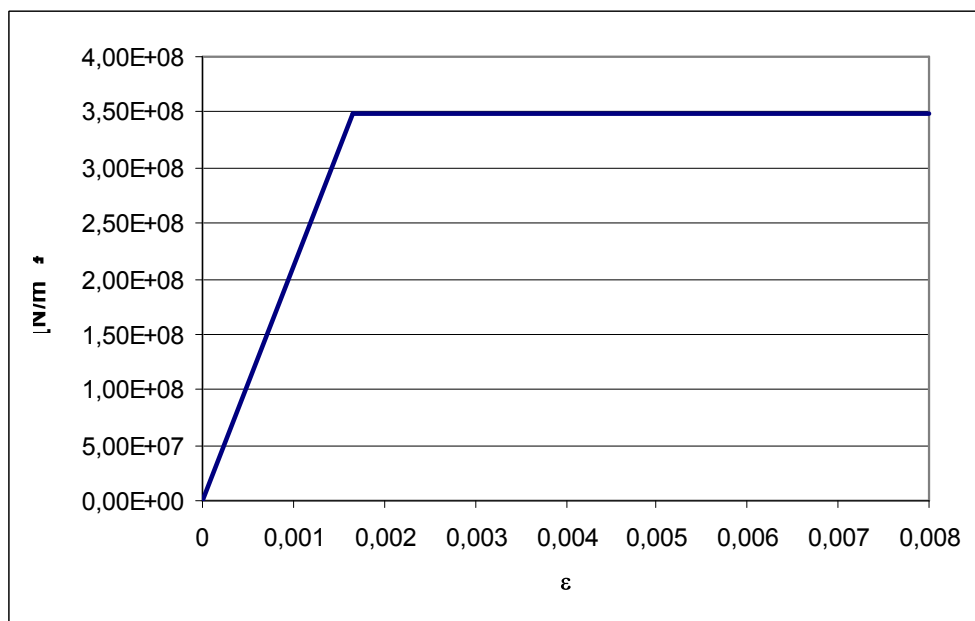
Passo 3 - Determinazione delle caratteristiche di un sistema ad un grado di libertà con comportamento bi-lineare equivalente.



L'analisi non lineare è eseguita su modello unifilare usando elementi finiti con comportamento non lineare :

Modello elastico	Modello plastico
PIPE 16	PIPE 20
PIPE 18	PIPE 60
LINK 8	LINK 8
BEAM 4	BEAM 24

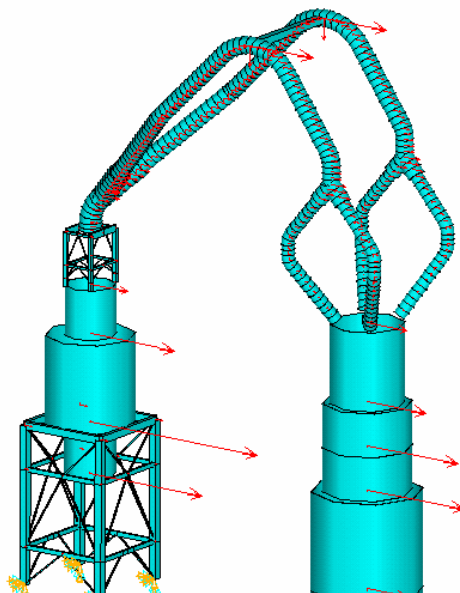
Il legame costitutivo tensione-deformazione è il seguente :



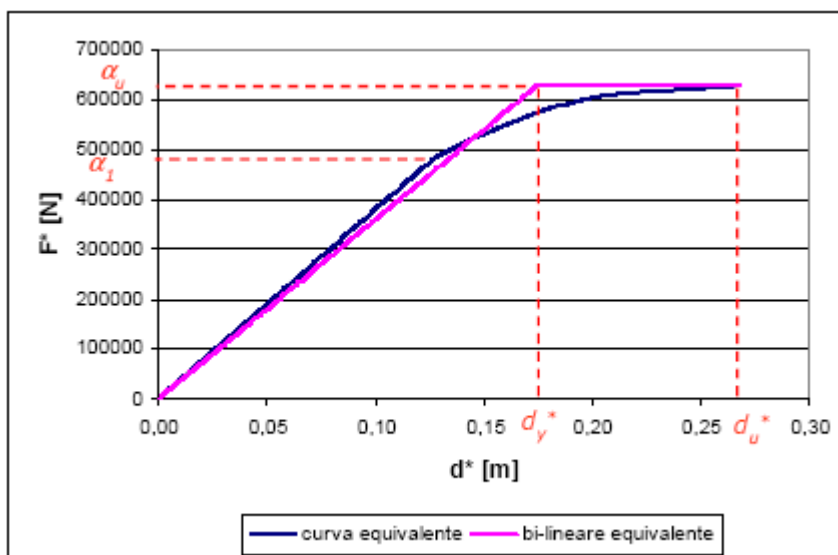
Vengono applicate le forze al modello nelle due direzioni orizzontali con incremento graduale nel tempo : $F_i = \psi_{Ti} \cdot M$

In direzione y le forze sono proporzionali al I° modo e in direzione x sono proporzionali al II° modo. Viene quindi costruita la curva forza-spostamento.

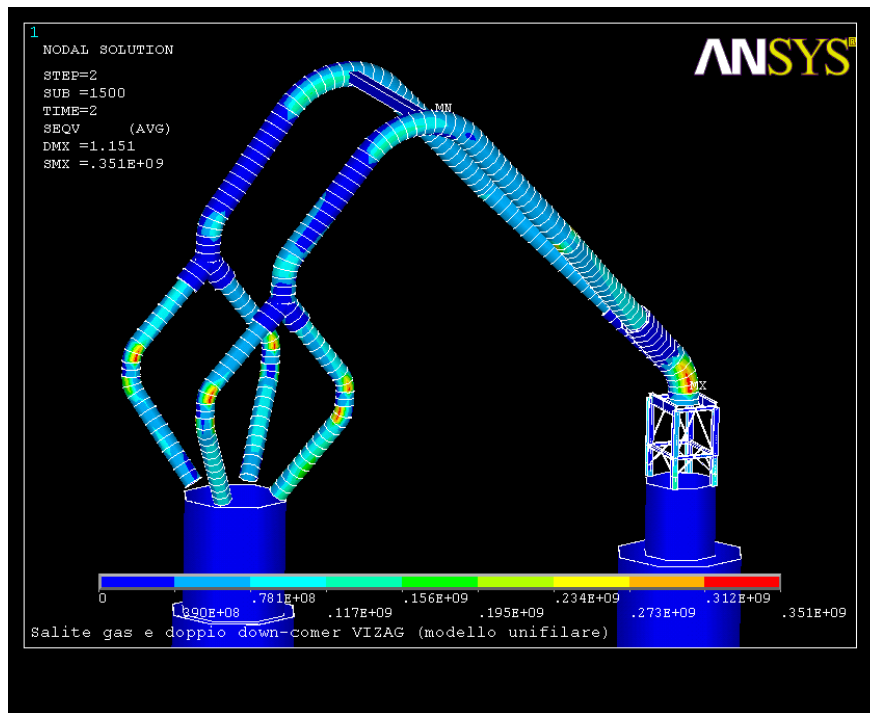
I risultati dell'analisi in direzione y sono di seguito riportati :



Con la seguente curva forza-spostamento :



La formazione della prima cerniera plastica si ha nel gomito inferiore delle condotte gas mentre le successive cerniere plastiche si formano nei gomiti dei tratti ascendenti.



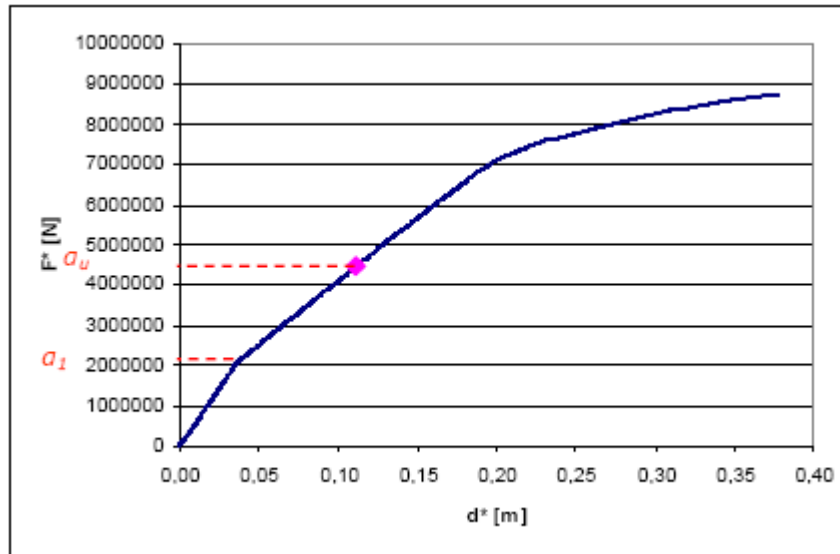
Il fattore di struttura q (R) è dato da :

$$R = \frac{d_u^*}{d_y^*} \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$$

$$q = (R) = 2$$

Che conferma un comportamento a mensola o a pendolo inverso del complesso delle condotte gas.

In direzione x si registra il raggiungimento del limite di rottura quando la struttura non ha ancora raggiunto la massima resistenza in termini di taglio alla base.

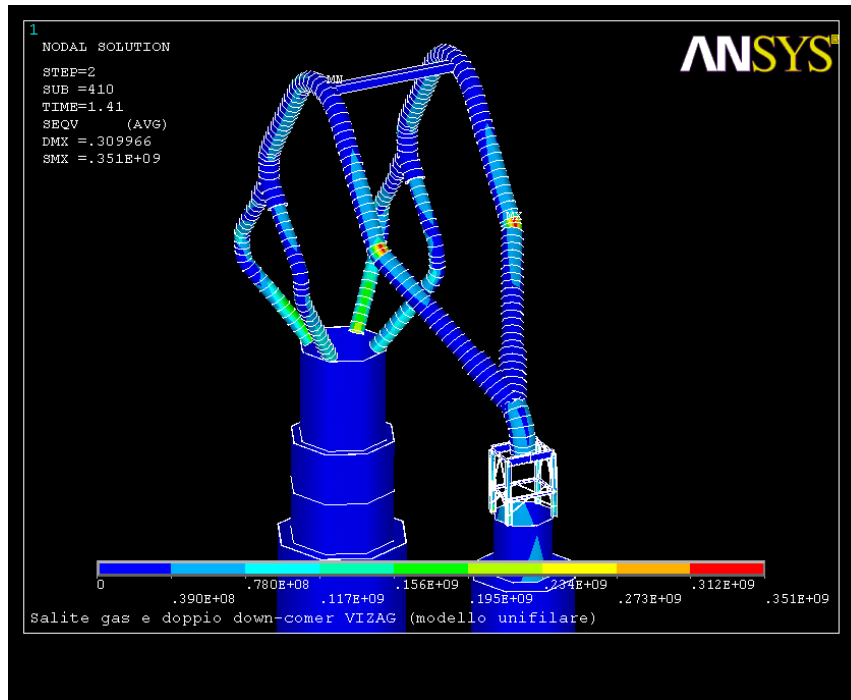


Ciò significa che per azioni sismiche in direzione x il complesso delle condotte non manifesta risorse di duttilità ma dopo la formazione delle prime due cerniere plastiche nei gomiti, l'incremento di carico porta a rottura prima del raggiungimento del taglio totale alla base. In questo caso la manifesta scarsa duttilità del sistema è misurata da un fattore di struttura q (R) dato dalla seguente espressione.

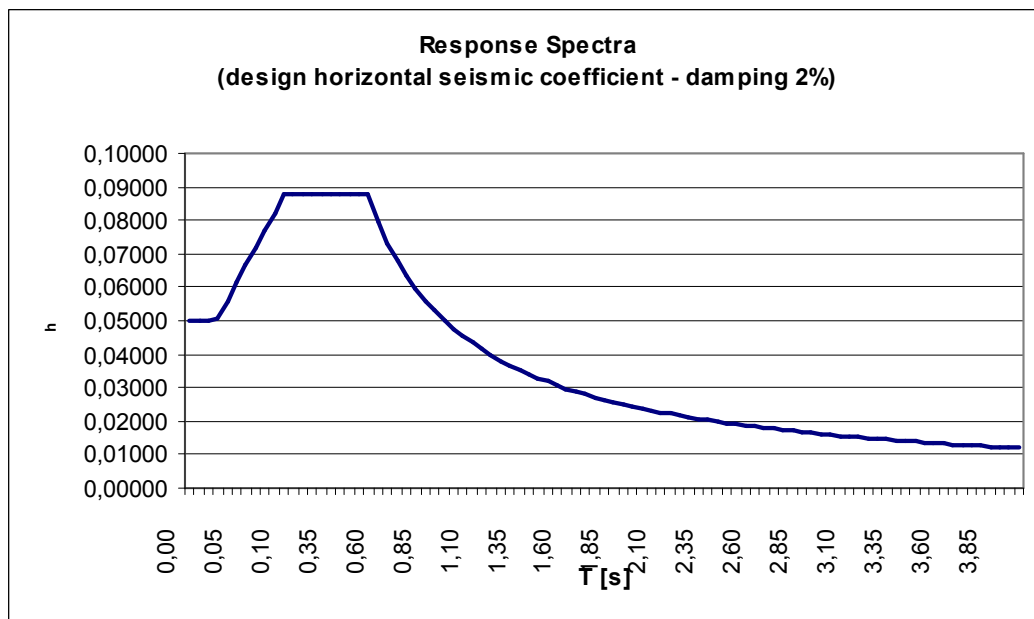
$$R = \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$$

$$q = (R) = 2,17$$

Il modo di collasso è evidenziato nella seguente figura :



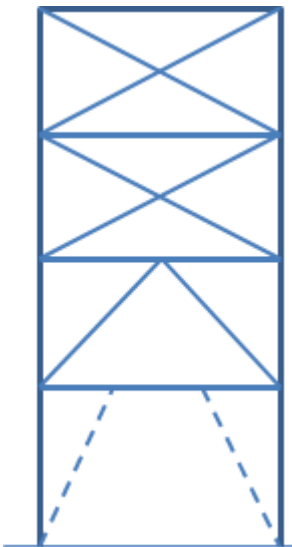
L'analisi sismica può essere eseguita con un fattore di struttura $q = 2$ adottando il seguente spettro di progetto per **SLV** e per la zona in cui la struttura è posta.



Come casi particolari non citati nelle norme e che richiedono analisi non lineari per determinare il fattore q si citano anche strutture che non hanno uguale sistema dissipativo su tutta l'altezza della costruzione come rappresentato nella seguente figura :

telaio di controvento misto con parte alta in elementi concentrici a diagonale tesa attiva, parte intermedia

con elementi concentrici a V e parte inferiore con elementi eccentrici o portale resistente a momento.



Il caso si complica se, in una costruzione parallelepipedica, si hanno diverse combinazioni di controventamento nella direzione dell'azione sismica ovvero controventi a diagonale tesa attiva su un lato e controventi a V concentrici o eccentrici su quello opposto.

In tutti i casi in cui non ci si possa riferire a modelli standard (previsti dalle norme), per avere una buona risposta del comportamento della struttura è necessario eseguire un'analisi pushover.