

ESERCITAZIONE N. 5

Analisi statica e dinamica lineare

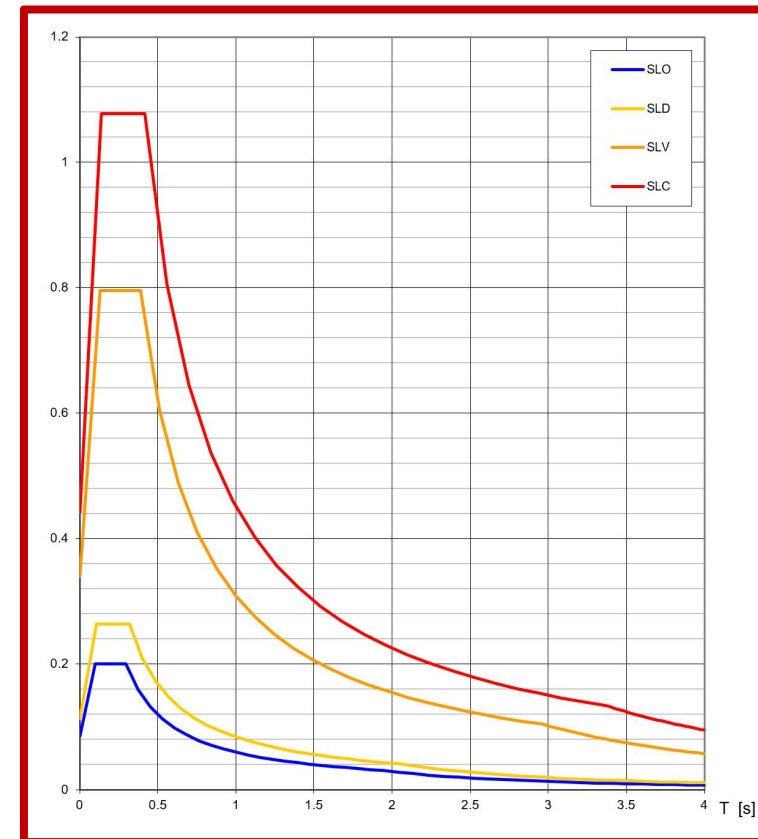
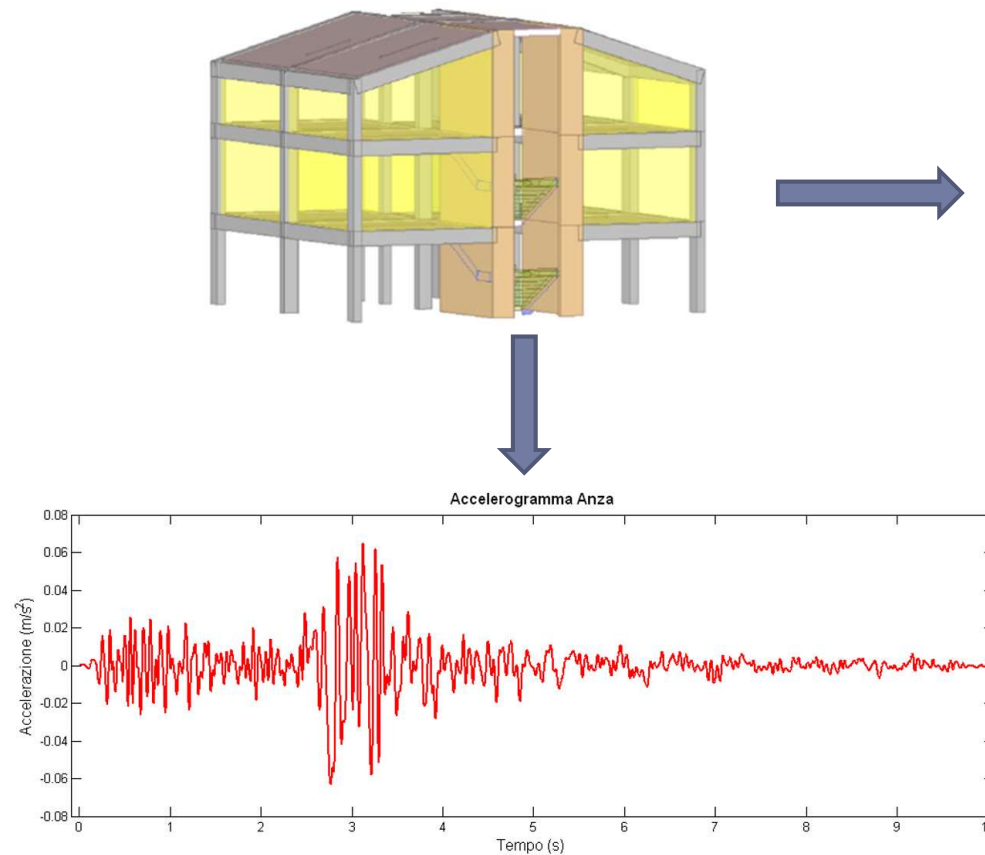
Corso di Costruzioni in Zona Sismica
A/A 2018-2019

Università degli Studi Roma Tre - Facoltà di Ingegneria

Dott. Ing. Corritore Daniele

Modellazione dell'azione sismica

Le azioni conseguenti al moto sismico possono essere modellate sia attraverso forze statiche equivalenti o spettri di risposta, sia attraverso storie temporali del moto del terreno, opportunamente selezionate.



Modellazione dell'azione sismica

L'entità della domanda indotta dall'azione sismica con la quale confrontare la capacità della struttura, può essere valutata adottando uno fra i metodi di analisi illustrati qui di seguito.

I metodi di analisi si articolano in lineari e non lineari, in funzione delle caratteristiche della struttura e del modello di comportamento adottato. Nelle norme sono ammessi quattro metodi di analisi caratterizzati da complessità e precisione crescenti. Essi sono:

Analisi statica lineare (per sistemi dissipativi e non dissipativi);

Analisi dinamica lineare (per sistemi dissipativi e non dissipativi);

Analisi statica non lineare (sistemi dissipativi);

Analisi dinamica non lineare (sistemi dissipativi).

Nel caso di **analisi lineare**, la domanda sismica per strutture a comportamento sia non dissipativo, sia dissipativo, può essere ridotta utilizzando un opportuno **fattore di comportamento q**. I valori attribuibili a q variano in funzione del comportamento strutturale (dissipativo o non dissipativo) e dello stato limite considerati, legandosi all'entità delle plasticizzazioni, che a ciascuno stato limite si accompagnano.

Modellazione dell'azione sismica

Per ciascuno degli stati limite e dei metodi di analisi considerati, nella tabella successiva sono riportati:

- **per l'analisi lineare**, il comportamento strutturale, le modalità di modellazione dell'azione sismica e i limiti da attribuire al fattore di comportamento q , a seconda dello stato limite considerato;
- **per l'analisi non lineare**, il comportamento strutturale, le modalità di modellazione dell'azione sismica.

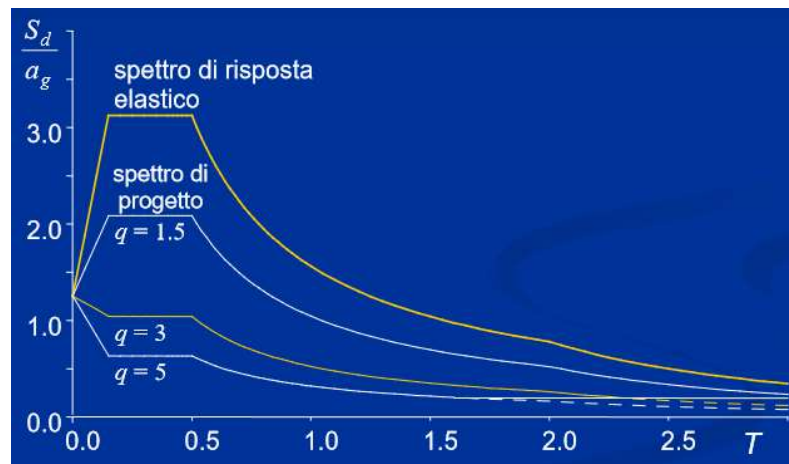
Tab. 7.3.I – Limiti su q e modalità di modellazione dell'azione sismica

STATI LIMITE		Lineare (Dinamica e Statica)		Non Lineare	
		Dissipativo	Non Dissipativo	Dinamica	Statica
SLE	SLO	$q = 1.0$ § 3.2.3.4	$q = 1.0$ § 3.2.3.4	§ 7.3.4.1	§ 7.3.4.2
	SLD	$q \leq 1,5$ § 3.2.3.5	$q \leq 1,5$ § 3.2.3.5		
SLU	SLV	$q \geq 1,5$ § 3.2.3.5	$q \leq 1,5$ § 3.2.3.5		
	SLC	---	---		

Il limite superiore del fattore q allo SLV è specificato, per tutte le tipologie strutturali, nel § 7.3.1, richiamandolo poi, per i diversi materiali, nei successivi paragrafi specifici.

Fattore di struttura q

Il **fattore di struttura q** definisce lo spettro di progetto a partire dallo spettro di risposta elastica: con l'eccezione del primo tratto ad andamento lineare, lo spettro di progetto è ottenuto da quello di risposta elastica mediante divisione per il fattore di struttura.



1° tratto - andamento lineare	$S_d = \frac{a_g S F_o}{q} \left[\frac{T}{T_B} + \frac{q}{F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$
2° tratto - costante	$S_d = \frac{a_g S F_o}{q}$
3° tratto - decrescente (con $1/T$)	$S_d = \frac{a_g S F_o}{q} \left(\frac{T_C}{T} \right)$
4° tratto - decrescente (con $1/T^2$)	$S_d = \frac{a_g S F_o}{q} \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)$

a_g : accelerazione orizzontale su suolo rigido massima del sito;

F_o : valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

T_B : periodo di inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;

T_C : periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro delle componenti orizzontali;

T_D : periodo di inizio del tratto dello spettro a spostamento costante;

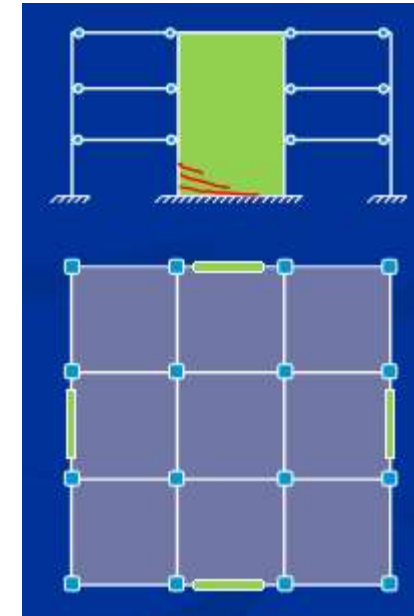
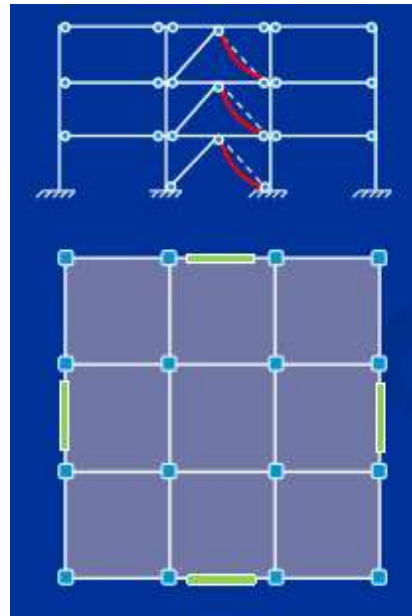
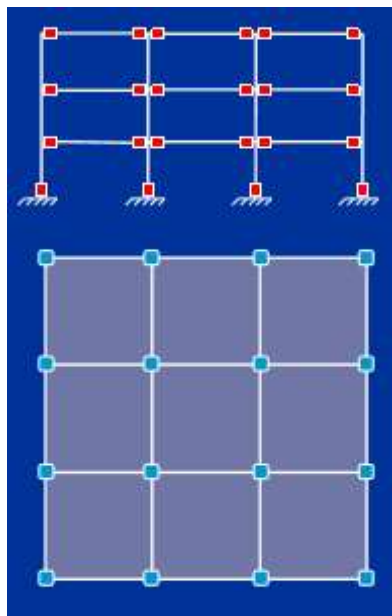
S : coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche.

Fattore di struttura q

Il **fattore di struttura q** sarà differente in funzione del:

- Duttilità globale attesa dalla struttura (CD "A" o CD "B");
- Dalla regolarità in altezza;
- Materiale e della tipologia strutturale;
- Dalla sovrarresistenza della struttura

Le tipologie strutturali, per loro natura, hanno diverse possibilità di dissipare energia per isteresi prima di dar luogo a labilità (si pensi a strutture intelaiate e a strutture con pareti).

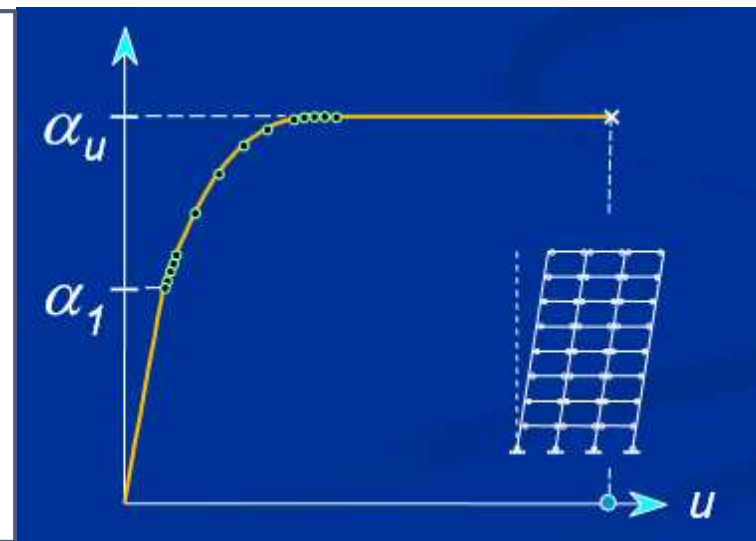


Fattore di struttura q

Il **fattore di struttura q** sarà differente in funzione del:

- Duttilità globale attesa dalla struttura;
- Dalla regolarità in altezza;
- Materiale e della tipologia strutturale;
- Dalla sovrarresistenza della struttura

La sovrarresistenza della struttura è rappresentata dal rapporto tra taglio resistente effettivo alla base e valore di progetto del taglio sollecitante alla base ed è misurata come il rapporto α_u/α_1 tra il valore dell'azione sismica per il quale si verifica la formazione di un numero di cerniere plastiche tali da rendere la struttura labile e quello per il quale il primo elemento strutturale raggiunge la plasticizzazione.



Fattore di struttura q

Il limite superiore q_{lim} del fattore di comportamento relativo allo SLV è calcolato tramite la seguente espressione:

$$q_{lim} = q_0 \cdot K_R$$

dove:

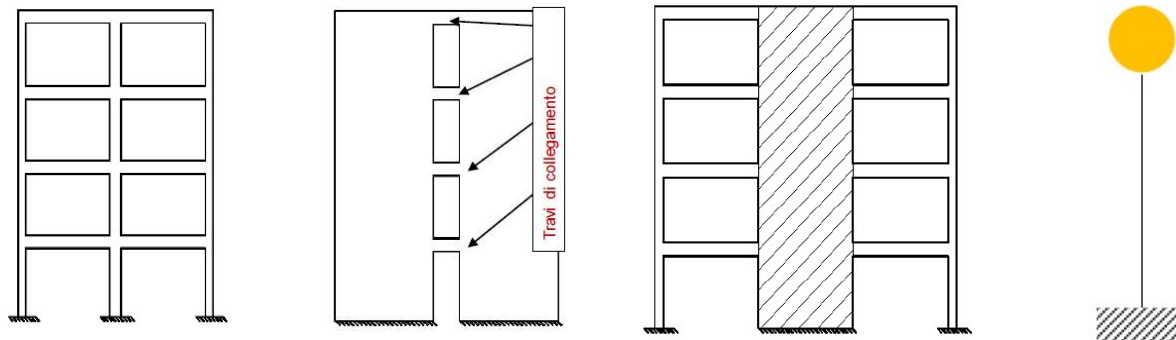
q_0 è il valore base del fattore di comportamento allo SLV, i cui massimi valori sono riportati in tabella 7.3. Il in dipendenza della Classe di Duttività, della tipologia strutturale, del rapporto di sovrarresistenza

K_R è un fattore che dipende dalle caratteristiche di regolarità in altezza della costruzione, con valore pari ad 1 per costruzioni regolari in altezza e pari a 0,8 per costruzioni non regolari in altezza.

Fattore di struttura q

Valori massimi del valore di base q_0 del fattore di comportamento allo SLV:

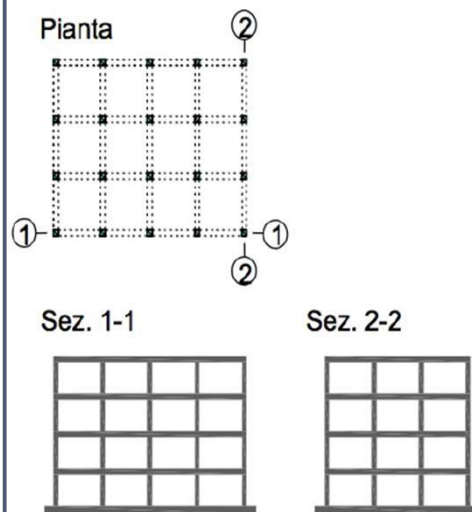
Tipologia strutturale	q_0	
	CD''A''	CD''B''
Costruzioni di calcestruzzo (§ 7.4.3.2)		
Strutture a telaio, a pareti accoppiate, miste (v. § 7.4.3.1)	$4,5 \alpha_u / \alpha_1$	$3,0 \alpha_u / \alpha_1$
Strutture a pareti non accoppiate (v. § 7.4.3.1)	$4,0 \alpha_u / \alpha_1$	3,0
Strutture deformabili torsionalmente (v. § 7.4.3.1)	3,0	2,0
Strutture a pendolo inverso (v. § 7.4.3.1)	2,0	1,5
Strutture a pendolo inverso intelaiate monopiano (v. § 7.4.3.1)	3,5	2,5



Le strutture possono essere classificate come appartenenti ad una tipologia in una direzione orizzontale e ad un'altra tipologia nella direzione orizzontale ortogonale alla precedente, utilizzando per ciascuna direzione il fattore di comportamento corrispondente.

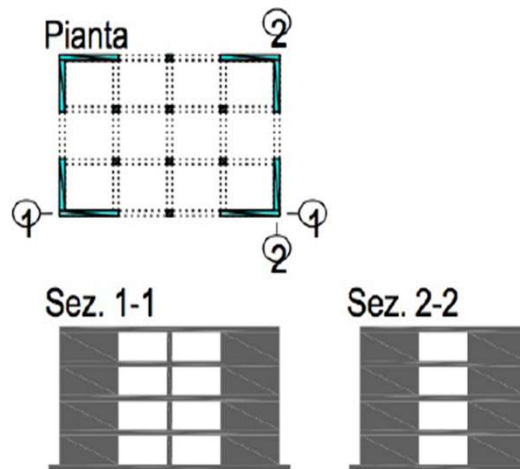
Fattore di struttura q

STRUTTURA A TELAIO



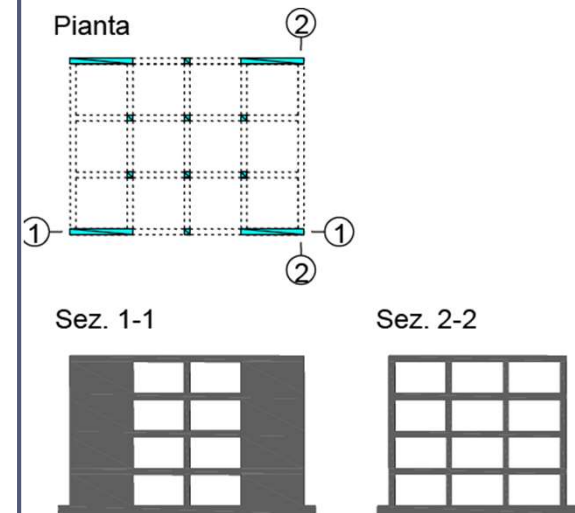
Resistenza a taglio del telaio $\geq 65\%$ del taglio totale alla base

STRUTTURA A PARETI



Resistenza a taglio delle pareti $\geq 65\%$ taglio totale alla base

STRUTTURA MISTA



Azioni verticali affidate al telaio
Azioni orizzontali affidate al telaio ed alle pareti

Fattore di struttura q

STRUTTURA MISTA

- *strutture miste telaio-pareti*, nelle quali la resistenza alle azioni verticali è affidata prevalentemente ai telai, la resistenza alle azioni orizzontali è affidata in parte ai telai ed in parte alle pareti, singole o accoppiate; se più del 50% dell'azione orizzontale è assorbita dai telai si parla di *strutture miste equivalenti a telai*, altrimenti si parla di *strutture miste equivalenti a pareti*;

STRUTTURA DEFORMABILE TORSIONALMENTE

- **strutture deformabili torsionalmente**, composte da telai e/o pareti, la cui rigidezza torsionale non soddisfa ad ogni piano la condizione $r^2/l_s^2 \geq 1$, nella quale:
 r^2 = raggio torsionale al quadrato è, per ciascun piano, il rapporto tra la rigidezza torsionale rispetto al centro di rigidezza laterale e la maggiore tra le rigidezze laterali, tenendo conto dei soli elementi strutturali primari, per strutture a telaio o a pareti (purché snelle e a deformazione prevalentemente flessionale), r^2 può essere valutato, per ogni piano, riferendosi ai momenti d'inerzia flessionali delle sezioni degli elementi verticali primari.
 l_s^2 = per ogni piano, è il rapporto fra il momento d'inerzia polare della massa del piano rispetto ad un asse verticale passante per il centro di massa del piano e la massa stessa del piano; nel caso di piano a pianta rettangolare $l_s^2 = (L^2 + B^2)/12$, essendo L e B le dimensioni in pianta del piano.

STRUTTURA A PENDOLO INVERSO

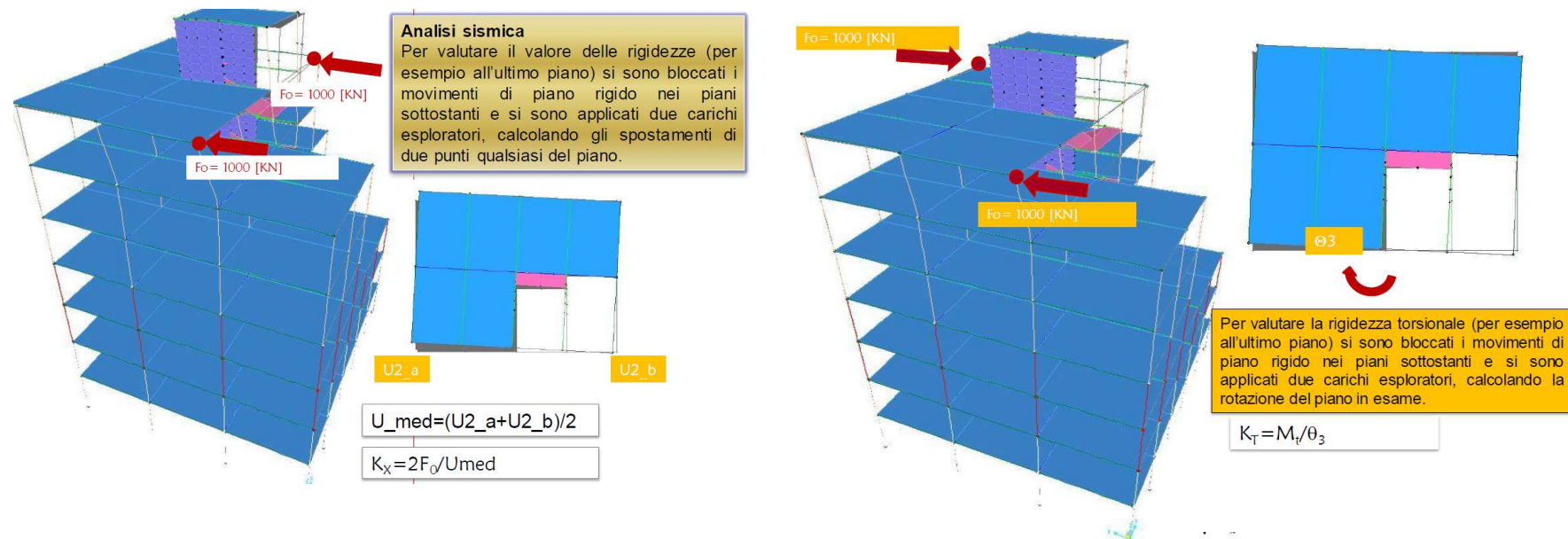
- *strutture a pendolo inverso*, nelle quali almeno il 50% della massa è nel terzo superiore dell'altezza della costruzione o nelle quali la dissipazione d'energia avviene alla base di un singolo elemento strutturale⁵.

Fattore di struttura q

Struttura deformabile torsionalmente.

Strutture deformabili torsionalmente, composte da telai e/o pareti, la cui rigidezza torsionale **non soddisfa ad ogni piano** la condizione $r^2/I_s^2 > 1.0$

r^2 : rapporto tra la rigidezza torsionale di piano rispetto al centro delle rigidezze e la **maggiore** fra le rigidezze di piano



Fattore di struttura q

Le strutture a pareti possono essere progettate sia in CD "A" sia in CD "B", mentre le strutture a pareti estese debolmente armate solo in CD "B".

Le strutture aventi i telai resistenti all'azione sismica realizzati, anche in una sola delle direzioni principali, con **travi a spessore** devono essere progettate in CD "B" salvo che tali travi non si possano considerare elementi strutturali "secondari".

Per strutture regolari in pianta, possono essere adottati i seguenti valori di α_w/α_1 :

a) Strutture a telaio o miste equivalenti a telai

- strutture a telaio di un piano
- strutture a telaio con più piani ed una sola campata
- strutture a telaio con più piani e più campate

$$\alpha_w/\alpha_1 = 1,1$$

$$\alpha_w/\alpha_1 = 1,2$$

$$\alpha_w/\alpha_1 = 1,3$$

b) Strutture a pareti o miste equivalenti a pareti

- strutture con solo due pareti non accoppiate per direzione orizzontale
- altre strutture a pareti non accoppiate
- strutture a pareti accoppiate o miste equivalenti a pareti

$$\alpha_w/\alpha_1 = 1,0$$

$$\alpha_w/\alpha_1 = 1,1$$

$$\alpha_w/\alpha_1 = 1,2$$

Per tipologie strutturali diverse da quelle sopra definite, ove s'intenda adottare un valore $q > 1,5$ il valore adottato deve essere adeguatamente giustificato dal progettista mediante l'impiego di analisi non lineari.

Per strutture non regolari in pianta può essere utilizzato il valore medio tra il valore 1 e i valori forniti precedentemente.

Fattore di struttura q

Qualora nella costruzione siano presenti pareti di calcestruzzo armato, per prevenirne il collasso fragile, i valori di q_0 devono essere ridotti mediante il fattore k_w , con:

$$k_w = \begin{cases} 1,00 & \text{per strutture a telaio e miste equivalenti a telai} \\ 0,5 \leq (1 + \alpha_0)/3 \leq 1 & \text{per strutture a pareti, miste equivalenti a pareti, torsionalmente deformabili} \end{cases}$$

dove α_0 è il valore assunto in prevalenza dal rapporto tra altezza totale (dalle fondazioni o dalla struttura scatolare rigida di base di cui al § 7.2.1, fino alla sommità) e lunghezza delle pareti; nel caso in cui gli α_0 delle pareti non differiscano significativamente tra di loro, il valore di α_0 per l'insieme delle pareti può essere calcolato assumendo, come altezza, la somma delle altezze delle singole pareti, come lunghezza, la somma delle lunghezze.

Qualora la domanda in resistenza allo *SLV* risulti inferiore a quella allo *SLD*, si può scegliere di progettare la capacità in resistenza sulla base della domanda allo *SLD* invece che allo *SLV*. In tal caso il fattore di comportamento allo *SLV* deve essere scelto in modo che le ordinate dello spettro di progetto per lo *SLV* siano non inferiori a quelle dello spettro di progetto per lo *SLD*.



Spettro di progetto

INTRO

D.M. 14 gennaio 2008 - Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni
Spettri di risposta ver. 1.0.3

Il documento Excel **SPETTRI-NTC** fornisce gli spettri di risposta rappresentativi delle componenti (orizzontali e verticale) delle azioni sismiche di progetto per il generico sito del territorio nazionale. La definizione degli spettri di risposta relativi ad uno Stato Limite è articolata in 3 fasi, ciascuna delle quali prevede la scelta dei valori di alcuni parametri da parte dell'utente:

FASE 1. Individuazione della pericolosità del sito (sulla base dei risultati del progetto S1 - INGV);
FASE 2. Scelta della strategia di progettazione;
FASE 3. Determinazione dell'azione di progetto.

La schermata relativa a ciascuna fase è suddivisa in sotto-schermate: l'utente può intervenire nelle sotto-schermate con sfondo grigio scuro mentre quelle con sfondo grigio chiaro consentono un immediato controllo grafico delle scelte effettuate. In ogni singola fase l'utente può visualizzare e stampare i risultati delle elaborazioni -in forma sia grafica che numerica- nonché i relativi riferimenti alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14.01.2008 pubblicate nella G.U. n.29 del 04.02.2008 Suppl. Ord. n.30 e scaricabile dal sito www.cslp.it

Programma ottimizzato per una visualizzazione schermo 1024 x 768

La verifica dell'idoneità del programma, l'utilizzo dei risultati da esso ottenuti sono onere e responsabilità esclusiva dell'utente. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici non potrà essere ritenuto responsabile dei danni risultanti dall'utilizzo dello stesso.

INTROFASE 1FASE 2FASE 3

Metodi di analisi lineari

- 1) **Analisi statica lineare;**
- 2) **Analisi dinamica lineare;**

Il metodo d'analisi lineare di riferimento per determinare gli effetti dell'azione sismica, per comportamenti strutturali sia dissipativi sia non dissipativi, è l'**analisi modale con spettro di risposta** o "**analisi lineare dinamica**".

In essa l'equilibrio è trattato dinamicamente e l'azione sismica è modellata attraverso lo spettro di progetto. In alternativa all'analisi modale si possono adottare tecniche di analisi più raffinate, quali l'integrazione al passo, modellando l'azione sismica attraverso storie temporali del moto del terreno.

Per le sole costruzioni la cui risposta sismica, in ogni direzione principale, non dipenda significativamente dai modi di vibrare superiori, è possibile utilizzare, per comportamenti strutturali sia dissipativi sia non dissipativi, il **metodo delle forze laterali** o "**analisi lineare statica**". In essa l'equilibrio è trattato staticamente, l'analisi della struttura è lineare e l'azione sismica è modellata attraverso lo spettro di progetto.

Analisi statica lineare

L'analisi statica lineare consiste nell'applicazione di forze statiche equivalenti alle forze di inerzia indotte dall'azione sismica e può essere effettuata per costruzioni che rispettino dei requisiti specifici, **a condizione che il periodo T_1 del modo di vibrare principale nella direzione in esame non superi $2,5 T_C$ o T_D e che la costruzione sia regolare in altezza.**

Per costruzioni civili o industriali che non superino i 40 m di altezza e la cui massa sia distribuita in modo approssimativamente uniforme lungo l'altezza, T_1 (in secondi) può essere stimato, in assenza di calcoli più dettagliati, utilizzando la formula seguente:

$$T_1 = 2\sqrt{d} \quad [7.3.6]$$

dove d è lo spostamento laterale elastico del punto più alto dell'edificio, espresso in metri, dovuto alla combinazione di carichi [2.5.7] applicata nella direzione orizzontale.



Gli effetti dell'azione sismica saranno valutati tenendo conto delle masse associate ai seguenti carichi gravitazionali:

$$G_1 + G_2 + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj} \quad [2.5.7]$$

Analisi statica lineare

Indicazione utile presente nelle vecchie norme NTC 2008

Per costruzioni civili o industriali che non superino i 40 m di altezza e la cui massa sia approssimativamente uniformemente distribuita lungo l'altezza, T_1 può essere stimato, in assenza di calcoli più dettagliati, utilizzando la formula seguente:

$$T_1 = C_1 \cdot H^{3/4}$$

dove: H è l'altezza della costruzione, in metri, dal piano di fondazione e

$C_1 = 0,085$ per costruzioni con struttura a telaio in acciaio,

$C_1 = 0,075$ per costruzioni con struttura a telaio in calcestruzzo armato

$C_1 = 0,050$ per costruzioni con qualsiasi altro tipo di struttura.

Analisi statica lineare

L'entità delle forze si ottiene dall'ordinata dello spettro di progetto corrispondente al periodo T_1 e la loro distribuzione sulla struttura segue la forma del modo di vibrare principale nella direzione in esame, valutata in modo approssimato.

La forza da applicare a ciascuna massa della costruzione è data dalla formula seguente:

$$F_i = F_h \cdot z_i \cdot \frac{W_i}{\sum_j z_j W_j} \quad [7.3.7]$$

dove:

F_h = $S_d(T_1) W \lambda / g$

F_i è la forza da applicare alla massa i-esima;

W_i e W_j sono i pesi, rispettivamente, della massa i e della massa j;

z_i e z_j sono le quote, rispetto al piano di fondazione (v. § 3.2.3.1), delle masse i e j;

$S_d(T_1)$ è l'ordinata dello spettro di risposta di progetto definito al § 3.2.3.5;

W è il peso complessivo della costruzione;

λ è un coefficiente pari a 0,85 se $T_1 < 2T_C$ e la costruzione ha almeno tre orizzontamenti, uguale a 1,0 in tutti gli altri casi;

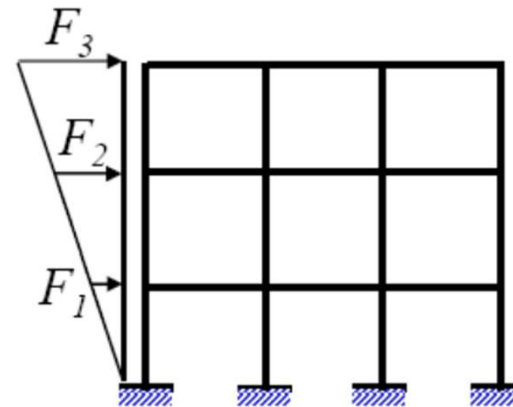
g è l'accelerazione di gravità.



Analisi statica lineare

L'analisi statica lineare consiste nell'applicazione di forze statiche equivalenti alle forze di inerzia indotte dall'azione sismica.

$$F_i = F_h \cdot z_i \cdot \frac{W_i}{\sum_j z_j W_j}$$



$$F_h = S_d(T_1) \cdot W \cdot \lambda / g$$

F_i è la forza da applicare alla massa i -esima;

W_i e W_j sono i pesi, rispettivamente, della massa i e della massa j ;

z_i e z_j sono le quote, rispetto al piano di fondazione (v. § 3.2.3.1), delle masse i e j ;

$S_d(T_1)$ è l'ordinata dello spettro di risposta di progetto definito al § 3.2.3.5;

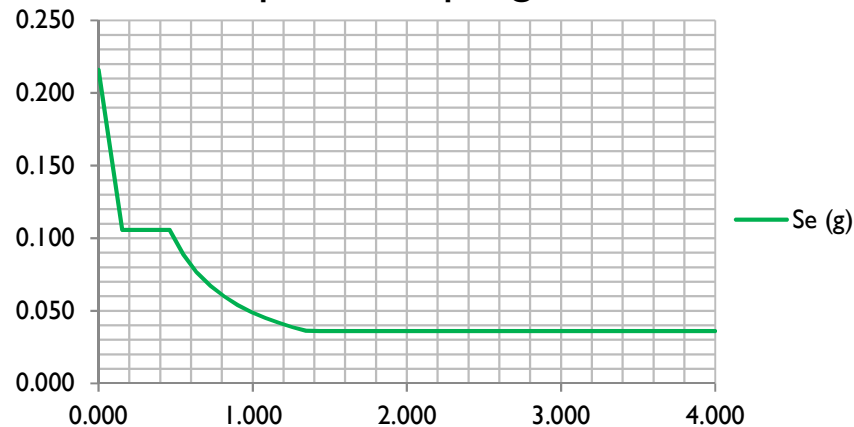
W è il peso complessivo della costruzione;

λ è un coefficiente pari a 0,85 se la costruzione ha almeno tre orizzontamenti e se $T_1 < 2T_c$, pari a 1,0 in tutti gli altri casi;

g è l'accelerazione di gravità.

Analisi statica lineare

Spettro di progetto



Lo spettro di progetto si ricava da quello elastico introducendo il fattore di struttura q .

$$q = q_0 \cdot K_R$$

Tipologia strutturale	q_0	
	CD "A"	CD "B"
Costruzioni di calcestruzzo (§ 7.4.3.2)		
Strutture a telaio, a pareti accoppiate, miste (v. § 7.4.3.1)	$4,5 \alpha_w / \alpha_1$	$3,0 \alpha_w / \alpha_1$
Strutture a pareti non accoppiate (v. § 7.4.3.1)	$4,0 \alpha_w / \alpha_1$	3,0
Strutture deformabili torsionalmente (v. § 7.4.3.1)	3,0	2,0
Strutture a pendolo inverso (v. § 7.4.3.1)	2,0	1,5
Strutture a pendolo inverso intelaiate monopiano (v. § 7.4.3.1)	3,5	2,5

K_R è un fattore riduttivo che dipende dalle caratteristiche di regolarità in altezza della costruzione, con valore pari ad 1 per costruzioni regolari in altezza e pari a 0,8 per costruzioni non regolari in altezza.

Procedura di calcolo

Si calcola il valore di T_1 per ciascuna direzione

Si verifica il rispetto dei requisiti

$$T_1 < 2.5 T_c$$

$$T_1 < T_d$$

Dallo spettro di progetto si ricava il valore $S_d(T_1)$

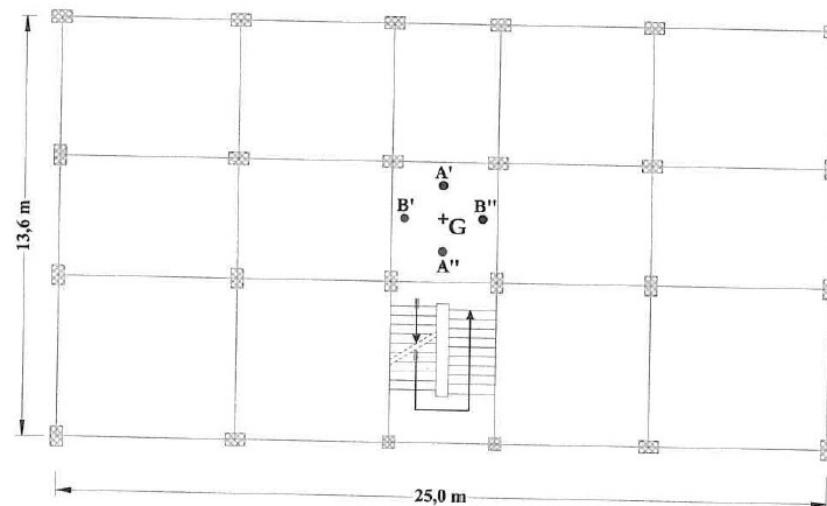
Si ricavano le forze di piano

$$F_h = S_d(T_1) \cdot W \cdot \lambda / g$$

Variabilità spaziale del moto

VARIABILITA' SPAZIALE DEL MOTO (NTC 7.2.6)

Per tenere conto della variabilità spaziale del moto sismico, nonché di eventuali incertezze nella localizzazione delle masse, al centro di massa deve essere attribuita una 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.



Variabilità spaziale del moto

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
		$-e_y$	$-0.3 E_y$	$+e_x$	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
		$-e_y$	$-0.3 E_y$	$+e_x$	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
		$-e_x$	$-0.3 E_x$	$+e_y$	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
		$-e_x$	$-0.3 E_x$	$+e_y$	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

Variabilità spaziale del moto

Per tener conto di eventuali imprecisioni si considera un'eccentricità del centro di massa del 5% delle dimensioni in pianta dell'edificio.

$$e_i = 0.05 * L_i \quad M_{ix}(+) = F_i * (e_i) \quad M_{ix}(-) = F_i * (-e_i)$$

Si combinano i momenti con le forze statiche equivalenti applicati al baricentro:

$$E_{ix}(+) = F_i + M_{ix}(+) \quad E_{ix}(-) = F_i + M_{ix}(-)$$

Stesso ragionamento in direzione y

$$\begin{aligned} \text{Si combinano poi le azioni } & \pm E_{ix} \pm 0.3E_{iy}; \\ & \pm E_{iy} \pm 0.3E_{ix} \end{aligned}$$

Analisi dinamica lineare

ANALISI DINAMICA LINEARE NTC2018

Il metodo d'analisi lineare di riferimento per determinare gli effetti dell'azione sismica, per comportamenti strutturali sia dissipativi sia non dissipativi, è l'analisi modale con spettro di risposta o “analisi lineare dinamica”.

L'analisi dinamica lineare consiste:

- 1) nella determinazione dei modi di vibrare della costruzione (analisi modale);
- 2) nel calcolo degli effetti dell'azione sismica, rappresentata dallo spettro di risposta di progetto, per ciascuno dei modi di vibrare individuati;
- 3) nella combinazione di questi effetti.

Devono essere considerati tutti i modi con massa partecipante significativa. È opportuno a tal riguardo considerare tutti i modi con massa partecipante superiore al 5% e comunque un numero di modi la cui massa partecipante totale sia superiore allo 85% per ogni verso dell'azione sismica.

Analisi dinamica lineare

Durante un evento sismico gli effetti massimi associati ad un modo di vibrare non si verificano generalmente nello stesso istante in cui si verificano quelli associati ad un altro modo di vibrare, e per tale ragione gli effetti finali non possono calcolarsi come una semplice somma.

COME SI COMBINANO GLI EFFETTI ASSOCIATI A CIASCUN MODO DI VIBRARE?

Se il periodo di vibrazione di ciascun modo significativo differisce di almeno il 10% da quello di tutti gli altri, le risposte dei modi di vibrare possono considerarsi indipendenti e la combinazione degli effetti può essere valutata utilizzando una combinazione SRSS (Square Root of Sum of Squares):

$$E = (\sum_i E_i^2)^{1/2}$$

Dove E_i rappresenta il valore dell'effetto relativo al modo i-esimo.

METODO DI COMBINAZIONE SRSS non più presente nelle NTC2018

Analisi dinamica lineare

METODO DI COMBINAZIONE CQC di riferimento delle NTC2018

Se i modi di vibrare non possono essere considerati indipendenti l'uno dall'altro le norme suggeriscono di utilizzare una combinazione quadratica completa CQC (Complete Quadratic Combination) data dalla relazione:

$$E = \left(\sum_j \sum_i \rho_{ij} \cdot E_i \cdot E_j \right)^{1/2}$$

$$\rho_{ij} = \frac{8\xi^2\beta_{ij}^{3/2}}{(1+\beta_{ij})[(1-\beta_{ij})^2 + 4\xi^2\beta_{ij}]} \quad \text{Coefficiente di correlazione tra il modo } i \text{ e il modo } j$$

ξ smorzamento viscoso dei modi i e j ; (si può porre pari al 5%)

β_{ij} è il rapporto tra l'inverso dei periodi di ciascuna coppia i - j di modi ($\beta_{ij} = T_j/T_i$).

Analisi dinamica lineare

ATTENZIONE!

La combinazione degli effetti di tipo quadratico (SRSS o CQC) comporta in output la perdita del segno degli effetti E_x ed E_y , ossia gli spostamenti e le sollecitazioni vengono dati in valore assoluto!

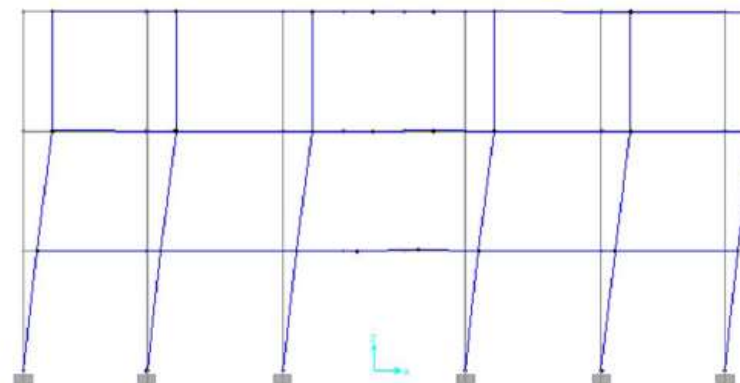
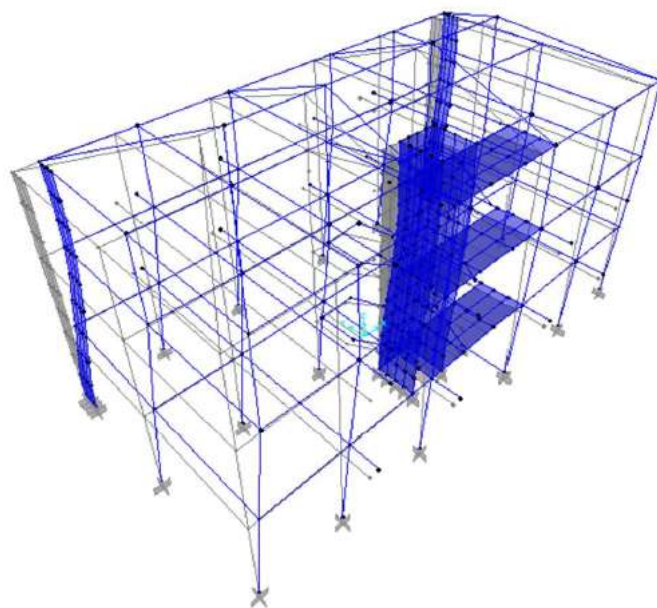
In molti casi la questione è irrilevante, diviene importante in presenza di sollecitazioni combinate sforzo normale-momento flettente e per l'adozione di alcune regole progettuali come nel caso del rispetto della gerarchia delle resistenze trave-pilastro, in cui servono i segni relativi delle diverse sollecitazioni.

Il problema si risolve dando ai risultati E_x ed E_y delle analisi dinamiche modali i **SEGNI DELLE SOLLECITAZIONI DOVUTE AL MODO PRINCIPALE DI VIBRARE NELLA DIREZIONE DI CIASCUNA DELLE DUE ANALISI.**

Analisi dinamica lineare

PUNTI FONDAMENTALI DELL'ANALISI DINAMICA LINEARE

I) DETERMINAZIONE DEI MODI DI VIBRARE

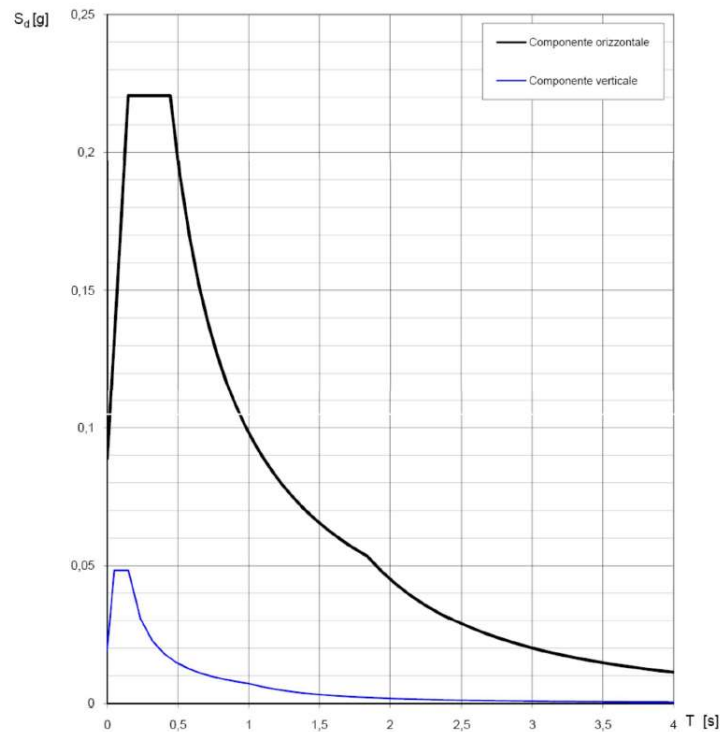


Analisi dinamica lineare

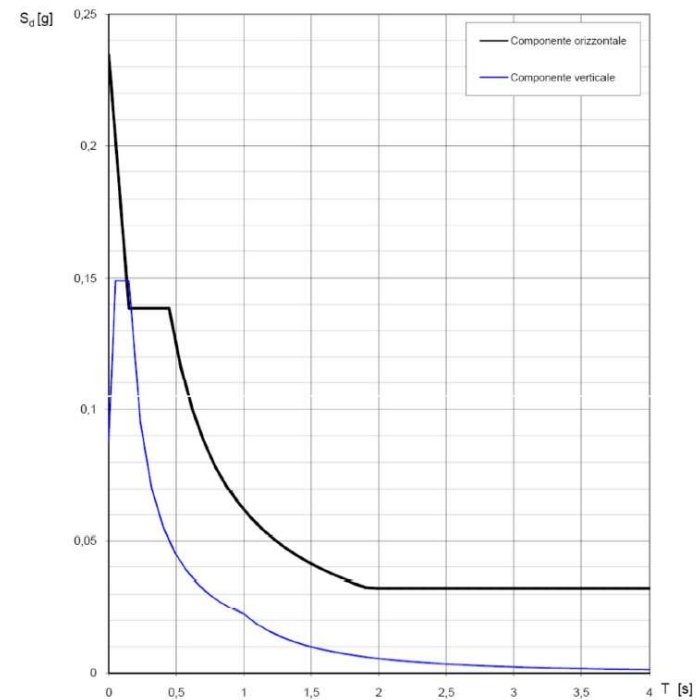
PUNTI FONDAMENTALI DELL'ANALISI

2) CALCOLO DEL FATTORE DI STRUTTURA E DEGLI SPETTRI ALLO SLD E ALLO SLV

Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato limite: SLD



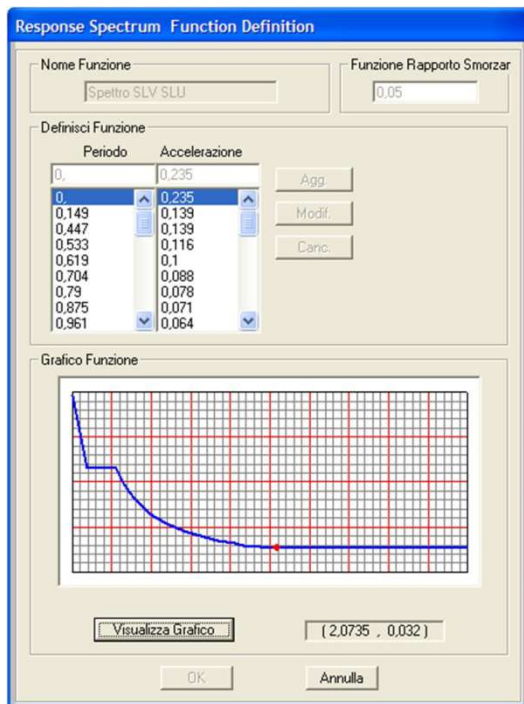
Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato limite: SLV



Analisi dinamica lineare

PUNTI FONDAMENTALI DELL'ANALISI

- 3) DEFINIZIONE DEGLI SPETTRI DI PROGETTO IN AMBIENTE SAP 2000
(tramite la funzione Response Spectrum e la modalità di combinazione degli effetti associati ai singoli modi)



Dati Caso Carico - Response Spectrum

Caso Carico: Sisma x

Nome Def: Mod/Mostra

Note: Progettoi

Combinazione Modale

- ☐ CQC
- ☒ SRSS
- ☐ Absolute
- ☐ GMC
- ☐ NRC 10 Percent
- ☐ Double Sum

GMC #1: 1.

GMC #2: 0.

Periodic + Rigid Type: SRSS

Combinazione Direzionale

- ☒ SRSS
- ☐ Absolute

Scala Error:

Caso Carico Modale

Usa Modelli da Questo Caso Carico Modale: MODAL

Carichi Applicati

Tipo di Carico	Nome Carico	Funzione	Fatt. Scala
Accel	U1	Spettro SLV	9.81
Accel	U1	Spettro SLV SLU	9.81

Mostra Parametri Carico Avanzato

Altri Parametri

Smorzamento Modale: Constant at 0.05

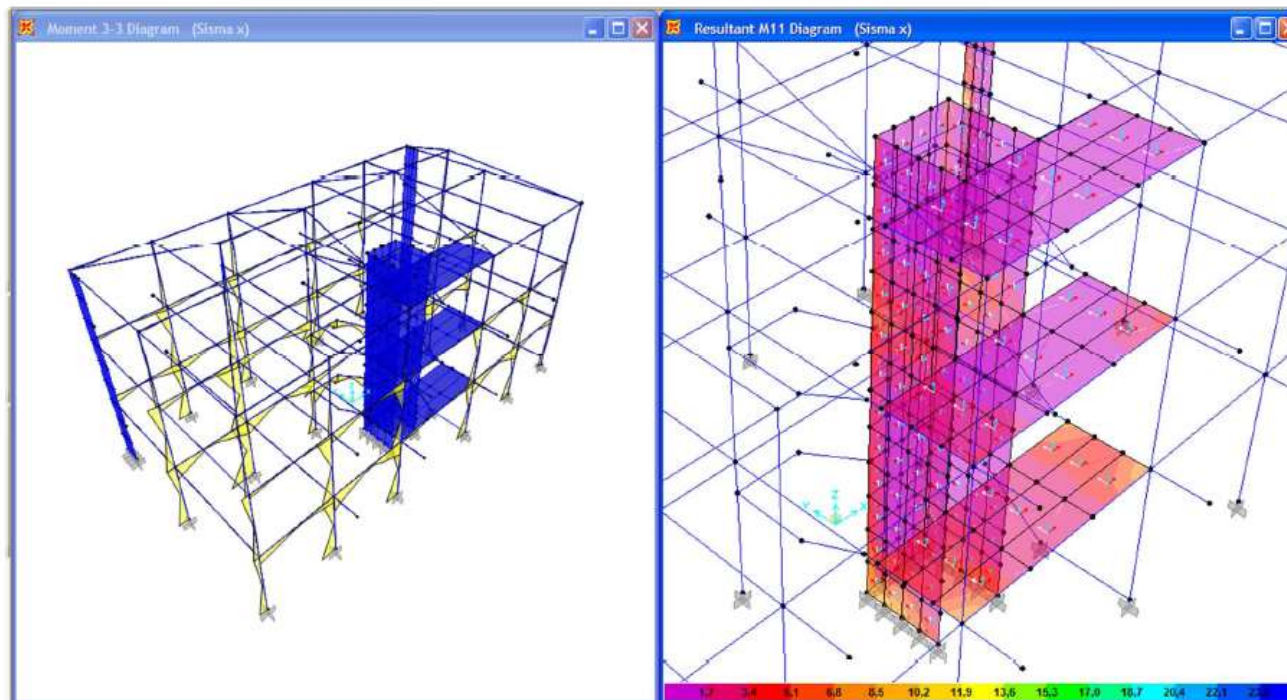
Mod/Mostra

OK Annulla

Analisi dinamica lineare

PUNTI FONDAMENTALI DELL'ANALISI

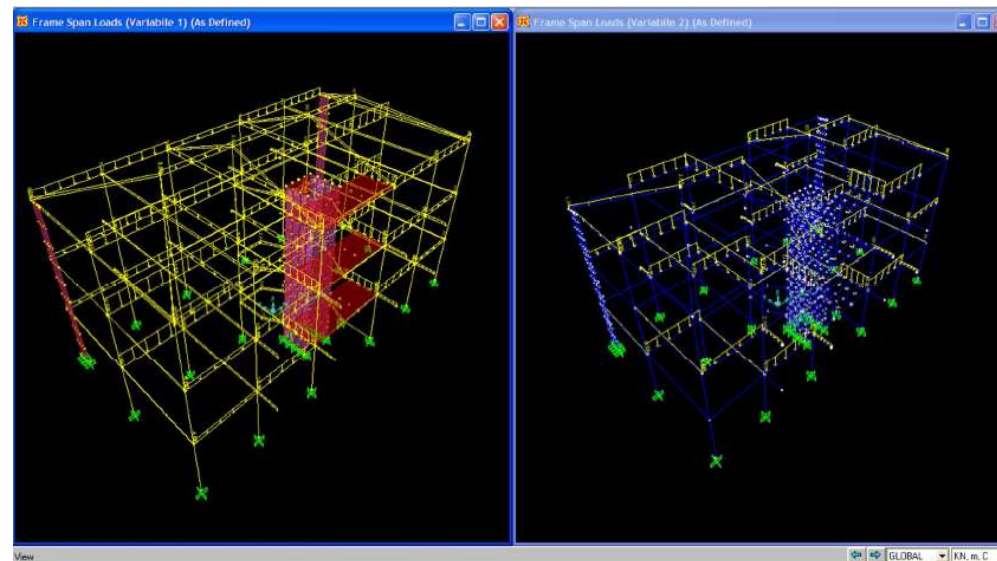
4) CALCOLO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALL'AZIONE SISMICA



Analisi dinamica lineare

PUNTI FONDAMENTALI DELL'ANALISI

- 5) VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA COMBINAZIONE DELL' AZIONE SISMICA CON I CARICHI VERTICALI (secondo la combinazione sismica definita dalla normativa)
- 6) VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI PRODOTTI DAI SOLI CARICHI VERTICALI (secondo la combinazione fondamentale allo SLU definita dalla normativa)



Analisi dinamica lineare

PUNTI FONDAMENTALI DELL'ANALISI

7) INVILUPPO DELLE SOLLECITAZIONI PRODOTTE DALLA COMBINAZIONE SISMICA E DALLA COMBINAZIONE FONDAMENTALE (a questo punto si hanno le sollecitazioni di base da cui partire per il dimensionamento delle travi a flessione)

