



Edifici esistenti (in c.a): valutazione della sicurezza sismica

Dott. Ing. Gerardo M. Verderame

1. Generalità

Gli edifici esistenti si distinguono da quelli di nuova progettazione per gli aspetti seguenti:

- 🏗 Il progetto riflette lo stato delle conoscenze al tempo della loro costruzione.
- 🏗 Il progetto può contenere difetti di impostazione concettuale e di realizzazione non immediatamente visibili.
- 🏗 Tali edifici possono essere stati soggetti a terremoti passati o di altre azioni accidentali i cui effetti non sono manifesti.

1. Generalità



La valutazione della sicurezza ed il progetto degli interventi sono normalmente affetti da un grado di incertezza diverso da quello degli edifici di nuova progettazione.

Ciò comporta l'impiego di:

- ▀ **fattori di confidenza** adeguati nelle verifiche di sicurezza
- ▀ **metodi di analisi** e di verifica appropriati
- ▀ **la completezza e affidabilità dell'informazione disponibile.**

1. Generalità

Valutazione di sicurezza sismica è obbligatoria se:

- ✓ Si sopraeleva o si amplia l'edificio
- ✓ Si modificano le destinazioni con incremento dei carichi superiori al 20%
- ✓ Si eseguono interventi strutturali che modificano l'organismo strutturale

Valutare la sicurezza significa:

- ✓ Procedere **quantitativamente** a stabilire se un edificio è in grado di resistere alle azioni sismiche di progetto

2. Requisiti di sicurezza

La valutazione della sicurezza degli edifici esistenti richiede in generale la considerazione di uno stato limite aggiuntivo rispetto a quelli di nuova progettazione, in quanto essi di regola non soddisfano né i principi di gerarchia delle resistenze né posseggono adeguata duttilità.

▀ **Stato limite di Danno Limitato (DL)**

▀ **Stato limite di Danno Severo (DS)**

▀ **Stato limite di Collasso (CO)**

2. Requisiti di sicurezza

▣ Stato limite di Danno Limitato (DL)

- ✓ i danni alla struttura sono di modesta entità senza significative escursioni in campo plastico.
- ✓ Resistenza e rigidezza degli elementi portanti non sono compromesse e non sono necessarie riparazioni.
- ✓ Gli elementi non strutturali presentano fessurazioni diffuse suscettibili di riparazioni di modesto impegno economico.
- ✓ Le deformazioni residue sono trascurabili.

2. Requisiti di sicurezza

▣ Stato limite di Danno Severo (DS)

- ✓ la struttura presenta danni importanti, con significative riduzioni di resistenza e rigidezza laterali.
- ✓ Gli elementi non strutturali sono danneggiati ma senza espulsione di tramezzi e tamponature.
- ✓ Data la presenza di deformazioni residue la riparazione dell'edificio risulta in genere economicamente non conveniente

2. Requisiti di sicurezza

🏠 Stato limite di Collasso (CO)

- ✓ la struttura è fortemente danneggiata, con ridotte caratteristiche di resistenza e rigidezza laterali residue, appena in grado di sostenere i carichi verticali.
- ✓ La maggior parte degli elementi non strutturali sono distrutti.
- ✓ L'edificio presenta un fuori piombo significativo e non sarebbe in grado di subire senza collasso ulteriori, anche modeste, accelerazioni al suolo la struttura è fortemente danneggiata, con ridotte caratteristiche di resistenza e rigidezza laterali residue, appena in grado di sostenere i carichi verticali.

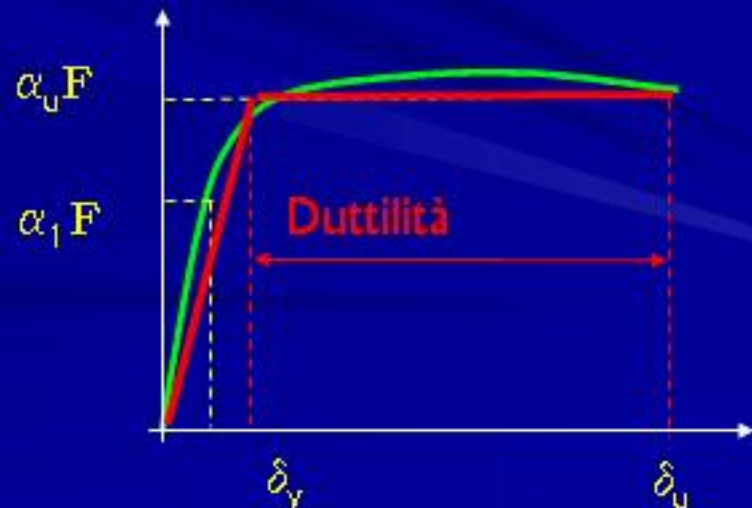
3. Criteri di verifica

Ai fini delle **verifiche di sicurezza** gli elementi strutturali vengono distinti in elementi/meccanismi “duttili” e “fragili”.

Elementi/meccanismi duttili

Un elemento strutturale può definirsi “duttile” se la crisi è attinta mediante attingimento di un meccanismo di tipo flessionale.

In generale, la verifica degli elementi “duttili”, viene eseguita confrontando gli effetti indotti dalle azioni sismiche in termini di deformazioni con le rispettive capacità espresse in termini di limiti di deformabilità.



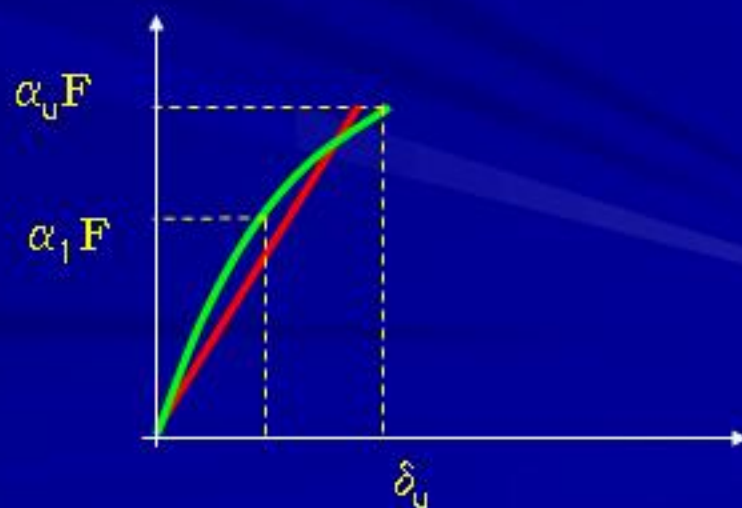
3. Criteri di verifica

Ai fini delle **verifiche di sicurezza** gli elementi strutturali vengono distinti in elementi/meccanismi “duttili” e “fragili”.

Elementi/meccanismi fragili

Un elemento strutturale può definirsi “fragile” se la crisi è attinta mediante attingimento di un meccanismo a taglio.

La verifica degli elementi “fragili” viene eseguita confrontando gli effetti indotti dalle azioni sismiche in termini di forze con le rispettive capacità espresse in termini resistenze.



3. Criteri di verifica

In generale, la **verifica di sicurezza** degli edifici esistenti viene eseguita con riferimento all'azione sismica data dallo spettro elastico (non ridotto) relativo alla zona sismica in esame e con riferimento allo stato limite (SL) analizzato. **(Verifica con lo spettro elastico).**

In tal caso:

- la verifica degli elementi “duttili” viene eseguita confrontando gli effetti indotti dalle azioni sismiche in **termini di deformazioni** con le rispettive capacità espresse in **termini di limiti di deformabilità**;
- la verifica degli elementi “fragili” viene eseguita confrontando gli effetti indotti dalle azioni sismiche in **termini di forze** con le rispettive capacità espresse in **termini resistenze**.

3. Criteri di verifica

Tuttavia, nel caso di analisi lineare, è consentito utilizzare lo spettro di progetto ottenuto dallo spettro elastico riducendone le ordinate per il fattore di struttura q , il cui valore è scelto nel campo fra 1.5 e 3.0 sulla base della regolarità nonché dei tassi di lavoro dei materiali sotto le azioni statiche. **(Verifica con il fattore di struttura q).**

In tal caso, la verifica degli elementi si effettua come segue:

- la verifica degli elementi “duttili” viene eseguita confrontando gli effetti indotti dall’azione sismica ridotta in **termini di forze** con le rispettive capacità espresse in **termini resistenze**
- la verifica degli elementi “fragili” viene eseguita confrontando gli effetti indotti dall’azione sismica ridotta in **termini di forze** con le rispettive capacità espresse in **termini resistenze**.

3. Criteri di verifica

▀ Valutazione degli effetti dell'azione sismica

La valutazione degli effetti dell'azione sismica è subordinata allo stato limite (SL) richiesto e al metodo di analisi impiegato.

3. Criteri di verifica

▀ Valutazione degli effetti dell'azione sismica

Analisi lineare

Nell'ipotesi di voler effettuare una analisi lineare (statica o dinamica) lo spettro da doversi adoperare è espresso in termini di accelerazioni e risulta determinato a partire dal corrispondente spettro elastico. In particolare, lo spettro di progetto da adoperarsi è subordinato allo stato limite in esame, ossia:

- SL di DL lo spettro di progetto da adottare è quello elastico ridotto di un fattore pari a 2.5;
- SL di DS lo spettro di progetto da adottare è quello elastico;
- SL di CO lo spettro di progetto da adottare è quello elastico amplificato di un fattore pari a 1.5.

Nel caso di elementi duttili gli effetti da considerare sono quelli derivanti dall'analisi strutturale, mentre nel caso di elementi fragili gli effetti derivanti dall'analisi strutturale possono venire modificati come indicato in 11.2.6.

3. Criteri di verifica

Valutazione degli effetti dell'azione sismica

Analisi lineare con l'impiego del fattore di struttura q

Tale metodo è applicabile ai soli stati limite di DS e DL.

Nell'ipotesi di voler effettuare una analisi lineare mediante l'impiego del fattore di struttura q , lo spettro di progetto in termini di accelerazioni da doversi adoperare si ottiene come segue:

- SL di DL lo spettro di progetto da adottare è quello elastico ridotto di un fattore pari a 2.5;
- SL di DS dallo spettro elastico riducendone le ordinate per il fattore di struttura q .

Nel caso di elementi duttili gli effetti da considerare sono quelli derivanti dall'analisi strutturale eseguita con il fattore q ,
mentre nel caso di elementi fragili gli effetti da considerare sono quelli derivanti dall'analisi strutturale eseguita con un fattore di struttura $q=1.50$.

3. Criteri di verifica

Valutazione degli effetti dell'azione sismica

Analisi statica non lineare

Nell'ipotesi di voler effettuare una analisi statica non lineare lo spettro da doversi adoperare è espresso in termini di spostamento ed è determinato a partire dal corrispondente spettro elastico. In particolare, in relazione ai tre stati limite si ha:

- SL di DL lo spettro di progetto da adottare è quello elastico ridotto di un fattore pari a 2.5;
- SL di DS lo spettro di progetto da adottare è quello elastico;
- SL di CO lo spettro di progetto da adottare è quello elastico amplificato di un fattore pari a 1.5.

Sia per gli elementi duttili che fragili gli effetti da considerare sono quelli derivanti dall'analisi strutturale.

3. Criteri di verifica

Valutazione delle capacità degli elementi strutturali

La valutazione delle capacità è subordinata allo stato limite (SL) richiesto e al tipo di elemento duttile/fragile.

Per il calcolo delle capacità degli **elementi duttili**:

*si utilizzano i **valori medi** delle proprietà dei materiali esistenti, come ottenuti dalle prove in situ e da eventuali informazioni aggiuntive, divisi per il **Fattore di Confidenza** in relazione al livello di conoscenza raggiunto.*

Per il calcolo delle capacità degli **elementi fragili**

*si utilizzano i **valori medi** delle proprietà dei materiali esistenti, come ottenuti dalle prove in situ e da eventuali informazioni aggiuntive, divisi per il **Fattore di Confidenza** in relazione al livello di conoscenza raggiunto, e divisi per il **coefficiente parziale** relativo.*

3. Criteri di verifica

🇮🇹 Valutazione delle capacità degli elementi strutturali

Stato limite di Danno Limitato (DL)

In tal caso, la capacità è da intendersi solo deformativa; essa, in mancanza di più specifiche valutazioni, si può definire in relazione ai valori limite di spostamento di interpiano validi per gli edifici nuovi oppure può esprimersi in termini di deformazione di snervamento” come riportato al punto 11.3.2.1 dell’Ordinanza.

3. Criteri di verifica

🇮🇹 Valutazione delle capacità degli elementi strutturali

Stato limite di Danno Severo (DS)

Per gli elementi/meccanismi duttili, la capacità deformativa è definita in termini di “deformazione di danno” θ_{SD} assunta pari $\frac{3}{4}$ della “deformazione ultima”.

Per gli elementi/meccanismi fragili la capacità resistente è espressa in termini di “resistenza prudenzialmente ridotta”. In particolare:

- per gli elementi/meccanismi fragili *travi e pilastri* la resistenza (taglio) è valutata secondo quanto riportato al punto 11.3.2.2.

dell'Ordinanza.

- per gli elementi fragili *nodi trave-pilastro* la resistenza (taglio) è valutata secondo quanto riportato al punto 11.3.2.3. dell'Ordinanza.

3. Criteri di verifica

🇮🇹 Valutazione delle capacità degli elementi strutturali

Stato limite di Collasso (CO)

Per gli elementi/meccanismi duttili, la capacità deformativa è definita in termini di “deformazione ultima” θ_U come definita nell’Allegato 11.A

Per gli elementi/meccanismi fragili la capacità resistente è espressa in termini di “resistenza ultima”. In particolare:

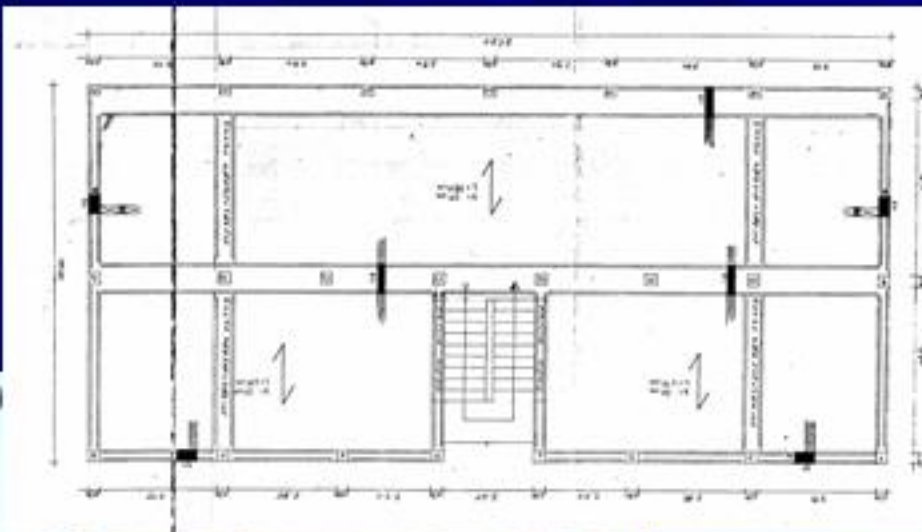
- per gli elementi/meccanismi fragili *travi e pilastri* la resistenza (taglio) è valutata secondo quanto riportato al punto 11.3.2.2. dell’Ordinanza.
- per gli elementi fragili *nodi trave-pilastro* la resistenza (taglio) è valutata secondo quanto riportato al punto 11.3.2.3. dell’Ordinanza.

4. I dati necessari per la valutazione

Le fonti di informazione

Le fonti da considerare per la acquisizione dei dati necessari sono:

- ✓ Documenti di progetto
- ✓ Rilievo strutturale
- ✓ Prove in situ e in laboratorio



4. I dati necessari per la valutazione

Tipologia del dato

- ✓ Definizione dell'organismo e verifica di regolarità
- ✓ Strutture di fondazione
- ✓ Categoria di suolo
- ✓ Geometria e dimensione della struttura portante
- ✓ Caratteristiche meccaniche delle parti strutturali
- ✓ Difetti nei particolari costruttivi e nei materiali
- ✓ Norme vigenti all'epoca del progetto
- ✓ Destinazione d'uso e categoria di importanza
- ✓ Eventuali danni subiti in precedenza e riparazioni effettuate

4. I dati necessari per la valutazione

La quantità e qualità dei dati acquisiti determina:

- ✓ **il metodo di analisi**
- ✓ **i fattori di confidenza** da applicare alle proprietà dei materiali da adoperare nelle verifiche di sicurezza

Ai fini della scelta del tipo di analisi e dei valori dei fattori di confidenza si distinguono i tre livelli di conoscenza seguenti:

LC1: Conoscenza Limitata

LC2: Conoscenza Adeguata

LC3: Conoscenza Accurata

4. I dati necessari per la valutazione

Gli aspetti che definiscono i livelli di conoscenza sono:

Geometria: le caratteristiche geometriche degli elementi strutturali,

Dettagli strutturali: quantità e disposizione delle armature (c.a.), collegamenti (acciaio), collegamenti tra elementi strutturali diversi, consistenza degli elementi non strutturali collaboranti,

Materiali: proprietà meccaniche dei materiali.

4. I dati necessari per la valutazione

LC1: Livello di Conoscenza Limitata

Geometria: la geometria della struttura è nota o in base a un rilievo o dai disegni originali. In quest'ultimo caso un rilievo visivo a campione dovrà essere effettuato per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni. I dati raccolti sulle dimensioni degli elementi strutturali saranno tali da consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo ad un'analisi lineare.

Dettagli costruttivi: i dettagli non sono disponibili da disegni costruttivi e devono venire ricavati sulla base di un **progetto simulato** eseguito secondo la pratica dell'epoca della costruzione.

E' richiesta una **limitata** verifica in-situ delle armature e dei collegamenti presenti negli elementi più importanti. I dati raccolti saranno tali da consentire verifiche locali di resistenza.

Proprietà dei materiali: non sono disponibili informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali, né da disegni costruttivi né da certificati di prova. Si adotteranno valori usuali della pratica costruttiva dell'epoca convalidati da **limitate** prove in-situ sugli elementi più importanti.

4. I dati necessari per la valutazione

LC2: Livello di Conoscenza Adeguata

Geometria: la geometria della struttura è nota o in base a un rilievo o dai disegni originali. In quest'ultimo caso un rilievo visivo a campione dovrà essere effettuato per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni. I dati raccolti sulle dimensioni degli elementi strutturali, insieme a quelli riguardanti i dettagli strutturali, saranno tali da consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo ad un'analisi lineare o non lineare.

Dettagli costruttivi: i dettagli sono noti da un'*estesa* verifica in-situ oppure parzialmente noti dai disegni costruttivi originali incompleti. In quest'ultimo caso è richiesta una *limitata* verifica in-situ delle armature e dei collegamenti presenti negli elementi più importanti.

Proprietà dei materiali: informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali sono disponibili in base ai disegni costruttivi o ai certificati originali di prova, o da *estese* verifiche in-situ. Nel primo caso dovranno anche essere eseguite *limitate* prove in-situ; se i valori ottenuti dalle prove in-situ sono minori di quelli disponibili dai disegni o dai certificati originali, dovranno essere eseguite estese prove in-situ.

4. I dati necessari per la valutazione

LC3: Livello di Conoscenza Accurata

Geometria: la geometria della struttura è nota o in base a un rilievo o dai disegni originali. In quest'ultimo caso un rilievo visivo a campione dovrà essere effettuato per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni. I dati raccolti sulle dimensioni degli elementi strutturali, insieme a quelli riguardanti i dettagli strutturali, saranno tali da consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo ad un'analisi lineare o non lineare.

Dettagli costruttivi: i dettagli sono noti o da *un'esauritiva* verifica in-situ oppure dai disegni costruttivi originali. In quest'ultimo caso è comunque richiesta una *limitata* verifica in-situ delle armature e dei collegamenti presenti negli elementi più importanti.

Proprietà dei materiali: informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali sono disponibili in base ai disegni costruttivi o ai certificati originali, o da *esauritive* verifiche in-situ. Nel primo caso dovranno anche essere eseguite *estese* prove in-situ; se i valori ottenuti dalle prove in-situ sono minori di quelli disponibili dai disegni o dai certificati originali, dovranno essere eseguite esauritive prove in-situ.

LIVELLI DI CONOSCENZA

informazione disponibile / metodi di analisi ammessi / fattori di confidenza

Livello di Conoscenza	Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione oppure rilievo ex-novo completo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>limitate</i> verifiche in-situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>limitate</i> prove in-situ	Analisi lineare statica o dinamica	1.35
LC2		Disegni costruttivi incompleti con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure <i>estese</i> verifiche in-situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali ¹ con <i>limitate</i> prove in-situ oppure <i>estese</i> prove in-situ	Tutti	1.20
LC3		Disegni costruttivi completi con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure <i>esauritive</i> verifiche in-situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto con <i>estese</i> prove in situ oppure <i>esauritive</i> prove in-situ	Tutti	1.00

4. I dati necessari per la valutazione

Livelli di rilievo/prove per edifici in c.a.

	Rilievo (dei dettagli costruttivi) ^(a)	Prove (sui materiali) ^{(b)(c)}
	Per ogni tipo di elemento "primario" (trave, pilastro...)	
Verifiche limitate	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 15% degli elementi	1 provino di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 1 campione di armatura per piano dell'edificio
Verifiche estese	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 35% degli elementi	2 provini di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 2 campioni di armatura per piano dell'edificio
Verifiche esaustive	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 50% degli elementi	3 provini di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 3 campioni di armatura per piano dell'edificio

4. I dati necessari per la valutazione

Alcune considerazioni sul rilievo dei dettagli costruttivi

Ai fini del rilievo dei dettagli, nel controllo del raggiungimento delle percentuali di elementi costruttivi indagati si terrà conto delle eventuali situazioni ripetitive, che consentano di estendere ad una più ampia percentuale i controlli effettuati su alcuni elementi strutturali facenti parte di una serie con evidenti caratteristiche di ripetitività, per uguale geometria e ruolo nello schema strutturale.

4. I dati necessari per la valutazione

Alcune considerazioni sulle prove materiali

Le prove sugli acciai sono finalizzate all'identificazione della classe dell'acciaio utilizzata con riferimento alla normativa vigente all'epoca di costruzione. Ai fini del raggiungimento del numero di prove sull'acciaio necessario per il livello di conoscenza è opportuno tener conto dei diametri (nelle strutture in c.a.) di più diffuso impiego negli elementi principali con esclusione delle staffe.

Ai fini delle prove sui materiali è consentito sostituire alcune prove distruttive, non più del 50%, con un più ampio numero, almeno il triplo, di prove non distruttive, singole o combinate, tarate su quelle distruttive.

Il numero di provini riportato nelle tabelle potrà esser variato, in aumento o in diminuzione, in relazione alle caratteristiche di omogeneità del materiale. Nel caso del calcestruzzo in opera tali caratteristiche sono spesso legate alle modalità costruttive tipiche dell'epoca di costruzione e del tipo di manufatto, di cui occorrerà tener conto nel pianificare l'indagine.

4. I dati necessari per la valutazione

I **fattori di confidenza** indicati in Tabella servono a un duplice scopo:

- a definire le resistenze dei materiali da utilizzare nelle formule di capacità degli elementi duttili e fragili. *Le resistenze medie, ottenute dalle prove in situ e dalle informazioni aggiuntive, sono divise per i fattori di confidenza;*
- a definire le sollecitazioni trasmesse dagli elementi duttili a quelli fragili. *A tale scopo, le resistenze medie degli elementi duttili, ottenute dalle prove in situ e dalle informazioni aggiuntive, sono moltiplicate per i fattori di confidenza.*

5. *L'azione sismica*

Azione sismica

- ✓ Per gli SL di **Danno Severo** e **Danno Limitato** l'azione sismica da adottare per la valutazione è quella per gli edifici nuovi.
- ✓ Le azioni per lo SL di **Collasso** si ottengono amplificando per 1.5 i valori indicati per lo SL di Danno Severo (per le strutture in c.a. ed acciaio)

6. Metodi di analisi

Gli effetti dell'azione sismica, da combinare con gli altri carichi permanenti e variabili, possono essere valutati con i seguenti metodi di analisi:

6.1. Analisi lineare

6.1.1 Analisi statica lineare

6.1.2 Analisi dinamica modale

6.2 Analisi lineare con fattore di struttura q

6.2.1 Analisi statica lineare

6.2.2 Analisi dinamica modale

6.3 Analisi Statica non Lineare

6. Metodi di analisi

Combinazione dell'azione sismica con le altre azioni

La verifica allo stato limite deve essere effettuata per la seguente combinazione degli effetti della azione sismica con le altre

$$F_d = \gamma_I E + G_k + \sum_i \Psi_{ji} \cdot Q_{ki}$$

essendo:

$\gamma_I \cdot E$ l'azione sismica per lo stato limite in esame; (γ_I =fattore di importanza)

G_k il valore caratteristico delle azioni permanenti;

Q_{ki} il valore caratteristico della azione variabile Q_i ;

$\Psi_{ji} = \Psi_{2i}$ coefficiente di combinazione che fornisce il valore quasi permanente della azione variabile Q_i

Ψ_{0i} coefficiente di combinazione che fornisce il valore raro della azione variabile Q_i

6. Metodi di analisi

Il peso complessivo della costruzione, W varia a seconda dello stato limite con la seguente espressione:

$$G_k + \sum_i (\Psi_{Ei} \cdot Q_{ki})$$

Ψ_{Ei} è un coefficiente di combinazione dell'azione variabile Q_i ed è pari:

• Ψ_{0i} (SL-Danno Limitato)

• Ψ_{2i} (SL-Danno Severo e Collasso)

Destinazione d'uso	Ψ_0	Ψ_2
Abitazione, Uffici	0,70	0,30
Uffici aperti al pubblico, Scuole, Negozi, Autorimesse	0,70	0,60
Tetti e coperture con nevi	0,70	0,35
Magazzini, Archivi	1,00	0,80
Vento	0,60	0,00

Carichi ai piani		Φ
Carichi indipendenti	Ultimo piano	1,0
	Altri piani	0,5
Archivi Carichi correlati ad alcuni piani	Ultimo piano	1,0
	Piani con carichi correlati	0,8
	Altri piani	0,5

6.1.1 Analisi Statica Lineare

Condizioni di applicabilità (1)

Regolarità in pianta a condizione che il primo periodo della struttura $T_1 \leq 2.5T_c$ con:

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

H : altezza edificio ≤ 40 m

C₁ : 0.085 struttura intelaiata acciaio

0.075 struttura intelaiata in c.a.

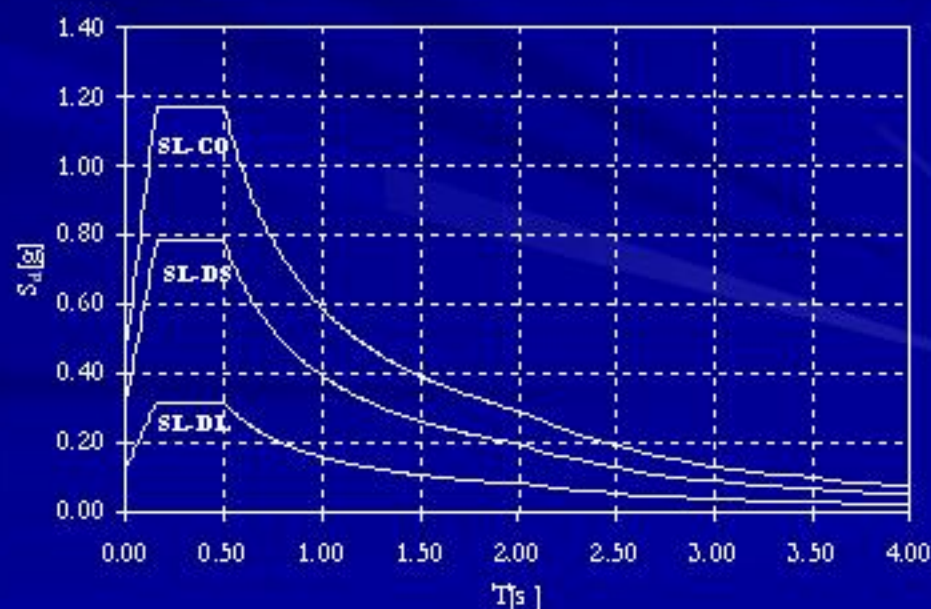
0.050 altri

6.1.1 Analisi Statica Lineare

Azione sismica: Spettro di progetto

In particolare, lo spettro di progetto da adoperarsi (in termini di accelerazioni) è subordinato allo stato limite in esame, ossia:

- SL di DL lo spettro di progetto da adottare è quello elastico ridotto di un fattore pari a 2.5;
- SL di DS lo spettro di progetto da adottare è quello elastico;
- SL di CO lo spettro di progetto da adottare è quello elastico amplificato di un fattore pari a 1.5.



6.1.1 Analisi Statica Lineare

Esecuzione dell'analisi

L'analisi consiste nell'applicare, un sistema di forze distribuite lungo l'altezza, nel baricentro degli impalcati, assumendo una distribuzione lineare e proporzionale ai pesi:

$$F_i = F_h \frac{(z_i \cdot W_i)}{\sum (z_j \cdot W_j)} \qquad F_h = S_d(T_1) \cdot W \cdot \lambda / g$$

$S_d(T_1)$	ordinata dello spettro di risposta di progetto, calcolato per i tre SL;
W	peso complessivo della costruzione che varia a seconda degli SL ;
λ	coefficiente pari a 0,85 se l'edificio ha almeno tre piani e se $T_1 < 2T_c$, pari a 1,0 in tutti gli altri casi;
g	l'accelerazione di gravità;
W_i e W_j	i pesi delle masse ai piani i e j rispettivamente;
z_i e z_j	le altezze dei piani i e j rispetto alle fondazioni.

6.1.1 Analisi Statica Lineare

Combinazione delle componenti dell'azione sismica

Nel caso di analisi lineari (statica e modale) i valori massimi della risposta ottenuti da ciascuna delle due azioni orizzontali applicate separatamente sono combinati sommando, ai massimi ottenuti per l'azione applicata in una direzione, il 30% dei massimi ottenuti per l'azione applicata nell'altra direzione (*punto 4.6 – Combinazione delle componenti dell'azione sismica*).

Quindi l'effetto globale del sisma E_{totx} in direzione longitudinale (X) e quello E_{toty} in direzione trasversale (Y) saranno pari a:

$$E_{totx} = E_X + 0.30E_Y$$

$$E_{toty} = E_Y + 0.30E_X$$

6.1.1 Analisi Statica Lineare

Condizioni di applicabilità (2)

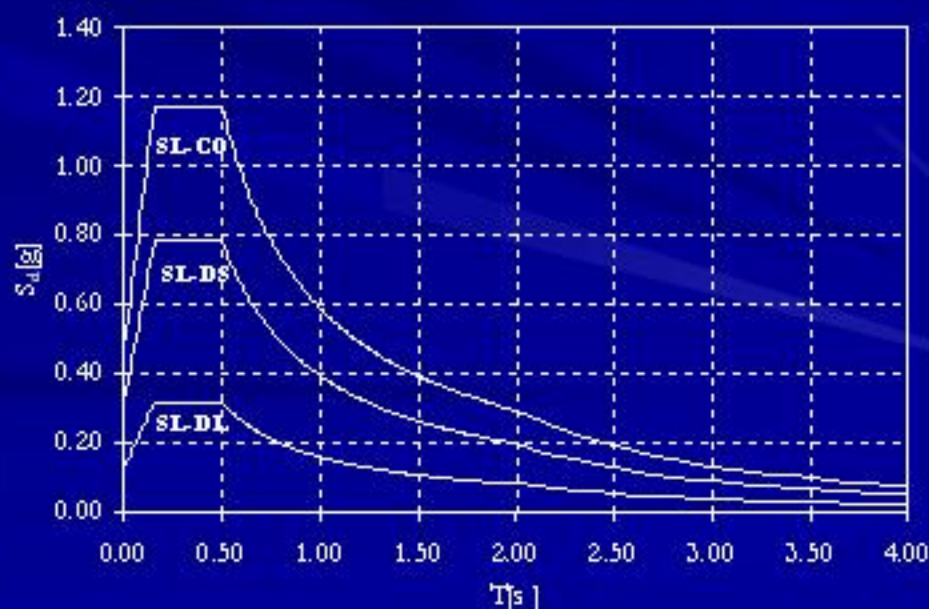
- Indicando con $\rho_i = D_i/C_i$ il rapporto tra il momento flettente fornito dall'analisi della struttura soggetta alla combinazione di carico sismica, e il corrispondente momento resistente (valutato con lo sforzo normale relativo alle condizioni di carico gravitazionali) dell' i -esimo elemento primario della struttura, e con $\rho_{\max}$ e $\rho_{\min}$ rispettivamente i valori massimo e minimo di tutti i $\rho_i > 2$ considerando tutti gli elementi primari della struttura, il rapporto non supera il valore 2.5;
- La capacità C_i degli elementi/meccanismi fragili è maggiore della corrispondente domanda D_i , quest'ultima calcolata sulla base della resistenza degli elementi duttili adiacenti, se il loro ρ_i è maggiore di 1, oppure sulla base dei risultati dell'analisi se il loro ρ_i è minore di 1.

6.1.2 Analisi Dinamica Modale

Azione sismica: Spettro di progetto

In particolare, lo spettro di progetto (in termini di accelerazioni) da adoperarsi è subordinato allo stato limite in esame, ossia:

- SL di DL lo spettro di progetto da adottare è quello elastico ridotto di un fattore pari a 2.5;
- SL di DS lo spettro di progetto da adottare è quello elastico;
- SL di CO lo spettro di progetto da adottare è quello elastico amplificato di un fattore pari a 1.5.



6.1.2 Analisi Dinamica Modale

Esecuzione dell'analisi

Vanno considerati tutti i modi con massa partecipante superiore al 5% oppure un numero di modi la cui massa partecipante totale sia superiore all'85%.

La combinazione dei modi può essere effettuata mediante:

SRSS a condizione che il periodo di vibrazione di ciascun modo differisca di almeno il 10% da tutti gli altri:

$$E = \sqrt{\sum E_i^2}$$

Una combinazione quadratica completa (CQC):

$$E = \sqrt{\sum_i \sum_j \rho_{ij} E_i E_j}$$

E è il valore totale della componente di risposta sismica che si sta considerando;

E_i è il valore della medesima componente dovuta al modo i ;

E_j è il valore della medesima componente dovuta al modo j ;

$\rho_{ij}(x)$ è il coefficiente di correlazione tra il modo i e il modo j ;

x è il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente (posto pari a 0,05);

6.1.2 Analisi Dinamica Modale

Alcune considerazioni

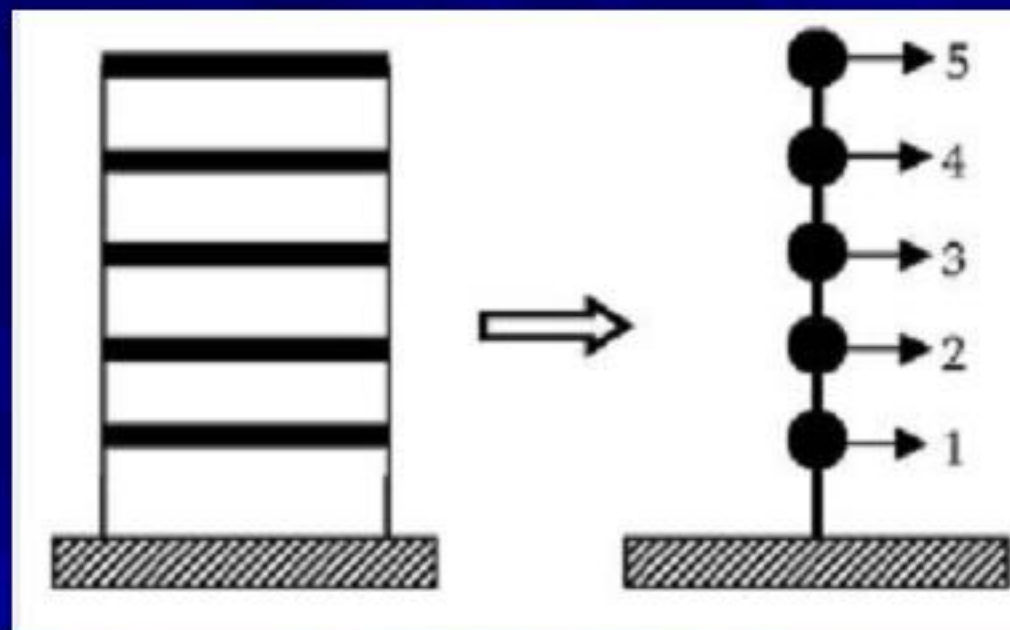
Sistema ad **n gradi di libertà** traslazionali (MDOF)

Oscillazioni libere in assenza di smorzamento

Equazione del moto:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{0\}$$

(perchè si verifichino oscillazioni il sistema deve essere caricato al tempo $t=0$ da energia potenziale interna o da energia cinetica)



6.1.2 Analisi Dinamica Modale

Alcune considerazioni

Effettuando l'analisi modale del sistema a più gradi di libertà si ottiene che il **vettore** $\{U\}$, soluzione dell'equazione del moto, è esprimibile come **combinazione lineare degli n vettori** $\{\Psi^{(i)}\}$, linearmente indipendenti, rappresentanti i **modi di vibrazione** del sistema

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{0\}$$



$$\{U\} = [X]\{p\} = \sum_{i=1}^n \{\Psi^{(i)}\} p_i$$



$$([K] - \omega^2 [M])\{\Psi\} = \{0\}$$

$[X]$ è una matrice contenente i vettori $\{\psi^{(i)}\}$ ordinati per colonna
 p_i è una funzione armonica di frequenza ω_i

Tale sistema omogeneo di equazioni lineari ammette soluzione diversa dalla banale solo se

$$\det([K] - \omega^2 [M]) = 0$$

6.1.2 Analisi Dinamica Modale

Alcune considerazioni

$$\det([K] - \omega^2[M]) = 0$$

$$\omega_1 \leq \omega_2 \leq \omega_3 \leq \dots \omega_n$$

$$\omega_i = 2\pi/T_i$$

da tale equazione algebrica di grado n si ricavano le **n pulsazioni proprie** del sistema e, ritornando nel sistema omogeneo, per ogni pulsazione (frequenza angolare) ω_i si trova la **forma modale corrispondente $\{\Psi^{(i)}\}$**

$$T_1 \geq T_2 \geq T_3 \geq \dots T_n$$

periodo fondamentale

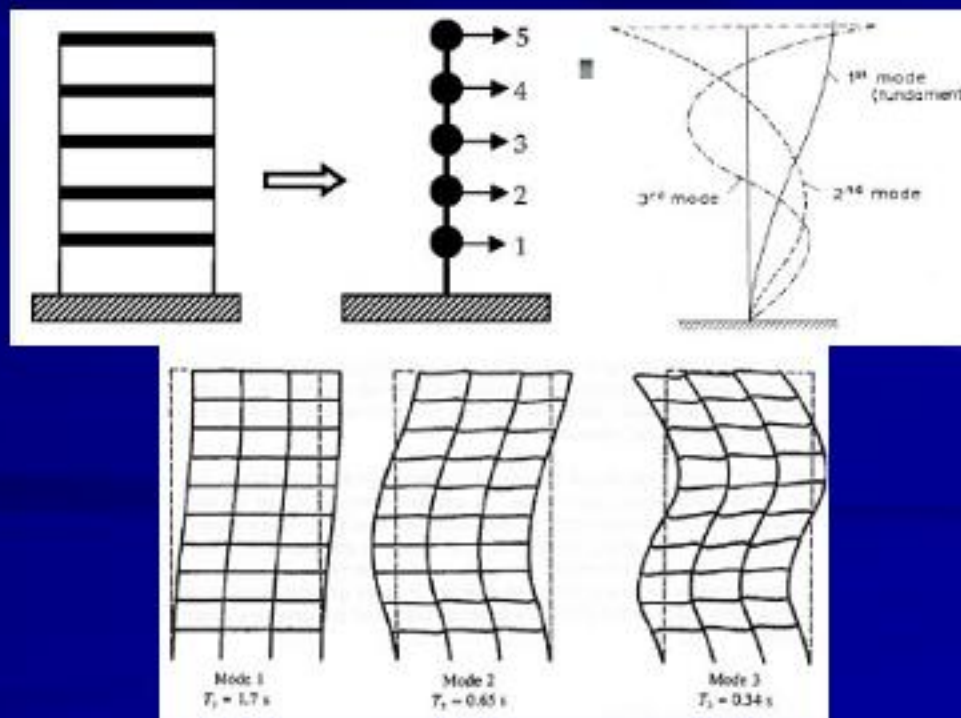
6.1.2 Analisi Dinamica Modale

Alcune considerazioni

Quando il sistema oscilla secondo il modo di vibrazione i -mo si ha:

$$\{U\} = \{\Psi^{(i)}\} p_i$$

essendo p_i una funzione armonica, gli spostamenti si annullano tutti nello stesso istante, così come nello stesso istante assumono i valori massimi



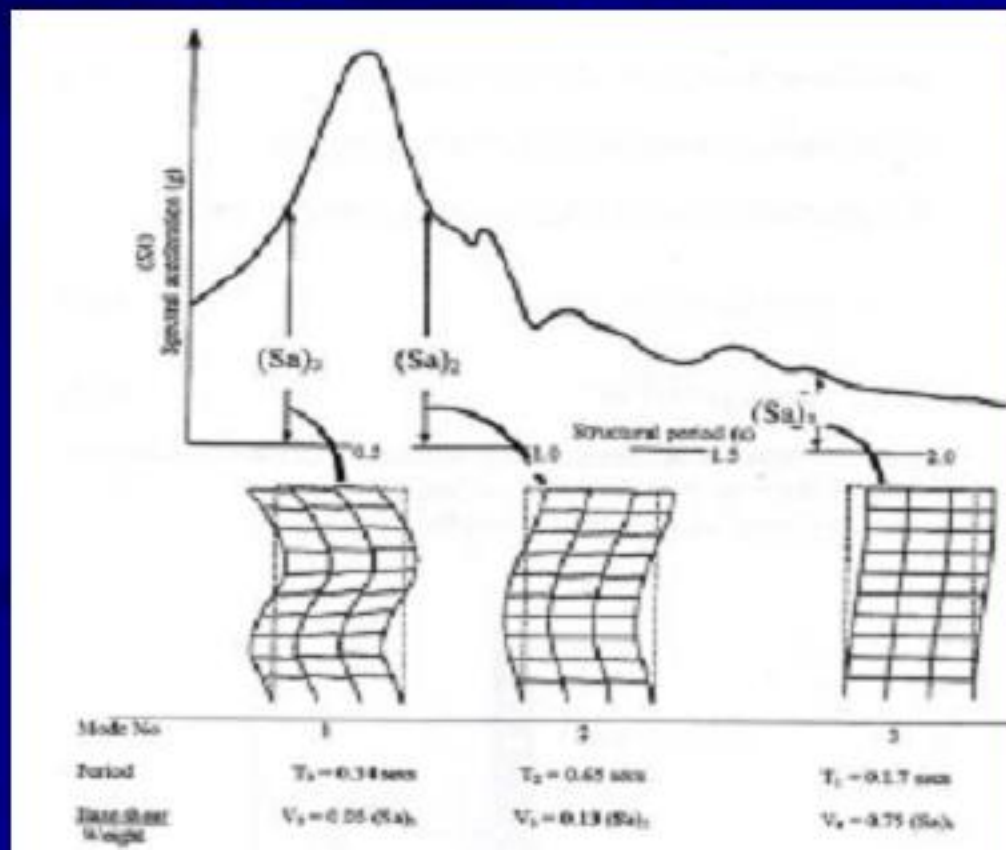
6.1.2 Analisi Dinamica Modale

Alcune considerazioni

Con l'analisi modale, avendo posto

$$\{U\} = \sum_1^n \{\Psi^{(i)}\} p_i$$

si riguarda il moto come sovrapposizione del moto di tanti oscillatori semplici di pulsazione ω_i .



6.1.2 Analisi Dinamica Modale

Combinazione delle componenti dell'azione sismica

Nel caso di analisi lineari (statica e modale) i valori massimi della risposta ottenuti da ciascuna delle due azioni orizzontali applicate separatamente sono combinati sommando, ai massimi ottenuti per l'azione applicata in una direzione, il 30% dei massimi ottenuti per l'azione applicata nell'altra direzione (*punto 4.6 – Combinazione delle componenti dell'azione sismica*).

Quindi l'effetto globale del sisma E_{totx} in direzione longitudinale (X) e quello E_{toty} in direzione trasversale (Y) saranno pari a:

$$E_{totx} = E_X + 0.30E_Y$$

$$E_{toty} = E_Y + 0.30E_X$$

6.1 Analisi lineare: Verifiche di sicurezza

Determinazione delle azioni di progetto

Nel caso di analisi statica lineare (statica o dinamica) le azioni di progetto D degli elementi strutturali, intese come effetti derivanti dall'azione sismica, sono derivabili dai risultati dell'analisi ed esprimibili in termini di forze e di deformazioni in relazione alla tipologia del meccanismo di crisi dell'elemento e allo stato limite in esame (SL).

Per gli elementi/ meccanismi “duttili” si assumono come azioni di progetto D i risultati derivanti dall'analisi.

In tal caso le azioni di progetto sono da intendersi in termini di deformazioni.

6.1 Analisi lineare: Verifiche di sicurezza

Determinazione delle azioni di progetto

Nel caso di analisi statica lineare (statica o dinamica) le azioni di progetto D degli elementi strutturali, intese come effetti derivanti dall'azione sismica, sono derivabili dai risultati dell'analisi ed esprimibili in termini di forze e di deformazioni in relazione alla tipologia del meccanismo di crisi dell'elemento e allo stato limite in esame (SL).

Per gli elementi/meccanismi “fragili” le azioni di progetto D sono da intendersi in termini di forze e sono, in generale, valutate dai risultati dell'analisi mediante condizioni di equilibrio sulle sollecitazioni trasmesse dagli elementi/meccanismi “duttili”.

In particolare la azione di progetto D può assumersi eguale:

- al valore D ottenuto dall'analisi, se la capacità C dell'elemento duttile (intesa come resistenza), valutata usando i valori medi delle proprietà dei materiali è minore o eguale al valore D ottenuto dall'analisi, ossia soddisfa $p = D/C \leq 1$,
- al valore di capacità dell'elemento duttile (intesa come resistenza), valutata usando i valori medi delle proprietà dei materiali moltiplicati per il fattore di confidenza, se il valore ottenuto dall'analisi risulta maggiore della capacità dell'elemento duttile C , valutata usando i valori medi delle proprietà dei materiali, ossia se $p = D/C > 1$.

6.1 Analisi lineare: Verifiche di sicurezza

Valutazione delle capacità

La valutazione delle capacità è subordinata alla tipologia di meccanismo di crisi dell'elemento strutturale e allo stato limite in esame (SL).

La capacità di elementi/meccanismi “duttili” è da intendersi in termini di deformazioni (limiti di deformabilità ovvero capacità deformativa).

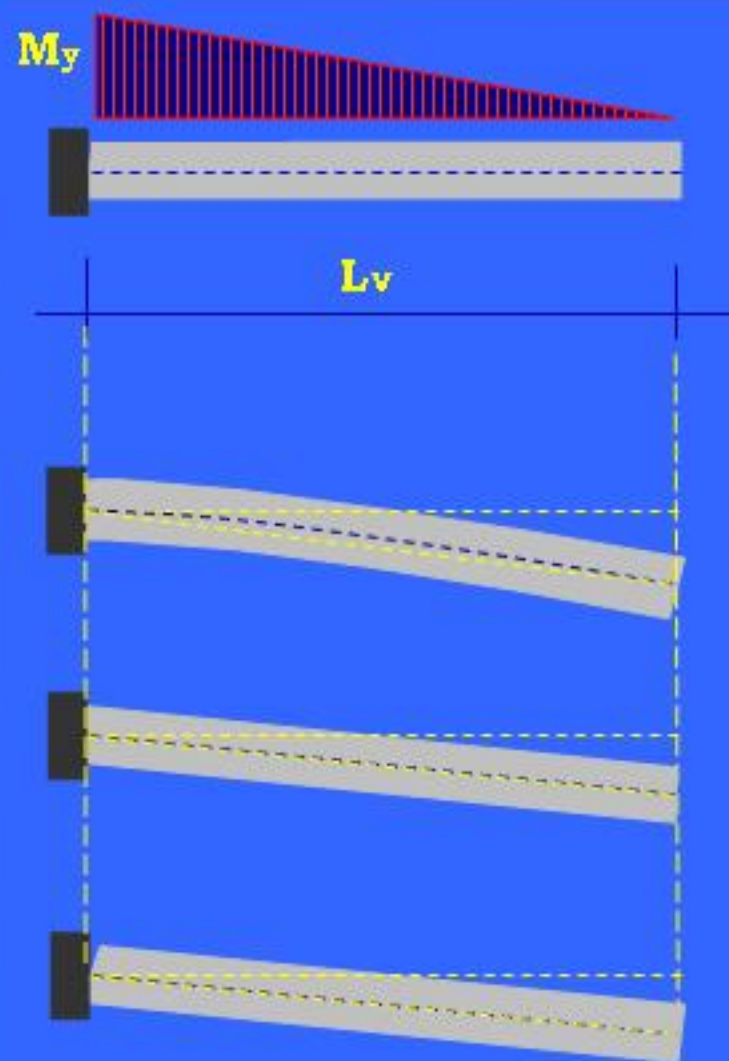
Per la valutazione della capacità si impiegano i valori medi delle proprietà dei materiali esistenti, direttamente ottenute da prove in sito e da eventuali informazioni aggiuntive, divise per i fattori di confidenza, in relazione al livello di conoscenza raggiunto.

La capacità di elementi/meccanismi “fragili” è da intendersi in termini di forze.

Per la valutazione della capacità si impiegano i valori medi delle proprietà dei materiali esistenti, direttamente ottenute da prove in sito e da eventuali informazioni aggiuntive, divise per i fattori di confidenza, in relazione al livello di conoscenza raggiunto e per il coefficiente di sicurezza parziale del materiale.

Modelli di capacità: elementi duttili

🇮🇹 Rotazione di snervamento



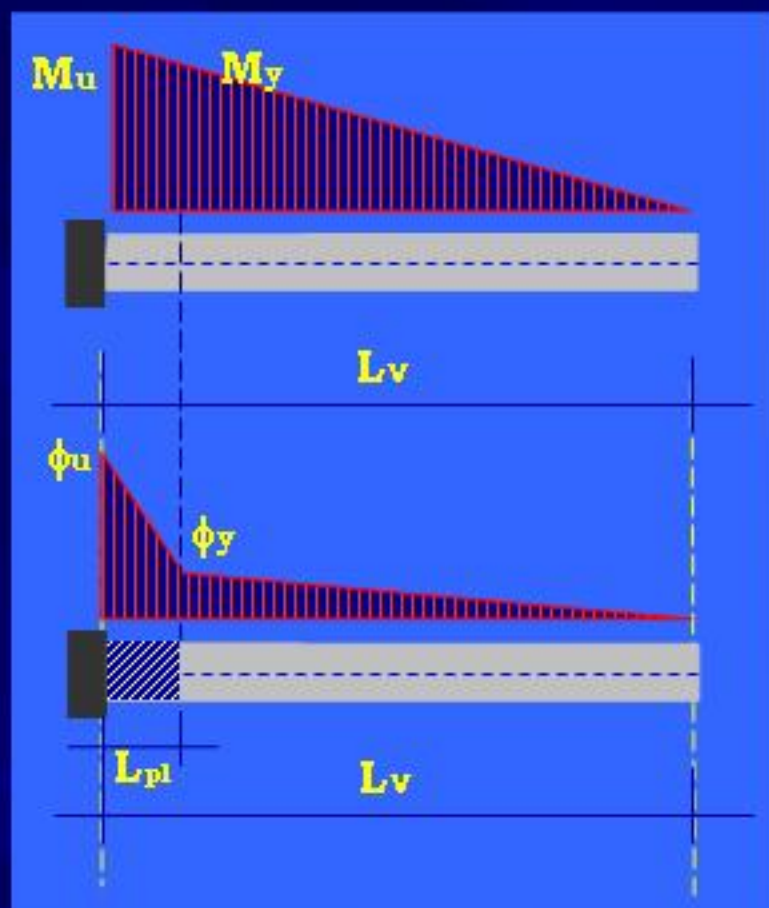
$$\theta_y = \phi_y \frac{L_v}{3} + 0,0013 \left(1 + 1,5 \frac{h}{L_v} \right) + 0,13 \phi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}}$$

Contributo
flessionale

Contributo
tagliante

Scorrimento
delle barre

Modelli di capacità: elementi duttili



Rotazione ultima

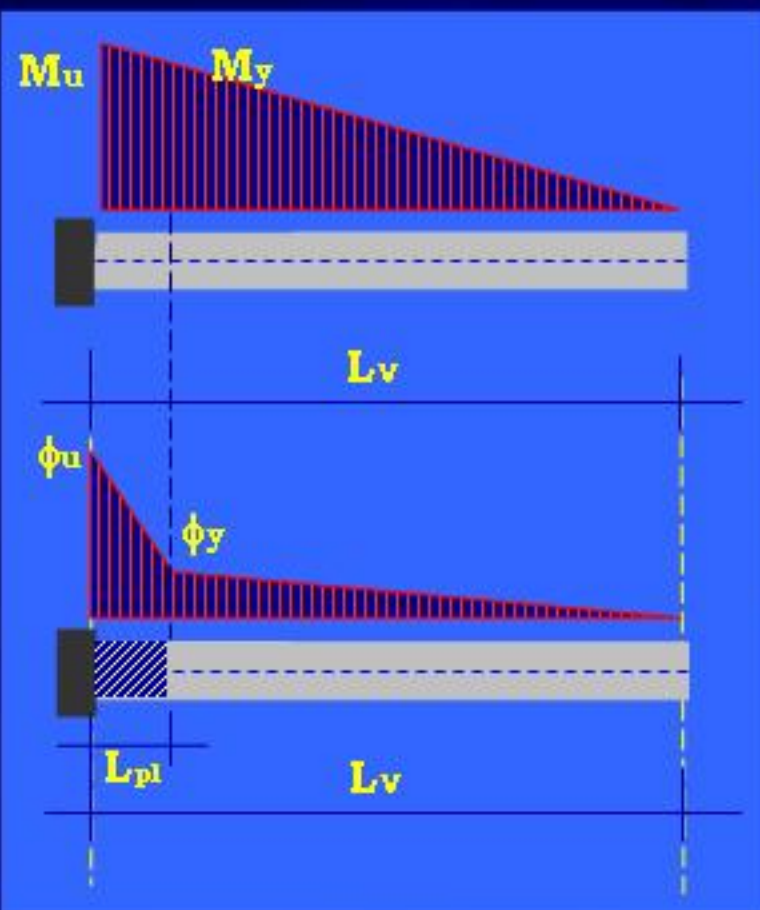
$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} \left(\theta_y + (\phi_u - \phi_y) L_{pl} \left(1 - \frac{0,5 L_{pl}}{L_v} \right) \right)$$

ϕ_y è la curvatura a snervamento valutata considerando la deformazione di snervamento dell'armatura tesa

ϕ_u è la curvatura ultima valutata considerando la deformazione ultima del cls

$$L_{pl} = 0,1 L_v + 0,17 h + 0,24 \frac{d_{bL} f_y (MPa)}{\sqrt{f_c (MPa)}}$$

Modelli di capacità: elementi duttili



Rotazione ultima

$v = N/(A_c f_c)$ lo sforzo assiale normalizzato agente su tutta la sezione A_c

$\omega = A_s f_y / (b h f_c)$ percentuali meccaniche di armatura

$\omega' = A'_s f_y / (b h f_c)$ percentuali meccaniche di armatura

$\rho_{sx} = A_{sx} / b_w s_k$ percentuale di armatura trasversale

ρ_d percentuale di eventuali armature diagonali

$\alpha = \left(1 - \frac{s_h}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s_h}{2h_o}\right) \left(1 - \frac{\sum b_1^2}{6h_o b_o}\right)$ fattore di efficienza del confinamento

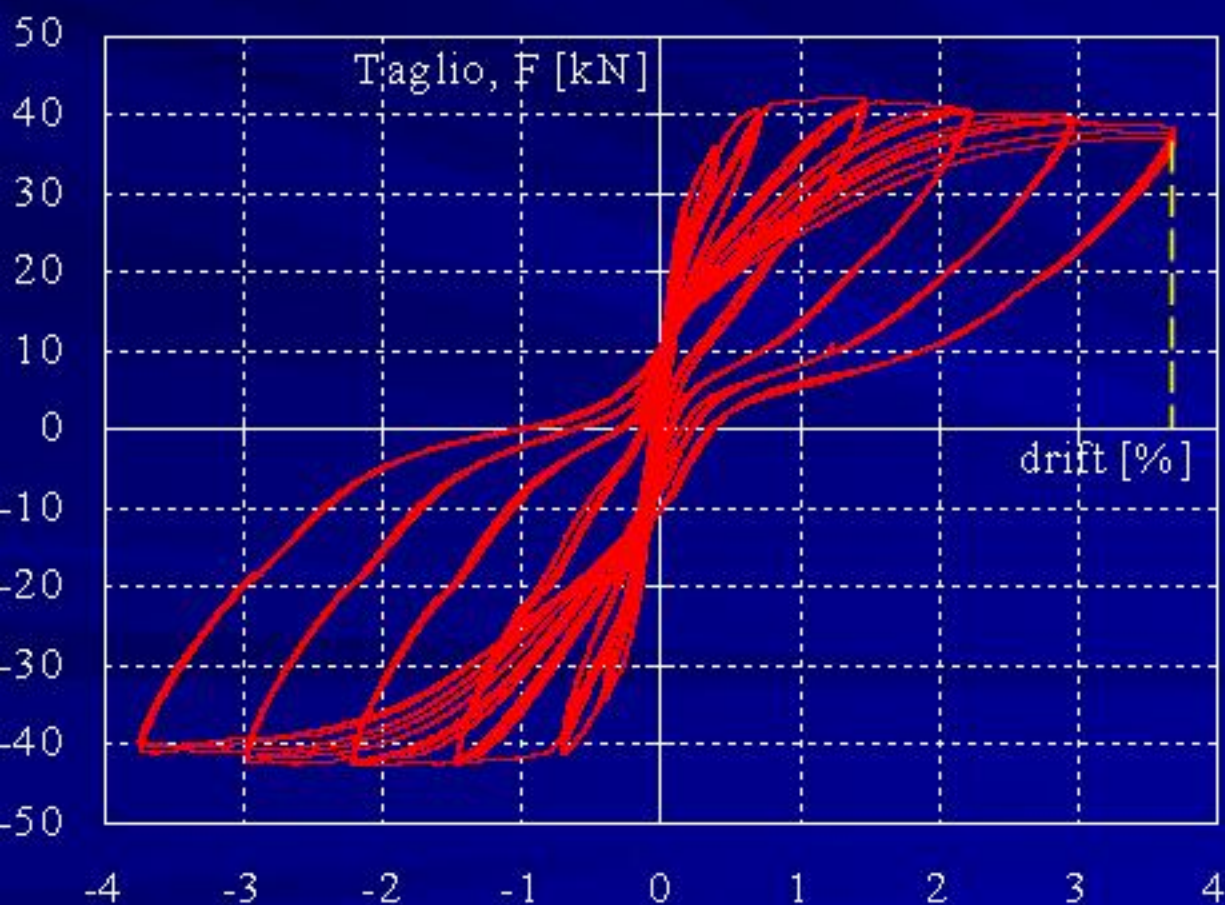
$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} 0,016 (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega)}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} \left(\frac{L_v}{h} \right)^{0,35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1,25^{100 \rho_d})$$

Modelli di capacità: elementi duttili

Colonna : prova ciclica

	monotona	ciclica
$\theta_{0.90F_{max}}$	5.24 (5.54)%	3.66%

$N = 270 \text{ kN}$ ($v \approx 0.1$)

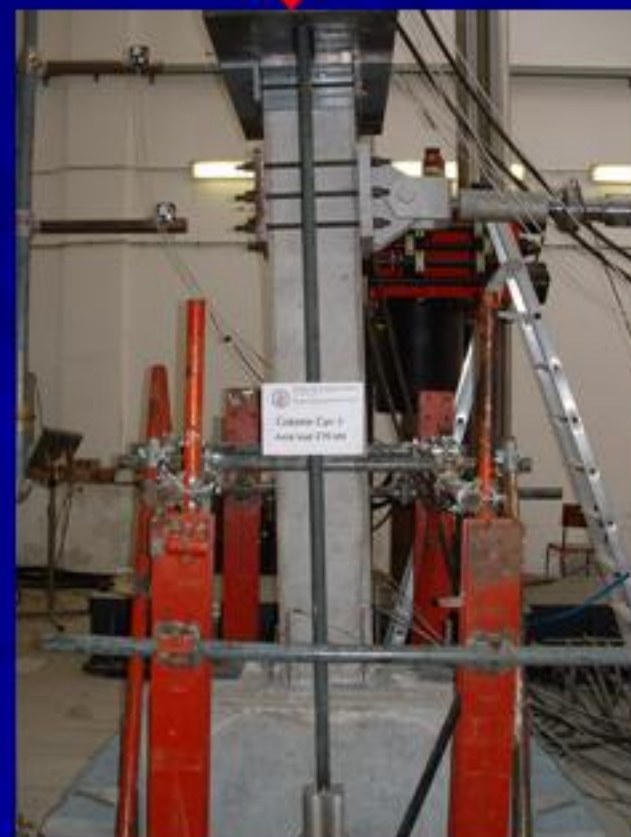
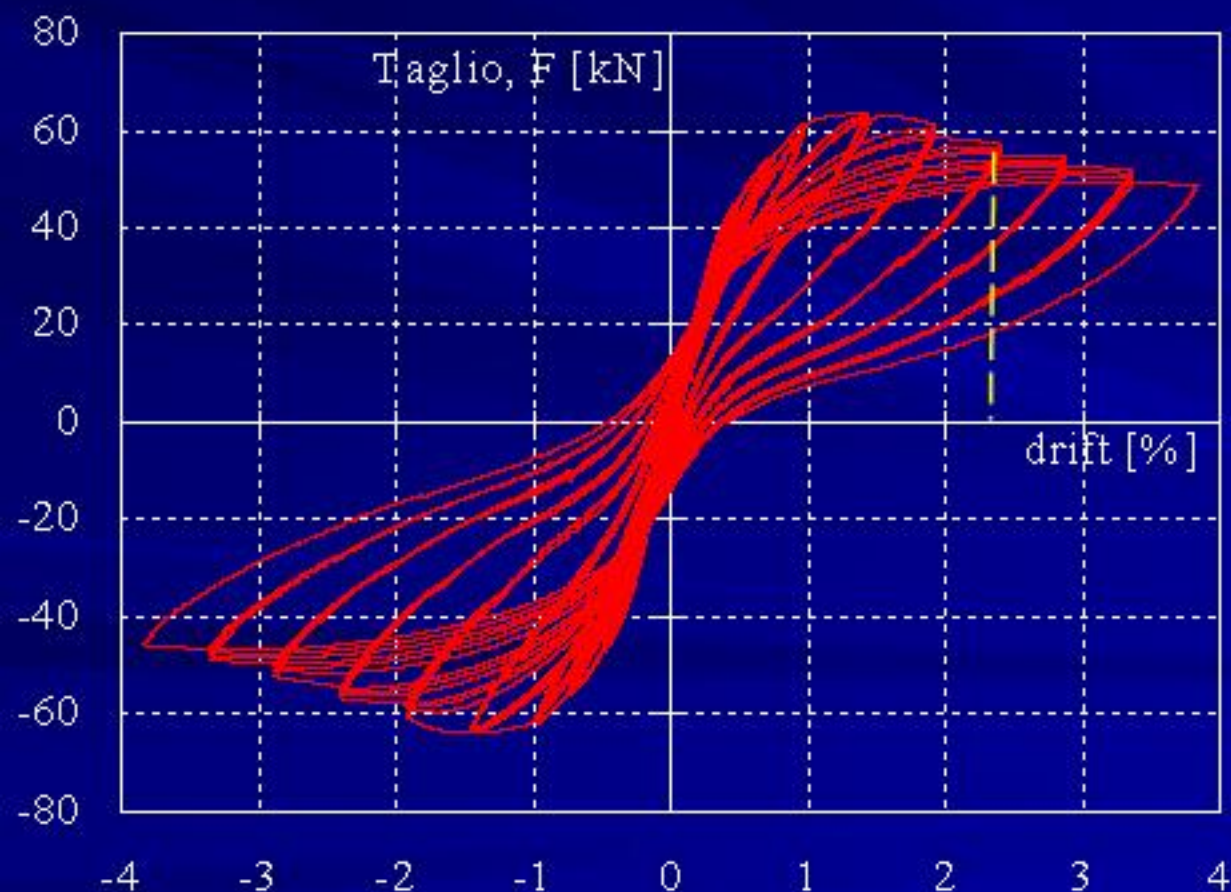


Modelli di capacità: elementi duttili

Colonna : prova ciclica

	ciclica $\nu=0.2$	ciclica $\nu=0.1$
$\theta_{0.90F_{max}}$	2.40%	3.66%

$N = 540 \text{ kN}$ ($\nu \equiv 0.2$)



Modelli di capacità: elementi fragili

Travi e pilastri: taglio

- ✓ La resistenza a taglio si valuta come per il caso di nuove costruzioni per situazioni non sismiche



Valutazione della resistenza a taglio

Si basa su tre valori della resistenza di calcolo:

- **VRd1** Resistenza di calcolo dell'elemento privo di armatura a taglio
- **VRd2** Massima forza di taglio di calcolo che può essere sopportata senza rottura delle bielle compresse convenzionali di calcestruzzo
- **VRd3** Forza di taglio di calcolo che può essere sopportata da un elemento con armatura a taglio

Modelli di capacità: elementi fragili

Travi e pilastri: taglio

La resistenza a taglio risulta

$$V_{u, \text{shear}} = \min \left\{ \begin{array}{l} V_{rd2} = 0.30 f_{cd} b_w d \\ V_{rd3} = V_{rd1} + V_{wd} \end{array} \right.$$

$$V_{rd1} = 0.25 f_{ctd} r (1 + 50 \rho_l) b_w d \delta$$

$$V_{wd} = A_{sw} f_{yd} \frac{0.90 d}{s} (\sin \alpha + \cos \alpha)$$

Modelli di capacità: elementi fragili

🏗️ Nodi trave-pilastro

La verifica di resistenza va effettuata solo per i nodo non interamente confinati

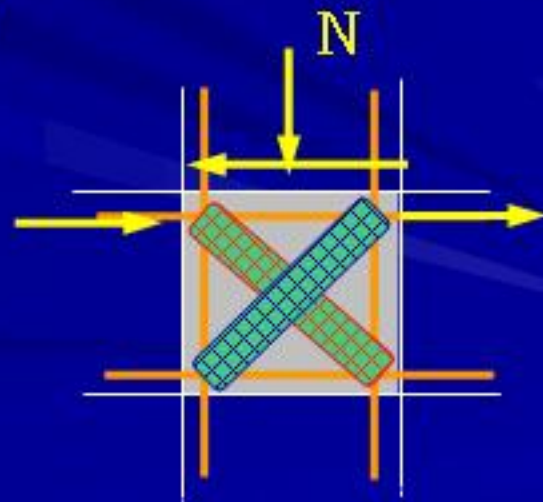
La resistenza deve essere verificata sia lungo la **diagonale tesa** che lungo la **diagonale compressa**:



A_g

$$\sigma_{nc} = \frac{N}{2A_g} - \sqrt{\left(\frac{N}{2A_g}\right)^2 + \left(\frac{V_n}{A_g}\right)^2} \leq 0.3\sqrt{f_c}$$

$$\sigma_{nc} = \frac{N}{2A_g} + \sqrt{\left(\frac{N}{2A_g}\right)^2 + \left(\frac{V_n}{A_g}\right)^2} \leq 0.5f_c$$



6.2 Analisi lineare con fattore q

L'analisi lineare (statica o dinamica) può effettuarsi, in alternativa, mediante l'utilizzo di un **fattore di struttura q** , quale parametro di riduzione delle ordinate spettrali.

Tale metodo **non** può applicarsi allo stato limite di collasso (SL-CO).

Il fattore di struttura va scelto nell'intervallo (1.50-3.00) in relazione alla regolarità della struttura e ai tassi tensionali degli elementi strutturali.

Ai fini delle verifiche degli *elementi fragili* va, in ogni caso, adottato un fattore di struttura $q=1.50$.

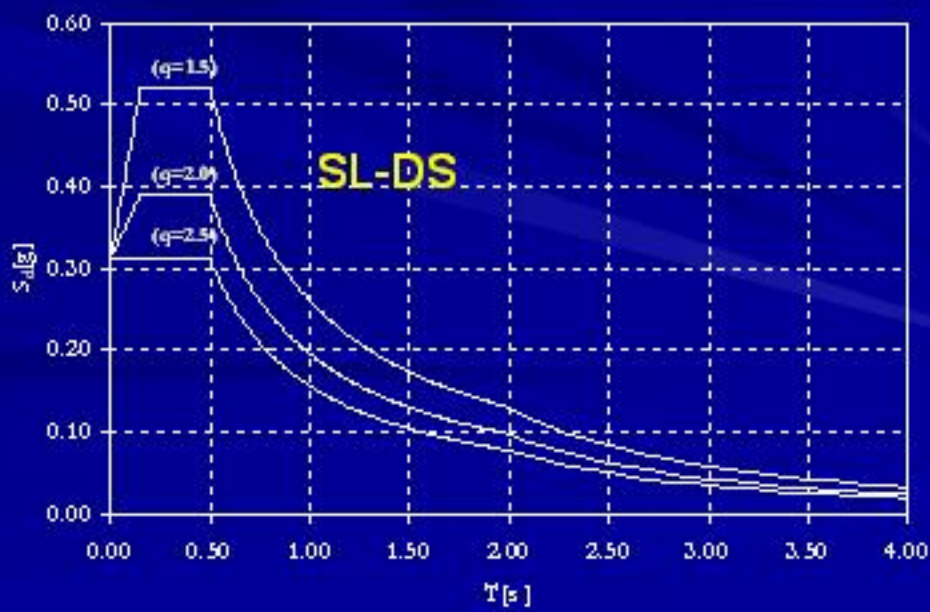
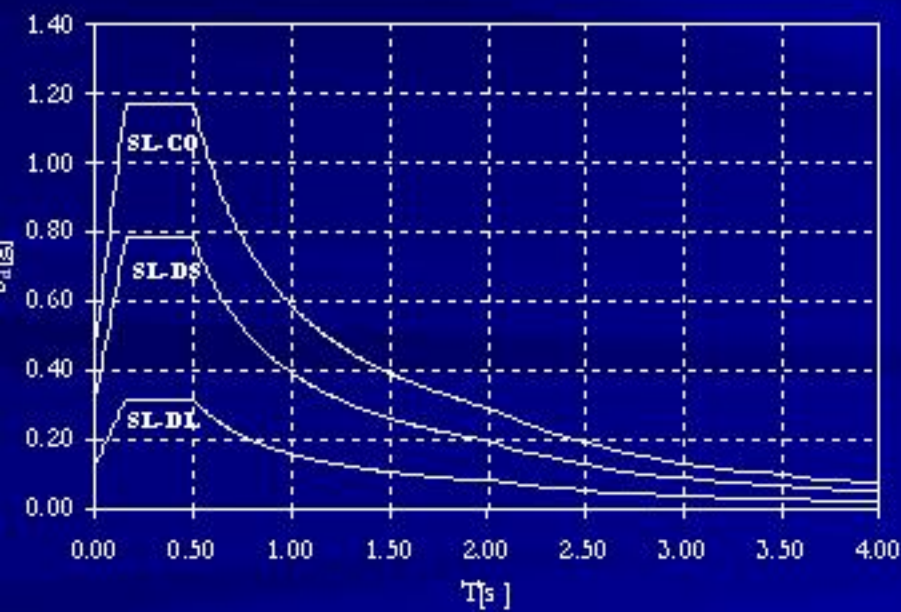
L'esecuzione delle analisi lineari (statica o dinamica) è effettuata in maniera del tutto analoga a quanto precedentemente esposto.

6.2 Analisi lineare con fattore q

Azione sismica: Spettro di progetto

In particolare, lo spettro di progetto (in termini di accelerazioni) da adoperarsi è subordinato allo stato limite in esame, ossia:

- SL di DL lo spettro di progetto da adottare è quello elastico ridotto di un fattore pari a 2.5;
- SL di DS lo spettro di progetto da adottare è quello elastico ridotto del fattore di struttura q



6.2 Analisi lineare con fattore q

Combinazione delle componenti dell'azione sismica

Nel caso di analisi lineari (statica e modale) i valori massimi della risposta ottenuti da ciascuna delle due azioni orizzontali applicate separatamente sono combinati sommando, ai massimi ottenuti per l'azione applicata in una direzione, il 30% dei massimi ottenuti per l'azione applicata nell'altra direzione (*punto 4.6 – Combinazione delle componenti dell'azione sismica*).

Quindi l'effetto globale del sisma E_{totx} in direzione longitudinale (X) e quello E_{toty} in direzione trasversale (Y) saranno pari a:

$$E_{totx} = E_X + 0.30E_Y$$

$$E_{toty} = E_Y + 0.30E_X$$

6.2 Analisi lineare q: Verifiche di sicurezza

Determinazione delle azioni di progetto

Nel caso di analisi lineare con spettro elastico ridotto (fattore di struttura q) si assumono quali azioni di progetto direttamente i risultati derivanti dall'analisi.

In questo caso, sia per gli elementi/meccanismi “duttili” che “fragili”, le azioni di progetto sono da intendersi in termini di forze.

6.2 Analisi lineare q: Verifiche di sicurezza

Valutazione delle capacità

La valutazione delle capacità è subordinata allo stato limite in esame (SL).

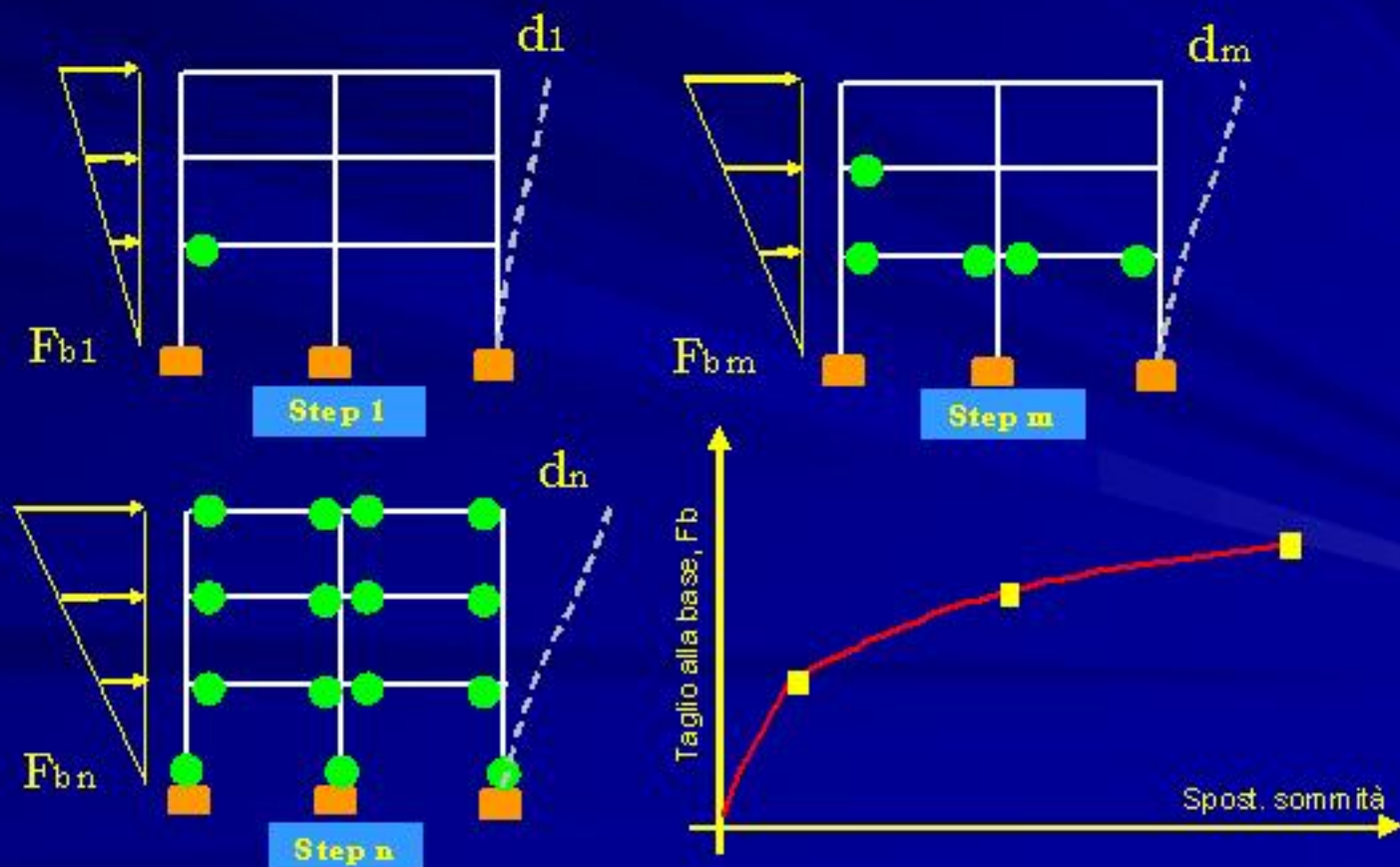
La capacità degli elementi/meccanismi sia “duttili” che “fragili” è da intendersi in termini di forze.

Per la valutazione della capacità degli elementi duttili, si impiegano i valori medi delle proprietà dei materiali esistenti, direttamente ottenute da prove in sito e da eventuali informazioni aggiuntive, divise per i fattori di confidenza, in relazione al livello di conoscenza raggiunto.

Per la valutazione della capacità degli elementi fragili, si impiegano i valori medi delle proprietà dei materiali esistenti, direttamente ottenute da prove in sito e da eventuali informazioni aggiuntive, divise per i fattori di confidenza, in relazione al livello di conoscenza raggiunto e per il coefficiente di sicurezza parziale del materiale.

6.3 Analisi Statica non Lineare

Consiste nell'applicare all'edificio i carichi gravitazionali e un sistema di forze orizzontali crescenti in maniera monotona fino al raggiungimento delle condizioni ultime.

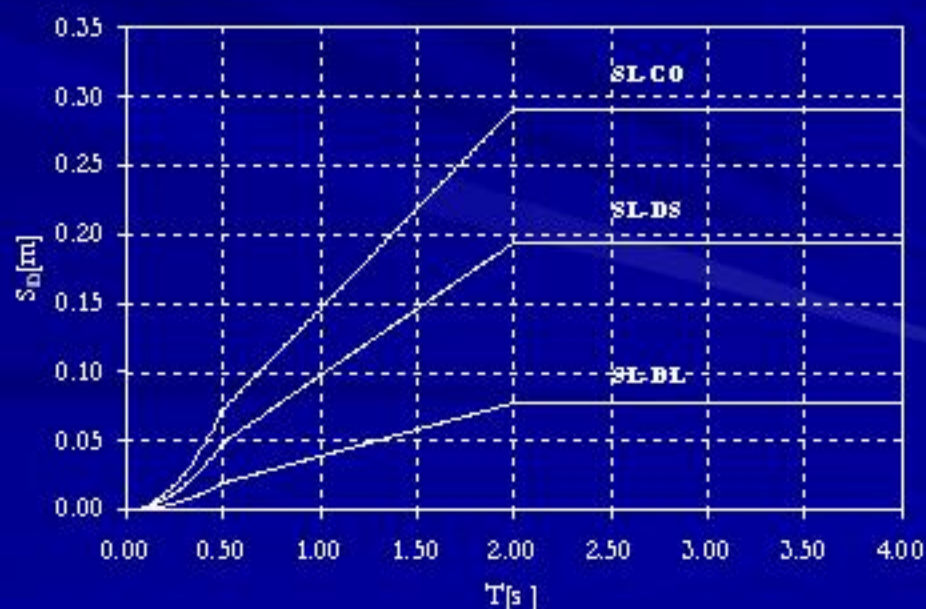


6.2 Analisi lineare con fattore q

Azione sismica: Spettro di progetto

In particolare, lo spettro di progetto (in termini di spostamenti) da adoperarsi è subordinato allo stato limite in esame, ossia:

- SL di DL lo spettro di progetto da adottare è quello elastico ridotto di un fattore pari a 2.5;
- SL di DS lo spettro di progetto da adottare è quello elastico;
- SL di CO lo spettro di progetto da adottare è quello elastico amplificato di un fattore pari a 1.5.



6.3 Analisi Statica non Lineare

Esecuzione dell'analisi

Il metodo si articola nei seguenti passi:

1. Determinazione di un legame forza-spostamento tra la risultante delle forze applicate, Taglio alla base F_b e lo spostamento d_c di un “punto di controllo” usualmente scelto come il baricentro dell'ultimo impalcato;
2. Determinazione delle caratteristiche di un sistema ad un grado di libertà equivalente a comportamento bi-lineare;
3. Determinazione della risposta massima in spostamento di tale sistema con utilizzo di spettro di risposta di progetto;
4. Conversione dello spostamento del sistema equivalente nella configurazione deformata effettiva dell'edificio e verifica della compatibilità degli spostamenti per gli elementi/meccanismi duttili e delle resistenze per gli elementi/meccanismi fragili.

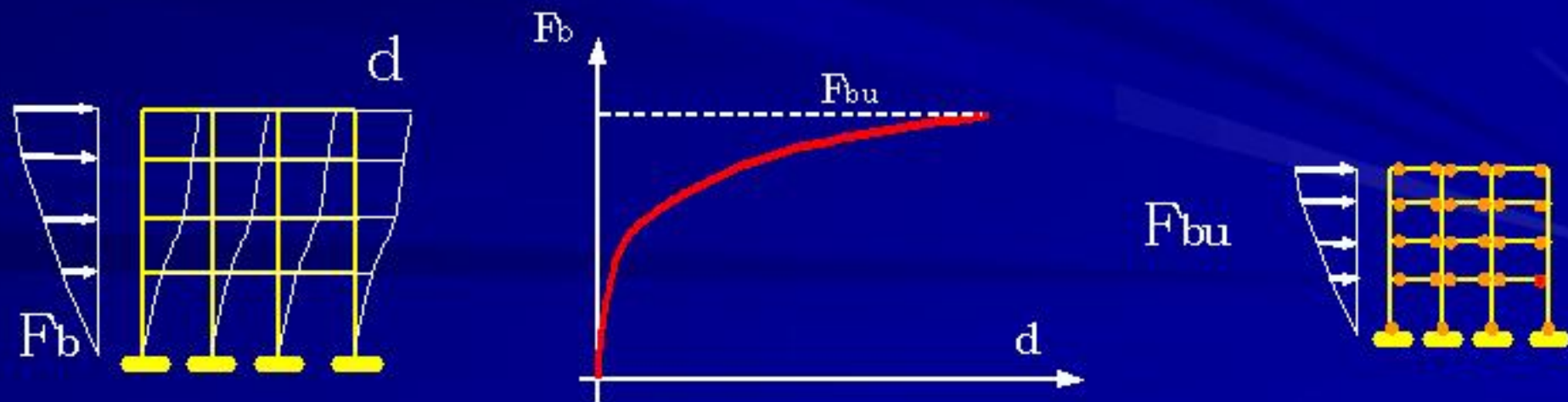
6.3 Analisi Statica non Lineare

Esecuzione dell'analisi

Step 1 determinazione legame forza-spostamento

Devono essere applicati all'edificio almeno due distinte distribuzioni di forze orizzontali, applicati ai baricentri delle masse a ciascun piano:

- ✓ Una distribuzione di forze proporzionali alle masse
- ✓ Una distribuzione di forze proporzionali al prodotto delle masse per la deformata corrispondente al primo modo di vibrazione

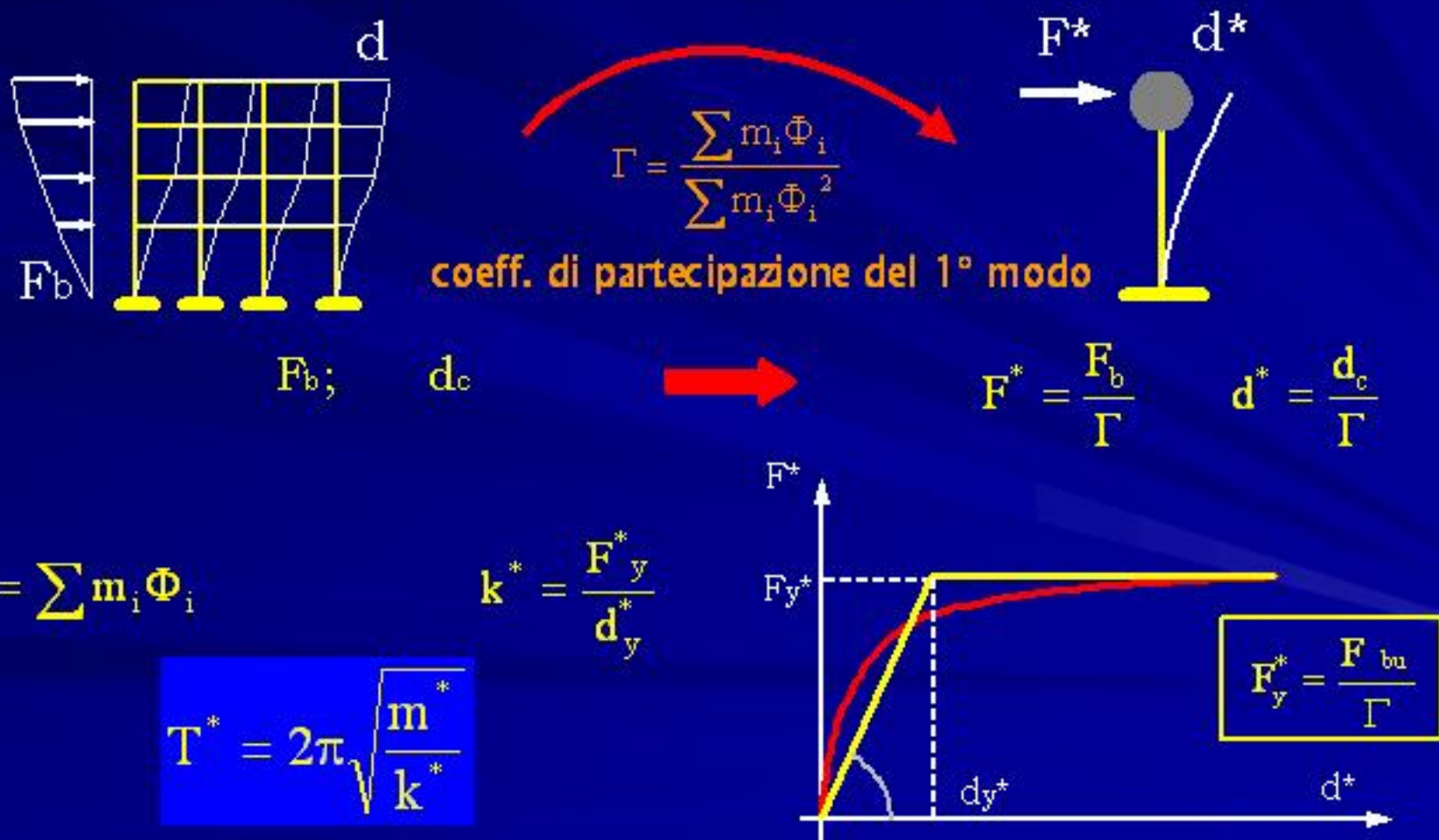


6.3 Analisi Statica non Lineare

Esecuzione dell'analisi

Step 2

Sistema ad un grado di libertà equivalente a comportamento bi-lineare

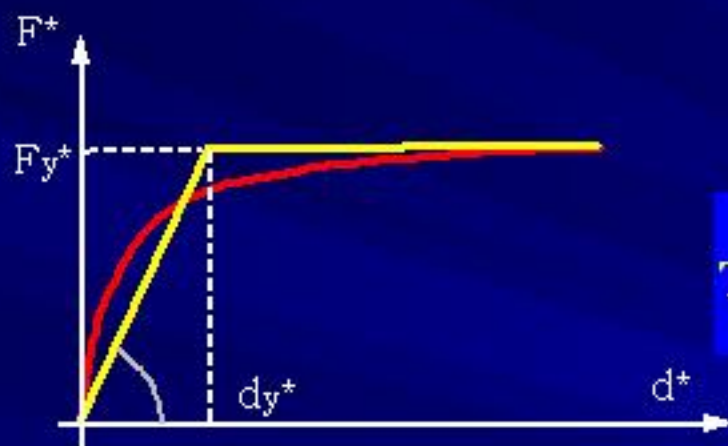


Analisi Statica non Lineare

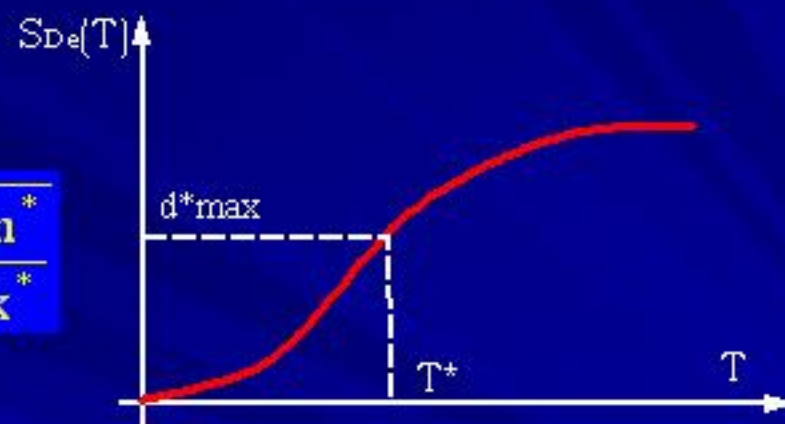
Esecuzione dell'analisi

Step 3

determinazione risposta in spostamento



$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{k^*}}$$



Se $T^* \geq T_c$

$$d_{max}^* = d_{e,max}^* = S_{De}(T^*)$$

Se $T^* < T_c$

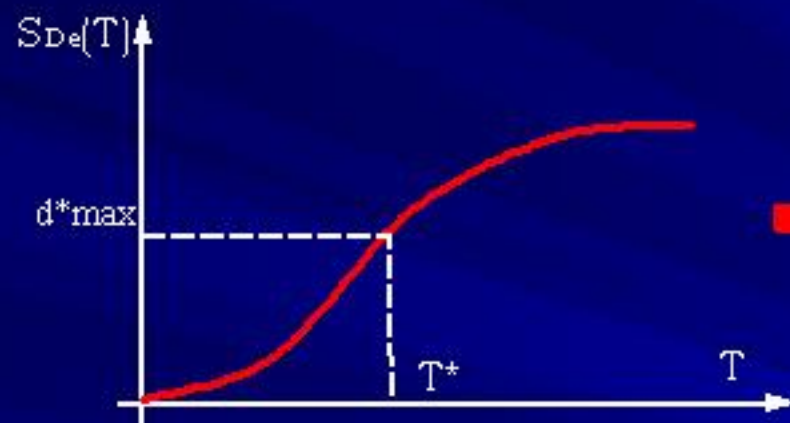
$$d_{max}^* = \frac{d_{e,max}^*}{q^*} \left[1 + (q^* - 1) \frac{T_c}{T^*} \right]$$

$$q^* = \frac{S_{De}(T^*) m^*}{F_{y^*}}$$

Analisi Statica non Lineare

Esecuzione dell'analisi

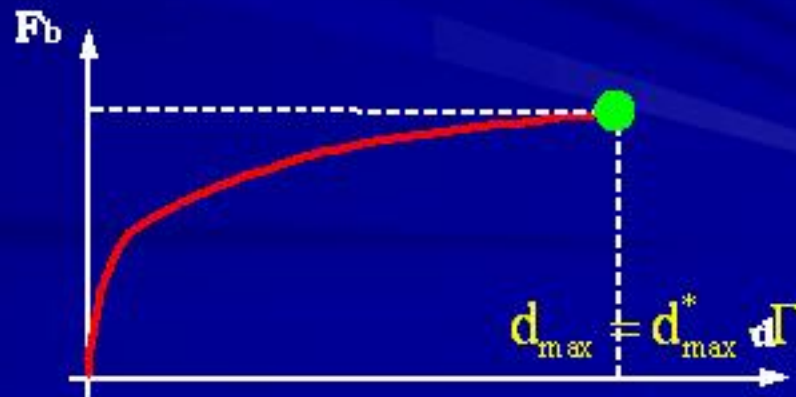
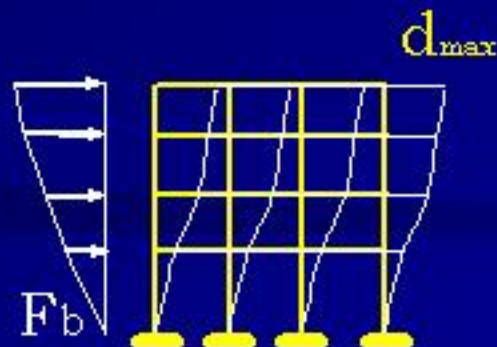
Step 4 Conversione della risposta in quella effettiva dell'edificio



$$\Gamma = \frac{\sum m_i \Phi_i}{\sum m_i \Phi_i^2}$$

d^*_{max}

$$d_{max} = d^*_{max} \cdot \Gamma$$



Verifiche di sicurezza: Analisi non lineare

Determinazione delle azioni di progetto

Nel caso di analisi non lineare si assumono quali azioni di progetto direttamente i risultati derivanti dall'analisi.

Per gli elementi/ meccanismi “duttili” si assumono come azioni di progetto D i risultati

derivanti dall'analisi. In tal caso le azioni di progetto sono da intendersi in termini di deformazioni.

Per gli elementi/meccanismi “fragili” le azioni di progetto D sono da intendersi in termini di forze e sono, in generale, valutate dai risultati dell'analisi.

Nel caso di analisi statica non lineare senza ramo degradante le azioni di progetto sono valutate in corrispondenza dello spostamento richiesto d_{max} . relativo allo stato limite in esame come di seguito riportato:

- nel caso di elementi duttili le azioni di progetto sono espresse in termini di deformazione e si valutano in corrispondenza di d_{max} ;
- nel caso di elementi fragili la domanda in termini di taglio si calcola in corrispondenza di d_{max} .

Verifiche di sicurezza: Analisi non lineare

Valutazione delle capacità

La valutazione delle capacità è subordinata alla tipologia di meccanismo di crisi dell'elemento strutturale e allo stato limite in esame (SL).

La capacità di elementi/meccanismi “duttili” è da intendersi in termini di deformazioni (limiti di deformabilità ovvero capacità deformativa).

Per la valutazione della capacità si impiegano i valori medi delle proprietà dei materiali esistenti, direttamente ottenute da prove in sito e da eventuali informazioni aggiuntive, divise per i fattori di confidenza, in relazione al livello di conoscenza raggiunto.

La capacità di elementi/meccanismi “fragili” è da intendersi in termini di forze.

Per la valutazione della capacità si impiegano i valori medi delle proprietà dei materiali esistenti, direttamente ottenute da prove in sito e da eventuali informazioni aggiuntive, divise per i fattori di confidenza, in relazione al livello di conoscenza raggiunto e per il coefficiente di sicurezza parziale del materiale.