

Corso di aggiornamento
Progettazione strutturale e
Norme Tecniche per le Costruzioni 2008

Verifica sismica di edifici esistenti in c.a.

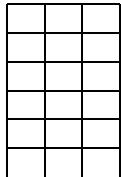
4 - Valutazione del comportamento sismico in campo elastico
e in campo plastico

Spoletto
24-26 maggio 2012
Aurelio Ghersi

Brevi richiami

- Come si valuta la risposta sismica di una struttura?
- Risposta in campo elastico
(vale per terremoto di bassa intensità)
 - Analisi dinamica lineare (al passo) → per studio
 - Spettro di risposta → per oscillatore semplice
 - Analisi modale (o statica) → per struttura reale

Risposta dinamica elastica



Modello della struttura:
elastico lineare

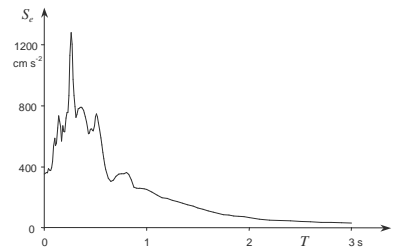
L'analisi fornisce la risposta istante
per istante (analisi al passo)
Consente di giudicare sollecitazioni e
deformazioni
Per strutture reali è un'analisi onerosa,
che si fa solo a livello di ricerca



Integrazione delle equazioni
dinamiche del moto

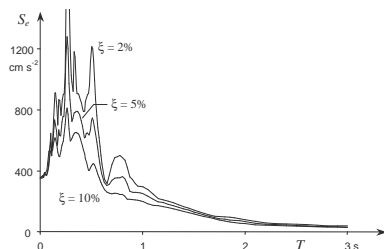
**Per schema a un grado di libertà:
spettro di risposta elastico**

Valutando la risposta
ad un singolo
accelerogramma si
ottiene lo spettro di
risposta elastico:
in termini di
accelerazione



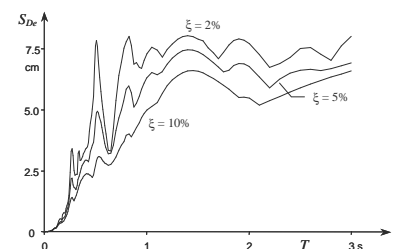
**Per schema a un grado di libertà:
spettro di risposta elastico**

Valutando la risposta
ad un singolo
accelerogramma si
ottiene lo spettro di
risposta elastico:
in termini di
accelerazione



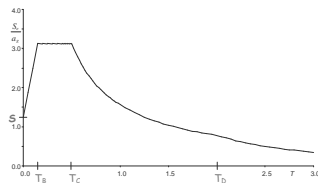
**Per schema a un grado di libertà:
spettro di risposta elastico**

Valutando la risposta
ad un singolo
accelerogramma si
ottiene lo spettro di
risposta elastico:
in termini di
spostamento



Spettri di risposta elastica di normativa

La normativa fornisce spettri che riassumono l'effetto di tutti i possibili terremoti in un sito



Spettri di risposta elastica di normativa

Per definire uno spettro di risposta elastico occorre indicare i parametri

- a_g accelerazione del terreno (su roccia)
- S amplificazione dovuta al tipo di terreno
- T_B T_C T_D periodi che separano i diversi tratti
- ξ smorzamento della struttura

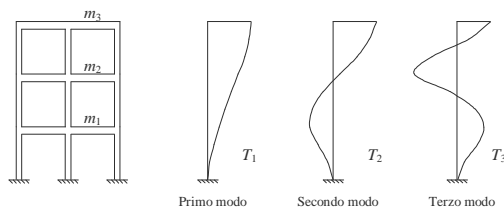
S T_B T_C T_D si ricavano a partire dai tre parametri

$$a_g \quad F_0 \quad T_C^*$$

(che sono legati al sito e al periodo di ritorno T_r) e dipendono anche dalle caratteristiche del terreno

Per schemi a più gradi di libertà analisi modale

- Valutazione dei modi di oscillazione libera della struttura

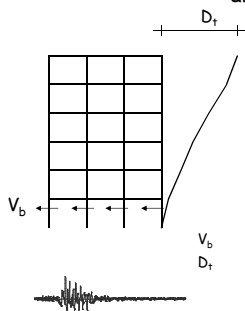


Per schemi a più gradi di libertà analisi modale

- Valutazione dei modi di oscillazione libera della struttura
- Valutazione della risposta di ciascun modo, utilizzando lo spettro di risposta
- Combinazione delle risposte dei singoli modi per avere l'inviluppo

Per questo è meglio parlare di analisi modale con uso di spettri di risposta

Per schemi a più gradi di libertà analisi modale

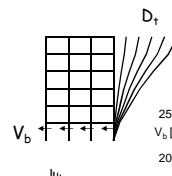


L'analisi modale fornisce i valori massimi di:

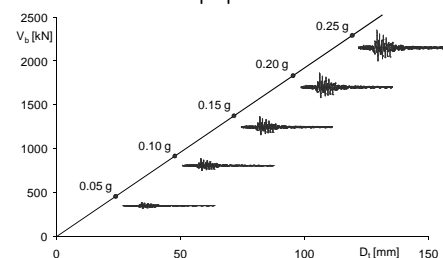
- Spostamenti
- Caratteristiche di sollecitazione

Al progettista occorrono proprio i valori massimi
Quindi questa analisi va bene per le applicazioni pratiche

Per schemi a più gradi di libertà analisi modale



Si noti che al crescere di a_g tutto cresce in proporzione



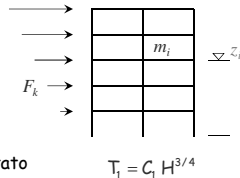
Alternativa: analisi statica

- Consiste nel considerare un unico insieme di forze, che rappresentano (in modo semplificato) l'effetto del primo modo

$$F_k = m_k z_k \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n m_i z_i} S_e(T_1)$$

Il periodo proprio può essere valutato con formule semplificate

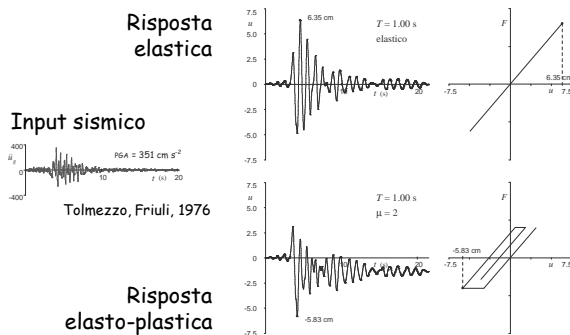
Le forze possono essere ridotte con $\lambda=0.85$ se l'edificio ha almeno 3 piani e periodo non troppo alto



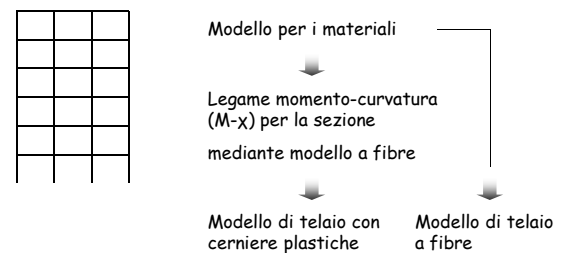
Brevi richiami

- Come si valuta la risposta sismica di una struttura?
- Risposta in campo elastico (vale per terremoto di bassa intensità)
 - Analisi dinamica lineare (al passo) → per studio
 - Spettro di risposta → per oscillatore semplice
 - Analisi modale (o statica) → per struttura reale
- Risposta oltre il limite elastico (serve per terremoto di forte intensità)
 - Analisi dinamica non lineare (al passo) → per studio
 - Analisi statica non lineare
 - Analisi modale (o statica) con fattore di struttura q

Comportamento oltre il limite elastico schema a un grado di libertà



Comportamento oltre il limite elastico schema a più gradi di libertà



Comportamento oltre il limite elastico schema a più gradi di libertà

Problemi (per i pilastri - telai piani)

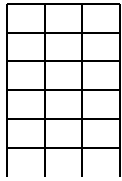
- Resistenza e duttilità variano con lo sforzo normale
- Se lo sforzo normale è alto:
 - È difficile schematizzare il legame con un a bilatera elastica-perfettamente plastica
 - C'è un ramo decrescente molto accentuato, con forte perdita di resistenza
 - La duttilità si riduce fortemente

Comportamento oltre il limite elastico schema a più gradi di libertà

Problemi (per i pilastri - telai spaziali)

- Occorre tener conto della interazione tra N , M_x ed M_y
- La modellazione è difficile ed i risultati potrebbero non essere attendibili

Analisi dinamica non lineare



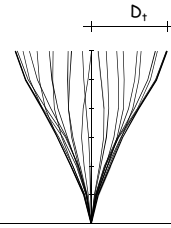
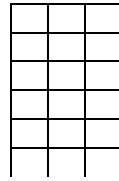
Modello della struttura:
non lineare

L'analisi fornisce la risposta istante
per istante (analisi al passo)
Consente di determinare quando
avviene il collasso (per limite di
deformazioni plastica)
Per strutture reali è un'analisi onerosa,
che si fa solo a livello di ricerca



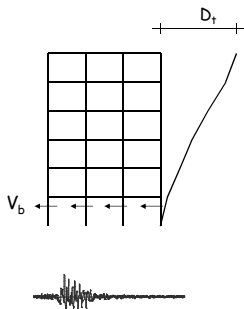
Integrazione delle equazioni
dinamiche del moto

Analisi dinamica non lineare



La struttura si deforma nel tempo
La forma della deformata varia nel tempo
Compaiono e scompaiono cerniere

Analisi dinamica non lineare



L'analisi dinamica non lineare
fornisce i valori massimi di:

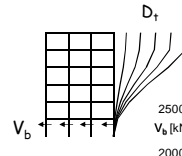
- Spostamenti
- Caratteristiche di sollecitazione
- Rotazioni plastiche

V_b taglio massimo al piede



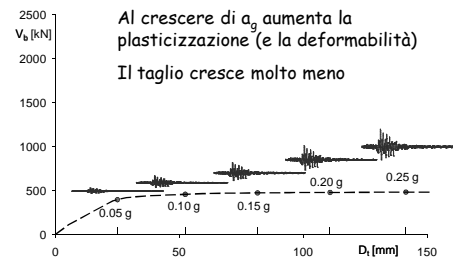
L'analisi dinamica non lineare fornisce deformazioni e spostamenti ad ogni istante e il loro inviluppo. Da questi si può giudicare se avviene il collasso

Analisi dinamica non lineare

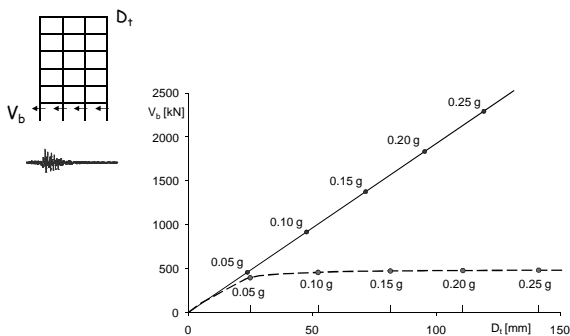


Al crescere di a_g tutto cresce
ma non in proporzione

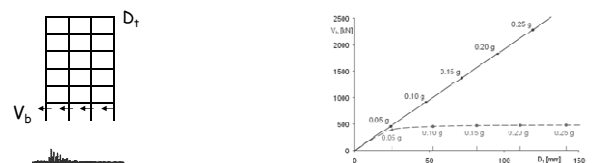
Al crescere di a_g aumenta la
plasticizzazione (e la deformabilità)
Il taglio cresce molto meno



Confronto tra risposta dinamica elastica e inelastica



Confronto tra risposta dinamica elastica e inelastica



Si noti che gli spostamenti in testa, a parità di a_g ,
potrebbero non cambiare molto nei due casi
(comportamento elastico e plastico)

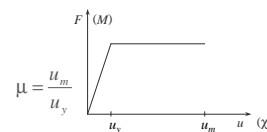
Può però essere molto diversa la distribuzione di
spostamenti lungo l'altezza

Valutazione del comportamento oltre il limite elastico

- L'analisi dinamica non lineare è troppo complicata
- E allora cosa si fa?

Progetto/verifica di strutture elasto-plastiche

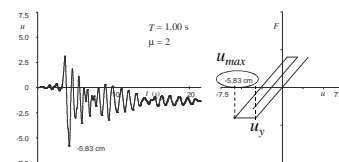
È possibile progettare la struttura con una forza ridotta, accettando la sua plasticizzazione, purché la duttilità disponibile



sia maggiore di quella richiesta

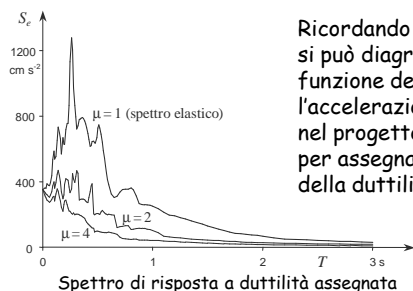
$$\mu = \frac{u_{max}}{u_y}$$

Risposta
elasto-plastica



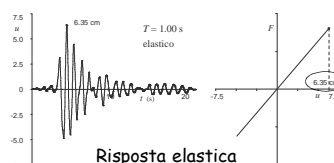
Progetto/verifica di strutture elasto-plastiche

La resistenza può essere ridotta tanto da far coincidere la duttilità disponibile con quella richiesta



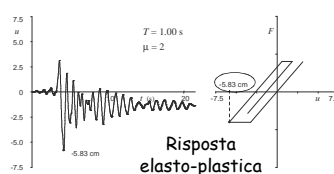
Ricordando che $F = m a$, si può diagrammare in funzione del periodo l'accelerazione da usare nel progetto, per assegnati valori della duttilità μ

Progettazione di strutture elasto-plastiche

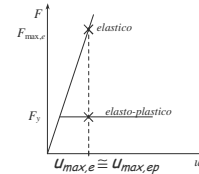


Risposta elastica

Le analisi numeriche mostrano che lo spostamento di schemi elastici ed elasto-plastici è più o meno lo stesso



Risposta elasto-plastica



Progettazione di strutture elasto-plastiche

La forza di progetto può essere ottenuta dividendo

F_d

la forza necessaria per mantenere la struttura in campo elastico

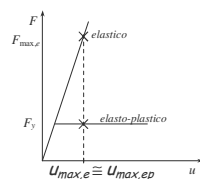
$F_{max,e}$

per la duttilità

μ

$$F_d = F_y = \frac{F_{max,e}}{\mu}$$

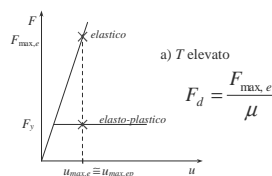
Le analisi numeriche mostrano che lo spostamento di schemi elastici ed elasto-plastici è più o meno lo stesso



Progettazione di strutture elasto-plastiche

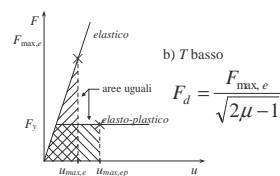
Il principio di uguaglianza di spostamenti vale solo per strutture con periodo medio-alto

Per strutture con periodo basso si può pensare ad una uguaglianza in termini energetici



a) T elevato

$$F_d = \frac{F_{max,e}}{\mu}$$

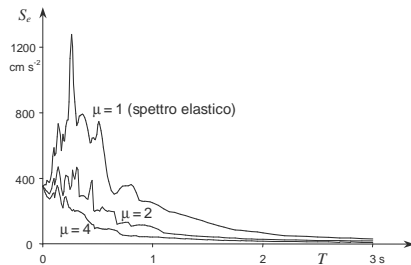


b) T basso

$$F_d = \frac{F_{max,e}}{\sqrt{2\mu - 1}}$$

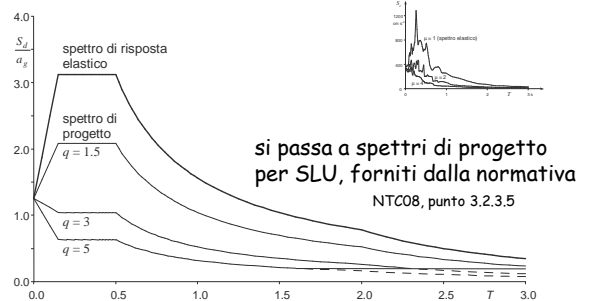
Progettazione di strutture elasto-plastiche

Dagli spettri di risposta a duttilità assegnata



Progettazione di strutture elasto-plastiche

Dagli spettri di risposta a duttilità assegnata

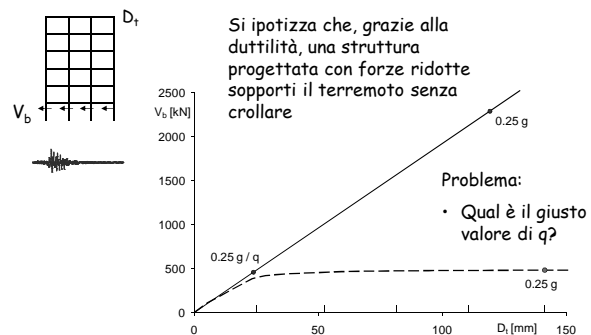


Progetto a duttilità assegnata

- Nota la duttilità, si può ricavare l'accelerazione (e quindi le forze) di progetto dagli spettri di risposta a duttilità assegnata.
- Risolvendo lo schema strutturale soggetto a queste forze (con analisi lineare) si verificano le sezioni.
- Se la struttura sopporta queste azioni ed ha la duttilità prevista, può sopportare (in campo inelastico) il terremoto.

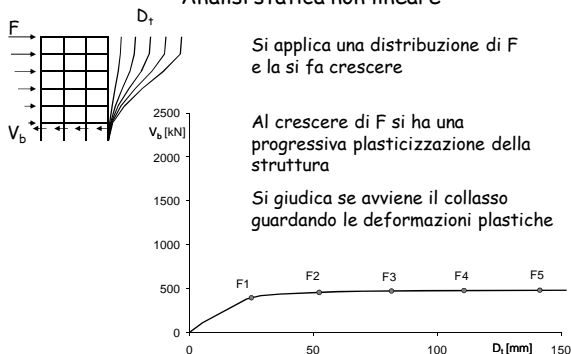
Alternative all'analisi dinamica non lineare

Analisi modale e riduzione con fattore di struttura q



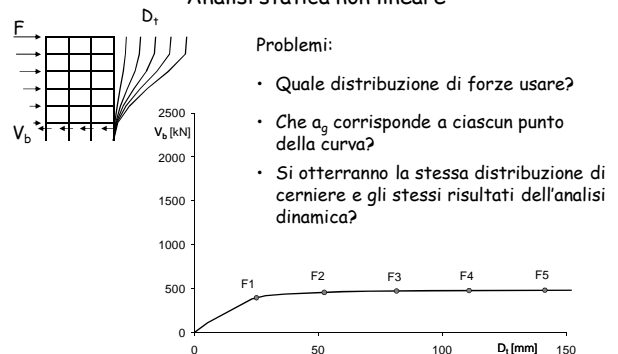
Alternative all'analisi dinamica non lineare

Analisi statica non lineare



Alternative all'analisi dinamica non lineare

Analisi statica non lineare



Modalità di collasso (duttile o fragile) e metodi di analisi

Collasso di un edificio

- Rottura fragile:
 - rottura a taglio delle sezioni di pilastri e travi
 - rotture a taglio dei nodi
 - scorrimento tra testa pilastro e trave in corrispondenza alle riprese di getto
- Rottura per esaurimento della duttilità:
 - estese plasticizzazioni agli estremi delle aste, fino al raggiungimento della rotazione ultima di una sezione

Rottura fragile

- Edifici antisismici di nuova progettazione:
la rottura fragile viene evitata con il criterio di gerarchia delle resistenze (gerarchia taglio-flessione)
- Edifici esistenti:
il rischio di rottura fragile è forte
la rottura spesso avviene già per bassi valori di a_g

Si può verificare in termini di resistenza, con analisi lineare, senza fattore di struttura (o con valore molto basso)

Rottura per esaurimento della duttilità

- Edifici antisismici di nuova progettazione:
una richiesta eccessiva di duttilità viene evitata con il criterio di gerarchia delle resistenze (gerarchia pilastro-trave, per evitare meccanismi di piano)
- Edifici esistenti:
potrebbero esserci meccanismi di piano che fanno esaurire presto la duttilità

Si può verificare in termini di resistenza, con analisi lineare, con basso fattore di struttura

Oppure in termini di deformazioni, con analisi lineare o non lineare

Collasso di edifici esistenti: duttile o fragile?

- Duttile: estese plasticizzazioni agli estremi delle aste (in particolare delle travi), meccanismo di collasso globale e non di piano
- Poco duttile: plasticizzazioni agli estremi dei pilastri, meccanismo di collasso di piano
- Fragile: rottura a taglio delle sezioni di pilastri e travi, rotture a taglio dei nodi, scorrimento tra testa pilastro e trave in corrispondenza alle riprese di getto

Collasso di edifici esistenti: duttile o fragile?

Edifici progettati solo per carichi verticali
o progettati per sisma in maniera non corretta

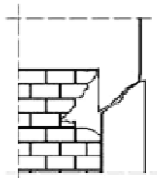
- Cosa mostra l'evidenza sperimentale?
(danneggiamento e crollo di edifici in cemento armato in conseguenza ai terremoti)

Collasso di edifici esistenti: duttile o fragile?



Foto G. Gaeta

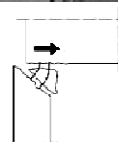
Rottura diagonale della muratura e propagazione come lesione a taglio nel pilastro



Collasso di edifici esistenti: duttile o fragile?



Foto G. Gaeta



Collasso di edifici esistenti: duttile o fragile?



Irpinia 1980,
S. Angelo dei
Lombardi
Foto A. Ghersi

Danneggiamento dei nodi in testa ed al piede del pilastro:
non si ha formazione di cerniere plastiche sulla colonna
né tantomeno sulle travi

Collasso di edifici esistenti: duttile o fragile?

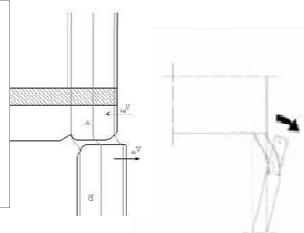


Danneggiamento dei nodi in testa ed al piede del pilastro:
non si ha formazione di cerniere plastiche sulla colonna
né tantomeno sulle travi

Collasso di edifici esistenti: duttile o fragile?



Irpinia 1980,
Lioni, Edificio del
Banco di Napoli
Foto A. Ghersi



Scorrimento tra la sommità del pilastro
e la trave in corrispondenza
della ripresa di getto

Collasso di edifici esistenti: duttile o fragile?

Edifici progettati solo per carichi verticali
o progettati per sisma in maniera non corretta

- Cosa mostra l'evidenza sperimentale ?
(danneggiamento e crollo di edifici in cemento
armato in conseguenza ai terremoti)



In tutti questi casi il collasso è fragile

Collasso di edifici esistenti: duttile o fragile?

Edifici progettati correttamente per sisma (indipendentemente dalle normative di riferimento) oppure progettati solo per carichi verticali, ma con una particolare cura del progetto e dei dettagli costruttivi (buone sezioni dei pilastri, ben armate e molto ben staffate)



In questi casi il collasso può essere duttile

Collasso di edifici esistenti: in molti casi: fragile!

Quindi:

- Determinare innanzitutto il livello di azione sismica che porta a rottura fragile (resistenza a taglio dei pilastri, resistenza a taglio dei nodi, scorrimento travi-pilastro)
- Usare una modellazione che tenga conto in maniera corretta della rigidità degli elementi strutturali (commisurata al livello di sollecitazione che porta alle rotture fragili)
- Tenere conto anche degli elementi non strutturali, tramezzi e tamponature, che hanno un ruolo rilevante per basse azioni sismiche

Primi interventi, essenziali (o comunque prime verifiche)

Ridurre il rischio di rottura fragile, con:

- Staffatura efficace degli estremi dei pilastri
- Cerchiatura dei nodi
- Cucitura tra pilastri e travi

Miglioramento, **essenziale**

Solo dopo aver fatto questo:

- Valutazione del comportamento non lineare
- Controllo della duttilità delle sezioni

Adeguamento, quando occorre