

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

Verifica sismica di edifici esistenti in c.a.

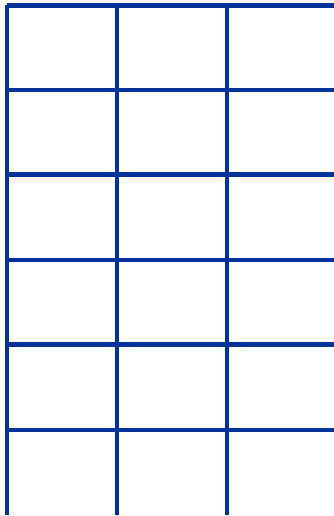
4 - Valutazione del comportamento sismico in campo elastico
e in campo plastico

Spoletto
24-26 maggio 2012
Aurelio Gheresi

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

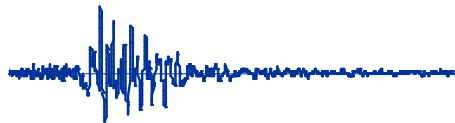


Modello della struttura:
elastico lineare

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

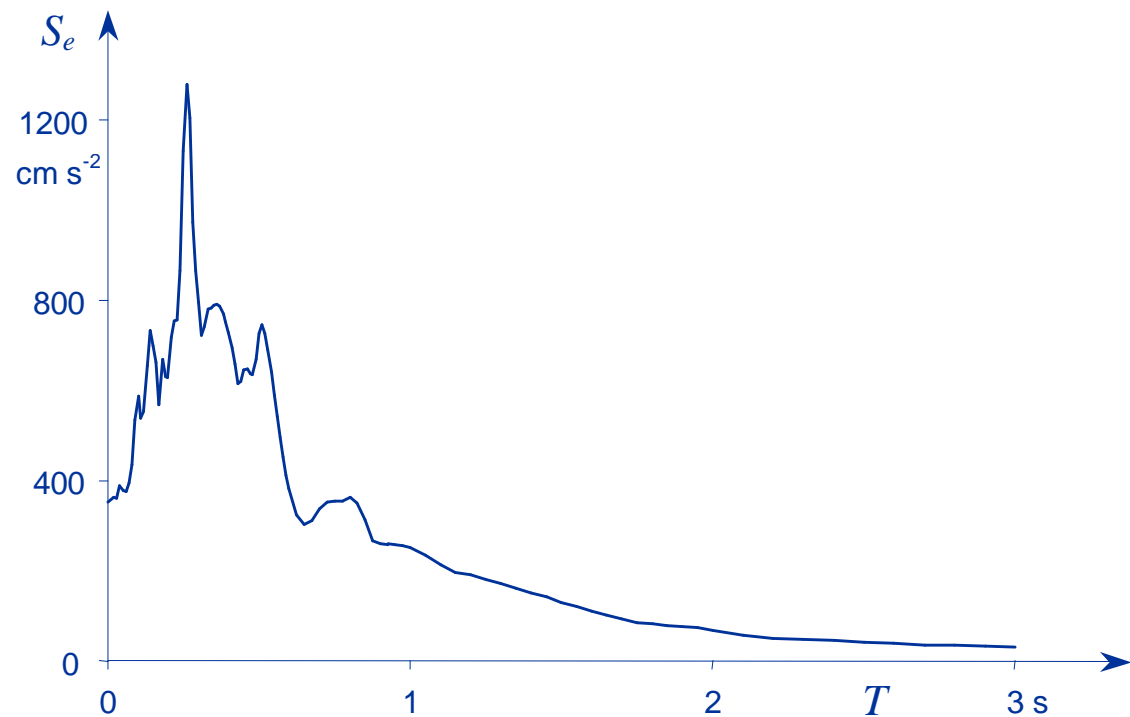


Integrazione delle equazioni
dinamiche del moto

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:

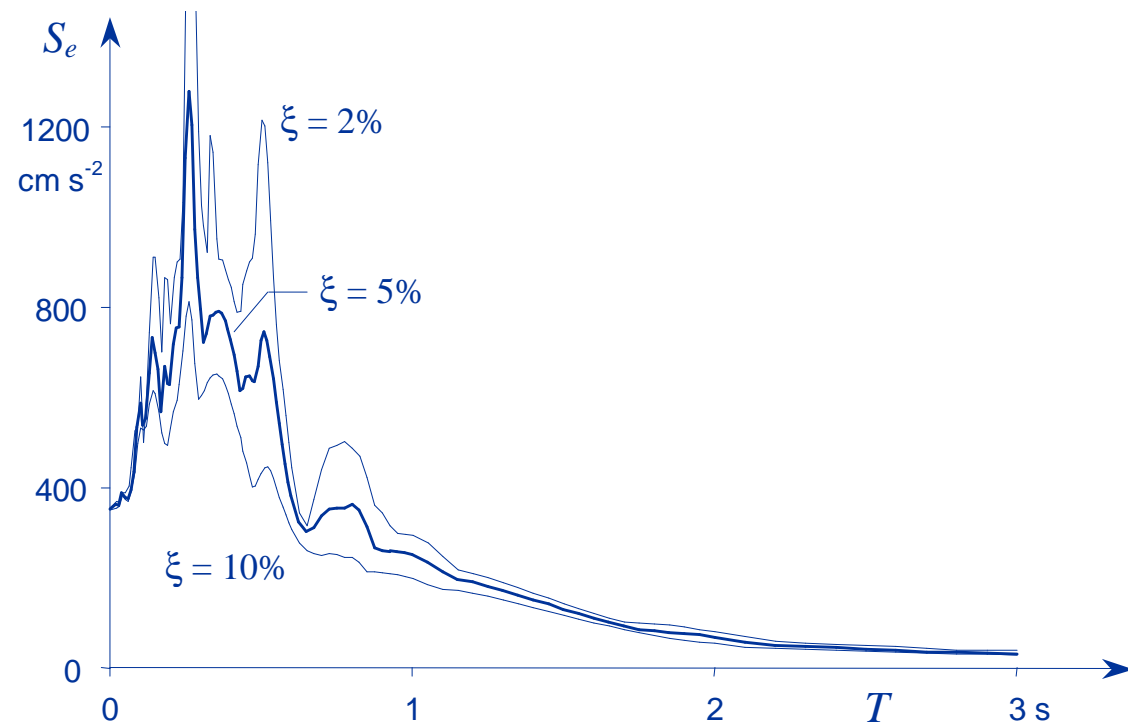
in termini di
accelerazione



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:

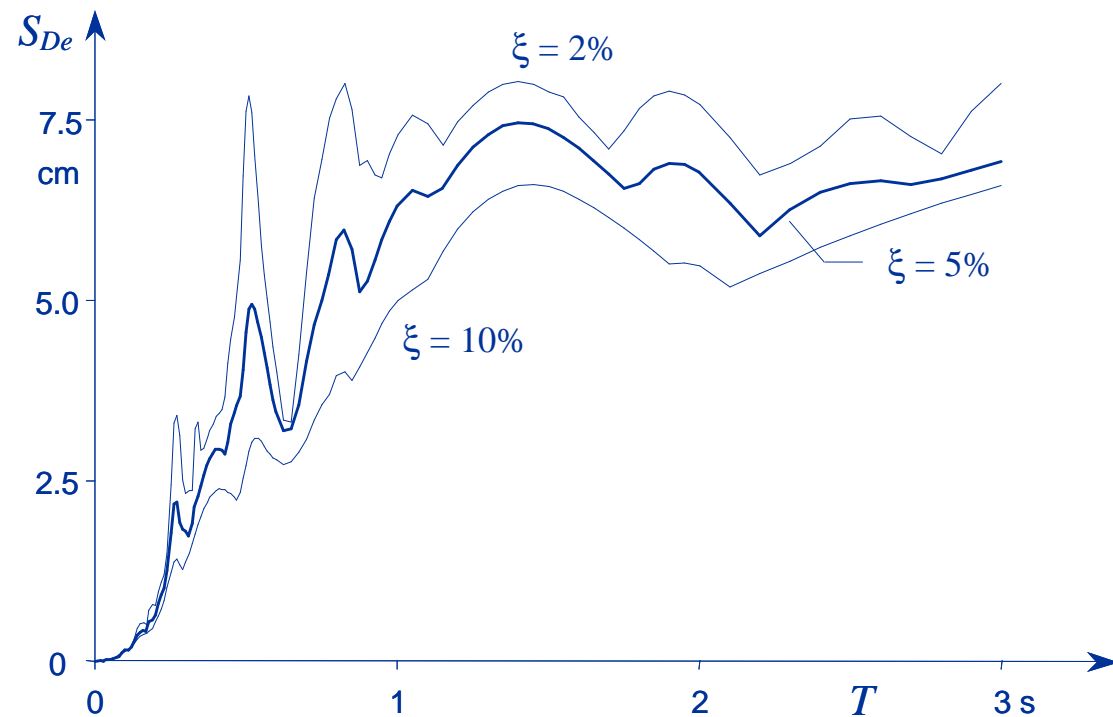
in termini di
accelerazione



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

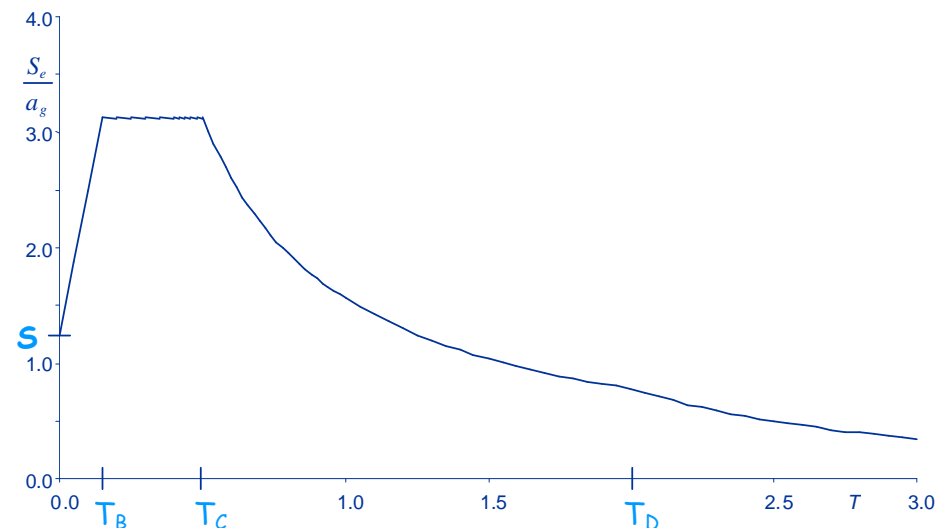
Valutando la risposta
ad un singolo
accelerogramma si
ottiene lo spettro di
risposta elastico:

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

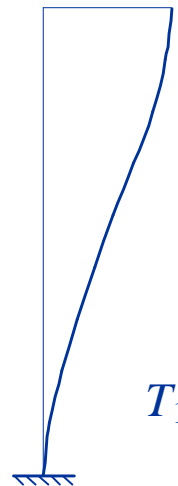
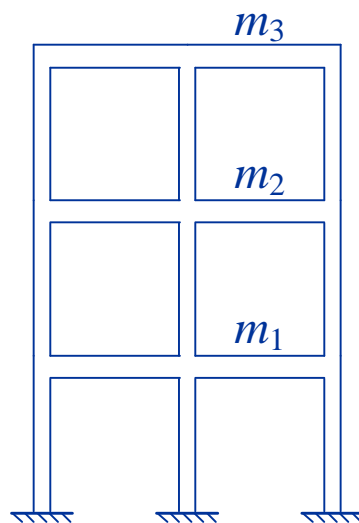
S T_B T_C T_D si ricavano a partire dai tre parametri

$$a_g \quad F_o \quad T_C^*$$

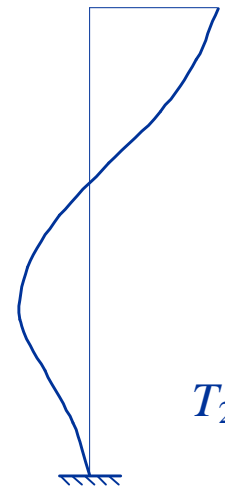
(che sono legati al sito e al periodo di ritorno T_r)
e dipendono anche dalle caratteristiche del terreno

Per schemi a più gradi di libertà analisi modale

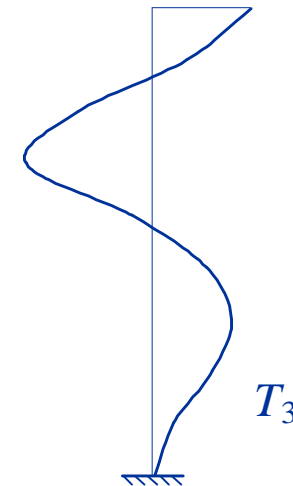
- Valutazione dei modi di oscillazione libera della struttura



Primo modo



Secondo modo



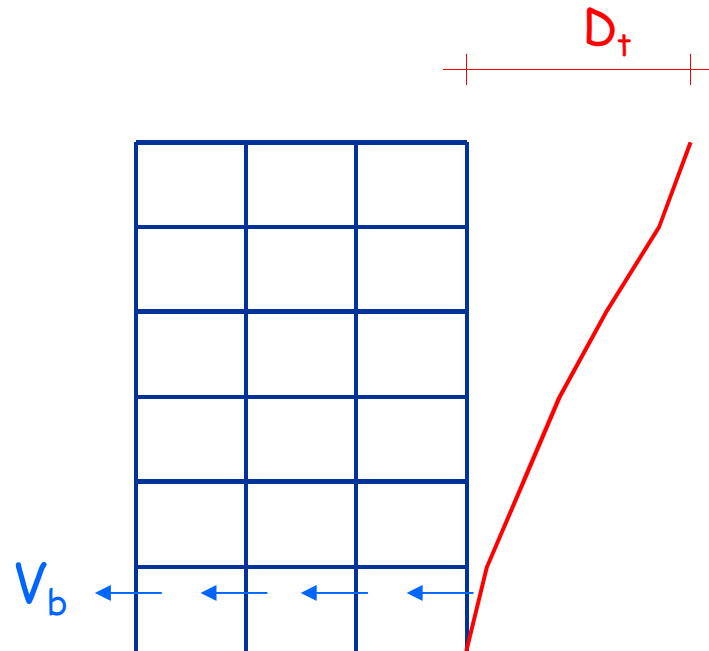
Terzo modo

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'involuppo

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

Per schemi a più gradi di libertà analisi modale

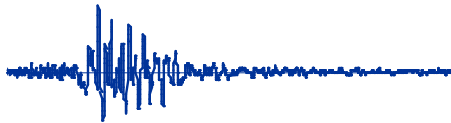


L'analisi modale fornisce i
valori massimi di:

- Spostamenti
- Caratteristiche di sollecitazione

V_b taglio massimo al piede

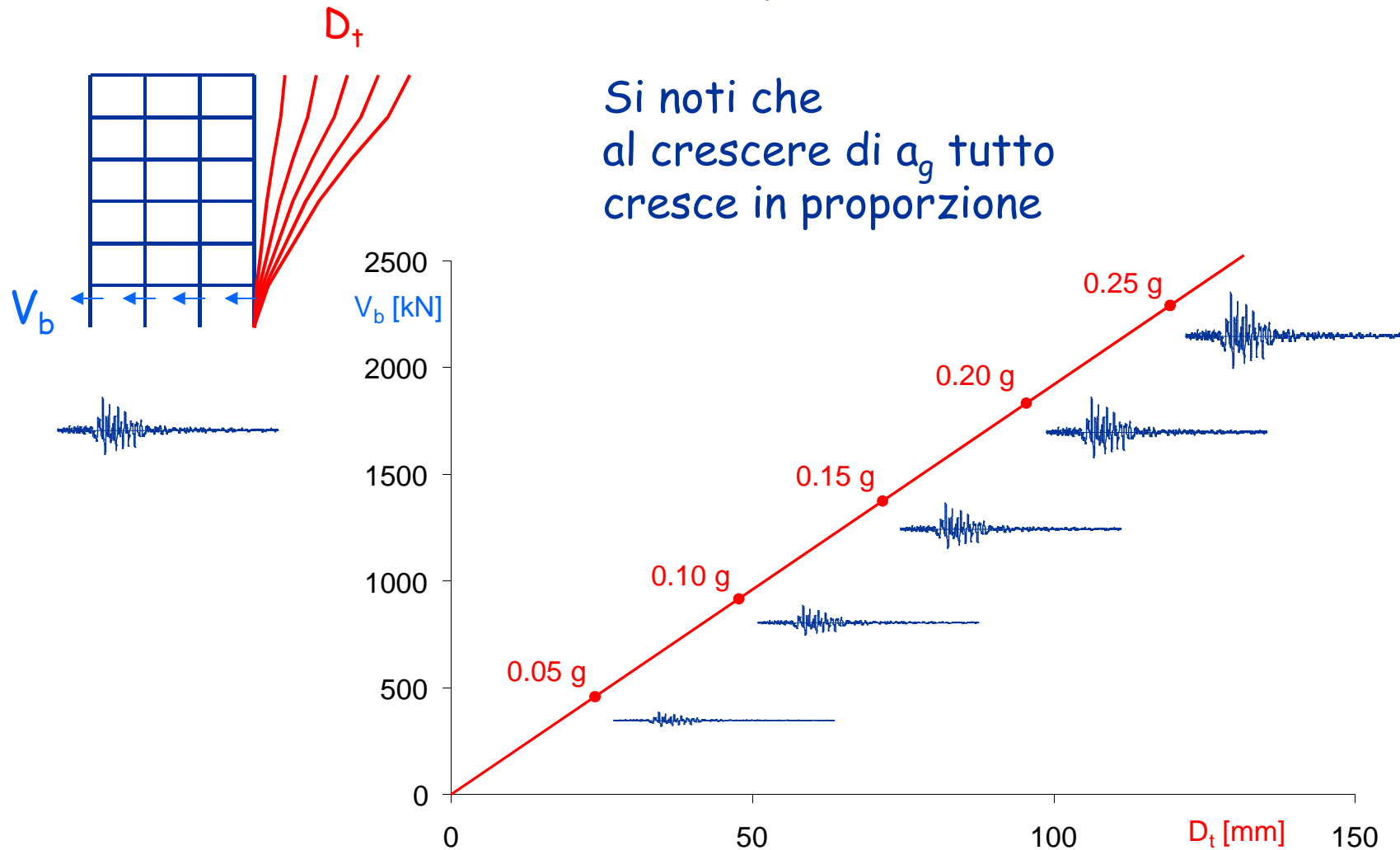
D_+ spostamento in testa



Al progettista occorrono proprio i valori massimi

Quindi questa analisi va bene per le applicazioni pratiche

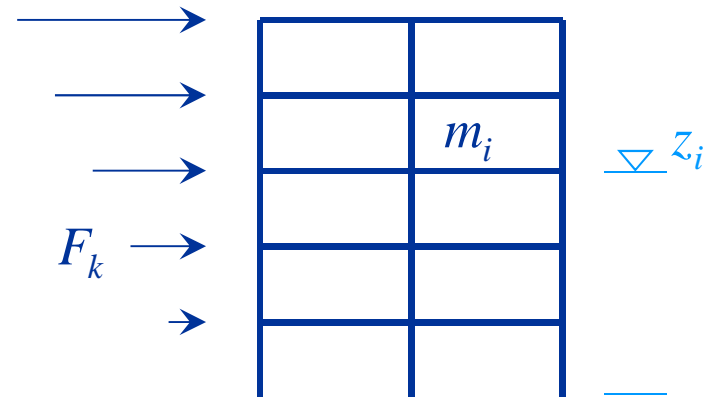
Per schemi a più gradi di libertà analisi modale



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

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

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

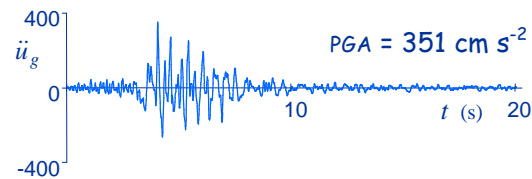
Brevi richiami

- 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

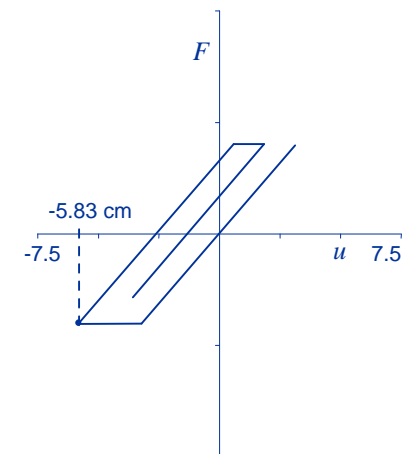
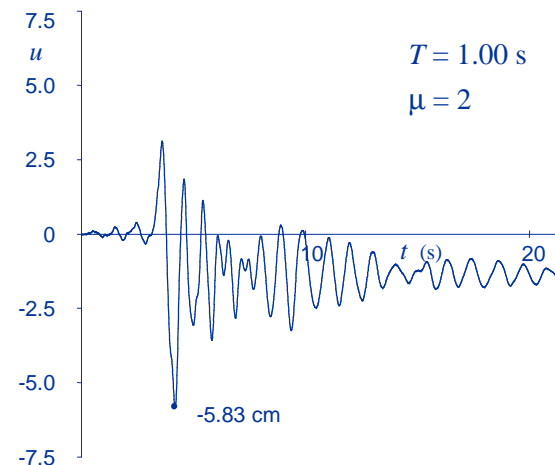
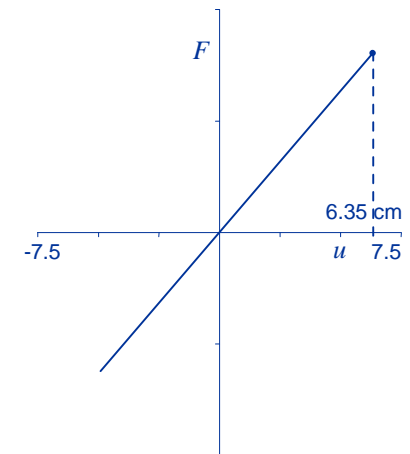
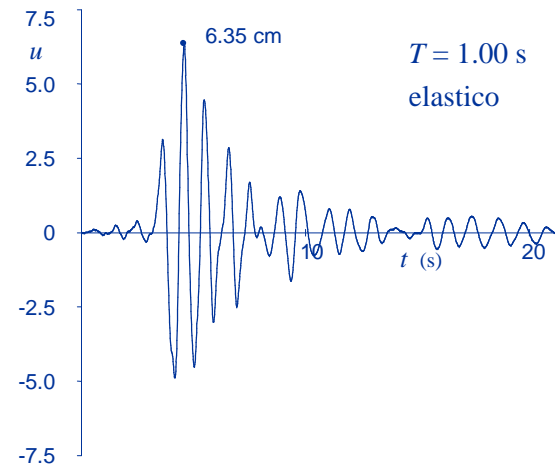
Risposta
elastica

Input sismico



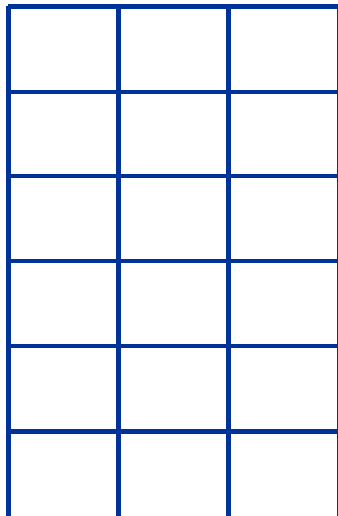
Tolmezzo, Friuli, 1976

Risposta
elasto-plastica



Comportamento oltre il limite elastico

schema a più gradi di libertà



Modello per i materiali



Legame momento-curvatura
($M-\chi$) per la sezione
mediante modello a fibre



Modello di telaio con
cerniere plastiche



Modello di telaio
a fibre

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

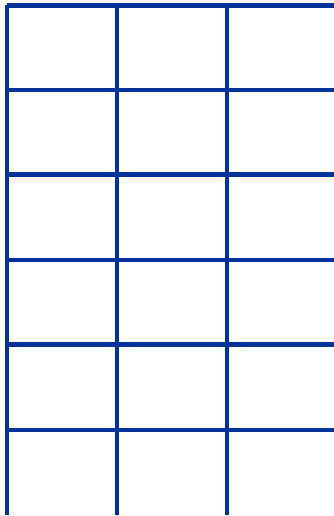
Comportamento oltre il limite elastico

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

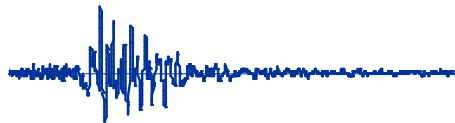


Modello della struttura:
non lineare

L'analisi fornisce la risposta istante
per istante (analisi al passo)

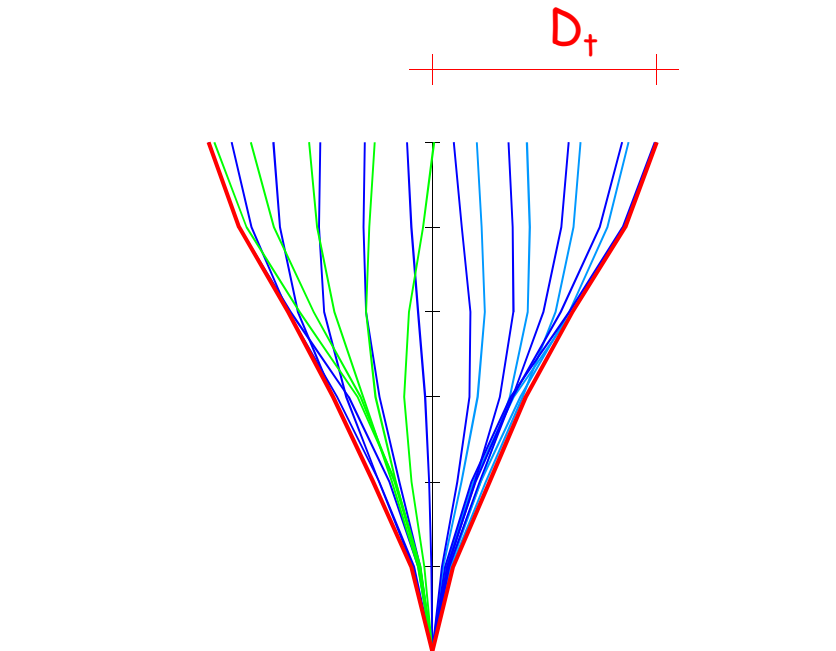
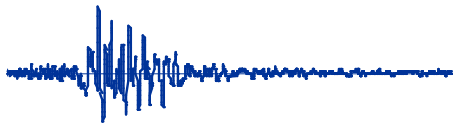
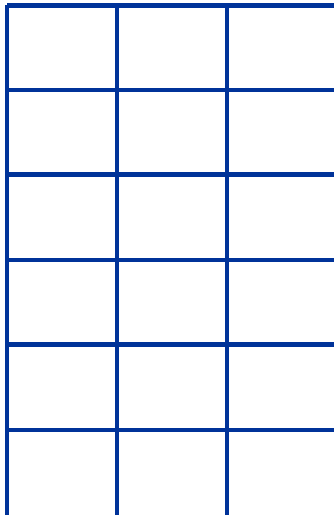
Consente di determinare quando
avviene il collasso (per limite di
deformazioni plastica)

Per strutture reali è un'analisi onerosa,
che si fa solo a livello di ricerca



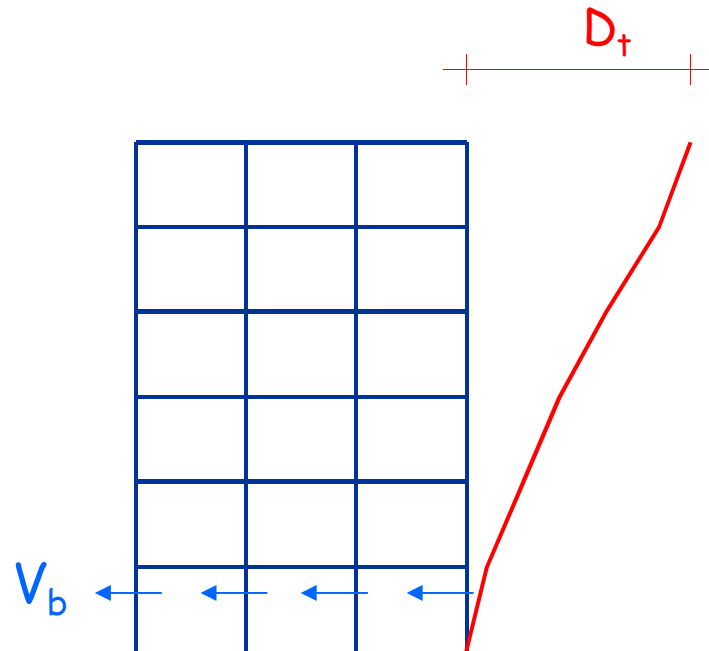
Integrazione delle equazioni
dinamiche del moto

Analisi dinamica non lineare



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

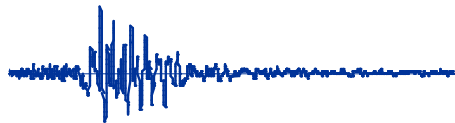
Analisi dinamica non lineare



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

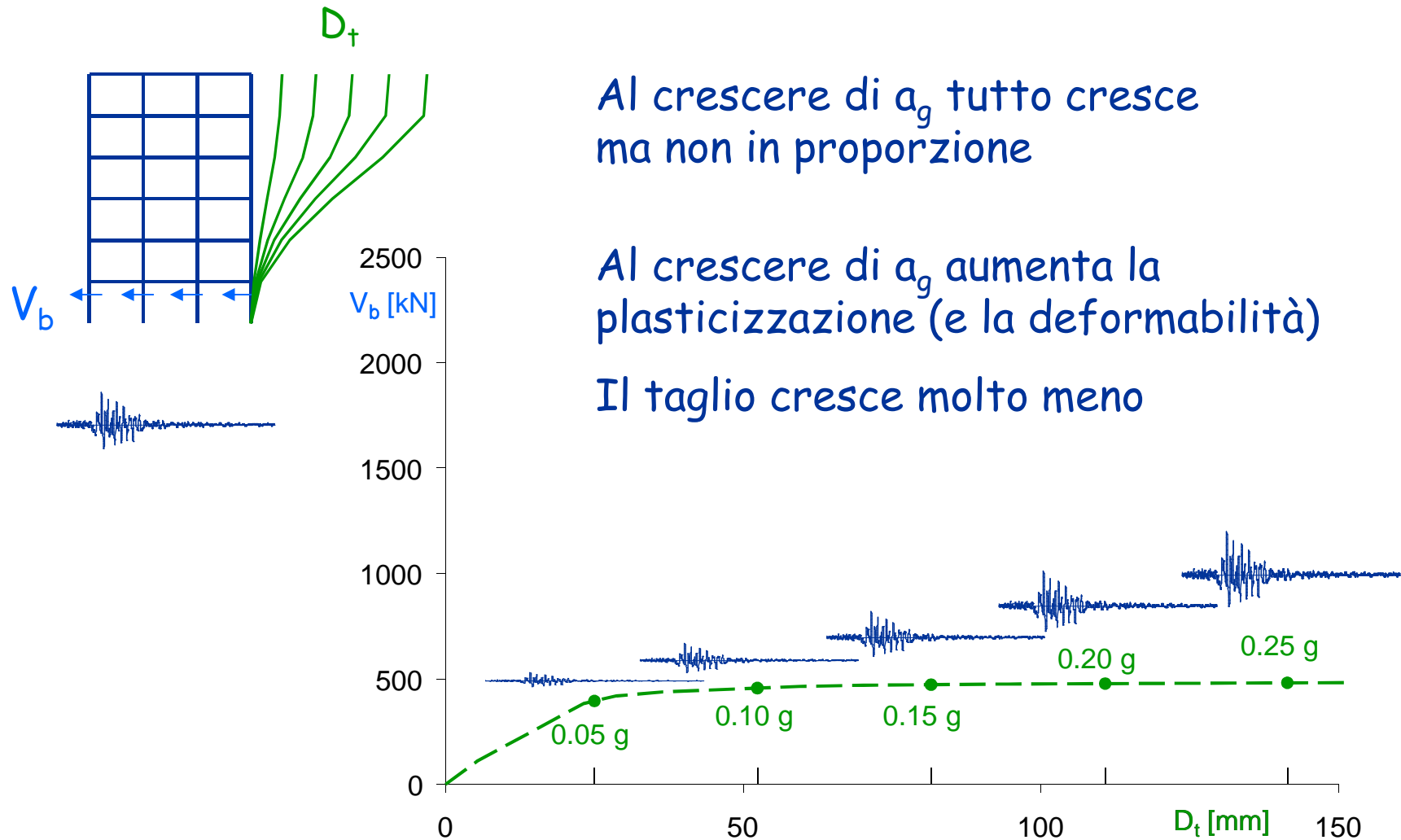
- Spostamenti
- Caratteristiche di sollecitazione
- Rotazioni plastiche

V_b taglio massimo al piede

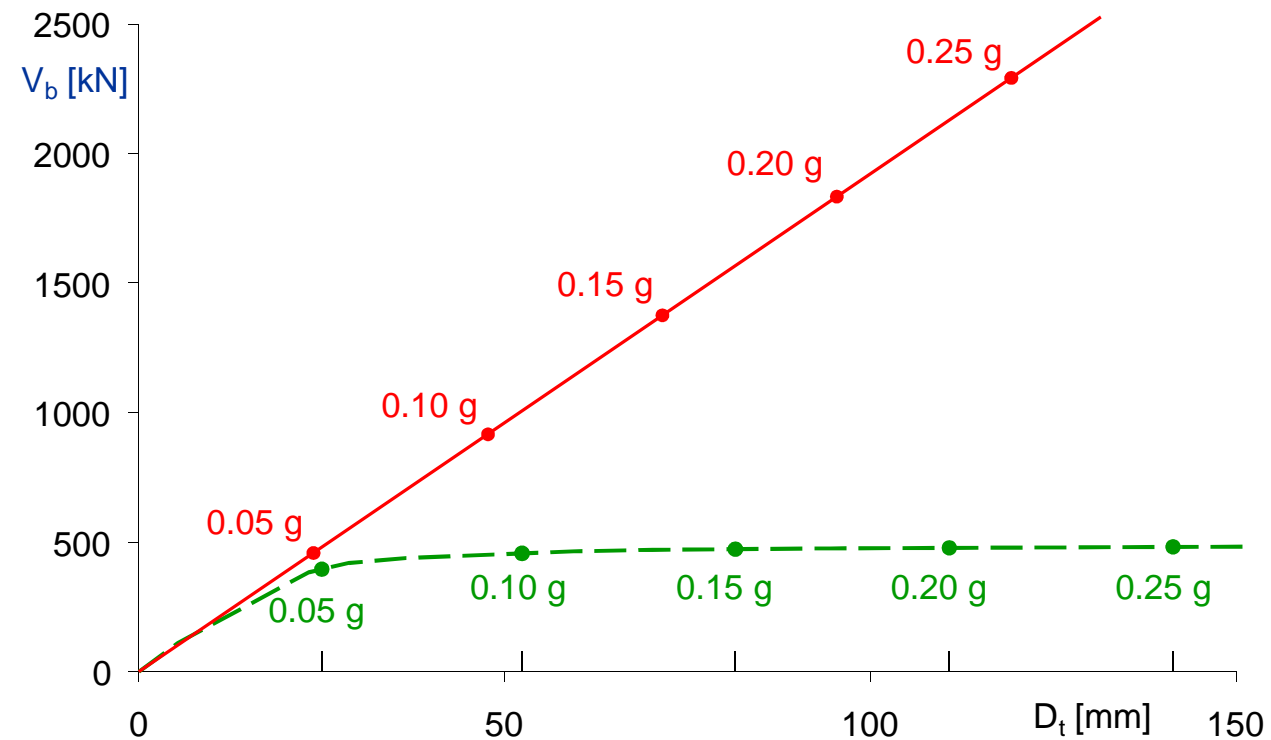
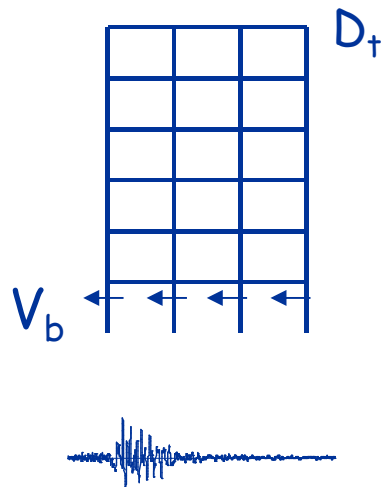


L'analisi dinamica non lineare fornisce deformazioni e spostamenti ad ogni istante e il loro inviluppo. Da questi si può giudicare se avviene il collasso

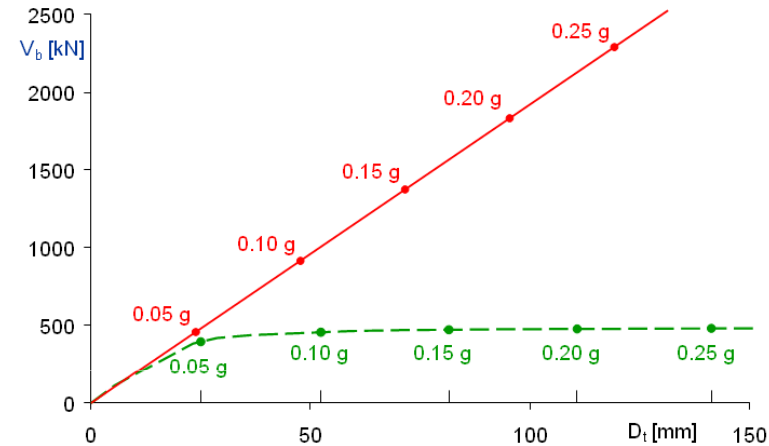
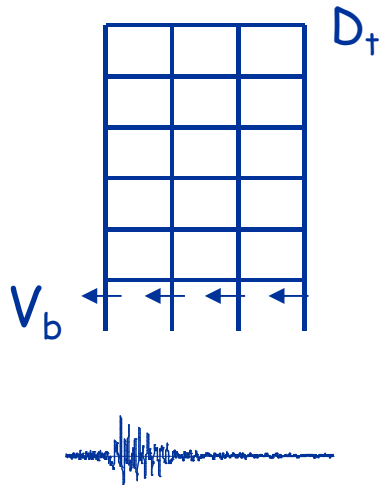
Analisi dinamica non lineare



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?

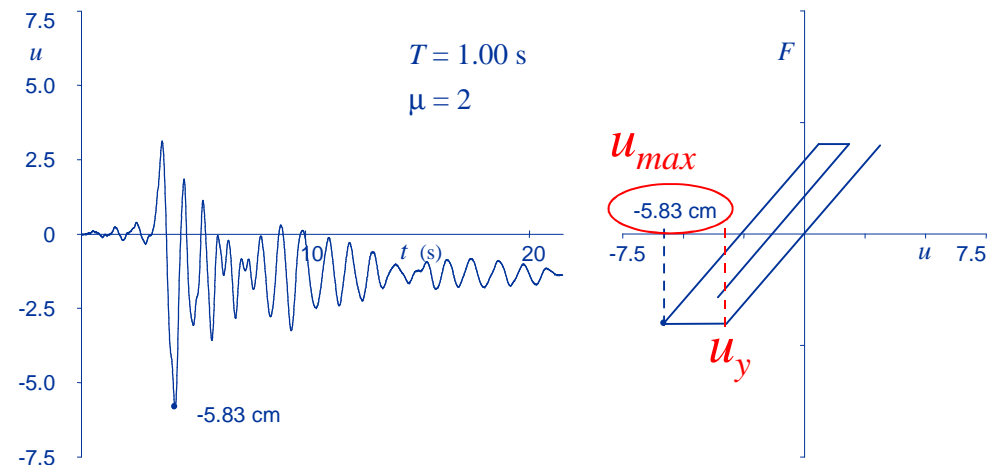
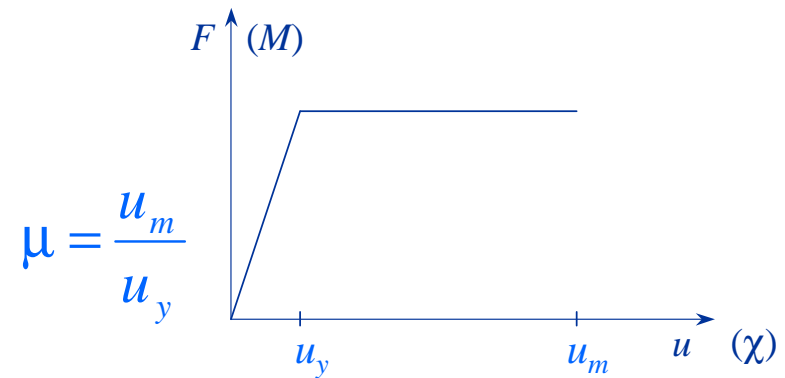
Progetto/verifica di strutture elasto-plastiche

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

sia maggiore di
quella richiesta

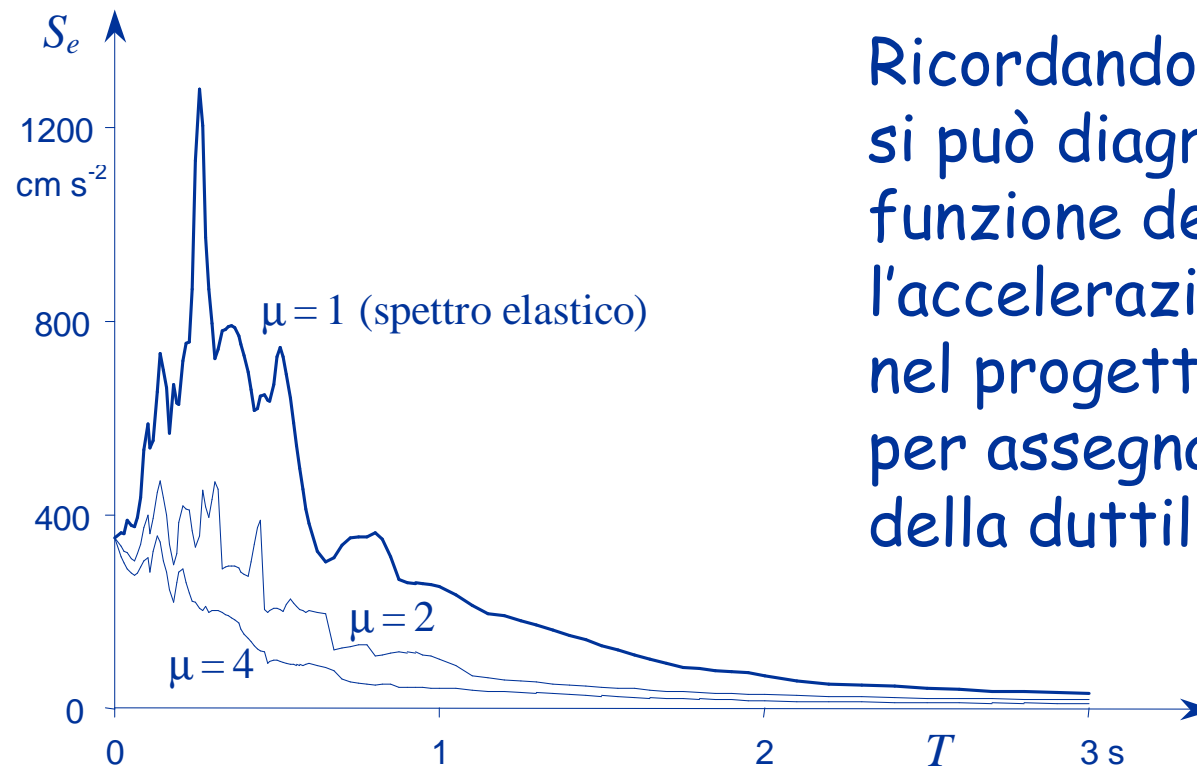
$$\mu = \frac{u_{\max}}{u_y}$$

Risposta
elasto-plastica



Progetto/verifica di strutture elasto-plastiche

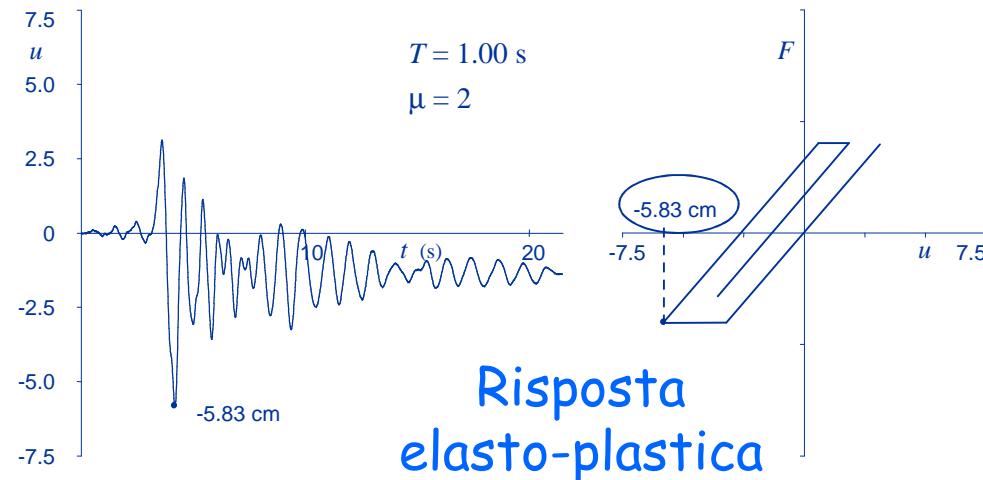
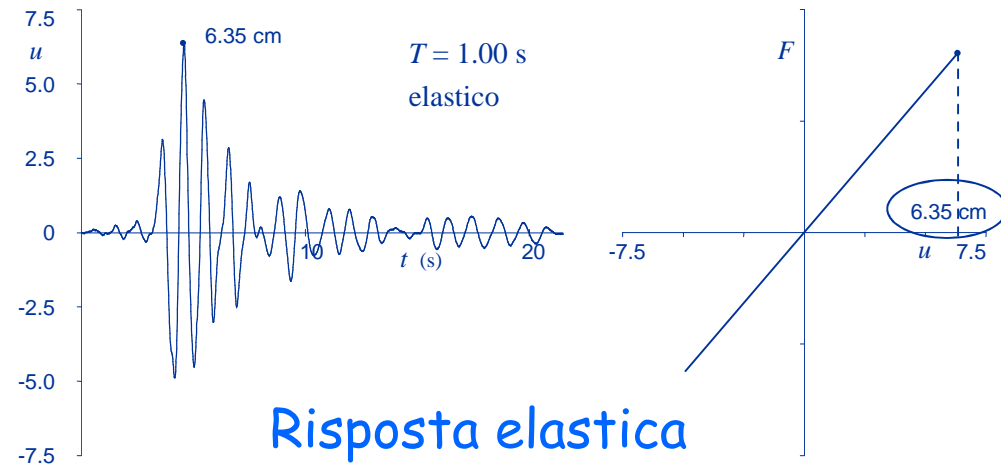
La resistenza può essere ridotta tanto da far coincidere la duttilità disponibile con quella richiesta



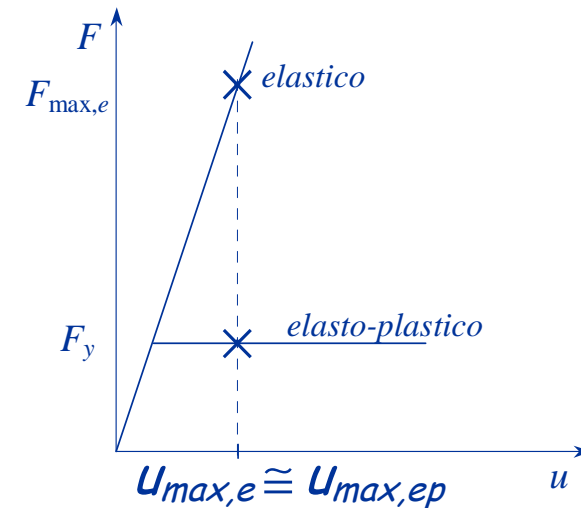
Ricordando che $F = m a$,
si può diagrammare in
funzione del periodo
l'accelerazione da usare
nel progetto,
per assegnati valori
della duttilità μ

Spettro di risposta a duttilità assegnata

Progettazione di strutture elasto-plastiche



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



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

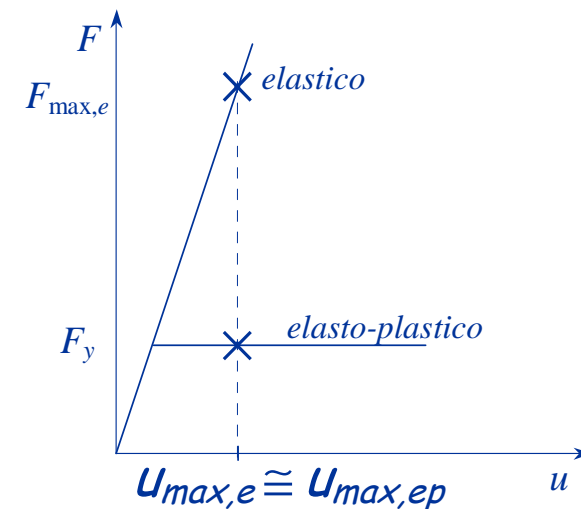
 $F_{max,e}$

per la duttilità

 μ

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

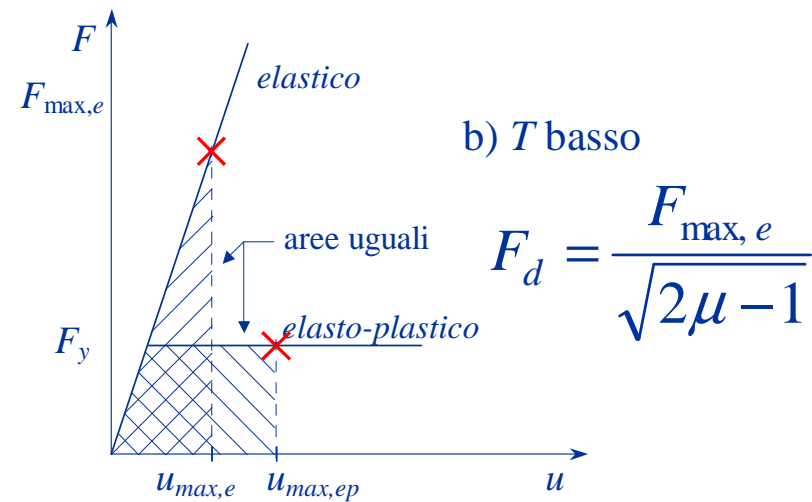
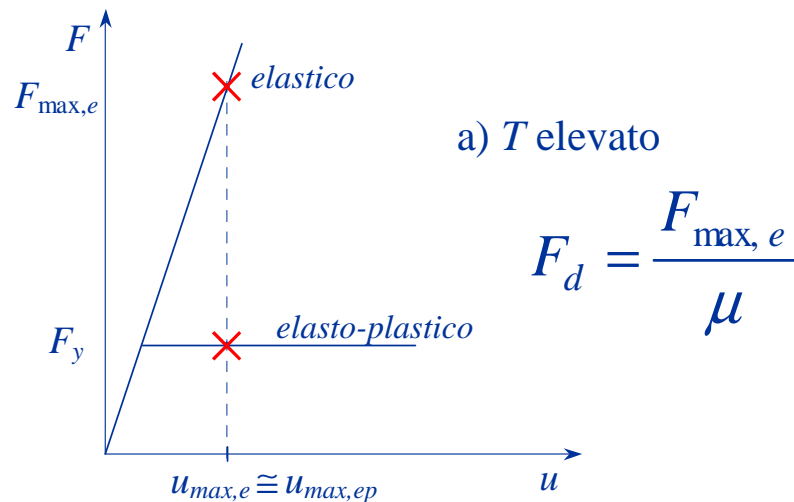
Le analisi numeriche
mostrano che lo
spostamento di
schemi elastici ed
elasto-plastici è più
o meno lo stesso



Progettazione di strutture elasto-plastiche

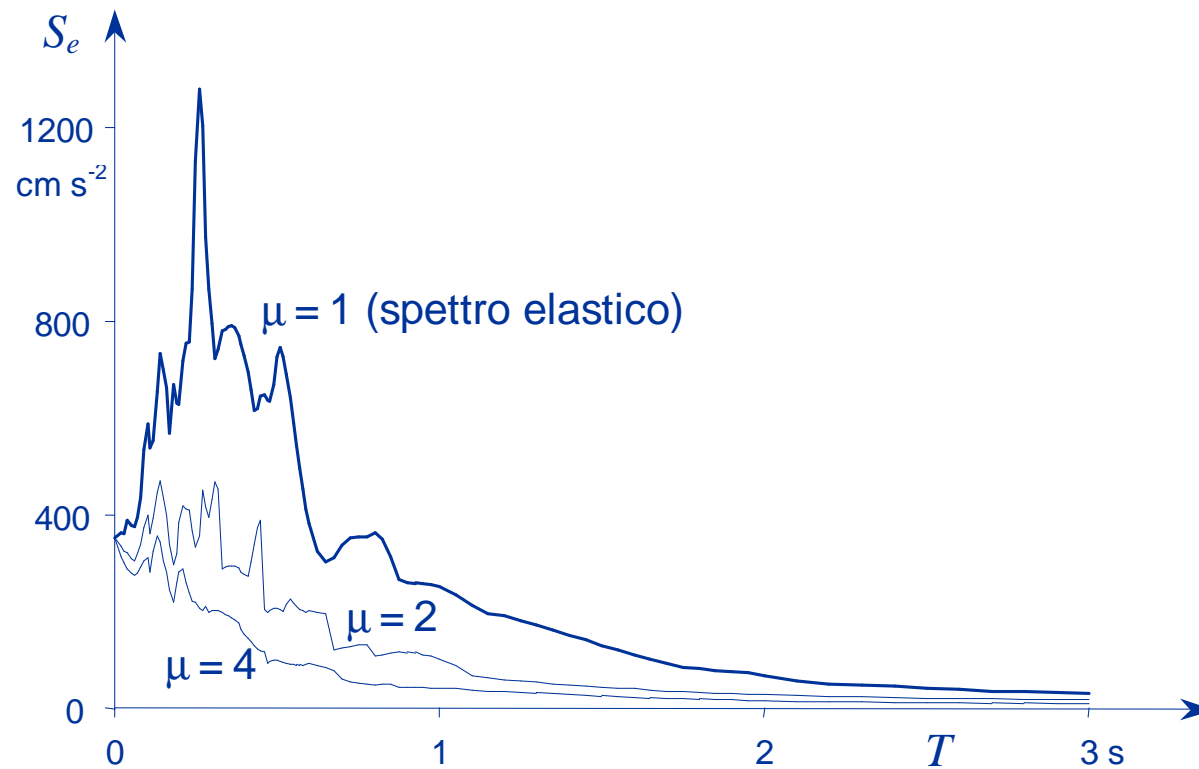
Il principio di uguaglianza di spostamenti vale solo
per strutture con periodo medio-alto

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



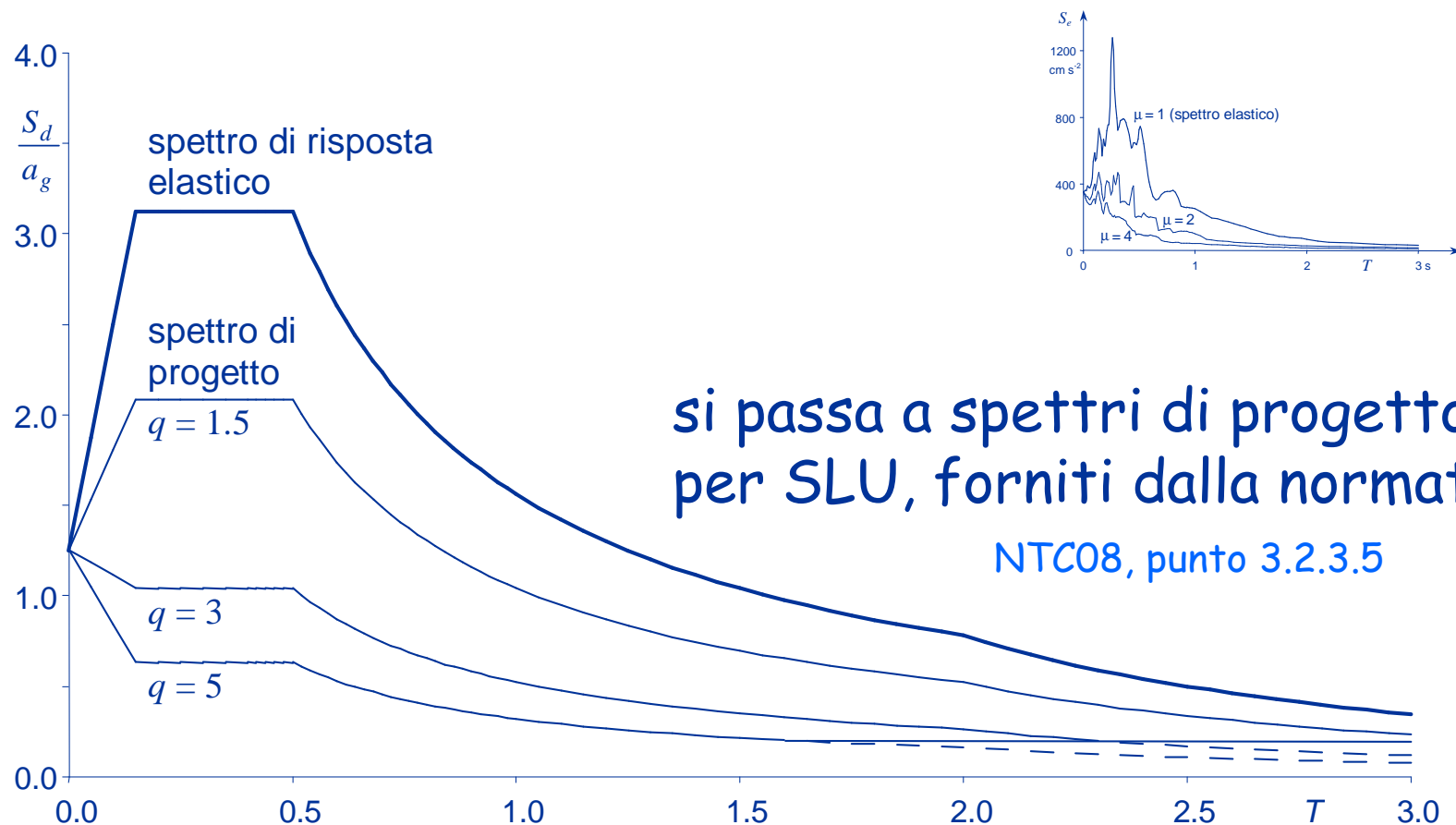
Progettazione di strutture elasto-plastiche

Dagli spettri di risposta a duttilità assegnata



Progettazione di strutture elasto-plastiche

Dagli spettri di risposta a duttilità assegnata



si passa a spettri di progetto
per SLU, forniti dalla normativa

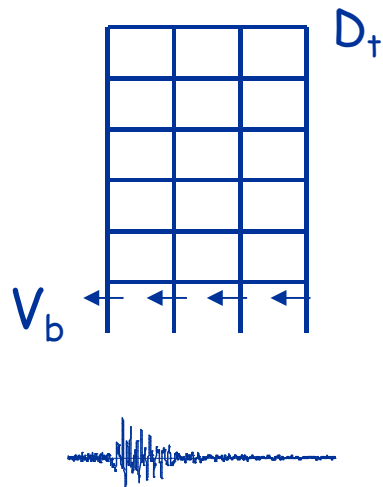
NTC08, punto 3.2.3.5

Progetto a duttilità assegnata

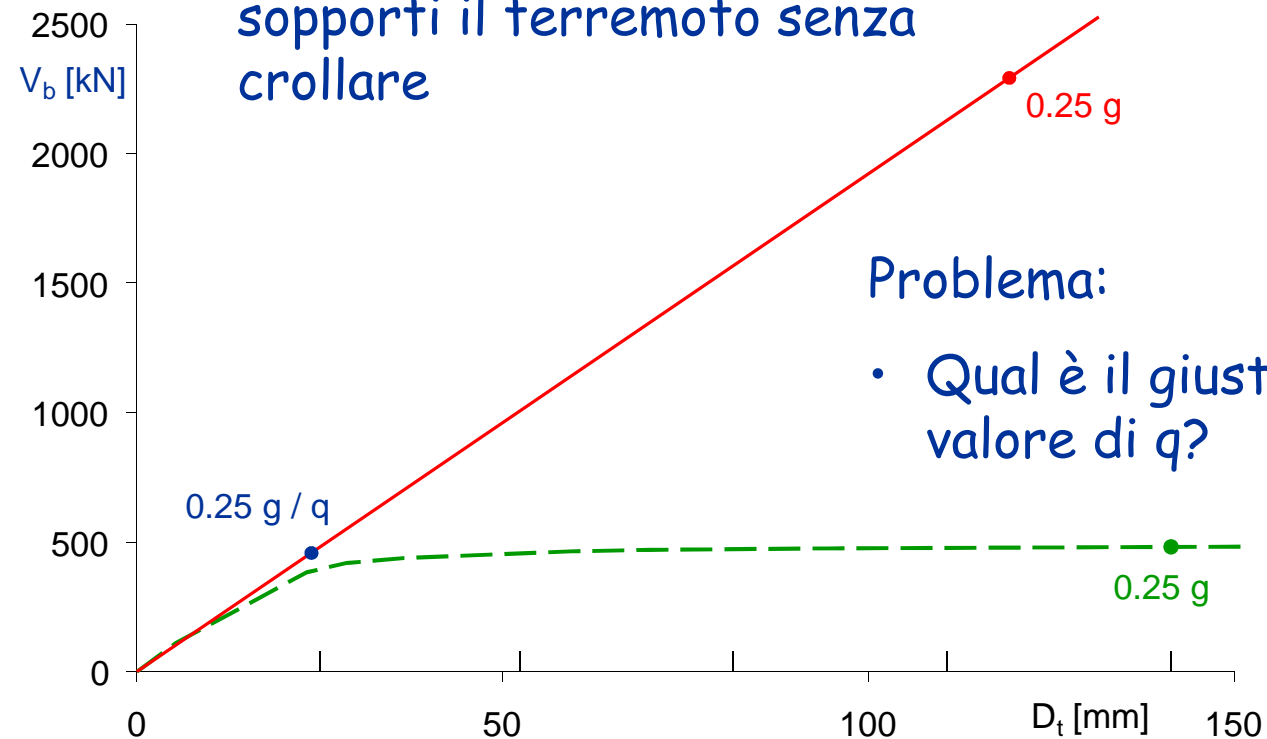
- Nota la duttilità, si può ricavare l'accelerazione (e quindi le forze) di progetto dagli spettri di risposta a duttilità assegnata.
- Risolvendo lo schema strutturale soggetto a queste forze (con analisi lineare) si verificano le sezioni.
- Se la struttura sopporta queste azioni ed ha la duttilità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

Alternative all'analisi dinamica non lineare

Analisi modale e riduzione con fattore di struttura q



Si ipotizza che, grazie alla duttilità, una struttura progettata con forze ridotte sopporti il terremoto senza crollare

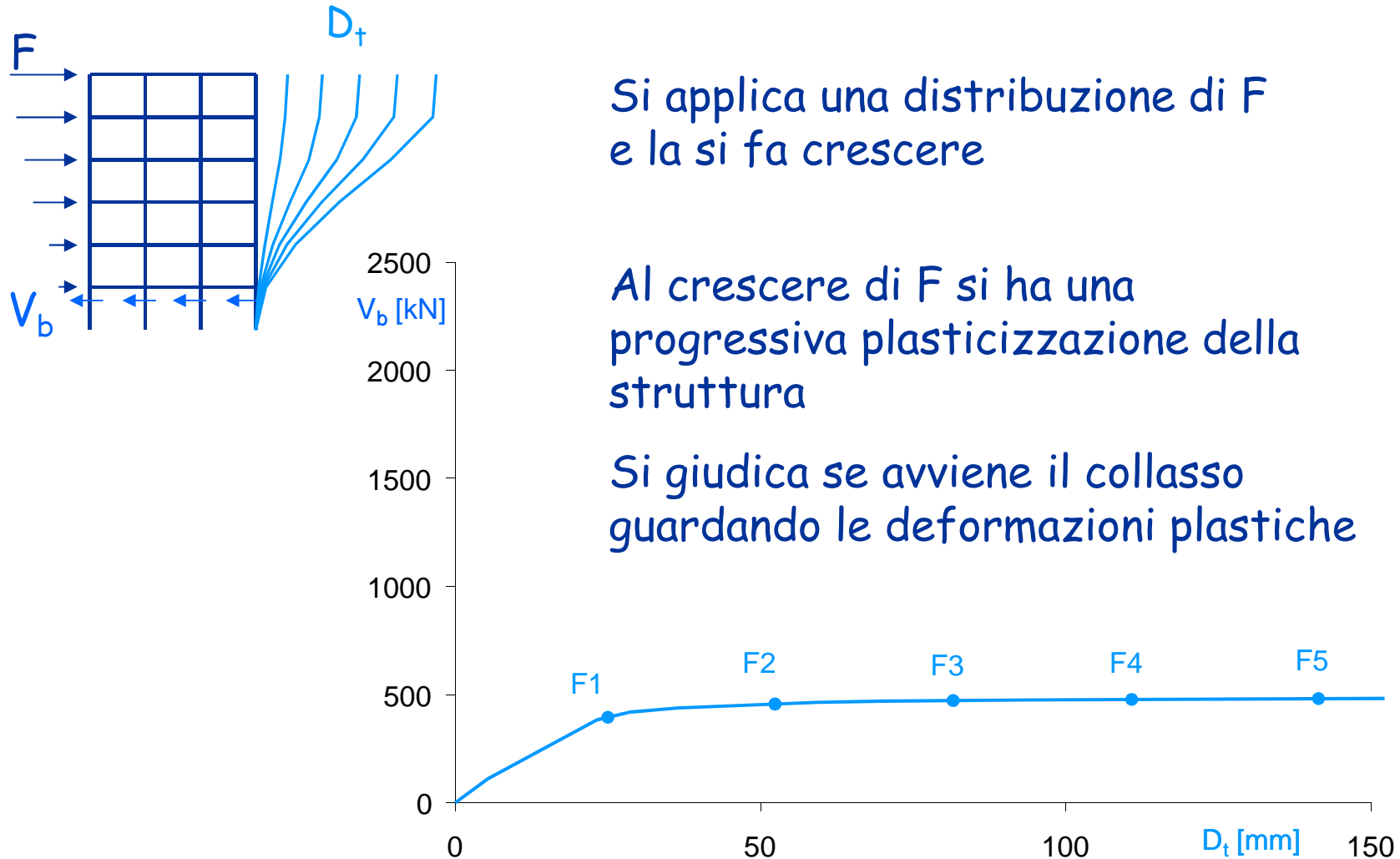


Problema:

- Qual è il giusto valore di q ?

Alternative all'analisi dinamica non lineare

Analisi statica non lineare



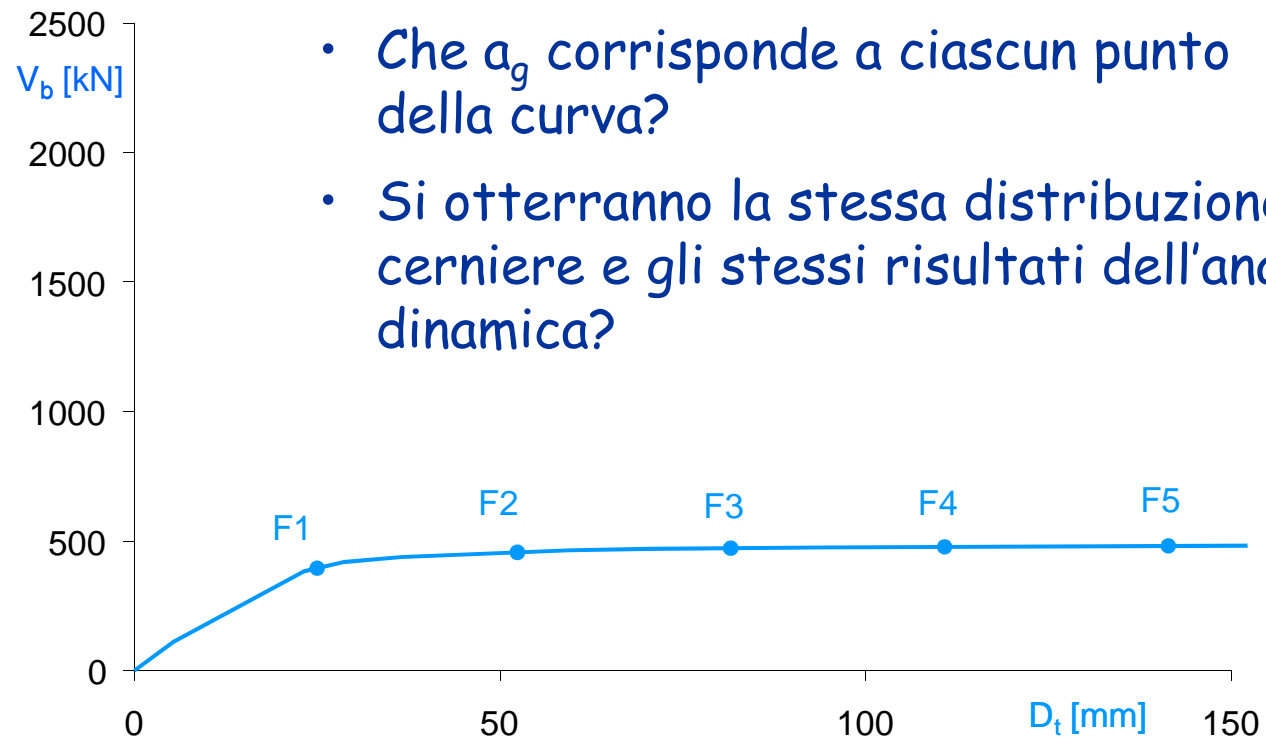
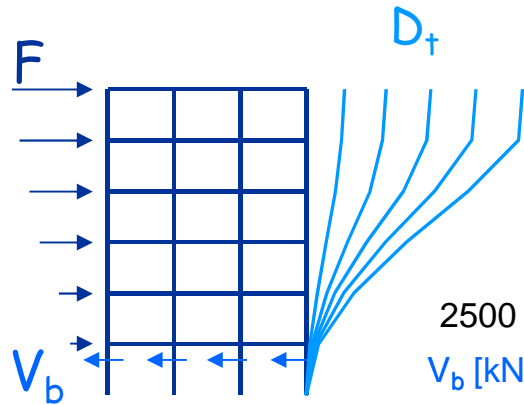
Si applica una distribuzione di F
e la si fa crescere

Al crescere di F si ha una
progressiva plasticizzazione della
struttura

Si giudica se avviene il collasso
guardando le deformazioni plastiche

Alternative all'analisi dinamica non lineare

Analisi statica non lineare



Problemi:

- Quale distribuzione di forze usare?
- Che a_g corrisponde a ciascun punto della curva?
- Si otterranno la stessa distribuzione di cerniere e gli stessi risultati dell'analisi dinamica?

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)

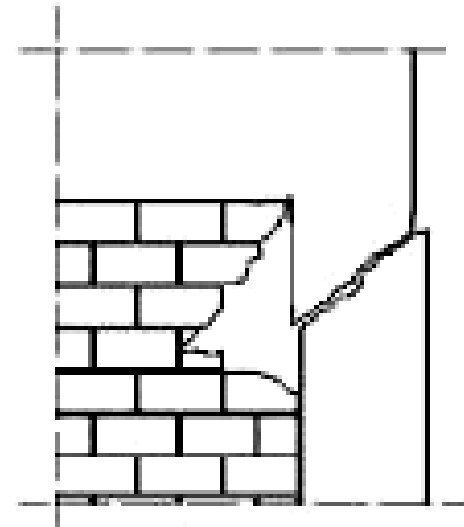
Collasso di edifici esistenti: duttile o fragile?

Santa Venerina,
2002

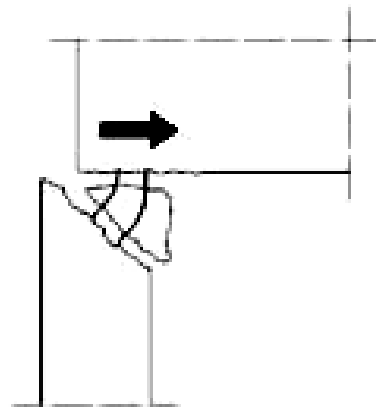
Foto G. Gaeta



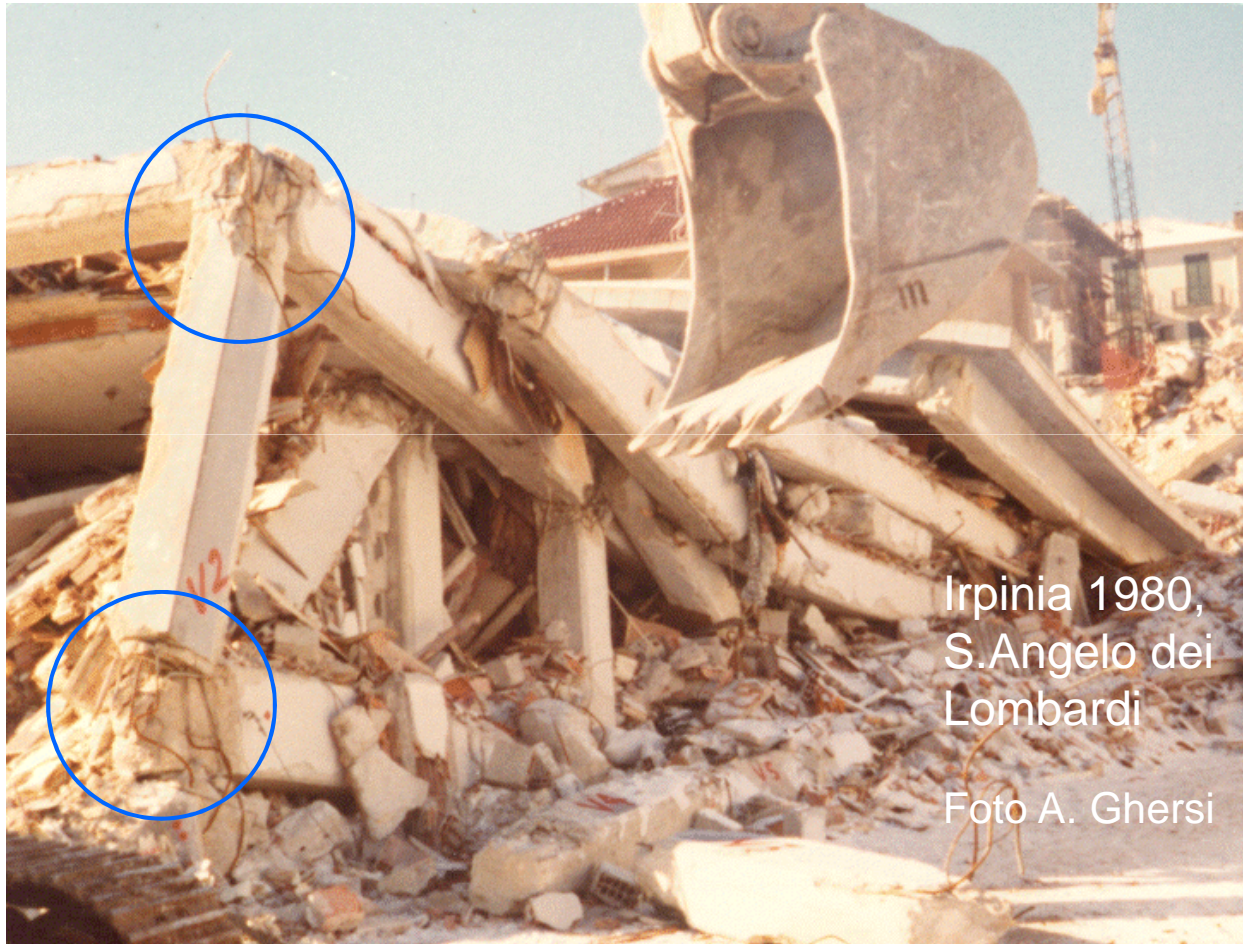
Rottura diagonale
della muratura e
propagazione come
lesione a taglio nel
pilastro



Collasso di edifici esistenti: duttile o fragile?



Collasso di edifici esistenti: duttile o fragile?



Irpinia 1980,
S. Angelo dei
Lombardi

Foto A. Gherzi

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?



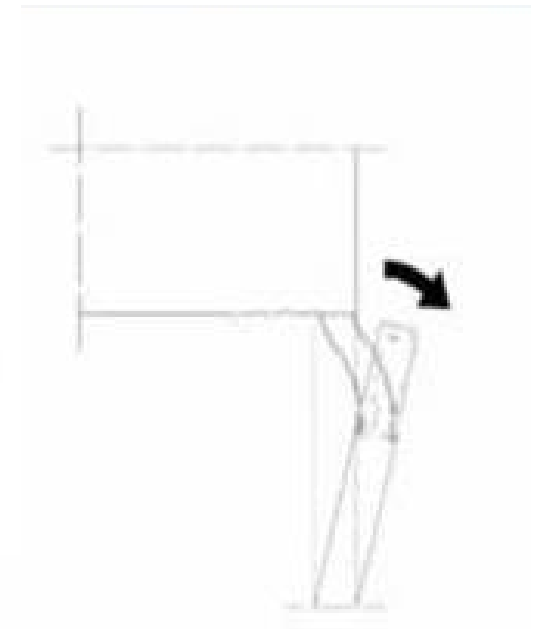
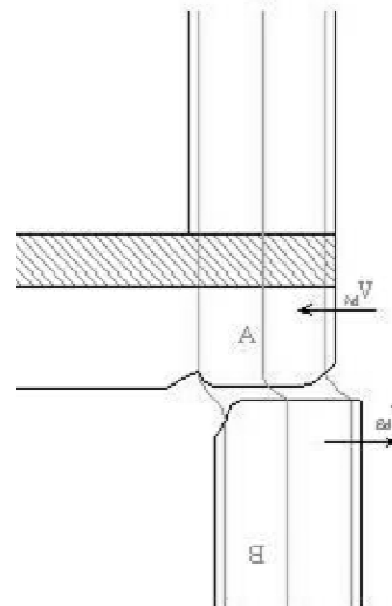
Danneggiamento dei nodi in testa ed al piede del pilastro:
non si ha formazione di cerniere plastiche sulla colonna
né tantomeno sulle travi

Collasso di edifici esistenti: duttile o fragile?



Irpinia 1980,
Lioni, Edificio del
Banco di Napoli

Foto A. Gherzi



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