

Corso di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura

Progetto di costruzioni in zona sismica
A.A. 2023/2024

07 – RISPOSTA INELASTICA DI SISTEMI SDOF

Edoardo M. Marino, Università degli Studi di Catania

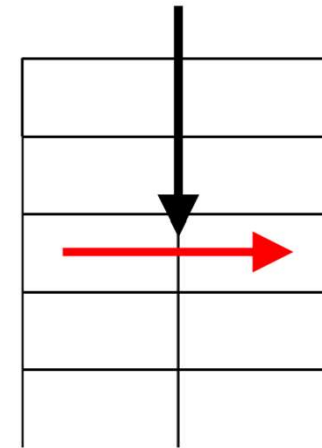
Possiamo progettare le strutture per rimanere in campo elastico?

La PGA, per terremoti con elevato periodo di ritorno, è molto forte (fino a 0.35g ed oltre in zone ad alta sismicità con terreni non buoni)

Per strutture con periodo medio-bassi si ha una notevole amplificazione dell'accelerazione rispetto a quella del suolo (circa 2.5 volte)

Le azioni inerziali (forze orizzontali indotte dal sisma) possono essere comparabili con le azioni verticali

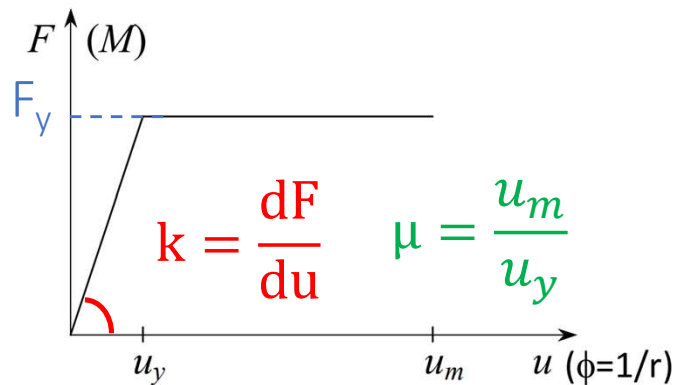
Non è economicamente conveniente progettare la struttura in modo che rimanga in campo elastico



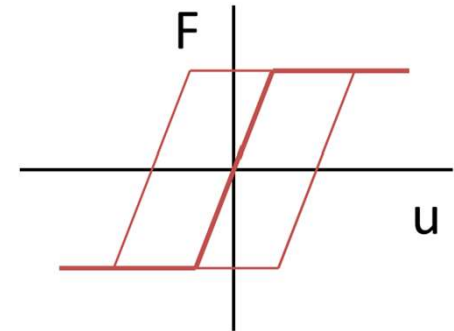
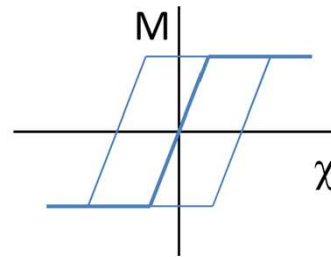
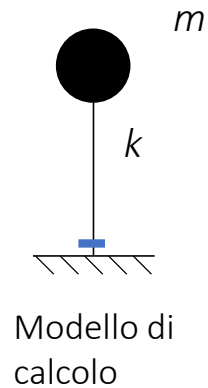
Sistema SDOF con comportamento elastico perfettamente plastico

È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza Inclinazione del diagramma
- Resistenza Soglia di plasticizzazione
- Duttilità Capacità di deformarsi plasticamente
(duttilità disponibile)



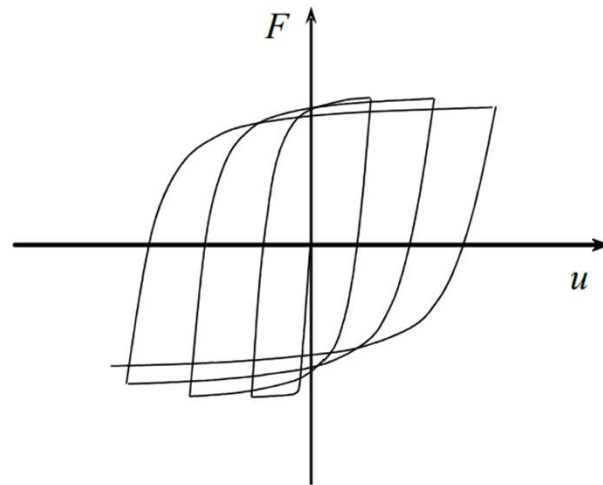
Comportamento ciclico



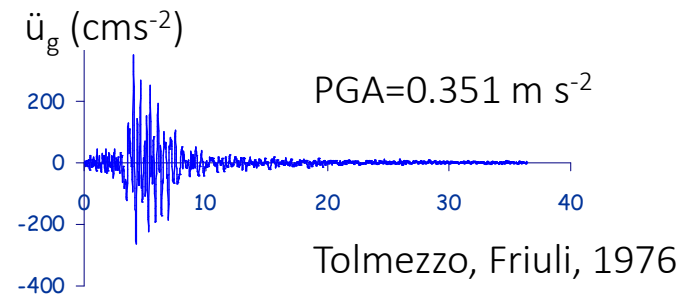
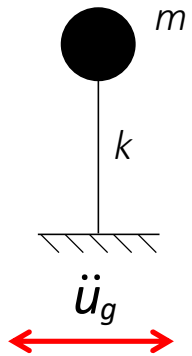
Definito il legame costitutivo della sezione è possibile determinare il legame forza-spostamento della struttura

Il comportamento reale può essere più complesso

Il comportamento ciclico di un sistema reale può presentare degradi di rigidità e resistenza



Risposta sismica ed equazione del moto



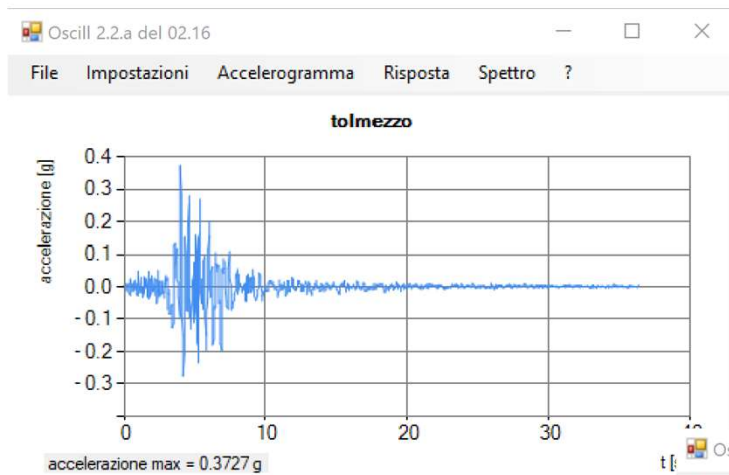
È possibile determinare numericamente la risposta ad un accelerogramma

Nell'equazione di equilibrio dinamico la forza di richiamo f_s non è elastica, quindi non è proporzionale allo spostamento u

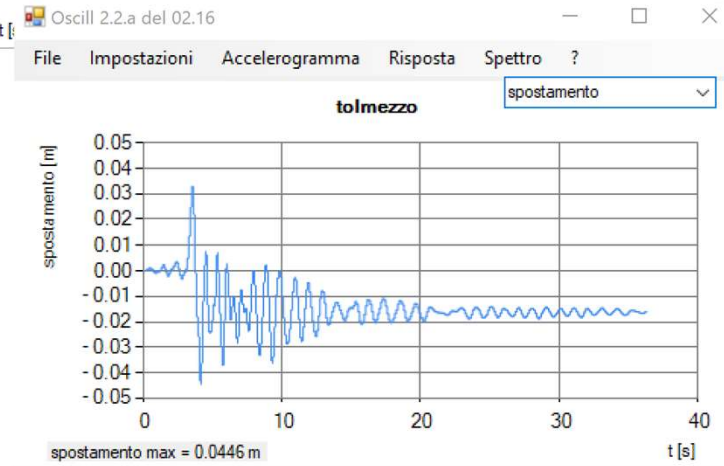
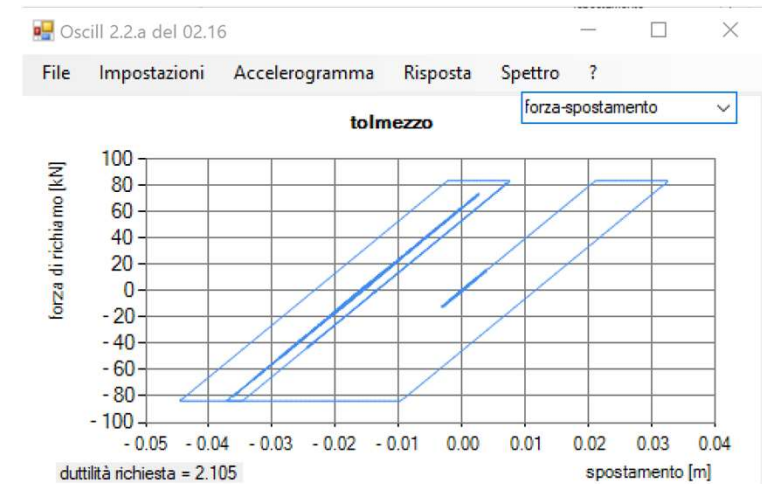
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u) = -m\ddot{u}_g$$

Risposta sismica (programma Oscill)

Accelerogramma



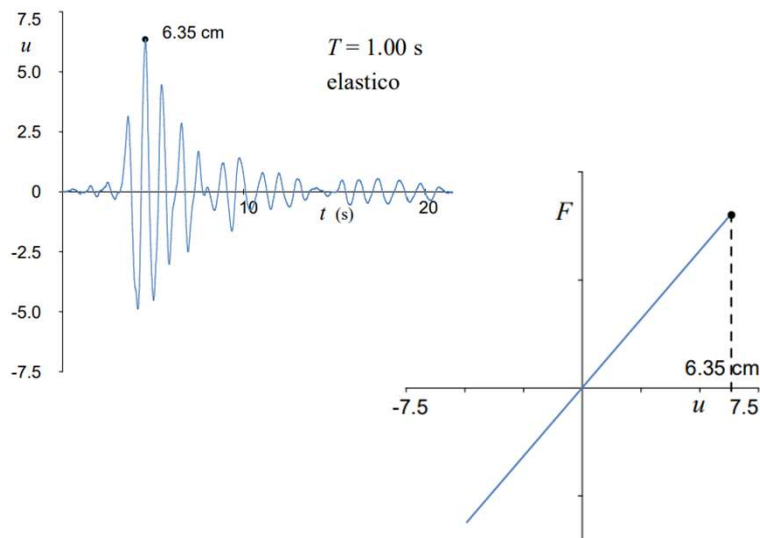
Risposta
sismica



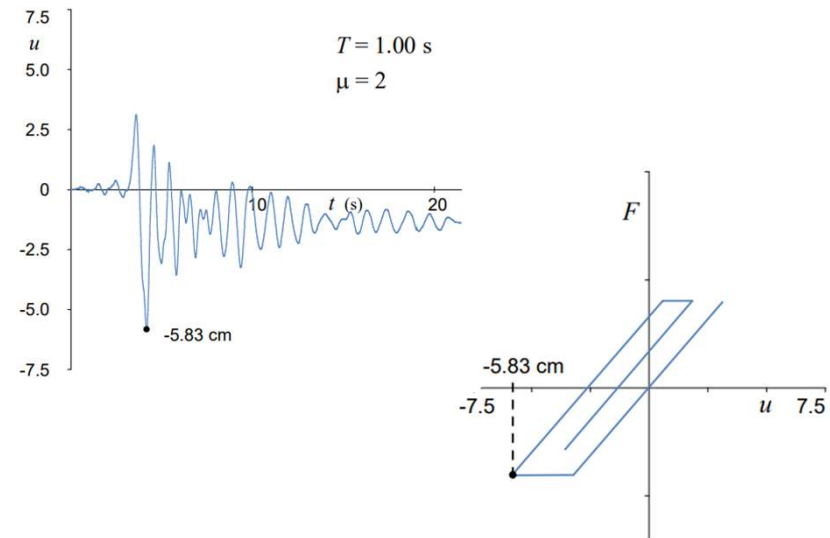
Risposta sismica (programma Oscill)

Il rapporto tra lo spostamento massimo u_{\max} ottenuto come risposta al sisma e lo spostamento u_y di plasticizzazione è la duttilità necessaria al sistema per non collassare (richiesta di duttilità)

Risposta elastica



Risposta inelastica



Implicazioni sulla progettazione

Una struttura dovrebbe essere progettata con forze elevate se la si vuole mantenere in campo elastico

Una struttura progettata con forze minori va in campo plastico, ma può superare i terremoto se la duttilità disponibile delle singole sezioni è maggiore della richiesta di duttilità

Per giudicare se la struttura, pur andando in campo plastico, è in grado di superare il terremoto occorre esprimere un giudizio sulla duttilità e quindi su deformazioni, spostamenti

Displacement based-design

Implicazioni sulla progettazione

Una struttura dovrebbe essere progettata con forze elevate se la si vuole mantenere in campo elastico

Una struttura progettata con forze minori va in campo plastico, ma può superare i terremoto se la duttilità disponibile delle singole sezioni è maggiore della richiesta di duttilità

Idea base della progettazione sismica:

Progettare le strutture con forze più basse, facendo affidamento sulla duttilità

Force based-design

Spettri di risposta 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

Costruzione di spettri di risposta a duttilità assegnata

È possibile progettare la struttura con una forza ridotta, accettando la sua plasticizzazione, purché la duttilità disponibile sia non inferiore a quella richiesta

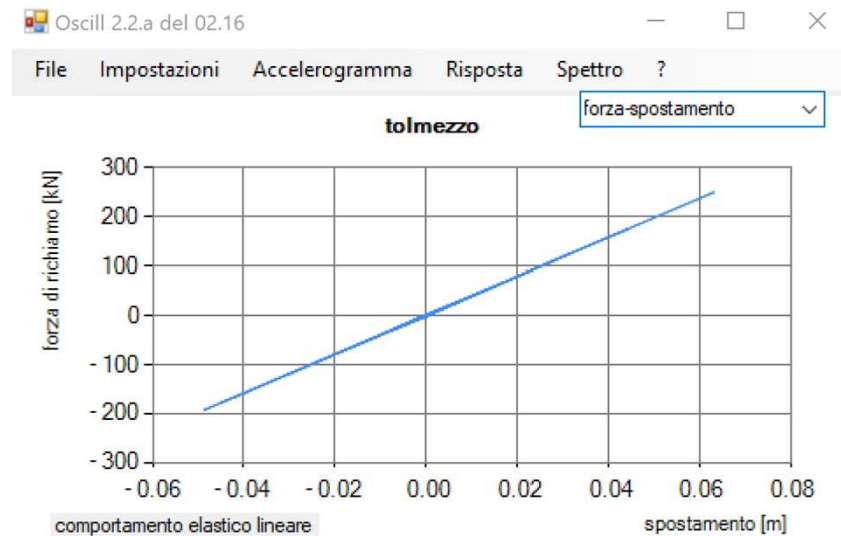
Esempio:

Duttilità disponibile = 2

Oscillatore elastico:

$F_{\max} = 250 \text{ kN}$

Duttilità richiesta = 0



Costruzione di spettri di risposta a duttilità assegnata

È possibile progettare la struttura con una forza ridotta, accettando la sua plasticizzazione, purché la duttilità disponibile sia non inferiore a quella richiesta

Esempio:

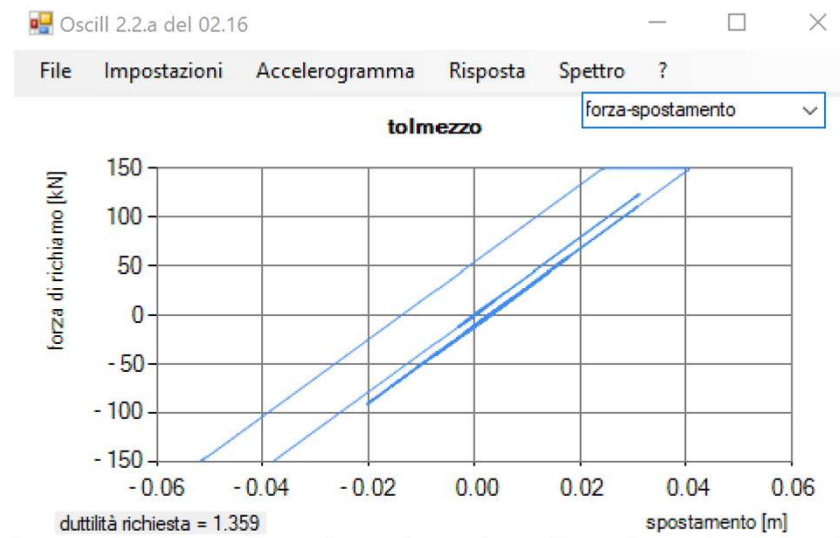
Duttilità disponibile = 2

Oscillatore con $F_y = 150$ kN:

$$u_y = 0.0379 \text{ m}$$

$$u_{\max} = 0.0516 \text{ m}$$

Duttilità richiesta = 1.359



Costruzione di spettri di risposta a duttilità assegnata

È possibile progettare la struttura con una forza ridotta, accettando la sua plasticizzazione, purché la duttilità disponibile sia non inferiore a quella richiesta

Esempio:

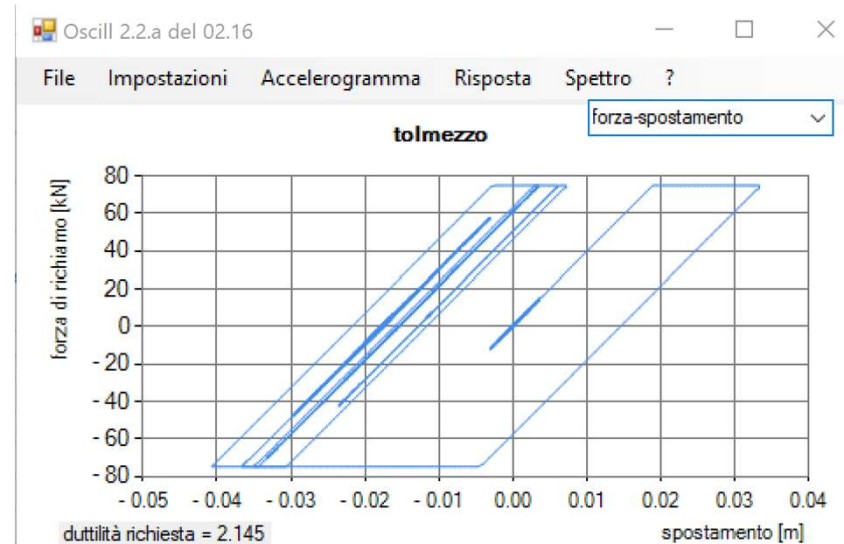
Duttilità disponibile = 2

Oscillatore con $F_y = 75$ kN:

$$u_y = 0.0190 \text{ m}$$

$$u_{\max} = 0.0407 \text{ m}$$

Duttilità richiesta = 2.145



Costruzione di spettri di risposta a duttilità assegnata

È possibile progettare la struttura con una forza ridotta, accettando la sua plasticizzazione, purché la duttilità disponibile sia non inferiore a quella richiesta

Esempio:

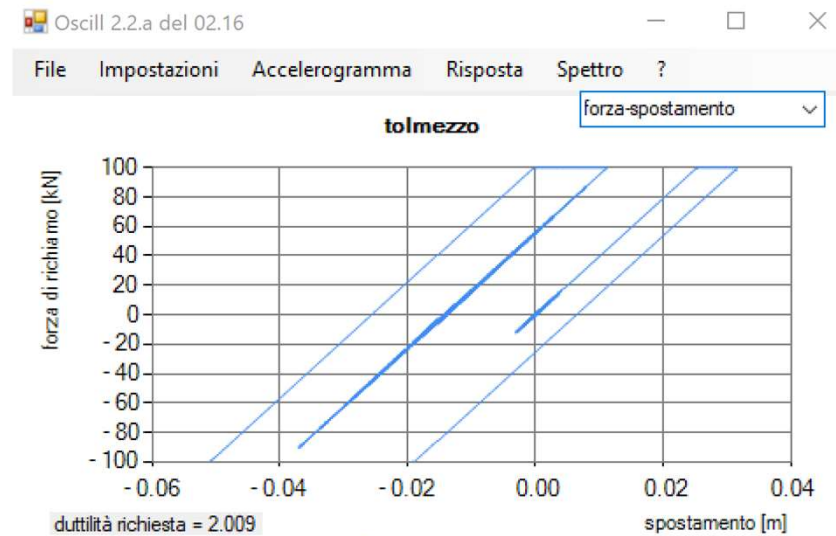
Duttilità disponibile = 2

Oscillatore con $F_y = 100$ kN:

$$u_y = 0.0253 \text{ m}$$

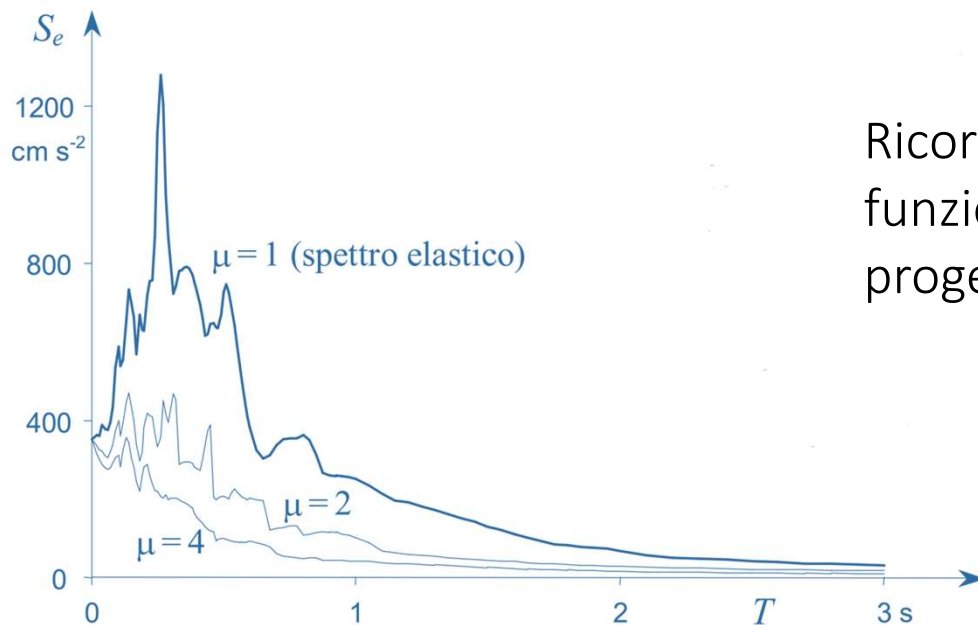
$$u_{\max} = 0.0509 \text{ m}$$

Duttilità richiesta = 2.009



Costruzione di spettri di risposta a duttilità assegnata

È possibile progettare la struttura con una forza ridotta, accettando la sua plasticizzazione, purché la duttilità disponibile sia non inferiore a quella richiesta

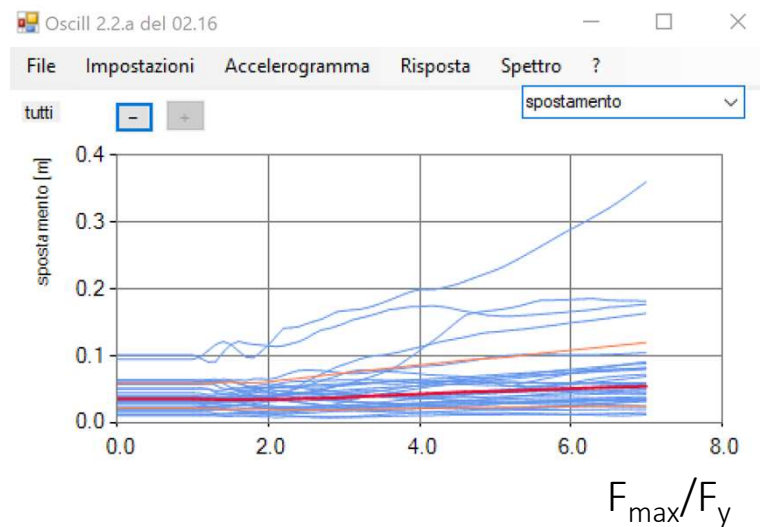
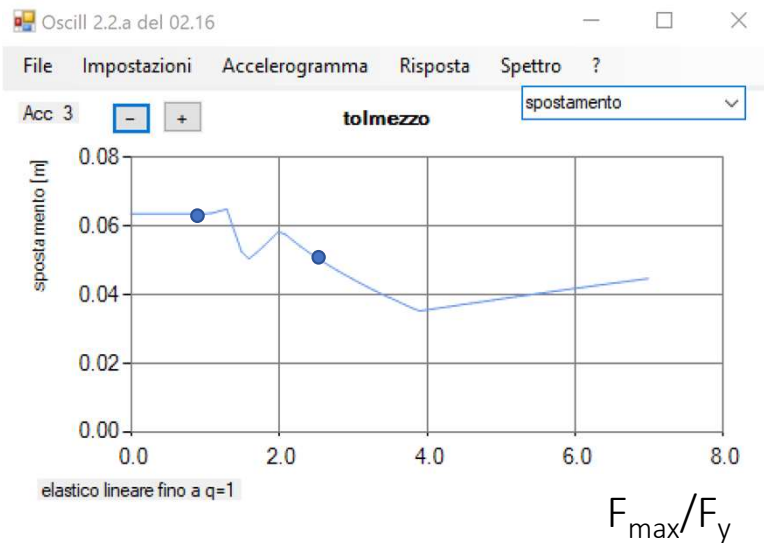


Ricordando che $F = m a$, si può diagrammare in funzione del periodo l'accelerazione da usare nel progetto, per assegnati valori della duttilità μ

Principio di uguaglianza degli spostamenti

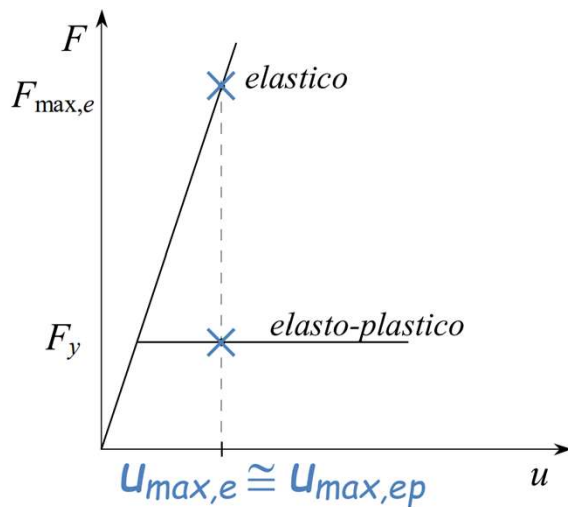
Le analisi numeriche mostrano che lo spostamento medio su tanti accelerogrammi di schemi elastici ed elasto-plastici è più o meno lo stesso

(Veletsos and Newmark, 1960; Newmark and Hall, 1973)



Principio di uguaglianza degli spostamenti

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



La forza di progetto F_d può essere ottenuta come:

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

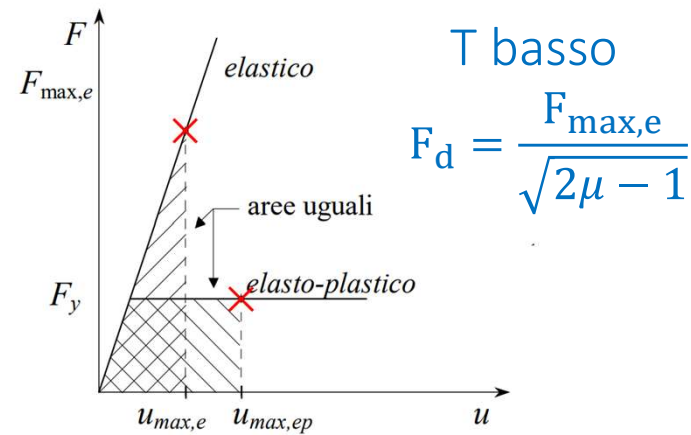
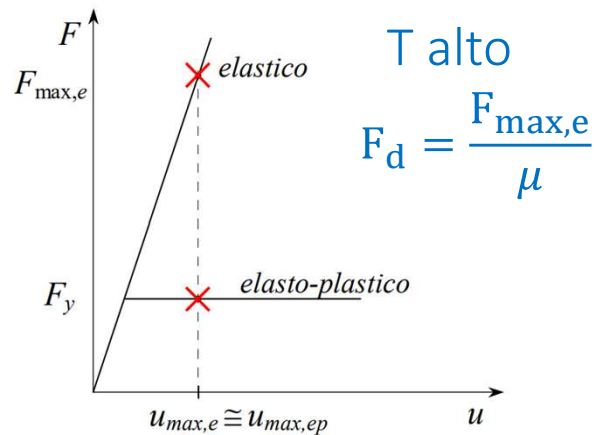
$F_{\max,e}$ forza necessaria per mantenere la struttura in campo elastico

μ duttilità disponibile

... ma non è sempre valido

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



Forza di progetto

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

Per le attuali normative T_c separa i sistemi a basso periodo da quelli ad alto periodo

$$F_d = \frac{F_{\max,e}}{\sqrt{2\mu - 1}} \quad \text{Per } T < T_c$$

$$F_d = \frac{F_{\max,e}}{\mu} \quad \text{Per } T \geq T_c$$

Spettro di progetto di NTC18 ed EC8

Lo spettro di progetto si ottiene a partire dallo spettro di risposta elastico sostituendo η con $1/q$

q = fattore di comportamento

$$S_d = \frac{a_g S F_0}{q} \left[\frac{T}{T_B} + \frac{q}{F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

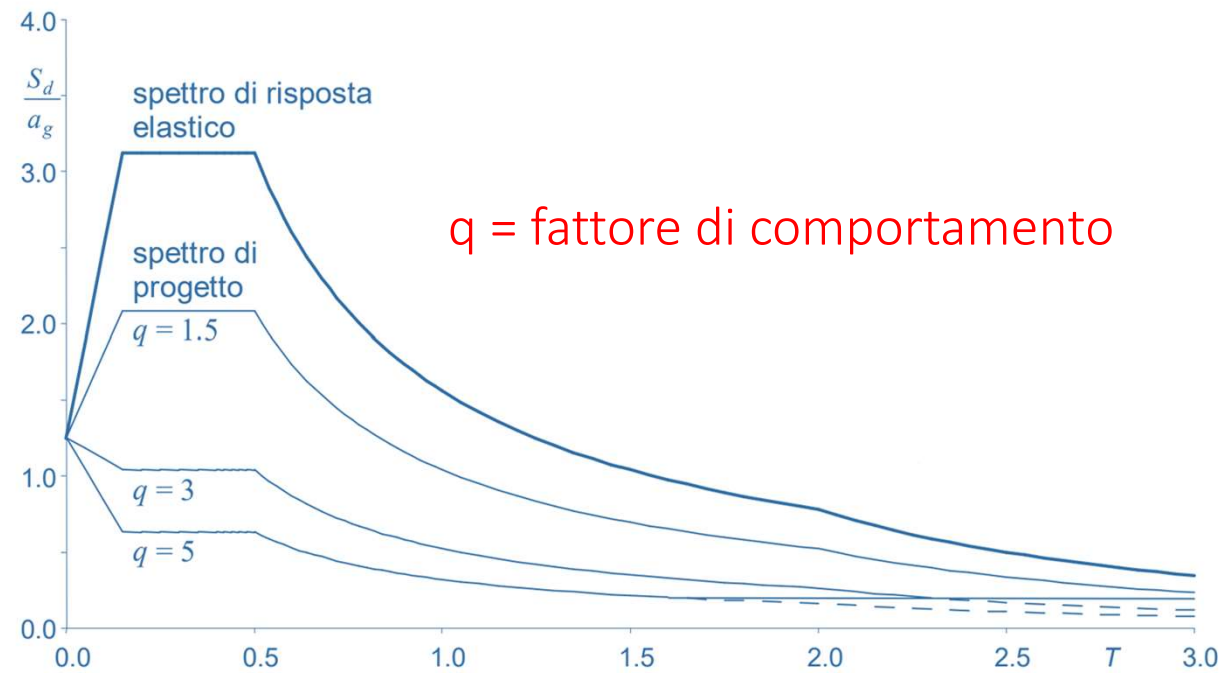
$$S_d = \frac{a_g S F_0}{q}$$

$$S_d = \frac{a_g S F_0}{q} \frac{T_C}{T}$$

$$S_d = \frac{a_g S F_0}{q} \frac{T_C T_D}{T^2}$$

Si assumerà comunque $S_d(T) > 0.2 a_g$

Spettro di progetto di NTC18 ed EC8



Si assumerà comunque $S_d(T) > 0.2a_g$