

Corsi di aggiornamento

# Progettiamo insieme

## Teoria e pratica della progettazione strutturale

### 1. Risposta sismica delle strutture

06 - Verifica del comportamento non lineare

Spoletto

18-19 marzo 2016

Aurelio Ghersi

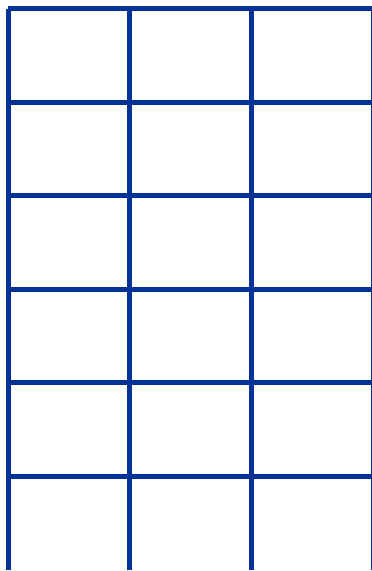
# Verifica delle strutture

- Se si ha a che fare con una struttura che non è stata progettata secondo i criteri di progettazione definiti dalla norma (o che per qualche motivo non li soddisfa a pieno) occorre valutare il comportamento non lineare della struttura ed esprimere un giudizio sulla sua capacità deformativa ancor più che sulla sua resistenza

# Comportamento non lineare la struttura

Valutare la risposta sismica di una struttura (che va oltre il limite elastico) ad un assegnato accelerogramma:

- È facile per un oscillatore semplice
- È molto complesso per strutture reali



Modello per i materiali



Legame momento-curvatura  
( $M-1/r$ ) per la sezione  
mediante modello a fibre



Modello di telaio con  
cerniere plastiche



Modello di telaio a  
fibre

# Alcuni problemi

relativi alla modellazione di struttura/materiale

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 una bilatera elastica-perfettamente plastica
  - C'è un ramo decrescente molto accentuato, con forte perdita di resistenza
  - La duttilità si riduce fortemente

# Alcuni problemi

relativi alla modellazione di struttura/materiale

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

# Comportamento non lineare gli accelerogrammi

Valutare la risposta sismica di una struttura (che va oltre il limite elastico) ad un assegnato accelerogramma

- Ma quale o quali?
- E quanti?
- Che tipo di giudizio si può tirar fuori?

# Comportamento non lineare gli accelerogrammi

La risposta è fortemente legata all'accelerogramma scelto

- Occorre utilizzare più accelerogrammi, che rispettino magnitudo, distanza epicentrale, spettro di risposta previsti per il sito  
... ma non è facile trovarli
- La normativa dice che 7 accelerogrammi consentono di usare il valore medio della risposta  
.. ma in realtà il numero minimo per analisi probabilistiche è 30 accelerogrammi

# Comportamento non lineare la risposta sismica

Il giudizio va espresso su parametri di deformazione plastica (rotazione plastica dei nodi, rotazione alla corda)

- Si può valutare quanti accelerogrammi portano al superamento del limite di rottura
- Si possono utilizzare indici di danno (da 0=nessun danno a 1=collasso)

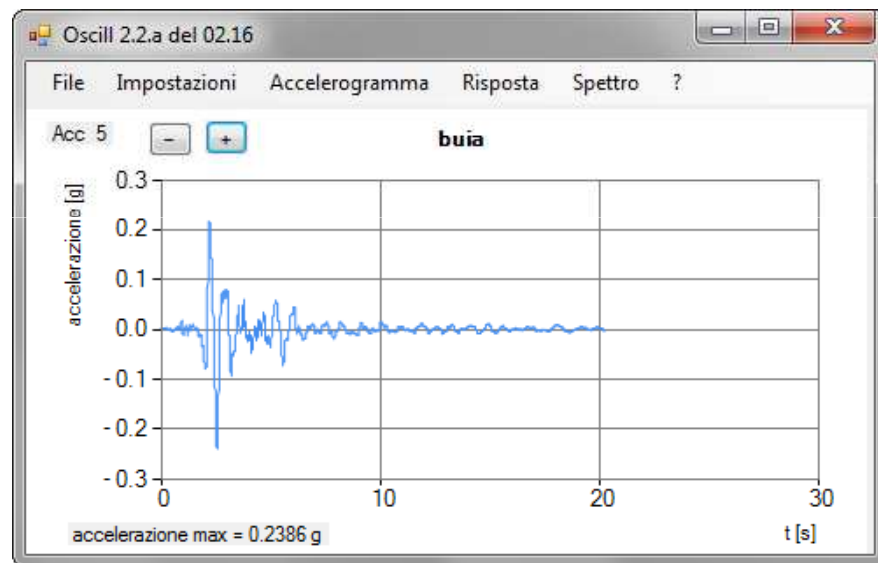
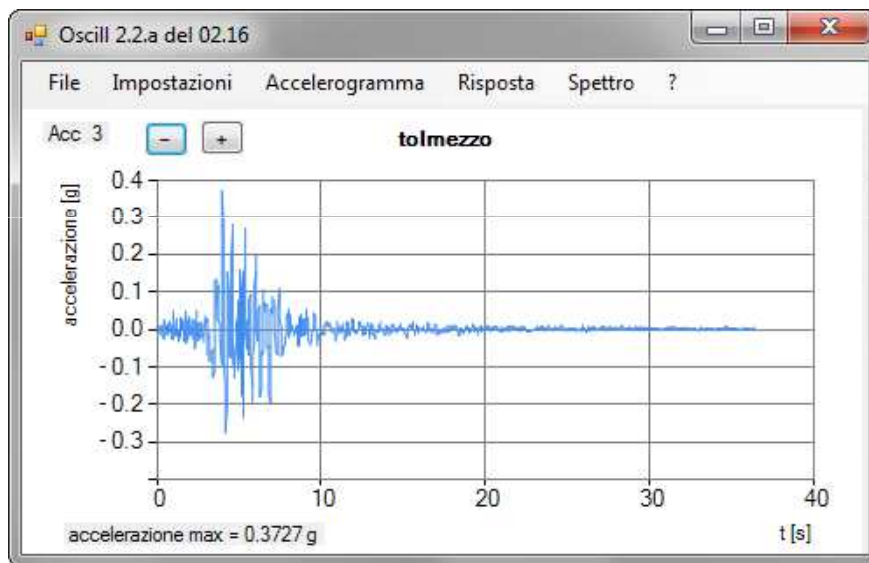
... ma come analizzarli statisticamente (come mettere insieme collasso e danneggiamento in un giudizio unico)?



# Analisi dinamica

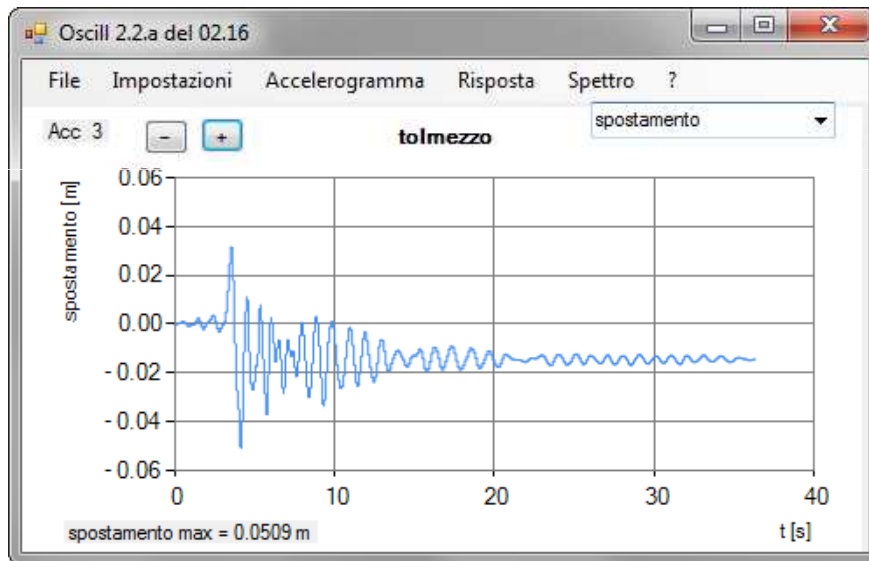
## un esempio, per oscillatore semplice

- Oscillatore semplice con periodo  $T=1.00$  s,  $\xi=0.05$ ,  $m=100$  t, resistenza 100 kN,  $u_{ult}=51$  mm
- Terremoti: 30 terremoti che forniscono uno spettro compatibile con quello di normativa

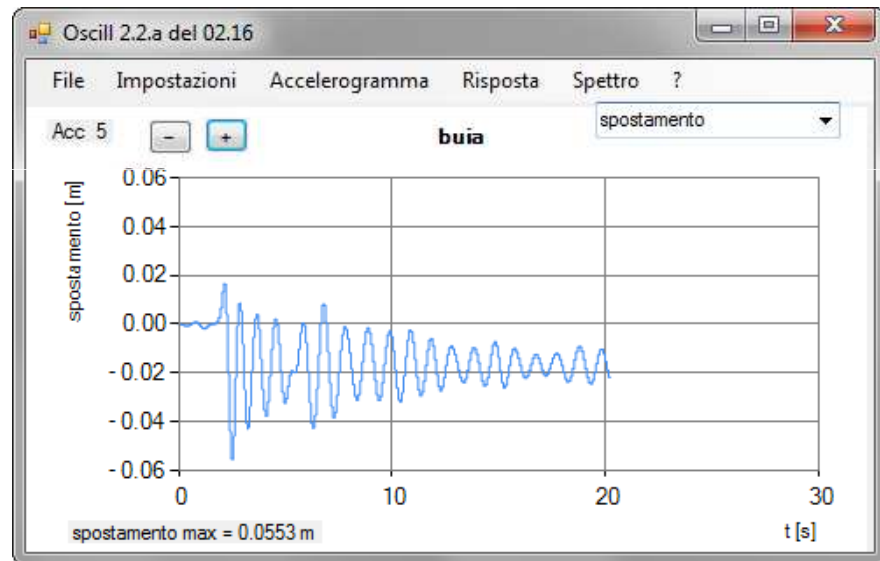


... e altri 28

# Risposta non lineare ai 30 terremoti



Spostamento di poco  
inferiore al limite



Spostamento  
superiore al limite

- In 5 terremoti su 30 viene superato il limite di spostamento

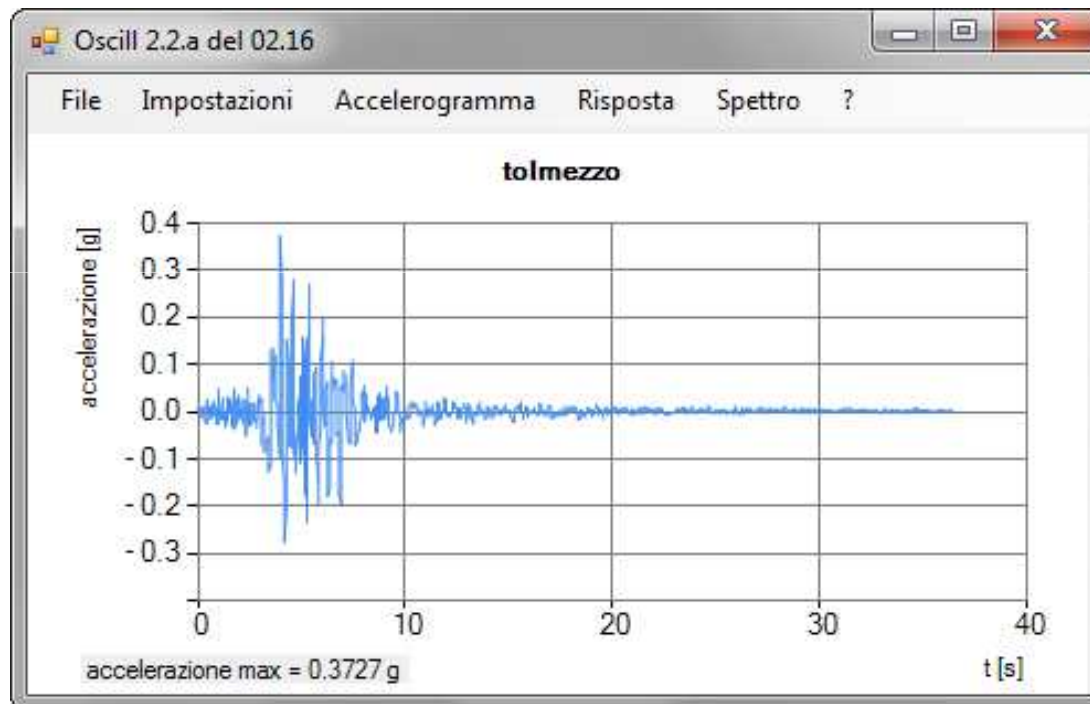
# Comportamento non lineare la risposta sismica

Può essere utile valutare la risposta sismica non lineare agli accelerogrammi facendone crescere progressivamente l'accelerazione  $a_g$   
IDA = Incremental Dynamic Analysis (Analisi dinamica incrementale)

- Si può valutare la probabilità di collasso in funzione del valore dell'accelerazione  $a_g$
- Questa può essere rappresentata mediante curve di fragilità
- Unendo curva di pericolosità e curva di fragilità si può calcolare la frequenza media annua di superamento di uno stato limite

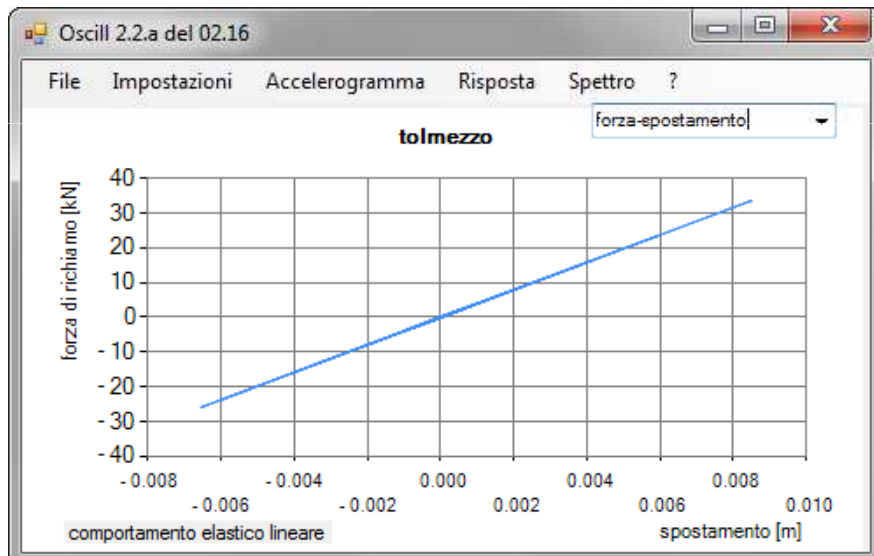
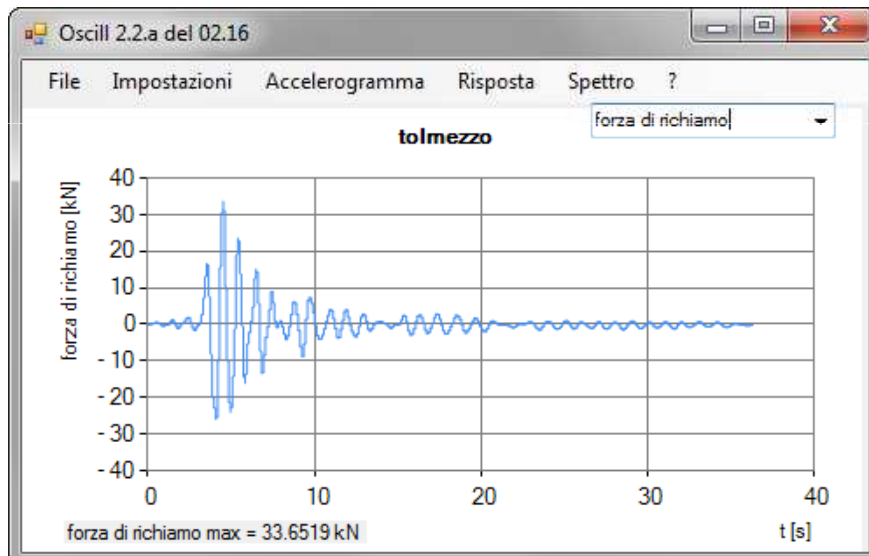
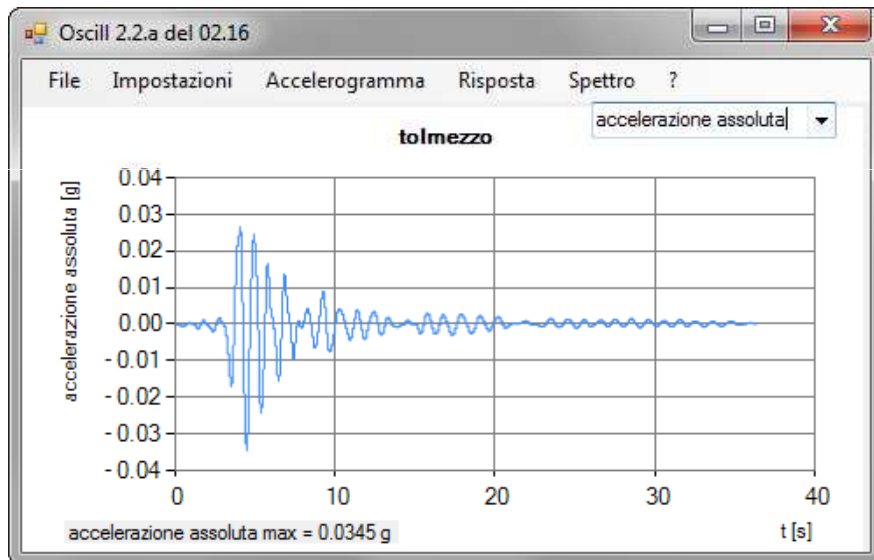
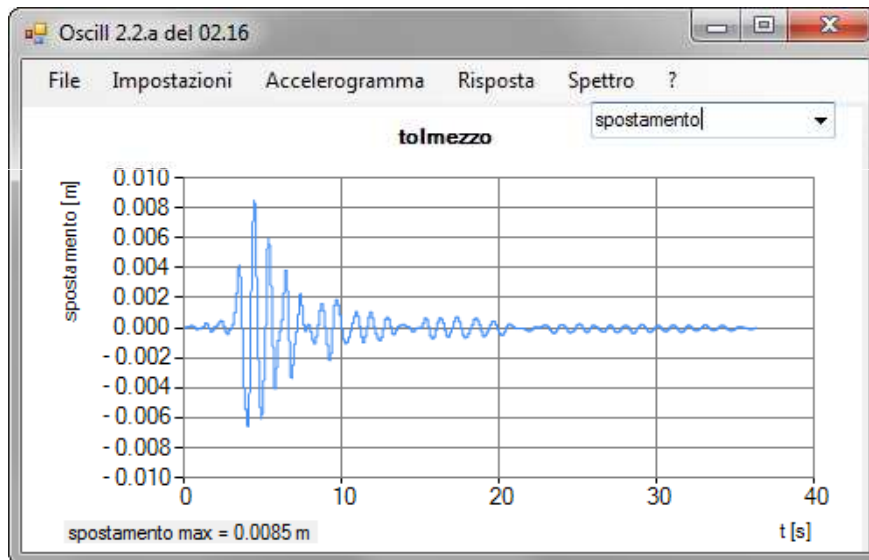
# Analisi dinamica incrementale un esempio, per oscillatore semplice

- Oscillatore semplice con periodo  $T=1.00$  s,  $\xi=0.05$ ,  $m=100$  t, resistenza 100 kN,  $u_{ult}=51$  mm
- Terremoto: Tolmezzo, scalato in modo da avere differenti valori di  $a_g$



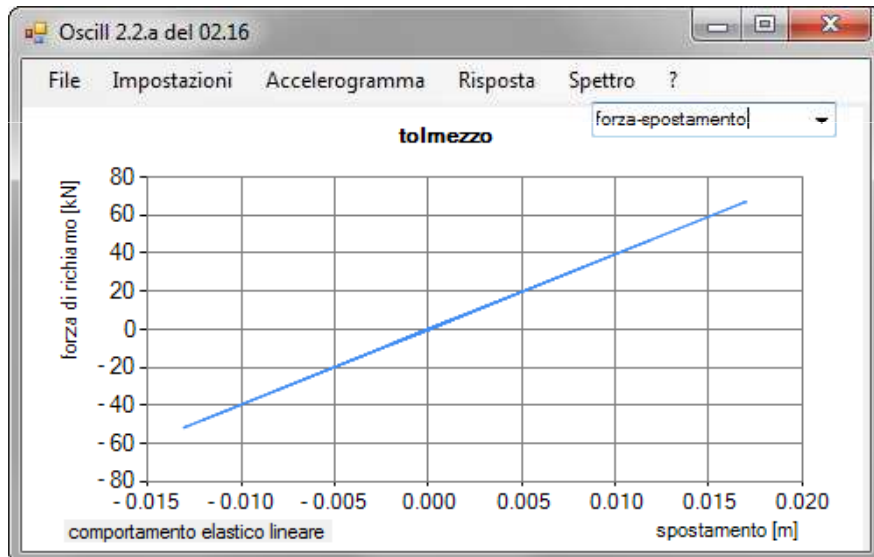
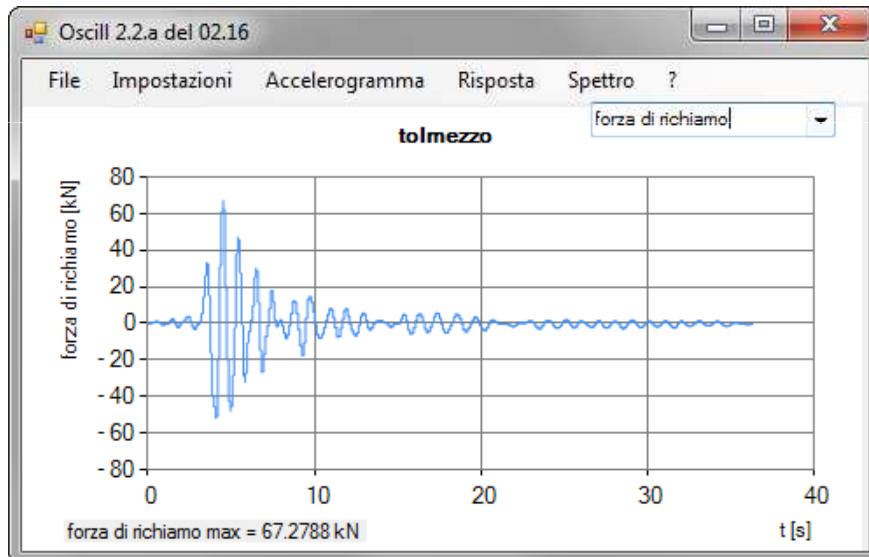
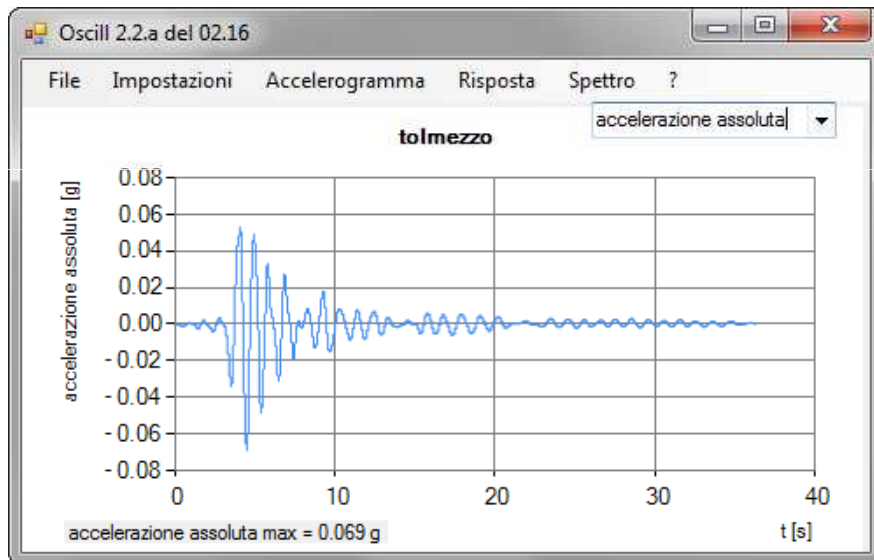
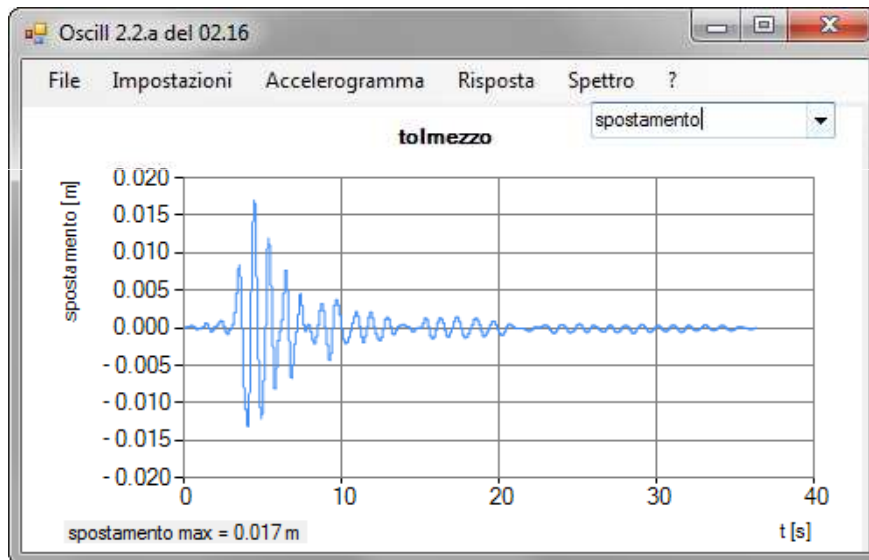
# Risposta per $a_g = 0.05 \text{ g}$

In campo  
elastico



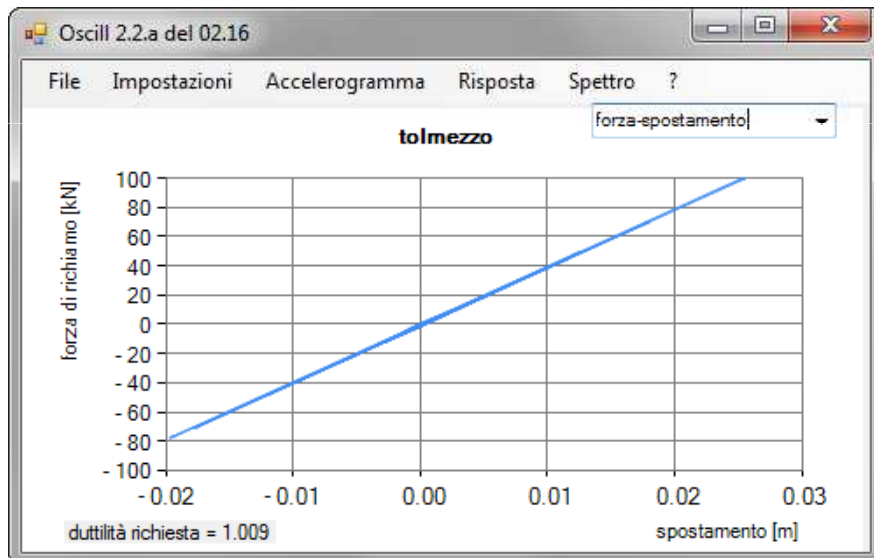
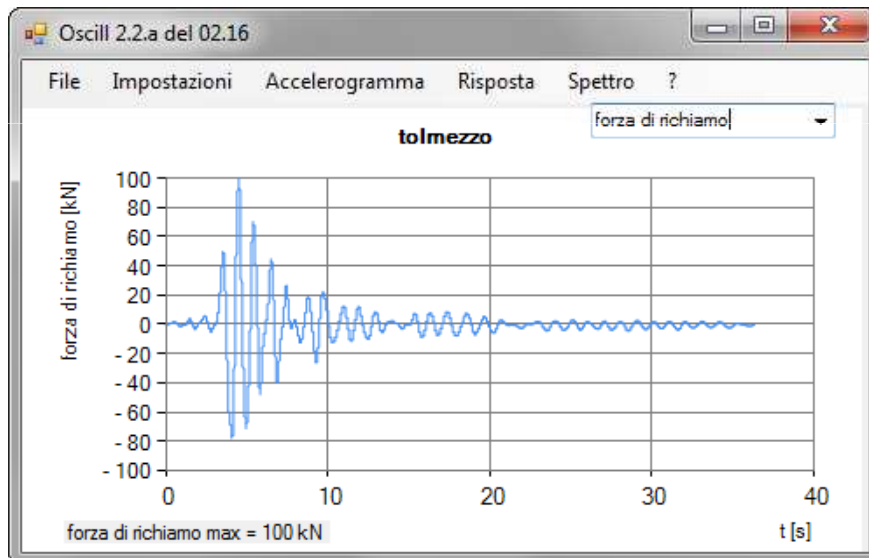
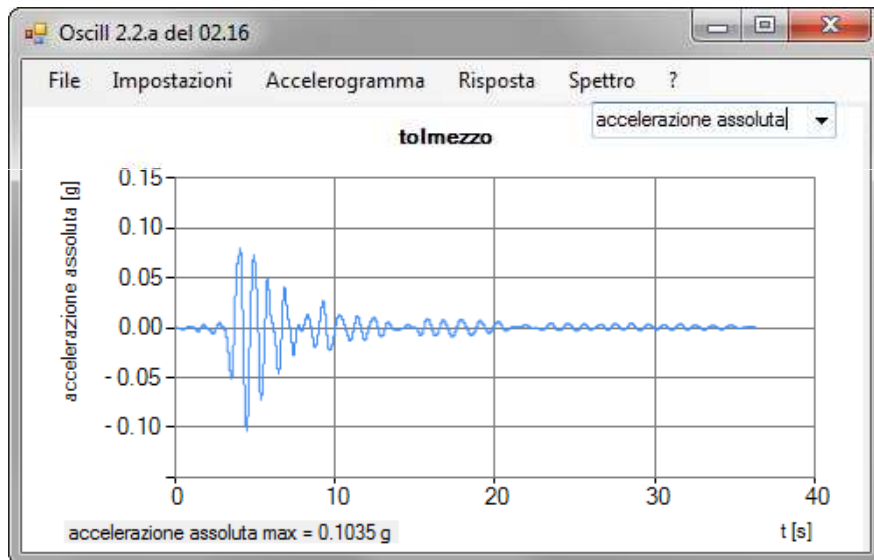
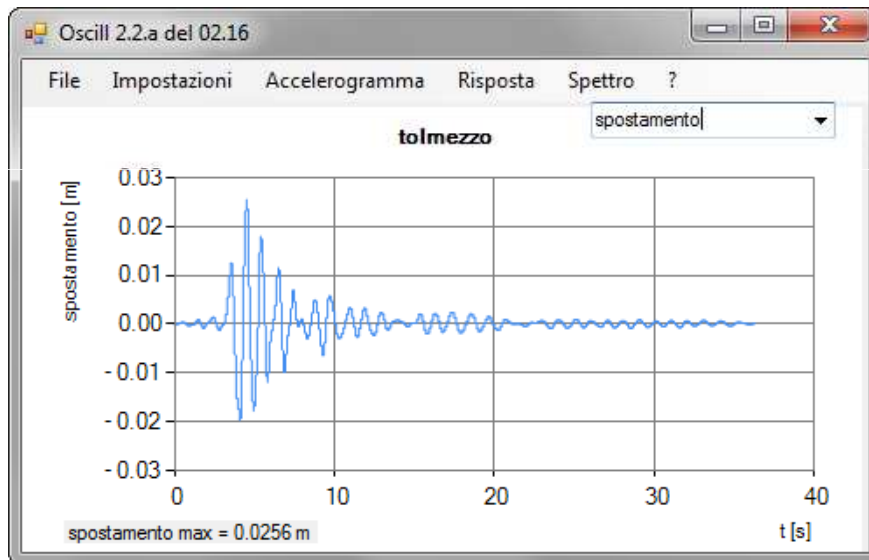
# Risposta per $a_g = 0.10 \text{ g}$

In campo  
elastico



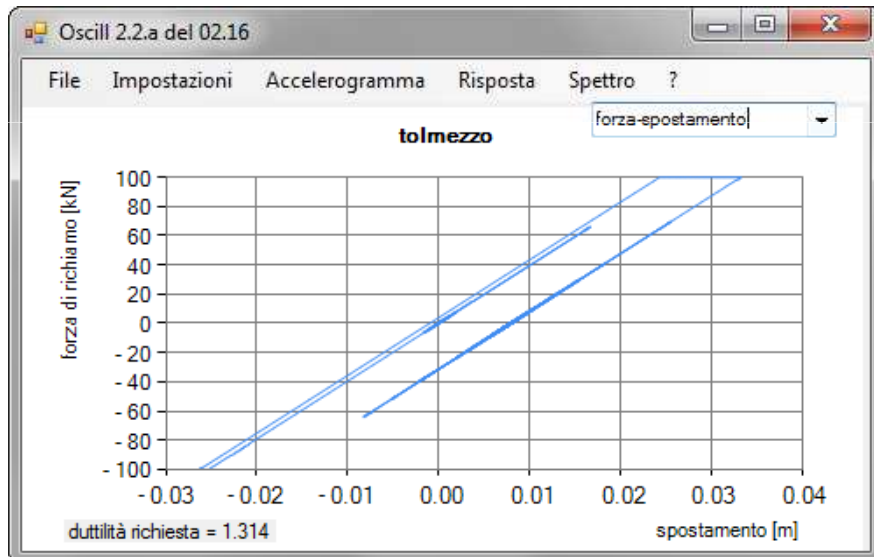
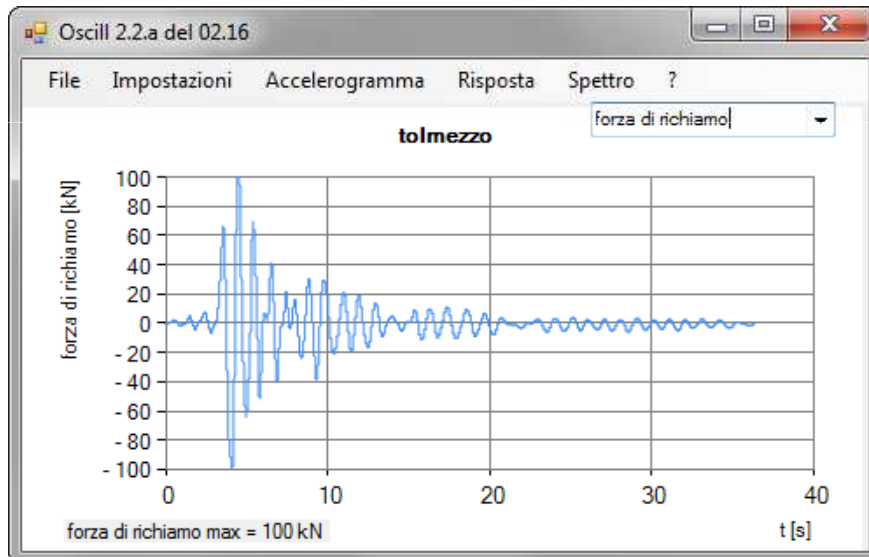
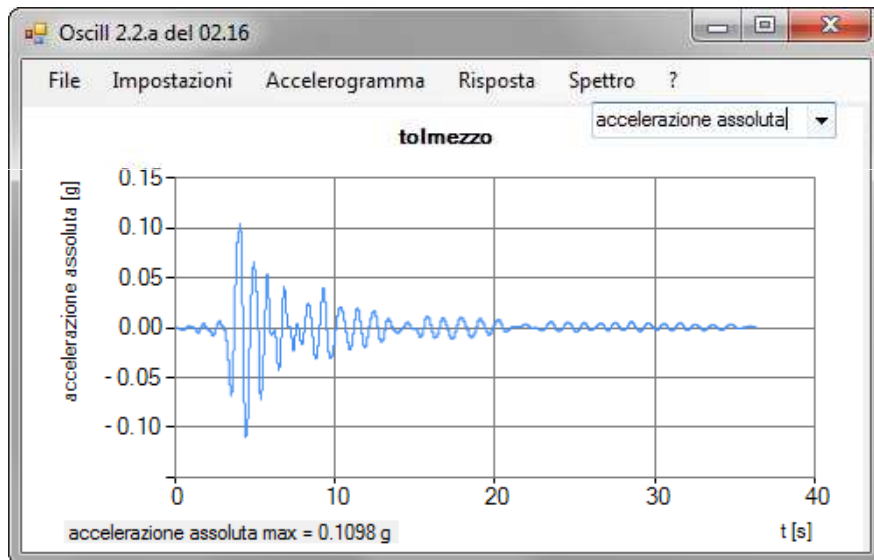
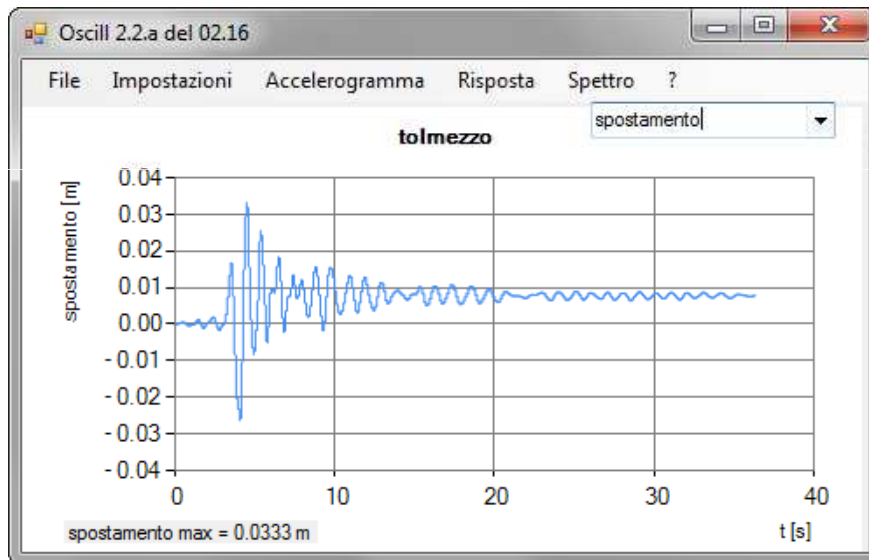
# Risposta per $a_g = 0.15 \text{ g}$

Appena oltre il  
limite elastico



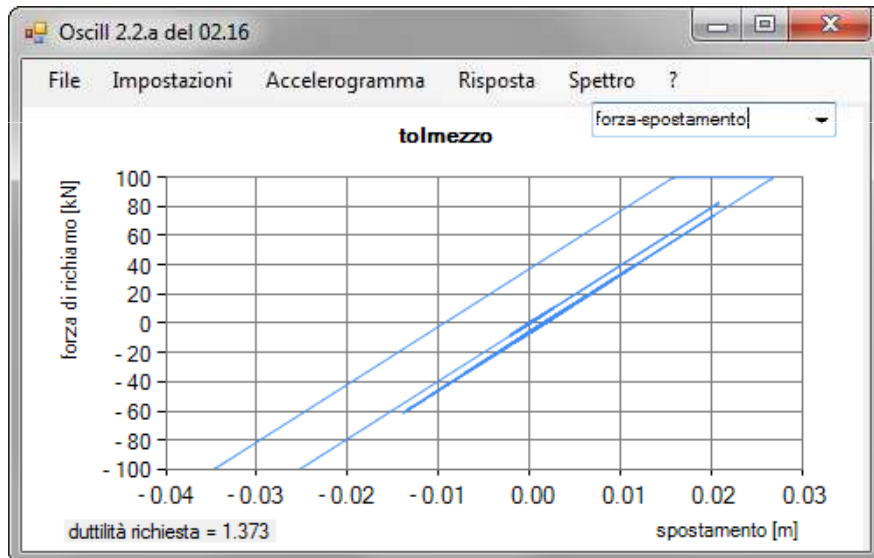
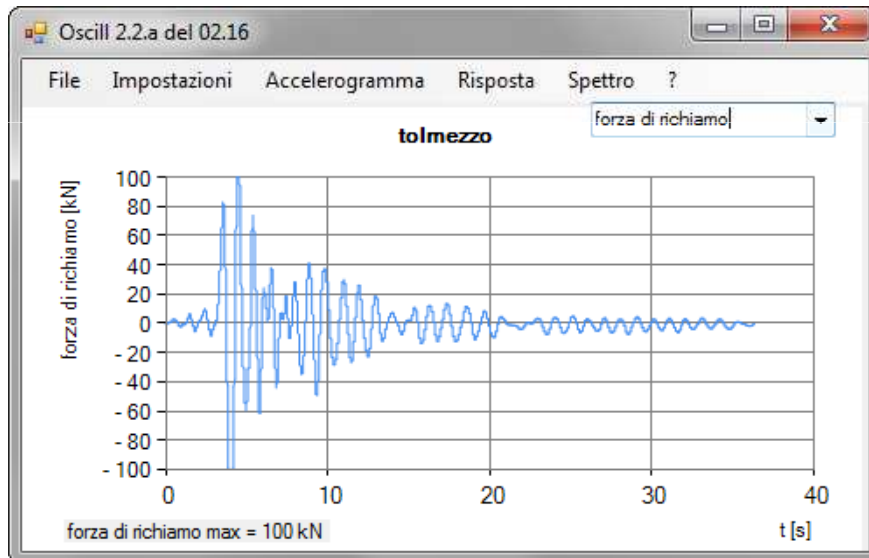
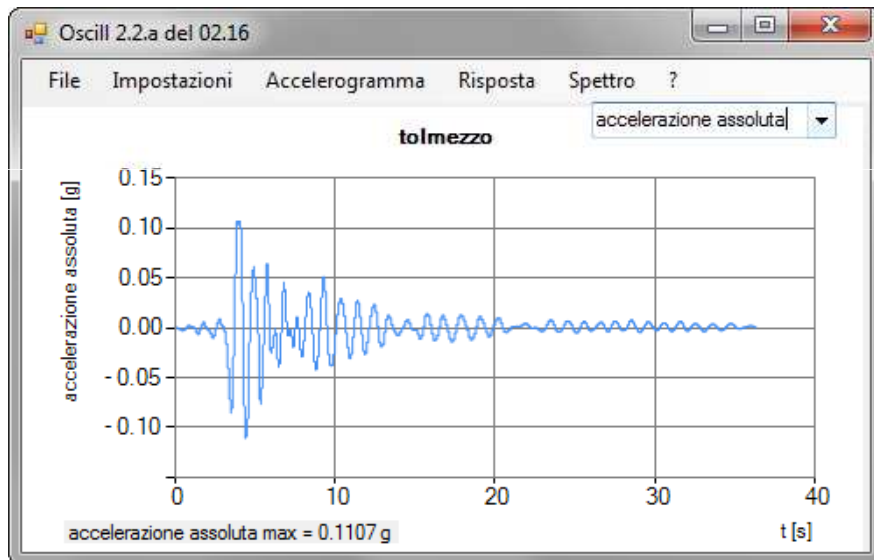
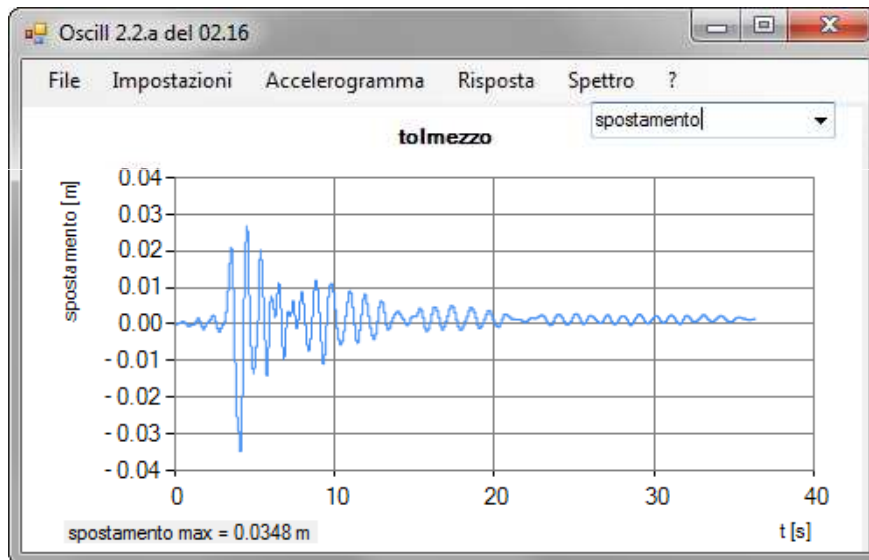


# Risposta per $a_g = 0.20\text{ g}$



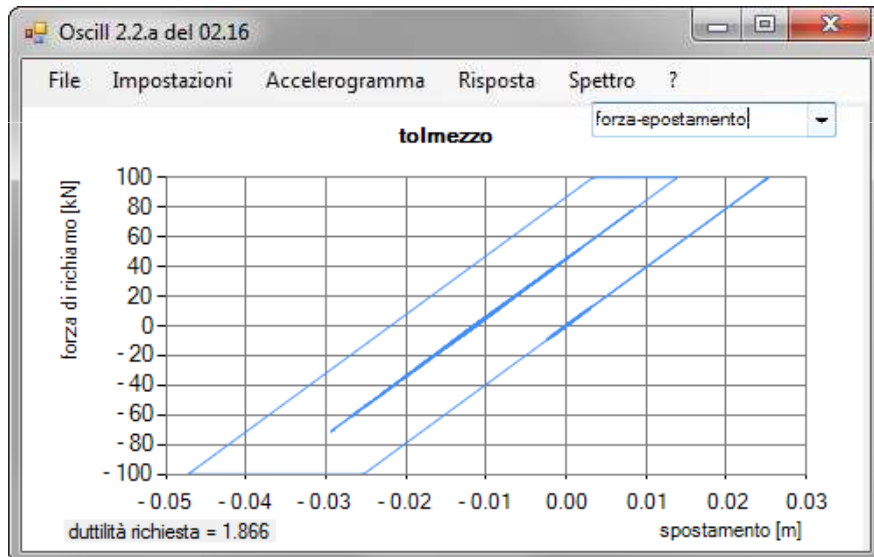
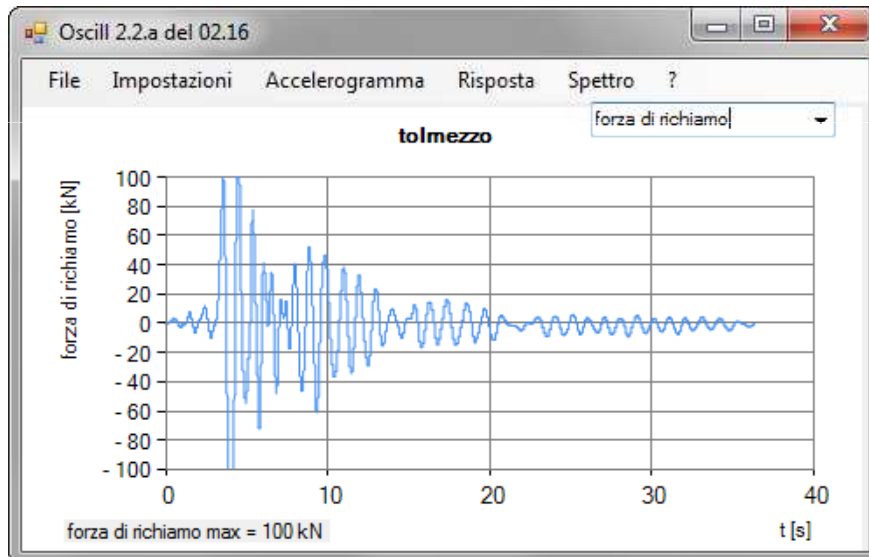
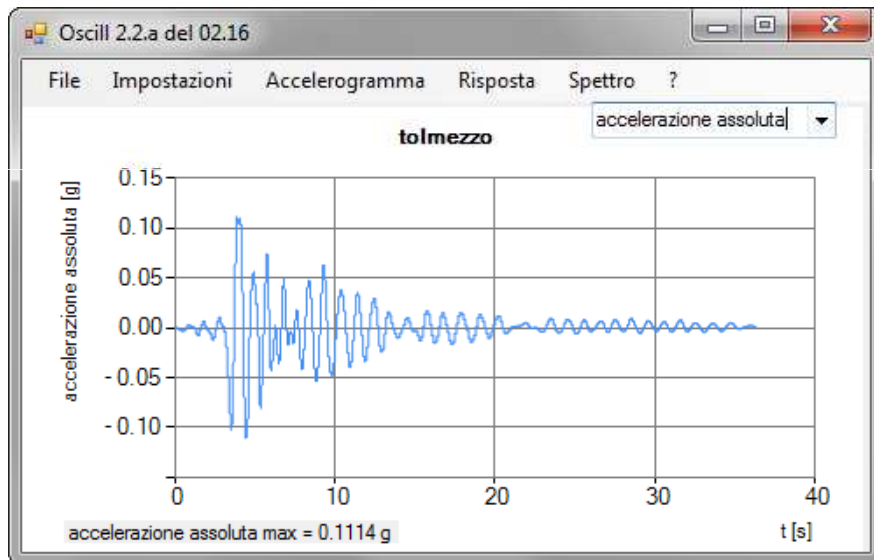
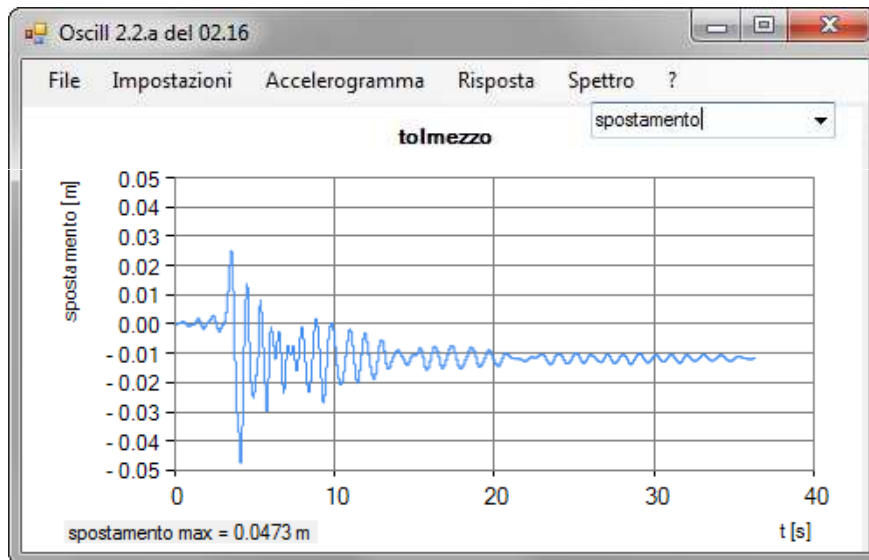


# Risposta per $a_g = 0.25 \text{ g}$

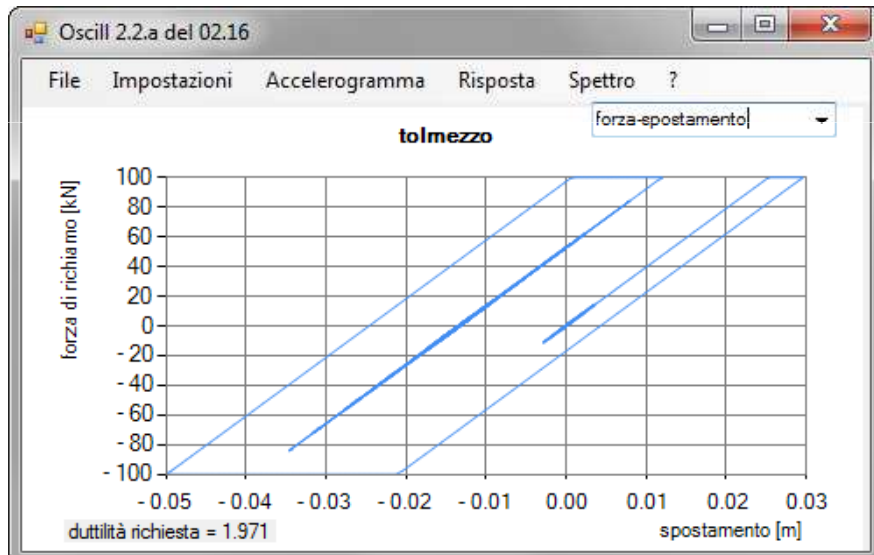
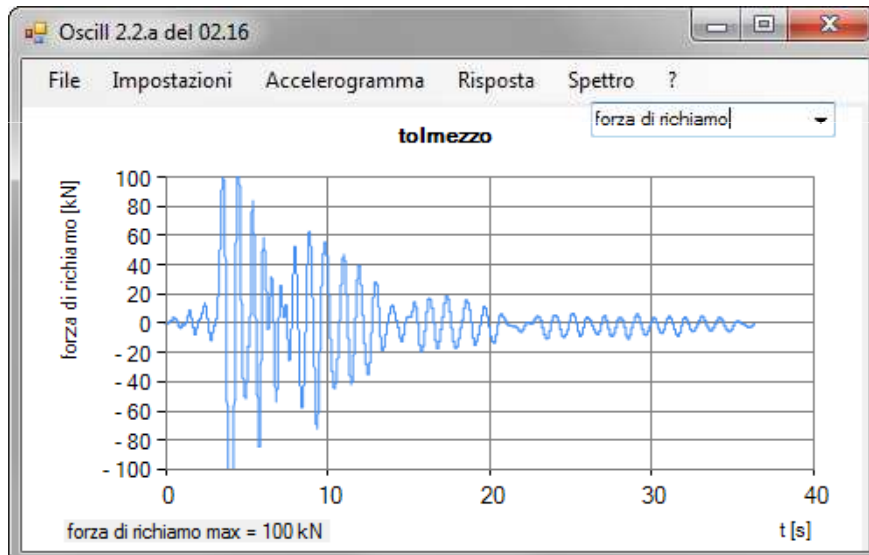
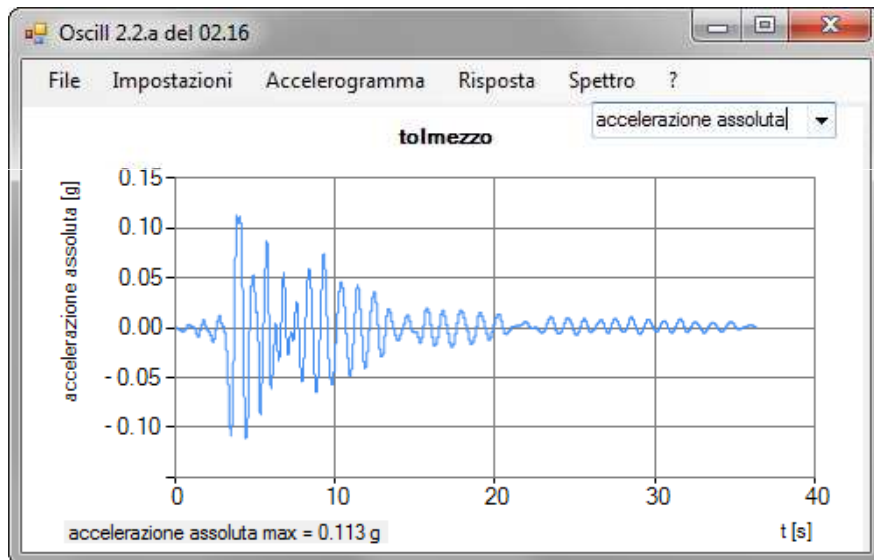
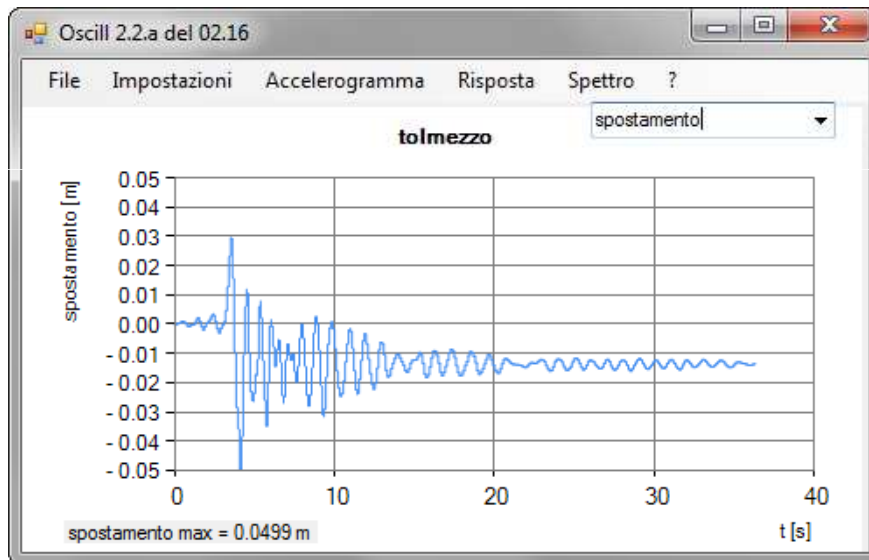


# Risposta per $a_g = 0.30\text{ g}$

Spostamento  
residuo ben visibile

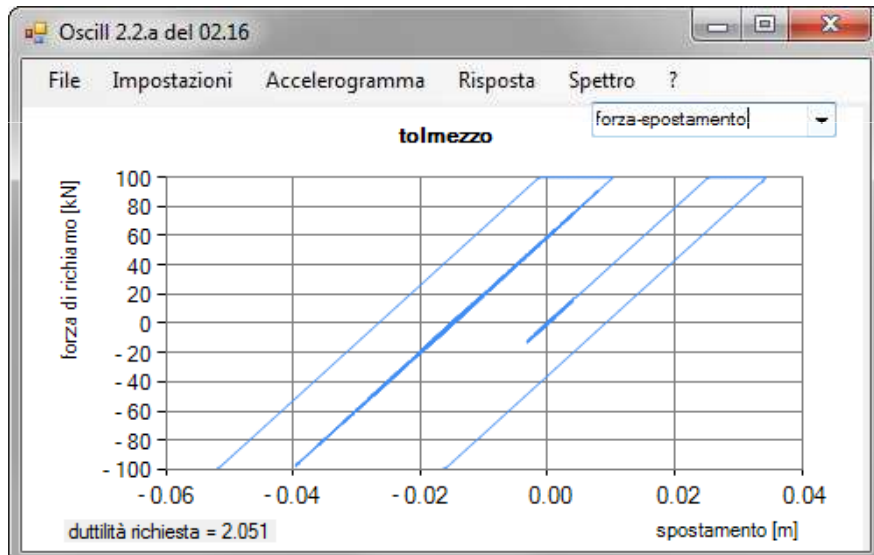
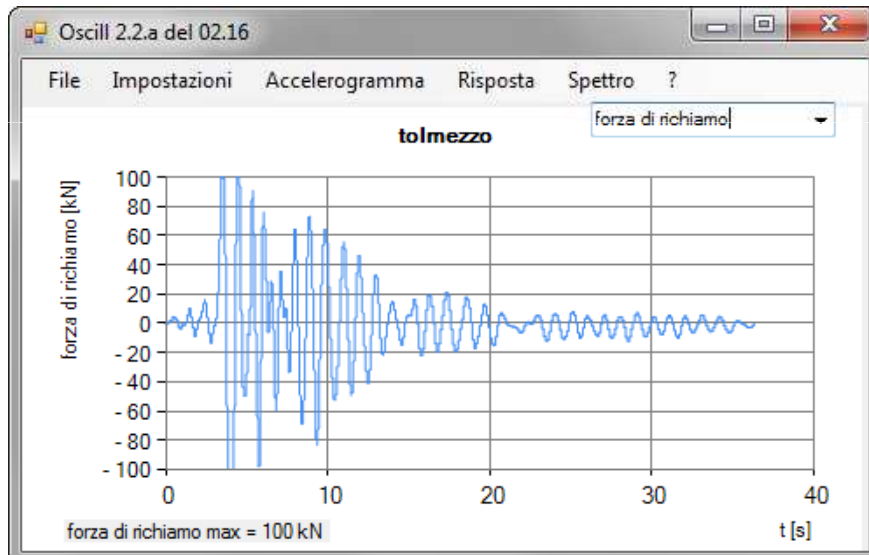
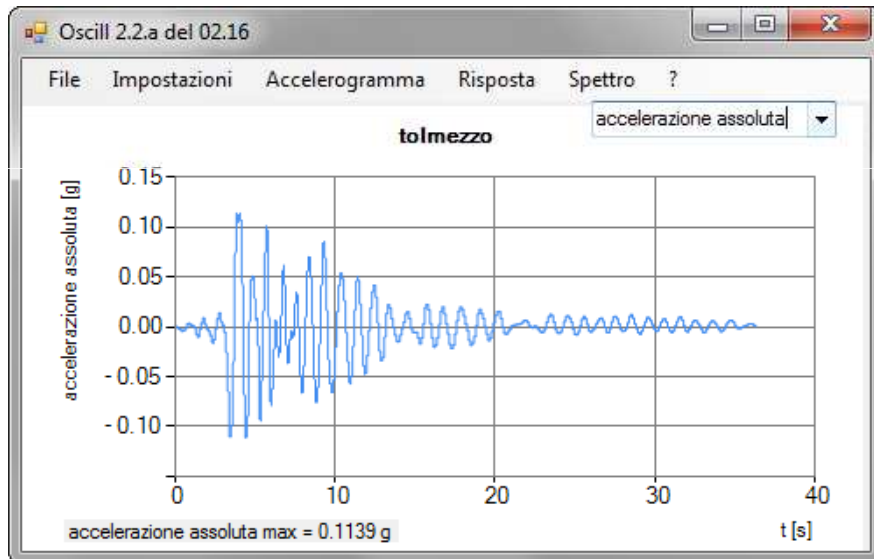
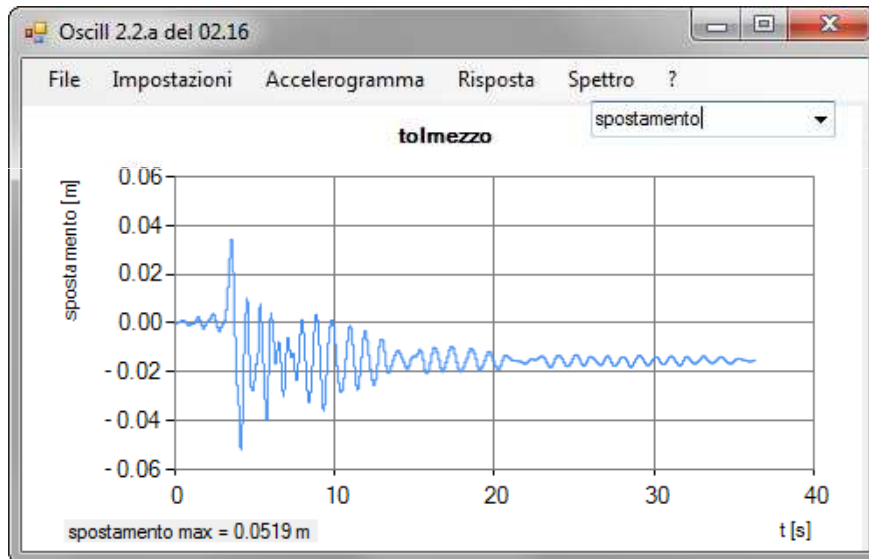


# Risposta per $a_g = 0.35\text{ g}$

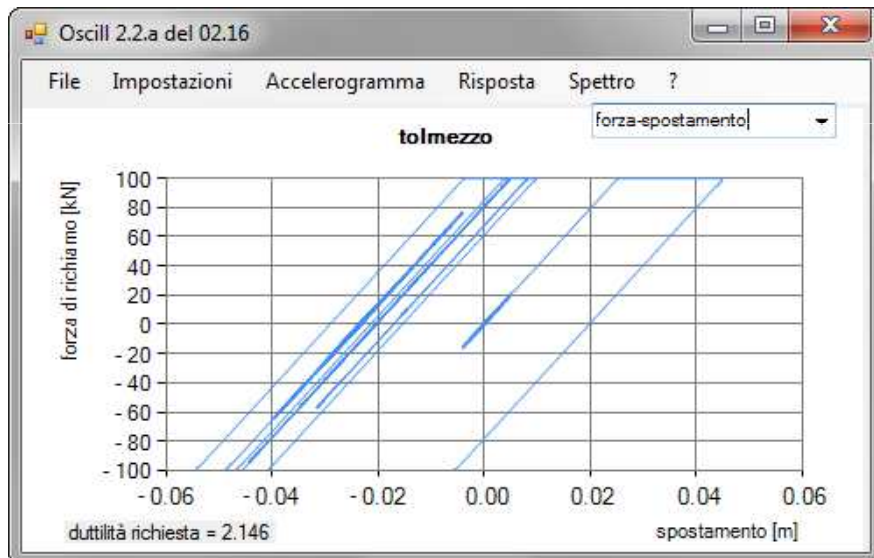
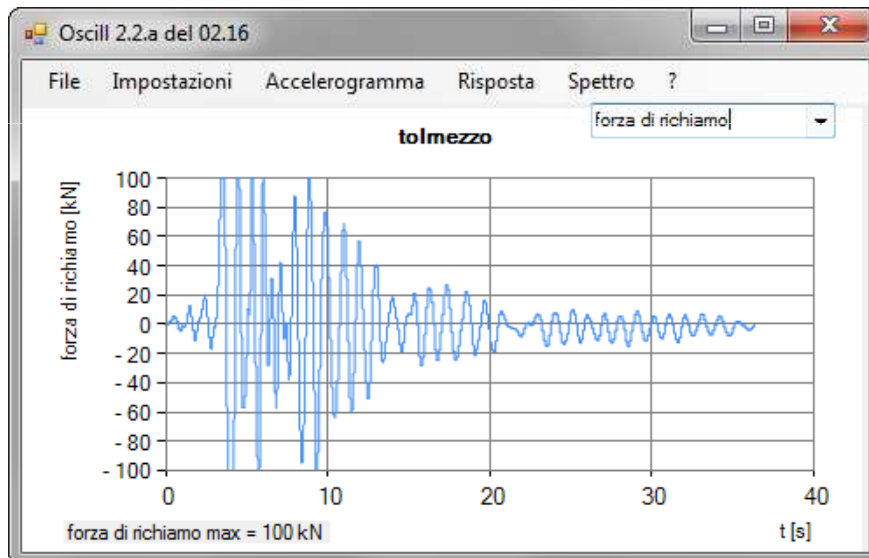
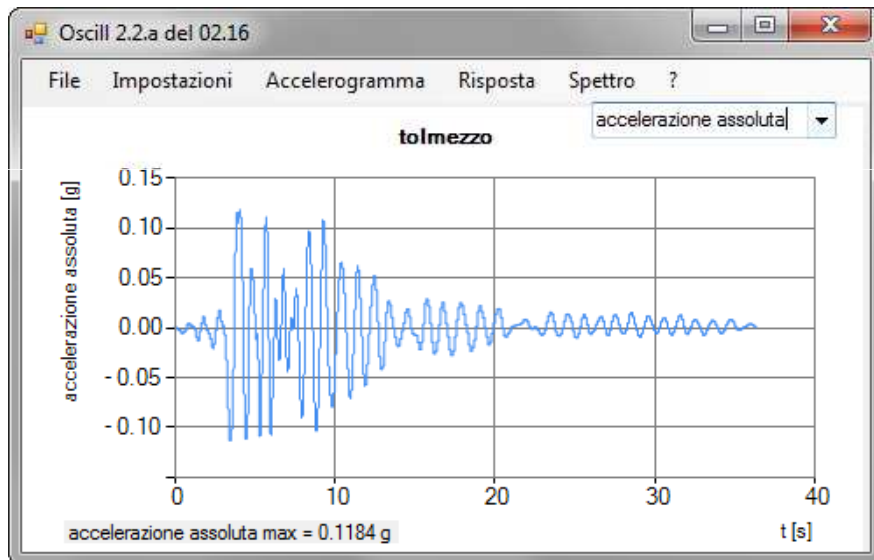
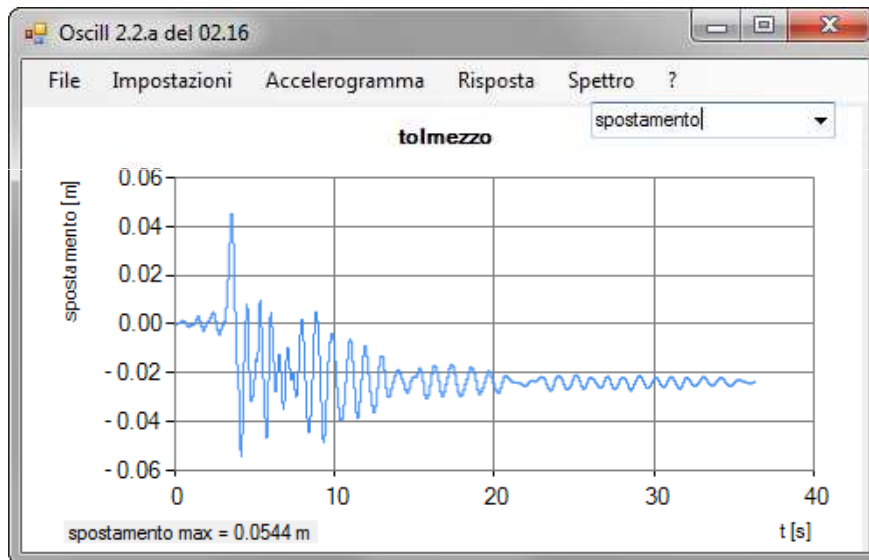


# Risposta per $a_g = 0.40\text{ g}$

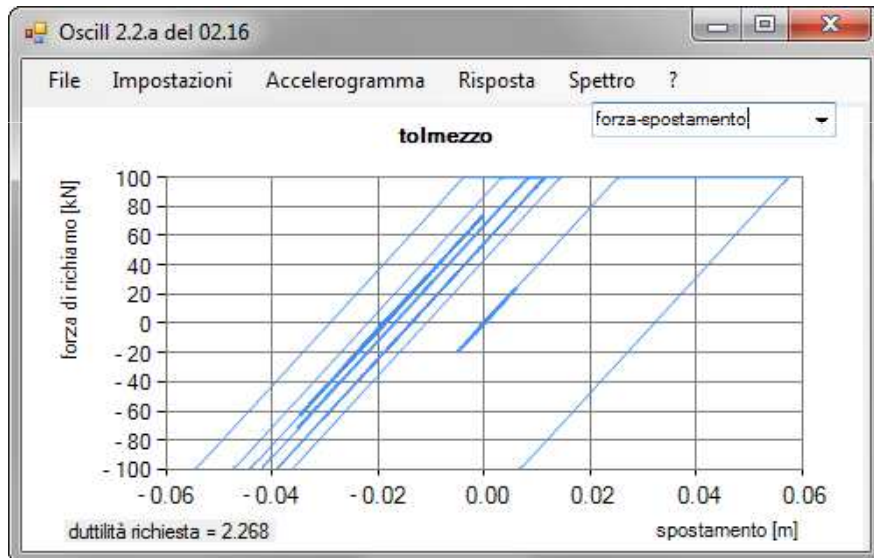
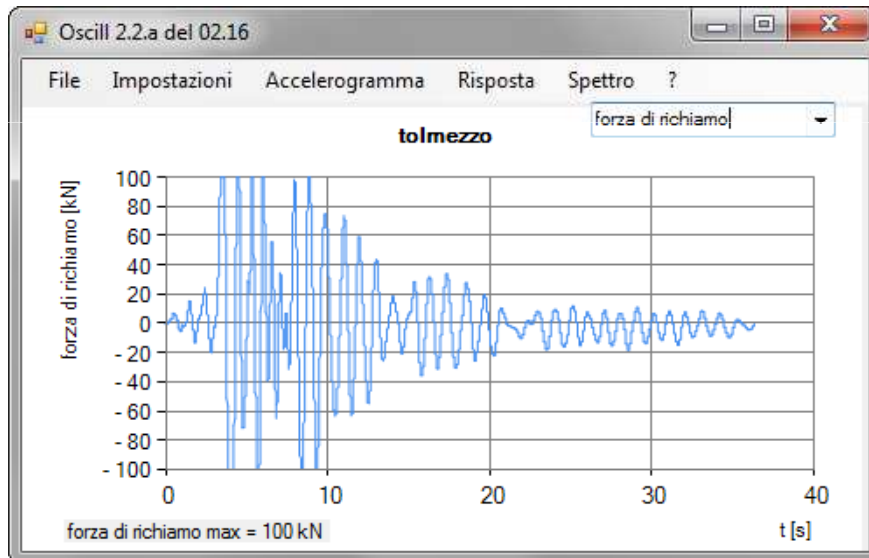
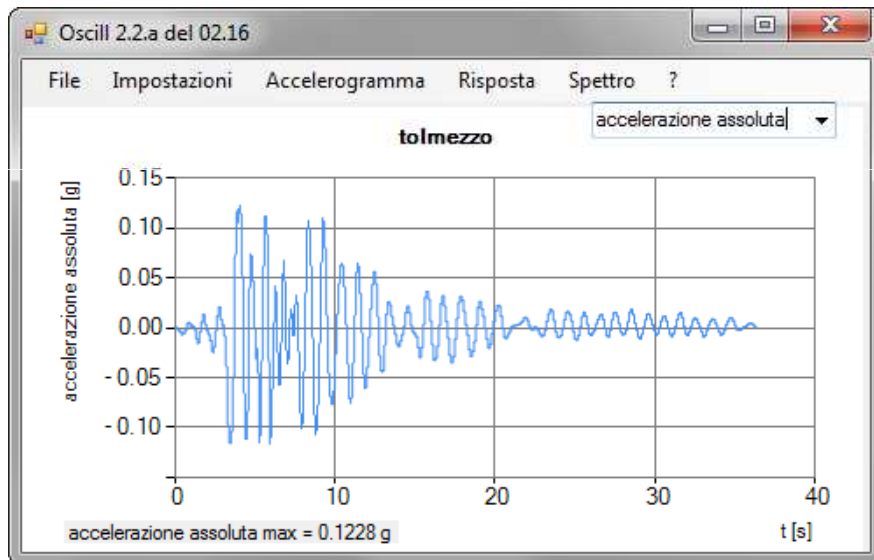
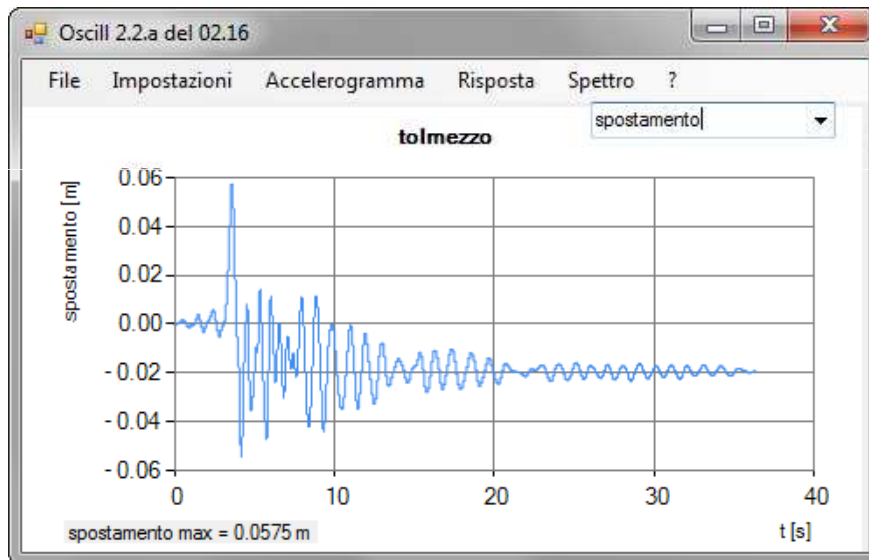
È superato il limite  
di spostamento



# Risposta per $a_g = 0.50 \text{ g}$

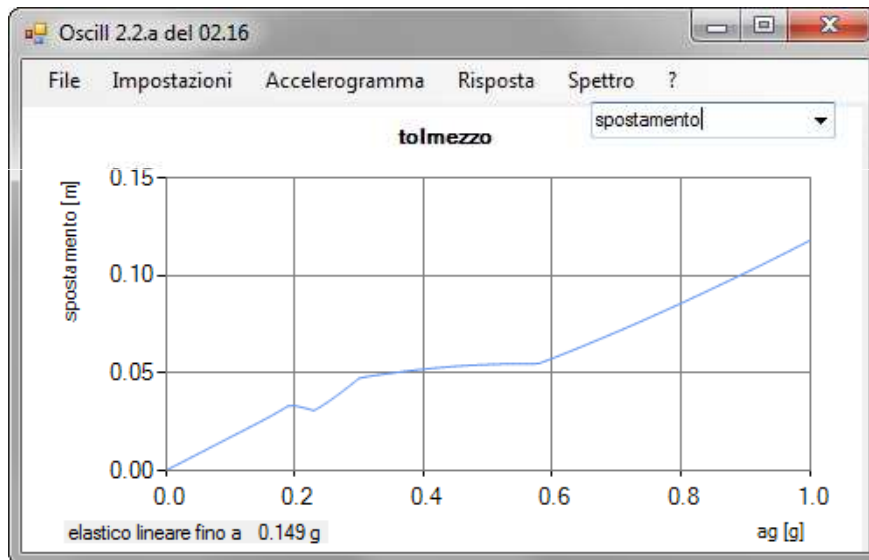


# Risposta per $a_g = 0.60\text{ g}$

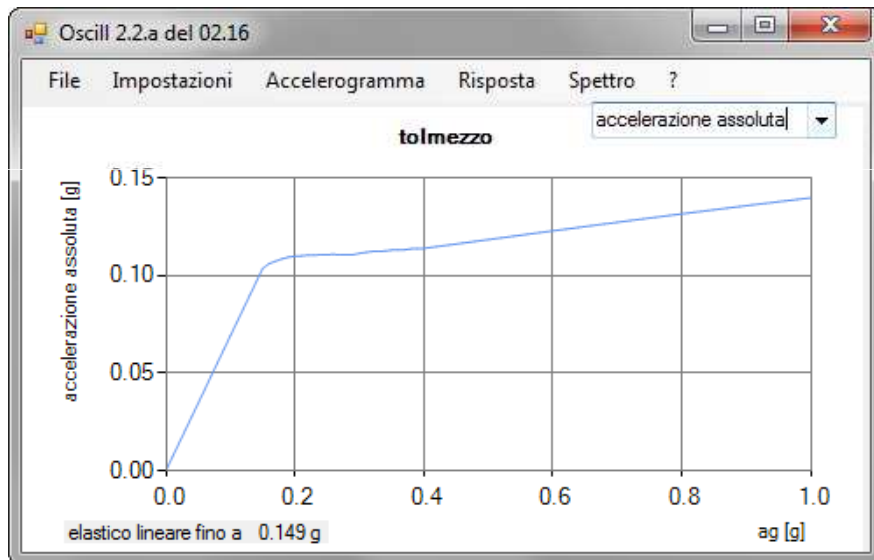




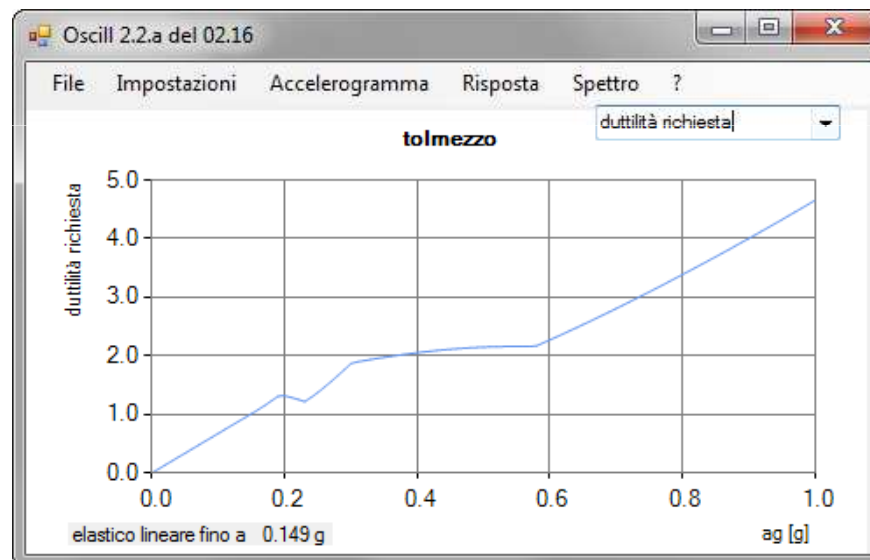
# Risposta al crescere di $a_g$



Lo spostamento cresce, ma non proprio in maniera lineare



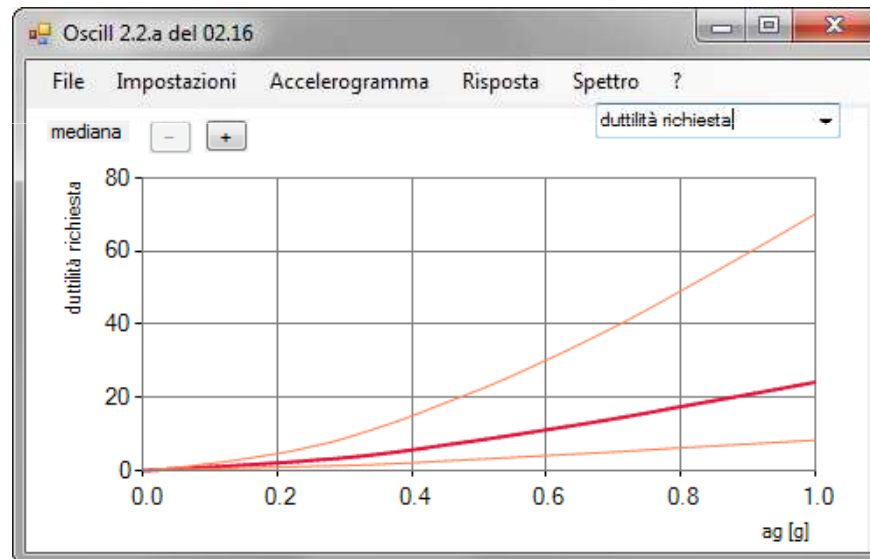
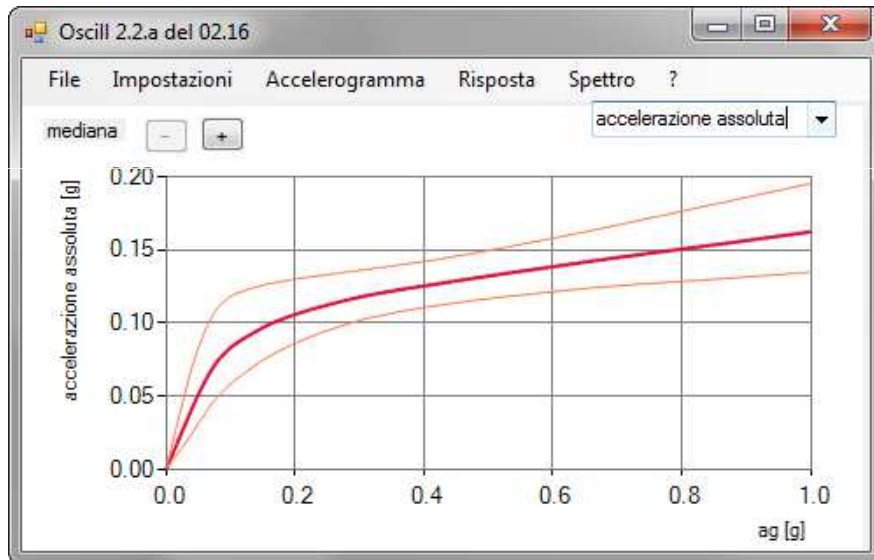
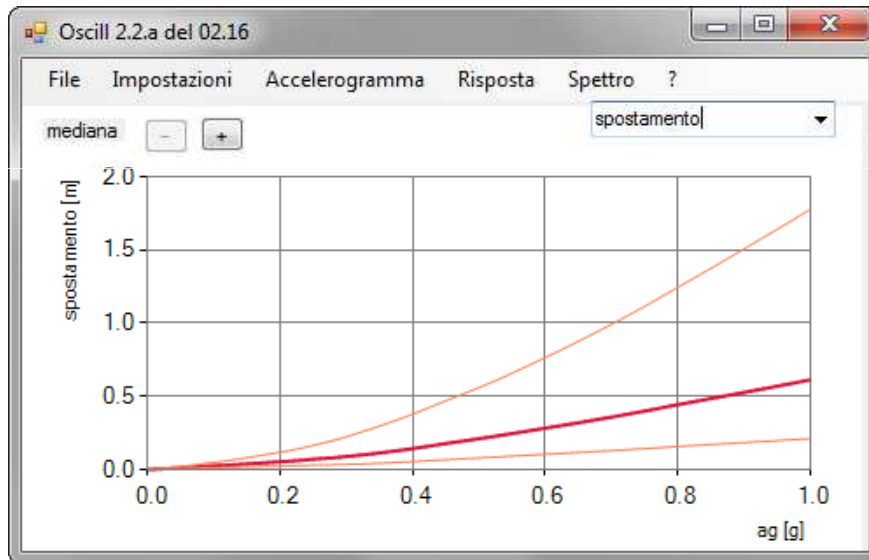
L'accelerazione cresce, ma di poco



La richiesta di duttilità è analoga allo spostamento

# Analisi dinamica incrementale

## 30 accelerogrammi



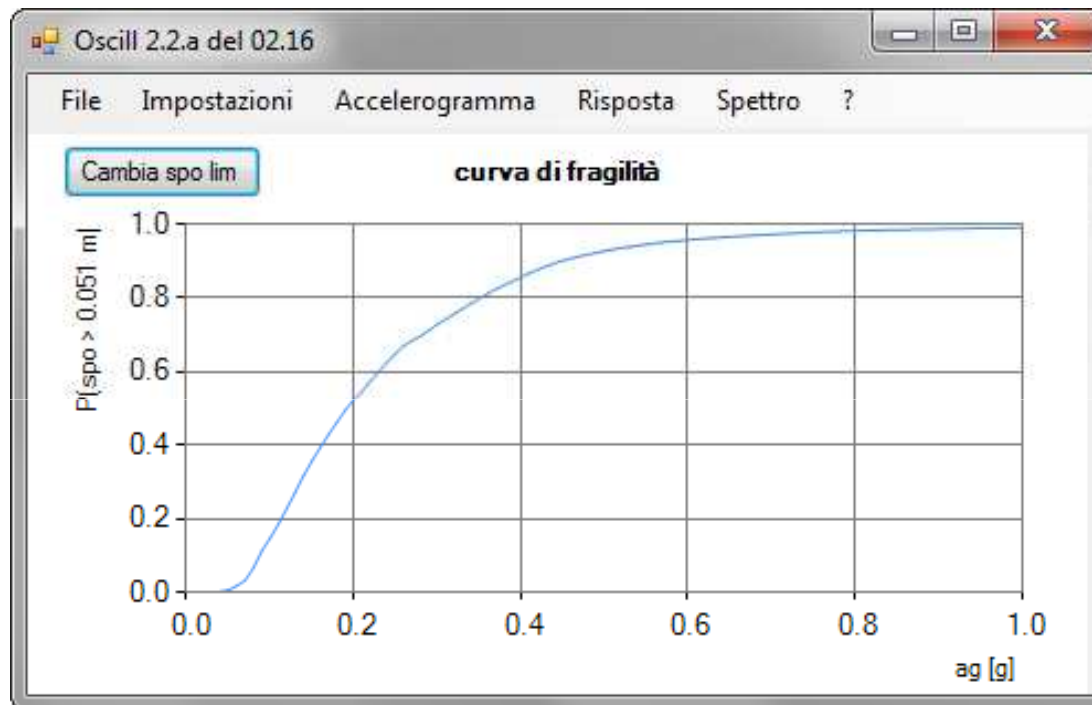


# Curva di fragilità

- Si valuta la risposta dinamica incrementale per ciascun accelerogramma
- Per ciascun valore di  $a_g$  si determina media e scarto quadratico medio del parametro (spostamento)
- Ipotizzando che la distribuzione sia lognormale, si valuta la probabilità di avere uno spostamento superiore a quello ultimo
- Si riporta in grafico (curva di fragilità) questa probabilità (numero tra 0 e 1) in funzione di  $a_g$

# Curva di fragilità

- Nel caso in esame, con spostamento ultimo  $u_{ult}=51$  mm, si ottiene la curva di fragilità qui riportata



Ad esempio, per  $a_g=0.2$  g la probabilità di superamento è poco più del 50%

Risposta dinamica non lineare  
di strutture reali

# Risposta dinamica non lineare per strutture reali

Occorre:

- Definire un modello della struttura
- Definire un modello non lineare per il materiale

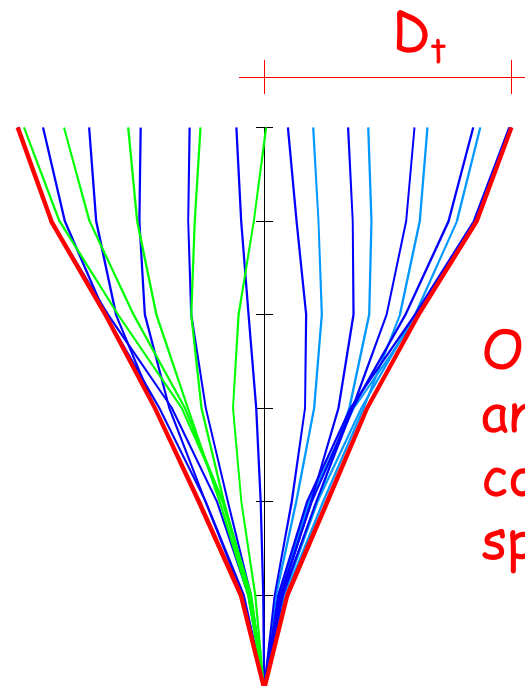
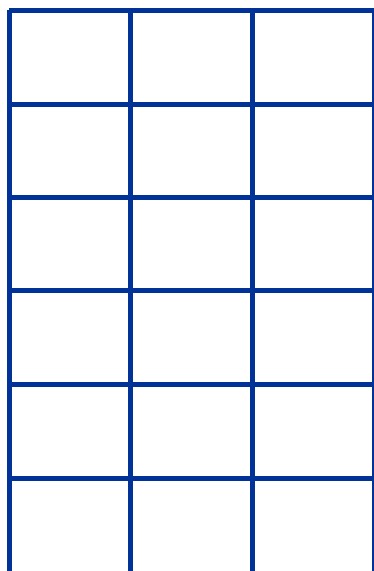
# Risposta dinamica non lineare per strutture reali

Occorre:

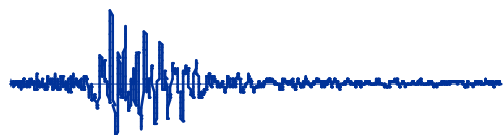
- Definire un modello della struttura
- Definire un modello non lineare per il materiale
- Assegnare un (o un gruppo di) accelerogramma
- Integrare (con un procedimento numerico) le equazioni del moto

Si ottiene la risposta nel tempo,  
istante dopo istante (time history)

# Risposta dinamica non lineare per strutture reali



Ovviamente fornisce  
anche i massimi,  
come l'involuppo degli  
spostamenti



La struttura si deforma nel tempo

La forma della deformata varia nel tempo

Compaiono e scompaiono cerniere

L'analisi dinamica non lineare fornisce  
deformazioni, spostamenti, ecc. ad ogni istante

# Risposta dinamica non lineare per strutture reali

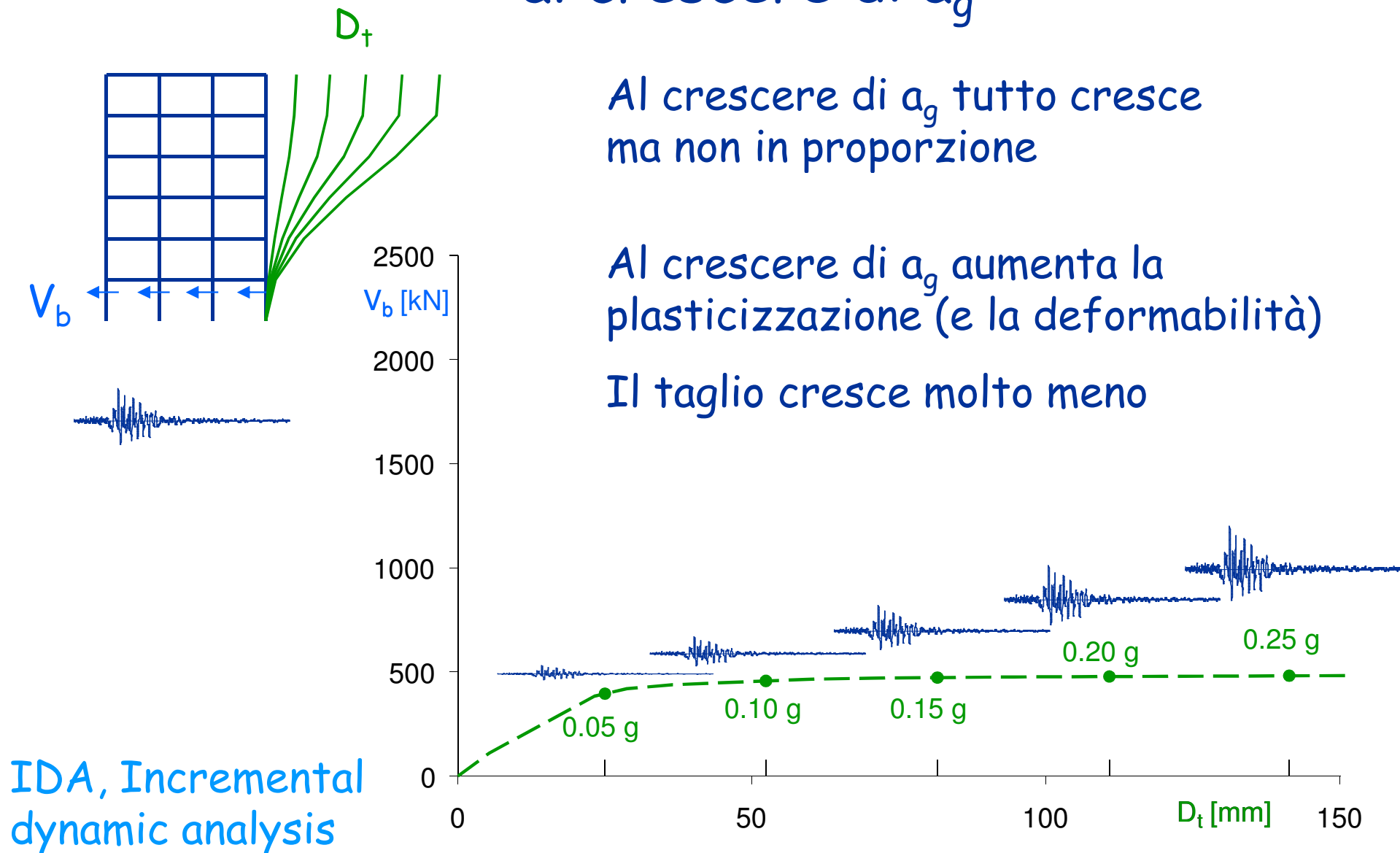
- Il giudizio sulla capacità della struttura di superare il terremoto si esprime esaminando:
  - rotazione plastica delle singole sezioni
  - rotazioni alla corda
  - spostamenti relativi tra i piani
- e non:
  - caratteristiche della sollecitazione

# Risposta dinamica non lineare al crescere di $a_g$

Al crescere di  $a_g$  tutto cresce  
ma non in proporzione

Al crescere di  $a_g$  aumenta la  
plasticizzazione (e la deformabilità)

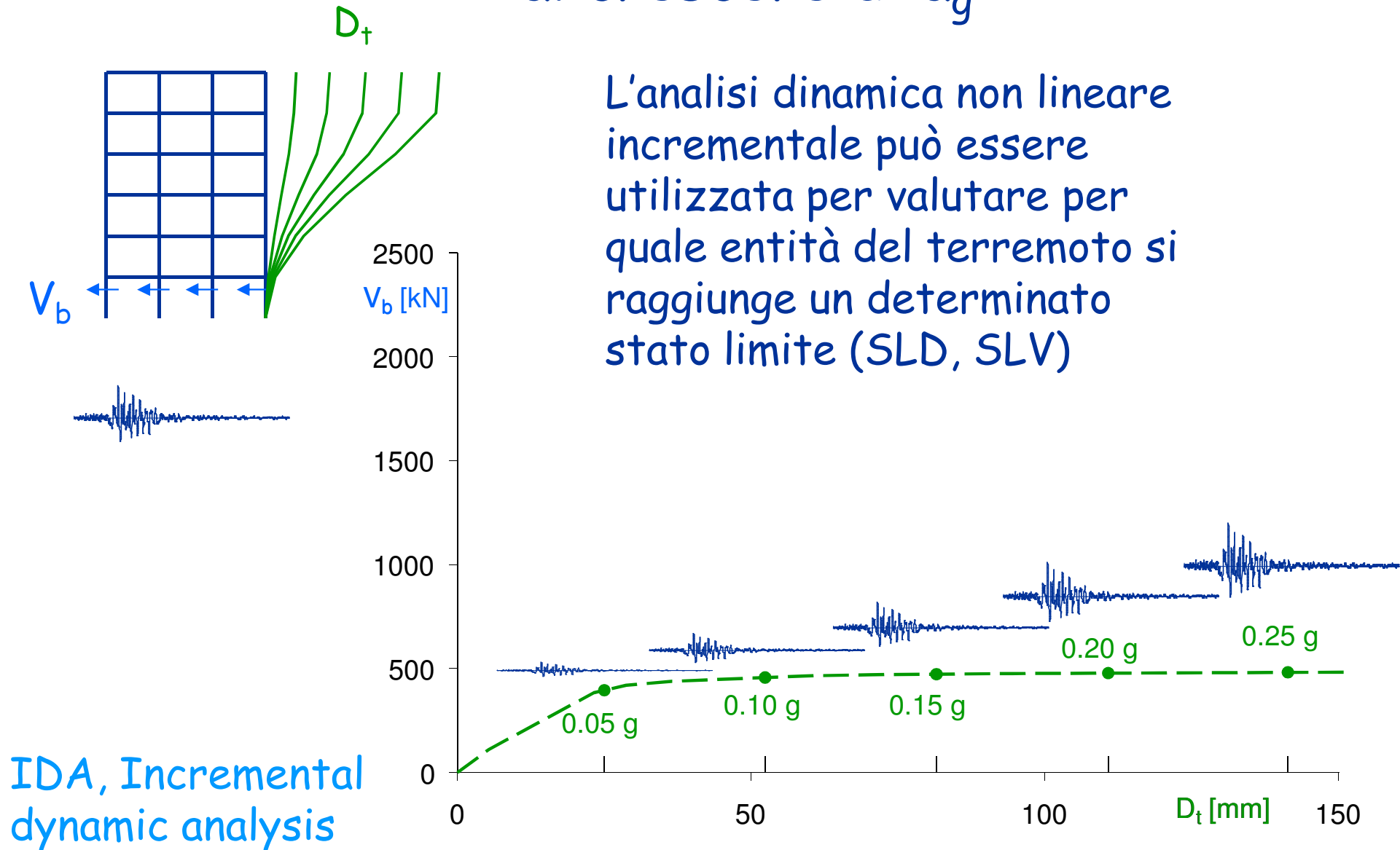
Il taglio cresce molto meno





# Risposta dinamica non lineare al crescere di $a_g$

L'analisi dinamica non lineare incrementale può essere utilizzata per valutare per quale entità del terremoto si raggiunge un determinato stato limite (SLD, SLV)



IDA, Incremental  
dynamic analysis

# Risposta dinamica non lineare per la verifica di strutture reali

Consente di valutare bene la risposta strutturale,  
ma:

- Va effettuata con specifici accelerogrammi - vedi NTC 08, punto 3.2.3.6  
Almeno 3? Oppure 7? O meglio 30?
- Richiede l'uso di programmi molto sofisticati ed una accurata modellazione del comportamento ciclico delle sezioni  $\Rightarrow$  possibili errori

Quindi: possibile solo a livello di ricerca

Risposta statica non lineare  
di strutture reali

# Alternative all'analisi dinamica non lineare

Si può cercare di prevedere il comportamento dinamico non lineare basandosi su una **analisi statica non lineare**

Effettuare una **analisi statica non lineare** vuol dire:

- Esaminare il comportamento non lineare della struttura soggetta a forze statiche crescenti (analisi pushover)
- Metterlo in relazione con il comportamento al crescere di  $a_g$
- Giudicare la struttura in base a quello che le accade per ciascun valore di  $a_g$

# Analisi statica non lineare

In quali casi può essere utile?

Progetto di nuove costruzioni:

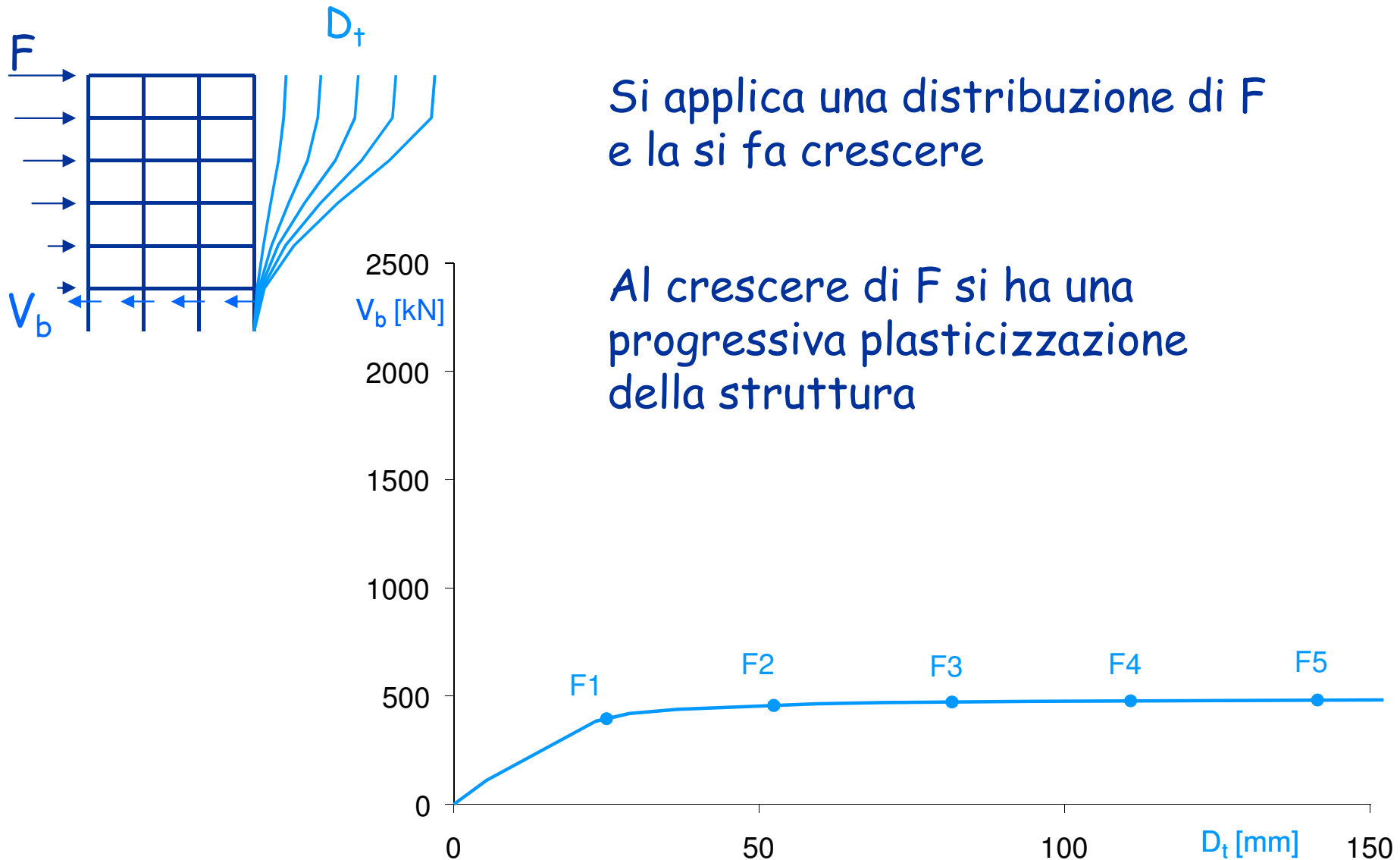
- Solo in casi particolari, se si vuole dimostrare che il superamento della resistenza in qualche sezione non porta comunque al collasso

Valutazione della vulnerabilità di costruzioni esistenti:

- Se la struttura non ha collasso fragile, l'analisi statica non lineare può essere indispensabile per tener conto correttamente della duttilità

# Alternative all'analisi dinamica inelastica

## Analisi statica non lineare

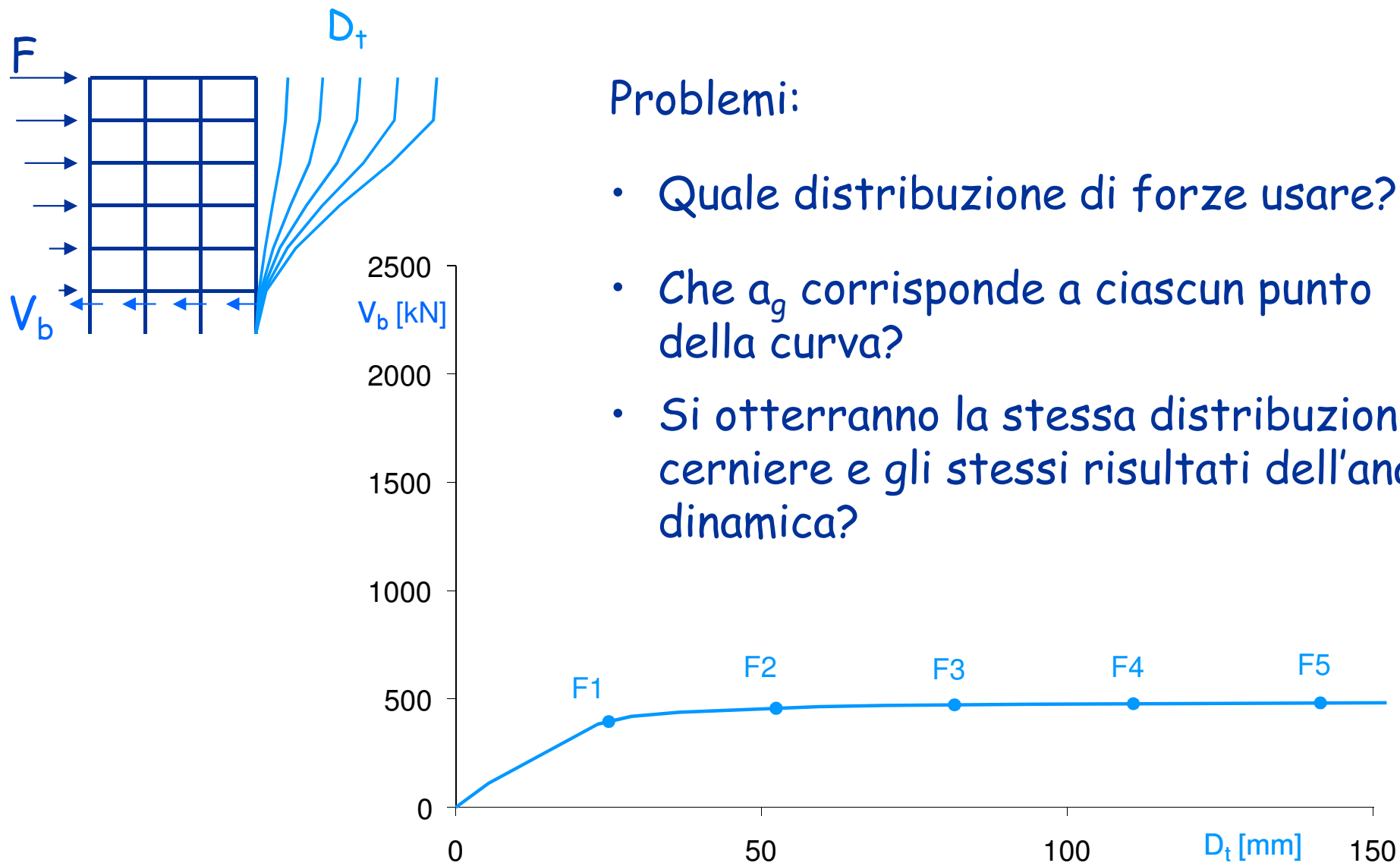


# Analisi statica non lineare

Effettuare una **analisi statica non lineare** vuol dire:

1. Esaminare il comportamento non lineare della struttura soggetta a forze statiche crescenti (analisi pushover)
2. Stimare gli spostamenti che la struttura avrà durante il terremoto  
(ipotesi di uguaglianza - o relazione nota - tra spostamenti dinamici in campo elastico e in campo non lineare)  
In questo modo si mette in relazione ciascun punto della pushover con un valore di  $a_g$
3. Giudicare la struttura in base a quello che le accade per gli spostamenti da sisma stimati

# Analisi statica non lineare



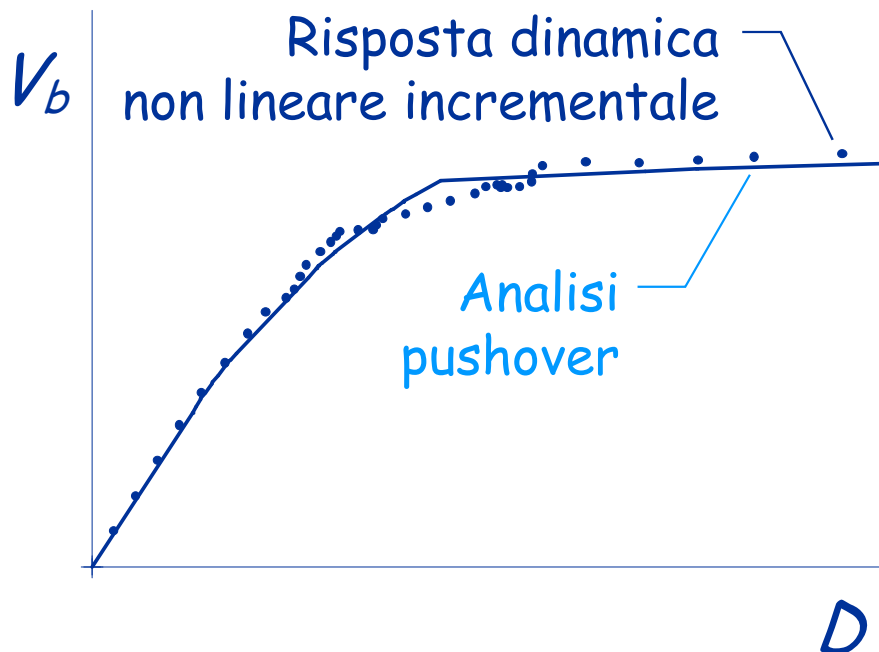
Problemi:

- 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?



# Analisi statica non lineare

- L'idea è ottima, perché riesce a tener conto in maniera esplicita della duttilità della struttura. Ma:
  - Gli spostamenti di collasso valutati con forze statiche coincidono con quelli dinamici?



Nell'esempio qui a fianco sì, ma non è sempre vero

# Analisi statica non lineare

- L'idea è ottima, perché riesce a tener conto in maniera esplicita della duttilità della struttura. Ma:
  - Gli spostamenti di collasso valutati con forze statiche coincidono con quelli dinamici?
  - Quanto è affidabile la previsione degli spostamenti che la struttura subirà durante un terremoto?

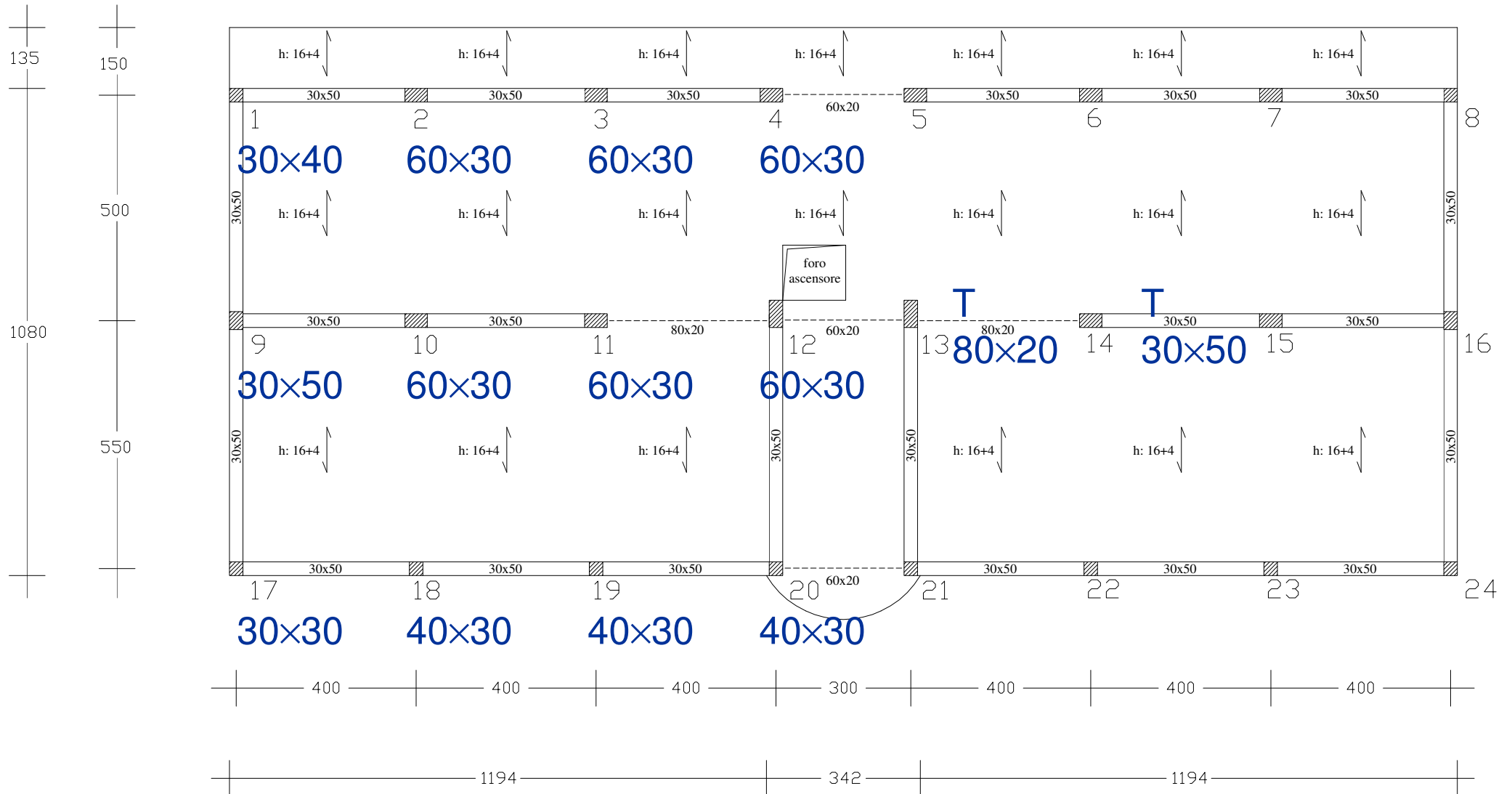
# Analisi statica non lineare

## Un esempio

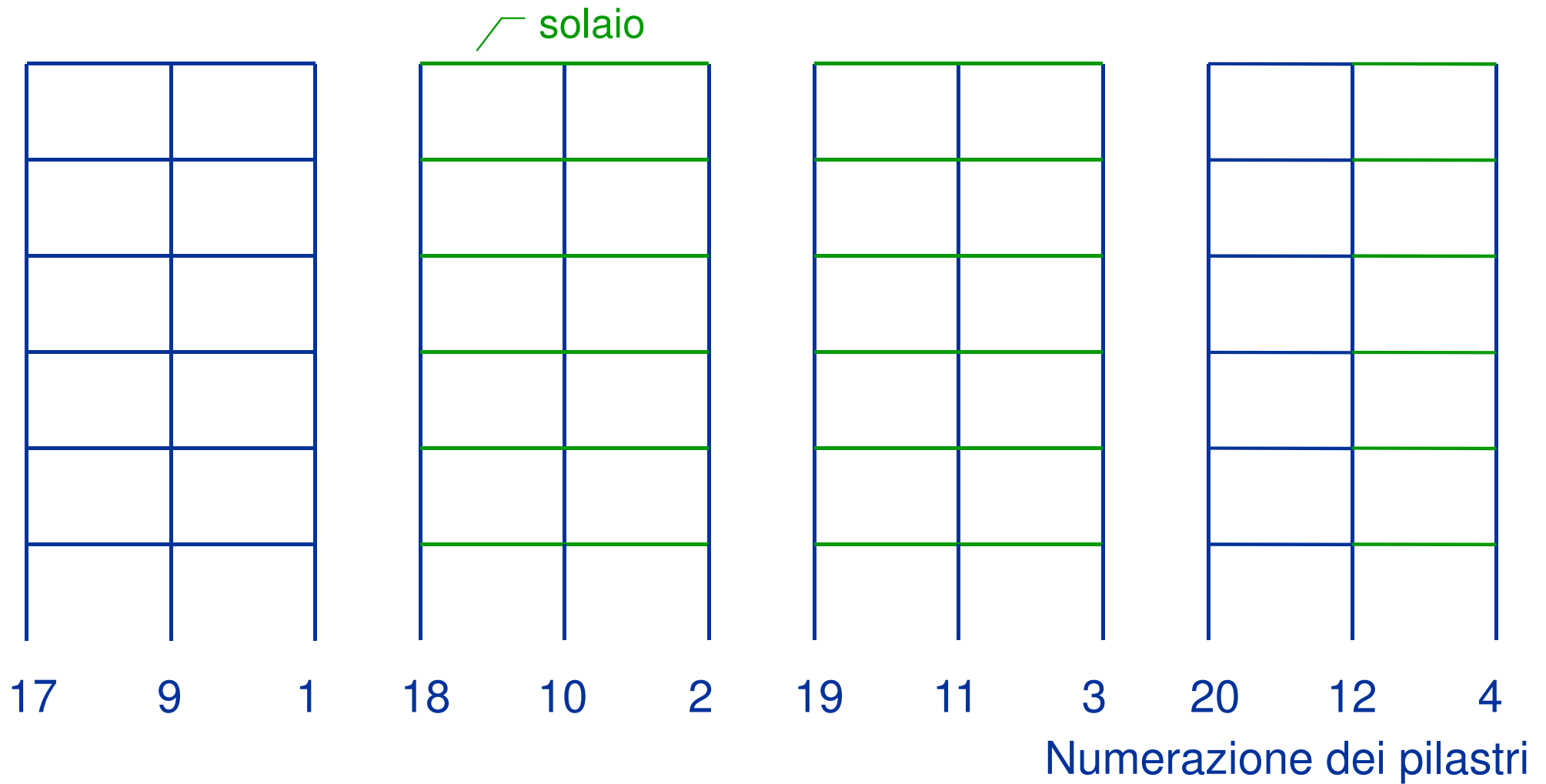
- Si prende in esame un edificio a 6 piani, progettato per soli carichi verticali
- Si riporta sinteticamente l'analisi svolta per sisma in direzione y (verticale in pianta) che è la direzione in cui la struttura appare più debole

Per maggiori dettagli si vedono le diapositive del corso tenuto a Imola, novembre 2015, nel sito [www.agheresi.it](http://www.agheresi.it)

# Carpenteria dell'edificio



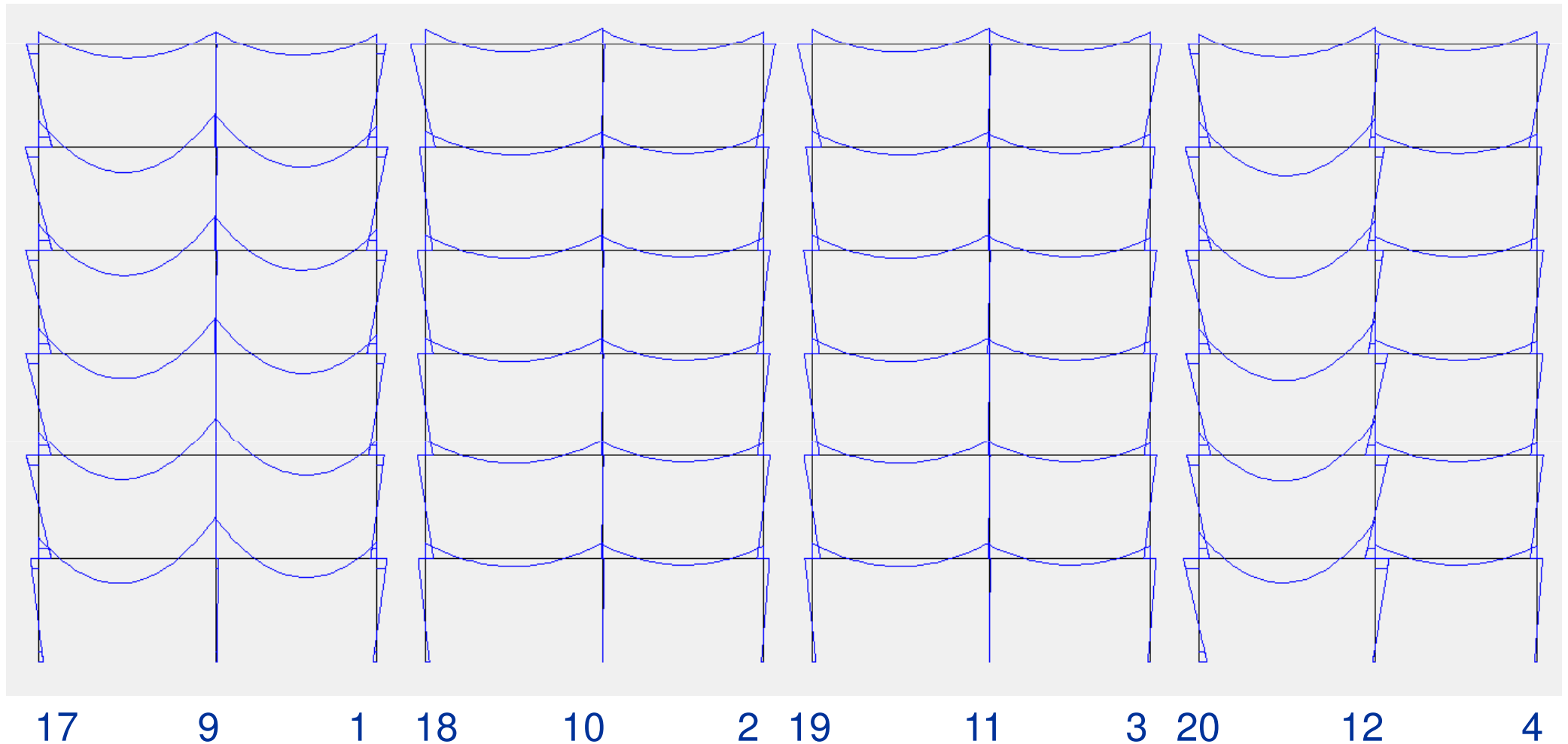
# Schema geometrico insieme dei telai - direzione y



Periodo:  $T = 1.68 \text{ s}$

# Telai in direzione y, carichi verticali

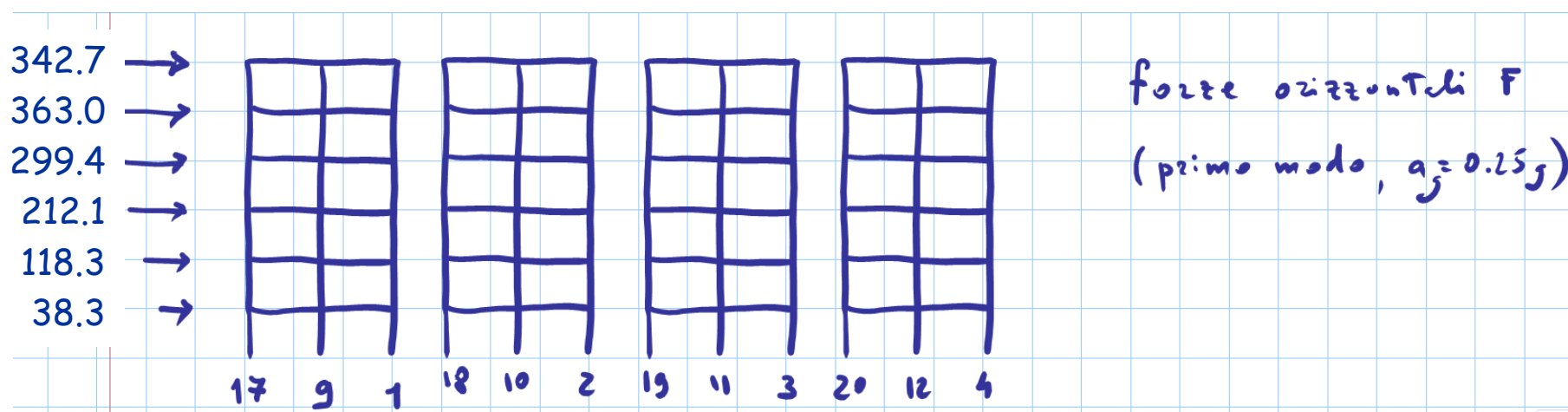
## diagramma del momento flettente



# Pushover

direzione y

- Distribuzione di forze



$$\sum F_i = 1373.8 \text{ kN}$$

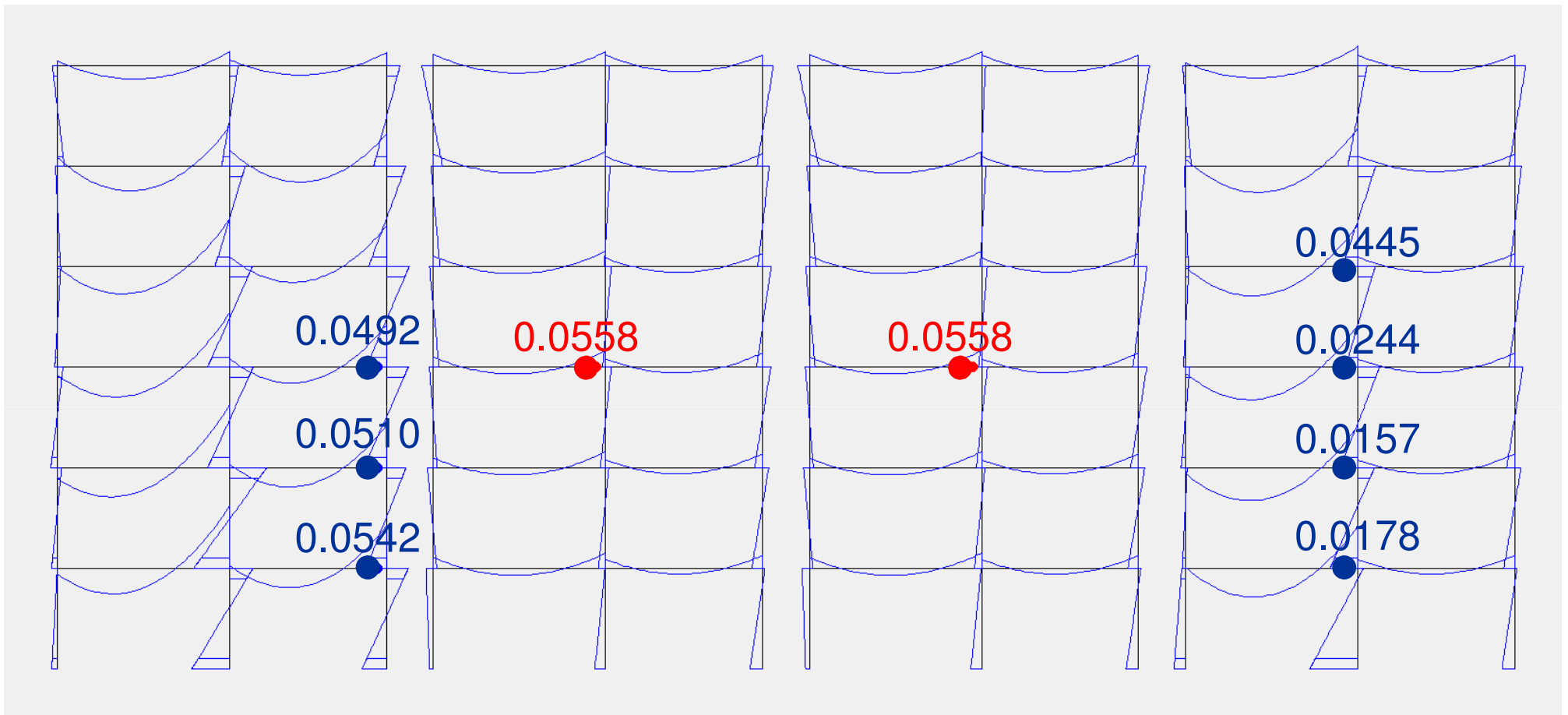
- Le forze usate nell'esempio sono quelle corrispondenti al primo modo

Nota: poiché le forze devono essere scalate, è la distribuzione (cioè i rapporti) che conta, non i valori in sé

# Pushover

direzione y

- Questa è la situazione al termine dell'ottavo passo





# Pushover

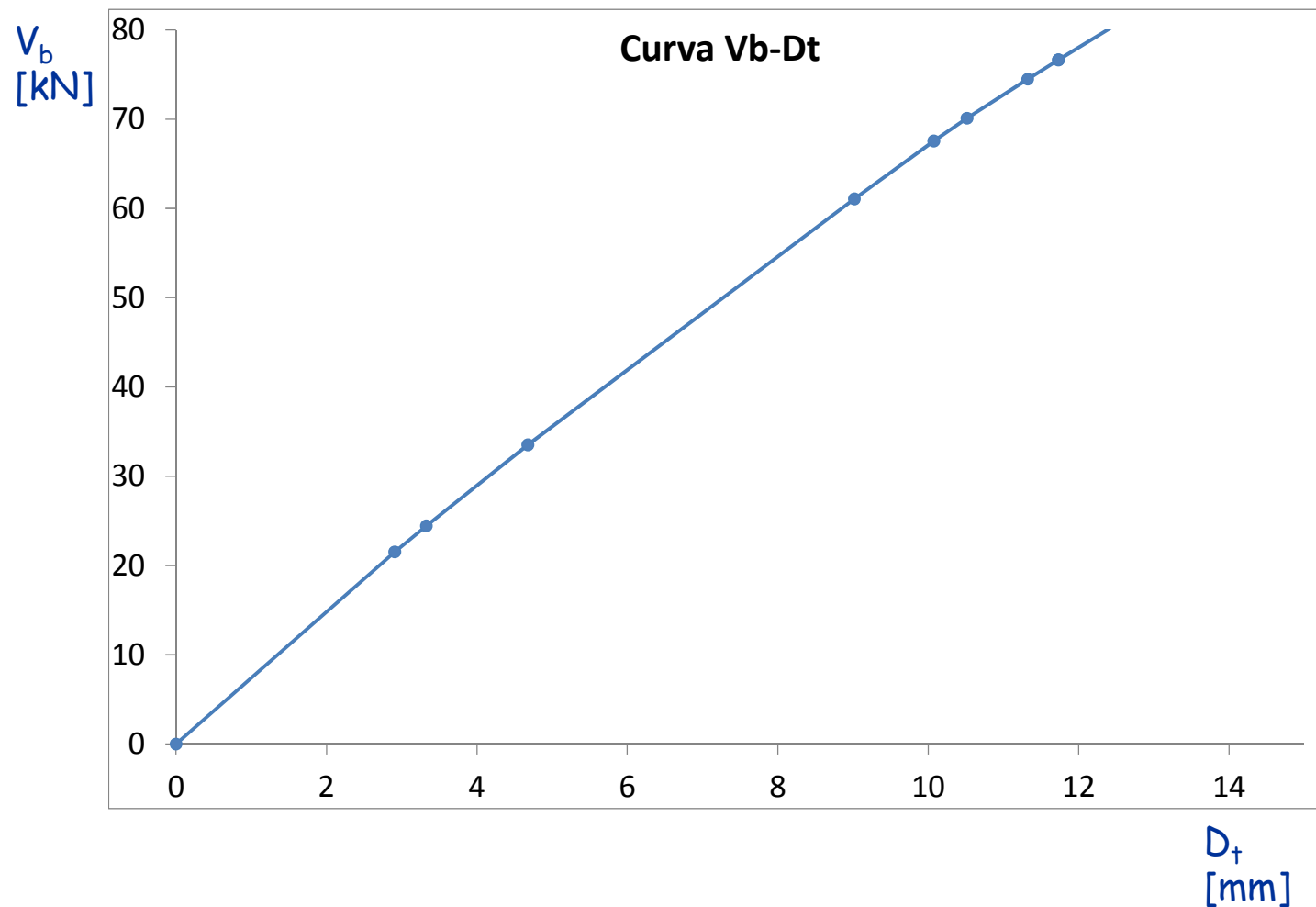
## direzione y

- Riepilogo dei risultati dei primi passi dell'analisi non lineare, fatti in maniera parzialmente manuale, ovvero con l'utilizzo di una analisi lineare e facendo variare via via lo schema

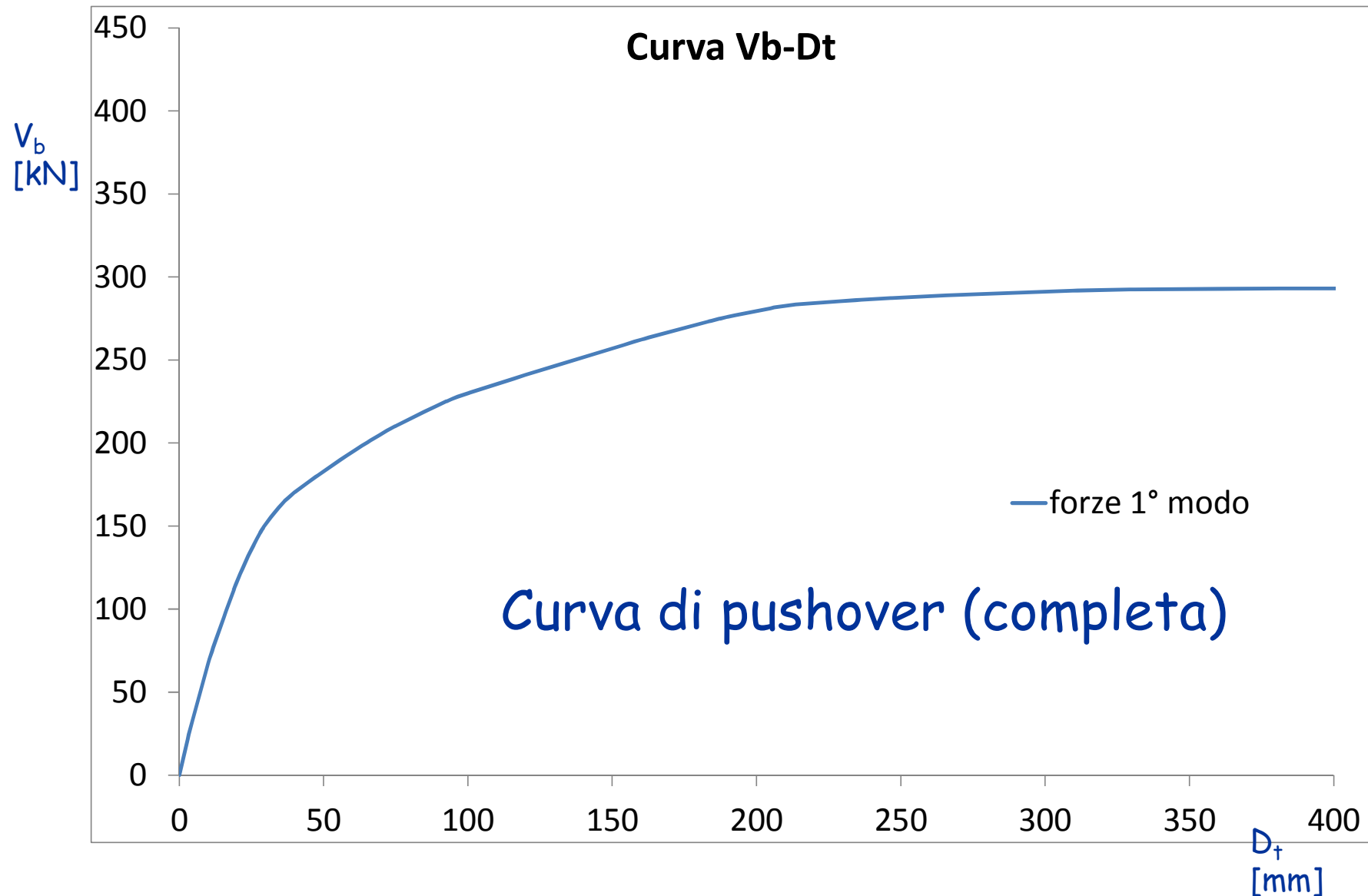
passo	1/p	$\Sigma 1/r$	Dt - Do	Vb	sequenza eventi			
0	0	0	0.000	0				
1	1.57%	1.57%	2.907	21.52	cer	171-2		
2	0.21%	1.78%	3.327	24.44	cer	179-2		
3	0.66%	2.44%	4.678	33.52	cer	163-2		
4	2.01%	4.45%	9.018	61.08	cer	155-2		
5	0.47%	4.92%	10.074	67.55	cer	158-2		
6	0.19%	5.10%	10.518	70.1	cer	166-2		
7	0.32%	5.42%	11.322	74.48	cer	174-2		
8	0.16%	5.58%	11.729	76.63	cer	159-2	cer	161-2

# Pushover direzione y

## Curva di pushover (parte iniziale)

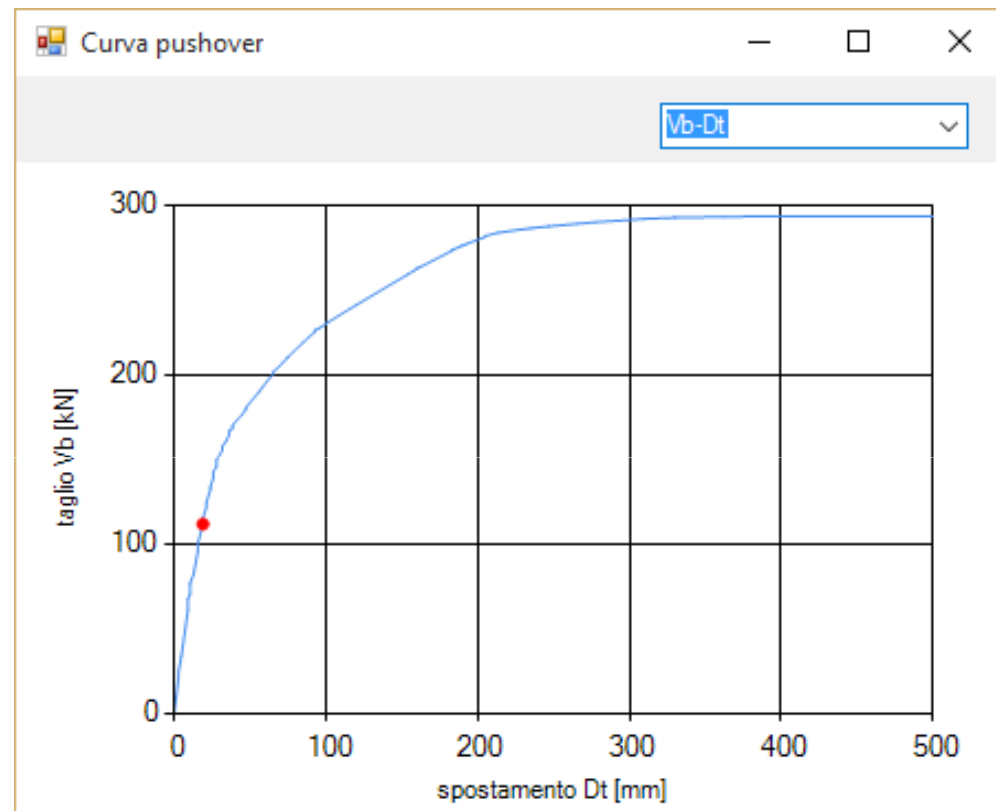


# Pushover direzione y



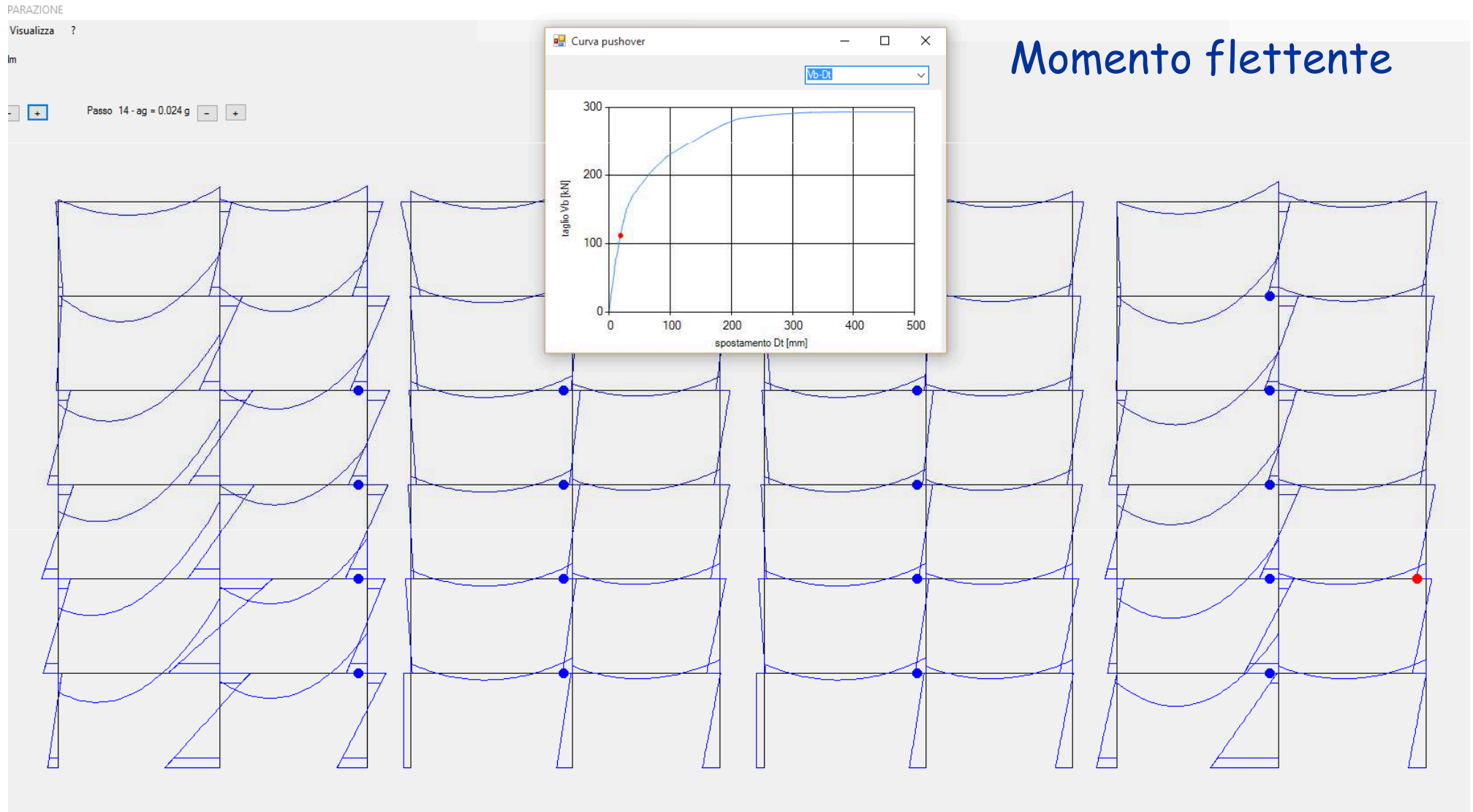
# Pushover direzione y

A ciascun punto della pushover corrispondono tante informazioni:



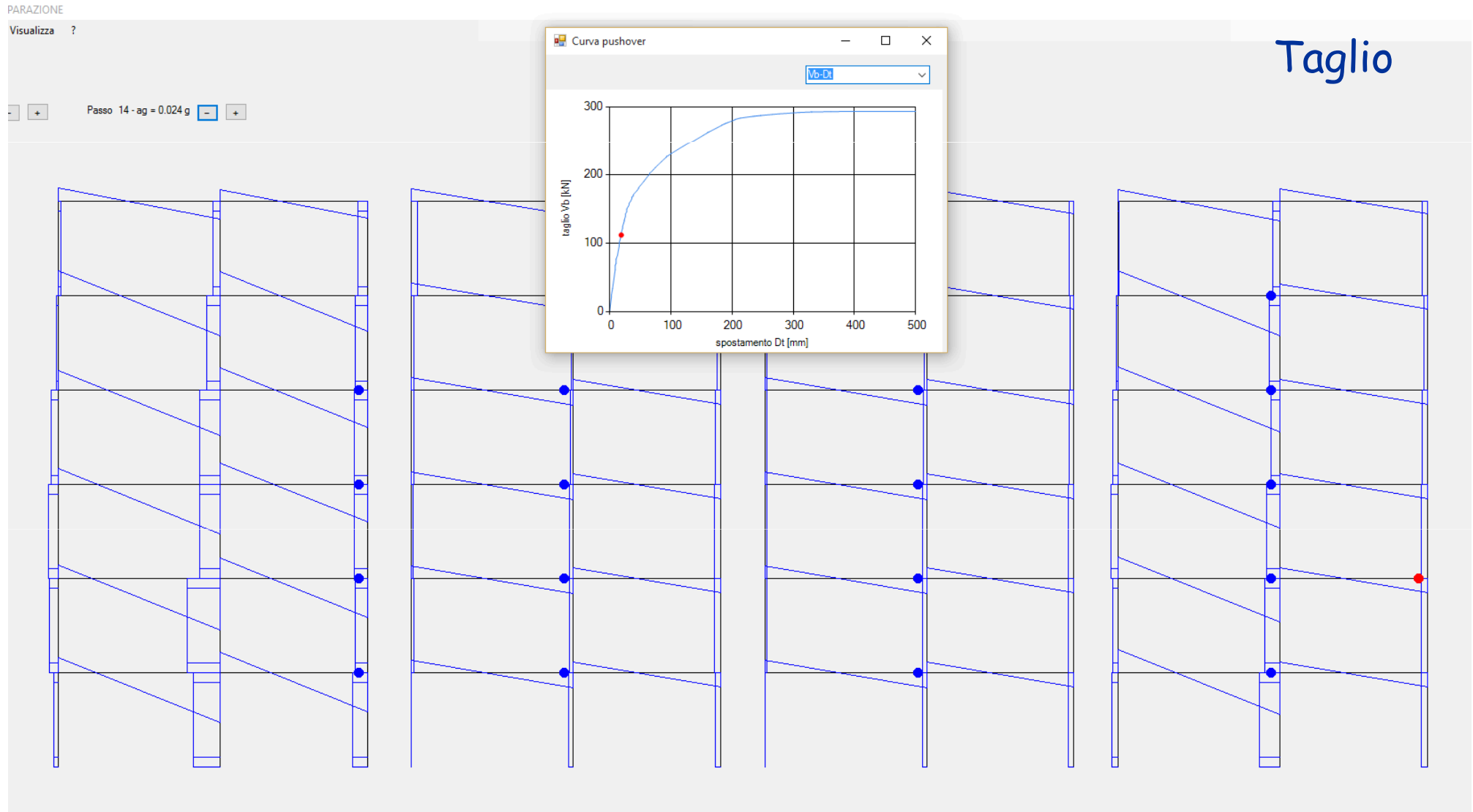
# Pushover direzione y

Momento flettente

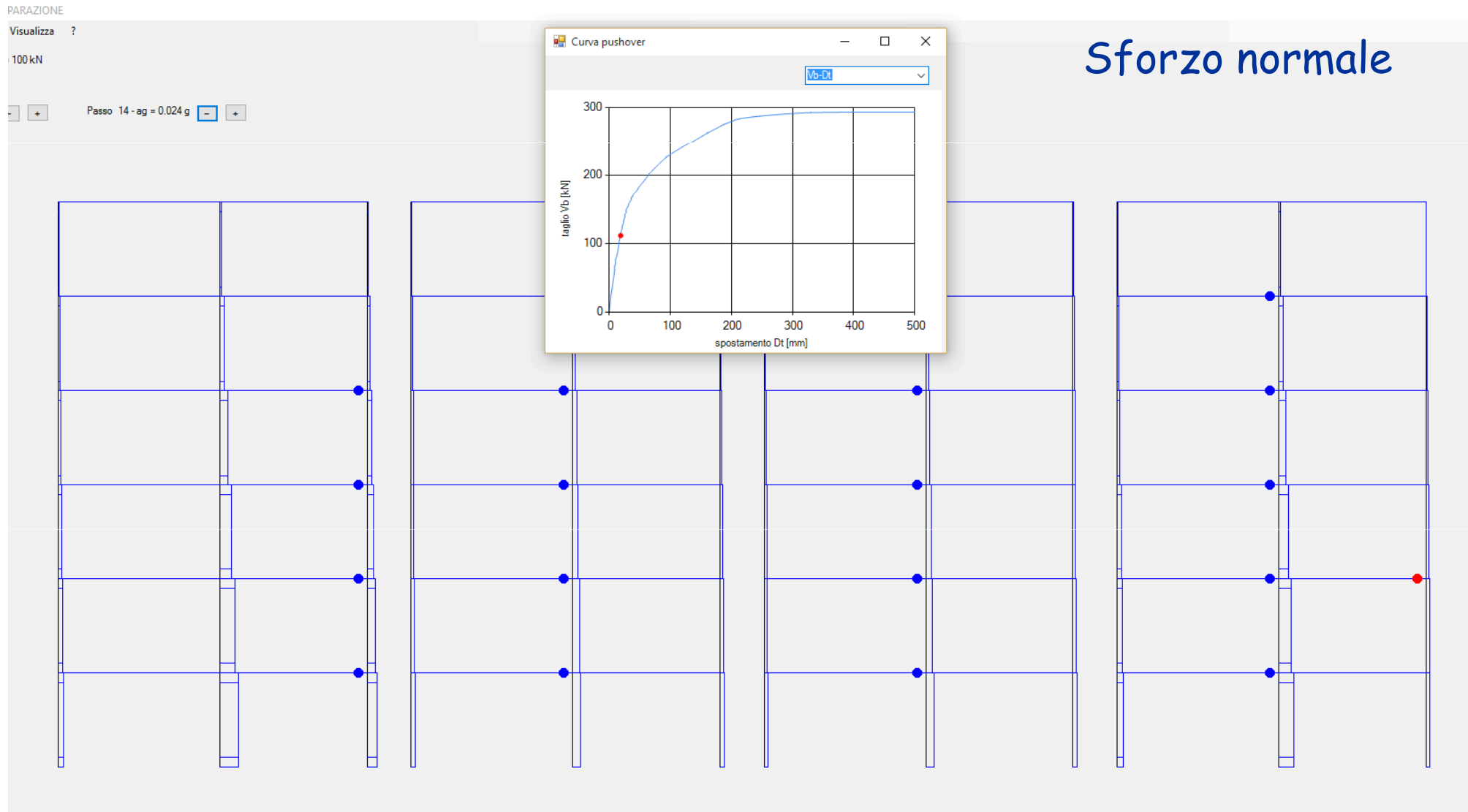


# Pushover direzione y

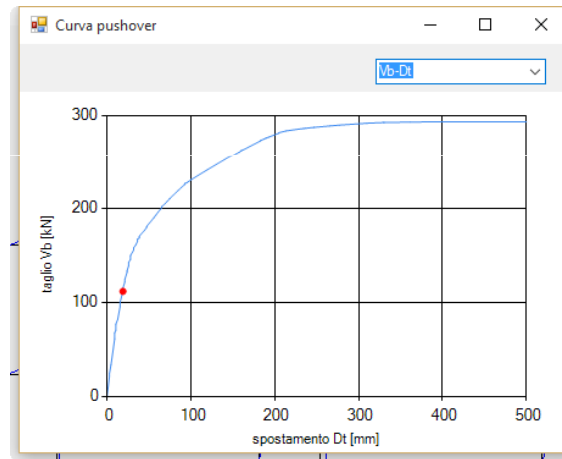
Taglio



# Pushover direzione y



# Pushover direzione y



E inoltre:

- Spostamento e rotazione dei nodi
- Spostamento assoluto e relativo degli impalcati
- Rotazione plastica delle sezioni plasticizzate

Ed anche:

- Capacità deformativa delle sezioni plasticizzate (che dipende anche da  $N$ , che varia durante il processo di carico)



# Corrispondenza tra punti della pushover e accelerazione sismica

Impostazione suggerita dalle norme europee:

- Metodo N2, proposto da Fajfar

Alternativa, sostanzialmente equivalente:

- Metodo N1, di Gheresi et al.

Evita il passaggio, avanti e indietro, tra schema reale e schema a un grado di libertà

Procedimento preferito negli Stati Uniti

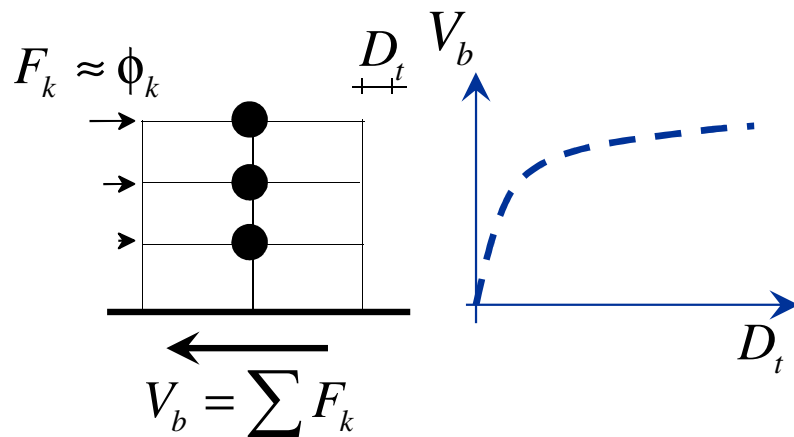
- Metodo di Freeman o dello spettro di capacità

Tiene conto in maniera differente (con variazione dello smorzamento) della variazione di dissipazione dovuta al progressivo danneggiamento della struttura

# Corrispondenza punti pushover - $a_g$ metodo N2, Fajfar

Multi Degree of Freedom

Telaio MDOF

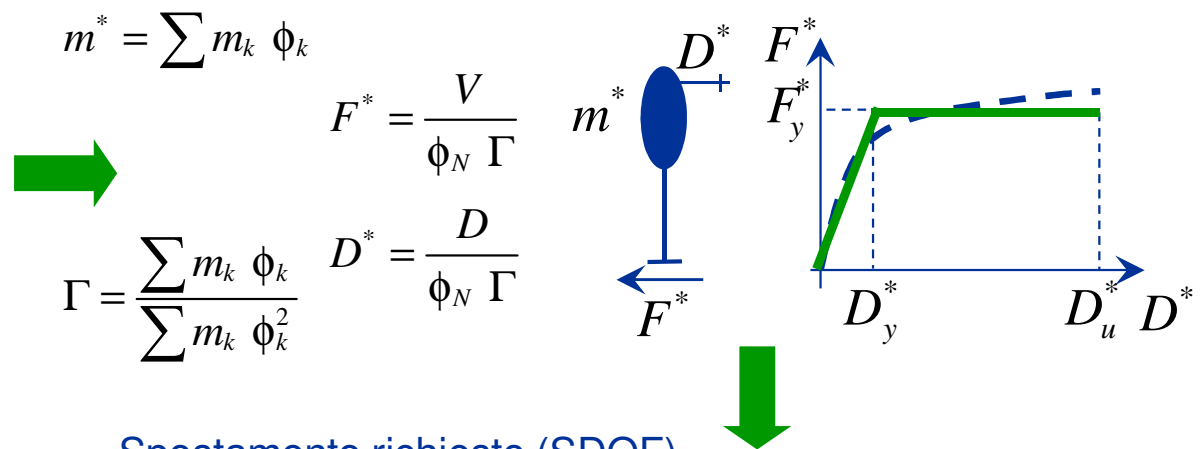


Spostamento richiesto (MDOF)

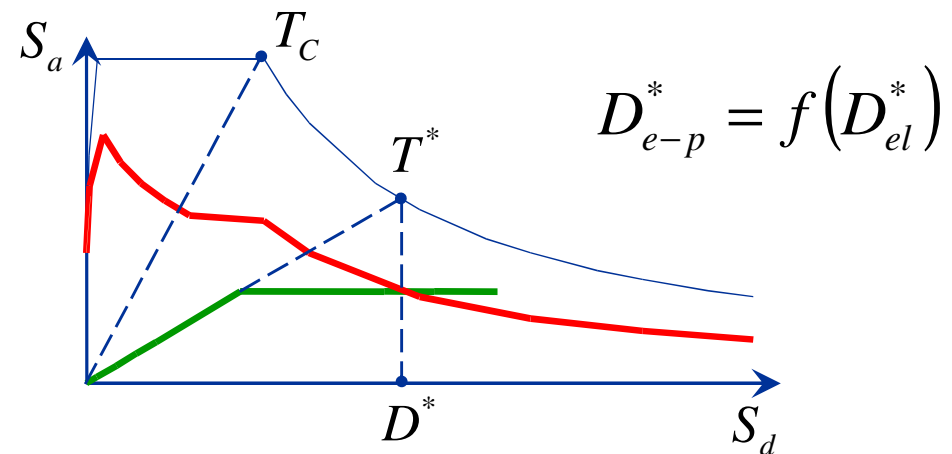
$$D_t = \Gamma D^*$$

Single Degree of Freedom

Sistema SDOF equivalente



Spostamento richiesto (SDOF)



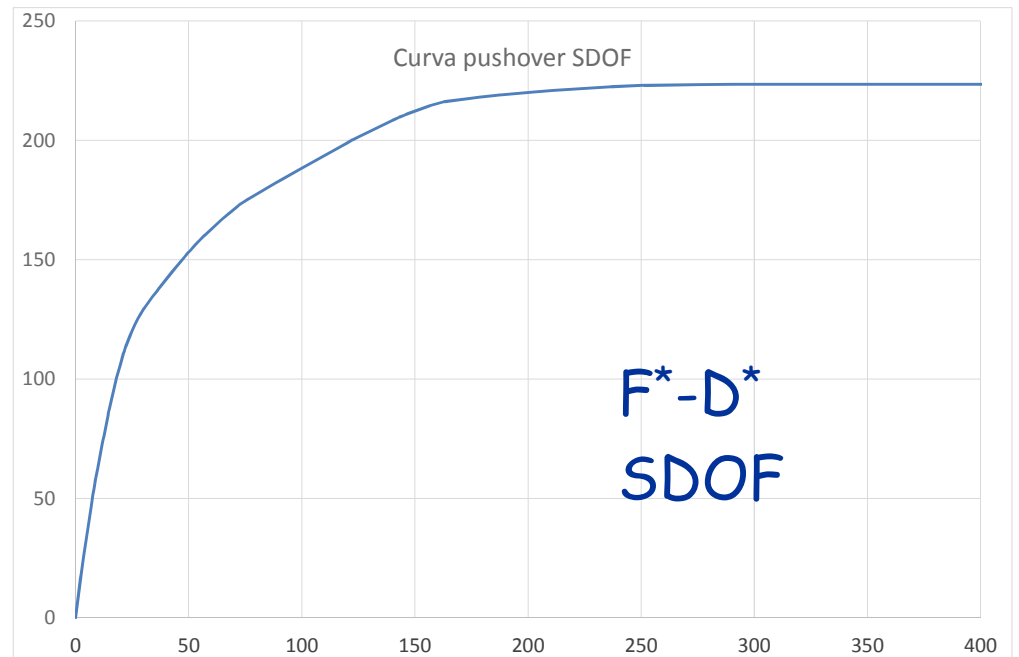
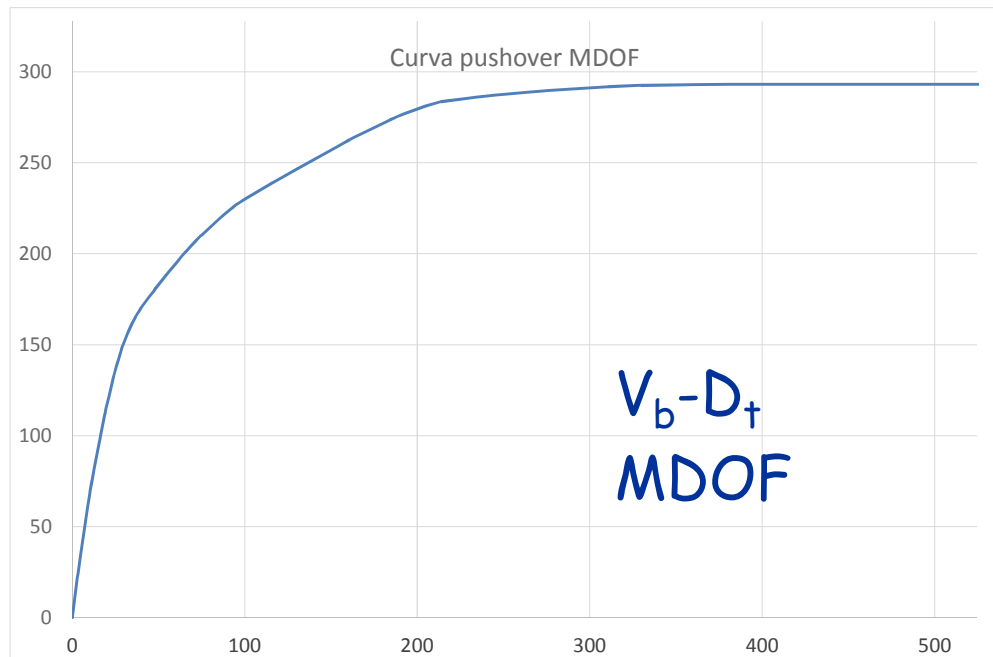
# Corrispondenza punti pushover - $a_g$

In sostanza, con riferimento alla curva di pushover fino ad un punto P qualsiasi (con spostamento  $D_{t,p}$ ):

- Si considera un oscillatore semplice elastico-perfettamente plastico equivalente alla struttura reale
- Per questo oscillatore, dallo spettro si ricava l'accelerazione  $a_{g,p}$  corrispondente allo spostamento assegnato
- Di conseguenza lo stato della struttura corrispondente allo spostamento  $D_{t,p}$  è associato all'accelerazione  $a_{g,p}$

# Corrispondenza punti pushover - $a_g$ metodo N2

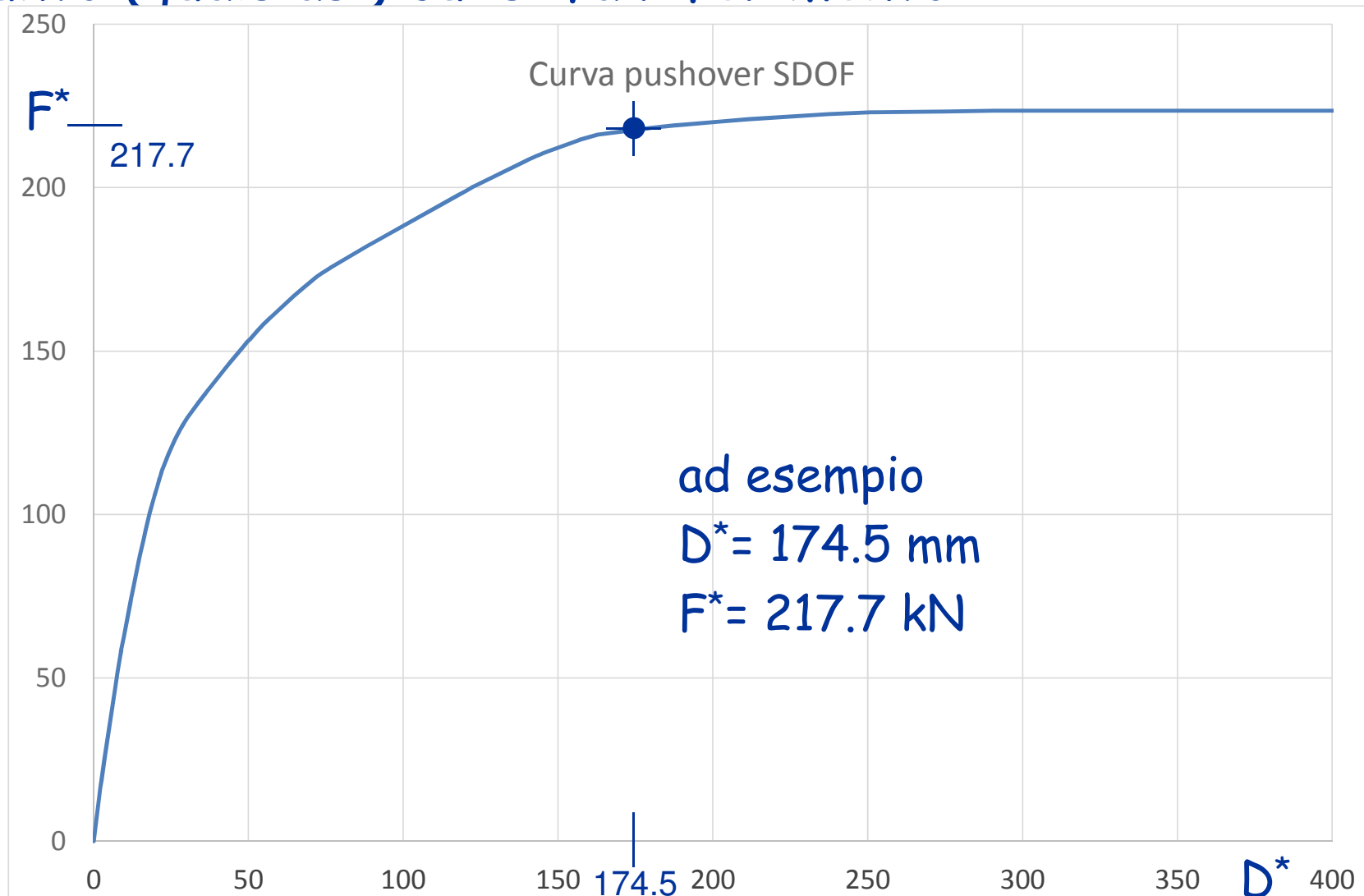
## Passaggio da MDOF a SDOF



I due grafici sono perfettamente proporzionali

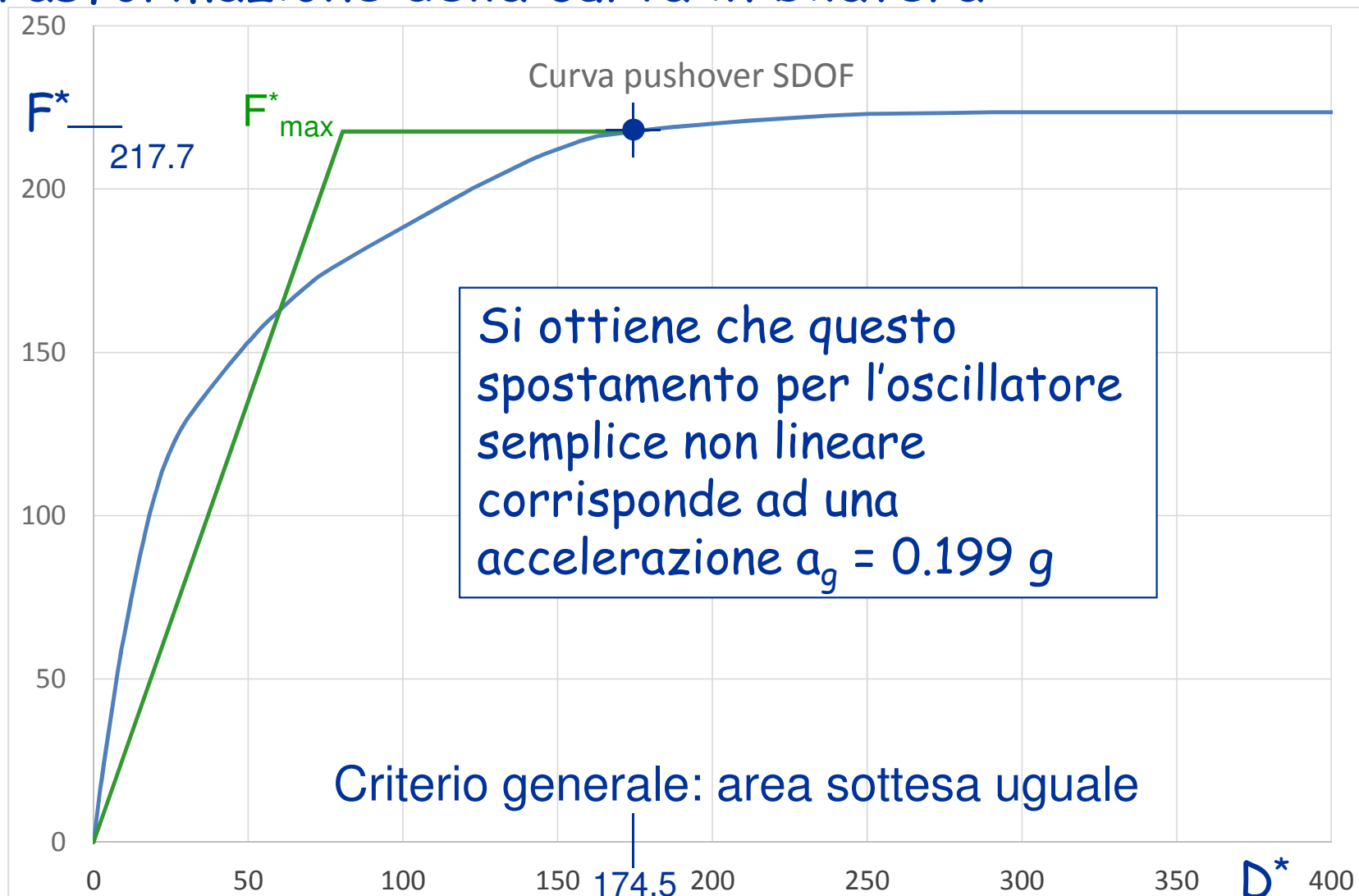
# Corrispondenza punti pushover - $a_g$ metodo N2

Punto (qualsiasi) cui si fa riferimento



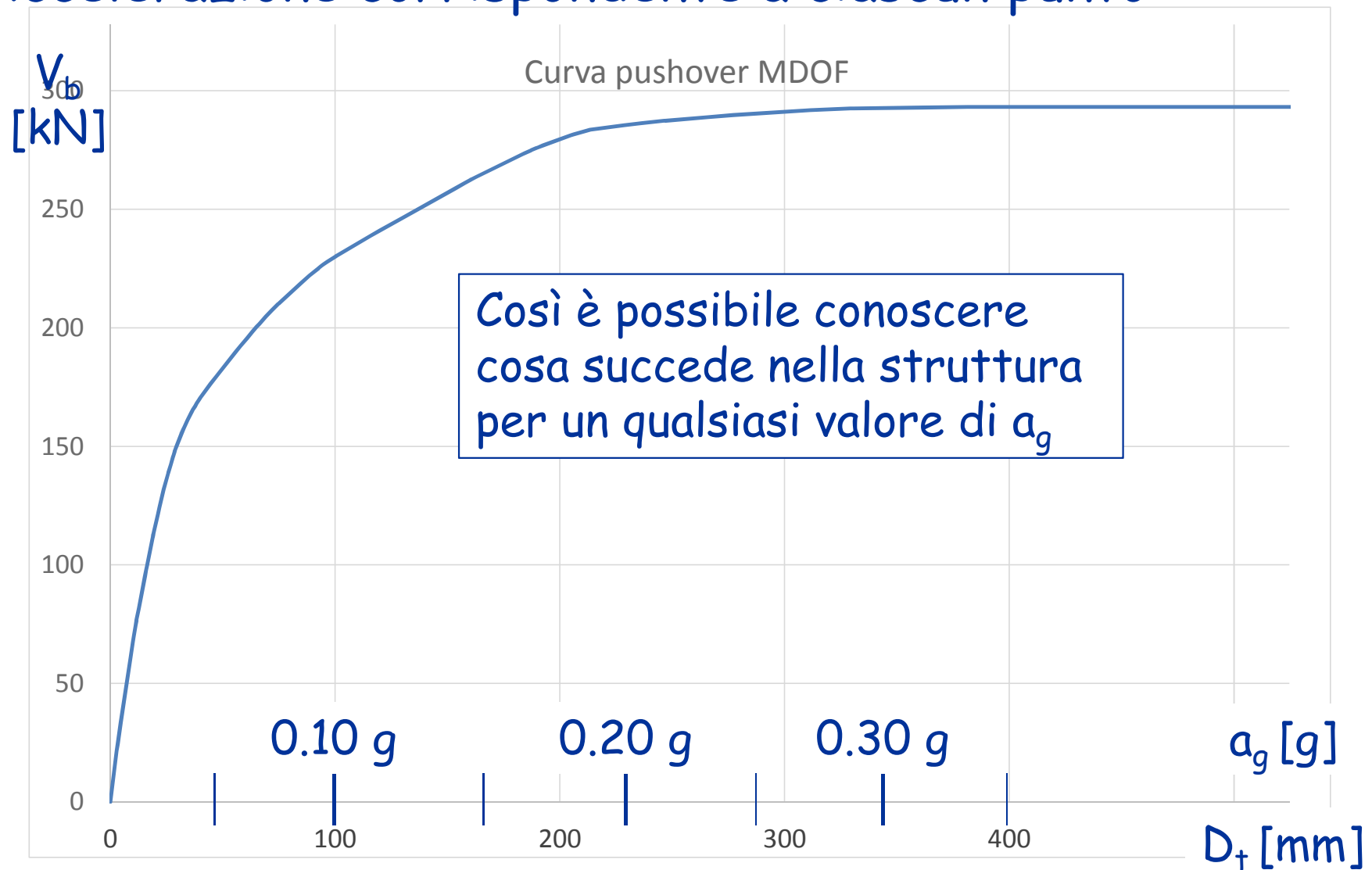
# Corrispondenza punti pushover - $a_g$ metodo N2

## Trasformazione della curva in bilatera



# Corrispondenza punti pushover - $a_g$ metodo N2

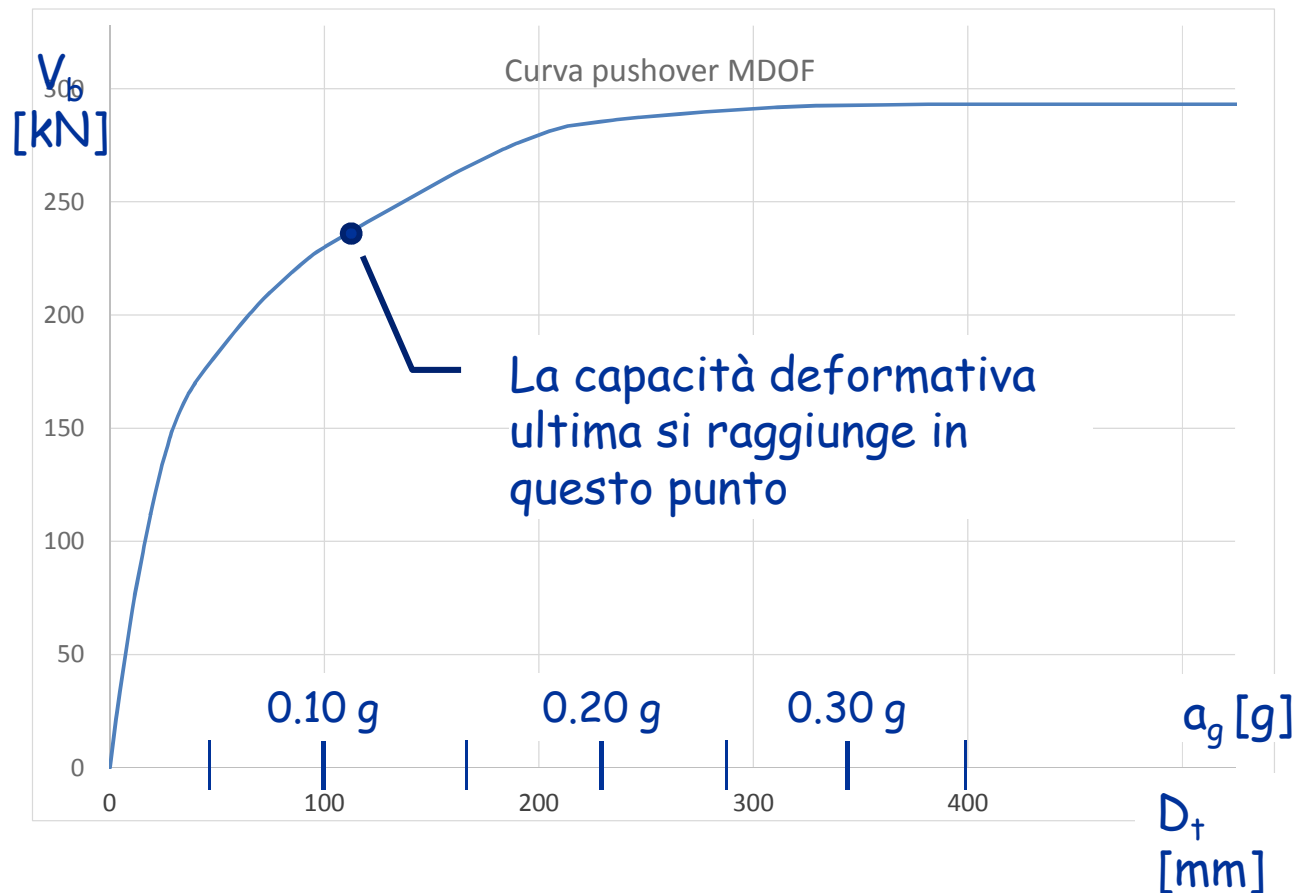
Accelerazione corrispondente a ciascun punto



# Analisi statica non lineare

## Giudizio sulla struttura

Spesso si usa l'analisi statica non lineare per esprimere un giudizio complessivo (sintetico) sulla struttura



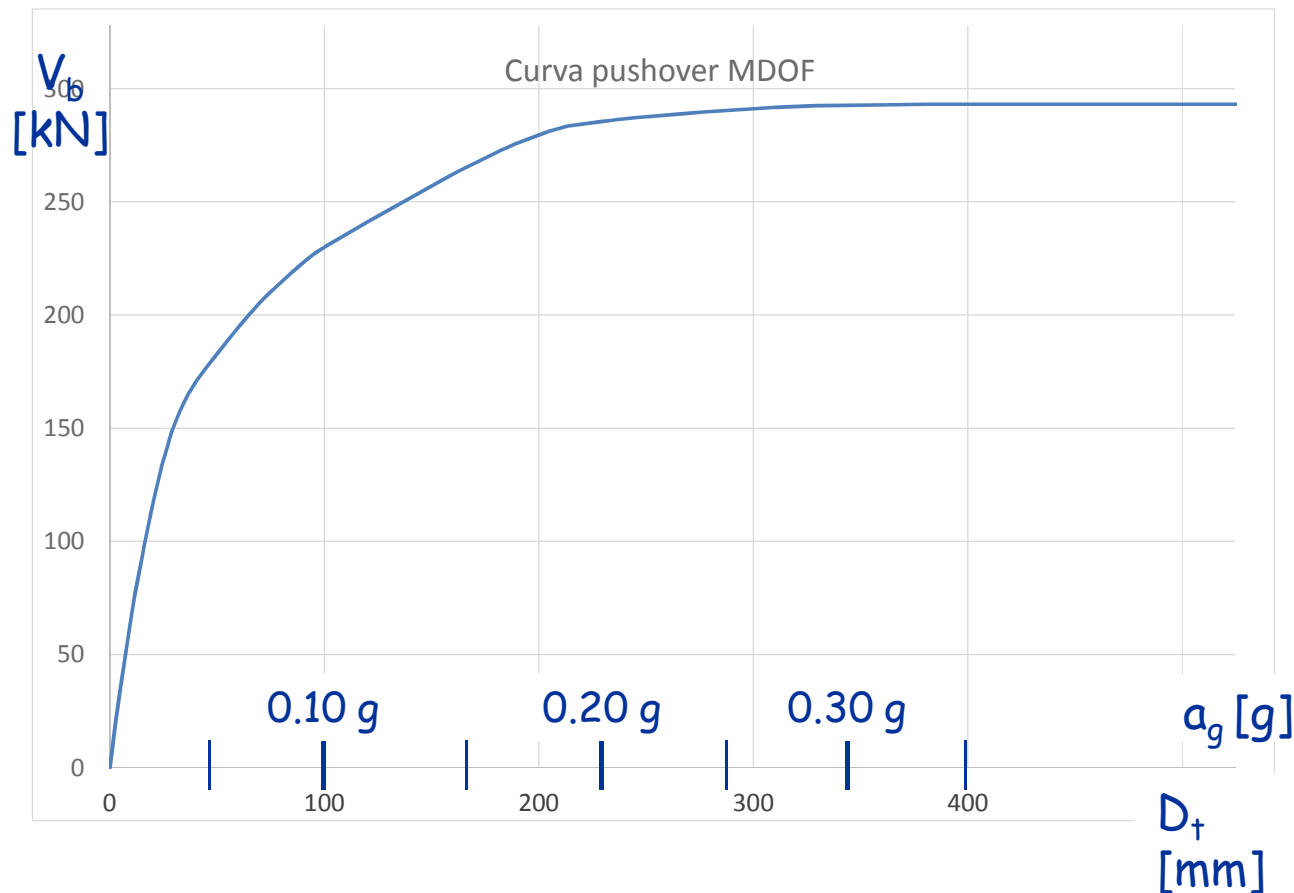
Poiché il punto corrisponde a 0.105 g si può asserire che la struttura sopporta un terremoto con  $a_g = 0.105 g$



# Analisi statica non lineare

## Giudizio sulla struttura

Può essere usata anche per dare un giudizio probabilistico (analisi "affidabilistica", Istruzioni CNR-DT 212)

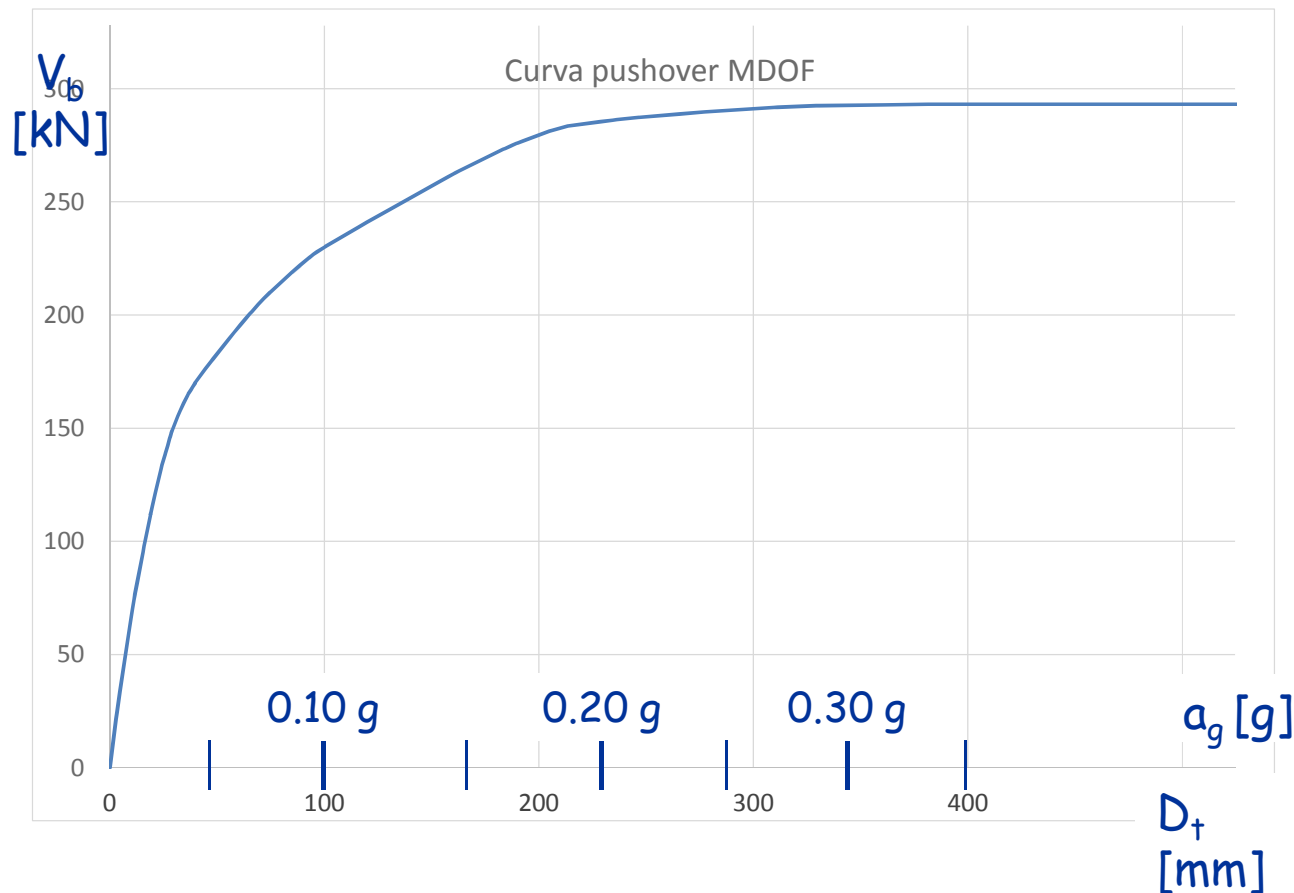


Si valuta la risposta dell'oscillatore a un insieme di accelerogrammi e si costruisce la curva di fragilità. Si determina quindi la frequenza media annua di superamento di SL

# Analisi statica non lineare

## Giudizio sulla struttura

È molto più utile usare l'analisi per giudicare come evolve il comportamento al crescere di  $a_g$



Si può vedere quali sezioni si plasticizzano prima, che tipo di meccanismo di collasso, se vi è rischio di rotture fragili, ecc.