NTC 2018: Tutto chiaro? – Proviamo ad orientarci – 1° giornata

Il cemento armato questo «s»conosciuto

Bologna, 28 giugno 2018

2 – Verifica di costruzioni esistenti

Docente del corso

AURELIO GHERSI

Quando siamo chiamati ad occuparci

di edifici esistenti?

- Esprimere un giudizio sull'agibilità per dissesti (reali o presunti) indipendenti da eventi sismici
  - L'analisi del quadro fessurativo fornisce indicazioni sulle possibili cause dei dissesti
  - L'obiettivo principale è giudicare se i dissesti hanno ridotto o compromesso gravemente la capacità di portare carichi verticali
  - Il giudizio è sostanzialmente indipendente dalla capacità della struttura di sostenere l'azione sismica, ma questo deve essere precisato chiaramente nella relazione

Quando siamo chiamati ad occuparci

di edifici esistenti?

- Esprimere un giudizio sull'agibilità per dissesti (reali o presunti) indipendenti da eventi sismici

- Esprimere un giudizio sull'agibilità dopo un evento sismico
  - Occorre principalmente valutare se la struttura ha subito danni che riducono in maniera sensibile la sua capacità portante nei confronti di azioni orizzontali
  - Esistono numerose schede (AeDES, FAST) per raccogliere informazioni sullo stato della struttura
  - Occorre però fondamentalmente comprendere il comportamento sismico della struttura per giudicare se il sisma lo ha modificato e peggiorato

Quando siamo chiamati ad occuparci

di edifici esistenti?

- Esprimere un giudizio sull'agibilità per dissesti (reali o presunti) indipendenti da eventi sismici

- Esprimere un giudizio sull'agibilità dopo un evento sismico
  - Nel giudizio, precisare sempre che si tratta di una valutazione comparativa (prima - dopo il danneggiamento da sisma) e non assoluta
  - Attenzione alle carenze strutturali gravi, che possono comunque rendere la struttura estremamente insicura nei confronti del sisma, anche se non ha subito danni

Quando siamo chiamati ad occuparci
di edifici esistenti?

- Esprimere un giudizio sull'agibilità per dissesti (reali o presunti) indipendenti da eventi sismici
- Esprimere un giudizio sull'agibilità dopo un evento sismico
- Valutare il rischio sismico o la vulnerabilità sismica per ampi insiemi di edifici
  - È basato su una analisi sommaria, principalmente tipologica, degli edifici
  - Si tratta di una valutazione di tipo probabilistico, usata per scelte generali, "politiche"

Quando siamo chiamati ad occuparci

di edifici esistenti?

- Esprimere un giudizio sull'agibilità per dissesti (reali o presunti) indipendenti da eventi sismici
- Esprimere un giudizio sull'agibilità dopo un evento sismico
- Valutare il rischio sismico o la vulnerabilità sismica per ampi insiemi di edifici
- Valutare il grado di sicurezza di un edificio nei confronti delle azioni sismiche
  - È basato su una analisi numerica che individua le debolezze della struttura e le quantifica con una indicazione finale numerica

Quando siamo chiamati ad occuparci
di edifici esistenti?

- Esprimere un giudizio sull'agibilità per dissesti (reali o presunti) indipendenti da eventi sismici
- Esprimere un giudizio sull'agibilità dopo un evento sismico
- Valutare il rischio sismico o la vulnerabilità sismica per ampi insiemi di edifici
- Valutare il grado di sicurezza di un edificio nei confronti delle azioni sismiche
- Valutare la classe di rischio sismico di un edificio
  - Classificazione istituita col D.M. 28/2/2017

Quando siamo chiamati ad occuparci

di edifici esistenti?

- Esprimere un giudizio sull'agibilità per dissesti (reali o presunti) indipendenti da eventi sismici
- Esprimere un giudizio sull'agibilità dopo un evento sismico
- Valutare il rischio sismico o la vulnerabilità sismica per ampi insiemi di edifici
- Valutare il grado di sicurezza di un edificio nei confronti delle azioni sismiche
- Valutare la classe di rischio sismico di un edificio
- Progettare interventi per migliorare la classe di rischio sismico di un edificio o adeguarlo sismicamente

Riferimenti normativi

- Eurocodice 8, parte 3
  Progettazione delle strutture per la zona sismica. Valutazione e adeguamento sismico degli edifici
  - È fondamentale perché da questo deriva le NTC, che a volte sono una copia con omissione di parti e quindi meno chiara
- Norme Tecniche per le Costruzioni 2018, DM 17 gennaio 2018
  - Capitolo 8, molto sintetico
- Circolare 21 gennaio 2019, n. 7
  - Molto più dettagliata rispetto a NTC

Valutazione della vulnerabilità di un edificio
Indicazioni generali

Valutazione della vulnerabilità

di un edificio

Obiettivi:

- Comprendere in che modo si comporta l'edificio durante il sisma, in modo da individuarne qualitativamente e quantitativamente le debolezze
- Fornire una stima quantitativa dell'accelerazione a_g (PGA) che porta al raggiungimento dello stato limite di danno SLD
- Fornire una stima quantitativa dell'accelerazione a_g (PGA) che porta al raggiungimento dello stato limite di salvaguardia della vita SLV (oppure di collasso SLC)

- Per farlo occorre affrontare diversi problemi:
  - Conoscenza della struttura
  - Modellazione della struttura
  - Tipo di analisi da effettuare

Valutazione della vulnerabilità
di un edificio

Conoscenza

- Abbiamo di fronte un edificio reale e dobbiamo cercare di capire al meglio:
  - La sua geometria
  - Gli elementi strutturali
  - Le caratteristiche meccaniche dei materiali che lo compongono
  - La possibile influenza degli elementi non strutturali

- Una conoscenza perfetta è praticamente impossibile
  - Una analisi preliminare, anche di massima, può fornire indicazioni su aspetti della conoscenza da approfondire ed aiutare nella definizione di un piano di indagine
  - Dobbiamo decidere come tener conto delle incertezze e della dispersione dei valori che siamo riusciti a misurare

Valutazione della vulnerabilità

di un edificio

Modellazione

- Quello che noi esaminiamo numericamente è sempre un modello della realtà
  - Nessun modello può cogliere esattamente la realtà
  - Modelli più sofisticati possono aiutare a comprendere il reale comportamento, ma sono più sensibili alle incertezze di conoscenza e ai possibili errori nella definizione del modello

- Nel modello potremmo tener conto delle incertezze nei valori (incertezze aleatorie) mediante analisi probabilistiche - ma è oneroso farlo
- Esistono incertezze non valutabili in maniera probabilistica (incertezze epistemiche)

Valutazione della vulnerabilità
di un edificio

Tipi di analisi

- Il reale comportamento sismico è dinamico non lineare
  - Analizzarlo in questo modo è troppo oneroso ed inserisce ulteriori incertezze
- Noi cerchiamo di coglierlo con analisi più semplici
  - Analisi lineare (analisi modale con spettro di risposta)
  - Analisi statica non lineare

- Ciascun tipo di analisi è condizionato dalle incertezze dei dati
  - Usare più tipi di analisi, partendo dalla più semplice e passando poi alla più complessa può consentire di tenere sotto controllo gli effetti delle incertezze

Procedimento da seguire

1. Indagini e prima valutazione della costruzione
   - Reperimento della documentazione, sopralluoghi, rilievo, analisi qualitativa, analisi numeriche semplificate, indagini
2. Analisi lineare (modale con spettro di risposta):
   - Fornisce caratteristiche di sollecitazione e spostamenti (che sono proporzionali ad a_g)
3. Analisi non lineare
   - Giudizio in termini di sollecitazioni e spostamenti
4. Influenza delle incertezze
   - Dare un giusto peso alle incertezze per arrivare ad un valore numerico affidabile

Procedimento da seguire

1 – Indagini e prima valutazione della costruzione

- Reperimento della documentazione disponibile
  - Progetto originario
  - Documentazione di prove
  - Informazioni generali su costruzione ed eventi nel tempo
- Sopralluoghi iniziali
  - Insieme all'esame del progetto, sono utili per farsi una prima idea
- Rilievo geometrico sufficientemente dettagliato
  - Se si è in possesso del progetto originario, basta un controllo a campione
  - In assenza di progetto occorre un rilevo completo

Nota: l'ordine delle operazioni può variare a seconda delle situazioni

Procedimento da seguire

1 – Indagini e prima valutazione della costruzione

- Se non si ha un progetto strutturale completo: progetto simulato
  - È importante avere sempre un progetto di riferimento, reale o simulato

- Indagini, per ottenere informazioni su:
  - Caratteristiche meccaniche dei materiali
  - Particolari costruttivi

  Queste informazioni sono essenziali per un'analisi numerica dettagliata

Nota: l'ordine può variare a seconda delle situazioni

Procedimento da seguire

1 – Indagini e prima valutazione della costruzione

- Prima valutazione di massima del comportamento strutturale, sia con esame visivo della costruzione e del progetto che con modelli numerici semplificati o analisi lineare completa

  Dal sopralluogo visivo e da queste analisi preliminari si possono avere:

  – Indicazioni sul possibile comportamento sismico della struttura

  ma anche:

  – Indicazioni su quali siano gli elementi su cui approfondire l'indagine

Nota: l'ordine può variare a seconda delle situazioni

Procedimento da seguire

1 – Indagini e prima valutazione della costruzione

Prima valutazione di massima del comportamento strutturale

- Un esame visivo della costruzione e del progetto (se disponibile) consente di individuarne i principali punti di debolezza. Ad esempio:
  - Presenza di una direzione particolarmente debole, perché sostanzialmente priva di travi emergenti
  - Presenza di pilastri molto deboli rispetto alle travi, che potrebbero portare a meccanismi di collasso di piano
  - Forti dissimmetrie che potrebbero portare a comportamenti rotazionali pericolosi
  - Elementi che possono portare a sollecitazioni localizzate molto forti (scale, ecc.)

Procedimento da seguire

1 – Indagini e prima valutazione della costruzione

Prima valutazione di massima del comportamento strutturale

- Un valutazione numerica semplificata
  - Consente di cogliere l'ordine di grandezza delle sollecitazioni ed individuare quali possono essere i problemi principali
  - È utile come validazione dei calcoli successivi (o almeno dei calcoli lineari), anche ai sensi del capitolo 10 delle NTC08
  - Insieme all'esame visivo, può fornire indicazioni anche per quanto riguarda le indagini da effettuare in sito e sui materiali

  Questa valutazione può essere effettuata con procedimenti semplificati, anche se spesso questo è meno facile rispetto al caso di progettazione ex-novo, oppure con normali analisi lineari

Procedimento da seguire

1 – Indagini e prima valutazione della costruzione

Prima valutazione di massima del comportamento strutturale

- Esame visivo della costruzione e del progetto (se disponibile)
- Valutazione numerica semplificata

⇩

È sempre un punto di partenza fondamentale
per lo sviluppo successivo delle analisi

Procedimento da seguire

2 – analisi lineare

Vantaggi:

- È il tipo di analisi cui siamo abituati, quindi la gestiamo bene
- L'analisi (intesa come risoluzione dello schema) richiede solo la definizione di geometria e carichi; la conoscenza di armature e caratteristiche dei materiali serve nella fase finale di verifica
  - Le incertezze su una sezione non si ripercuotono sulle altre
- La linearità consente proporzioni
  - Si può dire con facilità quale aliquota dei carichi la struttura può portare

Procedimento da seguire

2 – analisi lineare

Vantaggi:

- Dovrebbe andare bene per la verifica allo SLU per soli carichi verticali

  È possibile che alcune sezioni non siano verificate

  – Questo può essere un fatto fisiologico (esempio: pilastro all'ultimo ordine) ed è bene saperlo per non preoccuparsene quando si considera il sisma

  – Può essere un fatto patologico (esempio: trave armata in maniera insufficiente per carichi verticali) ed è bene saperlo per programmare interventi indipendentemente dl sisma

Procedimento da seguire

2 – analisi lineare

Vantaggi:

- Dovrebbe andare bene per la verifica sismica allo SLD
  - Il giudizio standard è in termini di spostamenti relativi di interpiano; modesti superamenti del limite elastico influiscono poco sugli spostamenti
  - Si può effettuare un'analisi lineare con fattore di comportamento fino a 1.5 se si vuole controllare che il danno strutturale allo SLD sia accettabile

Problema:

- Possono esserci casi in cui la struttura sta già molto male dal punto di vista sismico anche per accelerazioni modeste come quelle di SLD

Procedimento da seguire

2 – analisi lineare

Problema :

- Per lo SLV la struttura va sicuramente oltre il limite elastico. Come possiamo usarla?

Eurocodice 8-3
Prospetto 4.3

		Modello Lineare (LM)		Modello non lineare		Approccio con il fattore q	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo 8e/m)	Duttile	Accettabilità del modello lineare (per la verifica dei valori $\rho_i = D_i/C_i$):		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.	Dall'analisi.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.
		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.				
		Ispezioni (se LM è accettato):					
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.				
	Fragile	Verifiche (se LM è accettato):			In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.	In conformità alla sezione pertinente della EN 1998-1:2004.	
		Se $\rho_i \leq 1$: dall'analisi.					
		Se $\rho_i > 1$: dall'equilibrio con la resistenza di e/m duttili. Si usano i valori medi delle proprietà moltiplicati per CF.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.				

Analisi lineare con fattore q

Procedimento da seguire

2 – analisi lineare

Problema :

- Per lo SLV la struttura va sicuramente oltre il limite elastico. Come possiamo usarla?

Analisi lineare con fattore di comportamento q

- È l'analisi standard per il progetto di nuove costruzioni
  - Richiede verifica di resistenza delle sezioni

  Problema:
  - Quale fattore di comportamento usare se non sono rispettate le prescrizioni che garantiscono un comportamento duttile?

  La normativa suggerisce valori di q compresi tra 1.5 e 3, maggiori solo se ben motivati
  - Dobbiamo definire criteri chiari per scegliere il valore di q

Procedimento da seguire

2 – analisi lineare

Problema :

- Per lo SLV la struttura va sicuramente oltre il limite elastico. Come possiamo usarla?

Eurocodice 8-3
Prospetto 4.3

		Modello Lineare (LM)		Modello non lineare		Approccio con il fattore q	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo 8e/m)	Duttile	Accettabilità del modello lineare (per la verifica dei valori $\rho_i = D_i / C_i$):		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.	Dall'analisi.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.
		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.				
		Ispezioni (se LM è a					
		Dall'analisi.					
	Fragile	Verifiche (se LM è accettato):			In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.	In conformità alla sezione pertinente della EN 1998-1:2004.	
		Se $\rho_i \leq 1$: dall'analisi.					
		Se $\rho_i > 1$: dall'equilibrio con la resistenza di e/m duttili. Si usano i valori medi delle proprietà moltiplicati per CF.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.				

Analisi lineare con calcolo di $\rho = D / C$

Procedimento da seguire

2 – analisi lineare

Problema :

- Per lo SLV la struttura va sicuramente oltre il limite elastico. Come possiamo usarla?

Analisi lineare con q=1 e calcolo di ρ

- Richiede di calcolare il rapporto ρ tra domanda (da effetto sisma con q=1) e capacità della struttura
  - In termini di resistenza per gli elementi duttili, per valutare l'accettabilità del metodo
  - In termini di resistenza per gli elementi fragili e in termini di deformazione plastica per gli elementi duttili, per valutare cosa è capace di portare la struttura

Nota: la Circolare 2009 ne parlava più chiaramente;
con la Circolare 2019 non si capisce più niente

Procedimento da seguire

2 – analisi lineare

Problema :

- Per lo SLV la struttura va sicuramente oltre il limite elastico. Come possiamo usarla?

Analisi lineare con q=1 e calcolo di ρ

- Richiede di calcolare il rapporto ρ tra domanda (da effetto sisma con q=
  - In termini d valutare l'accettabil
  - In termini d termini di deformazio valutare cosa è capace di p

Questa analisi è in sostanza una semplificazione ed una prefigurazione dell'analisi non lineare

Nota: la Circolare 2009 ne parlava più chiaramente; con la Circolare 2019 non si capisce più niente

Procedimento da seguire

3 – analisi non lineare

3. Analisi pushover e individuazione di a_g corrispondente ai singoli punti della curva taglio-spostamento

   – Fornisce le caratteristiche di sollecitazione, le deformazioni elastiche e plastiche per un qualsiasi valore di a_g

   – Consente di individuare il valore di a_g per cui si hanno rotture fragili oppure il raggiungimento dei limiti di deformazioni plastiche (rotazione alla corda)

   – In sostanza, consente di comprendere il comportamento della struttura al crescere dell'azione sismica ed individuarne i punti deboli

Procedimento da seguire

3 – analisi non lineare

3. Analisi pushover e individuazione di a_g corrispondente ai singoli punti della curva taglio-spostamento

   – Fornisce le caratteristiche di sollecitazione, le deformazioni elast

   – Cons fragi plast

   – In so della punti deboli

L'analisi non lineare è fondamentale per la diagnosi del comportamento e per l'individuazione dei punti deboli della struttura ma i suoi risultati sono fortemente condizionati dalla modellazione e dai parametri scelti

Procedimento da seguire

4 – influenza delle incertezze

4. Valutare come cambiano i risultati numerici al variare della modellazione e dei parametri scelti
   - Evidenziare nella relazione le scelte base della modellazione e dei parametri usati
   - Individuare modelli alternativi o valori alternativi plausibili e ripetere l'analisi
   - Dare un peso ai risultati di ciascuna analisi, basato sulla attendibilità di modello e parametri
   - Riportare anche sinteticamente nella relazione le alternative esaminate ed il peso loro dato
   - Assumere in definitiva come valore numerico una media pesata dei risultati delle varie analisi

Procedimento da seguire

4 – influenza delle incertezze

4. Valutare come cambiano i risultati numerici al variare della modellazione e dei parametri scelti

   - Evidenziare nella relazione le scelte base della modellazione e dei parametri usati
   - Indiv
     ripet
   - Dare
     atter
   - Ripo
     esaminate ed il peso loro dato
   - Assumere in definitiva come valore numerico una media pesata dei risultati delle varie analisi

Tener conto delle incertezze è fondamentale per fornire una valutazione realistica del comportamento sismico dell'edificio

Conoscenza

Costruzioni esistenti

Conoscenza della struttura

- La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi devono tenere conto dei seguenti aspetti della costruzione:

  1. Essa riflette lo stato delle conoscenze al tempo della sua realizzazione
  2. In essa possono essere insiti, ma non palesi, difetti di impostazione e di realizzazione
  3. Essa può essere stata soggetta ad azioni, anche eccezionali, i cui effetti non siano completamente manifesti
  4. Le sue strutture possono presentare degrado e/o modifiche significative, rispetto alla situazione originaria

Costruzioni esistenti

Conoscenza della struttura

- Per definire un modello strutturale, ai fini del calcolo, occorre conoscere:
  - La geometria (posizione e dimensioni di tutti gli elementi strutturali, ma anche di quelli non strutturali che possono influire sul comportamento della struttura)
  - I particolari costruttivi (quantità e posizione delle barre di armatura)
  - Le proprietà meccaniche dei materiali (calcestruzzo e acciaio)
  - Le proprietà meccaniche dei terreni
  - I carichi permanenti agenti (ed i possibili carichi variabili)

Costruzioni esistenti

Richiami di normativa

- Per definire un modello strutturale, ai fini del calcolo, occorre conoscere:
  - La geometria

  Un rilievo geometrico-strutturale aiuta a:
  - Identificare l'organizzazione strutturale
  - Individuare la posizione e le dimensioni di travi, pilastri, scale e setti
  - Identificare i solai e la loro tipologia, orditura, sezione verticale
  - Individuare tipologia e dimensioni degli elementi non strutturali quali tamponamenti, tramezzature, etc.

NTC, punto 8.5.2 e Circolare, punto C8.5.2.2

Costruzioni esistenti

Richiami di normativa

- Per definire un modello strutturale, ai fini del calcolo, occorre conoscere:
  - La geometria

La presenza del progetto originale semplifica il lavoro:

- Se si è in possesso di tavole progettuali è sufficiente un riscontro a campione, con un attento confronto tra oggetto reale e tavole progettuali
- In assenza di progetto è necessario un dettagliato rilievo della struttura
- È in genere possibile limitare le incertezze legate alla geometria con lavoro e spesa non particolarmente elevati

NTC, punto 8.5.2 e Circolare, punto C8.5.2.2

Costruzioni esistenti

Conoscenza della struttura

- Per definire un modello strutturale, ai fini del calcolo, occorre conoscere:
  - I particolari costruttivi

  Occorre effettuare indagini per valutare:

  - Quantità e disposizione di armatura longitudinale e trasversale in travi, pilastri, pareti, incluse:
    - barre piegate che contribuiscono alla resistenza a taglio
    - armatura nei solai che contribuisce al momento negativo di travi
  - Quantità e dettagli di armatura nei nodi trave-pilastro
  - Lunghezze di ancoraggio e delle zone di sovrapposizione delle barre
  - Spessore dei copriferri

NTC, punto 8.5.2 e Circolare, punto C8.5.2.2

Costruzioni esistenti

Conoscenza della struttura

- Per definire un modello strutturale, ai fini del calcolo, occorre conoscere:
  - I particolari costruttivi

  - Una individuazione puntuale delle armature è molto costosa, praticamente improponibile
  - È importante avere un progetto di riferimento
    - Se si è in possesso di tavole progettuali originali è sufficiente un riscontro a campione
    - In caso contrario si deve svolgere un progetto simulato e procedere ad un rilievo e controllo più diffuso
  - Si possono ridurre le incertezze, ma non eliminarle del tutto

Costruzioni esistenti

Conoscenza della struttura

- Per definire un modello strutturale, ai fini del calcolo, occorre conoscere:
  - Le proprietà meccaniche dei materiali

È necessario individuare in particolare:

- La resistenza a compressione del calcestruzzo, come valore medio ma anche come dispersione dei valori (scarto quadratico medio)
  - È frequente trovare resistenze basse e/o valori di resistenza molto variabili da punto a punto
- La resistenza a trazione e l'allungamento a rottura dell'acciaio
  - La resistenza dell'acciaio è spesso abbastanza prevedibile

I valori di certificati di prova originali del calcestruzzo non sono sempre affidabili

NTC, punto 8.5.3 e Circolare, punto C8.5.3.2

Costruzioni esistenti

Conoscenza della struttura

- Per definire un modello strutturale, ai fini del calcolo, occorre conoscere:
  - Le proprietà meccaniche dei materiali

I valori delle resistenze meccaniche dei materiali da usare nei calcoli verranno valutati sulla base delle indagini e delle prove effettuate sulla struttura, tenendo motivatamente conto dell'entità delle dispersioni, prescindendo dalle classi discretizzate previste nelle norme per le nuove costruzioni

- Le caratteristiche dei materiali (specialmente del calcestruzzo) possono essere molto diverse da quelle usualmente adottate in progetto
- Una buona campagna di prove può ridurre le incertezze, ma non può eliminarle del tutto

NTC, punto 8.5.3

Costruzioni esistenti

Conoscenza della struttura

- Per definire un modello strutturale, ai fini del calcolo, occorre conoscere:
  - Le proprietà meccaniche dei terreni

  Caratteristiche del terreno:
  - Come per le nuove costruzioni, questi sono dati preliminari, necessari anche per valutare il comportamento sotto carichi verticali, in assenza di sisma
  - Sono inoltre dati indispensabili per la caratterizzazione sismica del sito
    - Prestare particolare attenzione alla possibilità di amplificazioni sismiche locali

Costruzioni esistenti

Conoscenza della struttura

- Per definire un modello strutturale, ai fini del calcolo, occorre conoscere:
  - La geometria, i particolari costruttivi, le proprietà meccaniche dei materiali, le proprietà meccaniche dei terreni, i carichi permanenti agenti
- Il livello di conoscenza di queste caratteristiche dipende dalla documentazione disponibile e dalla qualità ed estensione delle indagini che vengono svolte
- I metodi di analisi e di verifica da usare dipendono dalla completezza e dall'affidabilità dell'informazione disponibile
- Nelle verifiche i parametri devono essere modificati mediante coefficienti legati al livello di conoscenza

NTC, punto 8.2

Costruzioni esistenti

Conoscenza della struttura

- In sostanza:
  - Per svolgere qualsiasi tipo di analisi è necessario conoscere meglio possibile l'organismo strutturale, nello stato effettivo in cui si trova
    Obiettivo: Raggiungere una conoscenza dell’edificio sufficiente per poter esprimere un giudizio (sia qualitativo che quantitativo)
  - Non è possibile raggiungere la conoscenza "completa" di un edificio esistente, per cui vi saranno sempre dei margini di incertezza
  - Il margine di incertezza corrispondente al livello di approfondimento conseguito deve essere tenuto in conto nella valutazione della sicurezza

Costruzioni esistenti

Livelli di conoscenza e fattori di confidenza

- Il margine di incertezza corrispondente al livello di approfondimento conseguito deve essere tenuto in conto nella valutazione della sicurezza

⇩

Sulla base degli approfondimenti effettuati, saranno individuati i "livelli di conoscenza" dei diversi parametri coinvolti nel modello e definiti i correlati fattori di confidenza, da utilizzare nelle verifiche di sicurezza

Fattori di confidenza

- I fattori di confidenza FC sono utilizzati per la riduzione dei valori dei parametri meccanici dei materiali e devono essere intesi come indicatori del livello di approfondimento raggiunto

Circolare, punto C8.5.4

Mi sembra importante aggiungere che i FC servono anche a tenere conto della dispersione dei valori ottenuti

Aurelio Ghersi

Fattori di confidenza

- I fattori di confidenza, determinati in funzione del livello di conoscenza acquisito, vengono applicati ai valori medi delle resistenze dei materiali ottenuti dai campioni di prove distruttive e non distruttive, per fornire una stima dei valori medi delle resistenze dei materiali della struttura, entro l'intervallo di confidenza considerato (in genere si assume un intervallo di confidenza pari al 95%).

Circolare, punto C8.5.4.2

Ritengo che il fattore di confidenza FC serva per passare da un valore medio (misurato sperimentalmente) ad un opportuno frattile, concettualmente equivalente al valore caratteristico usato nella progettazione di nuove costruzioni

Aurelio Ghersi

Fattori di confidenza

- Per determinare i fattori di confidenza per i diversi elementi strutturali o loro insiemi si deve tener conto che essi includono, oltre alle incertezze nella stima della resistenza dei materiali, anche le incertezze relative all'individuazione dei dettagli costruttivi.
- Il livello di conoscenza acquisito … determina i valori dei fattori di confidenza da applicare alle proprietà dei materiali, anche in maniera differenziata per elementi strutturali o gruppi di elementi

Circolare, punto C8.5.4.2

Importante notare la possibilità di differenziare il fattore di confidenza
(ad esempio tra armatura longitudinale e trasversale)

Aurelio Ghersi

Fattori di confidenza

- In assenza di valutazioni specifiche, ci si può riferire alla Tabella che segue

Circolare, punto C8.5.4.2 e Tab. C8.5.IV

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e *indagini limitate* in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e *prove limitate* in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con *indagini limitate* in situ; in alternativa *indagini estese* in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con *prove limitate* in situ; in alternativa da *prove estese* in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con *indagini limitate* in situ; in alternativa *indagini esaustive* in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con *prove estese* in situ; in alternativa da *prove esaustive* in situ	Tutti	1,00

Quindi questa tabella è solo indicativa, non cogente

Aurelio Ghersi

Verifiche

limitate, estese, esaustive

Livello di Indagini e Prove	Rilievo(dei dettagli costruttivi)[a]	Prove (sui materiali)[b][c][d]
	Per ogni elemento "primario" (trave, pilastro)	
limitato	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 15% degli elementi	1 provino di cls. per 300 m² di piano dell'edificio, 1 campione di armatura per piano dell'edificio
esteso	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 35% degli elementi	2 provini di cls. per 300 m² di piano dell'edificio, 2 campioni di armatura per piano dell'edificio
esaustivo	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 50% degli elementi	3 provini di cls. per 300 m² di piano dell'edificio, 3 campioni di armatura per piano dell'edificio

Nel controllo del raggiungimento delle percentuali di elementi indagati ai fini del rilievo dei dettagli costruttivi si tiene 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 ripetibilità, per geometria e ruolo uguali nello schema strutturale .

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

Il numero dei provini può essere variato, in aumento o in diminuzione, in relazione alle caratteristiche di omogeneità del materiale

Circolare, punto C8.5.8.4.2 e Tab. C8.5.V

Verifiche

limitate, estese, esaustive

Livello di Indagini e Prove	Rilievo(dei dettagli costruttivi)[a]	Prove (sui materiali)[b][c][d]
	Per ogni elemento "primario" (trave, pilastro)	
limitato	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 15% degli elementi	1 provino di cls. per 300 m² di piano dell'edificio, 1 campione di armatura per piano dell'edificio
esteso	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 35% degli elementi	2 provini di cls. per 300 m² di piano dell'edificio, 2 campioni di armatura per piano dell'edificio
esaustivo	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 50% degli elementi	3 provini di cls. per 300 m² di piano dell'edificio, 3 campioni di armatura per piano dell'edificio

Anche queste indicazioni sono puramente indicative, non cogenti

Nel controllo ... ilievo
dei dettagli co ...
consentano di ... ni
elementi strut ... ilità,
per geometria e ruolo uguali nello schema strutturale .
Ai fini delle prove sui materiali e consentito sostituire alcune prove distruttive, non più del 50%, con almeno il triplo di prove non distruttive, singole o combinate, tarate su quelle distruttive.
Il numero dei provini può essere variato, in aumento o in diminuzione, in relazione alle caratteristiche di omogeneità del materiale

Circolare, punto C8.5.8.4.2 e Tab. C8.5.V

Livelli di conoscenza

e fattori di confidenza

- La Circolare fornisce indicazioni sul come individuare il livello di conoscenza
- Queste indicazioni possono essere un utile spunto di riflessione, ma non ha alcun valore cogente
- È importante valutare quante informazioni si hanno ma anche la loro omogeneità

In definitiva, è il progettista che deve valutare, in piena coscienza, quale sia il livello di conoscenza raggiunto ed il valore da assegnare ai fattori di confidenza FC

Esempio

- Edificio per abitazione costruito negli anni '70

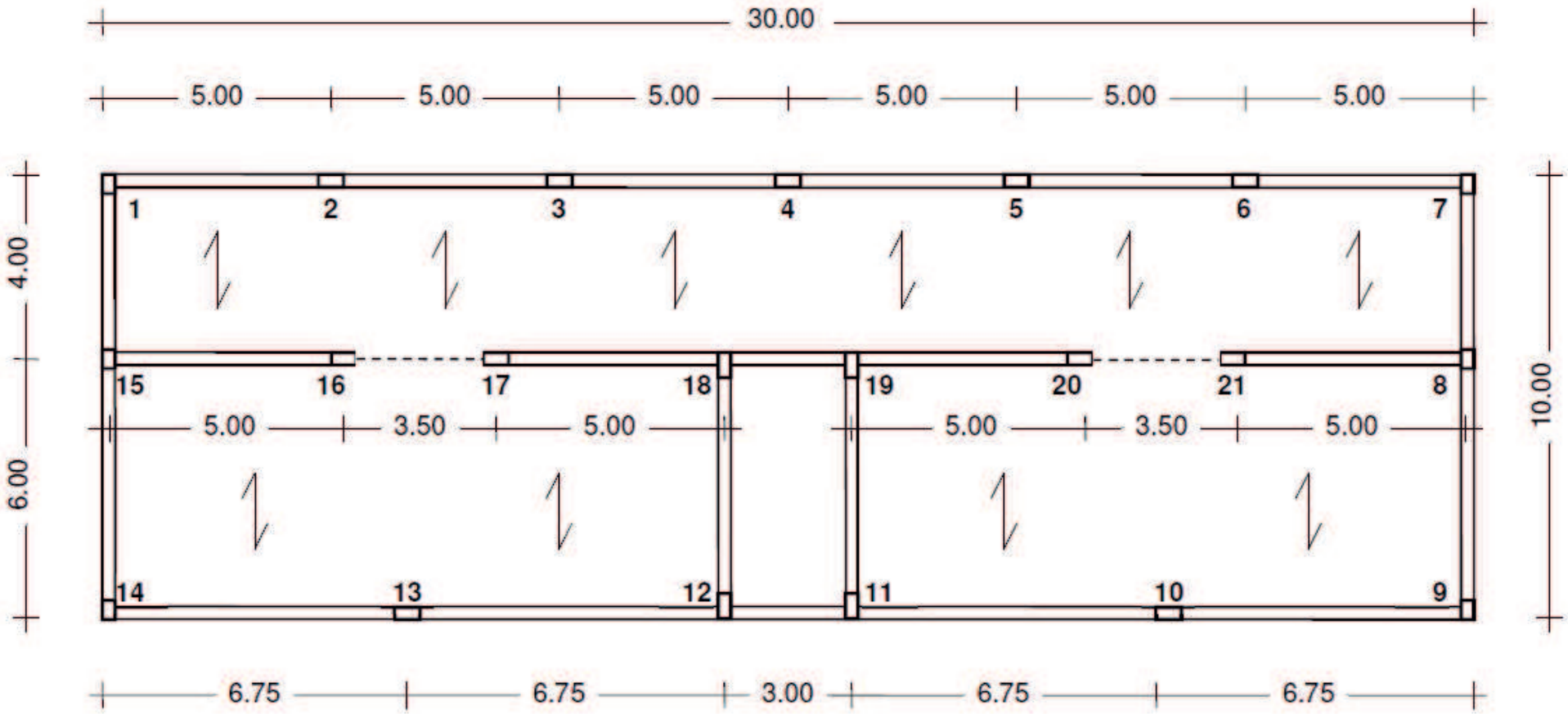
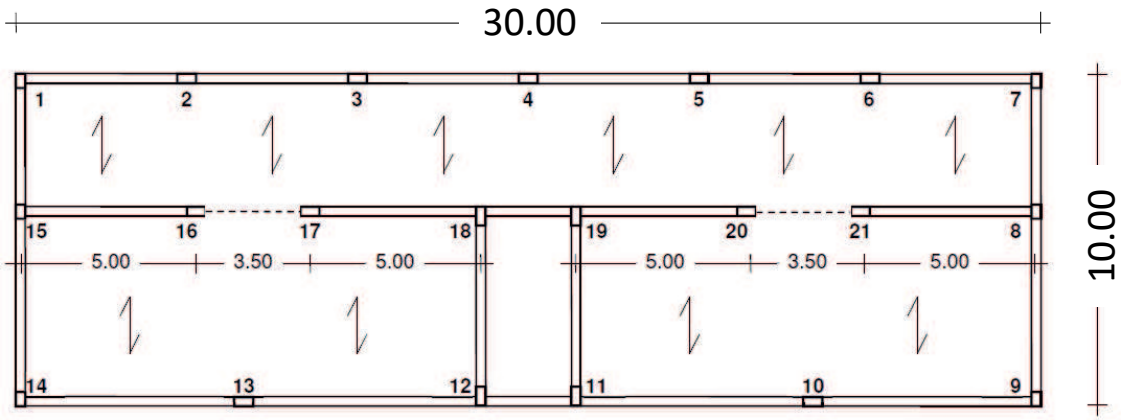
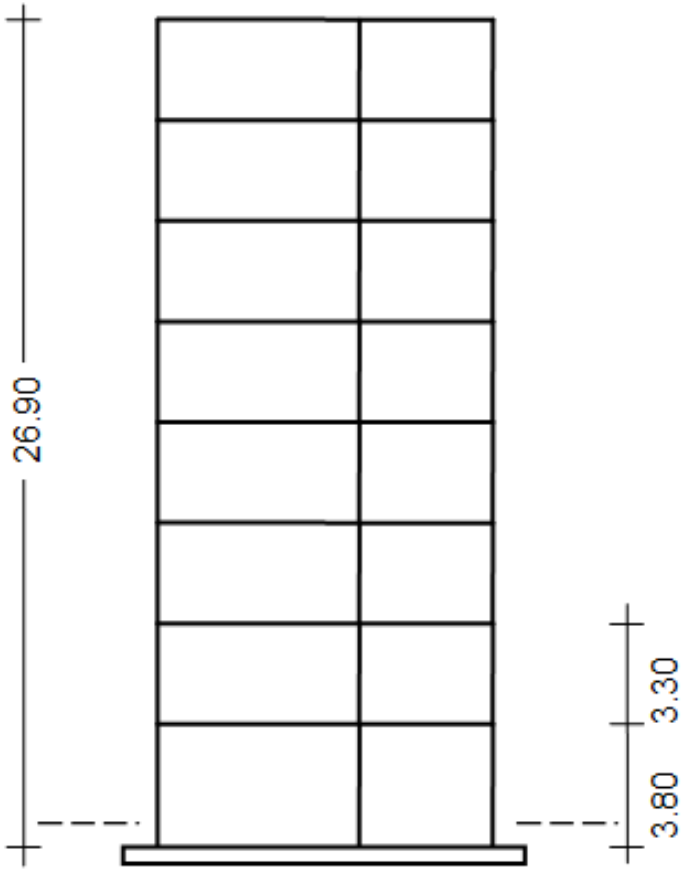


Fig. 5. Carpenteria del piano tipo

Esempio

- Edificio per abitazione costruito negli anni '70





Esempio

- Le prove sul calcestruzzo hanno fornito un valore medio f_{cm} = 19 MPa
  - Pur avendo fatto numerose prove, si è trovata un dispersione delle resistenze abbastanza forte
  - Per questo motivo si assume per il calcestruzzo FC = 1.2
- Le prove sull'acciaio hanno fornito un valore medio f_{ym} = 380 MPa
  - I valori sono abbastanza omogenei, ma comunque un po' di dispersione c'è
  - Le armature corrispondono abbastanza bene con quelle previste, ma in alcuni casi vi sono discordanze
  - Per questo motivo si assume per l'acciaio FC = 1.05

Prima valutazione della costruzione

Esame qualitativo della costruzione

ed eventuali valutazioni semplificate

- Un sopralluogo che consente un esame visivo della costruzione e della sua struttura e l'esame del progetto originario (se disponibile) o di un rilievo dettagliato sono sempre un punto di partenza
  - Spesso utile per la predisposizione del piano di indagini
  - Fondamentale per lo sviluppo successivo delle analisi
- L'esame visivo può essere integrato da analisi numeriche con modelli semplificati
- Occorre cercare di capire:
  - Quale sarà il comportamento elastico lineare della struttura per effetto di azioni orizzontali come il sisma
  - Quale sarà il suo comportamento quando si supera il limite elastico

Comportamento elastico lineare

Possibili punti di debolezza:

- Presenza di una direzione particolarmente debole, perché sostanzialmente priva di travi emergenti
  - Le sezioni possono raggiungere precocemente i limiti di resistenza
  - Una forte deformabilità può rendere rilevanti gli effetti del secondo ordine (effetto Pi-delta)
- Forti dissimmetrie (e carenza di rigidezza rotazionale)
  - Potrebbero portare a forti incrementi di spostamento e sollecitazione nei pilastri e travi più eccentrici
- Presenza di elementi che possono portare a sollecitazioni localizzate molto forti
  - Travi emergenti corte, pilastri corti (ad esempio per trave a ginocchio)

Comportamento elastico lineare

Possibili punti di debolezza:

- Attenzione anche agli elementi non strutturali
  - Le tamponature influiscono sul comportamento della struttura, anche se in genere non ne teniamo conto
  - Poche pareti tamponate, prive di aperture e con muratura molto robusta, possono provocare azioni forti nei pilastri adiacenti
  - La distribuzione planimetrica delle tamponature può provocare forti rotazioni degli impalcati e quindi sollecitazioni a pilastri e travi eccentrici
  - La forte carenza di tamponature ad un piano può portare ad una distribuzione di caratteristiche di sollecitazione molto disuniforme, con valori molto elevati in particolare nei pilastri del piano con tamponatura carente

Comportamento oltre il limite elastico

- Limite di resistenza a flessione

  Le travi e spesso anche i pilastri hanno una buona capacità deformativa oltre il limite elastico

  Possibili problemi, per singole sezioni:

  – Travi con forte armatura tesa e minima armatura compressa
  – Pilastri con tensione media N/A_c molto elevata rispetto alla resistenza (a causa di forti carichi e sezione inadeguata, ma a volte anche per la bassa resistenza del calcestruzzo)
  – Pilastri con armatura longitudinale molto bassa

  Possibili problemi, globali:

  – Bassa resistenza a flessione di tutti i pilastri (rispetto a quella delle travi, che può portare a labilità con meccanismo di piano

Comportamento oltre il limite elastico

plasticizzazione degli estremi dei pilastri

1999 – Turchia

Comportamento oltre il limite elastico

crollo dopo plasticizzazione degli estremi dei pilastri

23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

Comportamento oltre il limite elastico

plasticizzazione degli estremi dei pilastri

In questo caso:

- Il superamento della resistenza a flessione porta alla formazione di lesioni
  - Questo comporta l'impossibilità di portare ulteriore momento flettente, ma non il collasso
  - Finché rimane iperstatica e mantiene una certa rigidezza la struttura può continuare a portare carichi verticali ed anche azioni orizzontali
- Se lo spostamento di interpiano cresce oltre un certo limite, si raggiunge il limite di capacità deformativa della sezione
  - In questo caso si ha il crollo

Collasso di edifici esistenti:

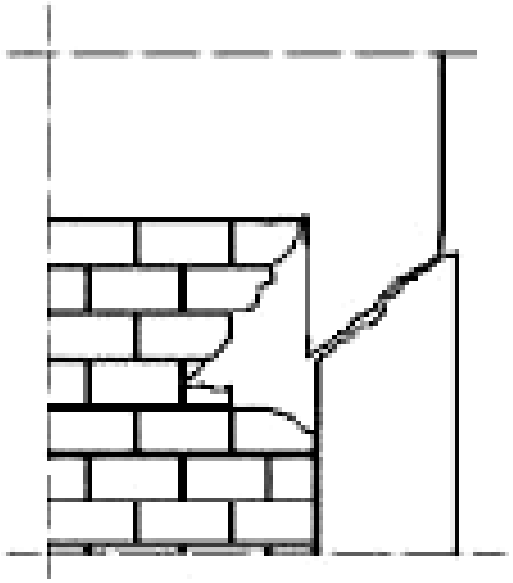
come avviene?

- Per esaurimento della duttilità:
  - Estese plasticizzazioni agli estremi delle aste (in particolare delle travi), che tendono verso un meccanismo globale e non di piano, non sono di per se indicatore di collasso
  - Plasticizzazioni agli estremi dei pilastri, con meccanismo di piano portano più facilmente al collasso
  - Il collasso è causato dal raggiungimento del limite di deformazione plastica dell'elemento (in particolare, del pilastro)
  - Una forte deformabilità ed il conseguente effetto P-Δ può anticipare il raggiungimento del limite

Comportamento oltre il limite elastico

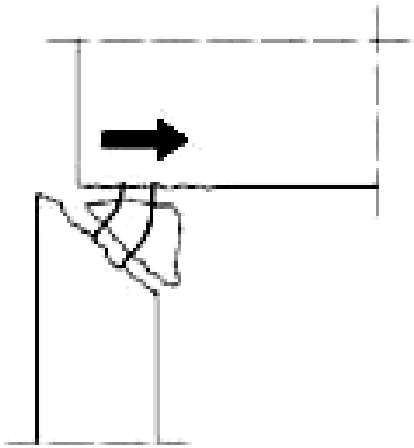
lesioni a taglio in un pilastro

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



Comportamento oltre il limite elastico

lesioni a taglio in un pilastro



Comportamento oltre il limite elastico

crollo conseguente a rottura a taglio dei pilastri (e dei nodi)

1999 – Turchia

Comportamento oltre il limite elastico

crollo conseguente a rottura a taglio dei pilastri (e dei nodi)

Qual è il problema principale?

- Il superamento della resistenza a taglio porta alla formazione della lesione inclinata
  - Questo comporta l'impossibilità di portare (ulteriore?) taglio e momento flettente, ma non automaticamente il collasso
- Se lo spostamento di interpiano cresce oltre un certo limite, il pilastro non riesce più a sostenere il carico verticale
  - In questo caso si ha il crollo

Collasso di edifici esistenti:

come avviene?

- Per comportamento fragile:
  - Il raggiungimento del limite di resistenza a taglio delle sezioni di pilastri e travi o dei nodi, ma anche lo scorrimento tra testa pilastro e trave in corrispondenza a riprese di getto, porta all'incapacità di sostenere i carichi verticali e quindi al crollo
  - Questo richiede in realtà la contemporanea presenza di rilevanti spostamenti relativi, ma di solito si considera sintomo di collasso il semplice raggiungimento del limite di resistenza

Verifica di edifici esistenti:

Indicazioni di normativa

La normativa parla esplicitamente di:

- Meccanismi fragili
  che si verificano controllando che la domanda non superi la corrispondente capacità in termini di resistenza
- Meccanismi duttili (o di esaurimento della duttilità)
  che si verificano controllando che la domanda non superi la corrispondente capacità in termini di deformazione
  o di resistenza in relazione al metodo utilizzato

NTC, punto 8.7.2

In termini di resistenza:

Domanda = momento, taglio prodotto dal sisma
Capacità = momento, taglio resistente della sezione

In termini di capacità:

Domanda = deformazione plastica prodotto dal sisma
Capacità = deformazione ultima che la sezione può sopportare

Esempio

- Edificio per abitazione costruito negli anni '70

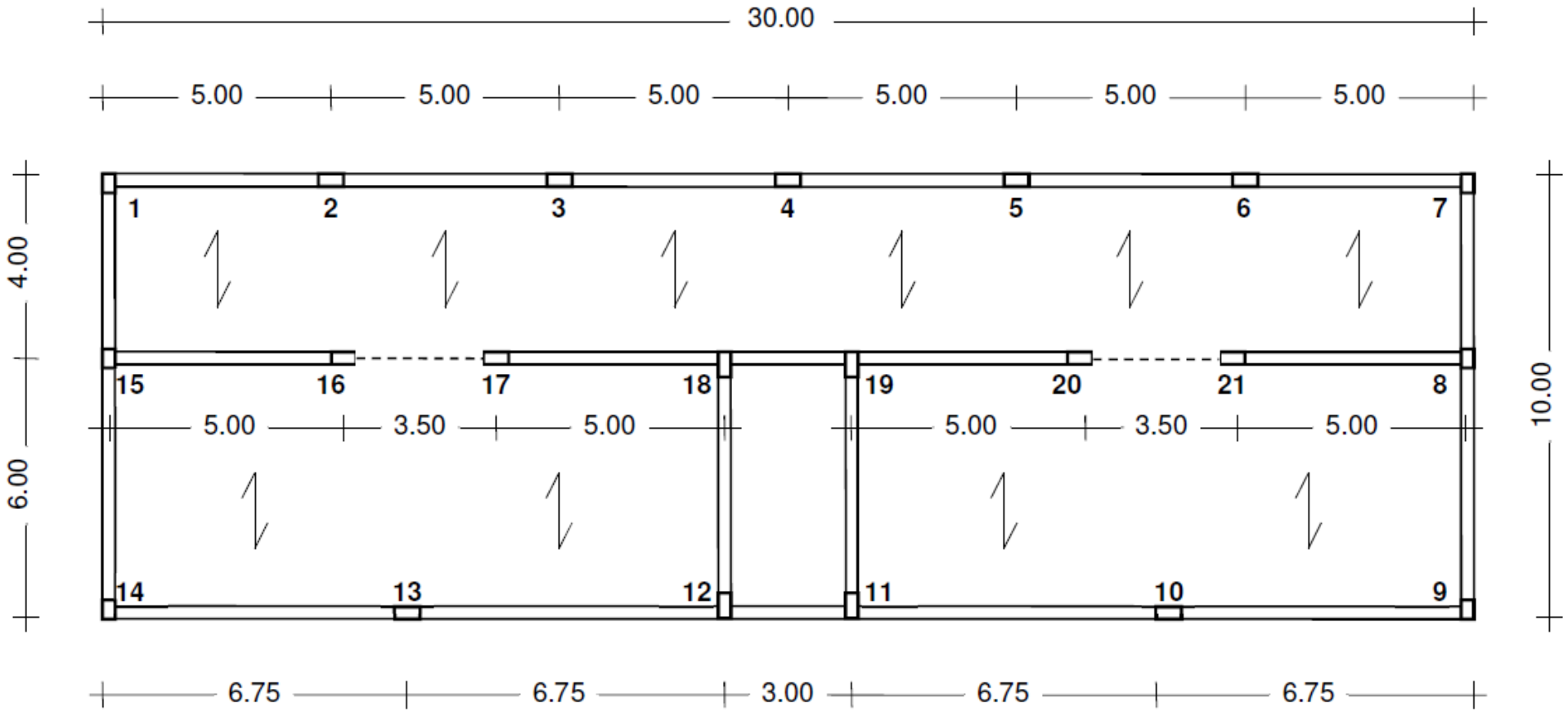


Fig. 5. Carpenteria del piano tipo

Valutazione qualitativa

Pro:

- Staffe nei pilastri non particolarmente carenti

Contro:

- La direzione y è molto debole, perché vi sono solo i telai perimetrali e (parzialmente) quelli della scala
- Le tamponature possono dare un aiuto ma possono anche portare a concentrazione di sollecitazioni, specie in direzione y
- Le abitudini costruttive dell'epoca hanno portato a pilastri deboli rispetto alle travi
- La scala è con soletta rampante, con trave a quota intermedia che porta ad incrementi locali di sollecitazione

Resistenza, rigidezza, duttilità

Analisi strutturale

in generale e specificamente per edificio in c.a.

Per effettuare qualsiasi tipo di analisi occorre definire i parametri fondamentali:

- Resistenza
  - Parametro meccanico che indica il valore massimo della tensione dei materiali costruttivi, da cui dipende il massimo valore delle caratteristiche di sollecitazioni sopportabili
- Rigidezza
  - Parametro legato alle caratteristiche geometriche della sezione ed elastiche del materiale, da cui dipende il rapporto tra azioni e componenti di movimento
- Duttilità
  - capacità deformativa di una sezione o di un'asta oltre il limite elastico

Valori della resistenza

per nuove costruzioni

- Valore di riferimento:
  il valore caratteristico f_k (frattile 5%, cioè valore al di sotto del quale si scende solo nel 5% dei casi)
  - Oltre alle incertezze sulla variabilità intrinseca della resistenza intervengono quelle relative alla effettiva rispondenza tra progetto ed esecuzione

- Valore di calcolo:
  per garantire con adeguata sicurezza che la sollecitazione non superi la resistenza di una singola sezione, si usa il valore corrispondente a un frattile più basso $f_d = f_k / \gamma_M$

- Valore medio:
  viene citato solo in rari casi

Valori della resistenza

per costruzioni esistenti

- Il riferimento base sono “le proprietà dei materiali esistenti” (NTC, punto 8.7.2) “valutate sulla base delle indagini e delle prove effettuate sulla struttura, tenendo motivatamente conto dell’entità delle dispersioni” (NTC, punto 8.5.3)
- L’Eurocodice 8 (EC8-3, punto 2.2.1) cita esplicitamente il valore medio f_m

- Nella verifica di capacità degli elementi si deve dividere il valore medio f_m per un fattore di confidenza FC; nella verifica di capacità degli elementi fragili questo valore deve essere ulteriormente diviso per il coefficiente di sicurezza parziale del materiale (NTC, punto 8.7.2, EC8-3, punto 2.2.1)

Valori della resistenza

per costruzioni esistenti

- Valore medio
  da usare per la valutazione del comportamento non lineare globale di una struttura f_m

  – Numerose ricerche mostrano che, nonostante la possibile dispersione delle resistenze, il comportamento globale (la distribuzione globale delle sollecitazioni) non è influenzato da questa dispersione
  – Quindi nel valutare la resistenza a flessione delle sezioni nelle analisi non lineari si usa il valore medio sperimentale f_m senza alcuna riduzione

Eurocodice 8 parte 3

prospetto 4.3 **Valori delle proprietà dei materiali e criteri di analisi e di verifica della sicurezza**

		Modello Lineare (LM)		Modello non lineare		Approccio con il fattore q	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo 8e/m)	Duttile	Accettabilità del modello lineare (per la verifica dei valori $\rho_i = D_i/C_i$):		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.	Dall'analisi.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.
		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.				
		Ispezioni (se LM è accettato):					
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.				
	Fragile	Verifiche (se LM è accettato):			In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.	In conformità alla sezione pertinente della EN 1998-1:2004.	
		Se $\rho_i \leq 1$: dall'analisi.					
		Se $\rho_i > 1$: dall'equilibrio con la resistenza di e/m duttili. Si usano i valori medi delle proprietà moltiplicati per CF.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.				

Valori della resistenza

per costruzioni esistenti

- Valore medio
  da usare per la valutazione del comportamento non lineare globale di una struttura f_m
- Valore di riferimento
  da considerare come corrispondente al valore caratteristico (frattile 5%) usato nelle comuni verifiche $\frac{f_m}{FC}$
  - Nella valutazione della capacità deformativa delle aste occorrerebbe usare un frattile molto basso, ma le formule tengono già conto della dispersione dei valori mediante un coefficiente γel
    - Nelle analisi non lineari
    - Nelle analisi lineari con spettro elastico e calcolo dei ρ
  - Si usa quindi il medio sperimentale f_m diviso per il fattore di confidenza FC

Eurocodice 8 parte 3

prospetto 4.3 **Valori delle proprietà dei materiali e criteri di analisi e di verifica della sicurezza**

		Modello Lineare (LM)		Modello non lineare		Approccio con il fattore q	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo 8e/m)	Duttile	Accettabilità del modello lineare (per la verifica dei valori $\rho_i = D_i/C_i$):		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.	Dall'analisi.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.
		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.				
		Ispezioni (se LM è accettato):					
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.				
	Fragile	Verifiche (se LM è accettato):			In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.	In conformità alla sezione pertinente della EN 1998-1:2004.	
		Se $\rho_i \leq 1$: dall'analisi.					
		Se $\rho_i > 1$: dall'equilibrio con la resistenza di e/m duttili. Si usano i valori medi delle proprietà moltiplicati per CF.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.				

Valori della resistenza

per costruzioni esistenti

- Valore medio
  da usare per la valutazione del comportamento non lineare globale di una struttura

$$f_m$$

- Valore di riferimento
  da considerare come corrispondente al valore caratteristico (frattile 5%) usato nelle comuni verifiche

$$\frac{f_m}{FC}$$

- Valore incrementato
  da considerare come corrispondente al valore caratteristico superiore (frattile 95%) usato in alcune verifiche
  - valore medio sperimentale f_m moltiplicato per il fattore di confidenza FC

$$f_m \times FC$$

Eurocodice 8 parte 3

prospetto 4.3 **Valori delle proprietà dei materiali e criteri di analisi e di verifica della sicurezza**

		Modello Lineare (LM)		Modello non lineare		Approccio con il fattore q	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo 8e/m)	Duttile	Accettabilità del modello lineare (per la verifica dei valori $\rho_i = D_i/C_i$):		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.	Dall'analisi.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.
		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.				
		Ispezioni (se LM è accettato):					
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.				
	Fragile	Verifiche (se LM è accettato):			In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.	In conformità alla sezione pertinente della EN 1998-1:2004.	
		Se $\rho_i \leq 1$: dall'analisi.					
		Se $\rho_i > 1$: dall'equilibrio con la resistenza di e/m duttili. Si usano i valori medi delle proprietà moltiplicati per CF.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.				

Valori della resistenza

per costruzioni esistenti

- Valore medio
  da usare per la valutazione del comportamento non lineare globale di una struttura f_m
- Valore di riferimento
  da considerare come corrispondente al valore caratteristico (frattile 5%) usato nelle comuni verifiche $\frac{f_m}{FC}$
- Valore incrementato
  da considerare come corrispondente al valore caratteristico superiore (frattile 95%) usato in alcune verifiche $f_m \times FC$
- Valore di calcolo
  per garantire con adeguata sicurezza che la sollecitazione non superi la resistenza di una sezione $\frac{f_m}{FC\,\gamma_m}$
  - valore di riferimento diviso per il coefficiente parziale di sicurezza γ_m

Eurocodice 8 parte 3

prospetto 4.3 **Valori delle proprietà dei materiali e criteri di analisi e di verifica della sicurezza**

		Modello Lineare (LM)		Modello non lineare		Approccio con il fattore q	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo 8e/m)	Duttile	Accettabilità del modello lineare (per la verifica dei valori $\rho_i = D_i/C_i$):		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.	Dall'analisi.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.
		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.				
		Ispezioni (se LM è accettato):					
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.				
	Fragile	Verifiche (se LM è accettato):			In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.	In conformità alla sezione pertinente della EN 1998-1:2004.	
		Se $\rho_i \leq 1$: dall'analisi.					
		Se $\rho_i > 1$: dall'equilibrio con la resistenza di e/m duttili. Si usano i valori medi delle proprietà moltiplicati per CF.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.				

Esempio

valori da usare per la resistenza

- Esempio (edificio analizzato)

  Si è trovato, in base alle prove sperimentali:
  - Per il calcestruzzo f_{cm} = 19 MPa
  - Per l'acciaio f_{ym} = 380 MPa

  e si deciso di usare FC=1.2 per il calcestruzzo e FC=1.05 per l'acciaio

  Il valore di riferimento è:
  - Per il calcestruzzo $f_{c,rif}$ = 19/1.2 = 15.83 MPa
  - Per l'acciaio $f_{y,rif}$ = 380/1.05 = 361.9 MPa

  Quando la maggiore resistenza è penalizzante si usa:
  - Per il calcestruzzo $f_{c,rif}$ = 19x1.2 = 22.8 MPa
  - Per l'acciaio $f_{y,rif}$ = 380x1.05 = 399 MPa

  Nelle verifiche a comportamento "fragile" si usa:
  - Per il calcestruzzo (γ_c=1.5) f_{cd} = 15.83/1.5 = 10.56 MPa
  - Per l'acciaio (γ_s=1.15) f_{yd} = 361.9/1.15 = 314.7 MPa

Rigidezza

di strutture in cemento armato

Nel definire il modello (in genere di telaio spaziale), occorre soffermarsi su due aspetti:

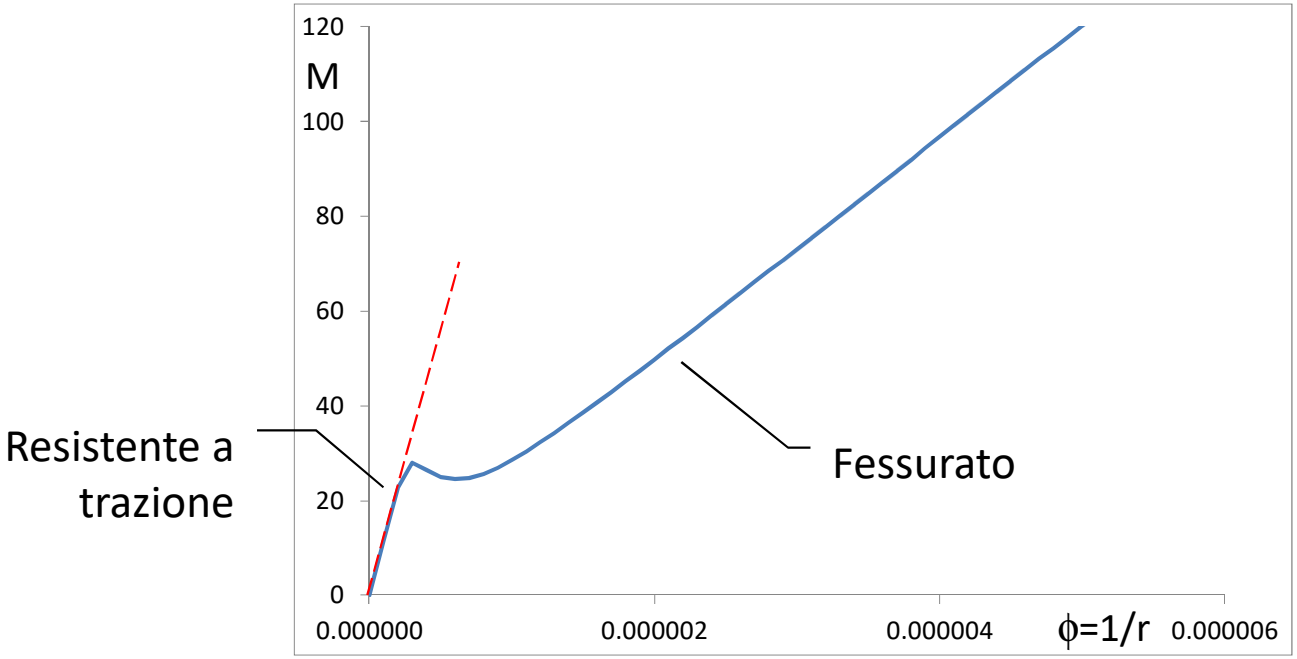
1. Il calcestruzzo ha una bassa resistenza a trazione e quindi si fessura
   - La fessurazione riduce la rigidezza dell'asta, in maniera molto rilevante per gli elementi inflessi (travi) ma anche per gli elementi pressoinflessi (pilastri)
2. I telai in c.a. sono caratterizzati da dimensioni delle sezioni non trascurabili rispetto alla lunghezza delle aste
   - Nel modello si inseriscono tratti rigidi (offset) da nodo a filo pilastro, che aumentano di molto la rigidezza dell'asta

Comportamento delle strutture

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- Non linearità dovuta alla fessurazione, nel caso di travi



Esempio:

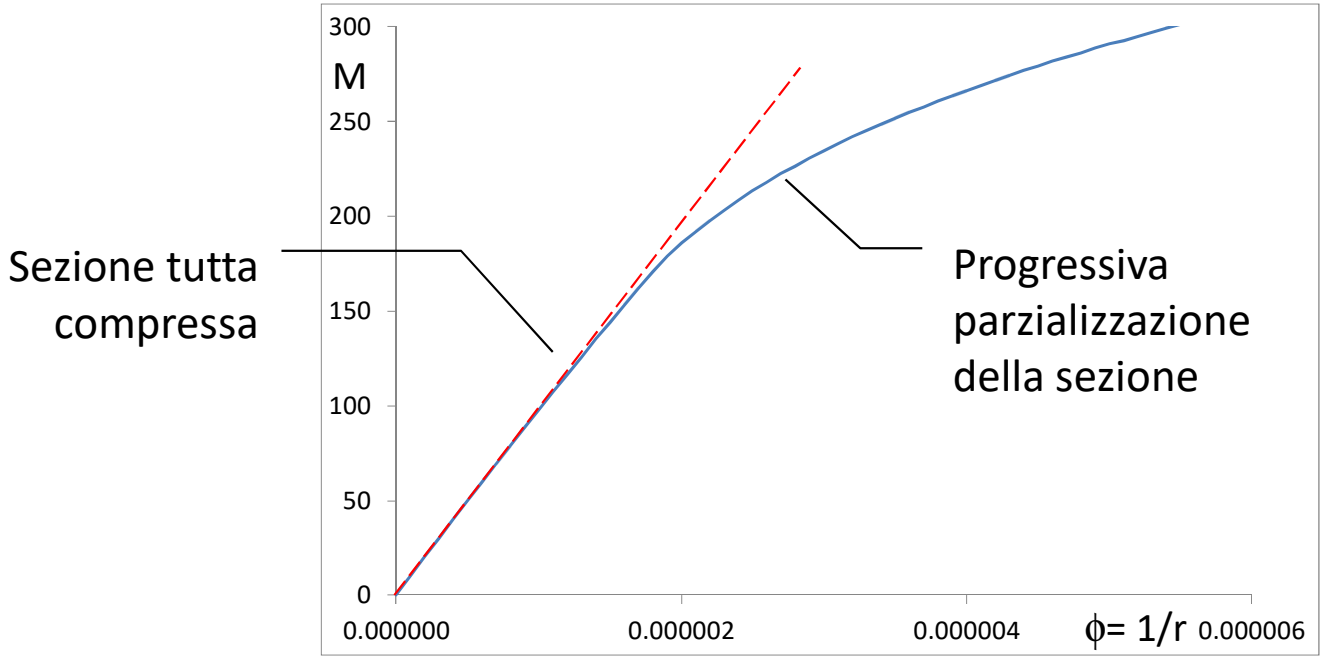
Trave (elemento soggetto solo a flessione)

Comportamento delle strutture

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- Non linearità dovute alla fessurazione, in presenza di variazione non proporzionale di M e N



Esempio:

Pilastro (elemento soggetto a flessione composta) con N costante

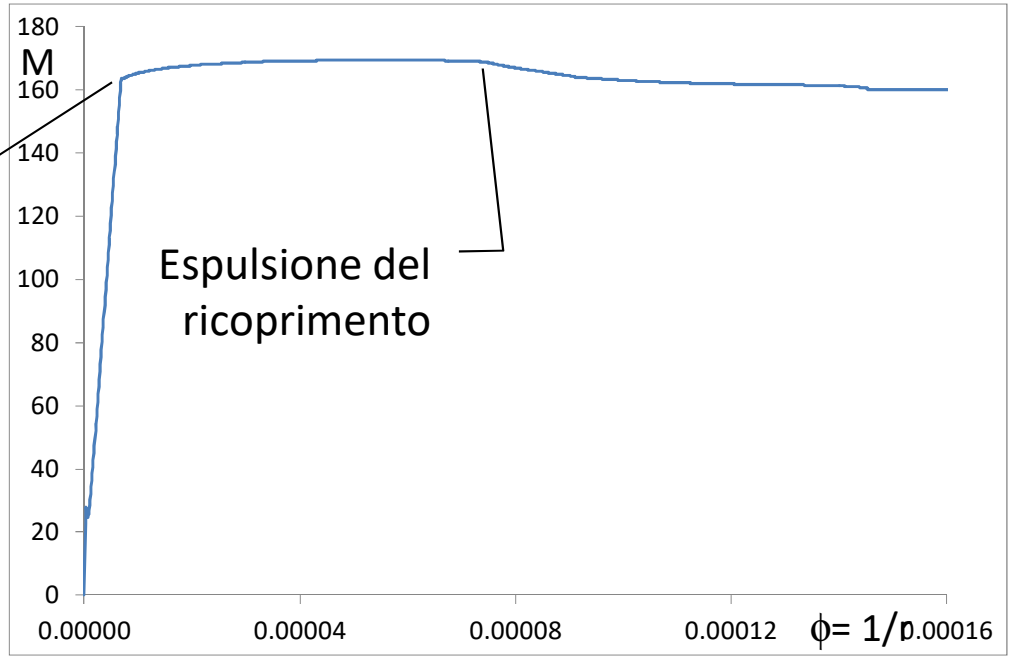
Comportamento delle strutture

In presenza di azioni sismiche crescenti

Strutture in cemento armato

- Non linearità dovute al legame σ-ε per elemento soggetto solo a flessione

Snervamento della armatura tesa



Esempio:

Trave

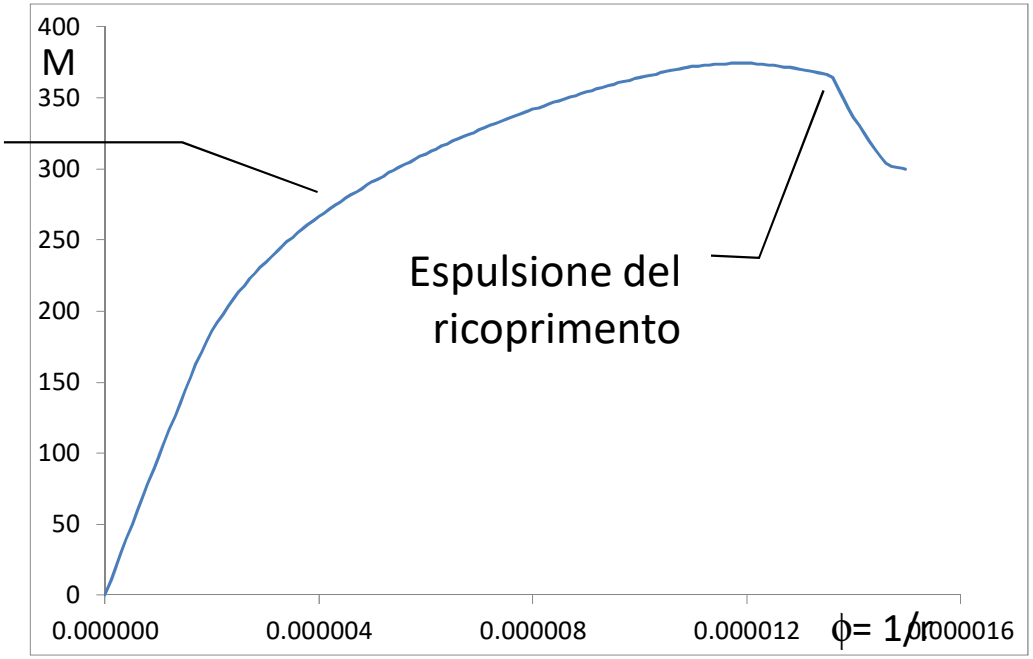
Comportamento delle strutture

In presenza di azioni sismiche crescenti

Strutture in cemento armato

- Non linearità dovute al legame σ-ε
  per elemento soggetto a flessione composta

Progressiva fessurazione della sezione



Esempio:

Pilastro
con N costante

Comportamento delle strutture

in cemento armato

La scelta di usare un modello lineare nel cemento armato è solo una comoda semplificazione

- Per una analisi più corretta occorre tener conto della fessurazione
  - Per le travi si può fare riferimento alla sezione reagente omogeneizzata
  - Per i pilastri occorre tener conto del rapporto M/N, perché da questo dipende l'estensione della zona fessurata
- Ma contemporaneamente occorre tener conto della maggior rigidezza dei tratti nodali

Rigidezza

per tener conto del comportamento non lineare

- Si dovrebbe tener conto della fessurazione e quindi ridurre opportunamente la rigidezza
  - Per le travi è sempre molto minore di quella nominale (cioè riferita alla sezione geometrica)
  - Per i pilastri è spesso minore ma a volte anche maggiore di quella nominale (cioè riferita alla sezione geometrica, senza armature), ma questo dipende molto dal valore di N (oltre che dall'entità dello spostamento)
- Se il modello di calcolo non tiene conto (con offset) dei tratti di incrocio trave-pilastro occorre aumentare la rigidezza
  - La rigidezza varia in funzione del cubo del rapporto tra luce teorica e luce netta

Suggerimento:

usare due schemi limite per testare l'influenza della rigidezza

Duttilità

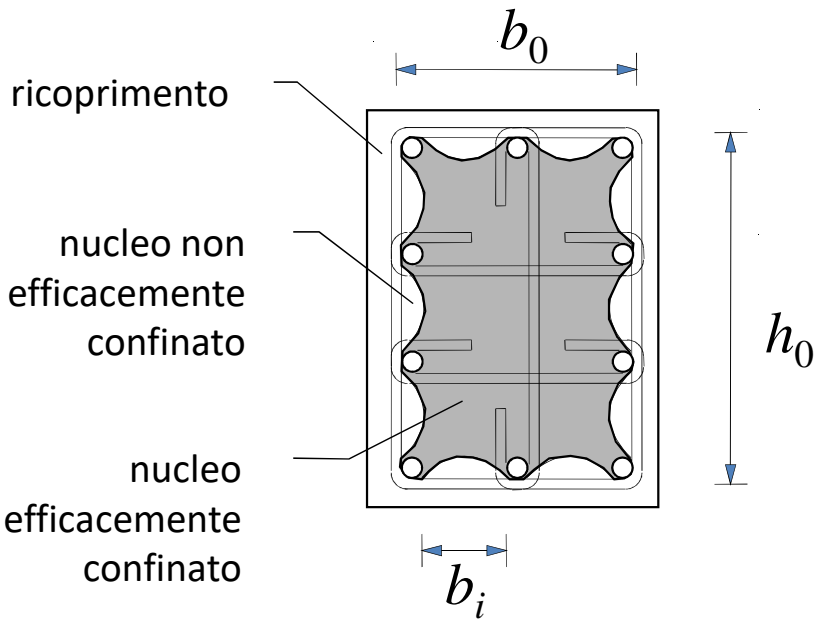
di strutture in cemento armato

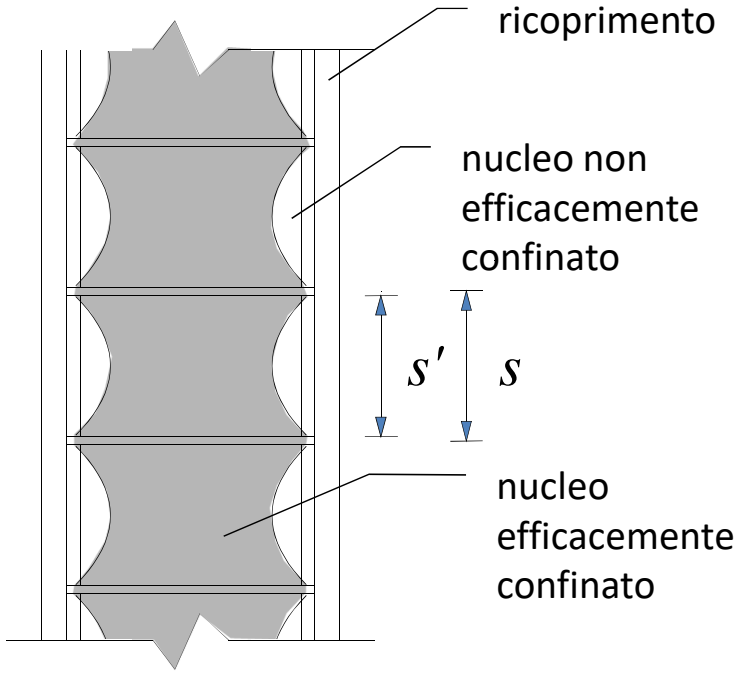
- Duttilità = capacità di deformarsi plasticamente dopo aver raggiunto il limite di resistenza

Occorre tener conto dell'effetto di confinamento dato dalle staffe

Problemi:

- Distinzione tra ricoprimento e nucleo confinato
- Valutazione dell'effetto del confinamento
- Efficacia del confinamento





Duttilità

di strutture in cemento armato

- Duttilità = capacità di deformarsi plasticamente dopo aver raggiunto il limite di resistenza

Occorre tener conto dell'effetto di confinamento dato dalle staffe

Problemi:

- Distinzione tra ricoprimento e nucleo confinato
- Valutazione dell'effetto del confinamento
- Efficacia del confinamento

La tensione di compressione trasversale da confinamento vale:

$$\sigma_{c,trasv} = 0.5\,\alpha\,\omega_{st}\,f_c$$

con $\alpha = \alpha_s\,\alpha_n$ $\quad \alpha_s = \left(1 - \frac{s'}{3\,b_0}\right)\left(1 - \frac{s'}{3\,h_0}\right)$ $\quad \alpha_n = 1 - \sum_n \frac{b_i^2}{6\,b_0\,h_0}$

$$\omega_{st} = \frac{\sum A_{st}\,l_{st}}{b_0\,h_0\,s}\,\frac{f_y}{f_c}$$

Comportamento della sezione

valutato mediante modelli a fibre

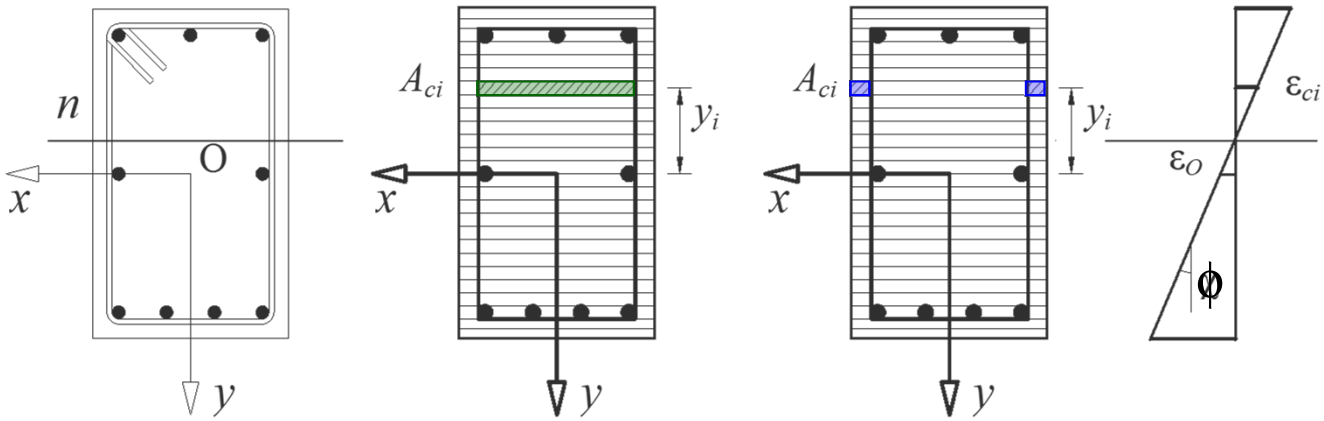
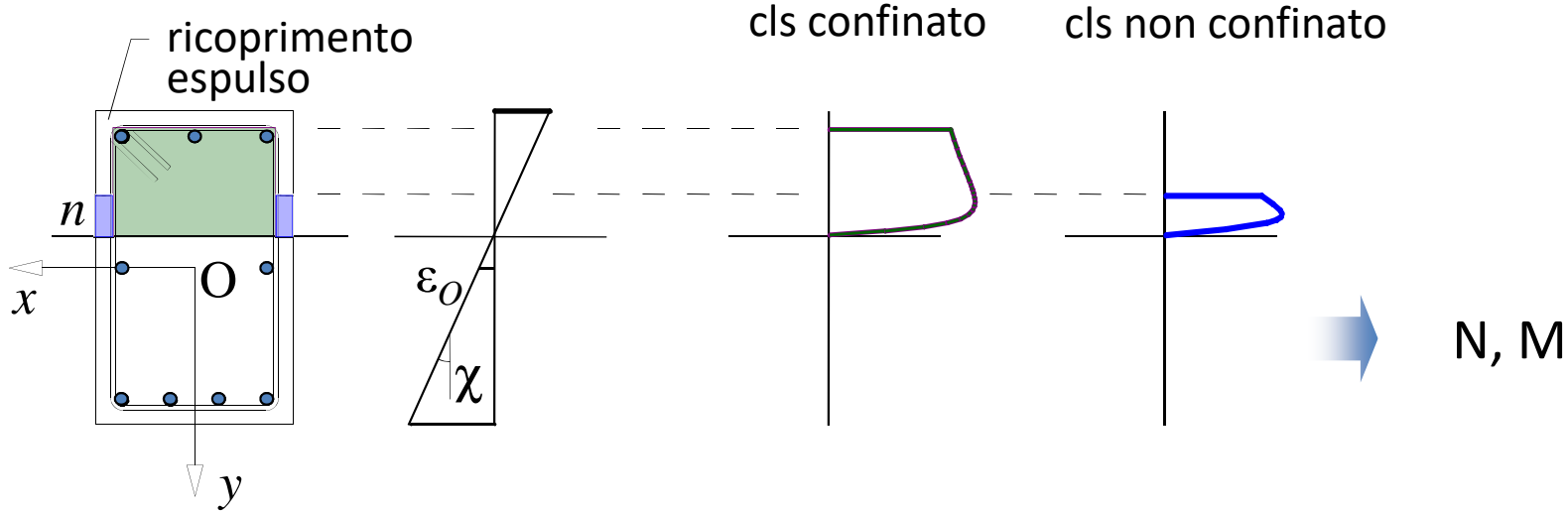


diagramma ε

diagramma σ
cls confinato

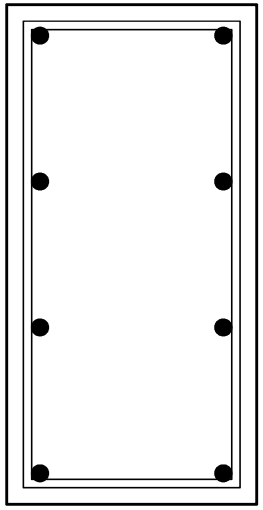
diagramma σ
cls non confinato



Esempio

Legame momento-curvatura

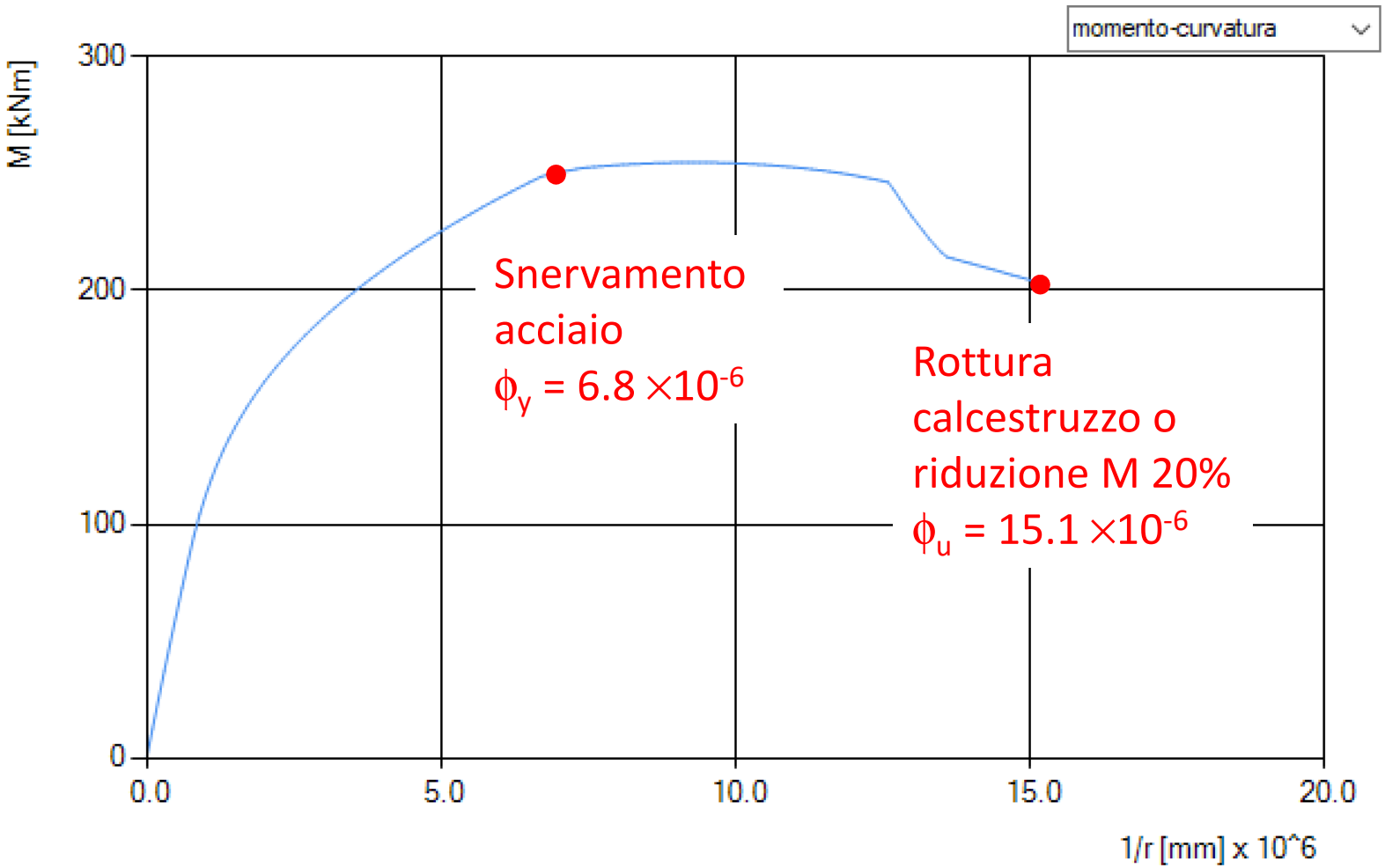
- Immaginiamo di avere un pilastro, di sezione 30×60, armato con 8 ∅14 e staffe ∅8/20
  - Si ha ρ_{st} = 0.00343
  - Coefficiente di efficacia assunto α=0.5



- Materiali:
  - Calcestruzzo f_{cm} = 18 MPa FC = 1.2
    f_{cm} /FC = 15 MPa
  - Acciaio f_{ym} = 380 MPa FC = 1.05
    f_{ym} /FC = 361.9 MPa
  - Si ha $\alpha\ \omega_{st}$ = 0.0413

Esempio

Legame momento-curvatura



- Punti principali di riferimento: ϕ_y e ϕ_u

Legame forza-spostamento di un'asta

mediante modello a fibre

- L'asta viene divisa in conci, per ciascuno dei quali si può determinare il legame momento curvatura
  - Assegnato il diagramma del momento si possono integrare le curvature per ottenere la deformata
- Problemi specifici da affrontare:
  - Propagazione delle tensioni di trazione nell'asta per effetto del taglio
  - Propagazione della deformazione dell'asta nel nodo

Legame forza-spostamento di un'asta

problemi specifici

- Propagazione delle tensioni di trazione nell'asta per effetto del taglio
  - Ricordate la traslazione del diagramma del momento flettente? Considerando una sezione inclinata di θ (pari al flusso delle tensioni di compressione) e scrivendo le condizioni di equilibrio si vede che l'armatura è soggetta ad una trazione pari non al momento che teoricamente agisce in quella sezione ma a un momento che si ha spostandosi di un Δx, funzione di d (altezza utile) e di cot θ
  - Di conseguenza la tensione massima f_y non si ha solo in una sezione ma in un tratto di ampiezza maggiore

Legame forza-spostamento di un'asta

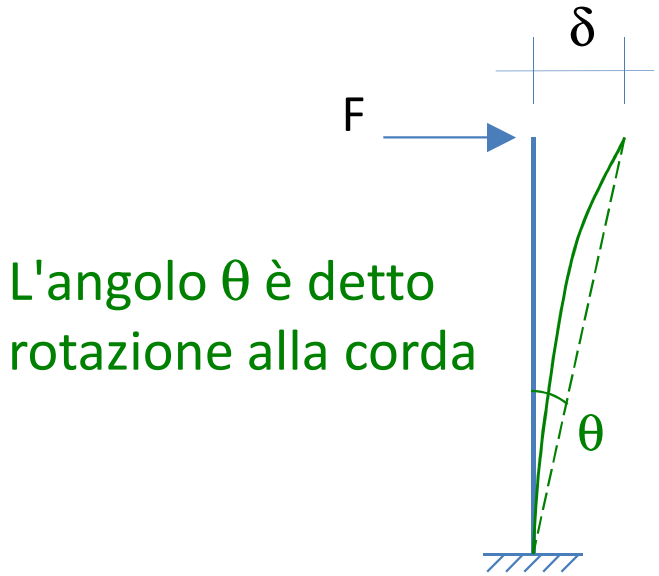
problemi specifici

- Propagazione della deformazione dell'asta nel nodo
  - Nella sezione di incastro ideale le barre di armatura sono soggette a tensione pari a f_y
  - Le barre sono però ancorate nel nodo; nella zona di ancoraggio le tensioni decrescono (grazie alle tensioni di aderenza acciaio-calcestruzzo f_b) fino ad annullarsi
  - Quello che realmente accade dipende da come è fatto e quanto è lungo l'ancoraggio

Capacità deformativa

valutazione sperimentale

- Molta sperimentazione è stata fatta con schemi a mensola (o analoghi a questo)



- Misurare le deformazioni nella zona plasticizzata (per trovare il legame momento-curvatura) è difficile
- È più facile trovare il legame forza-spostamento

Capacità deformativa

nelle verifiche strutturali

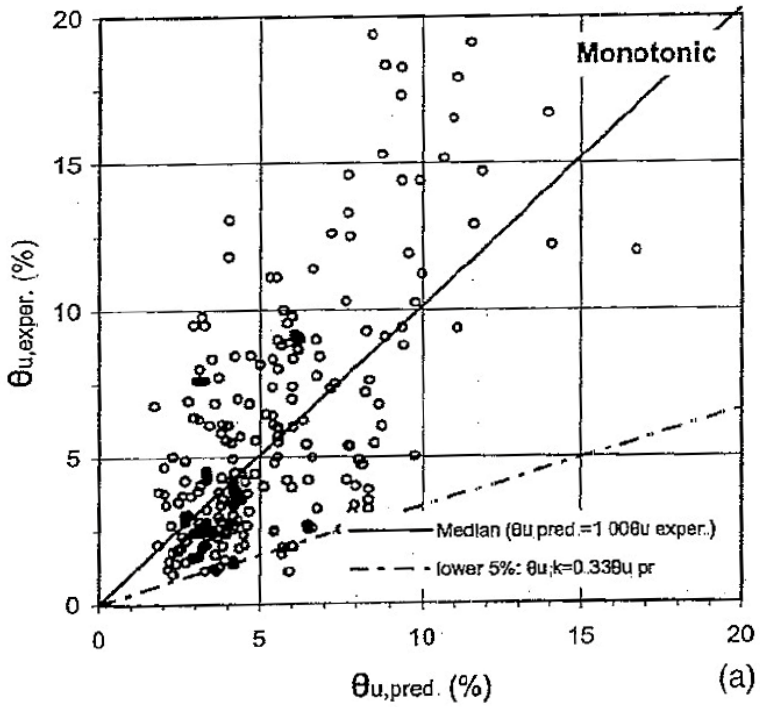
- Nella verifica di una struttura intelaiata si può assumere che il collasso di un pilastro si abbia quando viene raggiunto il valore limite θ_u della rotazione alla corda
- È possibile calcolare la rotazione limite θ_u in vari modi
  1. Con modelli a fibre (come i programmi RC_NL o OpenSees), come nell'esempio precedente
  2. Con una formulazione analitica (Eurocodice 8 parte 3, appendice A, punto A.3.2.2(6); Circolare NTC18, equazione C8.7.2.5)
  3. Con una formulazione ricavata da studi sperimentali di Panagiotakos e Fardis (Eurocodice 8 parte 3, appendice A, punto A.3.2.2(1); Circolare NTC18, equazione C8.7.2.1)

Non c'è tempo per soffermarsi, ma i diversi approcci portano a valori numerici della rotazione limite molto diversi

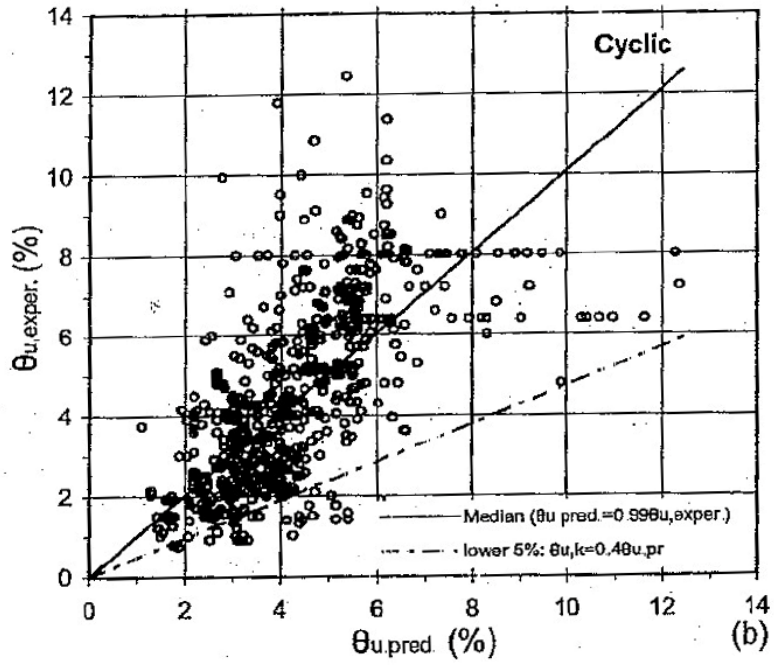
Capacità deformativa nelle verifiche strutturali

Confronto tra dati sperimentali e valori della formula di normativa

prove monotone



prove cicliche



Panagiotakos e Fardis, Deformations of Reinforced Concrete Members at Yielding and Ultimate, ACI Structural Journal, 2001

Analisi lineare

Analisi lineare

In che modo procedere?

Analisi lineare con fattore di comportamento q

- È l'analisi standard per il progetto di nuove costruzioni
  - Richiede verifica di resistenza delle sezioni

  Problema:

  - Quale fattore di comportamento usare se non sono rispettate le prescrizioni che garantiscono un comportamento duttile?

  La normativa suggerisce valori di q compresi tra 1.5 e 3, maggiori solo se ben motivati

  - Dobbiamo definire criteri chiari per scegliere il valore di q

Analisi lineare

In che modo procedere?

Analisi lineare con fattore di comportamento q

- È l'analisi standard per il progetto di nuove costruzioni
  - Richiede verifica di resistenza delle sezioni

  Valore di q suggerito (in linea di massima):
  - q=1.5 per le verifiche fragili (taglio, ecc.)
  - q=1.5 per le verifiche a pressoflessione dei pilastri se le travi sono chiaramente più resistenti dei pilastri
  - q=3 per le verifiche a flessione delle travi e a pressoflessione dei pilastri se le travi sono chiaramente meno resistenti dei pilastri
  - q>3 nel caso di edifici che sono stati ben progettati per il sisma (in particolare con gerarchia delle resistenze)

Analisi lineare

In che modo procedere?

Analisi lineare con fattore di comportamento q

- È l'analisi standard per il progetto di nuove costruzioni
  - Richiede verifica di resistenza delle sezioni

Valore di q suggerito (in linea di massima):

- q=1.5
- q=1.5 e travi sono chiara
- q=3 pe ssione dei pilastr i pilastri
- q>3 ne il sisma (in partic

Non sempre è facile capire a priori se il problema principale è il taglio oppure la flessione e se le travi sono più o meno resistenti dei pilastri
Sarebbe opportuno decidere il valore di q a posteriori (dopo il calcolo)

Analisi lineare

In che modo procedere?

Può essere utile:

- Individuare per ciascuna sezione il valore di a_g (meglio: l'aliquota dell'accelerazione a_g di picco al suolo su roccia prevista nel sito) che porta al raggiungimento del limite di resistenza (lasciando per ora in sospeso q)

Esempio - Indicando con

M_q il momento flettente prodotto dai carichi verticali

$M_{s,q=1}$ il momento flettente prodotto dal sisma (con tutte le combinazioni di carico) per q=1

ρ Il rapporto domanda/capacità
(o meglio il rapporto tra il sisma previsto nel sito e quello che porta al raggiungimento della resistenza della sezione)

Si ha $$M_{Ed} = M_q + \frac{1}{\rho}\frac{M_{s,q=1}}{q} = M_{Rd} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{\rho} = q\frac{M_{Rd} - M_q}{M_{s,q=1}}$$

Analisi lineare

In che modo procedere?

Può essere utile:

- Individuare per ciascuna sezione il valore di a_g (meglio: l'aliquota dell'accelerazione a_g di picco al suolo su roccia prevista nel sito) che porta al raggiungimento del limite di resistenza (lasciando per ora in sospeso q)

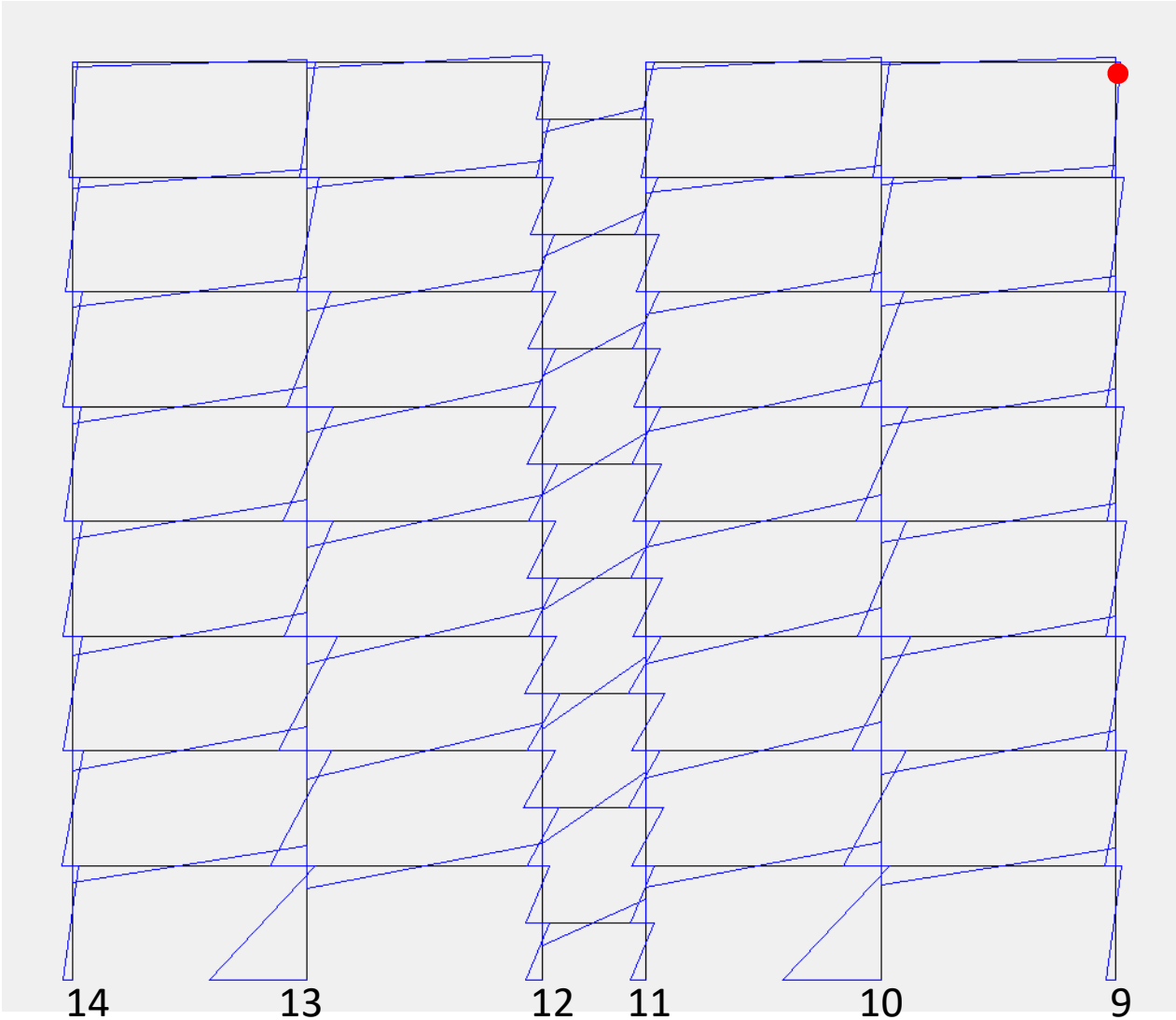
- Determinata per ogni sezione l'aliquota $1/\rho$ di sisma che porta al raggiungimento del limite di resistenza, si può decidere quale valore di q utilizzare e si può immediatamente sapere:
  - Se la struttura con quel valore di q sta bene

  oppure:
  - Quale aliquota di sisma può sopportare la struttura in funzione del valore di q scelto

Procedimento da seguire

esempio

- Telaio 1 x (in basso in pianta)



Per questa sezione è

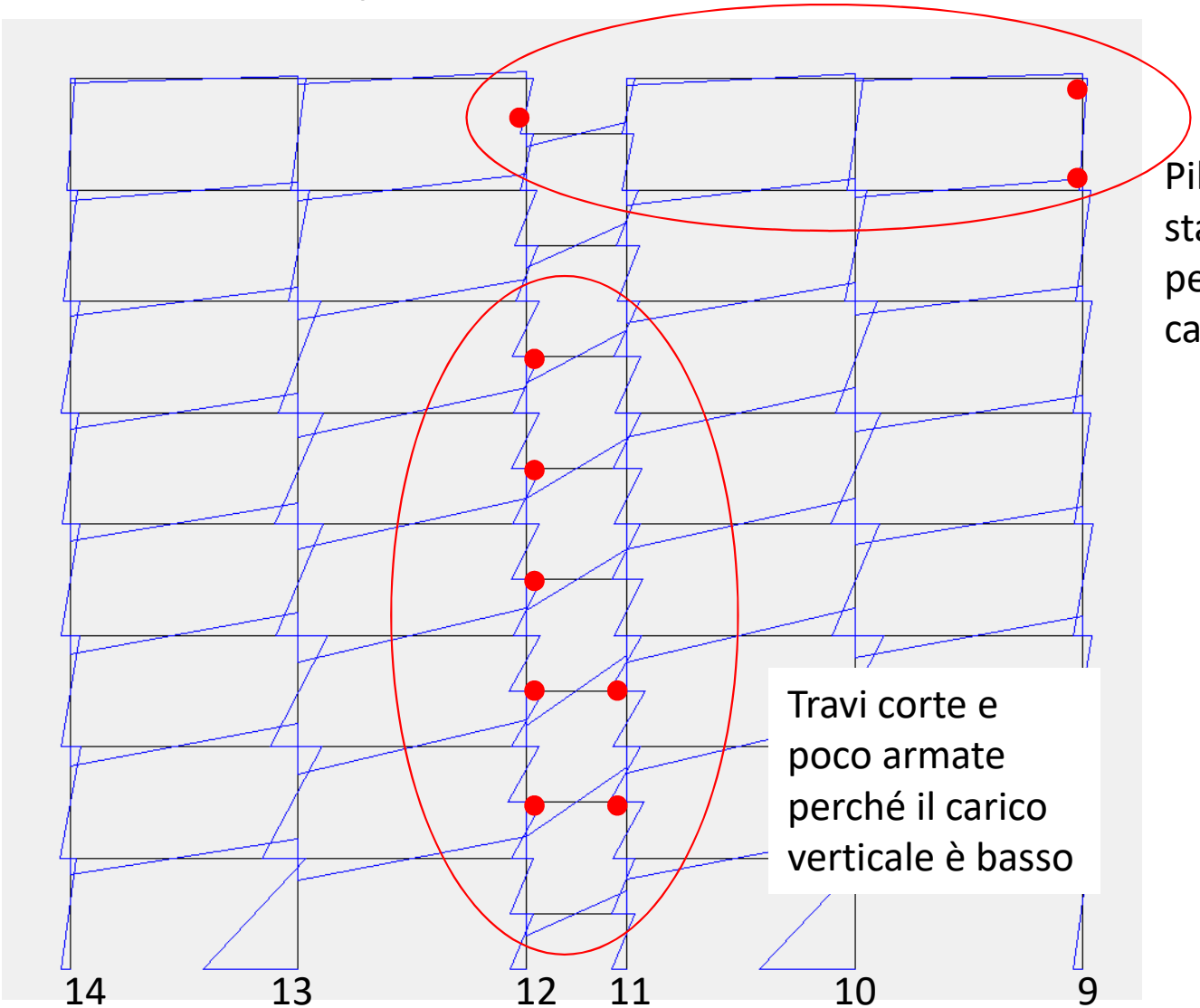
$$\frac{1}{\rho} = 0.028\, q$$

Niente di strano, è una sezione che sta male già per carichi verticali

Procedimento da seguire

valori di 1/ρ inferiori a 0.1 q

- Telaio 1 x (in basso in pianta)



Pilastri, che stanno male già per effetto di carichi verticali

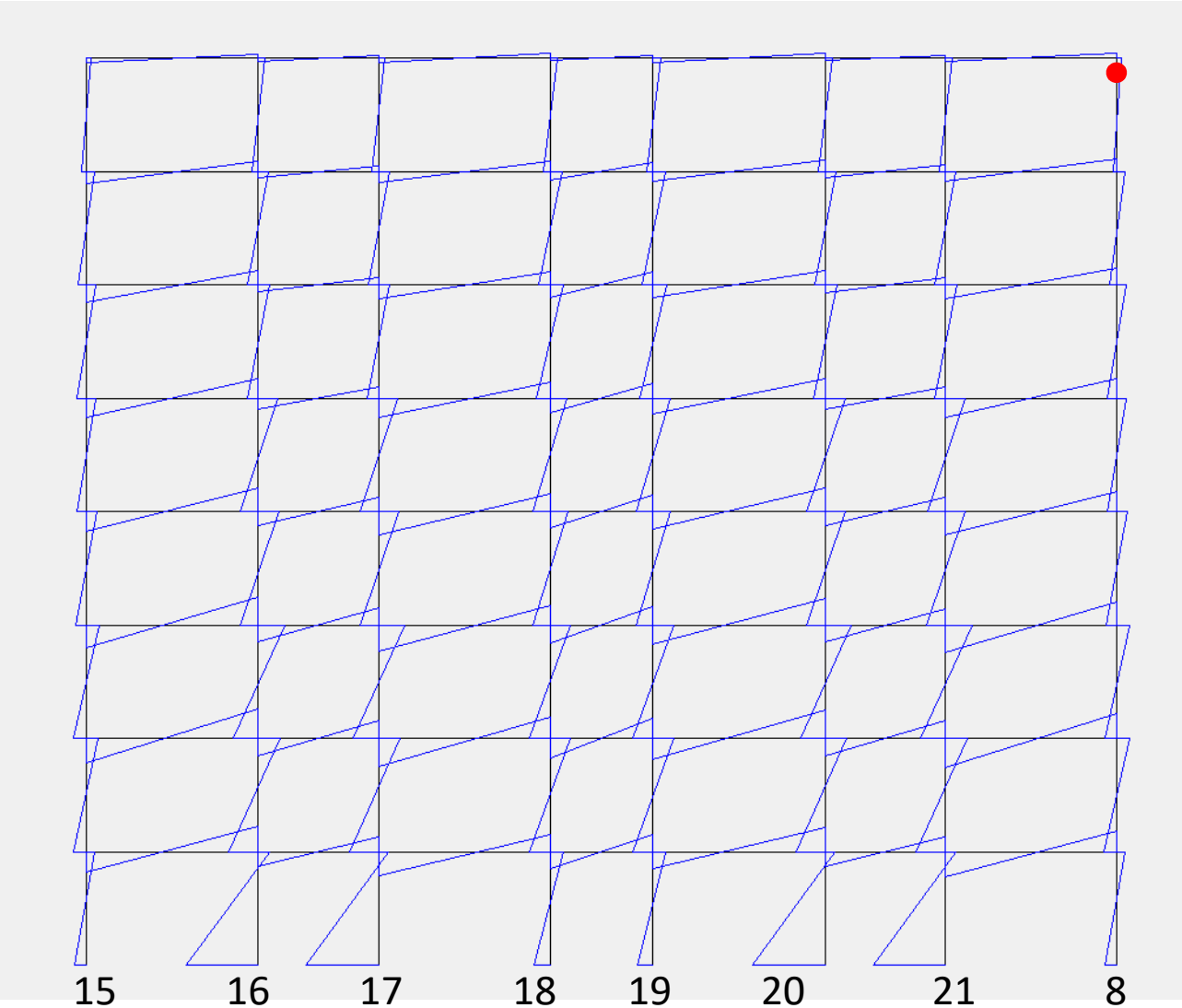
Travi corte e poco armate perché il carico verticale è basso

Nessun problema col taglio

Procedimento da seguire

valori di 1/ρ inferiori a 0.1 q

- Telaio 2 x (di spina)

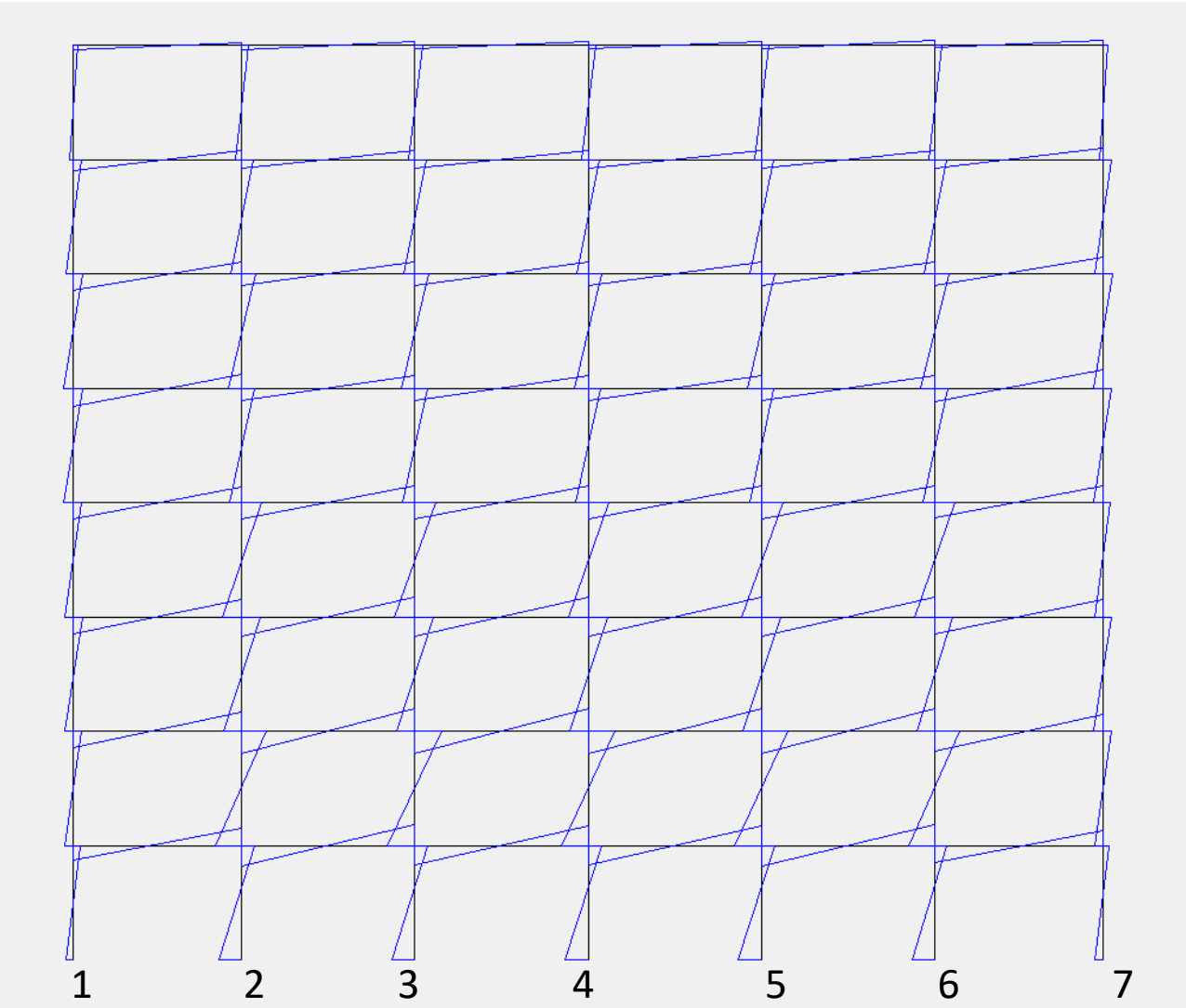


Solo un pilastro, male già per effetto di carichi verticali

Procedimento da seguire

valori di 1/ρ inferiori a 0.1 q

- Telaio 3 x (in alto in pianta)



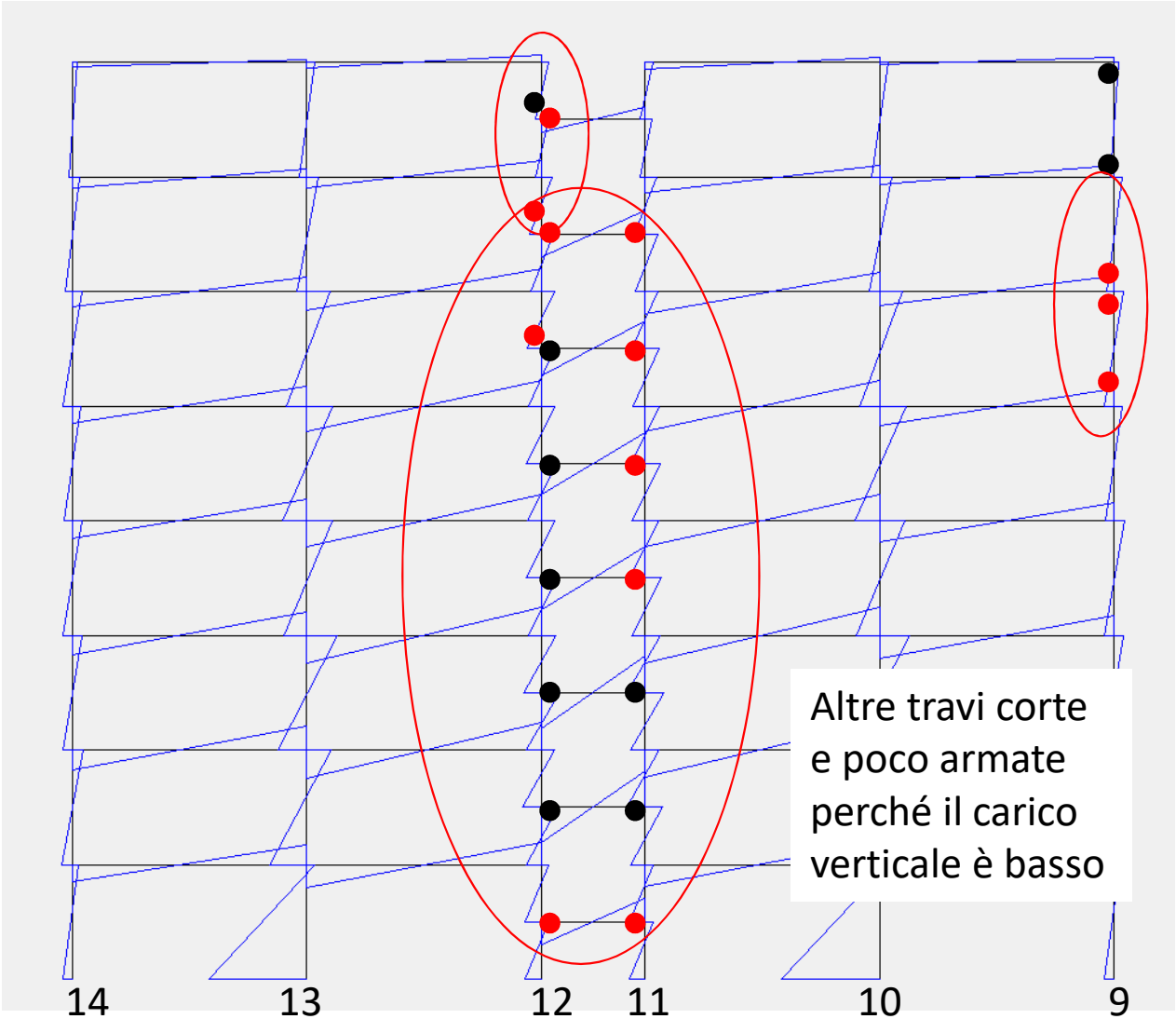
Nessuna sezione

Procedimento da seguire

valori di 1/ρ inferiori a 0.2 q

- Telaio 1 x (in basso in pianta)

- < 0.1 q
- 0.1÷0.2 q



Ulteriori pilastri, con N basso o corti

Altre travi corte e poco armate perché il carico verticale è basso

Ancora nessun problema col taglio

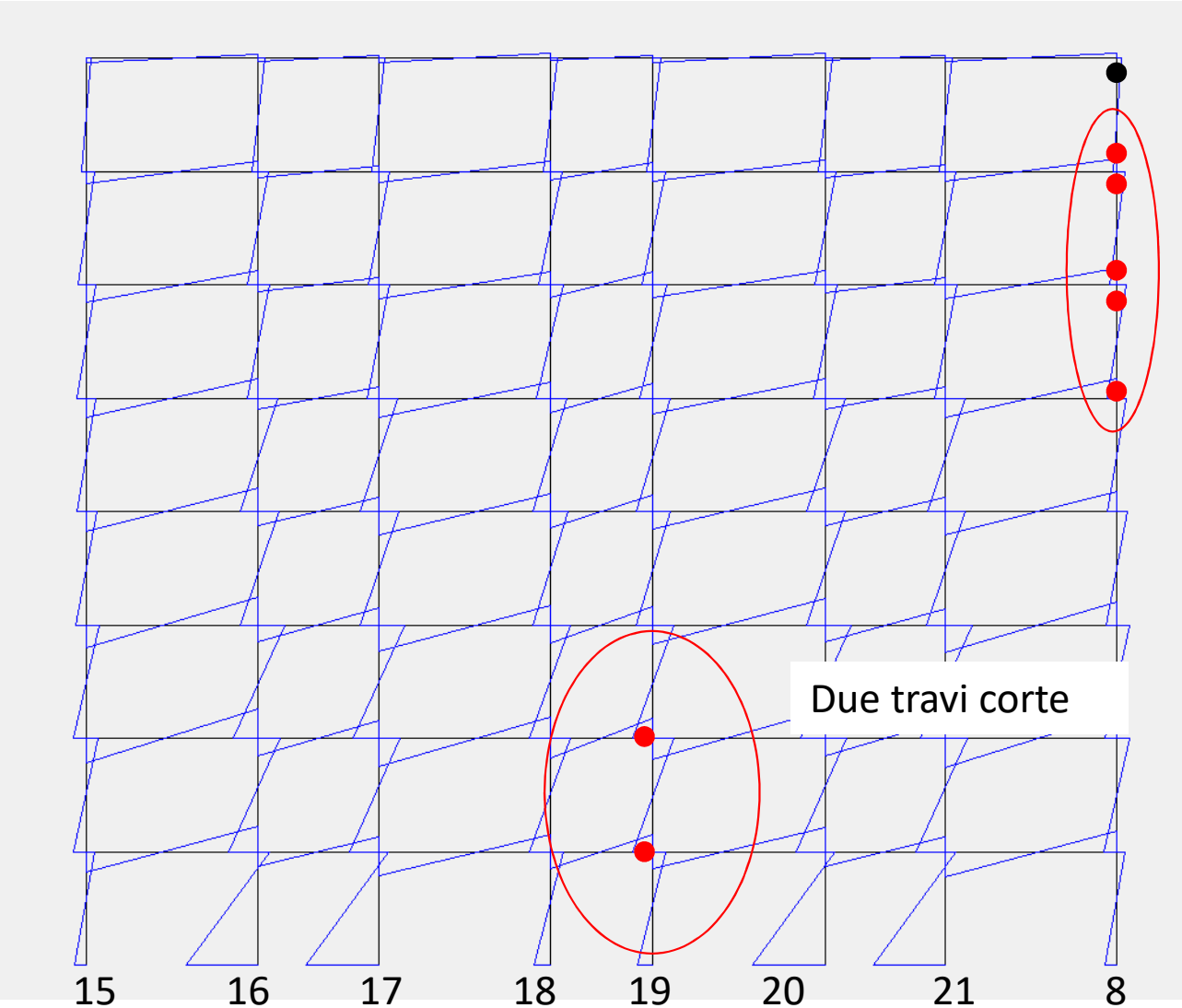
Procedimento da seguire

valori di 1/ρ inferiori a 0.2 q

- Telaio 2 x (di spina)

● < 0.1 q

● 0.1÷0.2 q



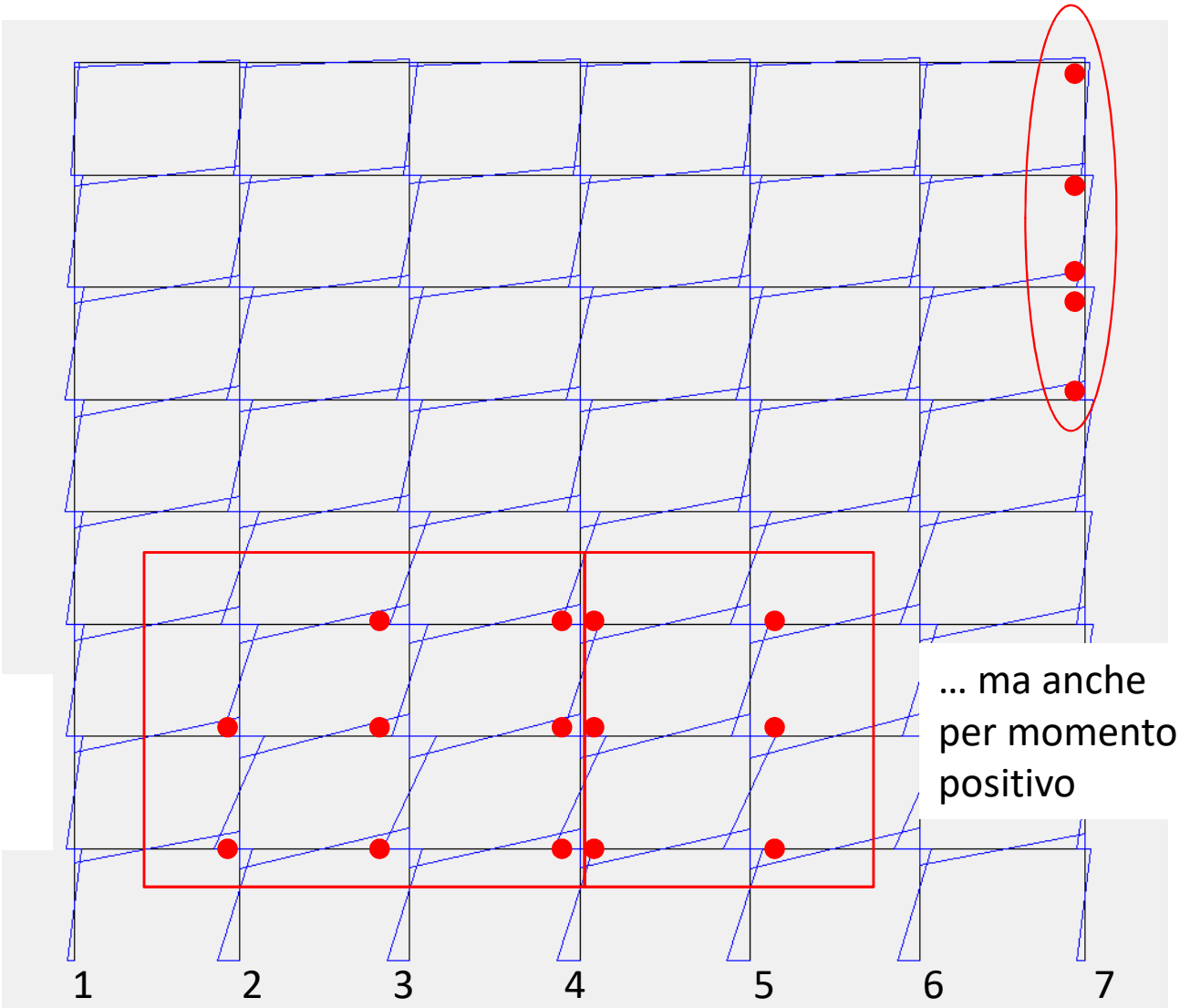
Procedimento da seguire

valori di 1/ρ inferiori a 0.2 q

- Telaio 3 x (in alto in pianta)

● < 0.1 q

● 0.1÷0.2 q



Pilastri, con N basso

Travi per momento negativo

… ma anche per momento positivo

Quale conclusione?

Per la direzione x - taglio

- Controllare innanzitutto il raggiungimento dei limiti di resistenza a taglio (soprattutto per i pilastri)
- In questo caso le staffe nei pilastri sono adeguate (∅8/20) ed il limite viene raggiunto per valori di $1/\rho$ pari a circa 0.24 q

- Per il raggiungimento del limite a taglio considerare un fattore di comportamento q=1.5
- La capacità della struttura nei confronti del taglio potrebbe essere $0.24 \times q = 0.36$ dell'azione sismica prevista

Nota: il massimo taglio che si può avere in un pilastro è $\frac{2\,M_{Rd}}{L}$

con M_{Rd} calcolato con resistenze maggiorate

È possibile controllare se certe sezioni non possono mai raggiungere il limite perché V_{Rd} è maggiore di questo valore

Quale conclusione?

Per la direzione x - flessione

- Parecchie travi raggiungono presto i limiti di resistenza; prima quelle corte ma presto anche quelle più lunghe
  - Se le armature disposte garantiscono duttilità, le travi non rappresentano un limite da considerare
  - È bene che siano prima le travi a raggiungere il limite prima dei pilastri
- I pilastri che stanno male sono tutti pilastri ai piani superiori, nei quali il problema principale è il momento flettente da carichi verticali, accoppiato ad uno sforzo normale basso
  - Queste sezioni potrebbero essere trascurate
  - Per valori di $1/\rho$ pari a circa 0.21 q cominciano ad arrivare al limite altri pilastri; questo può essere considerato il primo limite per i pilastri

Quale conclusione?

Per la direzione x - flessione

- Controllare che le travi non abbiano problema di duttilità
  - armature a rischio sfilamento per carenza di ancoraggio
  - armatura compressa fortemente carente
- Se le travi sono duttili, non le considero

- Escludere i pilastri che stanno male per M da carichi verticali e N basso (ultimi piani)
- I primi pilastri che considero critici raggiungono il limite per $1/\rho$ pari a circa 0.21 q

- Poiché sono molte le travi che raggiungono il limite prima dei pilastri posso considerare q=3
- La capacità della struttura nei confronti della flessione potrebbe essere $0.21 \times q = 0.63$ dell'azione sismica prevista

Quale conclusione?

Per la direzione y (non mostrata con figure)

- Il limite a taglio è raggiunto per $1/\rho = 0.38\ q$
- Per il raggiungimento del limite a taglio considero un fattore di comportamento $q=1.5$
- La capacità della struttura nei confronti del taglio potrebbe essere $0.38 \times q = 0.51$ dell'azione sismica prevista

- Il limite a flessione nei pilastri è raggiunto per $1/\rho = 0.13\ q$
- Per il raggiungimento del limite a flessione considero un fattore di comportamento $q=3$
- La capacità della struttura nei confronti della flessione potrebbe essere $0.13 \times q = 0.39$ dell'azione sismica prevista

Quale conclusione?

Complessivamente

- La direzione x è più resistente flessionalmente e potrebbe sopportare un'azione sismica maggiore.
  Potrebbe però essere più vulnerabile a taglio
- La direzione y è meno resistente flessionalmente ma sembra avere minori problemi a taglio
- Nel complesso, la struttura potrebbe sopportare il 36% dell'azione sismica, cioè $a_g = 0.36 \times 0.261 = 0.094$ g

Analisi non lineare

Verifica di strutture esistenti

con analisi statica non lineare

Fasi del procedimento

1. Definizione del modello della struttura
2. Analisi pushover (valutazione del comportamento sotto forze crescenti)
3. Associazione di una qualsiasi fase della pushover ad un valore dell'accelerazione sismica
4. Giudizio sul comportamento della struttura in una qualsiasi fase della pushover (e quindi per un valore dell'accelerazione sismica)

Ma, insieme e al di sopra di questo

- Tutte le incertezze citate

Modellazione strutturale

per tener conto del comportamento non lineare

Si possono usare due modelli differenti:

- Modelli a plasticità concentrata
  - Sono i modelli usati normalmente nell'attività professionale
  - Relativamente semplici, l'uso richiede comunque una certa esperienza
- Modelli a plasticità diffusa
  - Sono i modelli più usati a livello di ricerca
  - Molto potenti ma molto pesanti nel calcolo, possono presentare problemi

Modellazione strutturale

in analisi non lineari – plasticità concentrata

- Modelli a plasticità concentrata
  - Si valuta il comportamento della sezione (legame momento-curvatura)
  - Si schematizza il legame con un andamento elastico-perfettamente plastico
  - Quando si raggiunge il momento di plasticizzazione la sezione può ruotare liberamente, come se ci fosse una cerniera
    Quindi si incrementa progressivamente il carico, variando via via lo schema con formazione di cerniere
- Programmi che usano modelli a plasticità concentrata
  - La maggior parte dei programmi commerciali
  - È possibile usare il programma Tel 2016 (www.aghersi.it)

Modellazione strutturale

in analisi non lineari – plasticità diffusa

- Modelli a plasticità diffusa
  - Ogni asta è divisa in conci
  - Ciascun concio è descritto con un modello a fibre, con comportamento non lineare (analogo a quanto visto come legame momento-curvatura)
  - Nel progredire dell'analisi al crescere della deformazione varia la rigidezza e variano in maniera non lineare caratteristiche di sollecitazione e deformazioni

- Programmi che usano modelli a plasticità diffusa
  - A livello di ricerca si usa principalmente OpenSees
  - Ora presente anche in qualche programma commerciale

Modellazione strutturale

in analisi non lineari – plasticità diffusa

- Il modello tiene automaticamente conto della variazione progressiva della rigidezza al variare dei carichi
- È necessario che tutta l'asta sia modellata come elemento a plasticità diffusa
  - A volte per ridurre l'onere computazionale si considera a plasticità diffusa solo i tratti di estremità, ma questo vanifica in parte l'esattezza (rimane l'incertezza della rigidezza del tratto centrale)
- È necessario tener conto della maggior rigidezza dei tratti nodali
  - Non inserire tratti rigidi in corrispondenza dei nodi falsa il risultato

Modellazione strutturale

Quale resistenza?

- Sia nei modelli a plasticità concentrata che in quelli a plasticità diffusa occorre indicare quale resistenza usare rispettivamente negli estremi di aste o nei conci che si devono plasticizzare

Eurocodice 8-3
Prospetto 4.3

		Modello Lineare (LM)		Modello non lineare		Approccio con il fattore q	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo 8e/m)	Duttile	Accettabilità del modello lineare (per la verifica dei valori $\rho_i = D_i/C_i$):		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.	Dall'analisi.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.
		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.				
		Ispezioni (se LM è accettato):					
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.				
	Fragile	Verifiche (se LM è accettato):			In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.	In conformità alla sezione pertinente della EN 1998-1:2004.	
		Se $\rho_i \leq 1$: dall'analisi.					
		Se $\rho_i > 1$: dall'equilibrio con la resistenza di e/m duttili. Si usano i valori medi delle proprietà moltiplicati per CF.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.				

EC8-3
Si devono usare i valori medi

Modellazione strutturale

Quale resistenza?

- Sia nei modelli a plasticità concentrata che in quelli a plasticità diffusa occorre indicare quale resistenza usare rispettivamente negli estremi di aste o nei conci che si devono plasticizzare

Eurocodice 8-3
Prospetto 4.3

		Modello Lineare (LM)		Modello non lineare		Approccio con il fattore q	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo 8e/m)	Duttile	Accettabilità del modello lineare (per la verifica dei valori $\rho_i = D_i/C_i$):		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.	Dall'analisi.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.
		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.				
		Ispezioni (se LM è accettato):					
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.				
		Verifiche (se LM è accettato): Se $\rho_i \leq 1$: dall'analisi.			In termini di resistenza. Si usano i valori	In conformità alla	
			In termini di				

Ribadito da Circolare 2019, punto C8.7.2.2.3

Le sollecitazioni indotte dall'azione sismica sugli elementi/meccanismi sia duttili sia fragili, da utilizzare ai fini delle verifiche, sono quelle derivanti dall'analisi strutturale eseguita utilizzando i valori medi delle proprietà dei materiali.

Analisi pushover

Distribuzioni di forze

- La normativa richiede di applicare almeno due distribuzioni di forze d'inerzia, ricadenti l'una nelle distribuzioni principali (Gruppo 1) e l'altra nelle distribuzioni secondarie (Gruppo 2)

Gruppo 1 - distribuzioni principali

Una tra:

- Distribuzione proporzionale alle forze statiche (solo se $M^* \geq 75\%$)
- Distribuzione corrispondente alla forma del modo fondamentale di vibrare nella direzione considerata (solo se $M^* \geq 75\%$)
- Distribuzione corrispondente all'andamento delle forze di piano inviluppo di un'analisi modale (sempre possibile, obbligatoria se $T_1 > 1.3\ T_C$)

NTC, punto 7.3.4.2

Analisi pushover

Distribuzioni di forze

- La normativa richiede di applicare almeno due distribuzioni di forze d'inerzia, ricadenti l'una nelle distribuzioni principali (Gruppo 1) e l'altra nelle distribuzioni secondarie (Gruppo 2)

Gruppo 2 - distribuzioni secondarie

Una tra:

- Distribuzione di forze proporzionale ad un andamento uniforme di accelerazioni lungo l'altezza (obbligatoria se si usa la distribuzione proporzionale alle forze statiche)
- Distribuzione adattiva
- Distribuzione multimodale

NTC, punto 7.3.4.2

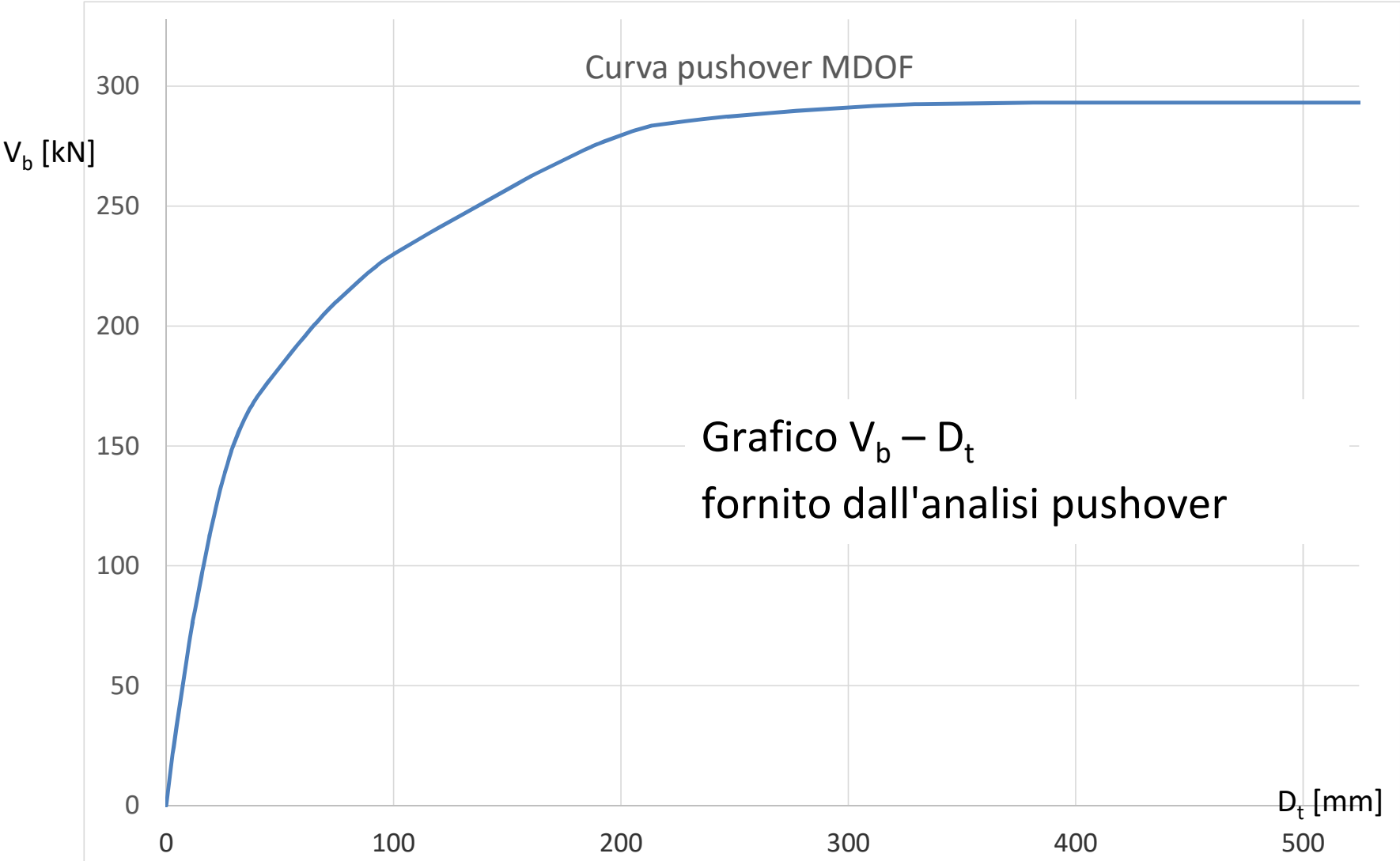
Associazione tra pushover
e accelerazione sismica

- La pushover mostra in che modo il comportamento della struttura cambia al crescere delle azioni applicate ma non fornisce indicazioni su quale accelerazione sismica corrisponda a ciascuno stato strutturale
- Tipicamente si procede determinando un oscillatore semplice equivalente e valutando per questo il valore dell'accelerazione corrispondente ad un certo stato
  - Il reale andamento curvilineo del legame forza-spostamento viene di solito sostituito da un andamento bilineare

Determinazione di a_g

metodo N2

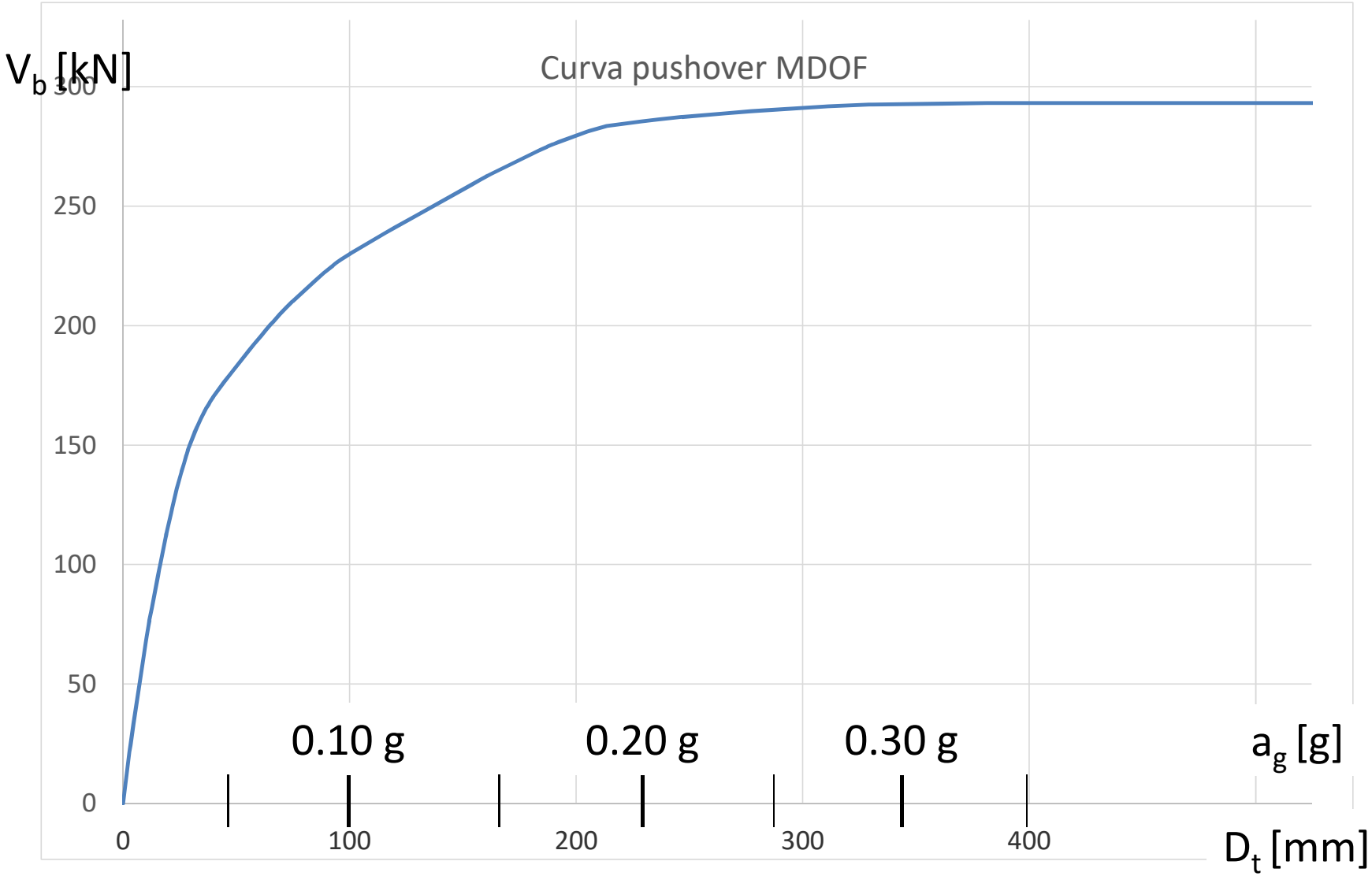
1. Curva di pushover



Determinazione di a_g

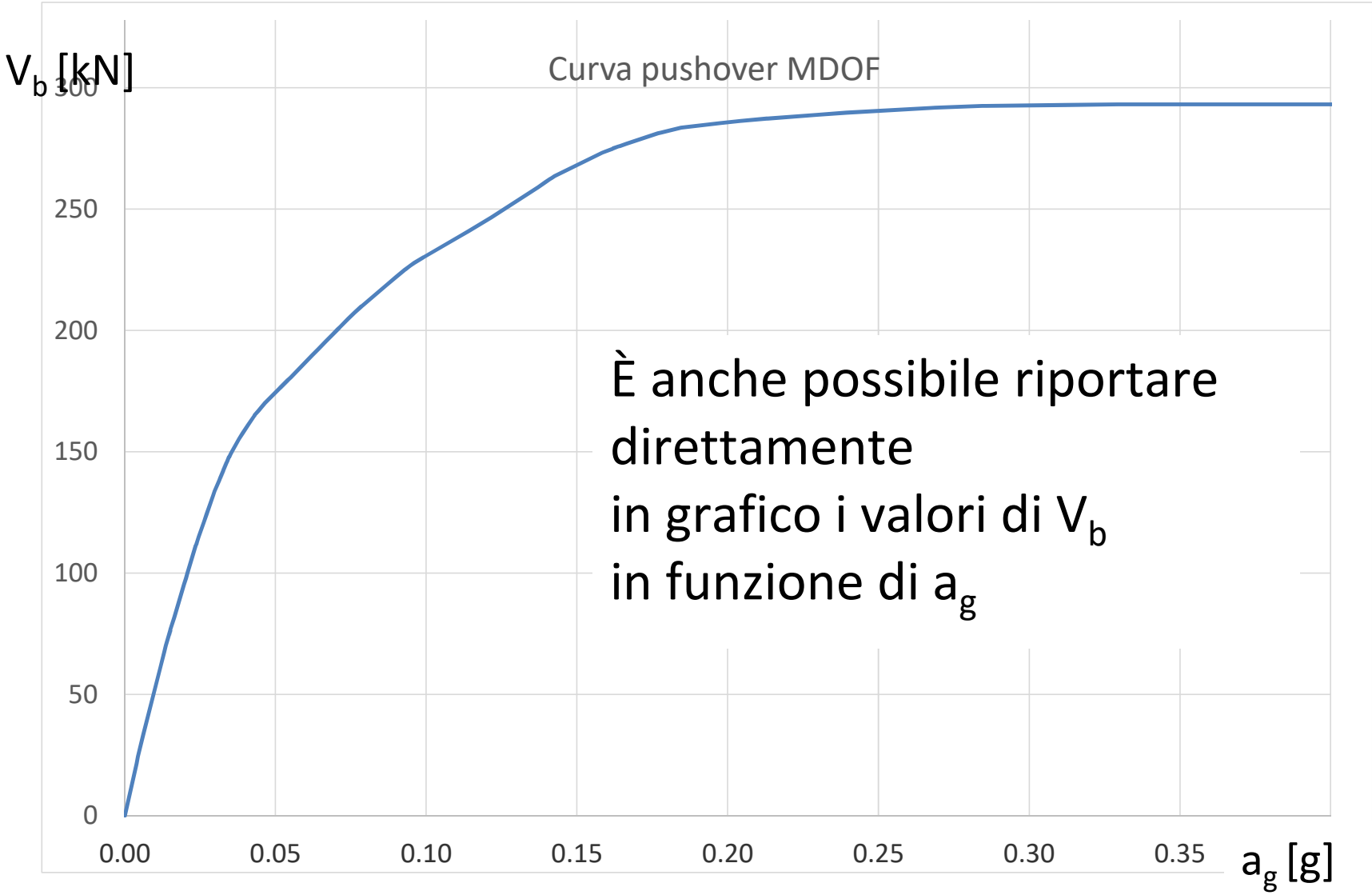
metodo N2

4. Accelerazione corrispondente a ciascun punto



Determinazione di a_g
metodo N2

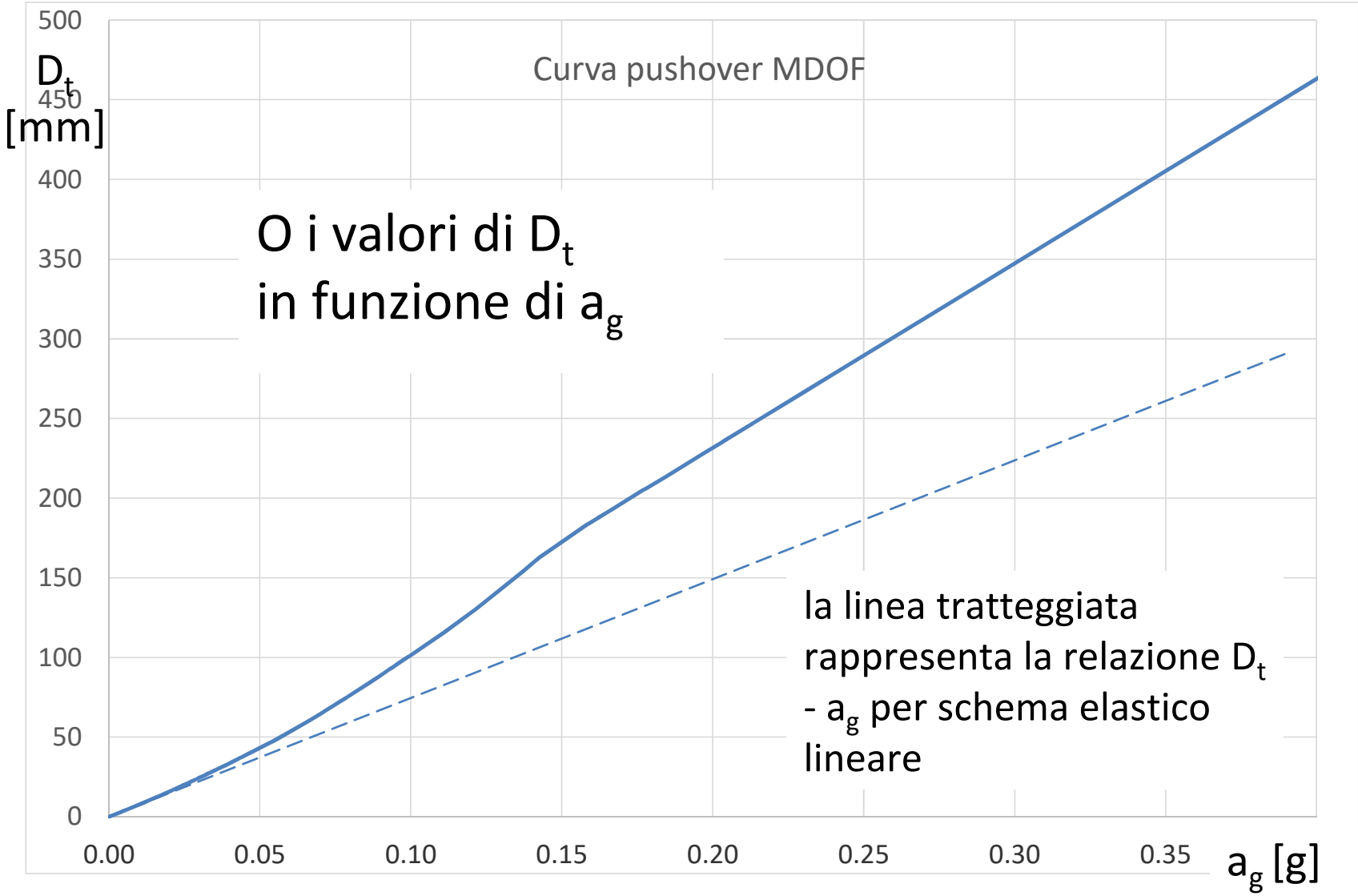
- Grafico V_b - a_g



È anche possibile riportare direttamente in grafico i valori di V_b in funzione di a_g

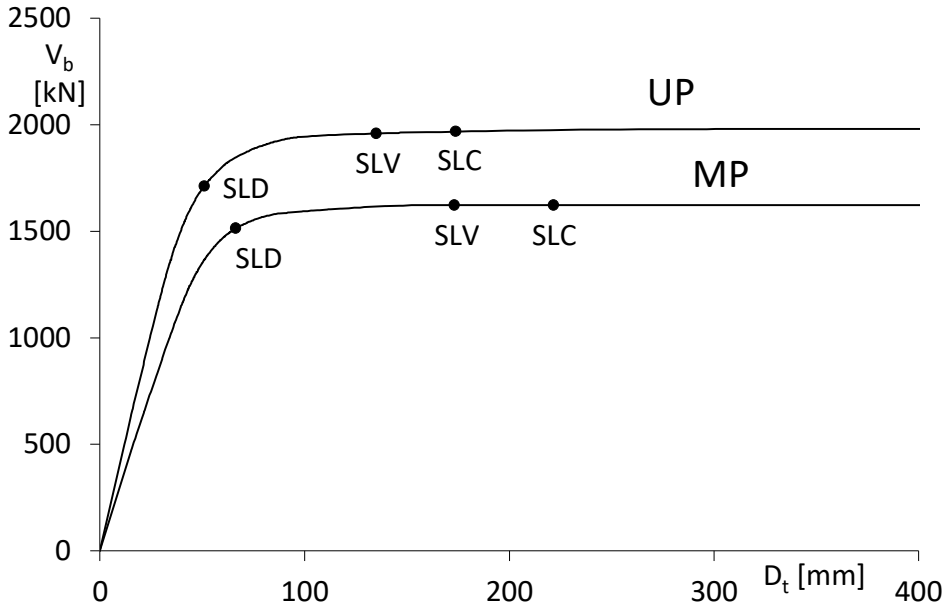
Determinazione di a_g
metodo N2

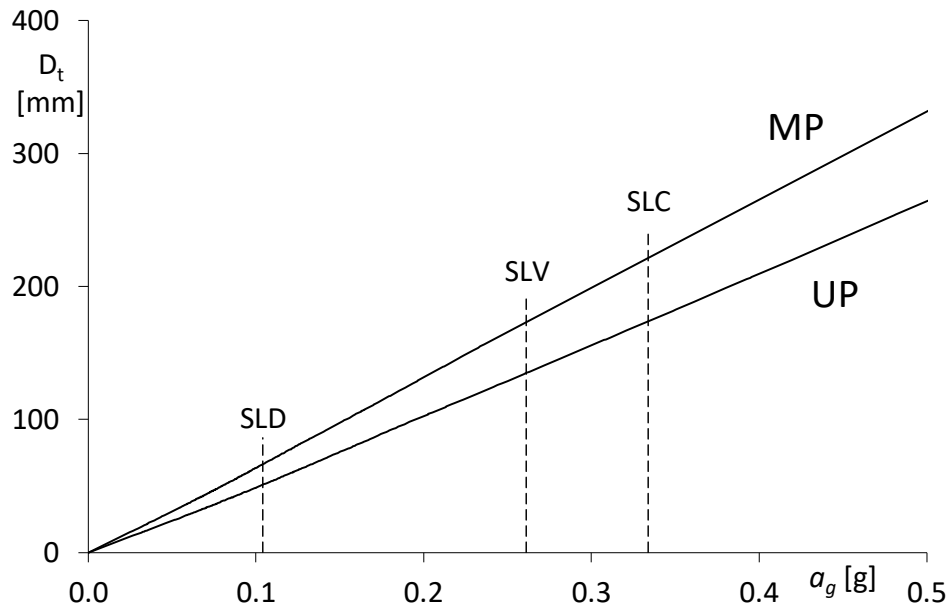
- Grafico D_t - a_g



Per l'esempio in esame

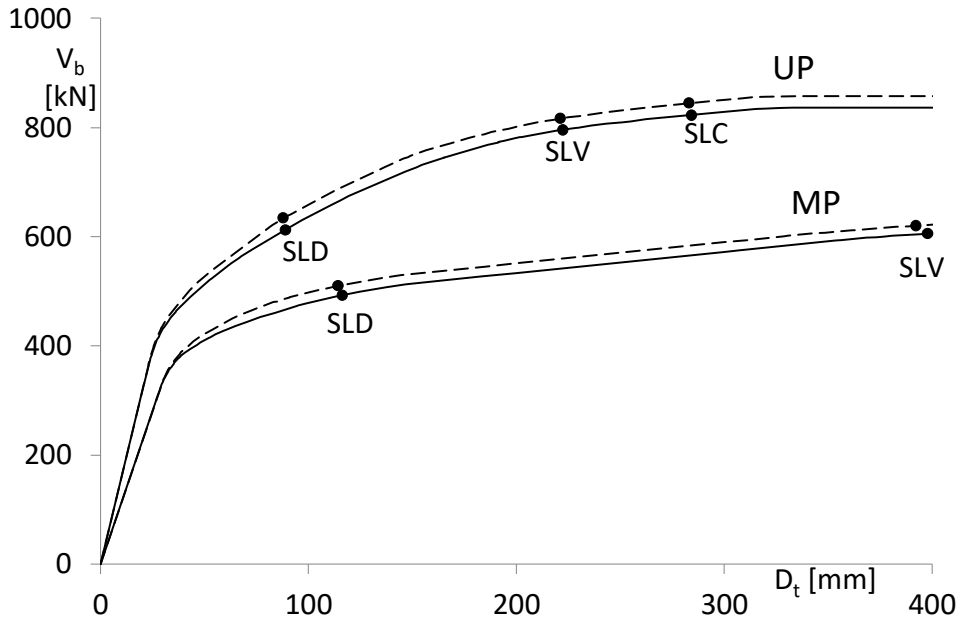
direzione x





Per l'esempio in esame

direzione y



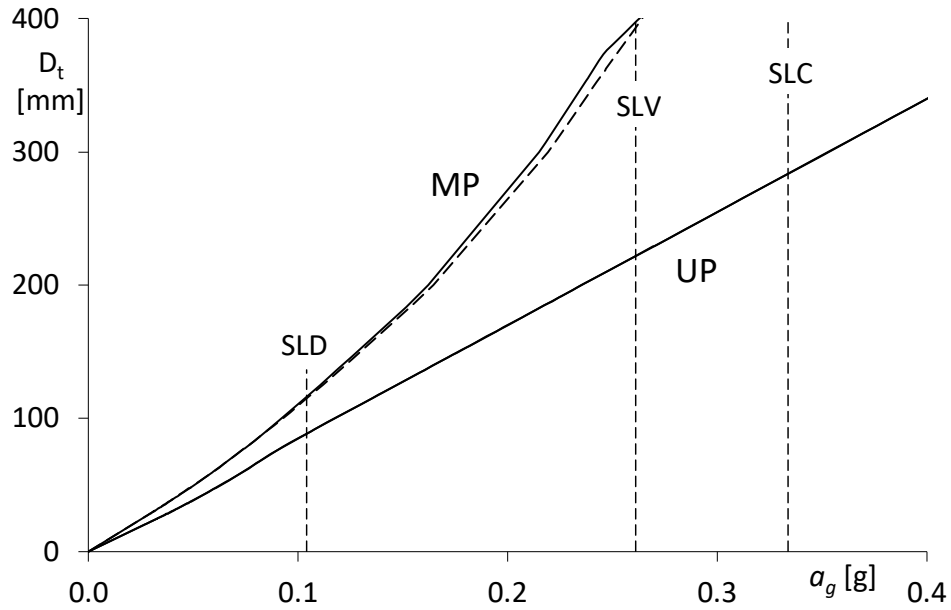


Grafico complessivo delle due pushover

in direzione x

- La relazione forza-spostamento è non lineare

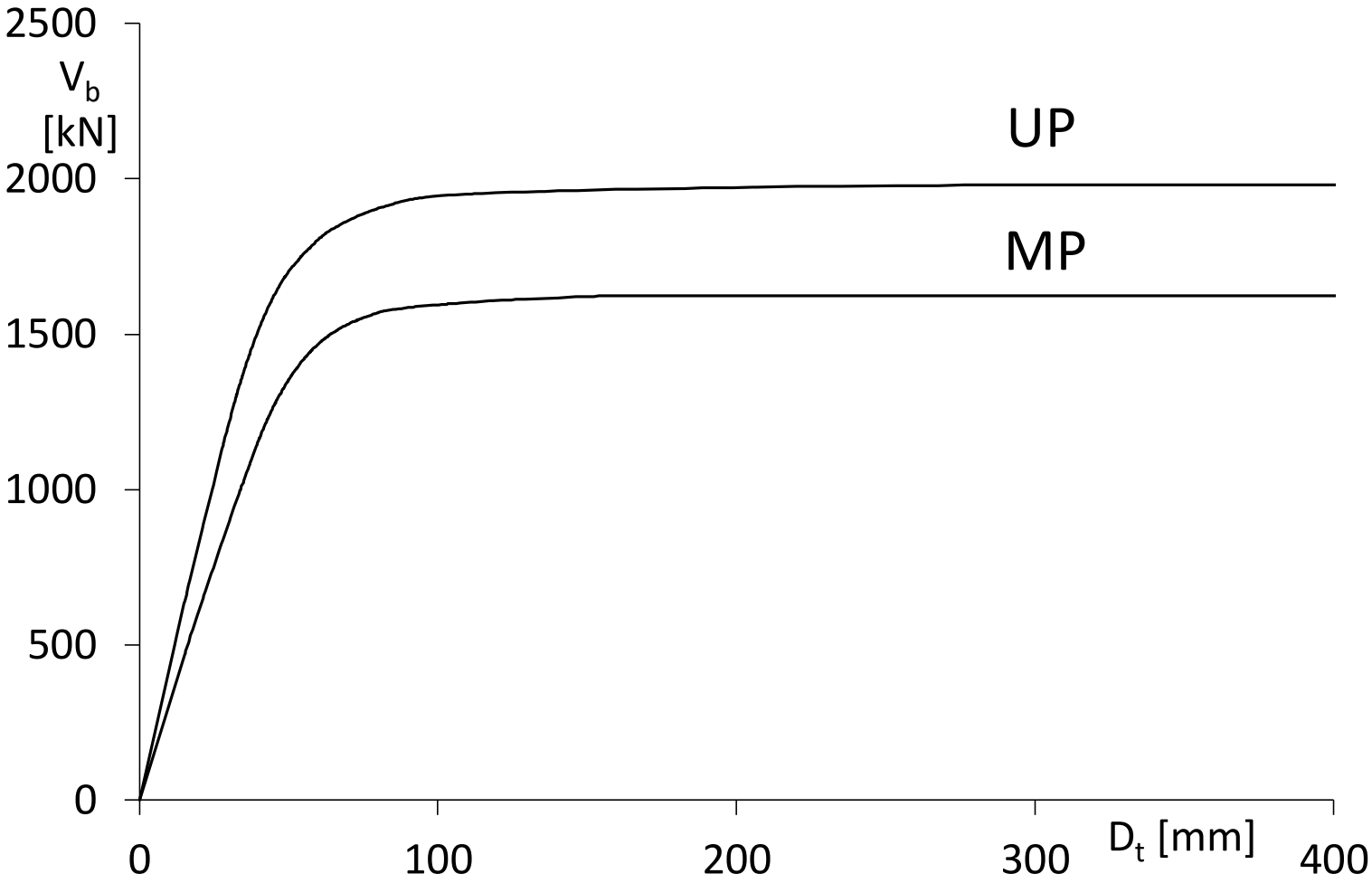
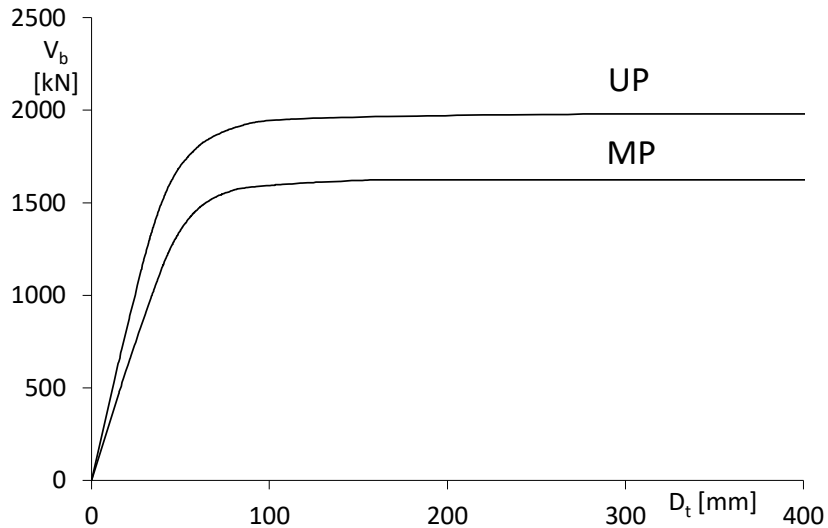


Grafico complessivo delle due pushover

Il grafico forza-spostamento di per sé non dice molto, se non cose ovvie:

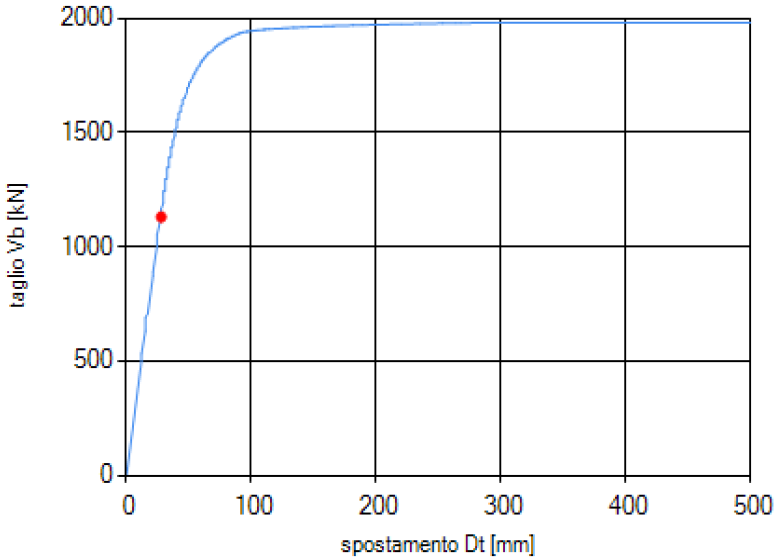
- Con la distribuzione uniforme (UP) la struttura può sopportare forze maggiori
- La pendenza iniziale della curva UP mostra una maggiore rigidezza
  - Ovvio, perché la MP ha forze maggiori in alto, che a parità di taglio sono più dannose per il telaio e provocano spostamenti maggiori

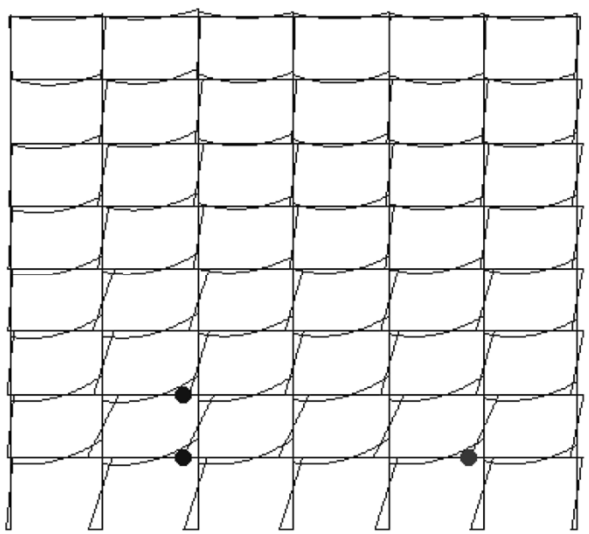


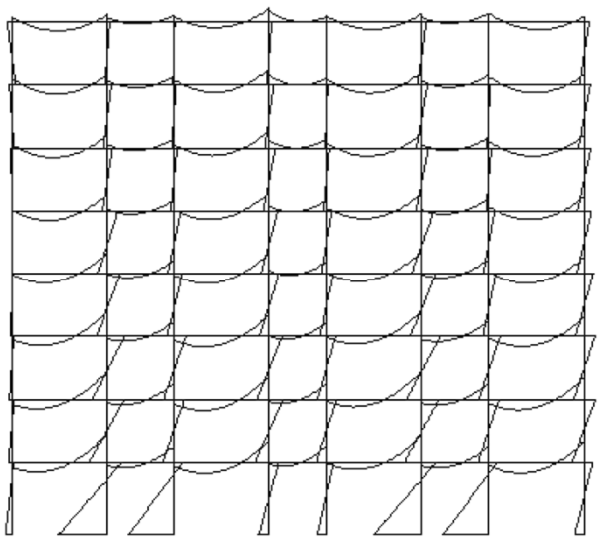
- È invece importante vedere in dettaglio cosa succede al crescere delle forze

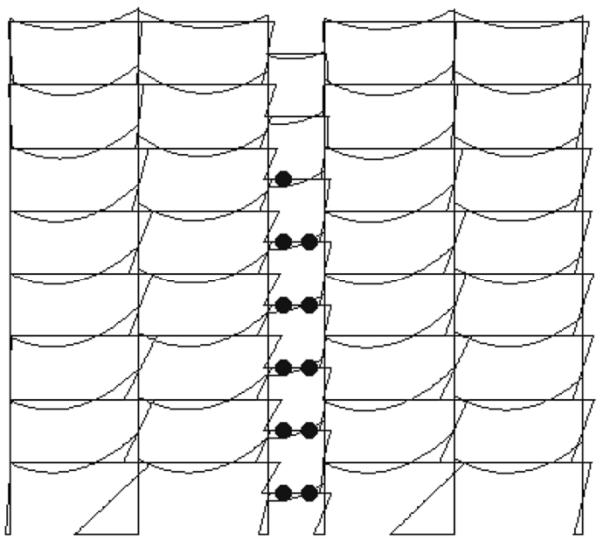
Fasi progressive della pushover x

UP
Cerniere concentrate nella zona scala



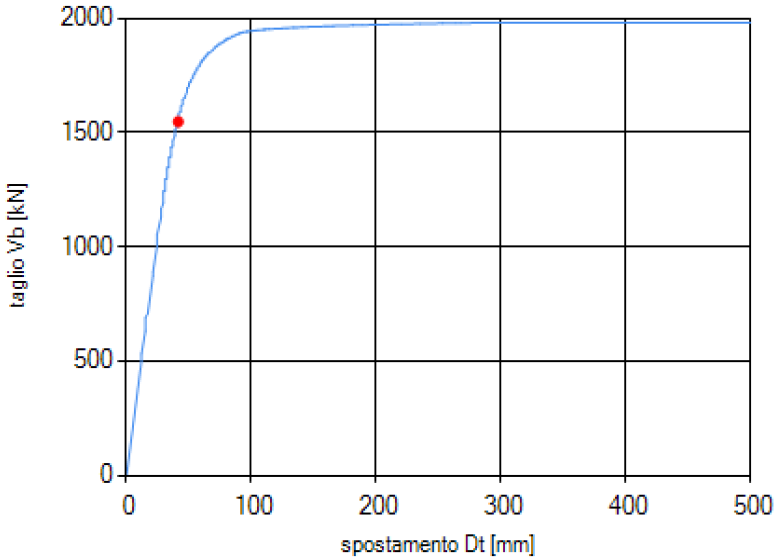


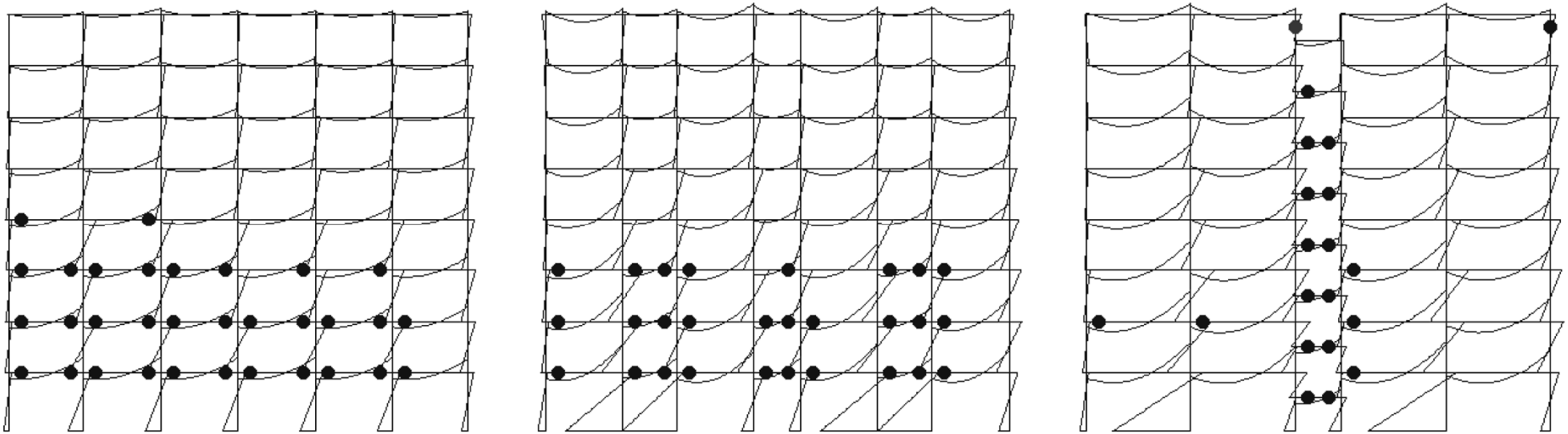




Fasi progressive della pushover x

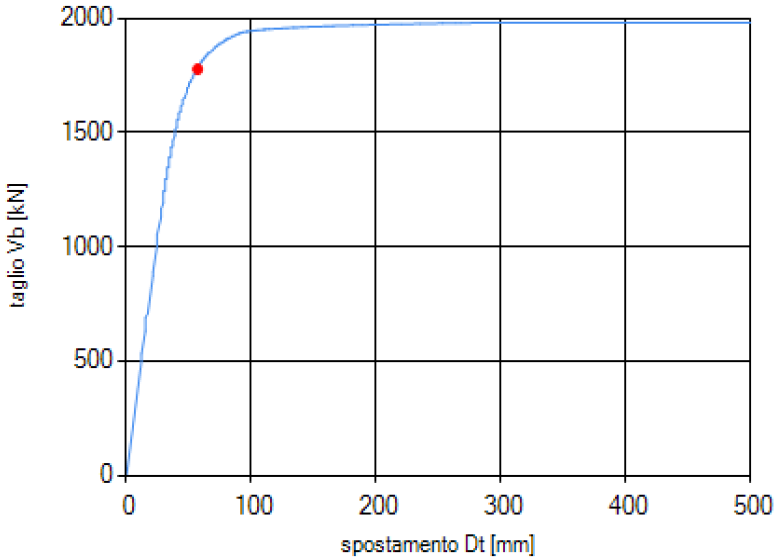
UP
Diffuse cerniere nelle travi dei primi tre impalcati

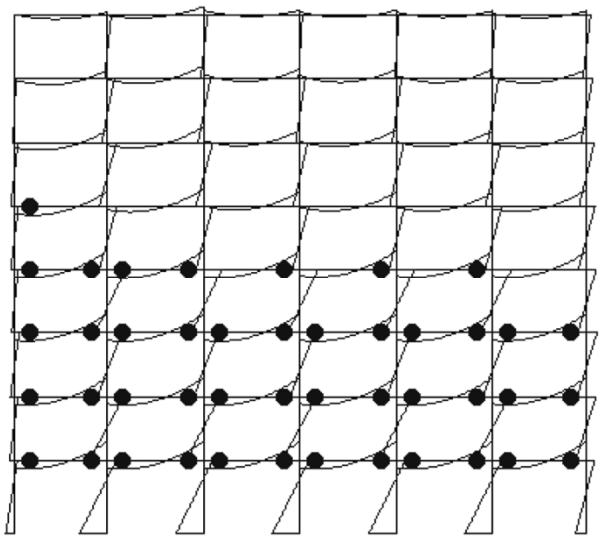


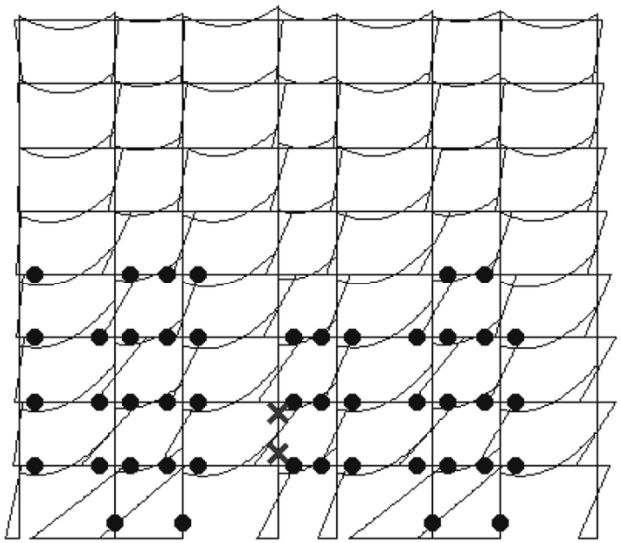


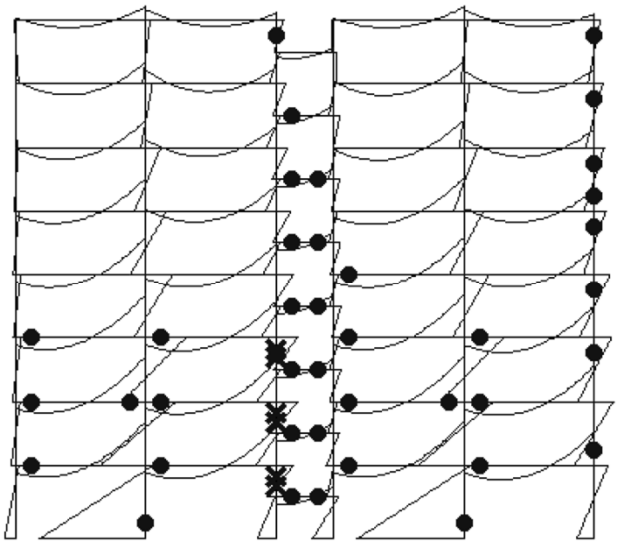
Fasi progressive della pushover x

UP
Iniziano a formarsi cerniere alla base dei pilastri, ma anche rotture a taglio



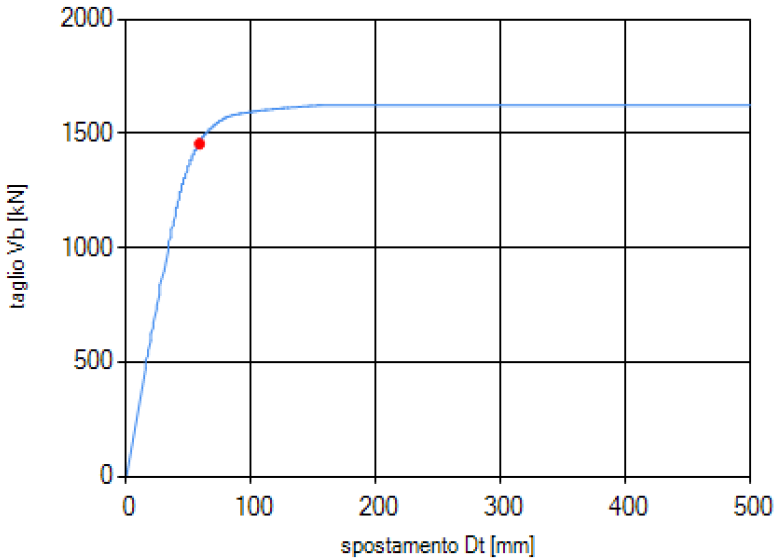






Fasi progressive della pushover x

MP
Avendo forze maggiori ai piani alti,
si hanno numerose cerniere al piede
e in testa a pilastri dei tre ordini
superiori



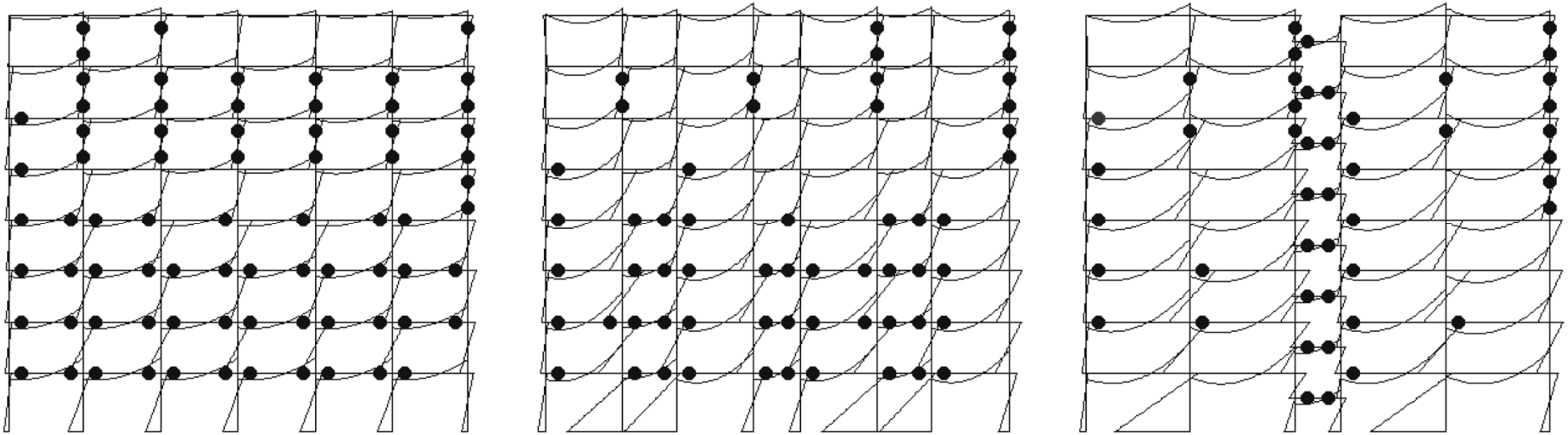


Grafico complessivo delle due pushover

in direzione y

- La relazione forza-spostamento è non lineare

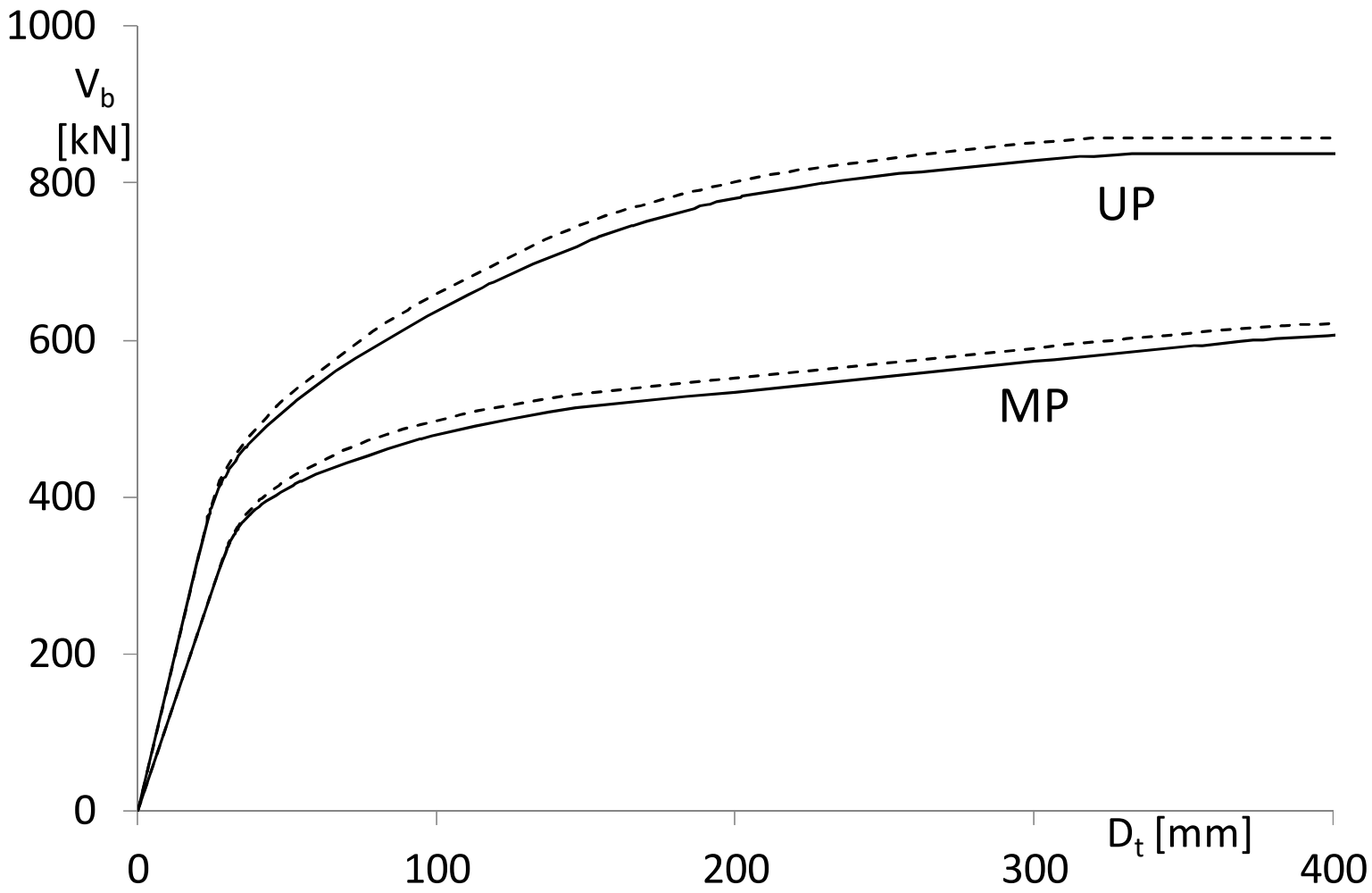
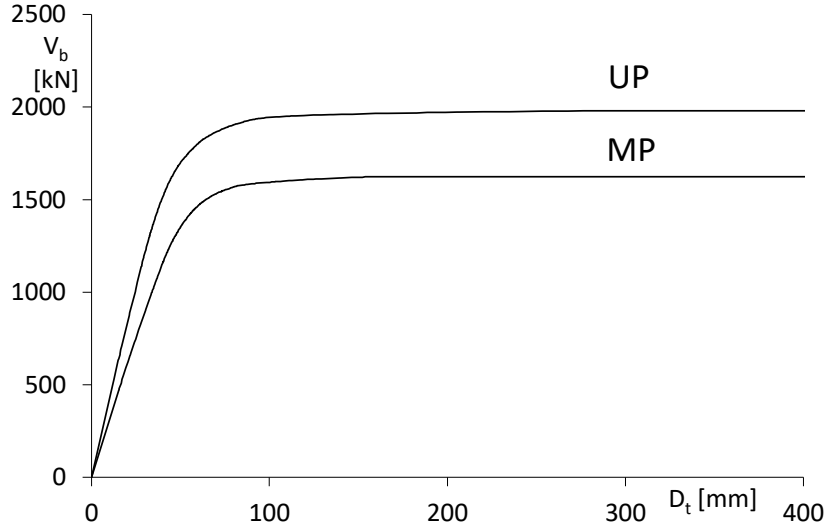


Grafico complessivo delle quattro pushover

Si nota qualche differenza rispetto alla direzione x

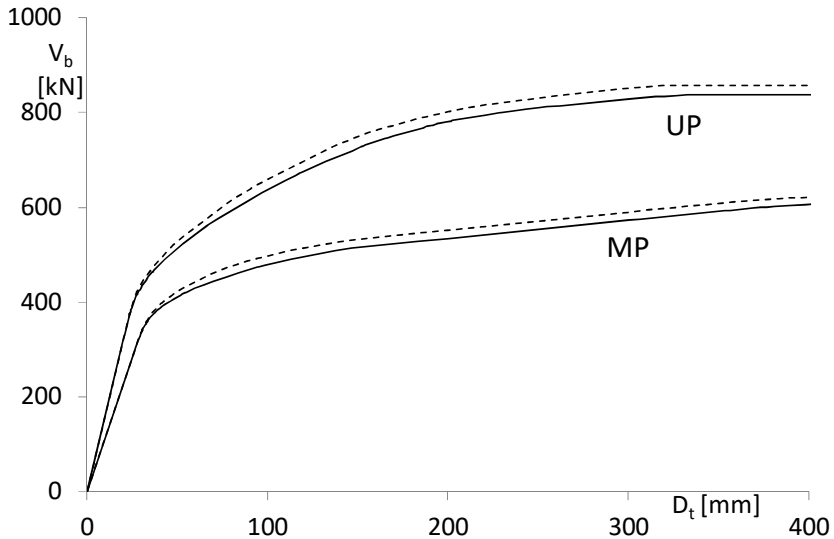
Direzione x

- Plasticizzazione abbastanza concentrata nel gomito della curva, poi tratto orizzontale (labile)



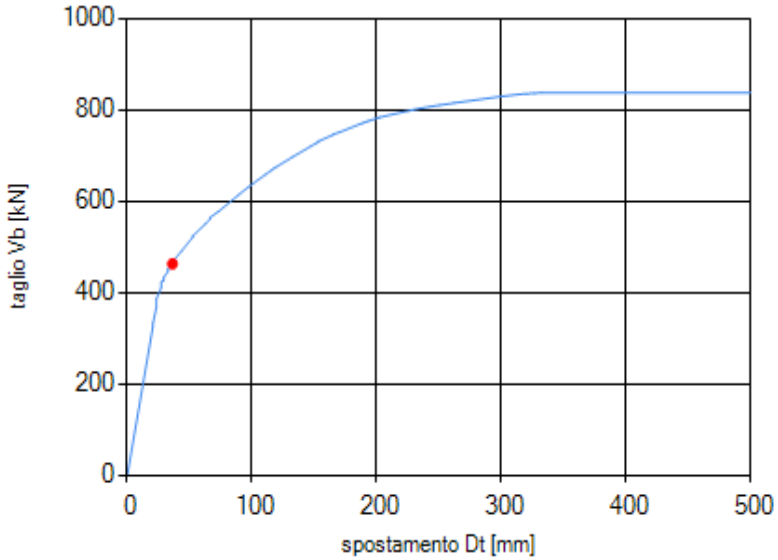
Direzione y

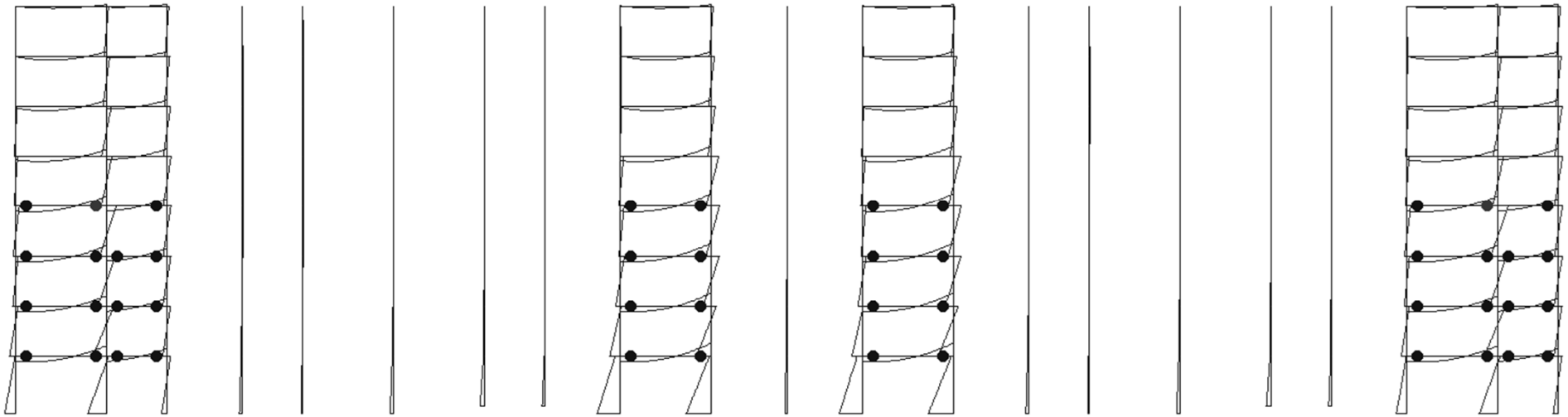
- Dopo il tratto elastico si assesta (specie MP) su un tratto ancora non labile ma molto deformabile



Fasi progressive della pushover y

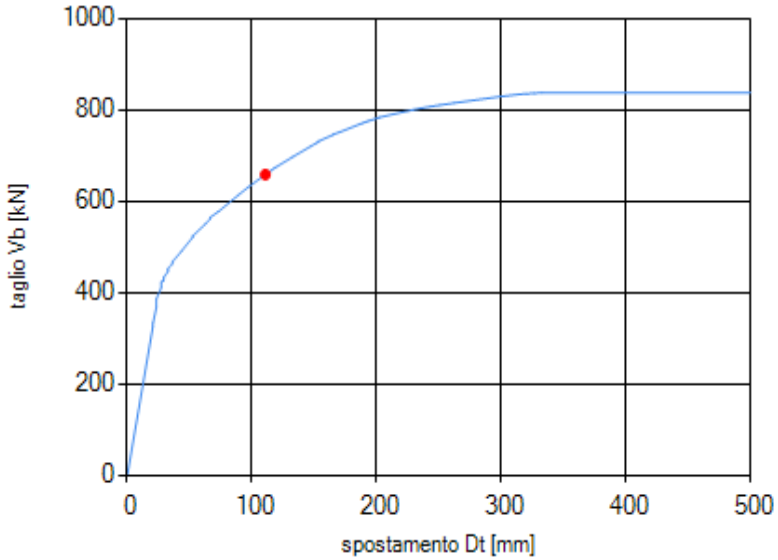
UP
Cerniere nelle travi dei primi quattro impalcati

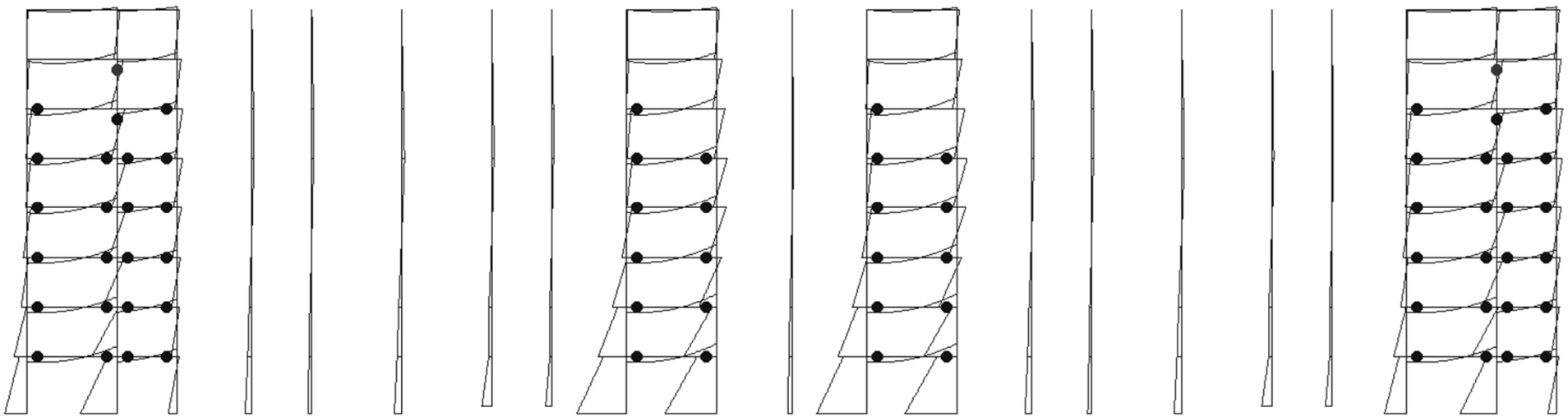




Fasi progressive della pushover y

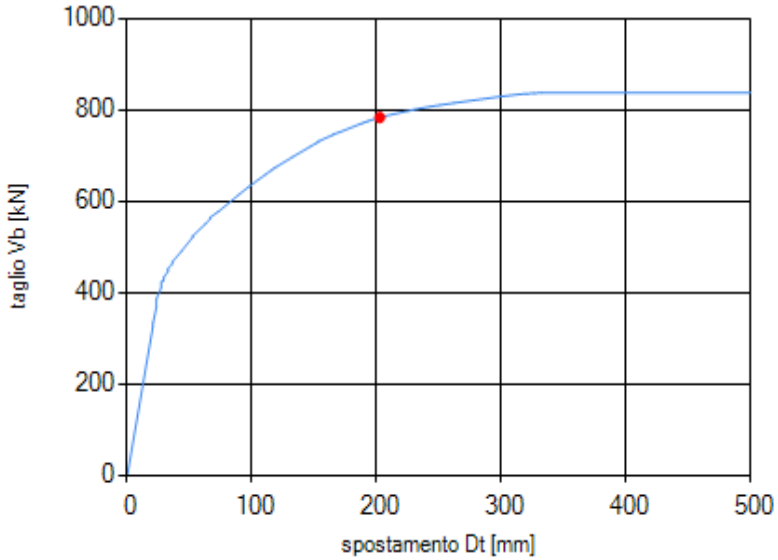
UP
Le cerniere nelle travi si estendono anche agli impalcati superiori
Prime cerniere in pilastri degli ultimi ordini

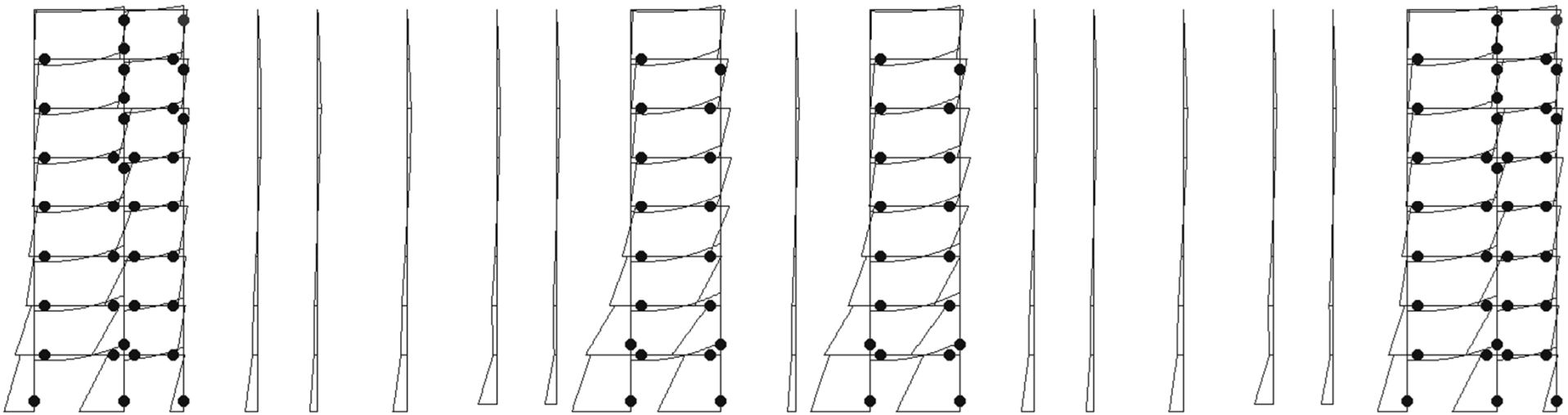




Fasi progressive della pushover y

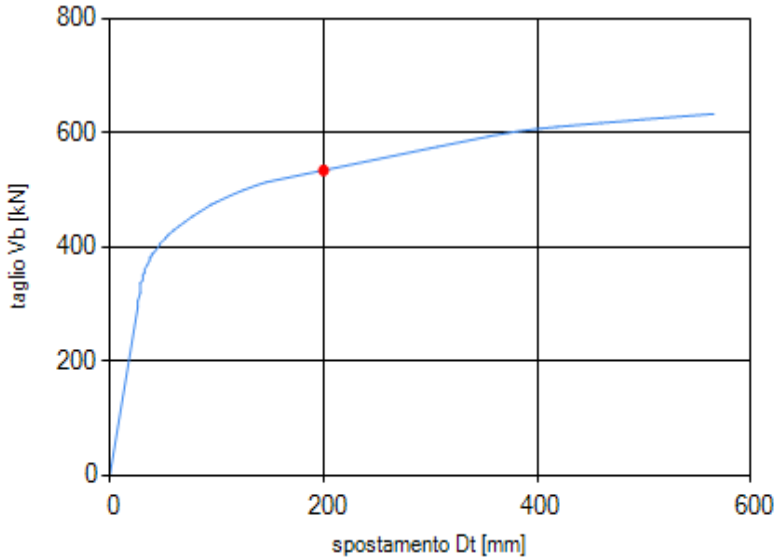
UP
Si formano cerniere anche al piede dei pilastri del primo ordine
I pilastri isolati sono ancora in campo elastico

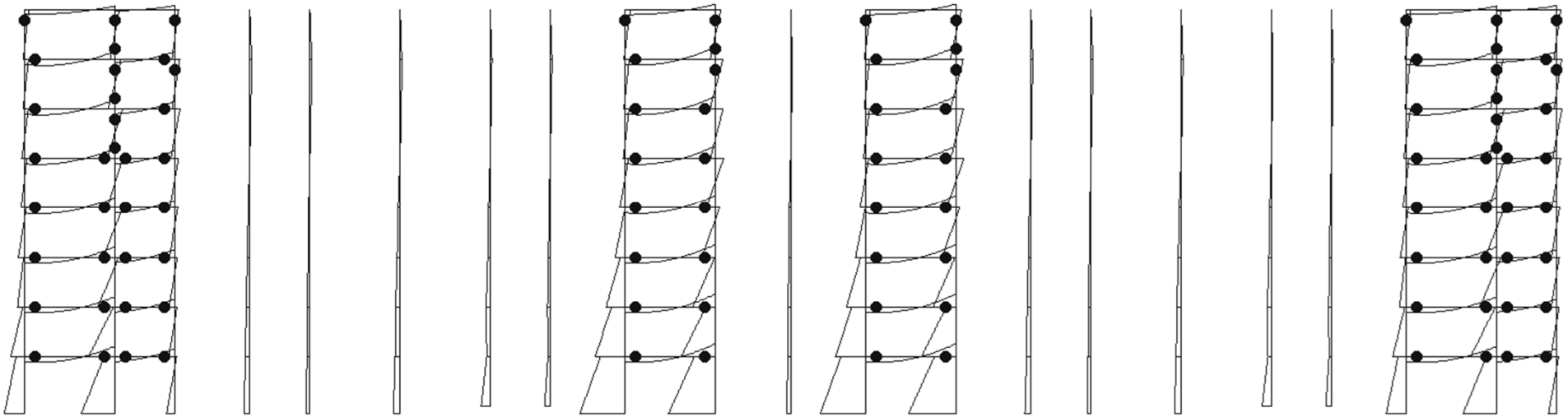




Fasi progressive della pushover y

MP
Cerniere in quasi tutte le travi
Cerniere in molti pilastri degli ultimi ordini, non al piede del primo ordine





Giudizio sulla struttura

In termini di sollecitazioni:

- Riguarda le rotture fragili, come rottura a taglio di una sezione o rottura di un nodo
  - In tal caso valutare anche l'influenza dello spostamento sulla perdita di capacità portante verticale

In termini di deformazioni:

- Riguarda la rottura per esaurimento della capacità deformativa plastica di un concio
  - Si basa sul controllo della “rotazione alla corda” (o della rotazione plastica)
  - Esistono varie formulazioni per il valore di collasso della rotazione alla corda (due in normativa, molte altre in bibliografia) che forniscono risultati diversi