

## Dalle tensioni ammissibili agli stati limite

un approccio unitario

Catania, 2 marzo 2004

Aurelio Ghersi

## Quali sono gli obiettivi della progettazione strutturale?

Una struttura deve essere progettata e costruita in modo che:

- Con accettabile probabilità rimanga adatta all'uso per il quale è prevista, tenendo nel dovuto conto la sua vita presupposta e il suo costo
- Con adeguati livelli di accettabilità sia in grado di sopportare tutte le azioni o influenze, cui possa essere sottoposta durante la sua realizzazione e il suo esercizio, e abbia adeguata durabilità in relazione ai costi di manutenzione

Eurocodice 2, punto 2.1

Come garantire che  
"la struttura sopporti le azioni ..." ?



Modello del  
materiale

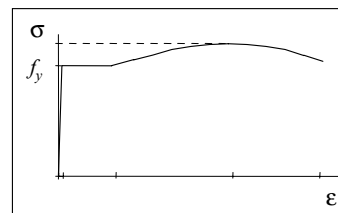
Modello della  
struttura

Modello dei  
carichi

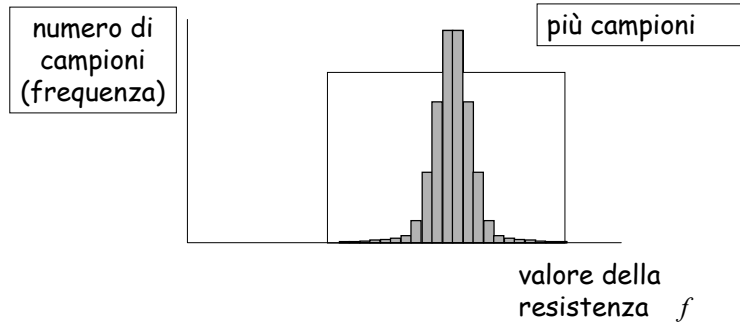
## Materiale

Problemi:

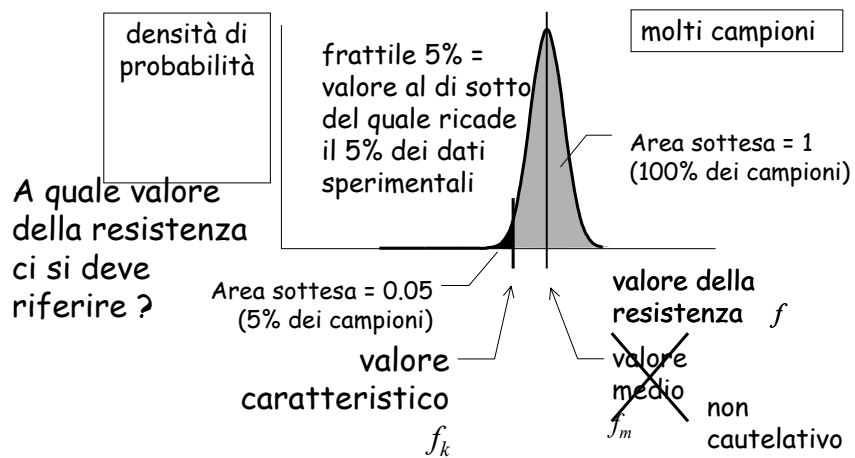
- Incertezze sul valore della resistenza
- Non linearità del legame costitutivo



## Incertezza sulla resistenza

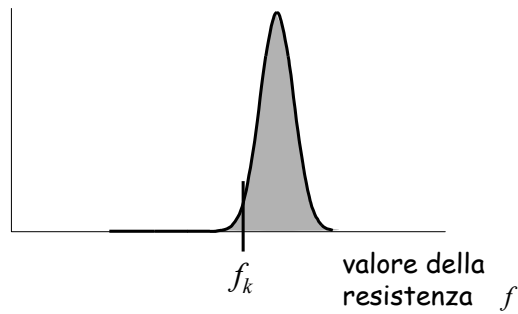


## Incertezza sulla resistenza



## Incertezza sulla resistenza

A quale valore della resistenza ci si deve riferire ?



Il riferimento fondamentale è sempre il valore caratteristico

## Azioni

|                    |     |  |
|--------------------|-----|--|
| Azioni permanenti  | $G$ | peso proprio, altri carichi che non variano nel tempo      |
| Azioni variabili   | $Q$ | carichi variabili di esercizio, carichi da vento o da neve |
| Azioni eccezionali | $A$ | esplosioni, urti di veicoli, terremoti                     |

## Incertezza sulle azioni

Valori nominali      peso di elementi di dimensioni  
e caratteristiche ben definite  
Esempio: peso proprio della  
soletta di un solaio

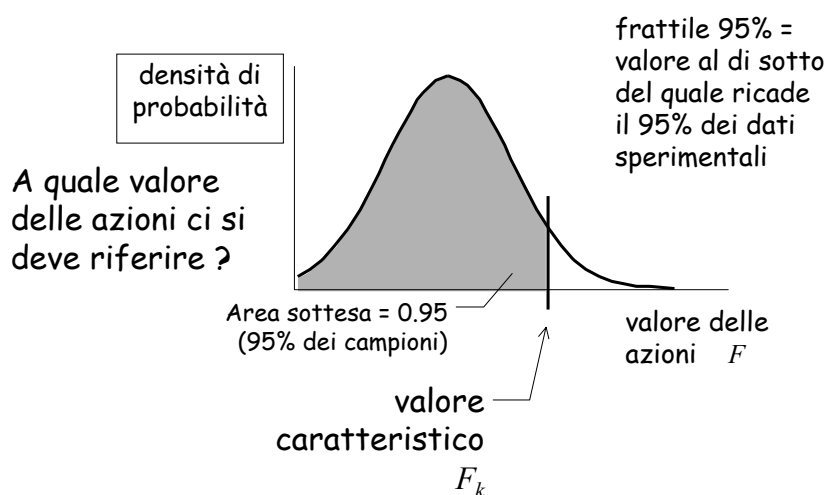
Siamo sicuri che verranno realizzati  
esattamente come previsto?

## Incertezza sulle azioni

Valori "massimi"      Esempio: massimo carico  
variabile su un solaio (in base  
alla destinazione d'uso)

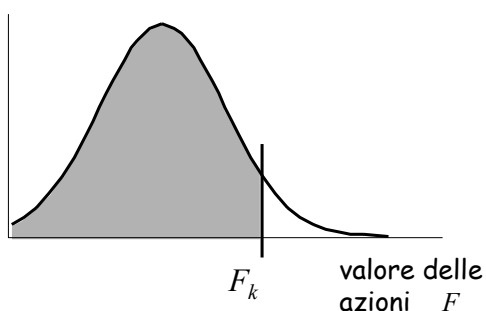
Siamo sicuri che non saranno mai superati?

## Incertezza sulle azioni



## Incertezza sulle azioni

A quale valore delle azioni ci si deve riferire ?



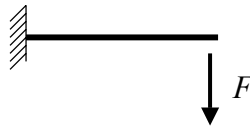
Il riferimento fondamentale è  
sempre il valore caratteristico  
(anche quando non viene indicato esplicitamente)

E' possibile fare il calcolo utilizzando i valori caratteristici della resistenza e delle azioni ?

"A occhio", non sembra abbastanza sicuro.

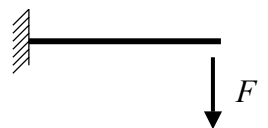
Ma come si può valutare la probabilità di avere un crollo ?

Esempio

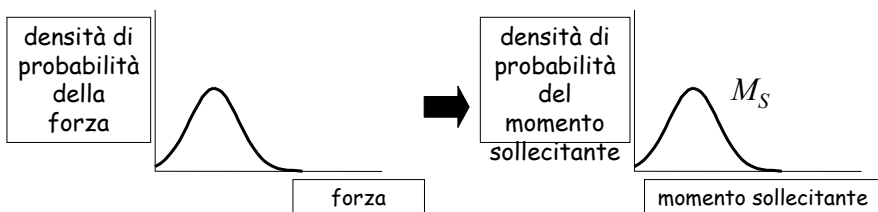


Per esprimere un giudizio dobbiamo confrontare il momento  $M_S$  che sollecita la sezione col momento  $M_R$  che essa può sopportare

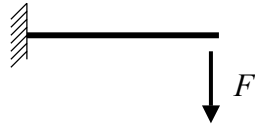
## Probabilità di crollo



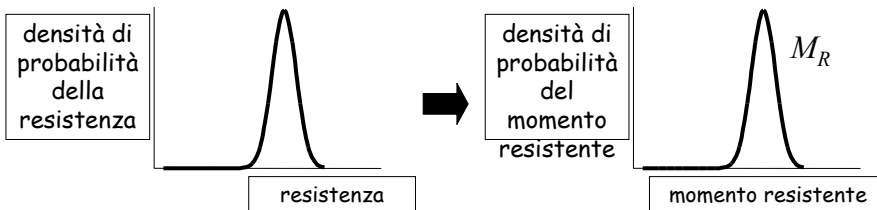
Il momento massimo  $M_S$  che sollecita la sezione dipende dal valore della forza



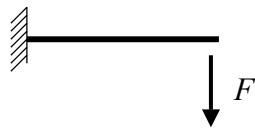
## Probabilità di crollo



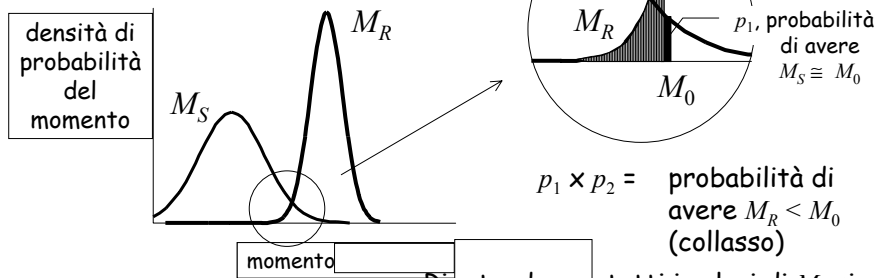
Il momento massimo  $M_R$  che la sezione può sopportare dipende dalla resistenza del materiale



## Probabilità di crollo



Confronto tra  $M_S$  e  $M_R$



Ripetendo per tutti i valori di  $M_0$  si trova la probabilità totale di crollo



E' possibile fare il calcolo utilizzando i valori caratteristici della resistenza e delle azioni ?

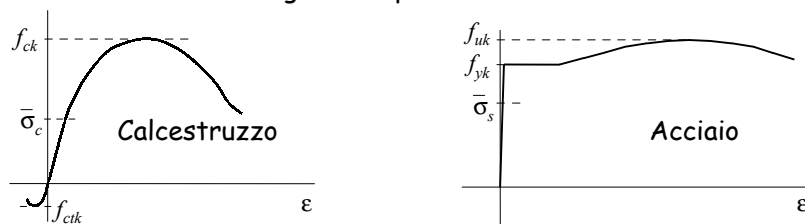
No, perché la possibilità di avere resistenza inferiore o azioni superiori porta ad un rischio di crollo non sufficientemente basso

E' necessario applicare coefficienti di sicurezza

In che modo ?

Prima possibilità: applicare un coefficiente di sicurezza alla resistenza

Diagrammi sperimentali

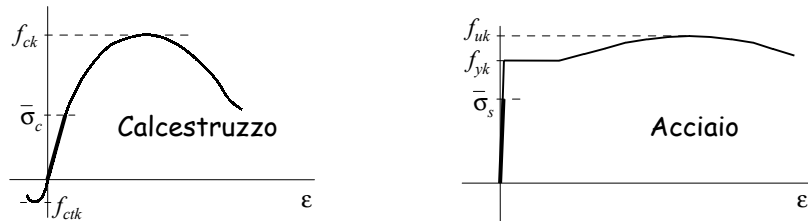


Si considerano "ammissibili" valori delle tensioni molto ridotti rispetto a quelli di rottura

$$\sigma_c \leq \bar{\sigma}_c = \frac{f_{ck}}{\gamma} \quad \sigma_s \leq \bar{\sigma}_s = \frac{f_{yk}}{\gamma}$$

## Prima possibilità: applicare un coefficiente di sicurezza alla resistenza

Diagrammi di calcolo



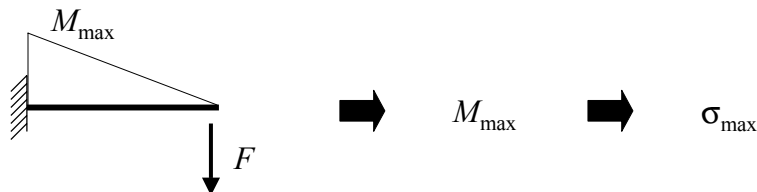
Per valori delle tensioni inferiori a quelli ammissibili  
il legame tensioni-deformazioni è lineare

E' possibile quindi applicare tutte le formule della teoria di  
elasticità lineare, il principio di sovrapposizione degli effetti,  
ecc. ecc.

## Prima possibilità: applicare un coefficiente di sicurezza alla resistenza

### Metodo delle tensioni ammissibili

La verifica consiste nel calcolare la tensione massima  
(prodotta dalle azioni, prese col valore caratteristico)

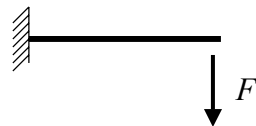
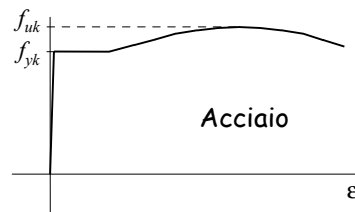
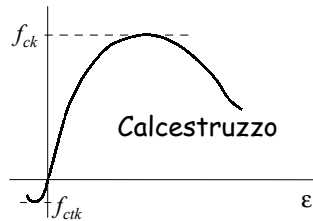


e controllare che sia inferiore a quella ammissibile

$$\sigma_{max} \leq \bar{\sigma}$$

Seconda possibilità: applicare un coefficiente di sicurezza ai carichi

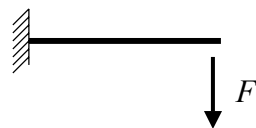
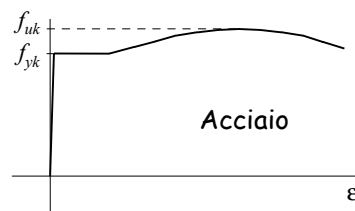
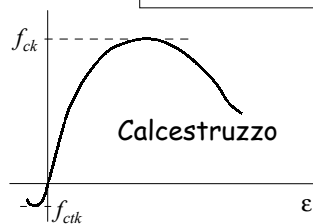
Diagrammi sperimentali



Usando i legami costitutivi sperimentali, si valuta il carico che porta a collasso la struttura

Seconda possibilità: applicare un coefficiente di sicurezza ai carichi

Calcolo a rottura



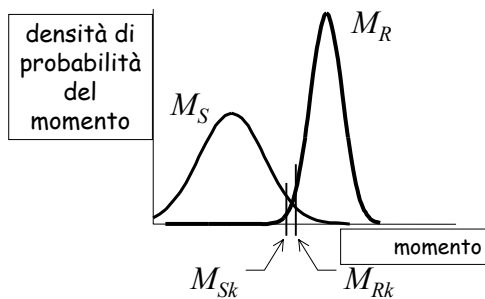
Si considera accettabile un carico ridotto rispetto a quello di collasso

$$F_k \leq \frac{F_u}{\gamma}$$

$$\gamma F_k \leq F_u$$

## Terza possibilità: applicare coefficienti di sicurezza sia alla resistenza che ai carichi

Si parte da considerazioni probabilistiche

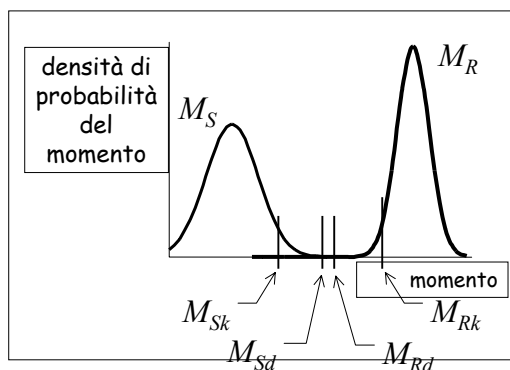


Effettuare i calcoli usando i valori caratteristici, cioè controllare che

$M_{Sk} \leq M_{Rk}$   
non garantisce una probabilità di crollo sufficientemente bassa

## Terza possibilità: applicare coefficienti di sicurezza sia alla resistenza che ai carichi

Si parte da considerazioni probabilistiche

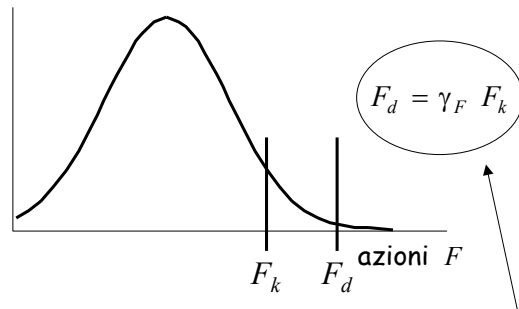


Per avere una bassa probabilità di crollo le due distribuzioni di probabilità devono essere ben distinte

Ciò può essere ottenuto facendo riferimento a valori di carichi e resistenza corrispondenti a differenti probabilità di occorrenza

Terza possibilità: applicare coefficienti di sicurezza sia alla resistenza che ai carichi

### Azioni



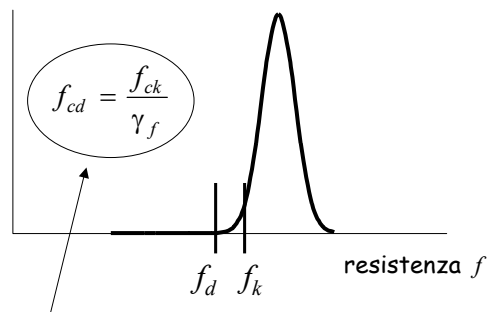
Al posto del valore caratteristico  $F_k$  (frattile 95%)

si usa come valore di calcolo  $F_d$  un frattile più alto (99.5%)

Convenzionalmente, si passa dal valore caratteristico al valore di calcolo applicando un opportuno coefficiente di sicurezza

Terza possibilità: applicare coefficienti di sicurezza sia alla resistenza che ai carichi

### Resistenza



Al posto del valore caratteristico  $f_k$  (frattile 5%)

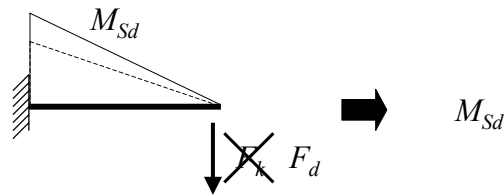
si usa come valore di calcolo  $f_d$  un frattile più basso (0.5%)

Convenzionalmente, si passa dal valore caratteristico al valore di calcolo applicando un opportuno coefficiente di sicurezza

## Terza possibilità: applicare coefficienti di sicurezza sia alla resistenza che ai carichi

### Verifica allo stato limite ultimo

La verifica consiste nel calcolare le caratteristiche di sollecitazione, prodotta da azioni maggiorate



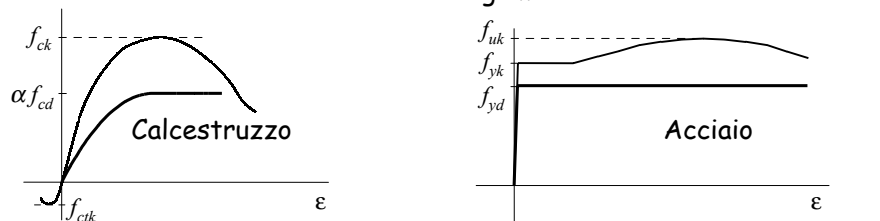
e controllare che siano inferiore a quelle resistenti, determinate con una resistenza ridotta

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}$$

## Terza possibilità: applicare coefficienti di sicurezza sia alla resistenza che ai carichi

### Verifica allo stato limite ultimo

Le caratteristiche di sollecitazione che la sezione può sopportare devono essere valutate tenendo conto della non linearità del legame costitutivo



Le caratteristiche di sollecitazione prodotte dai carichi possono essere valutate con analisi non lineare, ma più comunemente si usa un'analisi lineare

## ... Tornando agli obiettivi

### Metodo degli stati limite

- Sopportare tutte le azioni . . .

cioè evitare il collasso . . .

Verifica allo stato limite ultimo (SLU)

- Rimanere adatta all'uso . . .

ovvero limitare:

- deformazioni
- fessurazione (per c.a.)      ecc.

Verifica allo stato limite di esercizio (SLE)

## E per strutture in zona sismica . . .

- Sopportare tutte le azioni . . .

cioè evitare il collasso nel caso di terremoto  
con periodo di ritorno molto alto

Verifica allo stato limite ultimo (SLU)

- Rimanere adatta all'uso . . .

ovvero limitare i danni nel caso di terremoto  
con periodo di ritorno più basso

Verifica allo stato limite di danno (SLD)

## Evoluzione del concetto di protezione sismica

Prime normative:

Unico obiettivo

- |                                 |   |
|---------------------------------|---|
| • Evitare perdite di vite umane | nel caso di terremoto con periodo di ritorno molto alto |
|---------------------------------|---|

## Evoluzione del concetto di protezione sismica

Normative attuali:

Doppio livello di protezione

- |                                 |   |
|---------------------------------|---|
| • Evitare perdite di vite umane | nel caso di terremoto con periodo di ritorno molto alto |
| • Limitare i danni              | nel caso di terremoto con periodo di ritorno più basso  |

Normativa italiana, a partire dal 1996  
Normativa europea (Eurocodice 8)



## Evoluzione del concetto di protezione sismica

Performance based design

Tendenza della normativa:

Più livelli di prestazione

- Evitare il crollo
- Evitare perdite di vite umane
- Consentire un rapido ripristino dell'operatività
- Mantenere l'operatività

associati a diversi livelli di intensità sismica

Normativa americana FEMA  
Capitolo 11 dell'Ordinanza 3274

## Livelli di prestazione

Evitare il crollo

Near collapse

La capacità dell'edificio di portare azioni orizzontali e verticali è compromessa. L'uso dell'edificio dopo l'evento sismico comporterebbe un sensibile livello di rischio.

## Livelli di prestazione

Evitare perdite di vite umane

Life safe

Significativi danni agli elementi strutturali e non strutturali. Esiste ancora un consistente margine nei confronti del collasso. La funzionalità dell'edificio è compromessa.

## Livelli di prestazione

Consentire un rapido ripristino dell'operatività

Operational

Danni modesti agli elementi non strutturali e quasi nulli a quelli strutturali. L'utilizzo dell'opera dopo il sisma dovrebbe essere consentito, anche se alcune funzionalità potrebbero risultare compromesse.

## Livelli di prestazione

Mantenere l'operatività

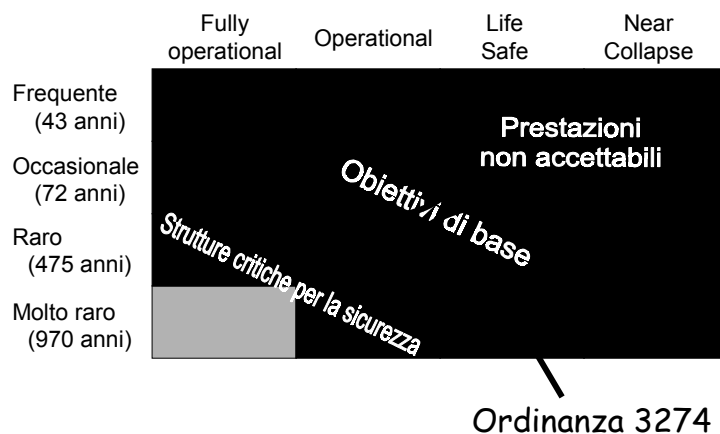
Fully operational

Danni estremamente modesti agli elementi non strutturali, tali da non compromettere in alcun modo la funzionalità dell'edificio.

## Livelli di intensità sismica

| Livello           | Periodo di ritorno | Probabilità di superamento |
|-------------------|--------------------|----------------------------|
| Frequente         | 43 anni            | 50% in 30 anni             |
| Occasionale       | 72 anni            | 50% in 50 anni             |
| Raro              | 475 anni           | 10% in 50 anni             |
| Estremamente raro | 970 anni           | 10% in 100 anni            |

## Obiettivi prestazionali



## Evoluzione dell'approccio normativo

Precedente normativa italiana:

Impostazione cogente, prescritzionale

indicazioni da seguire, obbligatoriamente

Norme europee, nuova normativa italiana:

Impostazione prestazionale

- Principi

obiettivi da raggiungere, obbligatori

- Regole applicative

come farlo, consigli "autorevoli" ma non obbligatori

## Impostazione prestazionale

- Principi

obiettivi da raggiungere,  
obbligatori

- Regole applicative

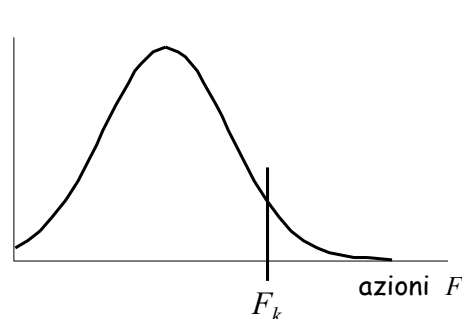
come farlo, consigli  
"autorevoli" ma non obbligatori

Giusto, ma . . .

- Come si capisce se un punto della norma è un principio oppure una regola applicativa?
- Se è una regola applicativa, come si giustifica un modo di procedere diverso da quello indicato?
- Come si valuta la responsabilità
  - del progettista
  - di chi controlla ?

## Tornando alle azioni . . .

Basandosi su considerazioni probabilistiche



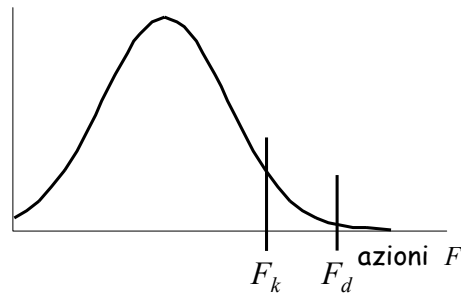
Usato nel metodo  
delle T.A.

Usato per stati limite  
di esercizio

$F_k$  Valore caratteristico (frattile 95%)

## Tornando alle azioni . . .

Basandosi su considerazioni probabilistiche



$$F_k$$

$$F_d = \gamma_F F_k$$

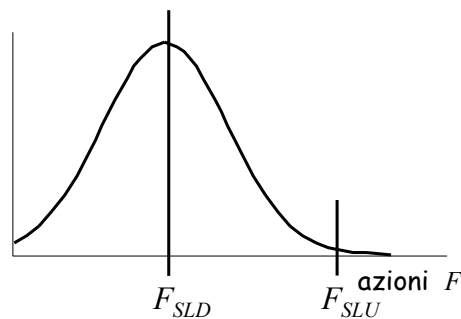
$$\gamma_F = \begin{array}{l} 1.4 \text{ per azioni permanenti} \\ 1.5 \text{ per azioni variabili} \end{array}$$

Usato per stato limite ultimo

$F_d$  Valore di calcolo (un frattile più alto, 99.5%)

## Tornando alle azioni . . .

o, nel caso del sisma



possibilità di superamento

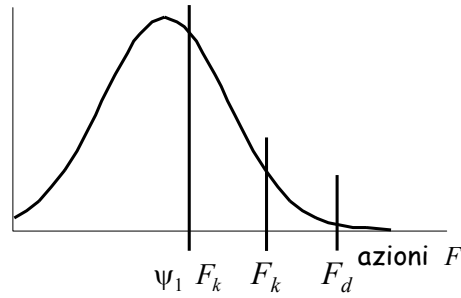
$$F_{SLD} \quad 50\% \text{ in } 50 \text{ anni}$$

$$F_{SLU} \quad 10\% \text{ in } 50 \text{ anni}$$

Valori corrispondenti a differente probabilità di superamento in un tempo assegnato (50 anni)

## Tornando alle azioni . . .

Inoltre, per azioni variabili



$$F_k$$

$$F_d = \gamma_F F_k$$

$$\psi_1 F_k$$

$\psi_1$  dipende dal tipo di carico

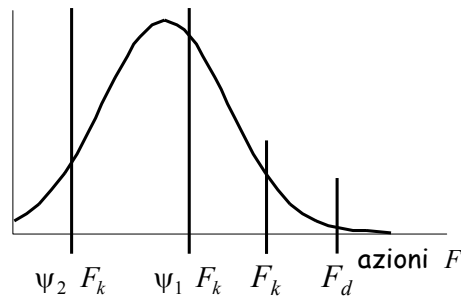
$\psi_1 = 0.5$  carico variabile per abitazione

0.2 per vento, neve

$\psi_1 F_k$  Valore frequente (un frattile basso)

## Tornando alle azioni . . .

Inoltre, per azioni variabili



$$F_k$$

$$F_d = \gamma_F F_k$$

$$\psi_1 F_k$$

$$\psi_2 F_k$$

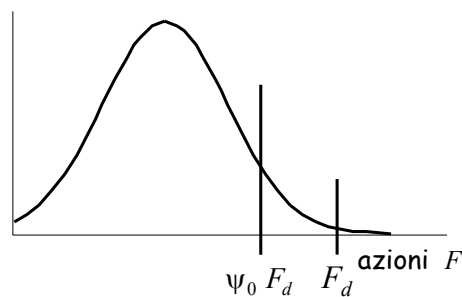
$\psi_2$  dipende dal tipo di carico

$\psi_2 = 0.2$  c. var. per abitazione  
0 per vento, neve

$\psi_2 F_k$  Valore quasi permanente (un frattile ancora più basso)

## Tornando alle azioni . . .

Infine, quando si accoppiano più azioni variabili indipendenti,  
sia per lo stato limite ultimo . . .



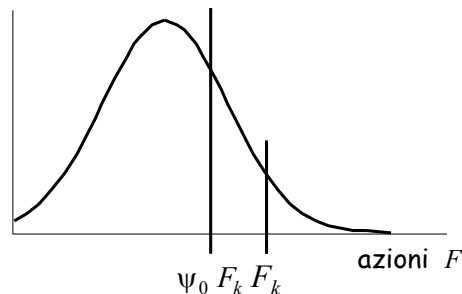
Si usa per l'azione  
meno gravosa  
un frattile più basso

$$\Psi_0 F_d$$

$\Psi_0 F_d$  Valore di combinazione (un frattile più basso)

## Tornando alle azioni . . .

Infine, quando si accoppiano più azioni variabili indipendenti,  
sia per lo stato limite ultimo . . . che per gli stati limite di esercizio



Si usa per l'azione  
meno gravosa  
un frattile più basso

$$\Psi_0 F_k$$

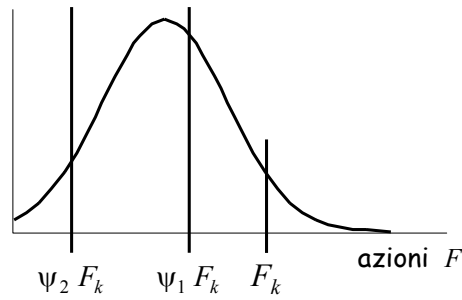
$\Psi_0 = 0.7$  c. var. per abitazione  
0.7 per vento, neve

$\Psi_0 F_k$  Valore di combinazione (un frattile più basso)



## Tornando alle azioni . . .

Infine, quando si accoppiano più azioni variabili indipendenti



Si usa per l'azione  
meno gravosa  
un frattile più basso

$$\Psi_0 F_k$$

o frattili ancora minori

$$\Psi_1 F_k$$

$$\Psi_2 F_k$$

# FINE

Per questa presentazione:

coordinamento

A. Gherzi

realizzazione

A. Gherzi

ultimo aggiornamento

5/03/2004