

**Metodo indiretto:** si paragonano i massimi effetti delle forze esterne, ossia le sollecitazioni  $S(\mu F_i)$ , con il massimo effetto  $R$  che provoca la crisi della struttura.

$$\mu = R / S(F_i)$$

$$S(\alpha q) = M_y = 1/12 \alpha q L^2 = M_{Ry} \Rightarrow 1/12 \alpha q L^2 = \sigma_y b h^2 / 6 \Rightarrow \alpha = 2 \sigma_y b h^2 / q L^2.$$

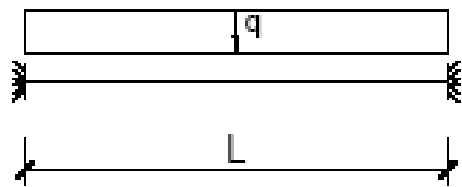


Fig. 3a

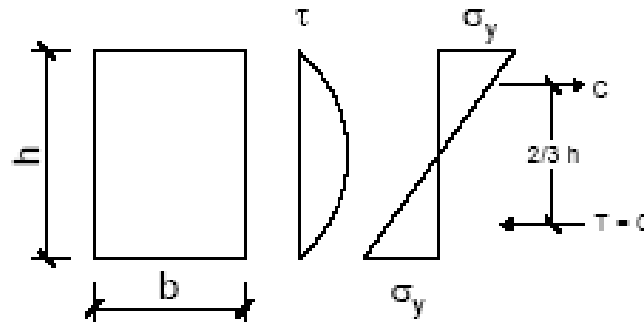


Fig. 3b

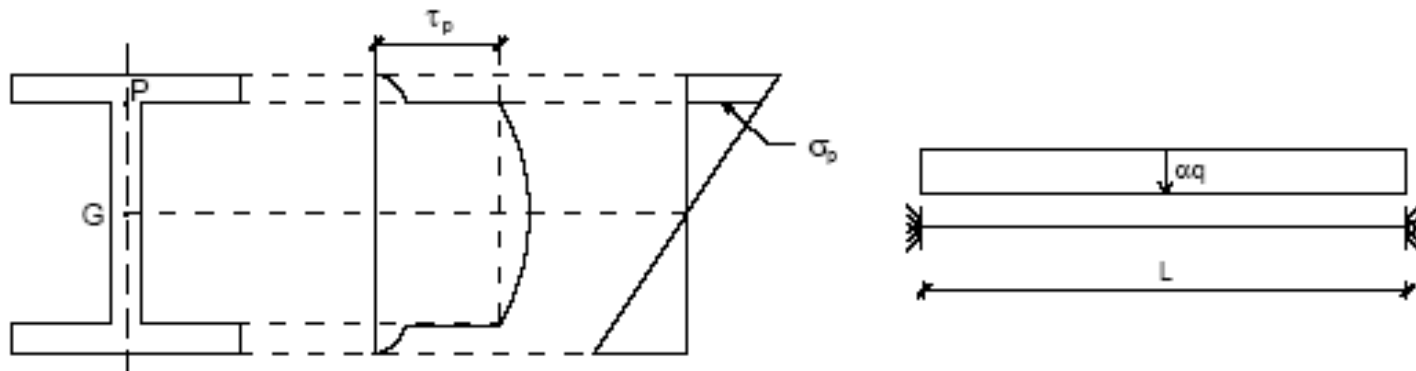
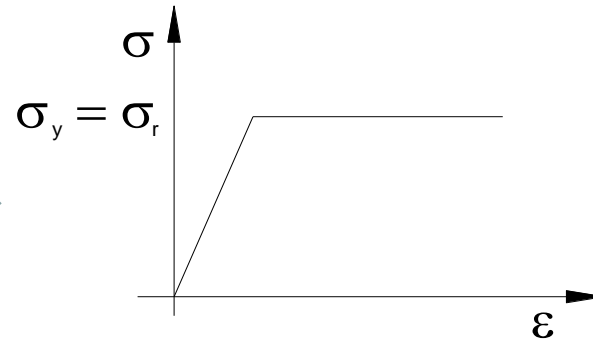
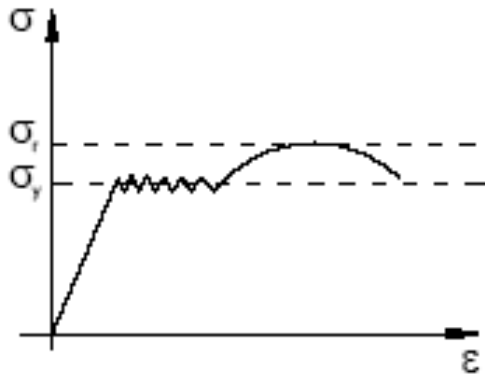


Fig. 4



$$S(\alpha F_i) < \alpha S(F_i)$$

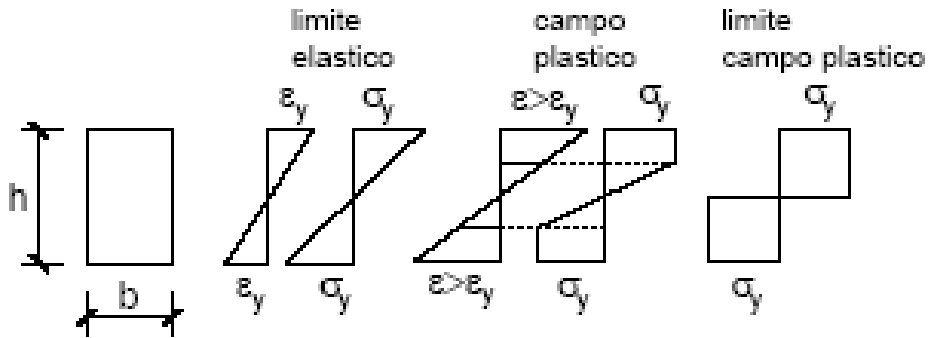
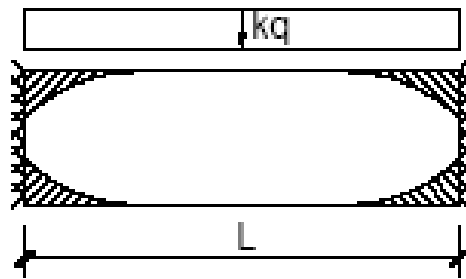


Fig. 9

( $\sigma_y = \sigma_r$ ).

$$R_y = M_{Ry} = \sigma_y b h^2 / 6.$$

$$R_r = M_{Ro} = \sigma_y b h^2 / 4.$$

$$M_{Ro} = 3/2 M_{Ry}.$$

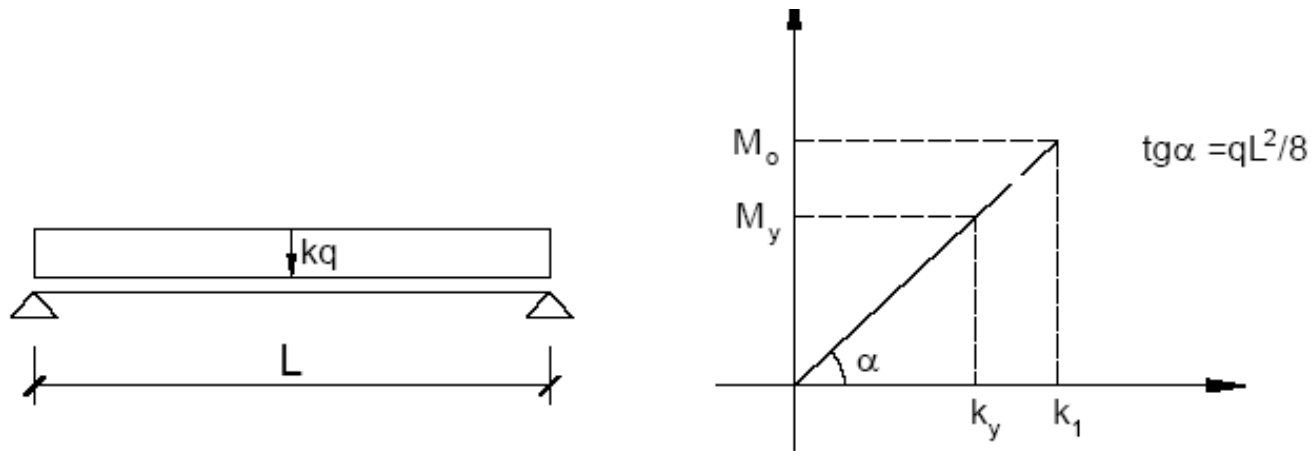


Fig. 10

I momenti resistenti invece sono:

$$M_{Ry} = \sigma_y b h^2 / 6$$

$$M_{Ro} = \sigma_y b h^2 / 4.$$

Pertanto si ha:

- crisi elastica

$$M_{Ry} = M_y$$

$$k_y = 4\sigma_y b h^2 / 3qL^2$$

- crisi plastica

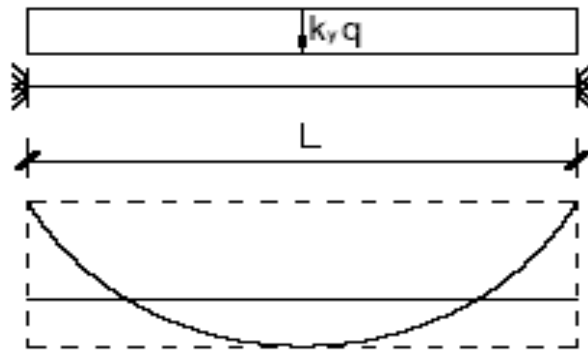
$$M_{Ro} = M_o$$

$$k_1 = 2\sigma_y b h^2 / qL^2.$$

$$k_1 = k_y \cdot 3/2 = 1.5 k_y$$

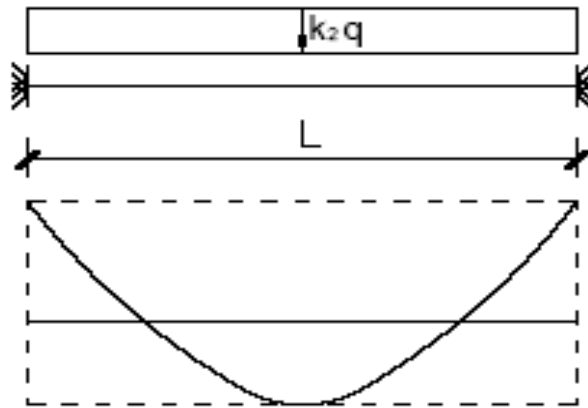
# La sicurezza strutturale

## Strutture iperstatiche



$$\begin{array}{l} \left| \begin{array}{l} 1/12 k_y q L^2 \\ 1/24 k_y q L^2 \end{array} \right. \end{array}$$

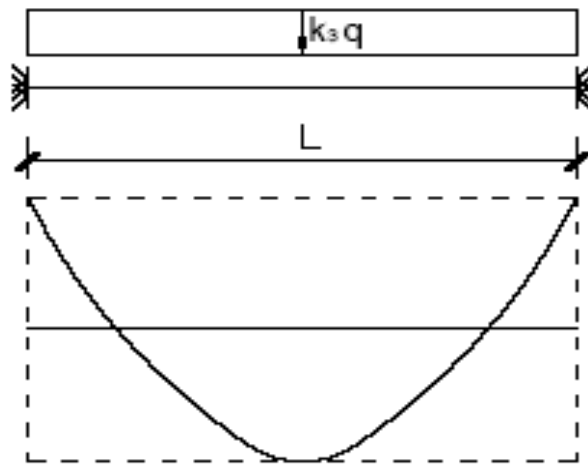
$$\left| \begin{array}{l} 1/8 k_y q L^2 \text{ campo elastico} \\ k_y \rightarrow k_1 \end{array} \right.$$



$$k_2 > k_y$$

$$\left| \begin{array}{l} M_i < 1/12 k_2 q L^2 \\ > 1/24 k_2 q L^2 \end{array} \right.$$

$$\left| \begin{array}{l} 1/8 k_2 q L^2 \text{ campo plastico} \end{array} \right.$$

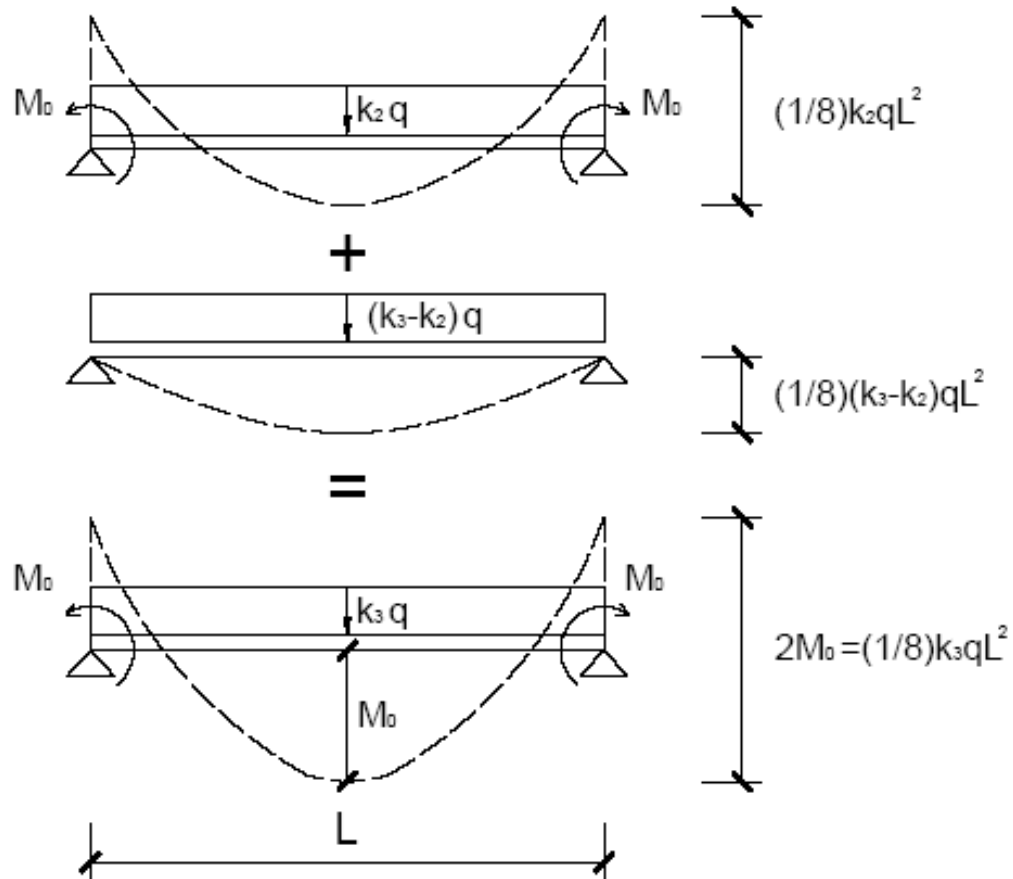


$$\left| \begin{array}{l} M_i = \sigma_y b h^2 / 4 = \\ = 1/16 k_3 q L^2 \\ 1/16 k_3 q L^2 \end{array} \right.$$

$$\left| \begin{array}{l} 1/8 k_3 q L^2 \text{ situazione limite} \end{array} \right.$$

# La sicurezza strutturale

## Strutture iperstatiche



### Collasso della trave

In mezzeria ed all'incastro si ha:

$$M_{Ro} = \sigma_y b h^2 / 4 = M_o \quad \text{in mezzeria e all'incastro.}$$

Per ragioni di equilibrio:  $M_{o(\text{incastro})} = M_{o(\text{mezzeria})} = (1/2)(1/8) k_3 q L^2 = 1/16 k_3 q L^2$ ;

$$M_o = M_{Ro} \quad \Rightarrow \quad 1/16 k_3 q L^2 = \sigma_y b h^2 / 4 \quad \Rightarrow \quad k_3 = 4 \sigma_y b h^2 / q L^2 = 2 k_y.$$

Se si ipotizza invece per assurdo un comportamento elastico della struttura fino al carico di collasso  $k_3 q$ , si ottiene un momento di incastro:

$$M_i = 1/12 k_3 q L^2$$

e, sostituendo il valore di  $k_3$  calcolato da:

$$1/16 k_3 q L^2 = M_{Ro} \quad \Rightarrow \quad k_3 = 16 M_{Ro} / q L^2$$

si ottiene:

$$M_{\text{incastro}} = 1/12 k_3 q L^2 = 4/3 M_{Ro} \quad M_{\text{mezz}} = 1/24 k_3 q L^2 = 2/3 M_{Ro}.$$

**coefficiente di redistribuzione**  $\delta$  il rapporto tra il momento ultimo redistribuito ed il momento valutato in assenza di redistribuzione

$$\delta = M_o / (4/3 M_o) = 0.75.$$

la redistribuzione dei momenti è legata alla **possibilità di rotazioni plastiche delle sezioni** d'incastro senza pervenire alla rottura dopo il superamento della fase elastica.



1. **Modello della struttura e dei singoli elementi componenti;**
2. **Modello delle azioni agenti;**
3. **Modello dei vincoli;**
4. **Modello dei legami costitutivi.**

**Le variabili sono di tipo aleatorio**  **Approccio di tipo probabilistico**

**Se il risultato di un esperimento con condizioni fissate è sempre lo stesso**

⇒ **Processo deterministico**

**Se il risultato di un esperimento con condizioni fissate non è sempre lo stesso**

⇒ **Processo casuale  
(aleatorio, stocastico, random)**

### **Processo aleatorio**

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$$

$f_i$  **frequenza dell'evento** = numero di volte in cui  $x=x_i$

**N** = numero di volte in cui è stato ripetuto l'esperimento

## Richiami di statistica: Variabile casuale discreta

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}.$$

$f_i =$  **frequenza**, numero di volte in cui la variabile  $x=x_i$   
 $N =$  numero totale degli esperimenti.

$$\sum_{i=1}^k f_i = N$$

Probabilità dell'evento  $x=x_i$   $P_i = \frac{f_i}{N}$   $0 \leq P_i \leq 1$

$$\sum_{i=1}^k P_i = 1$$

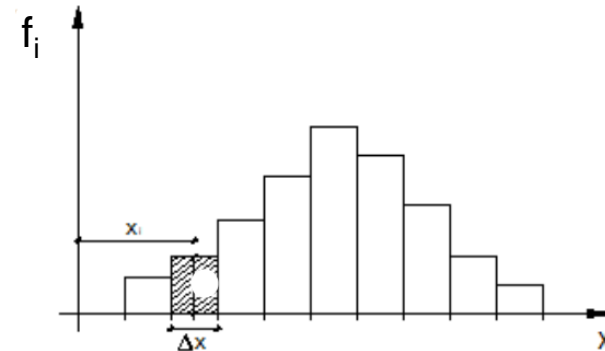
Valor medio

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^k \frac{f_i}{N} x_i = \sum_{i=1}^k P_i x_i$$

## Richiami di statistica: Variabile casuale discreta

Variabile casuale continua

$$x_{inf} \leq x \leq x_{sup}$$



Istogramma delle frequenze

$f_i =$  **frequenza**, numero di volte in cui la variabile  $x_a \leq x \leq x_a + \Delta x$

$N =$  numero totale degli esperimenti.

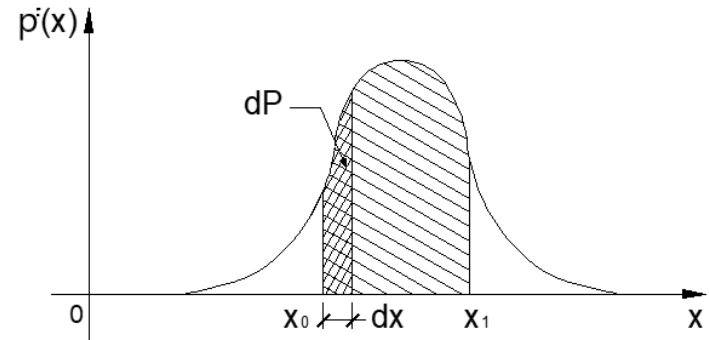
Si introduce

$$p_i = \frac{P_i}{\Delta x} \quad \Rightarrow \quad P_i = p_i \Delta x$$

## Richiami di statistica: Variabile casuale continua

$$x_{inf} \leq x \leq x_{sup}$$

Per  $N \rightarrow \infty$  e  $\Delta x \rightarrow dx$



Distribuzione continua della densità di probabilità

Probabilità dell'evento  $x=x_i$   $dP = P[x_i \leq x \leq x_i + dx] = p(x_i) dx$

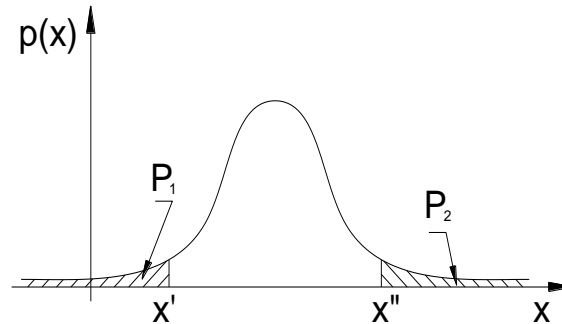
$$P[-\infty \leq x \leq +\infty] = \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) dx = 1$$

Valor medio  
(valore più probabile)  $x_m = \int_{-\infty}^{+\infty} x p(x) dx$

Varianza  
(dispersione intorno ad  $\bar{x}$ )  $\delta^2_x = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 p(x) dx$

## Richiami di statistica: Variabile casuale continua.

### I frattili



**frattile inferiore**  $x'$  di ordine  $P_1\%$  quel valore di  $x$  che ha la probabilità  $P_1$  di non essere superato

$$P_1(x \leq x') = \int_{-\infty}^{x'} p(x) dx.$$

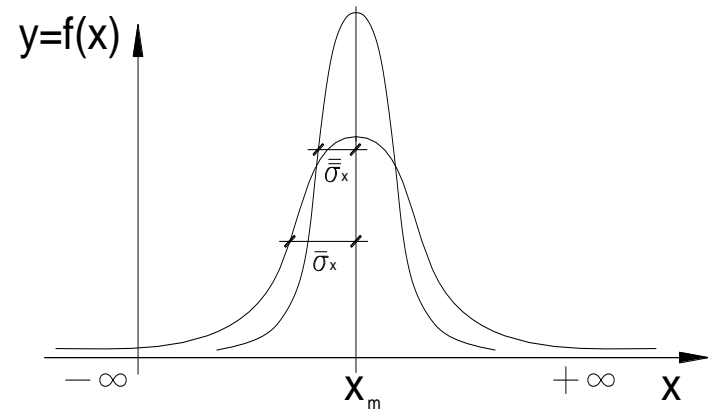
**frattile superiore**  $x''$  di ordine  $P_2\%$  quel valore di  $x$  che ha la probabilità  $P_2$  di essere superato

$$P_2(x \geq x'') = \int_{x''}^{+\infty} p(x) dx$$

## Richiami di statistica: Variabile casuale continua.

### Distribuzione normale

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{x-x_m}{\sigma_x \sqrt{2}}\right)^2}$$



frattile inferiore  $x_{k(i)}$

$$P(x < x_{k(i)}) = \int_{-\infty}^{x_{k(i)}} p(x) dx = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_{k(i)}} e^{-\left(\frac{x-x_m}{\sigma_x \sqrt{2}}\right)^2} dx$$

frattile superiore  $x_{k(s)}$  è dato da

$$P(x > x_{k(s)}) = \int_{x_{k(s)}}^{+\infty} p(x) dx = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{x_{k(s)}}^{+\infty} e^{-\left(\frac{x-x_m}{\sigma_x \sqrt{2}}\right)^2} dx$$

## Richiami di statistica: Variabile casuale continua.

### Distribuzione normale

Operata la sostituzione di variabile nell'integrale

$$t = (x - x_m) / (\sigma_x \sqrt{2}) \Rightarrow dx = \sqrt{2} \sigma_x dt$$

definiti i limiti di integrazione per la nuova variabile t:

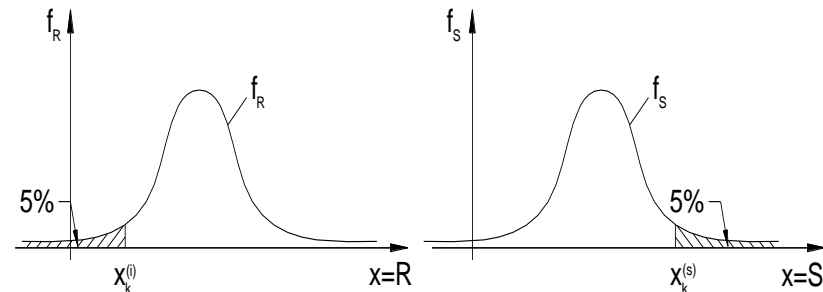
$$x_k \Rightarrow t_k = (x_k - x_m) / (\sigma_x \sqrt{2})$$



$$P(x < x_{k(i)}) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \sigma_x \sqrt{2} \int_{-\infty}^{t_k} e^{-t^2} dt = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{t_k} e^{-t^2} dt$$

Risolvendo l'integrale si ha

|             |               |                          |               |                             |
|-------------|---------------|--------------------------|---------------|-----------------------------|
| $P = 0.05$  | $\Rightarrow$ | $t_k = -1.64 / \sqrt{2}$ | $\Rightarrow$ | $x_k = x_m - 1.64 \sigma_x$ |
| $P = 0.015$ | $\Rightarrow$ | $t_k = -2.16 / \sqrt{2}$ | $\Rightarrow$ | $x_k = x_m - 2.16 \sigma_x$ |
| $P = 0.005$ | $\Rightarrow$ | $t_k = -2.58 / \sqrt{2}$ | $\Rightarrow$ | $x_k = x_m - 2.58 \sigma_x$ |
| $P = 0.95$  | $\Rightarrow$ | $t_k = +1.64 / \sqrt{2}$ | $\Rightarrow$ | $x_k = x_m + 1.64 \sigma_x$ |





La sicurezza e le prestazioni di una struttura o di una parte di essa vanno valutate in relazione all'insieme degli stati limite che si possono verificare durante la vita nominale di progetto.

**Stato limite** è la condizione superata la quale la struttura non soddisfa più le esigenze per le quali è stata progettata.

In particolare, secondo quanto stabilito nelle norme specifiche per le varie tipologie strutturali, strutture ed elementi strutturali devono soddisfare i seguenti requisiti:

- ***sicurezza nei confronti di stati limite ultimi (SLU)***: crolli, perdite di equilibrio e dissesti gravi, totali o parziali, che possano compromettere l'incolumità delle persone ovvero comportare la perdita di beni, ovvero provocare gravi danni ambientali e sociali, ovvero mettere fuori servizio l'opera;

- ***sicurezza nei confronti di stati limite di esercizio (SLE)***: tutti i requisiti atti a garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio;

- ***Sicurezza antincendio:*** capacità di garantire le prestazioni strutturali previste in caso d'incendio, per un periodo richiesto;
- ***Durabilità*** capacità della costruzione di mantenere, nell'arco della vita nominale di progetto, i livelli prestazionali per i quali è stata progettata, tenuto conto delle caratteristiche ambientali e del livello previsto di manutenzione;
- ***robustezza:*** capacità di evitare danni sproporzionati rispetto all'entità delle cause innescanti eccezionali quali esplosioni e urti.

**Il superamento di uno stato limite ultimo** ha carattere irreversibile.

**Il superamento di uno stato limite di esercizio** può avere carattere reversibile o irreversibile.

Nel primo caso il danno o la deformazione, reversibili, cessano non appena cessa la causa che ha portato al superamento dello stato limite.

Nel secondo caso si manifestano danneggiamenti irreversibili, nella struttura e nella stessa costruzione, o deformazioni permanenti inaccettabili.

**I materiali ed i prodotti**, per poter essere utilizzati nelle opere devono essere sottoposti a procedure e prove sperimentali di accettazione.

**Lo stato limite ultimo è definito come lo stato al superamento del quale si ha:**

- a) perdita di equilibrio della struttura o di una sua parte, considerati come corpi rigidi;**
- b) deformazioni o spostamenti eccessivi**
- c) raggiungimento della massima capacità di resistenza di parti di strutture, collegamenti, fondazioni**
- d) raggiungimento della massima capacità di resistenza della struttura nel suo insieme;**
- e) raggiungimento di una condizione di cinematismo irreversibile;**
- f) raggiungimento di meccanismi di collasso nei terreni;**
- g) rottura di membrature e collegamenti per fatica;**
- h) rottura di membrature e collegamenti per altri effetti dipendenti dal tempo;**
- i) instabilità di parti della struttura o del suo insieme.**

**Il grado di sicurezza nei confronti degli SLU dovrà essere, tanto più elevato, quanto più gravi sono le conseguenze dell'evento sfavorevole.**

# *La sicurezza strutturale*

---

## *Stato Limite Ultimo (SLU)*

**Per gli SLU è necessario l'impiego di modelli plastici o non lineari**

**Nel caso si adotti un'analisi elastica lineare si rinuncia a utilizzare la capacità d'insieme della costruzione e ci si limita a sfruttare, cautelativamente e a favore di sicurezza, la capacità delle singole sezioni. La struttura ha quindi un eccesso di capacità (sovracapacità) rispetto alla capacità minima ammessa. La significativa sovra capacità conseguita valutando la domanda con un'analisi elastica lineare e verificando le sezioni a rottura si può leggere, con un'analisi plastica o non lineare, seguendo la domanda e la sua evoluzione al plasticizzarsi delle sezioni.**

**Per contenere la sovracapacità è prevista la redistribuzione.**

### *Stato Limite di Esercizio (SLE)*

**Lo stato limite di esercizio è definito come lo stato al superamento del quale corrisponde la perdita di una particolare funzionalità che condiziona o limita la prestazione dell'opera.**

- a) danneggiamenti locali (ad es. fessurazione del calcestruzzo) che possono ridurre la durabilità della struttura, la sua efficienza o il suo aspetto**
- b) *Spostamenti e deformazioni* che possono limitare l'uso della costruzione, la sua efficienza e il suo aspetto**
- c) *Spostamenti e deformazioni* che possono compromettere l'efficienza e l'aspetto di elementi non strutturali, impianti, macchinari**
- d) vibrazioni che possono compromettere l'uso della costruzione**
- e) danni per fatica che possono compromettere la durabilità**
- f) corrosione e/o degrado dei materiali in funzione del tempo e dell'ambiente di esposizione che possano compromettere la durabilità.**

**Quando necessario, i rischi derivanti dagli incendi devono essere limitati progettando e realizzando le costruzioni in modo tale da garantire la resistenza e la stabilità degli elementi portanti, nonché da limitare la propagazione del fuoco e dei fumi.**

### *Durabilità*

La **durabilità**, definita come conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali e delle strutture, è una proprietà essenziale e può essere garantito progettando la costruzione, e la specifica manutenzione, in modo tale che il degrado della struttura, che si dovesse verificare durante la sua vita nominale di progetto, non riduca le prestazioni della costruzione al di sotto del livello previsto.

Tale requisito può essere soddisfatto attraverso l'adozione di appropriati provvedimenti stabiliti tenendo conto delle previste condizioni ambientali e di manutenzione ed in base alle peculiarità del singolo progetto, tra cui:

- a) scelta opportuna dei materiali;
- b) dimensionamento opportuno delle strutture;
- c) scelta opportuna dei dettagli costruttivi;
- d) adozione di tipologie costruttive e strutturali che consentano, ove possibile, l'ispezionabilità delle parti strutturali;



### *Durabilità*

- e) pianificazione di misure di protezione e manutenzione; oppure, quando queste non siano previste o possibili, progettazione rivolta a garantire che il deterioramento della costruzione o dei materiali che la compongono non ne causi il collasso;**
- f) impiego di prodotti e componenti chiaramente identificati in termini di caratteristiche meccanico-fisico-chimiche, indispensabili alla valutazione della sicurezza, e dotati di idonea qualificazione;**
- g) applicazione di sostanze o ricoprimenti protettivi dei materiali, soprattutto nei punti non più visibili o difficilmente ispezionabili ad opera completata;**
- h) adozione di sistemi di controllo, passivi o attivi, adatti alle azioni e ai fenomeni ai quali l'opera può essere sottoposta.**

**Le condizioni ambientali devono essere identificate in fase di progetto in modo da valutarne la rilevanza nei confronti della durabilità.**

**Il requisito della robustezza è inteso come la “capacità di evitare danni sproporzionati rispetto all’entità di possibili cause innescanti eccezionali quali esplosioni e urti”.**

**Le misure che possono essere adottate a tal fine nella progettazione sono legate all’uso previsto della costruzione e alle conseguenze del suo eventuale collasso. L’effettivo livello di robustezza attiene, più in generale, alla corretta concezione dell’organismo strutturale e dei suoi dettagli costruttivi.**

**In via generale la progettazione delle costruzioni condotta secondo le prescrizioni contenute nelle NTC, tenuto conto dei criteri di progettazione per le azioni sismiche, garantisce il conseguimento di livelli di robustezza che possono essere ritenuti, in generale, soddisfacenti.**

**Un adeguato livello di robustezza, in relazione all'uso previsto della costruzione ed alle conseguenze di un suo eventuale collasso, può essere garantito facendo ricorso ad una o più tra le seguenti strategie di progettazione:**

- a) progettazione della struttura in grado di resistere ad azioni eccezionali di carattere convenzionale, combinando valori nominali delle azioni eccezionali alle altre azioni esplicite di progetto;**
- b) prevenzione degli effetti indotti dalle azioni eccezionali alle quali la struttura può essere soggetta o riduzione della loro intensità;**
- c) adozione di una forma e tipologia strutturale poco sensibile alle azioni eccezionali considerate;**
- d) adozione di una forma e tipologia strutturale tale da tollerare il danneggiamento localizzato causato da un'azione di carattere eccezionale;**
- e) realizzazione di strutture quanto più ridondanti, resistenti e/o duttili è possibile;**
- f) adozione di sistemi di controllo, passivi o attivi, adatti alle azioni e ai fenomeni ai quali l'opera può essere sottoposta.**

Le opere devono essere verificate:

- a) per gli **stati limite ultimi** che possono verificarsi;
- b) per gli **stati limite di esercizio** definiti in relazione alle prestazioni attese;
- c) quando necessario, nei confronti degli effetti derivanti dalle azioni termiche connesse con lo sviluppo di un **incendio**.

Le verifiche di sicurezza delle opere devono essere contenute nei documenti di progetto, con riferimento alle prescritte caratteristiche meccaniche dei materiali e alla caratterizzazione geotecnica del terreno, dedotta in base a specifiche indagini. La struttura deve essere verificata nelle fasi intermedie, tenuto conto del processo costruttivo; le verifiche per queste situazioni transitorie sono generalmente condotte nei confronti dei soli stati limite ultimi.

**Sono possibili diversi approcci alla valutazione della sicurezza strutturale:**

- **Metodo di I livello: metodo semiprobabilistico agli stati limite (NTC18);**
- **Metodo di II livello:**
- **Metodo di III livello: valutazione diretta della probabilità di insuccesso.**

### *Metodo di III livello: Valutazione diretta della probabilità di insuccesso*

Le quantità fisiche riguardanti la resistenza e le azioni sono analizzate in chiave statistica. Ciò significa che la verifica della sicurezza deve essere intesa in senso probabilistico.

Per un qualsiasi stato limite, la sicurezza strutturale  $P_{si}$  può essere espressa dalla probabilità che  $R/S$  sia non maggiore di 1:

$$P[R/S \leq 1] \leq P^*$$

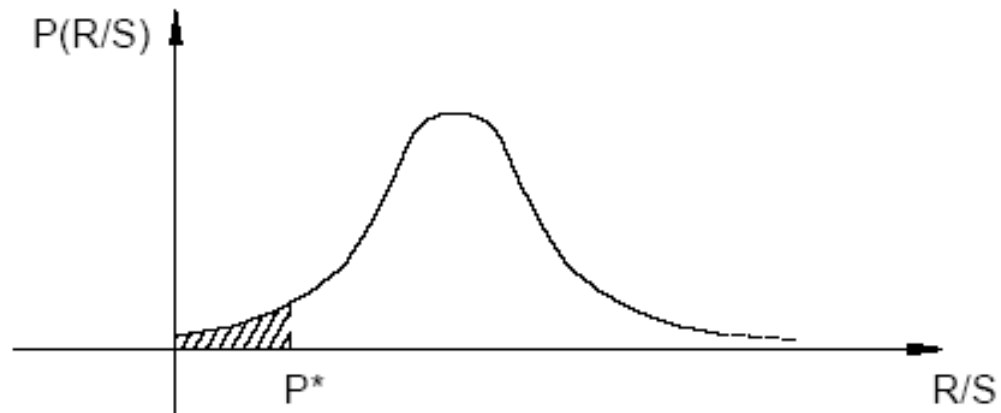
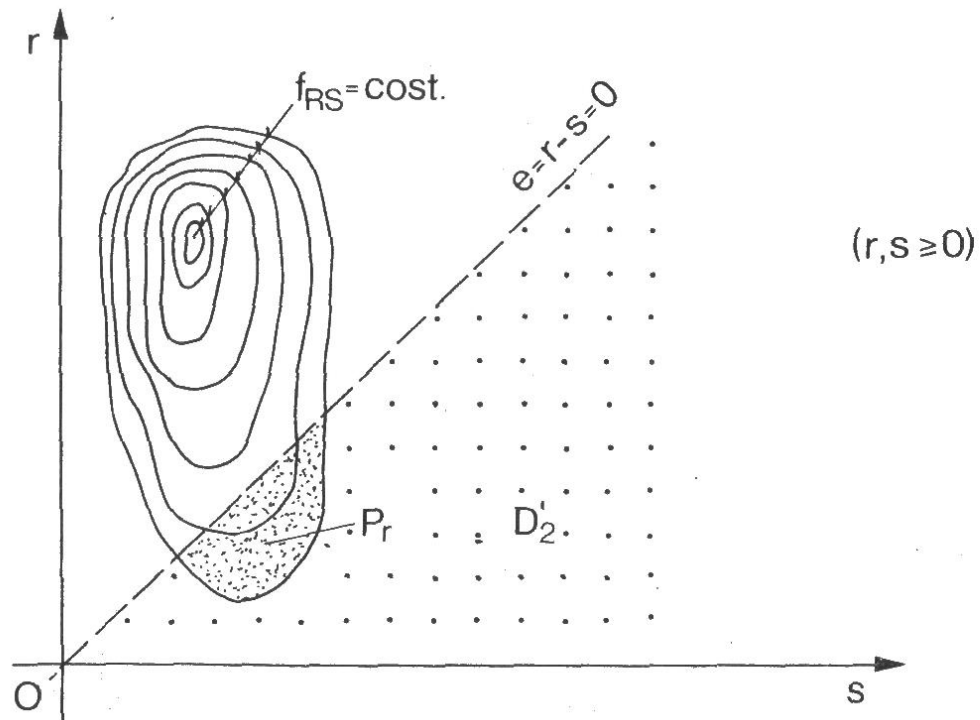


Fig. 24

La probabilità di insuccesso ammissibile  $P^*$  è funzione del tipo di verifica ed è fissato dalle normative .

$P[R-S \leq 0] \leq P_r$



Si ipotizza l'indipendenza reciproca delle due variabili aleatorie **resistenza R** ed **effetto delle azioni S**.

Si associa a ciascun valore  $x_s$  la probabilità che la resistenza gli sia inferiore

$$P\{x_R < x_s\} = \int_{-\infty}^{x_s} f_R(x) dx = F_R(x_s)$$

A ciascun valore si associa la probabilità dell'evento  $x_s$

$$P_r = P\{R < S\} = \int_{-\infty}^{+\infty} F_R(x) f_s(x) dx$$

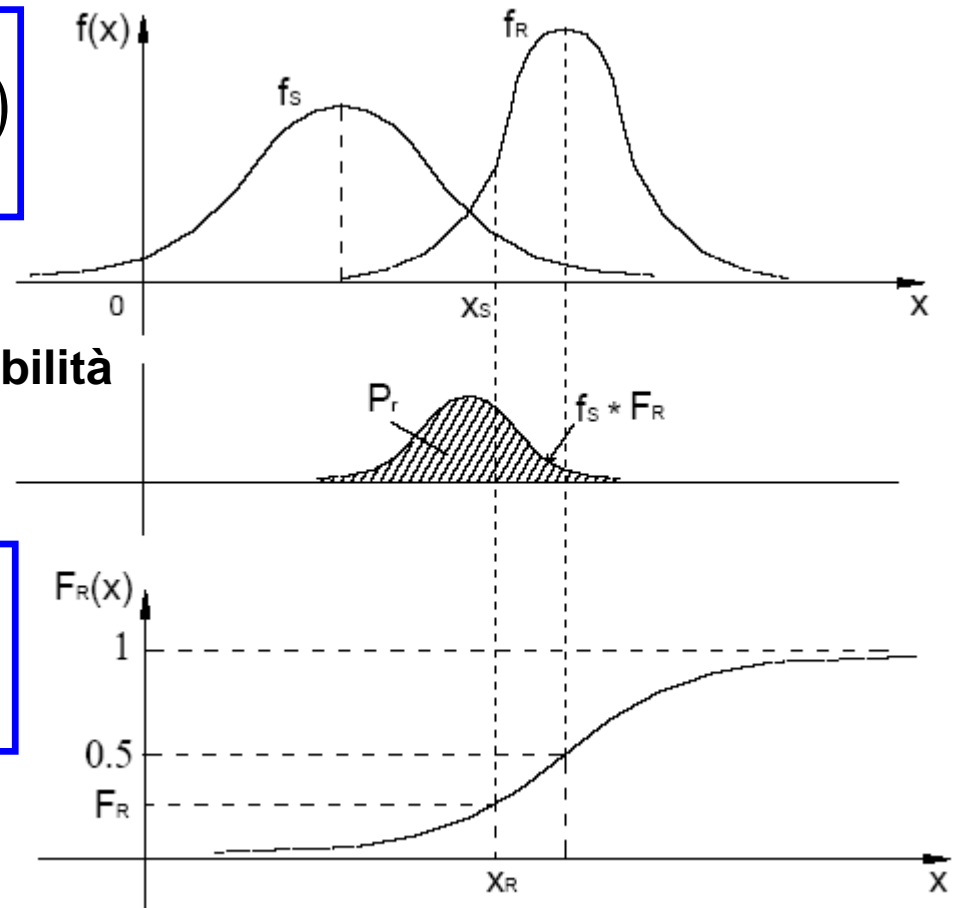


Fig. 25



# La sicurezza strutturale

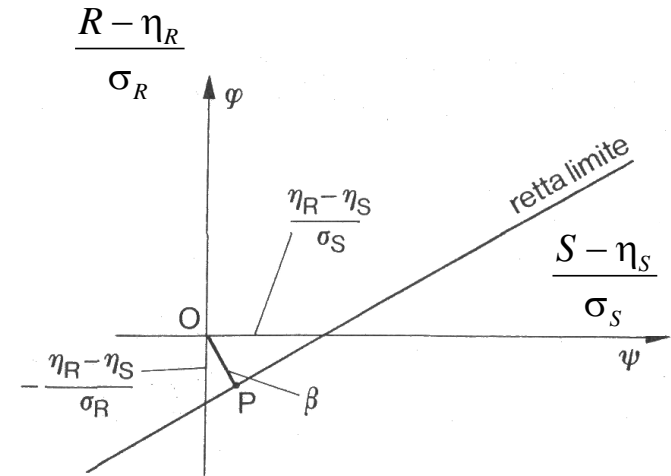
## Metodo di II livello

Se R e S sono non correlate

$$\eta_E \geq \beta \sigma_E$$

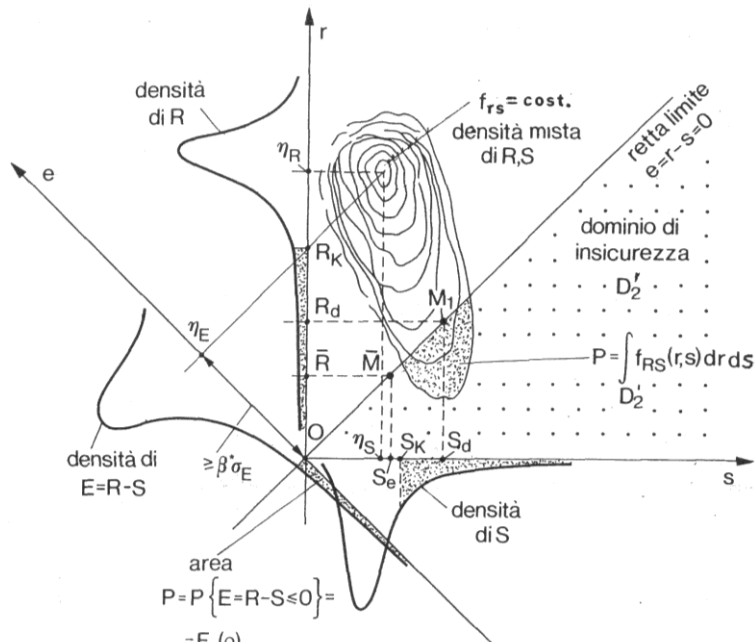
dove

$$\eta_E = \eta_R - \eta_S \quad \sigma_E = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$$



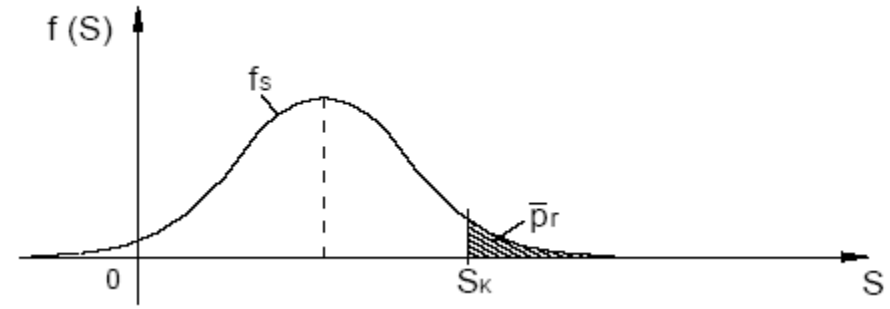
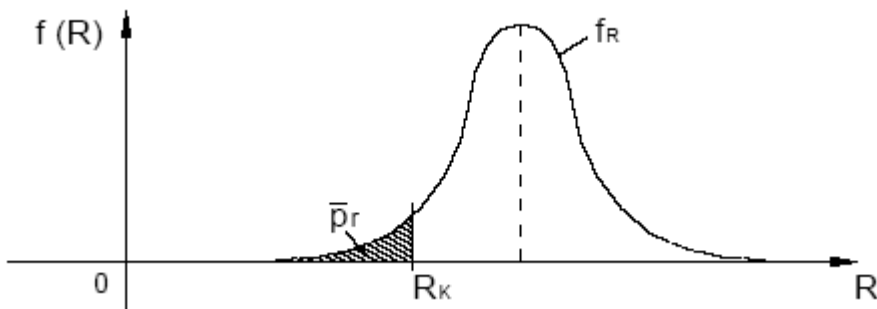
$$z = r - s = 0$$

$$Z = \varphi \sigma_R - \psi \sigma_S + \eta_R - \eta_S = 0$$



La sicurezza strutturale può, in via semplificativa, essere introdotta implicitamente, rappresentando la resistenza e le azioni non attraverso la loro densità di probabilità congiunta ma mediante **i valori caratteristici delle resistenze e delle azioni**, definiti rispettivamente come i frattili inferiori delle resistenze e quelli tra i frattili (superiori o inferiori) delle azioni che minimizzano la sicurezza. Le incertezze vengono coperte tramite l'introduzione dei coefficienti parziali di sicurezza.

Normalmente i frattili superiori hanno probabilità del 5% di essere superati, i frattili inferiori probabilità del 5% di non essere superati .



$R_d$  **capacità di progetto** in termini di resistenza, duttilità e/o spostamenti della struttura o della membratura strutturale. E' funzione delle caratteristiche meccaniche dei materiali  $f_d$  e dei valori nominali delle grandezze geometriche

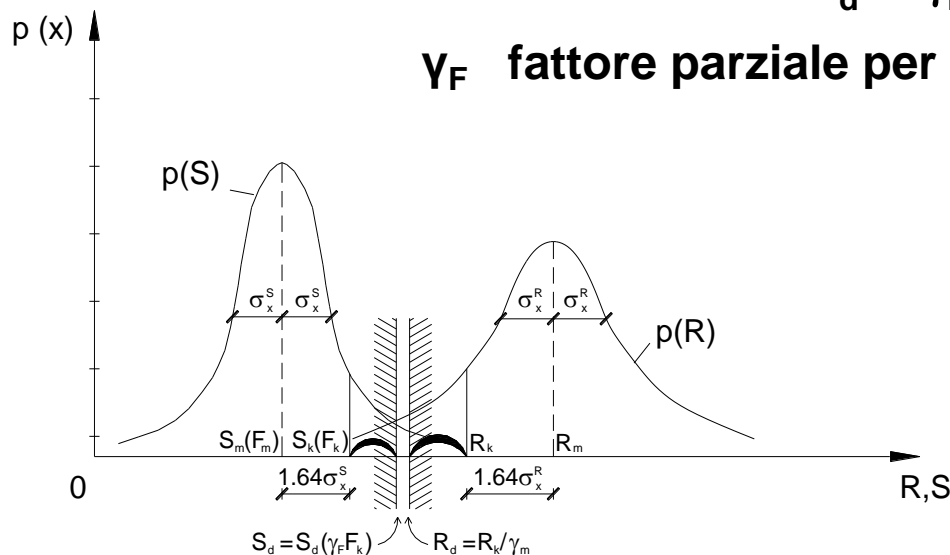
$$f_d = f_k / \gamma_m$$

$\gamma_m$  fattore parziale per le resistenze,

$S_d$  **valore di progetto della domanda** funzione dei valori di progetto delle azioni  $F_d$  e dei valori nominali delle grandezze geometriche.

$$S_d = \gamma_F S_k$$

$\gamma_F$  fattore parziale per le azioni.



$$R_d \geq S_d$$

**$C_d$**  **valore limite di progetto** associato a ciascun aspetto di funzionalità esaminato

**$E_d$**  **valore di progetto dell'effetto delle azioni.**

$$C_d \geq E_d$$

**Nell'approccio classico alla teoria della sicurezza le incertezze intrinseche nel modello di calcolo vengono accorpate con le incertezze sulle azioni.**

**Accade così che l'incertezza intrinseca del modello sfumi nelle incertezze proprie delle azioni, scomparendo spesso dalla comune consapevolezza. Conseguentemente il modello diviene, per chi lo definisce, estraneo al controllo delle incertezze, laddove invece, specie per le costruzioni esistenti, è il loro principale contenitore.**

Le resistenze di calcolo  $f_d$  indicano le resistenze dei materiali, conglomerato cementizio ed acciaio, ottenute mediante l'espressione:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m}$$

$f_k$  sono le resistenze caratteristiche del materiale,

$\gamma_m$  sono i coefficienti parziali per le resistenze, che variano in funzione del materiale, della situazione di progetto e della particolare verifica in esame.

Per quanto riguarda gli **SLU**

| Materiali  |      |        |         |
|------------|------|--------|---------|
|            | c.a. | c.a.p. | acciaio |
| $\gamma_m$ | 1.5  | 1.5    | 1.15    |

Per quanto riguarda gli **SLE**, i coefficienti parziali di sicurezza  $\gamma_m$  assumono valori differenti in base allo stato limite esaminato (fessurazione, tensione, deformazione).

La vita nominale di progetto  $V_N$  è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, manterrà specifici livelli prestazionali.

Tab. 2.4.I – Valori minimi della Vita nominale  $V_N$  di progetto per i diversi tipi di costruzioni

| TIPI DI COSTRUZIONI |   | Valori minimi di $V_N$ (anni) |
|---------------------|---|-------------------------------|
| 1                   | Costruzioni temporanee e provvisorie            | 10                            |
| 2                   | Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari | 50                            |
| 3                   | Costruzioni con livelli di prestazioni elevati  | 100                           |

E' il parametro a cui viene fatto riferimento in sede progettuale per le verifiche dei fenomeni dipendenti dal tempo, (ad esempio: fatica, durabilità, ecc.), rispettivamente attraverso la scelta ed il dimensionamento dei particolari costruttivi, dei materiali e delle eventuali applicazioni di misure protettive per garantire il mantenimento dei livelli di affidabilità, funzionalità e durabilità richiesti.

## *La sicurezza strutturale*

---

### *Vita Nominale di Progetto*

**Il periodo di ritorno dei sovraccarichi e delle azioni climatiche agenti sulla costruzione non è correlato alla vita nominale, calibrati per essere utilizzati congiuntamente ai valori caratteristici delle azioni stesse. Questi ultimi sono definiti indipendentemente dalla vita nominale attesa per la costruzione con un preassegnato periodo di ritorno (a titolo esemplificativo: 50 anni per le azioni ambientali, 1000 anni per le azioni da traffico)**

**Il periodo di ritorno dell'azione sismica agente sulla costruzione, invece, è funzione anche della vita nominale della costruzione, oltre che della classe d'uso, del tipo di terreno e della pericolosità del sito**

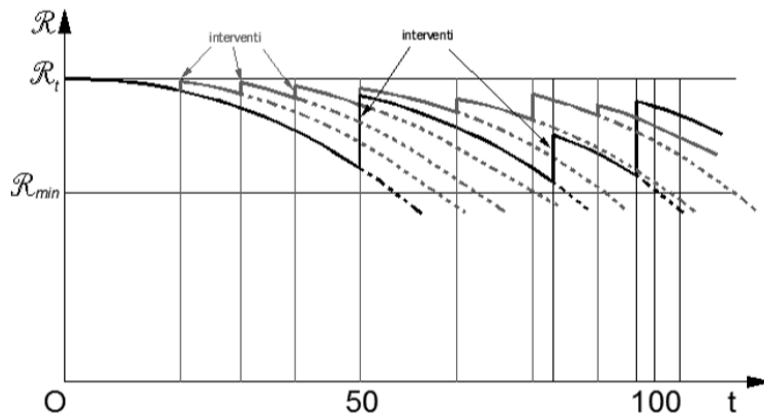


# La sicurezza strutturale

---

## Vita Nominale di Progetto

**Pertanto, se le condizioni ambientali e d'uso si mantengono, nel corso di  $V_N$ , nei limiti previsti, sarà possibile utilizzare l'opera senza interventi significativi di riparazione o di manutenzione straordinaria. Peraltro, una volta effettuati detti interventi, la vita nominale di progetto originaria sarà sostanzialmente ripristinata, cosicché risulta possibile che grazie a interventi successivi, la vita effettiva della costruzione possa essere molto maggiore della vita nominale di progetto. La vita nominale di progetto viene così a perdere ogni connotazione di carattere "biologico", perché essa sostanzialmente si rinnova a seguito degli interventi di riparazione o di manutenzione straordinaria.**



**Non è necessario concentrare gli interventi al termine di  $V_N$ , perché sono possibili anche strategie d'intervento alternative, che prevedono interventi più contenuti e più ravvicinati nel tempo.**

La classe d'uso, invece, definisce i livelli minimi di sicurezza differenziati in relazione alla funzione svolta nella costruzione e, pertanto, alle conseguenze che ne derivano in caso di fallimento.

**Classe I:** Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.

**Classe II:** Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.

**Classe III:** Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.

**Classe IV:** Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B D.M. "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica

Si definisce **azione** ogni causa o insieme di cause capace di indurre stati limite in una struttura.

### 1. Classificazione delle azioni secondo il loro modo di esplicarsi

**a) dirette:** Forze concentrate, carichi distribuiti, fissi o mobili;

**b) indirette:**

1. quantità cinematiche localizzate:

- i. cedimenti e spostamenti impressi assoluti (ovvero nei vincoli esterni);
- ii. cedimenti e spostamenti impressi relativi (tra parti dell'organismo strutturale o in vincoli interni);

2. quantità cinematiche distribuite:

- i. effetti di variazioni di temperatura;
- ii. deformazioni iniziali e anelastiche (ritiro, viscosità, precompressione);

**c) degrado:**

1. endogeno: alterazione naturale del materiale di cui è composta la struttura;

2. esogeno: alterazione a seguito di agenti esterni alla struttura delle caratteristiche materiali di questa.

**Classificazione delle azioni secondo la risposta strutturale**

- a) *statiche***: azioni che applicate alla struttura non provocano accelerazioni significative della stessa o di alcune sue parti;
  
- b) *pseudo statiche***: azioni dinamiche rappresentabili mediante un'azione statica equivalente;
  
- c) *dinamiche***: azioni che causano significative accelerazioni della struttura o dei suoi componenti.

### Classificazione delle azioni secondo la variazione della loro intensità nel tempo

**a) *permanenti (G)***: azioni che agiscono durante tutta la vita nominale della costruzione e la loro variazione di intensità nel tempo è così piccola e lenta da poterle considerare con sufficiente approssimazione costanti nel tempo:

- peso proprio di tutti gli elementi strutturali; peso proprio del terreno, quando pertinente; forze indotte dal terreno (esclusi gli effetti di carichi variabili applicati al terreno); forze risultanti dalla pressione dell'acqua (quando si configurino costanti nel tempo) (**G1**);
- peso proprio di tutti gli elementi non strutturali (**G2**);
- spostamenti e deformazioni impressi, incluso il ritiro;
- pretensione e precompressione (**P**).

**b) *variabili (Q)*:** azioni che agiscono sulla struttura o sull'elemento strutturale con valori istantanei che possono risultare sensibilmente diversi fra loro nel corso della vita nominale della struttura;

Sovraccarichi;

azione del vento,

azione della neve,

azioni dovute alle variazioni termiche.

**1. *di lunga durata*:** agiscono con un'intensità significativa, anche non continuativamente, per un tempo non trascurabile rispetto alla vita nominale della struttura;

**2. *di breve durata*:** agiscono per un periodo di tempo breve rispetto alla vita nominale della struttura;

**c) eccezionali (A):** sono azioni che si verificano solo eccezionalmente nel corso della vita nominale della struttura:

- a. incendi
- b. esplosioni
- c. urti ed impatti

**d) Sismiche (E):** sono azioni derivanti da terremoti.



Il valore di progetto di ciascuna delle azioni agenti sulla struttura  $F_d$  è ottenuto dal suo valore caratteristico  $F_k$ , inteso come frattile 95% della distribuzione statistica.

Nel caso di azioni variabili caratterizzate da distribuzioni dei valori estremi dipendenti dal tempo, si assume come valore caratteristico quello caratterizzato da un assegnato **periodo di ritorno**.

Per le **azioni ambientali** (neve, vento, temperatura) il periodo di ritorno è posto uguale a 50 anni, corrispondente ad una probabilità di eccedenza del 2% su base annua;

per le **azioni da traffico** sui ponti stradali il periodo di ritorno è convenzionalmente assunto pari a 1000 anni.

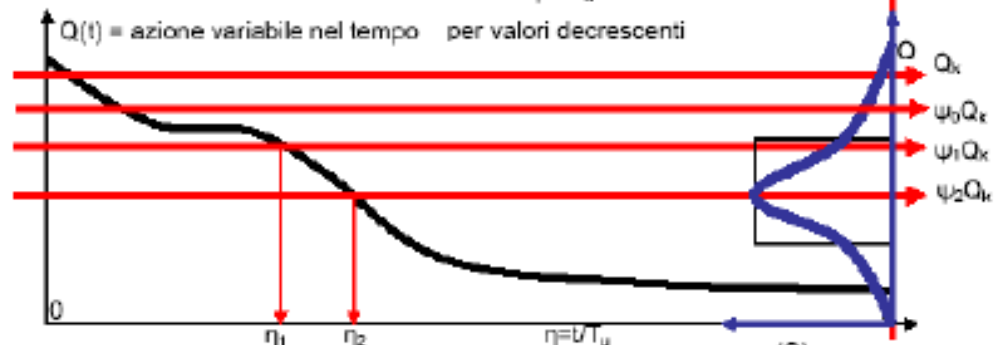
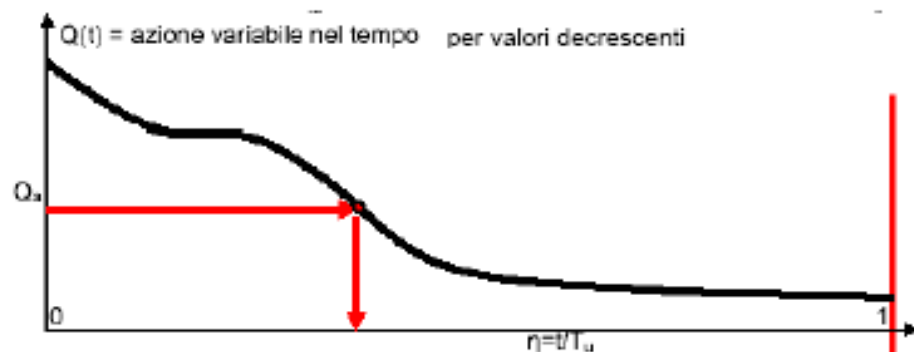
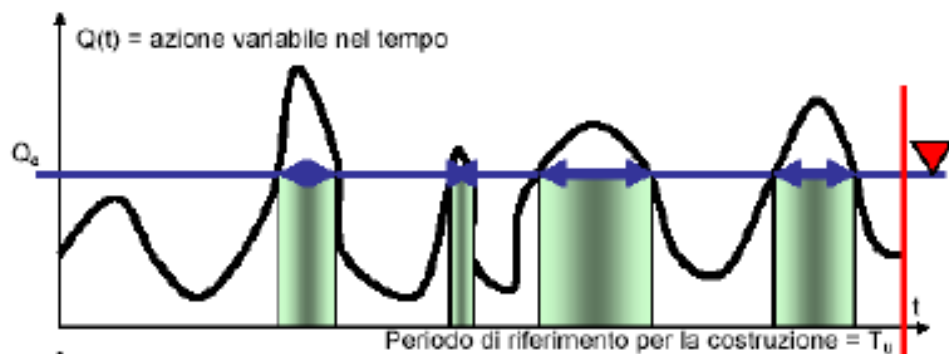
*Azioni sulle costruzioni: Variabilità nel tempo*

Individuata una azione variabile nel tempo  $Q(t)$ , ed a un periodo di riferimento  $T_u$ , legato alla vita nominale di progetto dell'opera in esame. Sono calcolabili i seguenti valori di riferimento dell'azione:

- $Q_k$ , **valore caratteristico dell'azione**; è il valore frattile della popolazione dei massimi caratterizzato da una probabilità del 95% di non essere superato in  $T_u$ .
- $\psi_1 \cdot Q_k$ , **valore frequente dell'azione**; è ottenuto dal valore caratteristico attraverso un fattore positivo  $\psi_1 \leq 1$ . Esso è scelto in modo da essere superato per un periodo totale di tempo che rappresenti una piccola frazione del periodo di riferimento. Indicativamente, esso può assumersi uguale al frattile 95% della distribuzione temporale dell'intensità

### *Azioni sulle costruzioni: Variabilità nel tempo*

- $\psi_2 \cdot Q_k$  , **valore quasi-permanente dell'azione**; è ottenuto dal valore caratteristico attraverso un fattore positivo  $\psi_2 \leq 1$ , che riduce il valore caratteristico ad un valore tale da essere superato oltre il 50% del tempo nel periodo di riferimento. Indicativamente, esso può assumersi uguale alla media della distribuzione temporale dell'intensità
- $\psi_0 \cdot Q_k$ , **valore di combinazione dell'azione**; è ottenuto dal valore caratteristico attraverso un fattore positivo  $\psi_0 \leq 1$  determinato imponendo che la probabilità di superamento degli effetti causati dalla concomitanza con altre azioni sia circa la stessa di quella associata al valore caratteristico di una singola azione.



## *La sicurezza strutturale*

---

### *Combinazioni delle azioni*

- Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.1)$$

- Combinazione caratteristica (rara), generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili, da utilizzarsi nelle verifiche alle tensioni ammissibili di cui al § 2.7:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.2)$$

- Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.3)$$

- Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.4)$$

## *La sicurezza strutturale*

---

### *Combinazioni delle azioni*

- Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E (v. § 3.2):

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad (2.5.5)$$

- Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali di progetto  $A_d$  (v. § 3.6):

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad (2.5.6)$$

**Nelle combinazioni si dovranno trascurare le azioni di natura variabile  $Q_{kj}$  che danno un contributo favorevole ai fini delle verifiche e, se del caso, i carichi permanenti non strutturali  $G_2$ .**

**Questi ultimi potranno quindi essere trascurati, ad esempio, nel caso di situazioni transitorie, in cui la costruzione subisca alterazioni e modifiche che prevedano la possibilità di assenza dei carichi  $G_2$  favorevoli alle verifiche**

## Azioni sulle costruzioni: Coefficienti di combinazione

Tab. 2.5.I – Valori dei coefficienti di combinazione

| Categoria/Azione variabile  | $\Psi_{0j}$                | $\Psi_{1j}$ | $\Psi_{2j}$ |
|---|----------------------------|-------------|-------------|
| Categoria A - Ambienti ad uso residenziale  | 0,7                        | 0,5         | 0,3         |
| Categoria B - Uffici  | 0,7                        | 0,5         | 0,3         |
| Categoria C - Ambienti suscettibili di affollamento   | 0,7                        | 0,7         | 0,6         |
| Categoria D - Ambienti ad uso commerciale   | 0,7                        | 0,7         | 0,6         |
| Categoria E – Aree per immagazzinamento, uso commerciale e uso industriale<br>Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale | 1,0                        | 0,9         | 0,8         |
| Categoria F - Rimesse , parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso $\leq 30$ kN)                                 | 0,7                        | 0,7         | 0,6         |
| Categoria G – Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso $> 30$ kN)                                     | 0,7                        | 0,5         | 0,3         |
| Categoria H - Coperture accessibili per sola manutenzione   | 0,0                        | 0,0         | 0,0         |
| Categoria I – Coperture praticabili   | da valutarsi caso per caso |             |             |
| Categoria K – Coperture per usi speciali (impianti, eliporti, ...)  |                            |             |             |
| Vento   | 0,6                        | 0,2         | 0,0         |
| Neve (a quota $\leq 1000$ m s.l.m.)   | 0,5                        | 0,2         | 0,0         |
| Neve (a quota $> 1000$ m s.l.m.)  | 0,7                        | 0,5         | 0,2         |
| Variazioni termiche   | 0,6                        | 0,5         | 0,0         |

## Combinazioni delle azioni: Verifiche agli SLU

le azioni di calcolo si ottengono

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

$G_j$  rappresenta il valore caratteristico della  $j$ -esima azione permanente (peso proprio, carichi permanenti portati, precompressione, ecc);

$Q_{k1}$  rappresenta il valore caratteristico dell'azione variabile di base di ogni combinazione;

$Q_{ki}$  rappresenta il valore caratteristico della  $i$ -esima azione variabile;

$P$  rappresenta il valore caratteristico della  $h$ -esima deformazione impressa (effetto della temperatura, deformazione del terreno, viscosità, ritiro, etc);

$\gamma_{Gj}$ ,  $\gamma_{Qj}$ ,  $\gamma_P$  rappresentano i coefficienti parziali;

$\psi_{0i}$  rappresentano i coefficienti di combinazione.



## Combinazioni delle azioni: Verifiche agli SLU

Si distinguono:

- **EQU** stato limite di equilibrio come corpo rigido: considera la struttura, il terreno o l'insieme terreno-struttura come corpi rigidi. tale verifica è limitata al ribaltamento di strutture fuori terra (ad esempio ciminiere, cartelloni pubblicitari, torri, ecc. rispetto ad una estremità della fondazione).
- **STR** stato limite di resistenza della struttura compresi gli elementi di fondazione: è da prendersi a riferimento per tutti i dimensionamenti strutturali
- **GEO** stato limite di resistenza del terreno: dimensionamento geotecnico delle opere di fondazione e di sostegno e, più in generale, delle strutture che interagiscono direttamente con il terreno, oltre che per le verifiche di stabilità globale dell'insieme terreno-struttura.

Tab. 2.6.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU

|  |             | Coefficiente  | EQU | A1  | A2  |
|--|-------------|---------------|-----|-----|-----|
|  |             | $\gamma_F$    |     |     |     |
| Carichi permanenti $G_1$                       | Favorevoli  | $\gamma_{G1}$ | 0,9 | 1,0 | 1,0 |
|  | Sfavorevoli |               | 1,1 | 1,3 | 1,0 |
| Carichi permanenti non strutturali $G_2^{(1)}$ | Favorevoli  | $\gamma_{G2}$ | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
|  | Sfavorevoli |               | 1,5 | 1,5 | 1,3 |
| Azioni variabili Q                             | Favorevoli  | $\gamma_{Qi}$ | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
|  | Sfavorevoli |               | 1,5 | 1,5 | 1,3 |

<sup>(1)</sup> Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali o di una parte di essi (ad es. carichi permanenti portati) sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti parziali validi per le azioni permanenti.

*Combinazioni delle azioni: Verifiche agli SLU*

Per gli stati limite strutturali (STR) e geotecnici (GEO) si possono usare:

Approccio 1:

Nella **Combinazione 1** dell'Approccio 1, per le azioni si impiegano i coefficienti  $\gamma_F$  riportati nella colonna A1

Nella **Combinazione 2** dell'Approccio 1, per le azioni si impiegano i coefficienti  $\gamma_F$  riportati nella colonna A2

Approccio 2:

**Unica combinazione dei gruppi di coefficienti parziali definiti nella colonna A1**

Il coefficiente parziale della precompressione si assume pari a  $\gamma_P = 1,0$ .

*Combinazioni delle azioni: Verifiche agli SLE*

- **verifiche di deformabilità,**
- **verifiche di vibrazione,**
- **verifiche di fessurazione,**
- **verifiche delle tensioni di esercizio,**
- **verifiche a fatica per quanto riguarda il progressivo degrado delle caratteristiche meccaniche quali la rigidità.**

## Combinazioni delle azioni: Verifiche agli SLE

Agli **Stati Limite di Esercizio** sono previste le seguenti combinazioni di carico:

- **combinazione caratteristica rara** (SLE irreversibili):

$$G_{k1} + G_{k2} + P_k + Q_{k1} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} Q_{kj}$$

- **combinazione frequente** (SLE reversibili):

$$G_{k1} + G_{k2} + P_k + \psi_{11} Q_{k1} + \sum_{j=2}^n \psi_{2j} Q_{kj}$$

- **combinazione quasi permanente** (SLE per effetti a lungo termine):

$$G_{k1} + G_{k2} + P_k + \psi_{21} Q_{k1} + \sum_{j=2}^n \psi_{2j} Q_{kj}$$

Per la verifica dello **stato limite di fessurazione**, la normativa impone l'utilizzo delle **combinazioni di carico frequenti e quasi permanenti** a seconda delle condizioni ambientali (ambiente poco aggressivo, moderatamente aggressivo, molto aggressivo).

Per gli **stati limite deformativi** bisogna considerare le **combinazioni frequenti**.