

Progettazione e sicurezza strutturali

rev. 9 – 16.02.2020

Progetto strutturale



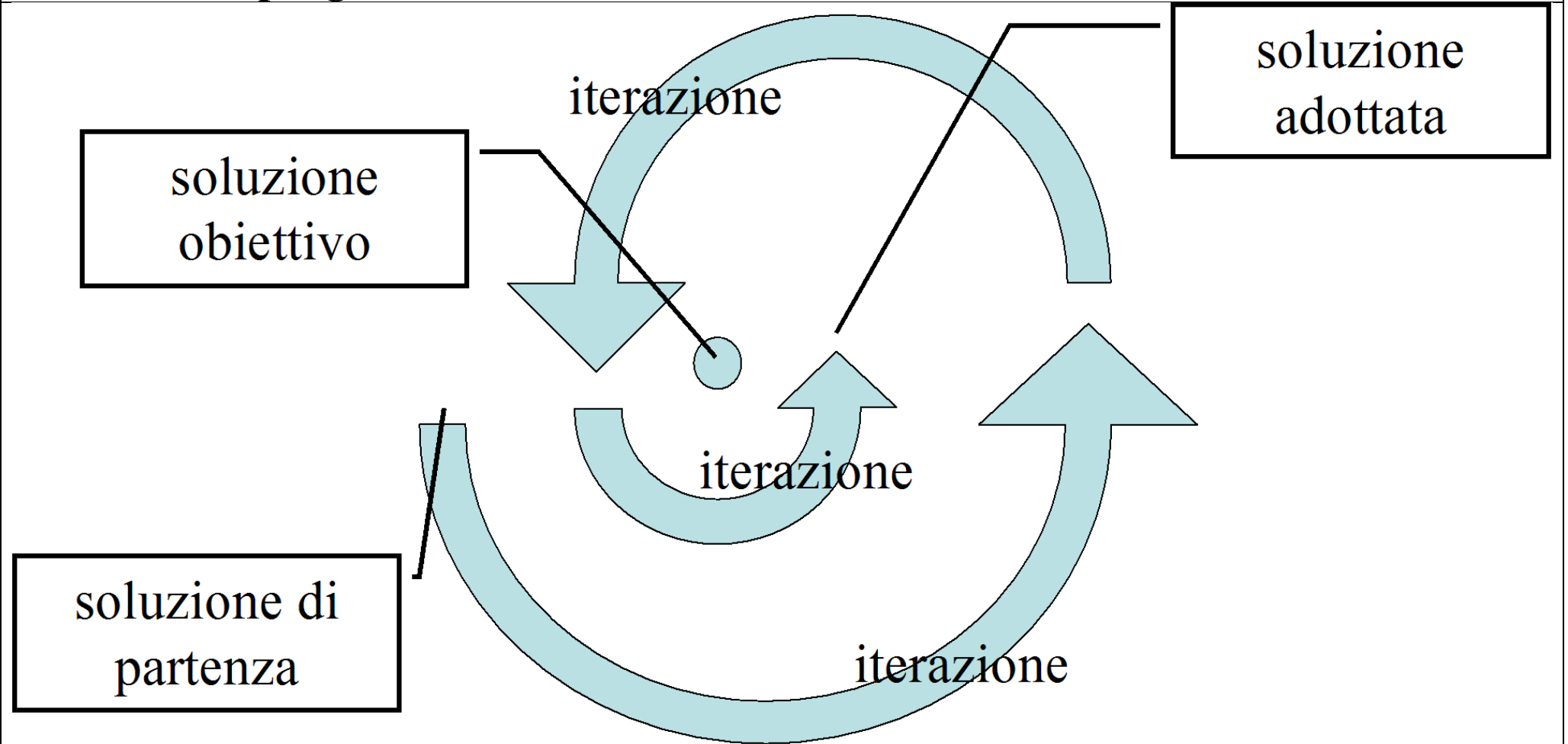
Definizione di una struttura:

- soddisfacendo una serie di esigenze (**parametri** di progetto)
ad esempio : g, q, L, σ_y
- tenendo conto di una serie di condizioni (**vincoli** di progetto)
ad esempio: $\sigma \leq \sigma_{amm}, f \leq f_{amm}, h/L \leq k, h \leq h_{max}$
- agendo su una serie di alternative o valori (**variabili** di progetto)
ad esempio:
tipologia costruttiva
schema statico
forma e dimensioni della sezione (b, h)
tipo e caratteristiche dei materiali (σ_y)

Spirale di progetto



Iterazioni di progetto



Il concetto di “modellazione”

La progettazione strutturale richiede inevitabilmente una o più “modellazioni” ovvero schematizzazioni della realtà più semplici da trattare

E’ possibile modellare, ad esempio, riconducendo la realtà ad altrettanti “modelli di calcolo”:

- strutture complesse
- singoli elementi strutturali
- singoli dettagli del comportamento di elementi strutturali

- carichi
- vincoli

- comportamento di materiali

-

Un modello di calcolo:

- costituisce una **schematizzazione** del comportamento dell'organismo o del componente strutturale in esame
- comporta l'introduzione di alcune **ipotesi semplificative** del comportamento reale (del sistema considerato e/o dei suoi vincoli e/o dei carichi agenti)
- fornisce risultati tanto più vicini ai regimi sollecitativo, tensionale e deformativo reali quanto più la schematizzazione è aderente alla realtà
- comporta inevitabilmente la necessità di una **valutazione critica** dei risultati dell'analisi strutturale conseguente, tanto più attenta quanto maggiore è il livello di semplificazione raggiunto
- non dovrebbe **mai condurre ad una diminuzione della sicurezza** e quindi va adottato dopo una attenta valutazione della tipologia strutturale e dei suoi vincoli

SICUREZZA E AFFIDABILITÀ STRUTTURALE

Il fine ultimo della progettazione delle strutture è quello di **garantire che l'opera assolva alla funzione per cui è stata concepita** mantenendo il **prefissato livello di sicurezza**.

Per **sicurezza strutturale** in genere si intende il **grado di protezione** di persone e beni rispetto alle conseguenze del **“collasso”** strutturale.

Per **“collasso”** non necessariamente si intende indica la distruzione dell'opera, bensì il raggiungimento di una qualunque condizione (**“stato limite”**) che determini il malfunzionamento del sistema strutturale o di una sua parte e che, quindi, possa potenzialmente determinare delle “perdite”.

Gli stati limite “strutturali” possono dunque riguardare ad es: a) il superamento della **resistenza**, b) la perdita di **funzionalità** e c) la perdita di **durabilità**.

Il concetto di sicurezza si fa sempre dipendere dal periodo di “funzionamento” o, per meglio dire, dalla **vita della costruzione**.

Garantire la sicurezza per una vita più lunga è più costoso, ed inoltre è praticamente impossibile assicurare un certo livello di protezione indefinitamente (i sistemi ingegneristici sono **inevitabilmente soggetti a degrado** delle prestazioni nel tempo).

I concetti descritti si sintetizzano nell'**affidabilità** del sistema, definita come la **capacità di un sistema di assolvere alla propria missione durante l'intero periodo temporale per cui deve funzionare**.

Nel caso delle strutture il periodo di tempo è spesso riferito alla **vita nominale utile** (o tecnica), che è quel periodo per cui la costruzione deve assolvere alla sua funzione in base alla **corretta progettazione** e alla normale **manutenzione programmata**.

Alcune considerazioni iniziali

- La sicurezza è un concetto essenzialmente **probabilistico**
- **Non è ragionevole parlare di sicurezza assoluta** delle strutture
- Occorre accettare un **inevitabile rischio** di un qualsiasi evento temuto
- Mediante considerazioni di ordine probabilistico bisogna **considerare razionalmente il rischio**, analizzando i fattori in gioco, graduandolo secondo le circostanze, contemperando l'esigenza di sicurezza con le disponibilità finanziarie
- Quale il **valore più conveniente del rischio** (legato alla probabilità di collasso)?

La verifica della sicurezza richiederà, anche se in modo indiretto, una valutazione della probabilità di collasso (inteso come “insuccesso” in senso lato)

La sicurezza può essere **compromessa** da:

- Sottostima del valore o modellazione errata/eccessivamente semplificata delle **azioni** (carichi, deformazioni imposte, degrado nel tempo per aggressioni chimiche ...)
- Sovrastima del valore o modellazione errata/eccessivamente semplificata delle **resistenze** (resistenza meccanica dei materiali, rigidità elementi, resistenza all'aggressione chimica, scarsa sensibilità alla fatica, scarsa sensibilità alle vibrazioni ...)
- Modellazione errata o eccessivamente semplificata del **comportamento strutturale**
- Errori di impostazione e/o svolgimento del progetto
- Inadeguatezza dei criteri di resistenza per le verifiche
- Errori di esecuzione e/o montaggio
-

Importanza della modellazione di: a) azioni, b) materiali, c) struttura

Metodi di verifica della sicurezza deterministici e probabilistici

Deterministici: assumono che le grandezze utilizzate nel processo di verifica siano deterministiche (ovvero valutabili con certezza). Esempi: a) metodo alle tensioni ammissibili, b) calcolo a rottura.

Probabilistici: assumono che le grandezze utilizzate nel processo di verifica siano aleatorie (ovvero note solo in modo probabilistico, attraverso una funzione di densità di probabilità)

Metodo di verifica alle “Tensioni Ammissibili” (TA)

Caratteristiche del metodo alle TA

- Metodo **deterministico**
- Ipotizza che la struttura rimanga in **campo elastico**
- Sicurezza garantita controllando che nel punto maggiormente sollecitato sia $\sigma \leq \sigma_{amm}$
- Richiede la valutazione delle tensioni massime che la struttura dovrà sopportare durante la sua vita di **esercizio** e della resistenza del materiale, rappresentata dalla σ_{amm}
- Per stati di tensione pluriassiali: $\sigma_{id} \leq \sigma_{amm}$ (richiede l'impiego di un criterio di resistenza per la definizione della σ_{id})

Pregi del metodo alle TA

- Semplice e chiaro
- Sono adottabili coefficienti di sicurezza in base all'esperienza passata
- Adotta **legami costitutivi lineari** e prevede **analisi lineari** (applicabili tutti i principi della Scienza delle Costruzioni classica; ad es. per aste monodimensionali è possibile utilizzare la teoria di De Saint Venant, che fornisce agevolmente lo stato tensionale corrispondente alle caratteristiche della sollecitazione ottenute dal calcolo)
- In alcuni casi di strutture molto complesse è l'unico applicabile

Difetti del metodo alle TA

- In quanto metodo deterministico non considera la inevitabile natura aleatoria delle grandezze in gioco
- Con **un solo coefficiente di sicurezza** non consente di differenziare le varie fonti di incertezza delle diverse grandezze in gioco
- Unico ampio coefficiente di sicurezza: **falsa sensazione** di avere a disposizione **ampi margini** da parte dei vari operatori nel processo di costruzione
- Valori di tensioni ammissibili fissati con **criteri empirici** oggetto di discussione
- **Non consente di valutare la probabilità di collasso** e quindi di confrontare razionalmente diverse alternative da questo punto di vista
- **Non consente di considerare il comportamento duttile (post-elastico) delle strutture**
- Spesso le tensioni calcolate, da confrontare con le ammissibili, hanno un puro valore convenzionale.

Approccio probabilistico alla valutazione della sicurezza

La valutazione dei margini di sicurezza di una costruzione è legata al **grado di conoscenza** dei fattori che regolano la meccanica strutturale.

Lo stato delle conoscenze dei fenomeni che interessano il sistema è sempre inevitabilmente incompleto o noto con incertezza e quindi affetto da **aleatorietà**.

È necessario ricorrere a un metodo per tenere in conto tale incertezza **razionalmente** e quindi in modo **economicamente** opportuno.

Il **calcolo delle probabilità** è una disciplina nata proprio allo scopo di rendere matematicamente quantificabile lo stato di conoscenze limitato relativo a un certo fenomeno di interesse.

In altre parole, la teoria delle probabilità non fa altro che tradurre in un linguaggio matematico (e quindi codificato) la fiducia che si ha sull'esito di un certo fenomeno sulla base di quanto si è in grado di descriverlo in tutti i suoi aspetti.

In questo contesto la **sicurezza strutturale** assume, attraverso il concetto di **affidabilità**, una **definizione quantitativa**.

Si può dire che l'**affidabilità $R(T)$** (Reliability) di un sistema è la **probabilità che la sua missione sia portata a termine con successo nell'intervallo di tempo di interesse $(0,T)$** .

Nel caso di un'opera d'ingegneria civile, per esempio, una possibile missione è il mantenimento della funzionalità nella vita (T) .

L'**affidabilità $R(T)$** di una struttura è la probabilità che essa sia “funzionante”, secondo i criteri stabiliti, al tempo T , ovvero:

$$R(T) = \Pr \{ \text{la struttura non raggiunga il “collasso” prima di } T \}$$

Interpretazione frequentistica: in un parco di strutture nominalmente tutte eguali, è la frazione di queste che ci aspettiamo siano ancora funzionanti al tempo T .

$$R(T) = \Pr \{ \text{“sopravvivenza” al tempo } T \}$$

Coerentemente con queste definizioni l'affidabilità è un numero sempre compreso tra zero e uno ed è esprimibile anche in termini percentuali.

La **probabilità di “collasso”** P_f (failure probability) è il complemento a uno dell'affidabilità.

Esprime il rischio del raggiungimento di una situazione per cui la struttura non garantisce più le prestazioni richieste.

$$P_f = 1 - R(T) = 1 - \Pr \{ \text{“sopravvivenza” al tempo } T \}$$

L'**obiettivo della sicurezza strutturale** è il **controllo della probabilità di “collasso”** per una struttura nuova o la sua valutazione per una struttura esistente.

Definizione di stato limite

Si definisce stato limite una situazione a partire dalla quale una struttura, o una delle sue parti, cessa di assolvere alla funzione alla quale era destinata e per la quale era stata progettata e costruita.

Il **superamento di uno stato limite** corrisponde ad una **perdita di funzionalità** da parte della struttura.

Si distingue tra:

Stati Limite Ultimi (SLU) : la perdita di funzionalità è associata in genere ad una vera e propria perdita della capacità portante (locale o globale) della struttura o comunque a una situazione che metta in pericolo la sicurezza delle persone o comportare perdita rilevante di beni, provocare gravi danni ambientali e sociali, mettere fuori servizio l'opera. Ha carattere irreversibile e si definisce collasso (vero e proprio).

Stati Limite di Esercizio (SLE) : la perdita di funzionalità corrisponde a un mancato soddisfacimento di prescritti requisiti di esercizio. Può avere carattere reversibile o irreversibile

Esempi di stati limite ultimi - SLU

- a) perdita di equilibrio della struttura o di una sua parte;
- b) spostamenti o deformazioni eccessive non reversibili;
- 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 meccanismi di collasso nei terreni;
- f) rottura di membrane e collegamenti per fatica;
- g) rottura di membrane e collegamenti per altri effetti dipendenti dal tempo;
- h) instabilità di parti della struttura o del suo insieme;

Esempi di stati limite di esercizio - SLE

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

Verifica della sicurezza in senso probabilistico

In sintesi la verifica della sicurezza in senso probabilistico può essere sintetizzata in:

- a) **definizione dello stato limite** nei confronti del quale ci si vuole cautelare
- b) **valutazione** della corrispondente **probabilità di insuccesso o “collasso”** P_f
- c) verifica che la probabilità di insuccesso sia **sufficientemente piccola da poter essere accettata** ovvero inferiore a un prefissato valore P_f^*

$$P_f \leq P_f^*$$

Probabilità di insuccesso accettabile.

Differenziazione dell'affidabilità delle costruzioni

Rispondere alla domanda “**quale livello di sicurezza è abbastanza sicuro per una costruzione?**” ha riflessi non trascurabili

La determinazione del rischio accettato e quindi della probabilità di collasso per le costruzioni, è un problema estremamente complesso che riveste aspetti tali da richiedere **competenze politiche e socio-economiche prima che strutturali.**

Sembrerebbe logico spingere perché siano molto basse le probabilità di collasso accettate e quindi imposte dai codici per le costruzioni.

D'altra parte però, **a bassi valori di P_f corrispondono strutture** (case, ponti, scuole ecc.) **comparativamente più costose.**

Poiché il settore delle costruzioni è economicamente importante, sia per quanto riguarda la spesa pubblica sia dal punto di vista dell'economia privata, non è possibile definire il livello di rischio accettato senza **tenere in debito conto le condizioni economiche e di sviluppo del paese in questione.**

Infatti, razionalmente il legislatore, dovrebbe tendere a **livellare la sicurezza in modo da ripartire opportunamente le risorse** da investire per aumentare il livello generale di qualità della vita del paese.

In altre parole, è quasi inutile, se non proprio errato, garantire una bassissima probabilità di collasso delle costruzioni in un paese in cui c'è un elevato rischio legato agli incidenti stradali o a ragioni sanitarie quali le epidemie.

Per questo, un grosso lavoro di ricerca è stato portato avanti negli ultimi quarant'anni per **calibrare le probabilità di collasso per diversi stati limite** e per diversi tipi di costruzione.

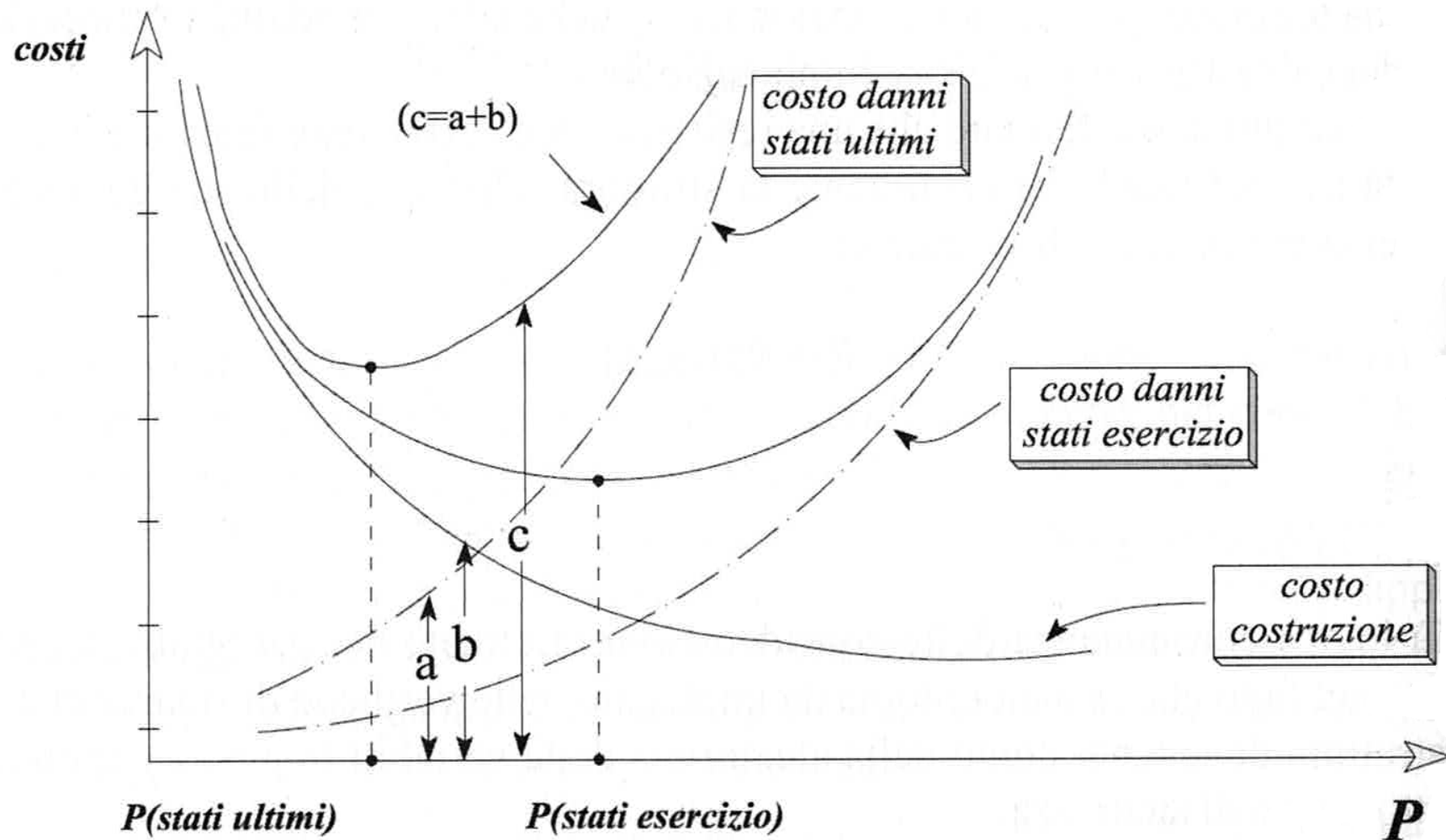
Infatti, è ragionevole che la **probabilità accettata** che un solaio vibri troppo in una abitazione (**Stato Limite di Esercizio**) sia più alta che la probabilità che la costruzione crolli (**Stato Limite Ultimo**).

Allo stesso modo, è maggiore il rischio di collasso accettato per un **edificio residenziale** rispetto a una **struttura a grande affollamento** come uno stadio sportivo.

Inoltre, nel caso delle costruzioni civili è altrettanto **complicato definire procedure di progetto codificate in apposite normative che garantiscano il livello di rischio fissato.**

Infatti, diversamente da quanto avviene in altri contesti di applicazione come quello industriale, la valutazione dell'**affidabilità strutturale per le costruzioni civili deve necessariamente basarsi sull'analisi e sul calcolo** invece che sulla sperimentazione, sia per la scala sia per l'unicità dei processi e delle pratiche costruttive.

Per questo le **procedure di progettazione moderne** come quelle adottate dalle normative italiane sono **sempre legate**, seppur tale legame può risultare poco visibile, **a metodi di analisi della sicurezza strutturale.**



Variabili aleatorie e distribuzioni di probabilità

Il funzionamento delle strutture è regolato da **enti** che, per motivi diversi, non sono noti con certezza, o per meglio dire, sono **noti con incertezza**.

Tra questi ci sono, ad esempio:

- le azioni,
- le proprietà dei materiali,
- le geometrie degli elementi che costituiscono il sistema
- le caratteristiche della risposta della struttura rispetto alle sollecitazioni,
- le leggi che regolano l'evoluzione nel tempo di fenomeni di degrado o di invecchiamento
- ecc.

Tutte queste grandezze sono rappresentabili da **variabili aleatorie (VA)**

Grandezze che, pur essendo determinate, non sono note allo stato delle conoscenze del progettista.

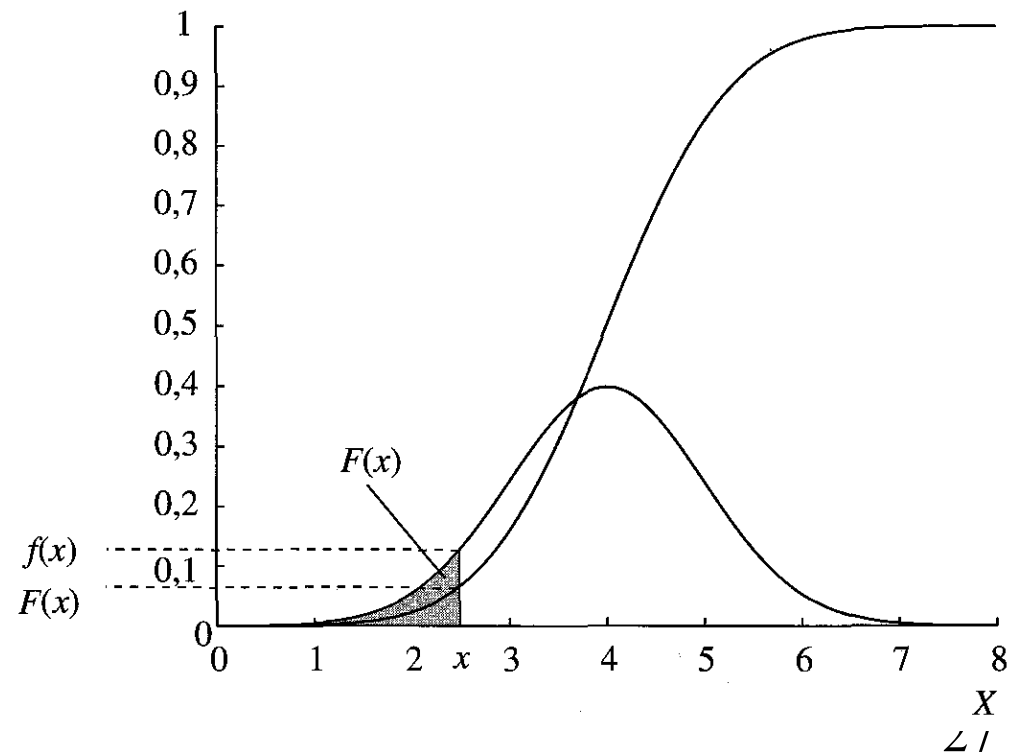
Funzione distribuzione cumulata (CDF)

L'incertezza sul valore di ciascuna variabile aleatoria si può caratterizzare attraverso la cosiddetta funzione distribuzione cumulata (**CDF**), che si indica spesso come **F(x)**.

Essa è una funzione che associa a ogni possibile valore della variabile X la probabilità che essa assuma valore inferiore a x

$$F(x_1) = \Pr \{x \leq x_1\}$$

(con la lettera minuscola si indica un particolare valore possibile della variabile aleatoria e come tale esso prende anche il nome di realizzazione della VA).



Funzione densità di probabilità (PDF)

Un'altra funzione che spesso si usa per caratterizzare una variabile aleatoria è la funzione densità di probabilità (PDF) che si indica come $f(x)$. È la derivata della CDF.

La PDF, moltiplicata per l'infinitesimo dx , associa a ogni specifico valore x la probabilità che X sia compresa tra x e $x + dx$.

L'area sottesa dalla $f(x)$ alla sinistra di x corrisponde a $F(x)$.

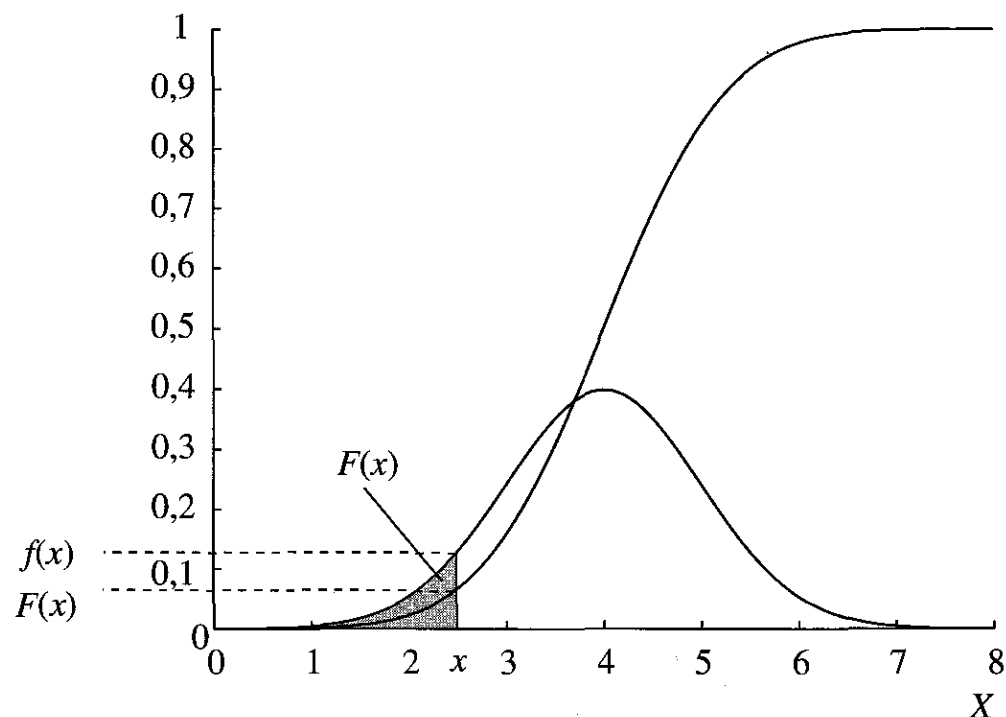
Valgono le:

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = \Pr\{x_1 \leq x \leq x_2\}$$

$$\int_{-\infty}^{x_1} f(x) dx = \Pr\{x \leq x_1\}$$

$$\int_{x_1}^{+\infty} f(x) dx = \Pr\{x_1 \leq x\}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = \Pr\{-\infty < x < +\infty\} = 1 \quad (\text{è la certezza})$$



Valore medio della distribuzione

$$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx$$

Corrisponde alla coordinata del baricentro della figura sotto la curva $f(x)$.

Infatti:

$$\mu = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx} = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx \quad \text{poiché} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$$

Varianza e scarto quadratico medio

$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx$ è la varianza.

σ_x è la deviazione standard o scarto quadratico medio e corrisponde al raggio d'inerzia della figura sotto la curva $f(x)$ rispetto l'asse $x = \mu$.

È un indice di dispersione, ed infatti aumenta quanto più la figura sotto la curva $f(x)$ è “centrifugata” rispetto l'asse $x = \mu$.

Stime statistiche del valore medio e della deviazione standard (scarto quadratico medio)

Basandosi su un campione di n “osservazioni”:

Valore medio del campione $\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

Deviazione standard o scarto quadratico medio

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1}}$$

Nell’espressione della deviazione standard al denominatore si usa il termine “n-1” (invece di “n”) per correggere la tendenza a sottostimare σ_x soprattutto nel caso in cui si lavori con pochi dati (n piccolo).

Modelli di distribuzione della probabilità

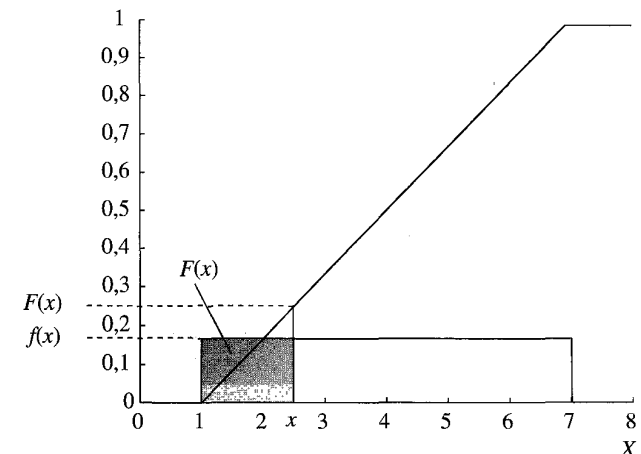
Esistono molti modelli di VA che si usano comunemente per descrivere le incertezze di un certo fenomeno.

Distribuzione costante in un intervallo

Uno dei modelli più semplici è quello di VA uniforme la cui PDF è costante in un intervallo e nulla al di fuori.

Assegna uguale credito al fatto che la variabile assuma uno qualunque dei valori nell'intervallo, mentre considera certo che essa non possa assumere valori al di fuori di questo.

$$\begin{cases} f(x) = \frac{1}{b-a} & x \in [a, b] \\ 0 & x \notin [a, b] \end{cases} \quad \begin{cases} F(x) = 0 & x < a \\ F(x) = \frac{x-a}{b-a} & x \in [a, b] \\ F(x) = 1 & x > b \end{cases}$$



Distribuzione gaussiana o normale

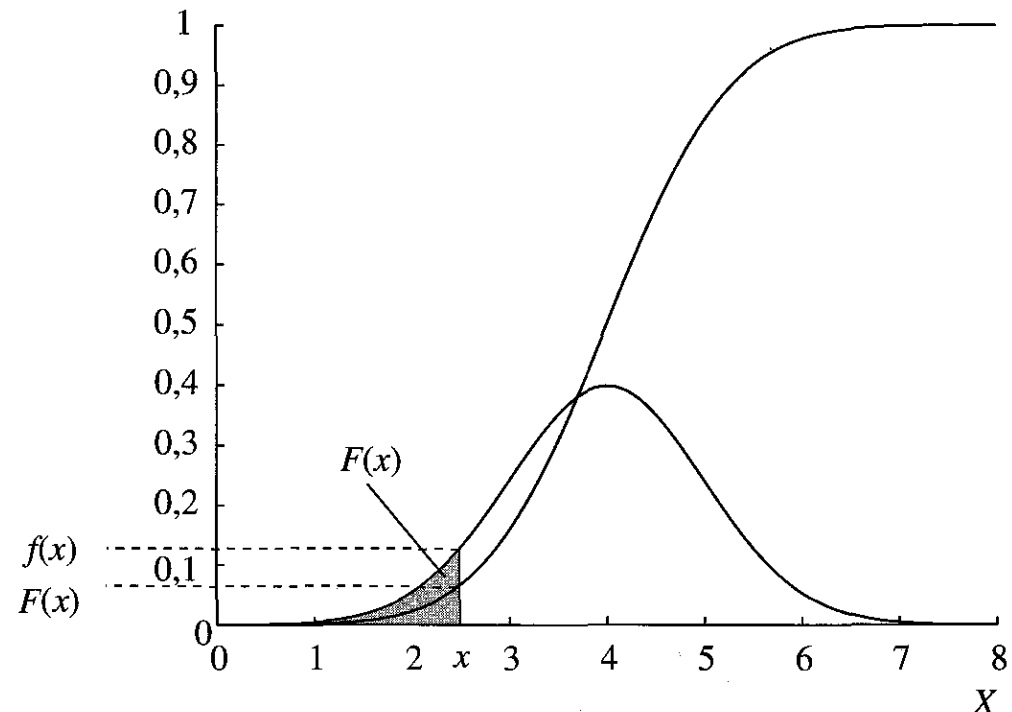
La PDF ha la nota forma a campana e la cui CDF, nota anche come funzione di Gauss e indicata con la lettera greca Φ , ha il tipico andamento ad esse.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

$$F(x) = \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad x \in]-\infty, +\infty]$$

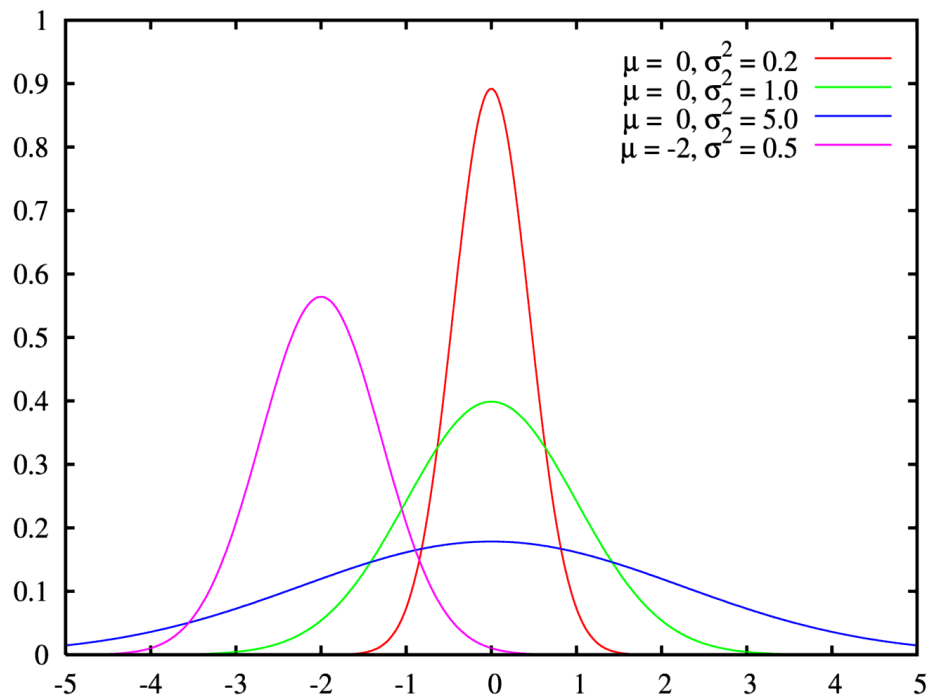
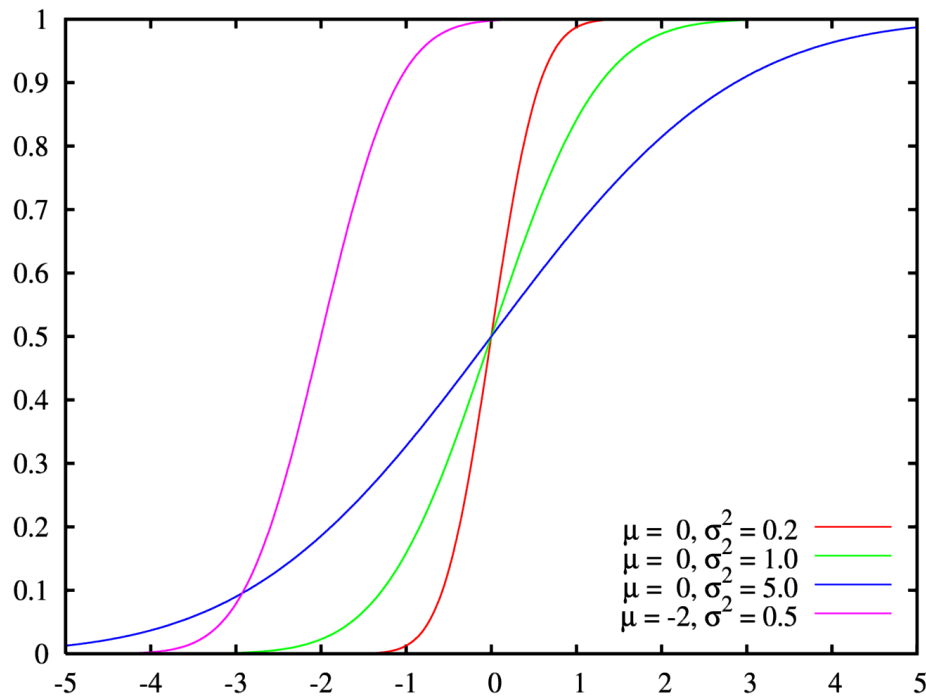
La PDF e la CDF della VA gaussiana dipendono solo dalla media μ (o valore atteso) e dallo scarto quadratico medio σ .

La media è il valore centrale nella PDF e cioè il valore attorno al quale ci si aspetta che si trovi il valore vero (più probabile) di X .



Infatti, si vede come siano più probabili i valori attorno alla media e meno frequenti quelli lontano da questa.

La deviazione standard è una misura della “larghezza” della campana (è la distanza della media dai punti di flesso della curva) e quindi misura l’incertezza sul valore di X.



Normalizzazione della distribuzione gaussiana

Nota la distribuzione della variabile aleatoria gaussiana X , il valor medio μ_x e la deviazione standard σ_x , la variabile aleatoria

$$Z = \frac{X - \mu_x}{\sigma_x}$$

è ancora gaussiana e gode della proprietà di avere $\mu_z = 0$ e $\sigma_z = 1$

Combinazione lineare di variabili gaussiane

Se la variabile aleatoria Z è combinazione lineare di n variabili gaussiane

$$Z = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n$$

allora

$$\mu_z = a_0 + a_1 \mu_{x_1} + a_2 \mu_{x_2} + \dots + a_n \mu_{x_n}$$

$$\sigma_z^2 = a_1^2 \sigma_{x_1}^2 + a_2^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + a_n^2 \sigma_{x_n}^2$$

Distribuzione lognormale

Una VA si può definire lognormale quando si assume che il suo logaritmo, che ovviamente è ancora una variabile aleatoria perché trasformazione matematica di una variabile aleatoria, sia caratterizzato da una distribuzione normale.

Questo modello si usa spesso quando la variabile di interesse può assumere valori solo di segno positivo come accade nel caso delle resistenze.

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma_{\log(x)}^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(x) - \mu_{\log(x)}}{\sigma_{\log(x)}}\right)^2} \quad x \in [0, +\infty[$$

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\log(x)}^2}} \int_{-\infty}^x \frac{1}{x} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(x) - \mu_{\log(x)}}{\sigma_{\log(x)}}\right)^2} dx \quad x \in [0, +\infty[$$

Distribuzione di Weibull

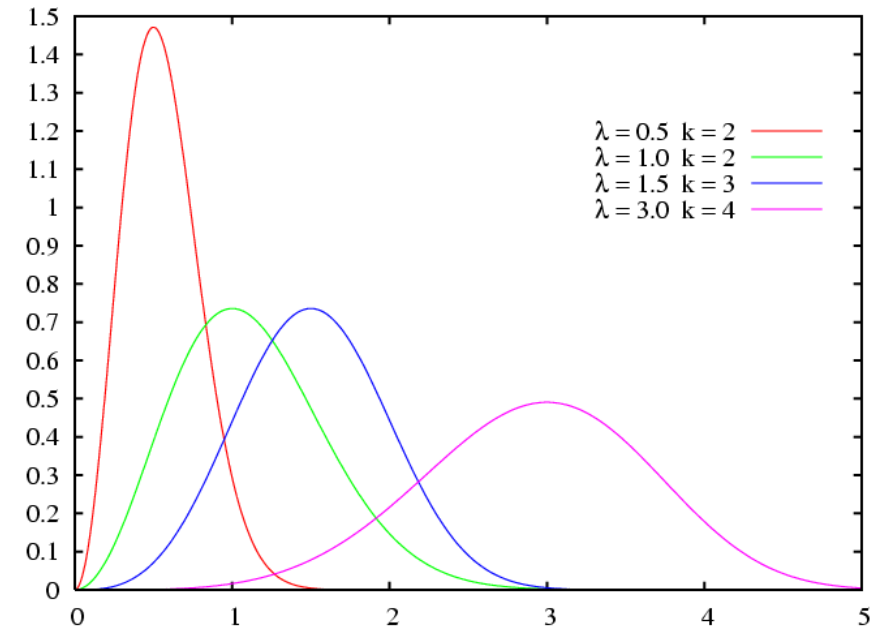
Adatto a descrivere l'andamento sperimentale delle resistenze di materiali cosiddetti “fragili” e cioè che si rompono improvvisamente non dando alcun preavviso quando la risposta è ancora sostanzialmente elastica e lineare.

In tali materiali la crisi è dovuta generalmente alla propagazione di un difetto intrinseco (discontinuità, fessura ecc.) divenuto instabile.

Tale comportamento è ben diverso da quello duttile, come nel caso dell'acciaio, in cui la rottura avviene a seguito di un forte allungamento plastico.

Il modello Weibull è definito per valori non negativi della variabile.

Dipende da due parametri α e k detti parametri di scala e forma che ovviamente dipendono dal materiale considerato proprio come la media e la deviazione standard.



$$f(x) = \frac{k}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^k} \quad F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^k} \quad x \in [0, +\infty[$$

Coefficiente di variazione

Una misura comunemente usata per l'incertezza associata a una variabile aleatoria è il coefficiente di variazione (CoV) definito come la deviazione standard diviso la media. Il suo carattere adimensionale consente, in linea di principio, di confrontare le incertezze di differenti VA.

$$\text{CoV} = \frac{\sigma}{\mu}$$

Frattile o Percentile

È il possibile valore della VA associato a una precisa probabilità di minoramento e cioè a un particolare valore della $F(x)$.

Frattile inferiore di ordine $k\%$ (k^{mo} percentile) $\bar{x} : F(\bar{x}) = \int_{-\infty}^{\bar{x}} f(x) dx = k\%$

Frattile superiore di ordine $k\%$ ($(1-k)^{\text{mo}}$ percentile) $\bar{x} : 1 - F(\bar{x}) = \int_{\bar{x}}^{\infty} f(x) dx = k\%$

Per esempio, il quinto percentile della VA aleatoria resistenza del calcestruzzo è quel particolare valore di resistenza tale che solo il 5% delle volte si riscontrano casi in cui la resistenza è uguale o più bassa e quindi è quel valore x per cui $F(x) = 0.05$.

Allo stesso modo il cinquantesimo percentile (detto anche mediana) è quel valore per cui la metà dei campioni avrà resistenza inferiore o uguale ($x : F(x) = 0.5$) e l'altra metà superiore.

Funzione stato limite e “collasso” convenzionale

La sicurezza è legata al possibile raggiungimento di uno o più stati limite e la probabilità di collasso è proprio la probabilità di occorrenza della condizione limite di interesse per il sistema che stiamo considerando.

Per definire matematicamente il raggiungimento di uno stato limite ci si serve di una cosiddetta **funzione stato limite** $G(\bar{X})$, dipendente dal vettore di variabili aleatorie che riguardano la struttura $\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$.

Convenzionalmente, si fa in modo che la funzione limite sia positiva se la struttura è in condizioni di sicurezza e assuma valori non positivi nel caso di raggiungimento o superamento della condizione limite.

$$G(X_1, X_2, \dots, X_n) : \begin{cases} G > 0 & \text{se la struttura è in condizioni} \\ & \text{di sicurezza} \\ G \leq 0 & \text{se la struttura ha raggiunto o} \\ & \text{superato la condizione limite} \end{cases}$$

La regione dello spazio a n dimensioni della variabile in cui $G(\bar{X}) > 0$ rappresenta il cosiddetto “**dominio di successo**”, quella in cui $G(\bar{X}) < 0$ il “**dominio di insuccesso F**” (Fail)

La condizione $G(\bar{X}) = 0$ definisce la cosiddetta “**superficie di collasso**” che separa i due domini.

Funzione stato limite G, affidabilità e probabilità di insuccesso

Caso di variabili X_i funzioni del tempo T

Normalmente azioni che agiscono sulle strutture variano nel tempo così come le proprietà dei materiali e le relative resistenze.

In generale, quindi, l'affidabilità e la probabilità di insuccesso dovrebbero essere considerate a loro volta funzioni del tempo T ed esprimersi come:

$$R(T) = \Pr \left\{ G[\bar{X}(t), t] > 0 \right\}$$

$$P_f(T) = 1 - R(T) = \Pr \left\{ G[\bar{X}(t), t] \leq 0 \right\} \quad \text{per } t \in (0, T)$$

cioè con riferimento alla probabilità di avere successo per tutto l'intervallo temporale d'interesse (ad esempio la vita utile o tecnica) o insuccesso anche solo una volta.

Caso di variabili X_i indipendenti dal tempo T

Nei casi in cui

a) la dipendenza dal tempo delle distribuzioni di probabilità delle azioni e delle resistenze sia non significativa

b) sia possibile fare in modo che il parametro tempo non compaia esplicitamente nella G , per esempio calibrando tali distribuzioni proprio sull'intervallo di tempo di interesse

la probabilità di collasso, ad esempio, si può calcolare direttamente secondo la

$$P_f = 1 - R = 1 - \Pr\{G[\bar{X}] > 0\} = \Pr\{G[\bar{X}] \leq 0\}$$

Valutazione della P_f per integrazione della funzione di densità di probabilità congiunta sul dominio di insuccesso

Qualora sia nota la funzione densità di probabilità congiunta

$$f_{\bar{X}}(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

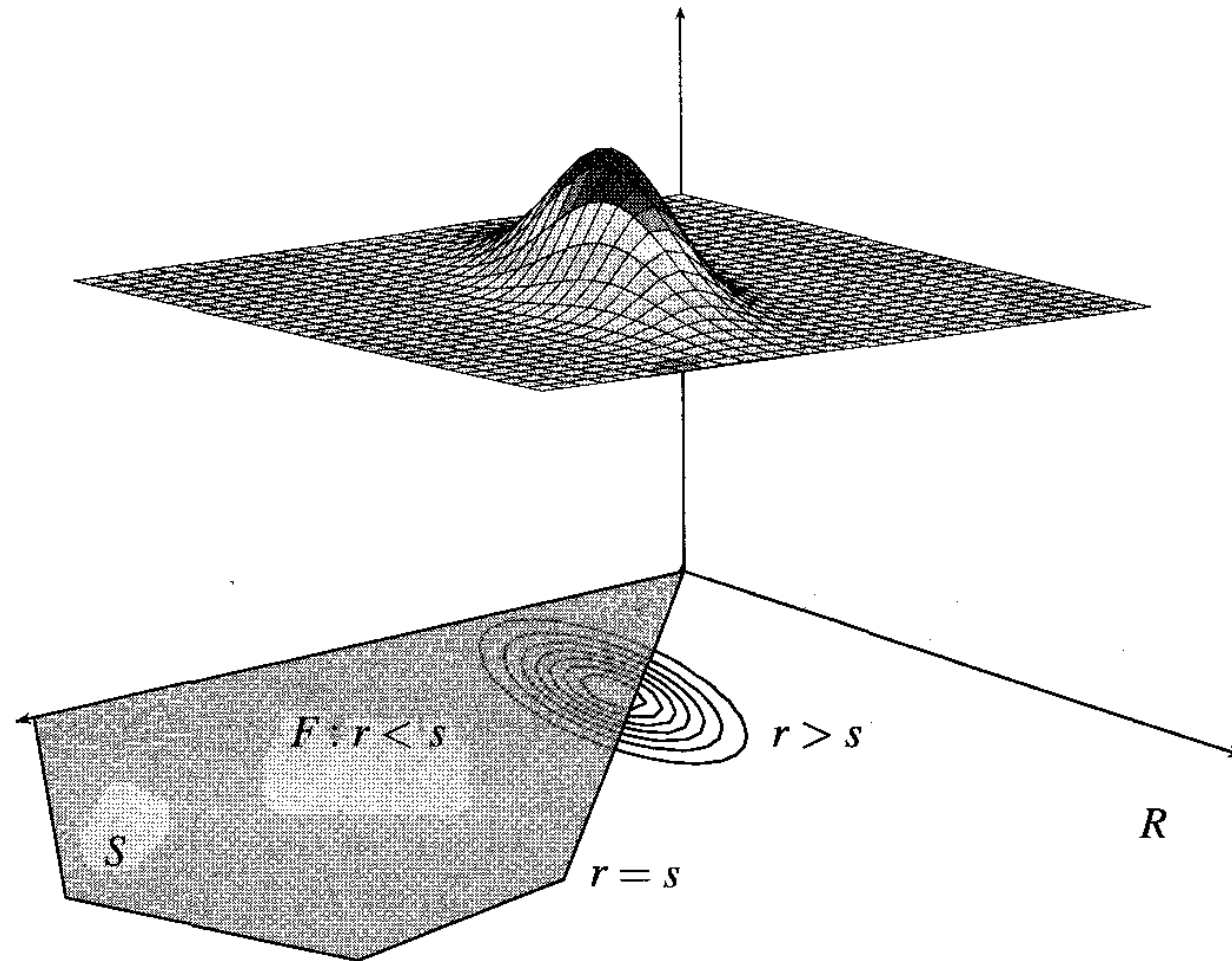
che caratterizza l'incertezza del vettore $\bar{X}$ nel suo insieme dalla

$$P_f = \Pr\{G[\bar{X}] \leq 0\}$$

segue che il calcolo della probabilità di collasso P_f si riduce al calcolo dell'integrale della $f_{\bar{X}}$ esteso al dominio di insuccesso F .

$$P_f = \Pr\{G[\bar{X}] \leq 0\} = \Pr\{\bar{X} \in F\} = \int_F f_{\bar{X}}(x_1, x_2, \dots, x_n) d\bar{X}$$

Il caso in cui il vettore $\bar{X}$ sia composto da due sole variabili aleatorie, la resistenza R e la sollecitazione S , è mostrato in figura:



Esempi di possibili funzioni limite: $G(R, S) = R - S$ oppure $G(R, S) = \log(R/S)$

Metodi di analisi della sicurezza strutturale

Nel seguito vengono descritti i possibili approcci al calcolo dell'affidabilità strutturale.

I metodi, con diversa strategia per il calcolo di P_f saranno presentati **in ordine di crescente approssimazione** del calcolo a fronte di una crescente semplicità di impiego.

Si distingue tra:

- **metodi probabilistici “rigorosi” (livello III)**
- **metodi probabilistici approssimati (livello II)**
- **metodi semiprobabilistici (livello I)**

Metodi probabilistici “rigorosi” (livello III)

I cosiddetti metodi di livello III hanno come obiettivo il **calcolo dell'integrale**

$$P_f = \Pr \left\{ G[\bar{X}] \leq 0 \right\} = \Pr \left\{ \bar{X} \in F \right\} = \int_F f_{\bar{X}}(x_1, x_2, \dots, x_n) d\bar{X}$$

per via analitica o con metodi approssimati.

In linea di principio **considerano tutte le variabili aleatorie coinvolte con la loro “effettiva” distribuzione di probabilità.**

Caso semplice con G dipendente da due sole variabili R ed S (modello sollecitazione-resistenza)

Nel caso in cui ciò non fosse immediatamente così si può ottenere, per esempio, definendo due relazioni funzionali R e S ottenute separando le variabili aleatorie di $\bar{X}$ che influenzano la resistenza ($\bar{X}_R$) e quelle che influenzano la sollecitazione ($\bar{X}_S$) (alcune VA compariranno sia in R sia in S):

$$\begin{cases} R(\bar{X}_R) \\ S(\bar{X}_S) \end{cases}$$

R ed S, direttamente confrontabili tra loro, sono anch'esse variabili aleatorie perché funzioni di variabili aleatorie (es.: momento resistente funzione dei materiali e momento sollecitante funzione dei carichi)

$$P_f = \sum_{\text{ogni } s} \Pr\{R \leq S | S = s\} \Pr\{S = s\}$$

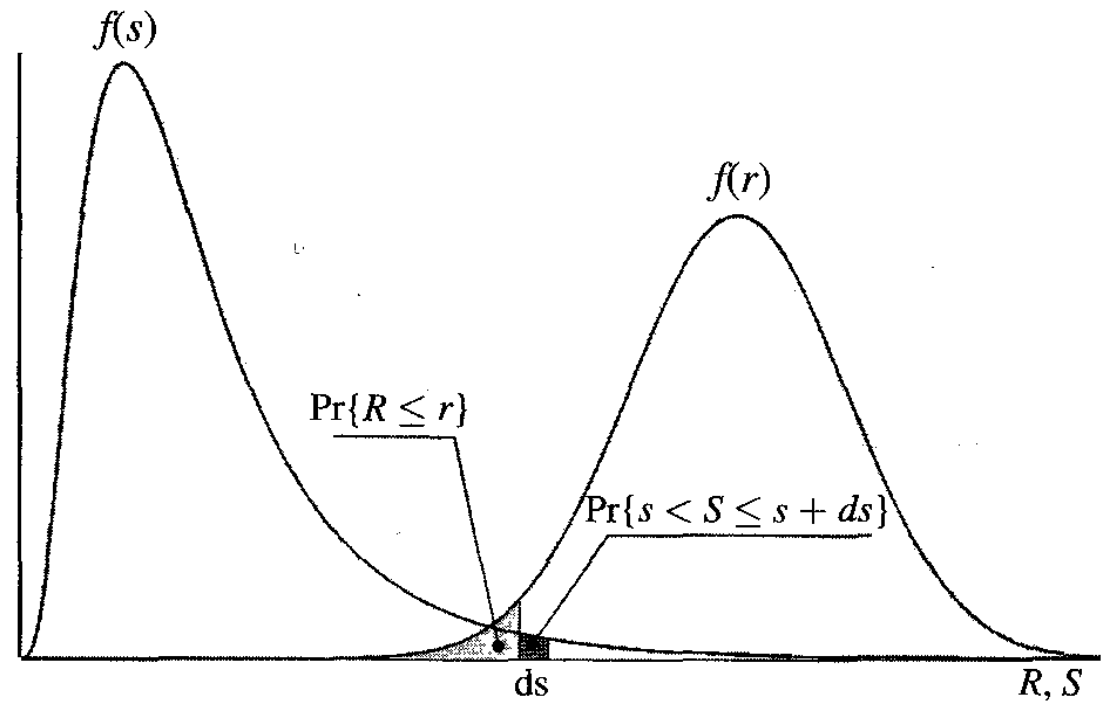
Se R e S sono stocasticamente indipendenti, nel caso di VA continue:

$$\Pr\{R \leq S | S = s\} = \Pr\{R \leq s\} = F_R(s)$$

$$\Pr\{S = s\} = f_s(s)$$

e quindi:

$$P_f = \Pr\{R \leq S\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \Pr\{R \leq S | S = s\} d\Pr\{S = s\} = \int_{-\infty}^{+\infty} F_R(s) f_s(s) ds$$



Caso generale – Metodi di simulazione numerica, metodo Montecarlo

Il calcolo dell'integrale raramente così immediato come nel modello sollecitazione-resistenza perché

- a) la scomposizione della distribuzione di probabilità del vettore X nelle distribuzioni delle singole variabili non è sempre così agevole
- b) non sempre i numeri aleatori che lo compongono sono stocasticamente indipendenti
- c) l'individuazione del dominio di collasso F può essere difficile

In generale poi l'integrale non è risolvibile analiticamente.

Si ricorre spesso ai cosiddetti metodi di simulazione numerica.

Virtualmente replicano un gran numero di volte l'evento di cui si vuole calcolare la probabilità di accadimento.

Tali procedure, più o meno raffinate, sono tutte caratterizzate da un'accuratezza inversamente proporzionale al numero di simulazioni, per cui richiedono l'impiego di calcolatori elettronici.

Il metodo di simulazione più semplice ma anche più conosciuto è il cosiddetto metodo Montecarlo.

Per il calcolo della probabilità di insuccesso viene definita una funzione ausiliaria, detta la funzione indicatrice I ,

$$I(\bar{x}) : \begin{cases} I(\bar{x}) = 0 & \text{se } G(\bar{x}) > 0 \\ I(\bar{x}) = 1 & \text{se } G(\bar{x}) \leq 0 \end{cases} \Rightarrow P_f = \int_F f_{\bar{X}}(\bar{x}) d\bar{x} = \\ = \int_{R^n} I(\bar{x}) f_{\bar{X}}(\bar{x}) d\bar{x} \approx \frac{k_f}{k}$$

In questo modo si può calcolare la probabilità di collasso estendendo l'integrale a tutto lo spazio R di definizione di X , senza dover prima determinare quale sia F .

Il risultato è poi approssimabile dal rapporto tra il numero di volte in cui ripetendo l'esperimento esso ha dato esito negativo (k_f), per cui risulta $G \leq 0$, e il numero totale di prove eseguite (k).

Dunque, se si riesce a ripetere molte volte l'esperimento, basta contare il numero di volte in cui esso finisce in un collasso rispetto al numero totale.

Il numero di simulazioni necessarie per ottenere una buona approssimazione della probabilità di collasso è dell'ordine di grandezza di $10/P_f$ per cui per stimare una probabilità di 10^{-3} sono necessarie almeno 10^4 simulazioni.

Visto che le probabilità di collasso delle strutture sono generalmente molto basse e che ogni simulazione richiede una analisi strutturale completa, l'onere computazionale richiesto può essere proibitivo anche per delle macchine.

Sono stati sviluppati, quindi, metodi di simulazione detti “intelligenti”, che rappresentano evoluzioni del metodo Montecarlo per cercare di ridurre il numero di simulazioni necessarie per calcolare l'affidabilità con una data accuratezza.

Metodi approssimati di livello II (“dell’indice o della distanza di sicurezza”)

I metodi di livello II non eseguono il calcolo dell’integrale che esprime la probabilità di insuccesso, nemmeno in modo approssimato.

Assumono che la distribuzione delle variabili aleatorie in gioco sia **gaussiana** e quindi descrivibile in funzione del solo valore medio μ e della deviazione standard σ di ciascuna di esse.

La probabilità di insuccesso P_f è espressa in funzione di un cosiddetto indice di sicurezza β .

Caso semplice con G dipendente da due sole variabili R ed S (modello sollecitazione-resistenza)

In questo caso, se R e S non sono correlate, assumendo come funzione limite la :

$$G = R - S$$

anche la funzione G è gaussiana e i relativi valore medi e deviazione standard valgono:

$$\mu_G = \mu_R - \mu_S \quad \text{e} \quad \sigma_G = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$$

Allora la probabilità di collasso corrisponde alla probabilità che, nella distribuzione gaussiana della funzione limite G , la G stessa assuma valori minori o uguali a zero.

Dunque:

$$P_f = \Pr(G \leq 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_G^2}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{g-\mu_G}{\sigma_G}\right)^2} dg = \Phi_G(0)$$

Introducendo l'indice di sicurezza:

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

osservando la distribuzione della funzione limite G l'indice di sicurezza può essere interpretato come la distanza del valore medio μ_G dallo zero, misurato in “unità σ_G ”.

A parità di valore medio e di deviazione standard, al crescere di β diminuisce la probabilità di insuccesso.

È in effetti possibile correlare il valore di β alla P_f

Normalizzando la funzione G nella G^* , la P_f può essere calcolata come la probabilità che la G^* assuma valori inferiori a $-\beta$ o (per simmetria) superiori a $+\beta$.

Cioè

$$P_f = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta)$$

La Φ nella espressione è la funzione di Gauss di una variabile aleatoria normalizzata con $\mu = 0$ e $\sigma = 1$ e quindi calcolabile o disponibile in tabelle. Il legame tra β e P_f , tradotto in tabella è il seguente:

P_f	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
β	2.32	3.09	3.72	4.27	4.75	5.20	5.61	6.00

Dunque, note μ_R , μ_S , σ_R , σ_S è possibile calcolare β e quindi P_f

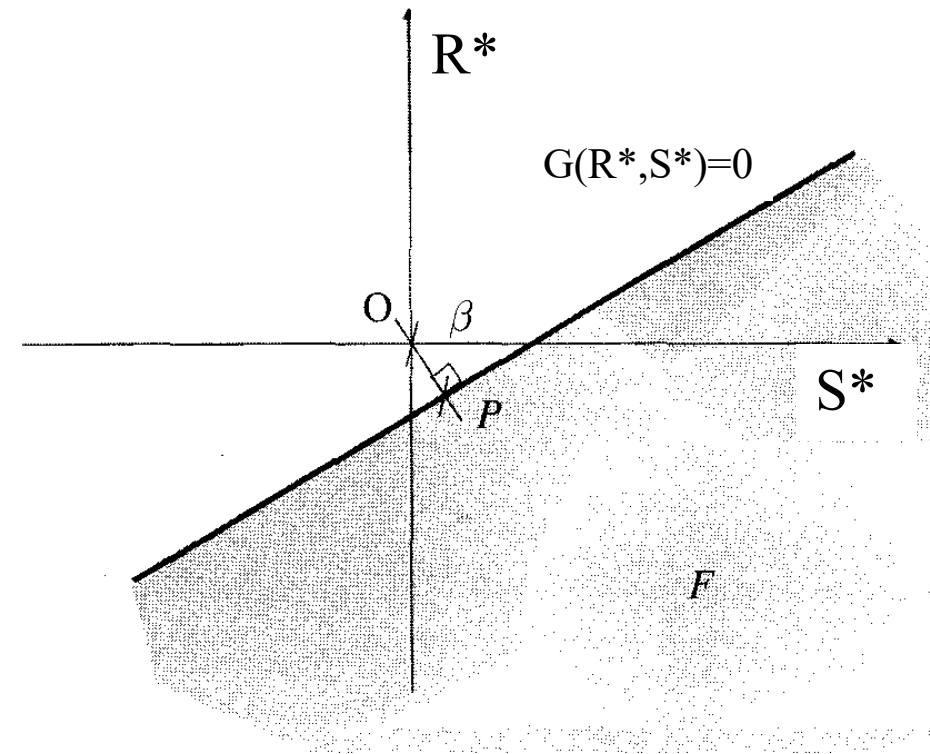
È poi possibile dare un'altra rappresentazione grafica del significato di β .

Se si normalizzano le variabile R e S separatamente, nella R^* e S^* la funzione limite, nel piano $R^* S^*$ ha l'equazione:

$$G(R^*, S^*) = R^* \sigma_R - S^* \sigma_S + \mu_R - \mu_S$$

β allora rappresenta la distanza della retta $G(R^*, S^*) = 0$ (confine del dominio di insuccesso) dall'origine degli assi (coppia $R^* = 0$; $S^* = 0$ di maggiore probabilità della funzione di densità di probabilità congiunta normalizzata).

Il punto P è detto “punto di progetto”.



Caso generale

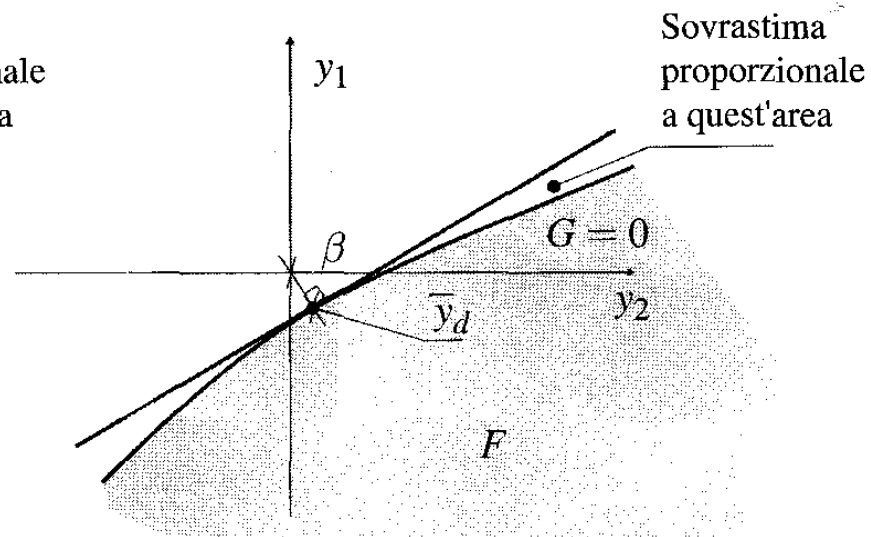
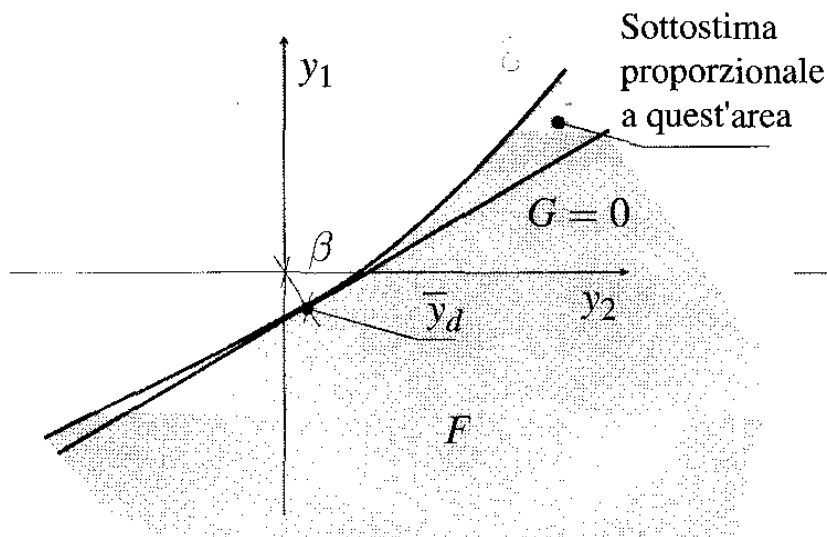
Nel caso in cui la funzione limite G sia una combinazione **lineare** delle variabili aleatorie in gioco la valutazione della P_f si può eseguire in modo analogo al caso “resistenza-sollecitazione” :

$$G(\bar{X}) = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n$$

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{a_0 + a_1 \mu_{X1} + \dots + a_n \mu_{Xn}}{\sqrt{a_1^2 \sigma_{X1}^2 + \dots + a_n^2 \sigma_{Xn}^2}} = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \mu_{Xi}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_{Xi}^2}}$$

Nel caso la funzione limite non sia una funzione lineare delle variabili (ad esempio $G(\bar{X}) = a_1 X_1^{e_1} + a_2 X_2^{e_2} + \dots + a_n X_n^{e_n}$) si può, in modo approssimato, calcolare P_f in funzione di un “ $\beta_{\min}$ ”, identificando prima un punto di progetto che soddisfi entrambe le condizioni:

$$\bar{y}_d = (y_1^d, y_2^d, \dots, y_n^d) : \begin{cases} G(y_1^d, y_2^d, \dots, y_n^d) = 0 \\ \beta = \min \sqrt{(y_1^d)^2 + (y_2^d)^2 + \dots + (y_n^d)^2} \end{cases}$$



Metodi semiprobabilistici di I livello

Risale all'inizio degli anni ottanta la prima ufficializzazione della necessità di adottare nei codici un approccio alla sicurezza secondo il modello sollecitazione-resistenza che tenesse implicitamente conto di una probabilità di collasso massima accettabile.

Riconoscendo la difficoltà di applicare direttamente i metodi dell'affidabilità strutturale di livello III e II nella pratica della progettazione, venne proposto un formato più semplice, noto come **metodo semi-probabilistico agli stati limite**, secondo la relazione formale:

$$\sum \gamma_q Q_{\text{nom},i} \leq \frac{R_{\text{nom}}}{\gamma_m}$$

Tale espressione formale va letta come: “l'effetto delle azioni nominali opportunamente amplificate per tenere conto delle incertezze, non deve superare la capacità resistente calcolata in base ai valori nominali delle resistenze opportunamente ridotte”. Scritta in termini più concisi, la stessa espressione diviene:

$$S_d \leq R_d$$

I due termini R_d e S_d sono detti **valori di progetto (design)** di resistenza e sollecitazione. I coefficienti γ_m e γ_q sono detti **coefficienti parziali di sicurezza**.

Ciò si traduce nella trasformazione della condizione di sicurezza da $R > S$, valutata in termini probabilistici, ad un **confronto tra scalari**.

Un approccio di questo tipo è di livello I ed è detto in inglese load-resistance factor design (LFRD).

Progettando la struttura considerando tali valori di calcolo (ottenuti minorando ovvero maggiorando) i valori nominali delle variabili aleatorie in gioco ci si garantisce, in linea di principio, che la probabilità di collasso sia compatibile rispetto ai criteri di accettabilità discussi.

Si noti che, minorare (o maggiorare) una variabile aleatoria è in linea di principio impossibile in quanto essa è, per definizione, ignota. In realtà si considerano **percentili molto bassi per le resistenze e molto alti per le azioni** in modo che tali valori siano molto probabilmente superati (o non superati).

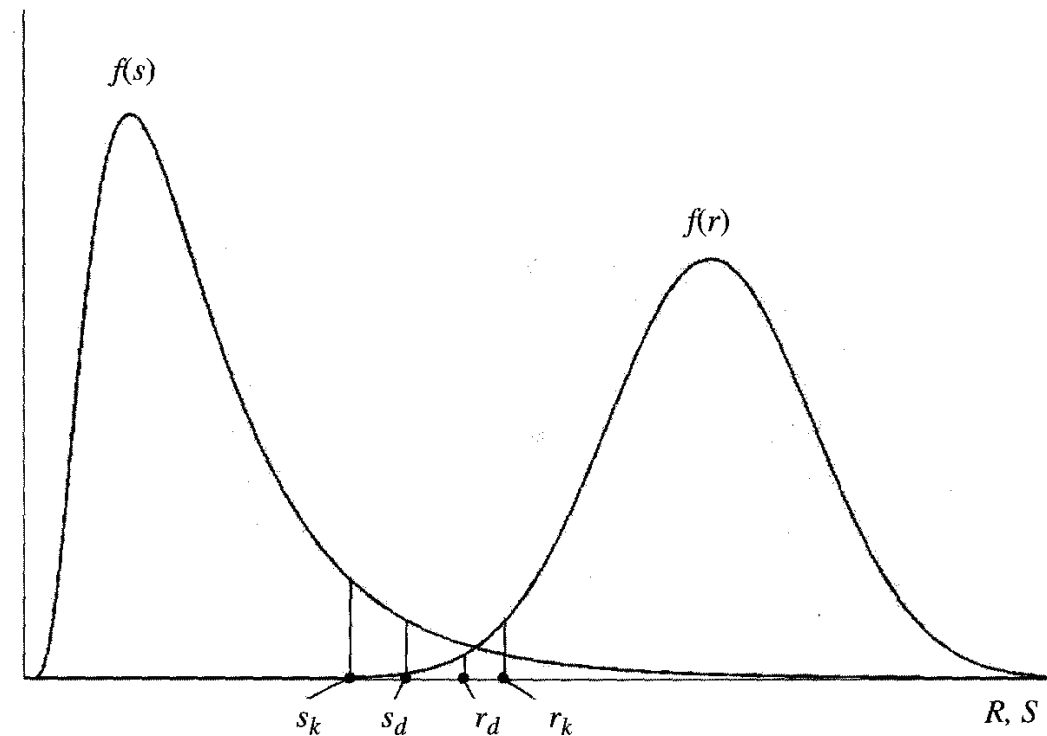
In genere i **valori nominali** delle variabili (detti **valori caratteristici**) corrispondono ai **frattili 5% e 95%** rispettivamente per le **resistenze** (o in generale per le grandezze che operano a favore di sicurezza) e per le **azioni** (o in generale per quelle che operano a sfavore di sicurezza).

I valori di progetto nel caso di SLU si riferiscono a frattili di circa un ordine di grandezza inferiore (rispettivamente circa 0.5% e 99.5%)

$$S_d \leq R_d \quad S_d = \gamma_s S_k \quad R_d = \frac{R_k}{\gamma_R}$$

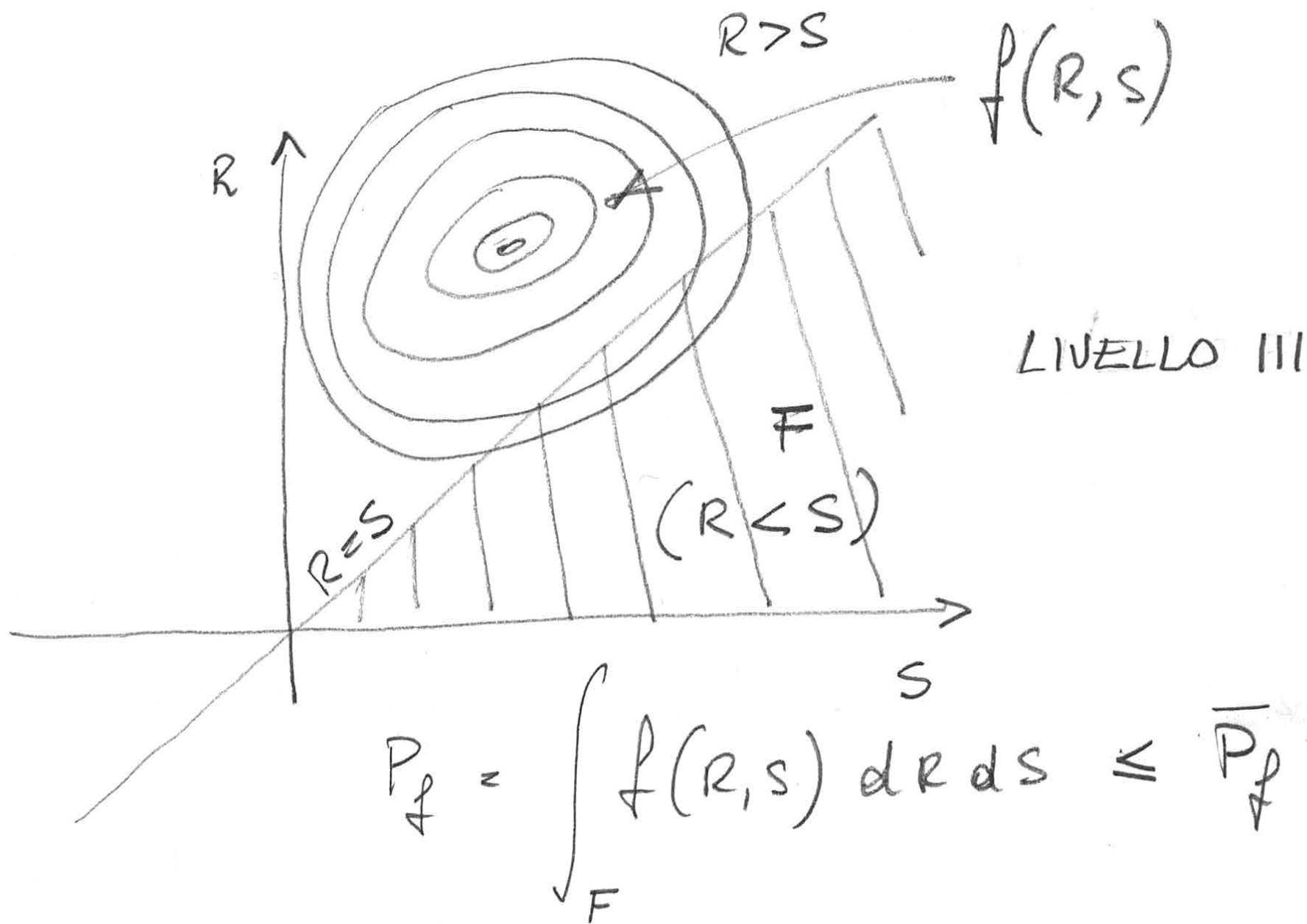
La verifica di sicurezza è analoga a una verifica di tipo deterministico.

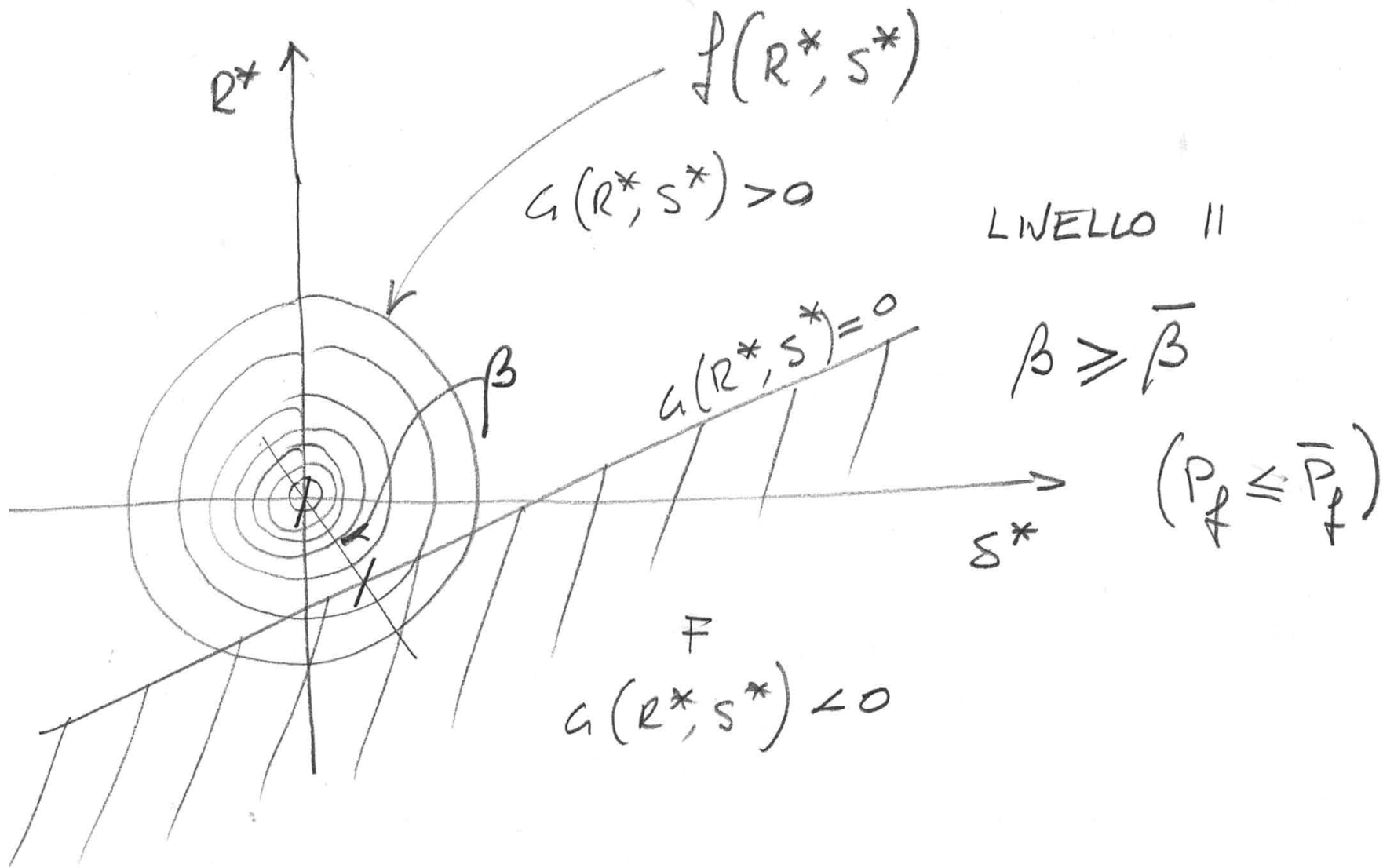
Si rinuncia al calcolo della probabilità di collasso sia direttamente (metodi di livello III) che indirettamente attraverso il calcolo dell'indice di sicurezza (metodi di livello II)

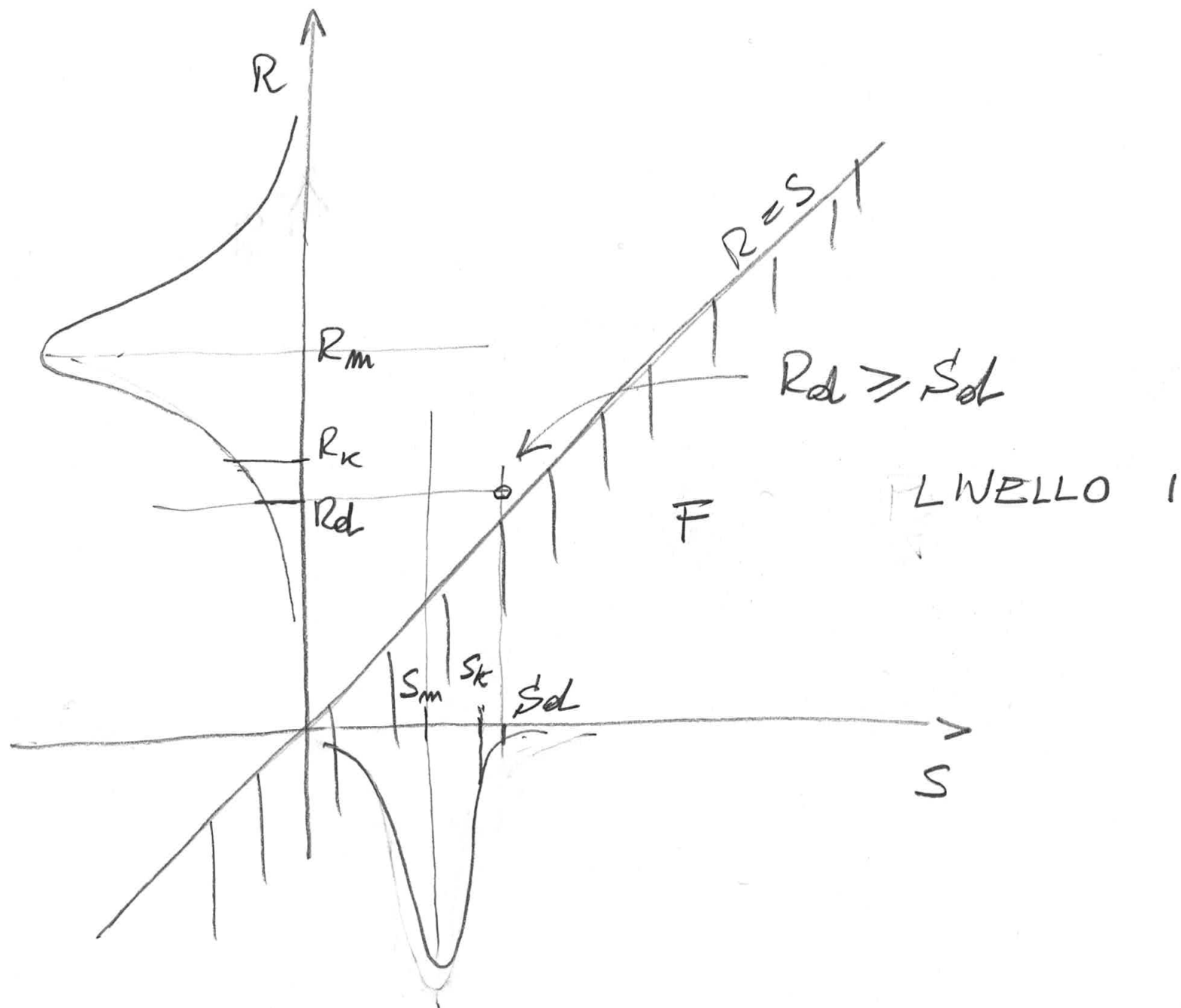


Tuttavia, i valori che si confrontano derivano da una caratterizzazione probabilistica delle azioni e delle caratteristiche strutturali (attraverso i valori caratteristici); **per questo motivo si parla di metodi semi-probabilistici.**

La “taratura” del metodo, ovvero il raggiungimento di una probabilità di successo minima avviene attraverso la **calibrazione dei valori dei coefficienti parziali di sicurezza**. Tale scelta non è fatta dal progettista, ma dal normatore (legislatore) in relazione al livello minimo (massimo) di sicurezza che si ritiene di voler garantire.







Metodo di verifica di I livello (Metodo agli stati limite) nella Normativa italiana (NTC2018)

La sicurezza strutturale nei confronti degli stati limite ultimi deve essere verificata confrontando:

- a) il **valore di progetto della capacità** R_d , in termini di resistenza, duttilità e/o spostamento della struttura o della membratura strutturale, funzione delle caratteristiche meccaniche dei materiali che la compongono (X_d) e dei valori nominali delle grandezze geometriche interessate (a_d), con il corrispondente
- b) **valore di progetto della domanda** E_d , funzione dei valori di progetto delle azioni (F_d) e dei valori nominali delle grandezze geometriche (a_d) della struttura interessata.

La verifica della sicurezza nei riguardi degli stati limite ultimi (SLU) è espressa dall'equazione formale:

$$R_d \geq E_d$$

Il **valore di progetto della resistenza** di un dato materiale X_d è, a sua volta, funzione del valore caratteristico della resistenza X_k , definito come frattile 5 % della distribuzione statistica della grandezza, attraverso l'espressione:

$$X_d = X_k / \gamma_M,$$

essendo γ_M il fattore parziale associato alla resistenza del materiale.

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 o come valore caratterizzato da un assegnato periodo di ritorno, attraverso l'espressione:

$$F_d = \gamma_F F_k$$

essendo γ_F il fattore parziale relativo alle azioni.

Per le verifiche agli SLU nel caso di concomitanza di più azioni variabili di origine diversa si definisce un **valore di combinazione** $\psi_0 F_k$, ove $\psi_0 \leq 1$ è un opportuno coefficiente di combinazione, che tiene conto della ridotta probabilità che più azioni di diversa origine si realizzino simultaneamente con il loro valore caratteristico.

Per grandezze caratterizzate da distribuzioni con coefficienti di variazione minori di 0.10, oppure per grandezze che non riguardino univocamente resistenze o azioni, si possono considerare i **valori nominali**, coincidenti con i valori medi.

Per le verifiche agli SLE la capacità di garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio deve essere verificata confrontando il valore limite di progetto associato a ciascun aspetto di funzionalità esaminato (capacità C_d), con il corrispondente valore di progetto dell'effetto delle azioni (E_d), attraverso la seguente espressione formale:

$$C_d \geq E_d$$

Coefficienti parziali di sicurezza per le resistenze e per le azioni; combinazioni di carico.

Resistenze dei materiali

Dal lato delle **resistenze** questo risultato si può ottenere passando dai valori caratteristici a quelli di progetto adottando coefficienti parziali di sicurezza.

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_R}$$

La normativa italiana stabilisce per il calcestruzzo $\gamma_c = 1.5$ e per l'acciaio $\gamma_s = 1.15$

Azioni

Per quanto riguarda le **azioni** da utilizzare nelle verifiche agli stati limite esse si classificano:

a) secondo la **modalità di applicazione**:

- dirette (da forze o carichi)
- indirette (da spostamenti o deformazioni imposte)
- da degrado (da alterazioni delle proprietà dei materiali).

b) secondo la **modalità di risposta nella struttura**:

- statiche (non provocano accelerazioni)
- dinamiche (provocano accelerazioni)
- pseudo-statiche (dinamiche ma rappresentabili da forze statiche equivalenti).

c) secondo la **variazione d'intensità nel tempo**:

- **azioni permanenti (G, g)** quelle che agiscono durante tutta la vita nominale della costruzione e la cui variazione di intensità è tale da poterle considerare costanti (es. pesi propri, spostamenti differenziali, azioni dovuti a effetti reologici, precompressione ecc.);
 - peso proprio di tutti gli elementi strutturali; peso proprio del terreno 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) (G_1);
 - peso proprio di tutti gli elementi non strutturali (G_2);
 - spostamenti e deformazioni imposti, previsti dal progetto e realizzati all'atto della costruzione;
 - pretensione e precompressione (P);
 - ritiro e viscosità;
 - spostamenti differenziali;
- **azioni variabili (Q, q)** quelle che hanno valori istantanei che possono variare significativamente nel tempo. Tali azioni si dicono di lunga durata se agiscono per un tempo non trascurabile rispetto alla vita nominale della struttura; di breve durata altrimenti. A seconda del sito ove sorge la costruzione, una medesima azione climatica può essere di lunga o di breve durata:
 - sovraccarichi (carichi variabili gravitazionali fissi o mobili);
 - azioni del vento;
 - azioni della neve;
 - azioni della temperatura.

- **azioni eccezionali (A)** quelle che si verificano solo eccezionalmente nel corso della vita nominale (per esempio incendi, esplosioni, impatti ecc.);
- **azioni sismiche (E)** quelle derivanti dai terremoti.

CARATTERIZZAZIONE DELLE AZIONI ELEMENTARI

Valore caratteristico delle azioni

Azioni permanenti. Il valore caratteristico G_k di azioni permanenti caratterizzate da distribuzioni con coefficienti di variazione minori di 0,10 si può assumere coincidente con il valore medio (indicato nel seguito con G , senza il pedice k)

Azioni variabili. 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.

Con riferimento alla durata relativa ai livelli di intensità di un'azione variabile, si definiscono poi, in funzione del valore caratteristico:

- il **valore quasi permanente** $\psi_{2j}Q_{kj}$: il valore istantaneo superato oltre il 50% del tempo nel periodo di riferimento. Indicativamente, esso può assumersi uguale alla media della distribuzione temporale dell'intensità;
- **valore frequente** $\psi_{1j}Q_{kj}$: il valore 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;
- **valore di combinazione** $\psi_{0j}Q_{kj}$: il valore tale 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.

Nel caso in cui la caratterizzazione probabilistica dell'azione considerata non sia disponibile, ad essa può essere attribuito il valore nominale (anche questi indicati nel seguito senza il pedice k-

La tabella seguente riporta i coefficienti ψ da adottarsi per gli edifici civili e industriali di tipo corrente.

Categoria/Azione variabile	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Categoria A Ambienti a 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 a uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti a uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H Coperture	0,0	0,0	0,0
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 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 di azioni per le verifiche

Le combinazioni delle **azioni permanenti e variabili** ai fini delle verifiche degli stati limite sono le seguenti (NB: + significa “combinato con”):

- combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli SLU:

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

- combinazioni rara, per SLE irreversibili:

$$G_1 + G_2 + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

- combinazioni frequente, per SLE reversibili:

$$G_1 + G_2 + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

- combinazione quasi permanente, generalmente impiegata per gli SLE relativi ad azioni che hanno effetti a lungo termine:

$$G_1 + G_2 + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Altre combinazioni esistono per casi specifici come quello sismico o derivante da azioni eccezionali.

Nelle combinazioni i coefficienti γ_i sono i **coefficienti parziali** amplificativi dei carichi e ψ_i sono **coefficienti di combinazione** che servono tenere conto della probabilità di accadimento contemporaneo di azioni di diversa natura.

Con Q_{k1} si indica la **azione variabile dominante** e Q_{k2} , Q_{k3} ecc. azioni variabili che possono agire **contemporaneamente** a quella dominante.

I valori dei coefficienti γ_i da assumere per la determinazione degli effetti delle azioni nelle verifiche agli SLU (STR – di resistenza delle strutture) sono riportati nella tabella nella colonna A1 (NTC2018):

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

		Coefficiente γ_F	EQU	A1	A2
Carichi permanenti G_1	Favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali $G_2^{(1)}$	Favorevoli	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevoli	γ_Q	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ 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.

Altri set di coefficienti sono previsti per verifiche agli SLU di tipo geotecnico (A2) e di equilibrio come corpo rigido (EQU).

Estratto Circolare esplicativa NTC2018

Punto C1.1 Logica della norma

“ Il percorso progettuale, volendolo sintetizzare, può pensarsi articolato nelle fasi della **concezione**, della **verifica**, della **esecuzione** e del **controllo**:

- la **concezione** è tutta e sola appannaggio della creatività, della competenza tecnica e dell'esperienza del singolo progettista; essa ricade nella sua esclusiva responsabilità, certo non può essere normata;
- la **verifica**, la **esecuzione** e il **controllo**, invece, ricadono nella sfera delle attività collettive, assumendo l'aspetto di un contratto sociale, di una convenzione che, pur essendo basata su valutazioni scientifiche, giunge a fissare la frontiera tra lecito e illecito, tra accettato e rifiutato, a seguito di tradizioni, mediazioni, accordi.

La normativa, proprio per il suo carattere eminentemente contrattuale e sociale, non si occupa della concezione, ma solo della verifica, della esecuzione e del controllo.

In questo ambito, certamente più ristretto, dello sviluppo progettuale, assumono importanza preminente, per gli obiettivi innanzi dichiarati, il **modello di calcolo** e il **metodo di analisi**, tenendo presente che le costruzioni civili, rispetto a quelle industriali, ad esempio, costituiscono sempre “oggetti unici”, cioè “prototipi”.

Per quest'ultimo motivo è utile identificare e riconoscere, da subito, quegli **elementi unificanti**, validi cioè per ogni costruzione, necessari per l'individuazione del modello di calcolo e la scelta del metodo di analisi.

Per ogni costruzione civile il **confronto tra capacità e domanda**, che la valutazione del livello di sicurezza impone, richiede una quantizzazione conseguita attraverso il filtro del modello di calcolo individuato e del metodo di analisi prescelto.”