



2

METODO SEMIPROBABILISTICO AGLI STATI LIMITE

A. A. 2024-2025
Corso di **Tecnica delle costruzioni**

Metodo semiprobabilistico agli stati limite

IL METODO SEMIPROBABILISTICO AGLI STATI LIMITE

Il metodo semiprobabilistico agli stati limite è una tecnica utilizzata nell'ambito dell'ingegneria strutturale per **progettare e verificare strutture** in modo che siano **sicure e funzionali**, tenendo conto delle **incertezze** associate ai carichi, ai materiali e alle geometrie.

Si definisce **SEMIPROBABILISTICO** perché è una combinazione tra un approccio deterministico (basato su stati limite definiti) e un approccio probabilistico, che tiene conto delle incertezze nella progettazione.

STATO LIMITE è una condizione superata la quale la struttura non soddisfa più le esigenze per le quali è stata progettata

In particolare le strutture devono garantire:

- **Sicurezza nei confronti di Stati Limite Ultimi (SLU):** capacità di evitare crolli, perdite di equilibrio e dissesti gravi, totali o parziali, che possano compromettere l'incolumità delle persone oppure comportare la perdita di beni, oppure provocare gravi danni ambientali e sociali, oppure mettere fuori servizio l'opera in modo irreversibile.

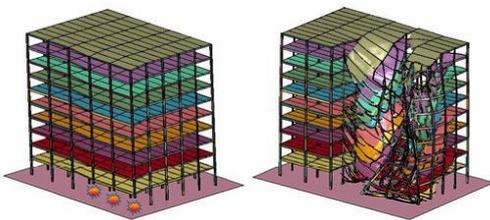
Esempi: *perdita di equilibrio della struttura o di una sua parte, deformazioni o movimenti eccessivi, raggiungimento della massima capacità di resistenza di parti di strutture, del suo insieme o dei terreni, rotture per fatica o per effetti dipendenti dal tempo, instabilità locale o globale.*

- **Sicurezza nei confronti di Stati Limite di Esercizio (SLE):** capacità di garantire le prestazioni previste per le condizioni di funzionalità in esercizio (condiziona o limita la prestazione dell'opera). Il superamento di uno stato limite di esercizio può avere carattere reversibile o irreversibile.

Esempi: *danneggiamenti locali (es. fessurazione del calcestruzzo), eccessive deformazioni e distorsioni, eccessive vibrazioni, danni per fatica, corrosione, degrado dei materiali... che possono alterare la durabilità, l'efficienza, l'uso o l'aspetto dell'opera o di sue parti (compresi anche elementi non strutturali, impianti, macchinari).*

- **Robustezza nei confronti di azioni Accidentali:** capacità di evitare danni sproporzionati rispetto all'entità di possibili cause innescanti eccezionali, quali esplosioni, urti, conseguenze di errori umani, incidenti vari.

Esempio: *deve essere evitato il collasso a catena dovuto al cedimento di uno o pochi elementi strutturali (in seguito a esplosioni, urti, ecc.)*



VALUTAZIONI DELLA SICUREZZA

Nel metodo agli stati limite, la sicurezza strutturale nei confronti degli **stati limite ultimi (SLU)** deve essere verificata confrontando

- la **capacità di progetto, 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 e dei valori nominali delle **grandezze geometriche** interessate

CON

- il corrispondente **valore di progetto della domanda, E_d**
 - ↳ funzione dei valori di progetto delle **azioni (F_d)** e dei valori nominali delle **grandezze geometriche** della struttura interessate.

E cioè:

$$\text{CAPACITA'} \quad R_d \geq E_d \quad \text{DOMANDA}$$

Analogamente, la capacità di garantire le prestazioni previste per le **condizioni di esercizio (SLE)** deve essere verificata confrontando il valore limite di progetto associato a ciascun aspetto di funzionalità esaminato (C_d), con il corrispondente valore di progetto dell'effetto delle azioni o domanda (E_d):

$$C_d \geq E_d$$



VITA NOMINALE DI UN'OPERA STRUTTURALE

- La **vita nominale di progetto** V_N di un'opera è convenzionalmente definita come il numero di anni nel quale è previsto che l'opera, purché soggetta alla necessaria manutenzione, mantenga specifici livelli prestazionali (e cioè deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata).

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



AZIONI SULLE COSTRUZIONI

$$\text{CAPACITA'} \geq \text{DOMANDA}$$

Un metodo di classificazione delle azioni è quello **secondo la variazione della loro intensità nel tempo**:

- Azioni **PERMANENTI (G)**: azioni che agiscono durante tutta la vita nominale di progetto della costruzione, la cui variazione di intensità nel tempo è molto lenta e di modesta entità:
 - peso proprio di tutti gli elementi STRUTTURALI (G1);
 - peso proprio di tutti gli elementi NON STRUTTURALI (G2);
 - spostamenti e deformazioni impressi, incluso il ritiro;
 - presollecitazione (P).
- Azioni **VARIABILI (Q)**: azioni che agiscono con valori istantanei che possono risultare sensibilmente diversi fra loro nel corso della vita nominale della struttura:
 - sovraccarichi;
 - azioni del vento;
 - azioni della neve;
 - azioni della temperatura.
- Azioni **ECCEZIONALI (A)**: che si verificano solo eccezionalmente nel corso della vita nominale della struttura, come incendi, esplosioni, urti e impatti;
- Azioni **SISMICHE (E)**: derivanti dai terremoti.



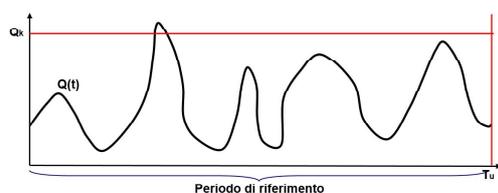
- Per le **azioni permanenti** si assume come **valore caratteristico G_k** il **valore medio** ricavato sulla base dei pesi nell'unità di volume forniti dalle norme (D.M. 17.01.2018 – Norme tecniche per le costruzioni).

Tab. 3.1.I - Pesi dell'unità di volume dei principali materiali

MATERIALI	PESO UNITÀ DI VOLUME [kN/m³]
Calcestruzzi cementizi e malte	
Calcestruzzo ordinario	24,0
Calcestruzzo armato (e/o precompresso)	25,0
Calcestruzzi "leggeri": da determinarsi caso per caso	14,0 - 20,0
Calcestruzzi "pesanti": da determinarsi caso per caso	28,0 - 50,0
Malta di calce	18,0
Malta di cemento	21,0
Calce in polvere	10,0
Cemento in polvere	14,0
Sabbia	17,0
Metalli e leghe	
Acciaio	78,5
Ghisa	72,5
Alluminio	27,0
Materiale lapideo	
Tufo vulcanico	17,0
Calcare compatto	26,0
Calcare tenero	22,0
Gesso	13,0
Granito	27,0
Laterizio (pieno)	18,0
Legnami	
Conifere e pioppo	4,0 - 6,0
Latifoglie (escluso pioppo)	6,0 - 8,0
Sostanze varie	
Acqua dolce (chiara)	9,81
Acqua di mare (chiara)	10,1
Carta	10,0
Vetro	25,0



- Per le **azioni variabili** si assume come **valore caratteristico Q_k** il valore corrispondente al frattile pari al 95% della popolazione dei massimi nel periodo di riferimento T_u .



Tab. 3.1.II - Valori dei sovraccarichi per le diverse categorie d'uso delle costruzioni

Cat.	Ambienti	q_k [kN/m²]	Q_k [kN]	H_k [kN/m]	
A	Ambienti ad uso residenziale				
	Aree per attività domestiche e residenziali: sono compresi in questa categoria i locali di abitazione e relativi servizi, gli alberghi (ad esclusione delle aree soggette ad affollamento), camere di degenza di ospedali	2,00	2,00	1,00	
	Scale comuni, balconi, ballatoi	4,00	4,00	2,00	
B	Uffici				
	Cat. B1 Uffici non aperti al pubblico	2,00	2,00	1,00	
	Cat. B2 Uffici aperti al pubblico	3,00	2,00	1,00	
C	Scale comuni, balconi e ballatoi	4,00	4,00	2,00	
	Ambienti suscettibili di affollamento				
	Cat. C1 Aree con tavoli, quali scuole, caffè, ristoranti, sale per banchetti, lettura e ricevimento	3,00	3,00	1,00	
	Cat. C2 Aree con posti a sedere fissi, quali chiese, teatri, cinema, sale per conferenze e attesa, aule universitarie e aule magne	4,00	4,00	2,00	
	Cat. C3 Ambienti privi di ostacoli al movimento delle persone, quali musei, sale per esposizioni, aree d'accesso a uffici, ad alberghi e ospedali, ad atri di stazioni ferroviarie	5,00	5,00	3,00	
	Cat. C4. Aree con possibile svolgimento di attività fisiche, quali sale da ballo, palestre, palcoscenici.	5,00	5,00	3,00	
	Cat. C5. Aree suscettibili di grandi affollamenti, quali edifici per eventi pubblici, sale da concerto, palazzetti per lo sport e relative tribune, gradinate e piattaforme ferroviarie.	5,00	5,00	3,00	
	Scale comuni, balconi e ballatoi	Secondo categoria d'uso servita, con le seguenti limitazioni			
		$\geq 4,00$	$\geq 4,00$	$\geq 2,00$	

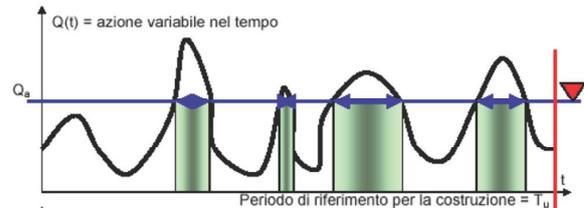


A partire da Q_k , si definiscono poi diversi **livelli di intensità** di un'azione variabile:

- valore **quasi permanente** $\psi_{2j}Q_{kj}$: il valore istantaneo superato oltre il 50% del tempo nel periodo di riferimento;
- valore **frequente** $\psi_{1j}Q_{kj}$: il valore superato per una piccola frazione del periodo di riferimento (~5%);
- 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.

Tab. 2.5.I – Valori dei coefficienti di combinazione

Categoria/Azione variabile	ψ_{0j}	ψ_{1j}	ψ_{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 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 ≤ 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, ...)	da valutarsi caso per caso		
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



Nelle verifiche di sicurezza si fa riferimento ai **valori di calcolo (o di progetto)** delle azioni, che si ottengono da quelli **caratteristici o di combinazione** moltiplicati per un **coefficiente di sicurezza** $\gamma_F \geq 1.0$.

Il coefficiente di sicurezza **AMPLIFICA LE AZIONI**, tenendo conto della **variabilità** aleatoria del valore dell'azione, dell'**approssimazione** del modello assunto, delle **incertezze** sulle effettive dimensioni delle strutture e finiture.

$$Q_d = \gamma_G \cdot Q_k$$

Valore di calcolo o di progetto dell'azione («d» sta per «design») Valore caratteristico dell'azione («k» sta per «characteristic»)

$$Q_d = \gamma_Q \cdot \psi_{ij} \cdot Q_k$$

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

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

Nelle norme italiane è prevista una serie di differenti combinazioni delle azioni

2.5.3. COMBINAZIONI DELLE AZIONI

Ai fini delle verifiche degli stati limite, si definiscono le seguenti 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, cosiddetta rara, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili:

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

- 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:

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

- Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E:

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

- Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali A:

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

Gli effetti dell'azione sismica saranno valutati tenendo conto delle masse associate ai seguenti carichi gravitazionali:

$$G_1 + G_2 + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj} \quad [2.5.7]$$

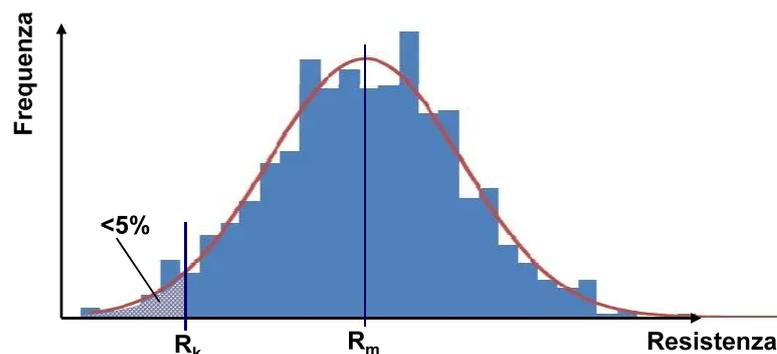


RESISTENZE

$$\text{CAPACITA'} \geq \text{DOMANDA}$$

Il valore della **resistenza caratteristica** rappresenta quel valore che ha una probabilità superiore o uguale al 95% di essere superato.

Può essere ricavata eseguendo numerose prove di rottura su campioni del materiale e riportando la distribuzione in **frequenza** dei valori di **resistenza** ottenuti, per poi individuare la porzione di area sottesa dalla curva che rappresenta non più del 5% dell'area totale.



Nelle verifiche si fa riferimento ai **valori di calcolo (o di progetto)** delle resistenze, che si ottengono da quelli caratteristici divisi per un coefficiente di sicurezza $\gamma_M \geq 1.0$.

Il coefficiente di sicurezza **RIDUCE LE RESISTENZE**, tenendo conto della **variabilità** aleatoria del valore della resistenza, delle diverse **condizioni di maturazione** tra campione di prova e materiale messo in opera, delle **incertezze** sulla geometria degli elementi strutturali impiegati, dell'**approssimazione** del modello di comportamento utilizzato per il materiale.

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

Valore di calcolo o di progetto della resistenza («d» sta per «design»)

Valore caratteristico della resistenza («k» sta per «characteristic»)

$$\text{SLU} \quad \left\{ \begin{array}{ll} \gamma_m = 1.5 & \text{calcestruzzo} \\ \gamma_m = 1.1 & \text{acciaio strutturale} \\ \gamma_m = 1.5 & \text{legno massiccio} \\ \gamma_m = 2.0 \div 3.0 & \text{muratura} \end{array} \right. \quad \text{SLE} \quad \gamma_m = 1.0$$



Bibliografia

- Eurocodice 1 – “Azioni sulle costruzioni – Parte 1.1: Pesi per unità di volume, pesi propri e sovraccarichi per gli edifici”, UNI EN 1991-1-1
- D.M. 17 gennaio 2018 “Norme tecniche per le costruzioni”.
- Circolare 21 gennaio 2019 n. 7/C.S.LL.PP.

