

2. SICUREZZA STRUTTURALE E METODI DI CALCOLO

2.1. Evoluzione del concetto di sicurezza

Il prof. Belluzzi nella prima pagina del suo celebre lavoro (1941) afferma che:

“La Scienza delle Costruzioni studia gli effetti prodotti dalle forze che sollecitano una costruzione e determina le condizioni cui devono soddisfare le diverse parti di questa affinché possano sopportare tali forze.”

La normativa europea (Eurocodice 2) fissa, come requisito fondamentale della progettazione, il principio che:

“Una struttura deve essere progettata e costruita in modo che:

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

Commento:

Si può notare una differenza fondamentale tra le due impostazioni:

- nella prima si parla di condizioni da soddisfare per sopportare le forze, in una versione deterministica di relazione causa-effetto.
- nella seconda si passa invece ad un approccio probabilistico (accettabile probabilità, adeguati livelli di accettabilità).

Inoltre nel primo caso ci si preoccupa solo della resistenza, mentre nel secondo si evidenzia una duplicità di problemi, legati a fatti quotidiani (rimanere adatta all'uso) ed eccezionali (sopportare tutte le azioni).

I metodi di calcolo ad oggi in uso sono caratterizzati dalla precisa consapevolezza che, a causa delle incertezze di differente tipo e natura che intervengono nella progettazione, la struttura è comunque sempre caratterizzata da un ben definito livello di rischio.

A seconda dell'importanza della costruzione, o della gravità del problema che si può manifestare in caso di danno, è quindi possibile, ed al contempo necessario, accettare differenti livelli di rischio.

2.2. La sicurezza

- Concetto essenzialmente probabilistico
- Non è ragionevole parlare di sicurezza assoluta delle strutture
- Accettare un inevitabile rischio di un qualsiasi evento temuto
- Mediante considerazioni di ordine probabilistico, considerare razionalmente il rischio, analizzando i fattori in gioco, graduandolo secondo le circostanze, contemperando l'esigenza di sicurezza con le disponibilità finanziarie
- Quale è il valore più conveniente del rischio (probabilità di rovina)?
- Valutazione della probabilità di rovina
- Normative: diversi livelli di rischio

La sicurezza di una struttura può essere compromessa da:

- Sottostima dei carichi
- Sovrastima delle resistenze degli elementi della struttura
- Errori nel calcolo delle azioni interne (eccessiva semplificazione nella modellazione)
- Errori di impostazione e/o svolgimento
- Inadeguatezza dei criteri di resistenza per le verifiche
- Errori di esecuzione e/o montaggio
- Sottostima del degrado di resistenza nel tempo (durabilità)
- ...



Importanza della corretta modellazione di:

a) carichi b) materiali c) struttura

2.3. Il concetto di “Vita Nominale di progetto V_N ”

Il D.M. 17/01/2018 (NTC2018) al paragrafo 2.4. riporta:

“La Vita Nominale di progetto un’opera strutturale V_N è convenzionalmente definita come il numero di anni nel quale è previsto che l’opera, purché soggetta alla necessaria manutenzione, mantenga specifici livelli prestazionali”.

Ciò deve essere precisato nei documenti di progetto.

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

Non sono da considerarsi temporanee le costruzioni o parti di esse che possono essere smantellate con l’intento di essere riutilizzate. Per un’opera di nuova realizzazione la cui fase di costruzione sia prevista in sede di progetto di durata pari a P_N , la vita nominale relativa a tale fase di costruzione, ai fini della valutazione delle azioni sismiche, dovrà essere assunta non inferiore a P_N e comunque non inferiore a 5 anni.

Le verifiche sismiche di opere di tipo 1 o in fase di costruzione possono omettersi quando il progetto preveda che tale condizione permanga per meno di 2 anni.

▪ “CLASSI D’USO”

Con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni risultano suddivise in quattro classi di importanza:

- 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 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.

▪ “PERIODO DI RIFERIMENTO PER L’AZIONE SISMICA

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento V_R che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la Vita Nominale per il coefficiente d’uso C_U :

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

Il valore del coefficiente C_U è definito nella seguente tabella, al variare della classe d’uso:

CLASSE D’USO	I	II	III	IV
coefficiente C_U	0.7	1.0	1.5	2.0

Per le costruzioni a servizio di attività a rischio di incidente rilevante si adotteranno valori di C_U anche superiori a 2, in relazione alle conseguenze sull’ambiente e sulla pubblica incolumità determinate dal raggiungimento degli stati limite.

▪ La durabilità

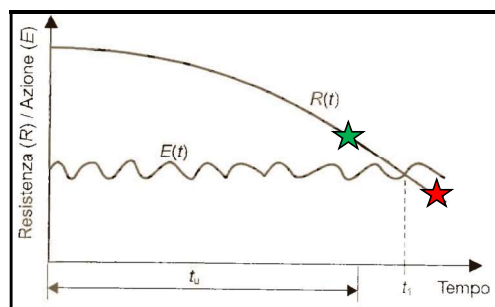
Si intende la

“conservazione nel tempo delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali e delle strutture.”

È una proprietà essenziale affinché 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.

La durabilità è funzione dell'ambiente in cui la struttura vive e del numero di cicli di carico cui la struttura potrà essere sottoposta.”

È compito del Progettista caratterizzare qualitativamente e quantitativamente tale ambiente, individuando e documentando chiaramente l'ambiente di progetto, che costituirà il quadro di riferimento generale per la definizione delle differenti situazioni di progetto.



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:

- “utilizzare materiali di ridotto degrado” ovvero un'opportuna scelta dei materiali per i quali l'ambiente determina una trascurabile riduzione di resistenza o di sezione resistente;
- adottare un adeguato proporzionamento delle dimensioni strutturali, cioè un opportuno dimensionamento delle strutture;
- scelta opportuna dei dettagli costruttivi;
- adozione di tipologie costruttive e strutturali che consentano, ove possibile, l'ispezionabilità delle parti strutturali; ovvero utilizzare eventualmente anche elementi caratterizzati da una vita utile inferiore a quella della struttura, ma periodicamente controllati, facilmente sostituibili con onere economico contenuto;

- 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;
- impiego di prodotti e componenti chiaramente identificati in termini di caratteristiche meccanico-fisico-chimiche, indispensabili alla valutazione della sicurezza, e dotati di **idonea qualificazione**, così come specificato al Capitolo 11 – NTC2018;
- applicazione di sostanze o ricoprimenti protettivi dei materiali, soprattutto nei punti non più visibili o difficilmente ispezionabili ad opera completata;
- adozione di sistemi di controllo, passivi o attivi, adatti alle azioni e ai fenomeni ai quali l'opera può essere sottoposta.

2.4. Metodi di verifica della sicurezza

- Deterministici: assumono che le grandezze utilizzate nel processo di verifica siano deterministiche (ovvero valutabili con certezza)
- 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)
- Il metodo alle Tensioni Ammissibili ed il Calcolo a Rottura sono metodi deterministici (Livello 0)
- Il metodo semiprobabilistico agli Stati Limite è, chiaramente, un metodo probabilistico (Livello 1)

2.5. Metodo di verifica alle Tensioni Ammissibili

Questo metodo è da considerarsi come il naturale punto di arrivo delle teorie basate sul "principio di sovrapposizione degli effetti":

- elasticità lineare (ipotizza che la struttura rimanga in campo elastico)
- "piccolezza" degli spostamenti
- vincoli lisci e bilateri

La sicurezza è garantita se, in ogni sezione di tutti gli elementi che costituiscono la struttura, lo stato tensionale non supera un valore limite accettabile detto "tensione ammissibile" ($\sigma_{id} < \sigma_{amm}$) (nel caso di stato di sforzo monoassiale: $\sigma < \sigma_{amm}$).

Il metodo richiede la valutazione:

- delle tensioni massime che la struttura dovrà sopportare durante la sua vita di esercizio;
- della resistenza del materiale, rappresentata dalla σ_{amm}

$$\sigma_{amm} = \frac{f_y}{\gamma} \quad (\text{nel caso dell'acciaio / legno})$$

2.6. Approccio probabilistico

Tutte le grandezze che intervengono nella fase progettuale, considerando quindi tutti i termini associati a resistenza e sollecitazione, sono di carattere aleatorio, ossia non riconducibili a valori univocamente noti o comunque individuabili in maniera deterministica.

L'approccio probabilistico richiede:

1. che il valore delle azioni (vento, neve, sisma) venga calcolato in funzione del loro periodo di ritorno T_R
2. la conoscenza della vita utile o nominale della struttura (normalmente 50 anni)
3. il valore della probabilità di riferimento P_C (variabile a seconda del tipo di stato limite considerato e della importanza della struttura)
4. di definire lo stato limite il cui raggiungimento si considera da evitare
5. di fornire adeguati procedimenti di verifica

Generalmente la probabilità di riferimento P_c è assunta pari a

S.L.U. $P_c = 10^{-4} \div 10^{-6}$ (periodi di ritorno $T_R = 10 \div 20$ volte la vita utile della struttura)

S.L.E. $P_c = 10^{-1} \div 10^{-3}$ (periodi di ritorno $T_R = 0.2 \div 0.5$ volte la vita utile della struttura)

L'approccio probabilistico mira quindi a valutare la probabilità di collasso ed a controllare che essa sia inferiore ad un valore (molto piccolo) considerato accettabile.

2.7. Metodo Semiprobabilistico agli Stati Limite

STATI LIMITE:

Sono stati oltre i quali la struttura o parte di essa NON SODDISFA più le richieste di prestazione progettuale

STATI LIMITE ULTIMI:

Sono stati associati al collasso strutturale e riguardano la sicurezza delle strutture e del loro contenuto oltre che ovviamente alla sicurezza delle persone.

- Perdita di equilibrio della struttura o di sua parte considerata come corpo rigido (ad es. ribaltamento di un muro di contenimento)
- Collasso per eccessiva deformazione, trasformazione in meccanismo
- Rottura
- Perdita di stabilità (tipica delle strutture snelle)
- Collasso per fatica o da altri effetti dipendenti dal tempo (come gli effetti viscosi che avvengono nei materiali)

STATI LIMITE di ESERCIZIO: Sono stati al di là dei quali non risultano più soddisfatti i requisiti di esercizio prescritti; comprende quindi situazioni che comportano un rapido deterioramento della struttura o la perdita della funzionalità.

- Deformazioni e spostamenti che influiscono sull'aspetto o sull'uso della struttura (incluso il funzionamento di macchine o servizi) o causano danneggiamenti delle finiture o degli elementi non strutturali
- Vibrazioni che causano mancanza di comfort alle persone, danno alle strutture o ai materiali che le compongono
- Danno (inclusa la fessurazione) che influisce in maniera negativa sull'aspetto, la durabilità ed il funzionamento della struttura
- Danno osservabile causato dalla fatica o da altri effetti dipendenti dal tempo

Il metodo semiprobabilistico agli Stati Limite appartiene alla famiglia dei [metodi di livello 1](#) ed il suo nome è dovuto al fatto che la variabilità di R ed S viene tenuta in conto, in modo semplificato, introducendo [opportuni coefficienti di sicurezza \$\gamma\$](#) , [distinti](#) in coefficienti minorativi γ_m per la resistenza dei materiali e in maggiorativi γ_f per le azioni.

Il metodo prevede le seguenti fasi operative

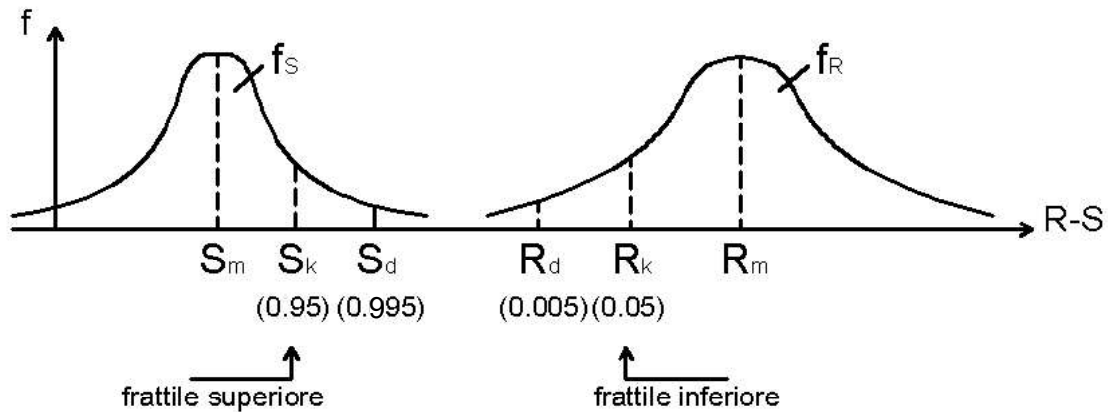
- Si assumono i valori caratteristici di resistenza R_k e di sollecitazione S_k . Tali valori vengono desunti direttamente dalle indicazioni riportate nella vigente Normativa Tecnica.
- Si tiene conto dei restanti fattori di incertezza trasformando i valori caratteristici R_k ed S_k in valori di progetto (design) R_d ed S_d tramite i coefficienti parziali di sicurezza γ_m e γ_f . Tali valori sono riportati nella vigente Normativa Tecnica.

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

$$S_d = S_k \cdot \gamma_f$$

- Si opera quindi il confronto diretto fra i valori di progetto R_d e S_d verificando che la sollecitazione di progetto non ecceda la resistenza.

$$R_d \geq S_d$$



Appare evidente come i coefficienti parziali di sicurezza assumano un ruolo determinante all'interno del metodo agli Stati Limite

2.8. Considerazioni conclusive

I criteri di sicurezza rappresentano una **condizione necessaria ma NON sufficiente** per escludere i collassi strutturali, perché c'è sempre la possibilità di errore.

Si può osservare che:

- i collassi strutturali dovuti a condizioni sfavorevoli di combinazioni di carichi troppo elevati e di resistenze troppo ridotte sono estremamente rari.
- la maggior parte dei collassi strutturali è conseguenza di errori di progettazione:
 - Concezione strutturale (ad es. schema strutturale sbagliato)
 - Trasmissione dei dati di progetto
 - Interpretazione delle normative
 - Individuazione degli stati limite (posso supporre che la mia struttura collassi per una determinata situazione e invece collassa per un'altra)
 - Modellazione strutturale
 - Calcolo (molto più frequente di una volta)
 - Disegno

- Errori di realizzazione:
 - Non conoscenza dei dati di progetto
 - Mancanze nell'approvvigionamento dei materiali
 - Mancanza di controllo nell'esecuzione

- Errori di utilizzazione:
 - Cattivo uso della costruzione
 - Modifiche alla costruzione
 - Difetti di manutenzione

- Errori umani:
 - Deviazioni non intenzionali da prassi comuni accettate
 - Superficialità o mancanza di conoscenza nel trattare il problema specifico
 - Condizionamenti da parte di fatti o persone estranee al problema tecnico (ad es. questioni di budget)

Per mitigare gli effetti degli errori umani non è sufficiente aumentare i coefficienti di sicurezza (a volte farlo peggiora la sicurezza, in passato infatti tali coefficienti erano più alti fino a quando ci si è resi conto che a favore di sicurezza era meglio abbassarli),

ma bisogna assicurare un controllo della QUALITÀ

- qualità della progettazione
- qualità dell'organizzazione del lavoro (responsabili a vario livello)
- formazione degli operatori (ognuno deve operare correttamente e collaborare per un corretto operare degli altri)

È NECESSARIA LA QUALITÀ

DELLA PROGETTAZIONE E DELL'ESECUZIONE

Gli Eurocodici esplicitamente affermano che le prescrizioni normative presuppongono le buone qualità di tutti gli operatori coinvolti nel progetto, esecuzione e utilizzazione della costruzione.

2.9. Riferimenti bibliografici essenziali

- “Il cemento armato” – A. Ghersi – Flaccovio Editore
- “Progettare costruzioni in acciaio” – G. Ballio e C. Bernuzzi – Heopli
- “Strutture in legno” – M. Piazza, R. Tomasi e R. Modena – Heopli
- “Progetto agli stati limite delle strutture in c.a. – parte prima” – A.Migliacci e F.Mola. – Masson Editore
- “Manuale di ingegneria civile – vol 2” (3^a edizione) – AA.VV. – Zanichelli / Esac
- “Guida all’uso dell’Eurocodice 2 (Vol 1) – aicap – Edizioni Pubblicamento
- “Norme tecniche per le costruzioni” a cura di D. Guzzoni - Il Sole24 ore
- D.M. 14/01/2008 “Norme tecniche per le costruzioni”
- Circolare 2 febbraio 2009 - Istruzioni per l’applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 14 gennaio 2008
- D.M. 17/01/2018 “Norme tecniche per le costruzioni”
- Circolare 21 gennaio 2019 - Istruzioni per l’applicazione dell’Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 17 gennaio 2018