

GIOVANNI FRONTE

**CALCOLO AGLI STATI LIMITE
DI STRUTTURE IN C.A.**

CON CENNI SULL'EUROCODICE EC2

INDICE

<i>Prefazione</i>	pag. 9
<i>Caratteristiche dei materiali - Unità di misura</i>	» 11
1. STATI LIMITE ITALIANI DELLE STRUTTURE IN CEMENTO ARMATO	
1.1. Riferimenti normativi	» 13
1.1.1. Definizioni	» 14
1.2. Stati limite ultimi italiani – Metodo semiprobabilistico o dei coefficienti parziali	» 15
1.2.1. Criteri di calcolo agli stati limite ultimi	» 15
1.2.2. Valori caratteristici e valori di calcolo – Deformazioni	» 16
1.2.2.1. Valori caratteristici di resistenza dei materiali	» 16
1.2.2.1.1. Calcestruzzo	» 17
1.2.2.1.2. Acciaio	» 20
1.2.2.2. Riepilogo delle deformazioni	» 22
1.2.3. Azioni caratteristiche e di calcolo	» 22
1.2.3.1. Azioni di calcolo negli stati limite ultimi	» 23
1.2.3.2. Sollecitazioni di progetto S_d	» 25
1.2.3.3. Resistenze di calcolo dei materiali	» 26
1.2.3.4. Sollecitazioni resistenti R_d	» 26
1.2.4. Stati limite ultimi per tensione normale	» 27
1.2.4.1. Ipotesi di calcolo	» 27
1.2.4.2. Campi di rottura	» 29
1.2.4.3. Tipi di rottura per sollecitazioni semplici	» 31
1.2.4.3.1. Compressione semplice	» 31
1.2.4.3.2. Trazione semplice	» 32
1.2.4.3.3. Flessione semplice – Sezione rettangolare a semplice armatura – diagramma tensioni semplificato	» 32
1.2.4.3.3.1. Verifica allo stato limite ultimo	» 33
1.2.4.3.3.2. Progetto	» 38
1.2.4.3.3.3. Esempi di progetto e di verifica.....	» 41
1.2.4.3.4. Flessione semplice – Sezione rettangolare a doppia armatura – diagramma semplificato	» 47
1.2.4.3.4.1. Procedimenti di calcolo	» 51
1.2.4.3.4.2. Applicazioni numeriche	» 59
1.2.4.4. Tipi di rottura per sollecitazioni composte	» 65
1.2.4.4.1. Pressoflessione retta – Doppia armatura	» 65
1.2.4.4.1.1. Premesse e ipotesi di verifica allo stato limite ultimo	» 65
1.2.4.4.1.2. Verifica della sicurezza	» 66
1.2.4.4.1.3. Pressoflessione retta – Sezione di forma qualsiasi	» 68

1.2.4.4.1.4. Pressoflessione retta con grande eccentricità – Sezione rettangolare – Doppia armatura – Diagramma semplificato.....	» 70
1.2.4.4.1.5. Esempi di verifica a pressoflessione retta di sezioni rettangolari	» 78
1.2.4.4.1.6. Pressoflessione con piccola eccentricità – Sezione rettangolare	» 83
1.2.4.4.2. Trazione e flessione	» 83
1.2.5. Stati limite ultimi per tensione tangenziale.....	» 84
1.2.5.1. Stato limite ultimo per taglio	» 84
1.2.5.1.1. Metodo di calcolo	» 85
1.2.5.1.2. Disposizioni costruttive	» 88
1.2.5.1.3. Applicazioni numeriche	» 89
1.2.5.2. Stato limite ultimo per torsione	» 96
1.2.5.2.1. Verifica della resistenza	» 97
1.2.5.2.2. Procedimento di calcolo	» 98
1.2.6. Azioni combinate.....	» 98
1.2.6.1. Torsione, flessione e sforzo normale	» 98
1.2.6.2. Torsione e taglio	» 99
1.2.7. Colonna modello	» 99
1.3. Stati limite di esercizio	» 100
1.3.1. Condizioni ambientali	» 101
1.3.2. Azioni di calcolo – Combinazioni di carico	» 101
1.3.3. Stati limite di fessurazione per tensione normale	» 104
2. STATI LIMITE SECONDO L'EUROCODICE 2	
2.1. Eurocodice 2 (EC2).....	» 107
2.1.1. Normativa europea.....	» 107
2.1.2. Modello di verifica EC2	» 108
2.1.2.1. Valori caratteristici di resistenza dei materiali	» 108
2.1.2.2. Azioni di calcolo (progetto)	» 110
2.1.3. Stati limite ultimi.....	» 111
2.1.3.1. Combinazione delle azioni	» 112
2.1.4. Stati limite di esercizio	» 113
2.1.5. Sollecitazioni di rottura	» 113
2.1.5.1. Pressoflessione	» 114
2.1.5.2. Taglio.....	» 114
2.1.6. Fessurazione.....	» 116
2.1.6.1. Limitazione ampiezze fessure.....	» 116
2.1.6.2. Calcolo ampiezza fessure	» 117
3. ESEMPIO DI CALCOLO	
3.1. Esempio esteso di calcolo agli stati limite italiani (zona non sismica)	» 119
3.1.1. Materiali	» 119
3.1.2. Combinazione delle azioni	» 120

3.1.2.1. Stato limite ultimo	» 120
3.1.2.2. Stato limite di esercizio	» 120
3.1.3. Analisi dei carichi	» 121
3.1.3.1. Carichi unitari	» 121
3.1.3.2. Azioni dovute al vento (Norme tecniche di cui al D.M.LL.PP. 16/1/1996).....	» 121
3.1.4. Analisi e combinazione dei carichi	» 124
3.1.4.1. Analisi dei carichi	» 124
3.1.4.2. Combinazioni dei carichi	» 124
3.1.4.3. Combinazioni carichi n. 5 e 6.....	» 125
3.1.5. Telaio	» 126
3.1.5.1. Risoluzione del telaio B	» 128
3.1.6. Sollecitazioni nelle travi e nei pilastri del 1° impalcato (dal telaio B)	» 132
3.1.7. Travi	» 133
3.1.7.1. Calcolo armature a flessione.....	» 133
3.1.7.2. Calcolo armature trasversali a taglio (staffe)	» 143
3.1.8. Pilastri	» 146
3.1.8.1. Sollecitazioni sui pilastri.....	» 146
Appendice	» 153
Riferimenti bibliografici	» 157

Prefazione

A parte alcune osservazioni, in corso di esame, sulla normativa antisismica presentate dalle Regioni e dalle Associazioni di categoria, è arrivato alla conclusione il lunghissimo e travagliato iter legislativo dei vari provvedimenti destinati a disciplinare tutta la nuova normativa tecnica da applicare nella realizzazione delle costruzioni.

L'Assemblea generale del consiglio superiore dei lavori pubblici, nella seduta del 27 luglio 2007, ha espressamente previsto la proroga al 31 dicembre 2007 del periodo transitorio durante il quale è ancora possibile applicare, in alternativa alle nuove norme tecniche per le costruzioni contenute nel D.M. del 14 settembre 2005, la precedente normativa di cui alle L. 1086/71 e L. 64/74 con le relative norme di attuazione.

Per quanto riguarda la classificazione sismica riportata nell'allegato dell'O.P.C.M. 3274, così come modificata dalle delibere regionali e riportata nella medesima ordinanza, è da considerare anch'essa vigente.

Il testo aggiornato (terza versione ufficiosa emanata dal Ministero) contiene le risultanze delle osservazioni presentate da parte del Dipartimento della protezione civile ed ha anche ricevuto il parere favorevole del Ministero delle infrastrutture. Le novità introdotte, non sostanziali, richiamano in maniera più esplicita i legami con l'ordinanza 3274 in materia antisismica.

Una quarta revisione riguarda il cambiamento del titolo di frontespizio da "Testo Unico Norme Tecniche per le Costruzioni" a quello più semplice di "Norme Tecniche per le Costruzioni".

L'aspetto più interessante e innovativo della nuova normativa italiana ed europea, per quanto attiene l'Eurocodice 2: "Progettazione delle strutture in calcestruzzo", è senz'altro rappresentato dal passaggio definitivo dal modello di calcolo basato sulle tensioni ammissibili, cui sono da sempre legati gli attuali progettisti strutturali italiani, a quello agli stati limite che, benché consentito in Italia da oltre 20 anni, non era però applicabile per il calcolo di strutture in zona sismica e di fatto non applicato in nessun caso nella pratica professionale corrente.

I due differenti metodi di calcolo hanno sicuramente approcci completamente diversi dal punto di vista concettuale, ma portano generalmente a risultati di calcolo non eccessivamente diversi dal punto di vista dimensionale e dei costi di realizzazione.

Tralasciamo di occuparci dell'ormai comune metodo di calcolo basato sulle

tensioni ammissibili, che a tutt'oggi ha rappresentato il metodo classico più diffuso in Italia, per trattare degli altri due metodi agli stati limite già in uso in campo europeo.

La sostanziale innovazione normativa coinvolge tutti i tecnici del settore e rende necessario un loro aggiornamento teorico, atto a ricostruirsi un'esperienza di calcolo del tutto nuova.

Il presente lavoro, lungi dall'esaurire il vasto, complesso e in certi punti anche ambiguo argomento, vuole essere solo un primo approccio alla nuova normativa con l'augurio che riesca ad iniziare il tecnico interessato verso la nuova svolta professionale.

Giovanni Fronte

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Fronte', with a stylized, cursive script.

CARATTERISTICHE DEI MATERIALI – UNITÀ DI MISURA

CALCESTRUZZO (DATI RIFERITI ALLA CLASSE C 25/30)

Resistenze e modulo di elasticità espressi in MPa.

- Classe di resistenza: $R_{ck} = 30$
- Resistenza cilindrica caratteristica: $f_{ck} = 0,83R_{ck} = 24,90$
- Resistenza cilindrica di calcolo: $f'_{cd} = f_{ck}/\gamma_c$
- Resistenza cilindrica di calcolo, ridotta:
 $f_{cd} = \alpha f'_{cd} = 0,85 f_{ck}/\gamma_c = 0,85 f_{ck}/1,6 = 13,22$

Nei calcoli che seguono il simbolo f_{cd} indica la resistenza cilindrica ridotta che tiene già conto del coefficiente di riduzione $\alpha = 0,85$.

- Resistenza media a trazione semplice:

$$f_{ctm} = 0,27\sqrt[3]{R_{ck}^2} = 2,61$$

- Resistenza caratteristica a trazione (frattile 5%):

$$f_{ctk} = 0,25\sqrt[3]{f_{ck}^2} = 1,82$$

- Resistenza di calcolo a trazione:

$$f_{ctd} = f_{ctk}/\gamma_c = 1,6 = 0,118\sqrt[3]{R_{ck}^2} = 1,14$$

- Resistenza media a trazione per flessione:

$$f_{cfm} = 1,2 f_{ctm} = 3,13$$

- Modulo elastico istantaneo (tangente all'origine):

$$E_c = 5700\sqrt{R_{ck}} = 31220$$

ACCIAIO (FEB44K)

Tensioni e modulo di elasticità espressi in MPa.

- Tensione di snervamento caratteristica: $f_{yk} = 430$
- Tensione di snervamento di calcolo:
 $f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s = f_{yk}/1,15 = 373,9$
- Modulo elastico: $E_s = 206 \cdot 10^3$

FATTORI DI SICUREZZA PARZIALI

- Coefficiente di sicurezza per calcestruzzo: $\gamma_c = 1,6$
- Fattore di lunga durata carichi (cls): $\alpha = 0,85$
- Coefficiente sicurezza per acciaio: $\gamma_s = 1,15$

ALLUNGAMENTI SPECIFICI

a) Calcestruzzo

- Fine tratto parabolico: $\varepsilon_{c1} = 0,2 \%$
- Deformazione ultima: $\varepsilon_{cu} = 0,35 \%$

b) Acciaio

- Deformazione ultima: $\varepsilon_{su} = 1 \%$
- Deformazione al limite elastico (FeB44K): $\varepsilon_{yd} = 0,181 \%$

SISTEMA DI MISURE INTERNAZIONALE

Unità – multipli – equivalenze [N – m – sec]

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa}$$

$$1 \text{ kN} = 1000 \text{ N} = \approx 100 \text{ kg} (= 1 \text{ Q})$$

$$1 \text{ kg/cm}^2 = 0,1 \text{ N/mm}^2$$

$$1 \text{ N/mm}^2 = 10 \text{ kg/cm}^2$$

1. STATI LIMITE ITALIANI DELLE STRUTTURE IN CEMENTO ARMATO

1.1. RIFERIMENTI NORMATIVI

Il 1° gennaio 2008 sono entrate definitivamente in vigore, dopo molteplici revisioni, le nuove norme tecniche per le costruzioni.

Tali norme prescrivono l'utilizzo del metodo semiprobabilistico agli stati limite nel calcolo delle strutture, anche in zona sismica, assumendo come riferimento i criteri e i metodi applicativi descritti negli eurocodici italiano ed europeo (Eurocodice 2).

Esce pertanto di scena il modello di calcolo basato sulle "tensioni ammissibili" (D.M. 9/1/96) che considerava i materiali omogenei ed isotropi e che riteneva non soddisfatta la verifica, sempre di tipo elastico lineare, se il limite elastico veniva superato anche in un solo punto della sezione. Le verifiche di resistenza condotte con il vecchio metodo saranno consentite solo in pochi comuni italiani e per controlli su calcoli effettuati con le precedenti norme.

La prima ordinanza (l'O.P.C.M. 3274 del marzo 2003) relativa alle nuove norme tecniche era viziata già in origine da molte imprecisioni per cui ha dovuto subire ben due modifiche ed integrazioni (l'O.P.C.M. 3316 dell'ottobre 2003 e l'O.P.C.M. 3431 del maggio 2005) ed è stata di fatto superata dal D.M. 14 settembre 2005: "Norme tecniche per le strutture". I provvedimenti aggiornano e condensano in un unico volume tutta la normativa italiana relativa alla progettazione e alla realizzazione dei manufatti edilizi.

La classificazione sismica delle varie zone, definita inizialmente negli allegati all'O.P.C.M. 3274 del 2003 è stata poi modificata dalle delibere regionali successive alla medesima ordinanza ed è tuttora vigente.

Come verrà più avanti ribadito, la valutazione della resistenza di una sezione in cemento armato effettuata con il metodo degli S.L.U. non esaurisce il compito del calcolatore in quanto per gli elementi in cemento armato ordinario le norme prescrivono, salvo eccezioni che verranno più avanti specificate, la verifica analitica degli stati limite di esercizio relativamente alle tensioni normali di esercizio, all'apertura delle fessure e alle deformazioni.

Tra le novità della nuova normativa, rispetto al D.M. 9/1/96, si annoverano le seguenti:

- a) viene preso in considerazione un unico tipo di acciaio per le armature, con caratteristiche ben definite di snervamento, di rottura e di allungamento che garantiscono alle sezioni una notevole duttilità;
- b) il copriferro viene maggiorato, con l'obbligo di indicare la maggiorazione nei progetti esecutivi;
- c) la lunghezza di ancoraggio delle barre in zona compressa va calcolata come per le barre in zona tesa.

I due metodi di calcolo agli stati limite, italiano ed europeo, sono sostanzialmente simili nei concetti di base ed hanno in comune le prescrizioni inerenti le azioni, le combinazioni, il materiale ed il collaudo statico. L'adeguamento del metodo italiano all'Eurocodice 2, per quanto attiene i valori numerici di una serie di parametri e coefficienti, è specificato nel DAN (documento di applicazione nazionale – v. norme).

1.1.1. Definizioni

Si definisce stato limite ogni stato di insufficienza strutturale dovuto a cause diverse. Il metodo di calcolo parte dal presupposto che le strutture siano progettate tenendo conto di situazioni limite, compresa quella di collasso, per le quali la struttura viene messa fuori servizio.

Le norme distinguono due tipi di stati limite:

- a) stato limite ultimo (S.L.U.): è lo stato oltre il quale si possono avere collasso o cedimenti strutturali che mettono in pericolo la sicurezza delle persone o delle cose. I fenomeni che si possono presentare sono: perdita di stabilità delle strutture, rottura di sezioni critiche, collasso per incendio ed esplosioni, ecc.;
- b) stato limite di esercizio (S.L.E.): è lo stato oltre il quale l'utilizzo della struttura non è più ottimale e la costruzione, pur non manifestando cedimenti strutturali, non può essere utilizzata per gli scopi preposti; i fenomeni che si possono presentare sono: deformazioni eccessive, fessurazioni eccessive, ecc.

Uno stato limite può essere raggiunto per combinazione di diversi fattori di insicurezza che possono riguardare la resistenza dei materiali, le incertezze dei carichi permanenti, dei sovraccarichi, delle deformazioni, ecc. Appare pertanto evidente che lo scopo del metodo è anche quello di ottimizzare il costo della struttura mantenendo la richiesta sicurezza entro limiti prefissati.

1.2. STATI LIMITE ULTIMI ITALIANI – METODO SEMIPROBABILISTICO O DEI COEFFICIENTI PARZIALI

Per ridurre l'influenza delle incertezze connesse con la non perfetta conoscenza dei valori effettivi e della variabilità di grandezze che entrano in gioco nella sicurezza, quali ad esempio la resistenza dei materiali, le azioni esterne applicate, ecc., anziché ricorrere a una più approfondita analisi probabilistica completa della sicurezza, si fa ricorso a un modello semplicistico di verifica semiprobabilistico degli stati limite, detto anche *metodo dei coefficienti parziali*, che ha lo scopo di contenere entro un limite predefinito di probabilità il raggiungimento di un determinato stato limite.

Il ricorso a questo modello mira a valutare le probabilità di collasso e conseguentemente a ridurle a valori molto bassi che si possano ritenere accettabili. Esso si basa sull'assunzione di valori caratteristici per le resistenze dei materiali e per le azioni agenti, entrambe prefissate a priori in funzione delle probabilità di scostamento, in più o in meno, dei valori effettivi rispetto a quelli prefissati. Il fattore di incertezza viene ridotto trasformando i valori caratteristici in valori di calcolo tramite l'introduzione di coefficienti di sicurezza.

In sostanza, il modello semiprobabilistico degli stati limite induce a:

- a) stabilire quali S.L. si vogliono evitare nella struttura;
- b) valutare la gravità dei rischi che comportano gli S.L. prefissati e conseguentemente fissare i limiti probabilistici di ammissibilità per il tipo di struttura in esame;
- c) definire le regole da seguire affinché la probabilità di accadimento dei fenomeni rientri nei limiti prefissati.

1.2.1. Criteri di calcolo agli stati limite ultimi

Il calcolo allo stato limite ultimo di una struttura mira a valutarne la resistenza a rottura e il valore del carico che la determina, partendo da dati certi (entro limiti ben definiti) dei valori di sollecitazioni che producono la plasticizzazione e la rottura della sezione, tenendo quindi conto della non linearità del legame costitutivo $\sigma - \epsilon$ del materiale.

I criteri su cui si basa il metodo sono i seguenti:

- 1) assunzione dei cosiddetti *valori caratteristici* (contrassegnati con k) sia per la resistenza dei materiali che per le azioni agenti, entrambe prefissate a priori in funzione delle probabilità di scostamento dei valori effettivi rispetto a quelli prefissati;
- 2) introduzione di opportuni coefficienti di sicurezza (contrassegnati con γ) per coprire tutte le incertezze e trasformare i valori caratteristici in valori

di calcolo (contrassegnati con d). Il coefficiente di sicurezza viene qui applicato alle azioni esterne anziché alle resistenze interne come nel criterio basato sulle tensioni ammissibili;

- 3) verifica basata sul confronto fra la sollecitazione di calcolo S_d e la resistenza di calcolo R_d della struttura, quest'ultima valutata per lo S.L. in esame, dovendo risultare in ogni sezione:

$$S_d \leq R_d \quad (1.1)$$

avendo indicato con:

S_d = l'azione caratteristica esterna, di progetto, maggiorata con appositi coefficienti di combinazione;

R_d = la resistenza di calcolo sviluppata dai materiali, ottenuta partendo da quella caratteristica, ridotta poi con l'applicazione di coefficienti di sicurezza.

1.2.2. Valori caratteristici e valori di calcolo – Deformazioni

Come già accennato, il metodo agli stati limite ultimi fa riferimento ai cosiddetti valori caratteristici delle resistenze dei materiali e delle azioni esterne che con l'applicazione di opportuni coefficienti riduttivi si trasformano in valori di calcolo.

La simbologia adottata è la seguente:

- valori caratteristici: sono contrassegnati con il pedice k , così ad esempio il simbolo f_{ck} indica la resistenza caratteristica del calcestruzzo;
- valori di calcolo: sono contrassegnati con il pedice d , così il simbolo f_{cd} indica la resistenza di calcolo del calcestruzzo.

1.2.2.1. Valori caratteristici di resistenza dei materiali

I valori della resistenza di un determinato tipo di materiale, rilevati con misure dirette su diversi campioni, risultano in genere molto differenti. Per ovviare a questa differenza si è introdotto il concetto di *valore caratteristico* della resistenza, ovvero il valore per cui esiste una probabilità $\leq 5\%$ di trovare un provino con resistenza inferiore a quella definita *caratteristica*; in altri termini, detto valore viene confermato da un numero di provini \geq al 95%.

Il criterio di verifica agli stati limite spinge il calcestruzzo e l'acciaio, entrambi considerati materiali elasto-plastici a duttilità limitata, a lavorare oltre il campo elastico lineare. La normativa individua come S.L.U. per il cemento armato la limitazione delle deformazioni e quindi non più la limitazione delle sollecitazioni interne.