

**Gianni Michele De Gaetanis**

# **Verifiche e dimensionamento di elementi strutturali**

**VOLUME SECONDO**



**SOLLECITAZIONE DI TAGLIO,  
TORSIONE, INSTABILITÀ E STATI LIMITE DI ESERCIZIO**

**CD-ROM INCLUSO**

D.M. 14 GENNAIO 2008  
C.M. 2 FEBBRAIO 2009, N. 617  
SPETTRI DI RISPOSTA

The logo for GRAFILL, featuring a stylized graphic of a building or structure above the word "GRAFILL" in a bold, sans-serif font.

Gianni Michele De Gaetanis

## VERIFICHE E DIMENSIONAMENTO DI ELEMENTI STRUTTURALI (VOLUME SECONDO)

ISBN 13 978-88-8207-367-1

EAN 9 788882 073671

Manuali, 86

Prima edizione, gennaio 2010

De Gaetanis, Gianni Michele <1970->  
Verifiche e dimensionamento di elementi strutturali /  
Gianni Michele De Gaetanis. – Palermo : Grafill  
1. Strutture edilizie – Controllo.  
624.17 CDD-21 SBN Pal0218223  
2 / Gianni Michele De Gaetanis. – Palermo : Grafill, 2010.  
(Manuali ; 86)  
ISBN 978-88-8207-367-1  
CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail [grafill@grafill.it](mailto:grafill@grafill.it)

Finito di stampare nel mese di gennaio 2010

presso **Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l.** Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

<b>Prefazione</b> .....	p.	13
<b>Avvertenze e quadro legislativo</b> .....	“	13
<b>Convenzioni terminologiche</b> .....	“	14
<b>SIMBOLI UTILIZZATI</b> .....	“	15
<b>CARATTERISTICHE DEI MATERIALI</b> .....	“	27
Avvertenze introduttive.....	“	29
Materiali.....	“	29
Calcestruzzo.....	“	29
Titolo.....	“	29
SLU.....	“	29
Legame costitutivo parabola-rettangolo.....	“	29
Legame costitutivo triangolo-rettangolo.....	“	29
Legame costitutivo rettangolo (Stress-block).....	“	30
Parametri di calcolo.....	“	30
Coefficienti di sicurezza.....	“	30
SLE/SLS.....	“	31
Parametri di calcolo.....	“	31
Coefficienti di sicurezza.....	“	32
Acciaio.....	“	32
Generalità.....	“	32
SLU.....	“	32
Legame costitutivo bilineare finito con incrudimento....	“	32
Legame costitutivo elastico perfettamente plastico		
indefinito.....	“	33
Parametri di calcolo.....	“	33
Coefficienti di sicurezza.....	“	33
SLE/SLS.....	“	33
Coefficienti di sicurezza.....	“	34
Riferimenti bibliografici.....	“	34
<b>ELEMENTI DI STATICA DEL CALCESTRUZZO ARMATO</b> ....	“	35
Avvertenze introduttive.....	“	37
Principi generali.....	“	37
Introduzione ed ipotesi di base.....	“	37
Approccio e formulazione generale per comportamento		
lineare dei materiali.....	“	37
Studio delle componenti normali.....	“	37
Studio delle componenti flettenti.....	“	38
Sistema risolutivo.....	“	38
Studio riferito al calcestruzzo con sezione parzializzata...	“	38
Flessione.....	“	38
Presso/tenso flessione.....	“	39
Studio riferito al calcestruzzo con sezione tutta reagente.	“	39
Flessione.....	“	39
Presso/tenso flessione.....	“	40

Approccio e formulazione generale per comportamento non lineare dei materiali.....	p.	41
Snervamento dell'acciaio.....	"	41
Studio delle componenti normali.....	"	41
Studio delle componenti flettenti.....	"	41
Sistema risolutivo.....	"	42
Flessione.....	"	42
Presso/tenso flessione.....	"	42
Materiali in condizioni ultime.....	"	43
Acciaio in condizioni ultime.....	"	43
Studio dell'equilibrio con calcestruzzo in campo elasto-plastico.....	"	43
Studio dell'equilibrio con calcestruzzo in campo plastico.....	"	44
Calcestruzzo in condizioni ultime.....	"	45
Studio dell'equilibrio con acciaio in campo plastico.....	"	45
Studio dell'equilibrio con acciaio in campo elastico.....	"	46
Calcestruzzo e acciaio teso in condizioni ultime.....	"	47
Coefficienti di omogeneizzazione.....	"	47
Riferimenti bibliografici.....	"	48
<b>CENNI SULLE APPLICAZIONI NUMERICHE.....</b>	"	49
Avvertenze introduttive.....	"	51
Introduzione.....	"	51
Concetto di errore.....	"	51
Errore vero percentuale.....	"	51
Errore relativo percentuale.....	"	51
Cifre significative esatte e errore relativo percentuale massimo.....	"	52
Zeri di una equazione.....	"	52
Metodo della bisezione.....	"	52
Metodo di Newton-Raphson.....	"	52
Interpolazione lineare.....	"	53
Riferimenti bibliografici.....	"	54
<b>ESEMPI DI CALCOLO E VERIFICA.....</b>	"	55
Esempi applicativi allo SLU.....	"	57
Sollecitazione di taglio.....	"	57
Esempio 1. Predimensionamento di una sezione rettangolare.....	"	58
Esempio 2. Verifica senza armatura a taglio di una sezione rettangolare.....	"	60
Esempio 3. Verifica senza armatura a taglio di una sezione rettangolare.....	"	62
Esempio 4. Dimensionamento dell'armatura a taglio di una sezione rettangolare.....	"	65

Esempio 5.	Dimensionamento dell'armatura a taglio di una sezione rettangolare e confronto con le TA.....	p.	68
Esempio 6.	Dimensionamento dell'armatura a taglio di una sezione rettangolare e confronto con le TA.....	"	74
Esempio 7.	Dimensionamento dell'armatura a taglio di una sezione rettangolare.....	"	79
Esempio 8.	Dimensionamento dell'armatura a taglio di una sezione a "T".....	"	83
Esempio 9.	Dimensionamento dell'armatura a taglio di una sezione quadrata cava..	"	87
Esempio 10.	Dimensionamento dell'armatura a taglio di una sezione rettangolare con staffe inclinate.....	"	91
Esempio 11.	Verifica a punzonamento.....	"	95
Sollecitazione di torsione	.....	"	97
Esempio 12.	Verifica dell'armatura a torsione di una sezione rettangolare.....	"	99
Esempio 13.	Progetto dell'armatura a torsione di una sezione rettangolare e confronto con le TA.....	"	102
Esempio 14.	Progetto dell'armatura a torsione di una sezione rettangolare e confronto con le TA.....	"	112
Esempio 15.	Progetto dell'armatura a torsione di una sezione a "T".....	"	119
Esempio 16.	Progetto dell'armatura a torsione di una sezione rettangolare con staffe a quattro braccia.....	"	128
Esempio 17.	Progetto dell'armatura a torsione di una sezione quadrata cava.....	"	133
Esempio 18.	Progetto dell'armatura a torsione di una sezione quadrata in presenza di flessione.....	"	138
Esempio 19.	Progetto dell'armatura a torsione di una sezione rettangolare a doppio registro in presenza di presso-flessione.....	"	146
Esempio 20.	Progetto dell'armatura a torsione di una sezione quadrata in presenza taglio.....	"	156
Instabilità.....	.....	"	162
Esempio 21.	Calcolo della lunghezza libera di inflessione del pilastro di un telaio a nodi fissi.....	"	163
Esempio 22.	Calcolo della lunghezza libera di inflessione dei pilastri di un telaio a nodi mobili.....	"	166

Esempio 23.	Calcolo della lunghezza libera di inflessione di un pilastro.....	p.	171
Esempio 24.	Determinazione della snellezza limite di un pilastro.....	“	172
Esempio 25.	Condizioni per la verifica di instabilità di un pilastro.....	“	174
Esempio 26.	Definizione del metodo di costruzione della curva M-1/r-N per una sezione rettangolare.....	“	176
Esempio 27.	Si costruisca la curva M- $\chi$ -N per una sezione rettangolare.....	“	183
Esempio 28.	Verifica di stabilità di un pilastro tramite il metodo della colonna modello.....	“	184
Esempio 29.	Verifica di stabilità di un pilastro tramite il metodo della colonna modello.....	“	186
Esempio 30.	Verifica di stabilità di un pilastro tramite il metodo della colonna modello.....	“	190
Esempio 31.	Verifica di stabilità di un pilastro tramite il metodo diretto dello stato di equilibrio.....	“	192
Esempio 32.	Verifica di stabilità di un pilastro tramite il metodo diretto dello stato di equilibrio.....	“	196
Dettagli esecutivi: cenni.....		“	199
Esempio 33.	Calcolo della lunghezza di ancoraggio di una barra senza uncini.....	“	200
Esempio 34.	Calcolo della massima sollecitazione di ancoraggio di una barra con uncini..	“	201
Esempi applicativi allo SLE/SLS.....		“	204
Stato limite di fessurazione.....		“	204
Esempio 35.	Determinazione della apertura caratteristica delle fessure in relazione alla classe di esposizione e all'ambiente.....	“	208
Esempio 36.	Verifica dello stato limite di fessurazione per trazione semplice.....	“	209
Esempio 37.	Verifica della ampiezza delle fessure per lo stato limite di fessurazione per trazione semplice.....	“	210
Esempio 38.	Verifica della ampiezza delle fessure per lo stato limite di fessurazione per trazione semplice.....	“	213
Esempio 39.	Verifica dello stato limite di fessurazione per flessione semplice....	“	216
Esempio 40.	Verifica dello stato limite di fessurazione per flessione semplice....	“	219

Esempio 41.	Verifica dello stato limite di fessurazione per presso flessione.....	p.	227
Esempio 42.	Verifica dello stato limite di fessurazione per tenso flessione.....	“	234
Stato limite di deformazione.....		“	241
Esempio 43.	Condizioni per la verifica dello stato limite di deformazione di una trave semplicemente appoggiata con carico uniforme.....	“	242
Esempio 44.	Condizioni per la verifica dello stato limite di deformazione di una trave a sbalzo con carico uniforme.....	“	243
Esempio 45.	Determinazione della freccia in mezzeria per una trave appoggiata caricata con carico distribuito uniforme (di fessurazione).....	“	245
Esempio 46.	Determinazione della freccia in mezzeria per una trave appoggiata caricata con carico distribuito uniforme.....	“	249
Esempio 47.	Determinazione della freccia per una trave incastrata caricata con carico concentrato d'estremità.....	“	256
Esempio 48.	Determinazione della freccia in mezzeria per una trave appoggiata caricata con carico distribuito uniforme.....	“	265
Stato limite delle tensioni di esercizio.....		“	273
Esempio 49.	Verificare le tensioni di esercizio per la sezione rettangolare sollecitata a flessione semplice retta.....	“	273
Esempio 50.	Verificare le tensioni di esercizio per la sezione rettangolare sollecitata a presso-flessione retta.....	“	277
Esempio 51.	Verificare le tensioni di esercizio per la sezione rettangolare sollecitata a tenso-flessione retta.....	“	280
Esempio 52.	Verificare le tensioni di esercizio per la sezione rettangolare sollecitata a flessione semplice retta.....	“	284
Esempio 53.	Verificare le tensioni di esercizio per la sezione rettangolare sollecitata a presso-flessione retta.....	“	288
Esempio 54.	Verificare le tensioni di esercizio per la sezione rettangolare sollecitata a tenso-flessione retta.....	“	289
Esempio 55.	Verificare le tensioni di esercizio per la sezione rettangolare sollecitata a tenso-flessione retta	“	293

<b>TABELLE E GRAFICI</b> .....	p.	299
Predimensionamento a compressione semplice.....	"	301
Tabella 1. Compressione semplice ( $A_s/A_c = 0.30\%$ )....	"	301
Tabella 2. Compressione semplice ( $A_s/A_c = 1.00\%$ )....	"	301
Tabella 3. Compressione semplice ( $A_s/A_c = 2.00\%$ )....	"	302
Tabella 4. Compressione semplice ( $A_s/A_c = 3.00\%$ )....	"	302
Tabella 5. Compressione semplice ( $A_s/A_c = 4.00\%$ )....	"	303
Flessione semplice retta per sezioni rettangolari (singolo registro).....	"	303
Tabella 6. Prospetto $\delta - H$ .....	"	304
Tabella 7. Tabella q-m ( $\delta = 0.02$ ).....	"	305
Tabella 8. Tabella q-m ( $\delta = 0.05$ ).....	"	306
Tabella 9. Tabella q-m ( $\delta = 0.10$ ).....	"	307
Flessione semplice retta per sezioni rettangolari (doppio registro).....	"	308
Tabella 10. Prospetto per la determinazione di f ( $\varphi = 0.10$ ).....	"	308
Tabella 11. Prospetto per la determinazione di f ( $\varphi = 0.20$ ).....	"	309
Tabella 12. Tabella q-m ( $\delta = 0.02$ ; $\varphi = 0.10$ ).....	"	310
Tabella 13. Tabella q-m ( $\delta = 0.05$ ; $\varphi = 0.10$ ).....	"	311
Tabella 14. Tabella q-m ( $\delta = 0.10$ ; $\varphi = 0.10$ ).....	"	312
Tabella 15. Tabella q-m ( $\delta = 0.02$ ; $\varphi = 0.20$ ).....	"	313
Tabella 16. Tabella q-m ( $\delta = 0.05$ ; $\varphi = 0.20$ ).....	"	314
Tabella 17. Tabella q-m ( $\delta = 0.10$ ; $\varphi = 0.20$ ).....	"	315
Presso/tenso flessione retta per sezioni rettangolari (singolo registro).....	"	316
Grafico 1. Diagramma n-m ( $\delta = 0.02$ ; $u = 0.00 -$ Singolo registro).....	"	316
Grafico 2. Diagramma n-m ( $\delta = 0.02$ ; $u = 0.25 -$ Singolo registro).....	"	317
Grafico 3. Diagramma n-m ( $\delta = 0.02$ ; $u = 0.50 -$ Singolo registro).....	"	318
Grafico 4. Diagramma n-m ( $\delta = 0.02$ ; $u = 0.75 -$ Singolo registro).....	"	319
Grafico 5. Diagramma n-m ( $\delta = 0.02$ ; $u = 0.10 -$ Singolo registro).....	"	320
Grafico 6. Diagramma n-m ( $\delta = 0.05$ ; $u = 0.00 -$ Singolo registro).....	"	321
Grafico 7. Diagramma n-m ( $\delta = 0.05$ ; $u = 0.25 -$ Singolo registro).....	"	322
Grafico 8. Diagramma n-m ( $\delta = 0.05$ ; $u = 0.50 -$ Singolo registro).....	"	323
Grafico 9. Diagramma n-m ( $\delta = 0.05$ ; $u = 0.75 -$ Singolo registro).....	"	324

Grafico 10.	Diagramma n-m ( $\delta = 0.05$ ; $u = 0.10$ – Singolo registro).....	p.	325
Grafico 11.	Diagramma n-m ( $\delta = 0.10$ ; $u = 0.00$ – Singolo registro).....	“	326
Grafico 12.	Diagramma n-m ( $\delta = 0.10$ ; $u = 0.25$ – Singolo registro).....	“	327
Grafico 13.	Diagramma n-m ( $\delta = 0.10$ ; $u = 0.50$ – Singolo registro).....	“	328
Grafico 14.	Diagramma n-m ( $\delta = 0.10$ ; $u = 0.75$ – Singolo registro).....	“	329
Grafico 15.	Diagramma n-m ( $\delta = 0.10$ ; $u = 0.10$ – Singolo registro).....	“	330
	Presso/tenso flessione retta per sezioni rettangolari (doppio registro).....	“	331
Grafico 16.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.10$ ; $\delta = 0.02$ ; $u = 0.00$ – doppio registro).....	“	331
Grafico 17.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.10$ ; $\delta = 0.02$ ; $u = 0.25$ – doppio registro).....	“	332
Grafico 18.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.10$ ; $\delta = 0.02$ ; $u = 0.50$ – doppio registro).....	“	333
Grafico 19.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.10$ ; $\delta = 0.02$ ; $u = 0.75$ – doppio registro).....	“	334
Grafico 20.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.10$ ; $\delta = 0.02$ ; $u = 1.00$ – doppio registro).....	“	335
Grafico 21.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.10$ ; $\delta = 0.05$ ; $u = 0.00$ – doppio registro).....	“	336
Grafico 22.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.10$ ; $\delta = 0.05$ ; $u = 0.25$ – doppio registro).....	“	337
Grafico 23.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.10$ ; $\delta = 0.05$ ; $u = 0.50$ – doppio registro).....	“	338
Grafico 24.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.10$ ; $\delta = 0.05$ ; $u = 0.75$ – doppio registro).....	“	329
Grafico 25.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.10$ ; $\delta = 0.05$ ; $u = 1.00$ – doppio registro).....	“	340
Grafico 26.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.10$ ; $\delta = 0.10$ ; $u = 0.00$ – doppio registro).....	“	341
Grafico 27.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.10$ ; $\delta = 0.10$ ; $u = 0.25$ – doppio registro).....	“	342
Grafico 28.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.10$ ; $\delta = 0.10$ ; $u = 0.50$ – doppio registro).....	“	343
Grafico 29.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.10$ ; $\delta = 0.10$ ; $u = 0.75$ – doppio registro).....	“	344
Grafico 30.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.10$ ; $\delta = 0.10$ ; $u = 1.00$ – doppio registro).....	“	345
Grafico 31.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.20$ ; $\delta = 0.02$ ; $u = 0.00$ – doppio registro).....	“	346

Grafico 32.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.20$ ; $\delta = 0.02$ ; u = 0.25 – doppio registro).....	p.	347
Grafico 33.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.20$ ; $\delta = 0.02$ ; u = 0.50 – doppio registro).....	“	348
Grafico 34.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.20$ ; $\delta = 0.02$ ; u = 0.75 – doppio registro).....	“	349
Grafico 35.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.20$ ; $\delta = 0.02$ ; u = 1.00 – doppio registro).....	“	350
Grafico 36.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.20$ ; $\delta = 0.05$ ; u = 0.00 – doppio registro).....	“	351
Grafico 37.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.20$ ; $\delta = 0.05$ ; u = 0.25 – doppio registro).....	“	352
Grafico 38.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.20$ ; $\delta = 0.05$ ; u = 0.50 – doppio registro).....	“	353
Grafico 39.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.20$ ; $\delta = 0.05$ ; u = 0.75 – doppio registro).....	“	354
Grafico 40.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.20$ ; $\delta = 0.05$ ; u = 1.00 – doppio registro).....	“	355
Grafico 41.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.20$ ; $\delta = 0.10$ ; u = 0.00 – doppio registro).....	“	356
Grafico 42.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.20$ ; $\delta = 0.10$ ; u = 0.25 – doppio registro).....	“	357
Grafico 43.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.20$ ; $\delta = 0.10$ ; u = 0.50 – doppio registro).....	“	358
Grafico 44.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.20$ ; $\delta = 0.10$ ; u = 0.75 – doppio registro).....	“	359
Grafico 45.	Diagramma n-m ( $\varphi = 0.20$ ; $\delta = 0.10$ ; u = 1.00 – doppio registro).....	“	360
Calcolo di s e t a flessione semplice retta (singolo registro)..		“	361
Tabella 18.	Tabella s-m ( $\delta = 0.02$ - u = 0.00).....	“	361
Tabella 19.	Tabella s-m ( $\delta = 0.02$ - u = 0.25).....	“	361
Tabella 20.	Tabella s-m ( $\delta = 0.02$ - u = 0.50).....	“	362
Tabella 21.	Tabella s-m ( $\delta = 0.02$ - u = 0.75).....	“	362
Tabella 22.	Tabella s-m ( $\delta = 0.02$ - u = 1.00).....	“	362
Tabella 23.	Tabella s-m ( $\delta = 0.05$ - u = 0.00).....	“	363
Tabella 24.	Tabella s-m ( $\delta = 0.05$ - u = 0.25).....	“	363
Tabella 25.	Tabella s-m ( $\delta = 0.05$ - u = 0.50).....	“	363
Tabella 26.	Tabella s-m ( $\delta = 0.05$ - u = 0.75).....	“	364
Tabella 27.	Tabella s-m ( $\delta = 0.05$ - u = 1.00).....	“	364
Tabella 28.	Tabella s-m ( $\delta = 0.10$ - u = 0.00).....	“	364
Tabella 29.	Tabella s-m ( $\delta = 0.10$ - u = 0.25).....	“	365
Tabella 30.	Tabella s-m ( $\delta = 0.10$ - u = 0.50).....	“	365
Tabella 31.	Tabella s-m ( $\delta = 0.10$ - u = 0.75).....	“	365
Tabella 32.	Tabella s-m ( $\delta = 0.10$ - u = 1.00).....	“	366
Grafici a “n” variabili in piano (singolo registro).....		“	367

Grafico 46.	Grafico a "n" variabili in piano per compressione semplice.....	p.	367
Grafico 47.	Grafico a "n" variabili in piano per flessione semplice ( $\delta = 0.02$ ).....	"	368
Grafico 48.	Grafico a "n" variabili in piano per flessione semplice ( $\delta = 0.05$ ).....	"	369
Grafico 49.	Grafico a "n" variabili in piano per flessione semplice ( $\delta = 0.10$ ).....	"	370
	Riferimenti bibliografici.....	"	371
	<b>INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE ALLEGATO.....</b>	"	373
	Contenuti del CD-ROM.....	"	375
	Requisiti minimi hardware e software.....	"	375
	Richiesta della password utente.....	"	375
	Installazione e registrazione del software.....	"	375
	Utilizzo del software.....	"	376
	<b>LICENZA D'USO.....</b>	"	383
	<b>SCHEDA DI REGISTRAZIONE.....</b>	"	384



---

## Prefazione

Il presente testo oltre che una applicazione dei principi e della teoria della progettazione strutturale espressa nel “Manuale di calcolo agli stati limite – stati limite all’italiana – calcestruzzo con armatura metallica – Il edizione – Gianni Michele De Gaetanis” pubblicato nel mese di settembre 2008 è la naturale prosecuzione del volume “Verifiche e dimensionamento di elementi strutturali – sollecitazione assiale, flessione e presso/tenso flessione – Gianni Michele De Gaetanis” pubblicato nel mese di giugno 2009

Come per il volume citato sulle verifiche, anche nel presente testo si è preso in esame *un metodo di calcolo standardizzato e di comprovata valenza tecnica* fornito dalla legislazione tecnica italiana.

La circolare ministeriale di applicazione del DM 14 gennaio 2008, le NTC, ha chiarito molti punti dubbi lasciando invariata, per alcuni aspetti, la possibilità di ricorrere, con le dovute cautele, ai documenti CNR, agli eurocodici o ad altre normative di riconosciuta, a livello nazionale, valenza tecnica.

È possibile, quindi, dalla interpretazione della legge, trarre un metodo, organizzato in una sequenza ordinata e prestabilita di operazioni e cicli di calcolo, attraverso il quale addivenire alla progettazione strutturale.

Il metodo è unico? Nei risultati del calcolo sì! È unico pure per le impostazioni teoriche! Non sempre è unico nelle procedure e sequenze di calcolo e/o verifica.

Nel presente testo, quindi, si propone un metodo di calcolo basato su una consolidata ed univoca teoria tecnica e su una sequenza logica di procedure: ciò è vincolante per la teoria tecnica mentre non lo è per le procedure che il progettista può, a suo razionale piacimento, modificarne l’ordine ed i criteri ed introdurne uno più calzante al problema da risolvere o al suo personale stile di progettazione.

Si sottolinea, infine, che l’attenzione del presente testo è incentrata sulle questioni strutturali, ossia sul dimensionamento e/o verifica delle sezioni, senza entrare nel merito del calcolo delle sollecitazioni di progetto.

Gennaio 2010

### **Avvertenze e quadro legislativo**

Il presente testo è riferito alle norme tecniche per le costruzioni emanate con DM del 14 gennaio 2008 (NTC): in alcuni punti le norme rimandano a documenti tecnici di comprovata affidabilità costringendo il professionista a richiamare altri strumenti tecnici, interpretandoli e raccordandoli con il DM medesimo.

Ciò si traduce nel fatto che il progettista deve, necessariamente, avere una conoscenza degli stati limite a-priori.

Come premesso, la norma di riferimento è costituita dalle NTC che sanciscono definitivamente che *“È fatto obbligo di utilizzo del metodo agli stati limite ad eccezione che per le costruzioni di tipo 1 e 2 e Classe d'uso I e II, limitatamente a siti ricadenti in Zona 4, per le quali è ammesso il Metodo di verifica alle tensioni ammissibili”* (NTC, punto 2.7). A tale disposto tecnico si affianca la circolare ministeriale n. 617/2009.

### **Convenzioni terminologiche**

Nel presente testo si è fatto uso di alcune frasi ed indicazioni ricorrenti che possono risultare diverse da altri testi o inusuali nel linguaggio tecnico.

In generale, le diverse frasi indicano:

**registro:** gruppo di tondini ordinati lungo una retta aventi funzione strutturale e risultanti dal calcolo;

**doppio registro:** gruppo di tondini, risultanti dal calcolo, disposti due file o registri in zona tesa (indipendentemente dal valore di  $u$ );

**singolo registro:** gruppo di tondini, risultanti dal calcolo, disposti su una sola fila o registro in zona tesa (indipendentemente dal valore di  $u$ );

**doppia armatura:** gruppo di tondini, risultanti dal calcolo, sia in zona compressa che tesa (indipendentemente dal valore di  $u$ ) disposti su un registro in trazione ed uno in compressione;

**singola armatura:** gruppo di tondini, risultanti dal calcolo, solo in zona tesa disposti su un registro.

---

## Simboli utilizzati

### $\alpha$

- $\alpha$  • Parametro di calcolo nelle verifiche a presso/tenso flessione deviata
- Inclinazione delle staffe rispetto all'asse della trave
- $\alpha_c$  Coefficiente maggiorativo nel calcolo della resistenza di "taglio compressione"
- $\alpha_{cc}$  Coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata
- $\alpha_{EP}$  Coefficiente riduttivo per le resistenze in funzione dello spessore dell'elemento strutturale

### $\beta$

- $\beta$  • Parametro di calcolo
- Coefficiente di snellezza

### $\chi$

- $\chi$  Curvatura di una sezione
- $\chi_f$  Curvatura di una sezione associata al momento di fessurazione  $M_f$
- $\chi_{su}$  Curvatura di una sezione associata al momento ultimo
- $\chi_{sy}$  Curvatura di una sezione associata al momento di snervamento  $M_{sy}$

### $\delta, \Delta$

- $\delta$  • Rapporto fra il copriferro e l'altezza utile della sezione ( $\delta = c/h$ )
- Freccia nella sezione critica
- $\delta_G$  Distanza baricentrico adimensionalizzata
- $\delta_{max}$  Freccia massima nella sezione critica
- $\delta_x$  Rapporto fra il copriferro e l'altezza utile della sezione in direzione x ( $\delta_x = c/h_x$ )
- $\delta_y$  Rapporto fra il copriferro e l'altezza utile della sezione in direzione y ( $\delta_y = c/h_y$ )
- $\Delta f$  Errore associato alla stima di f
- $\Delta_{sm}$  Distanza media fra due fessure

### $\epsilon$

- $\epsilon'_s$  Deformazione dell'acciaio in zona compressa

$\epsilon_c$	Deformazione del calcestruzzo
$\epsilon_{c2}$	Deformazione in corrispondenza del punto di stato limite elastoplastico-perfettamente plastico del calcestruzzo nel legame costitutivo parabola-rettangolo
$\epsilon_{c3}$	Deformazione in corrispondenza del punto di stato limite elastoplastico-perfettamente plastico del calcestruzzo nel legame costitutivo triangolo-rettangolo
$\epsilon_{c4}$	Deformazione in corrispondenza del punto di stato limite iniziale plastico del calcestruzzo nel legame rettangolo (stress block)
$\epsilon_{cl}$	Deformazione di compressione del calcestruzzo al lembo maggiormente compresso
$\epsilon_{ct}$	Deformazione del calcestruzzo a trazione al lembo maggiormente teso (in corrispondenza della tensione di trazione $f_{ctk 5\%}$ )
$\epsilon_{cu}$	Deformazione del punto di stato limite ultimo del calcestruzzo
$\epsilon_{ck}$	Cfr. $\epsilon_{c2}$ ( $\epsilon_{ck} = \epsilon_{c2}$ )
$\epsilon_s$	Deformazione dell'acciaio
$\epsilon_{sm}$	Deformazione media delle barre d'armatura
$\epsilon_{su}$	Deformazione del punto di stato limite ultimo ( $\epsilon_{su} = \epsilon_{ud}$ )
$\epsilon_{sy}$	Deformazione del punto di stato limite elastico dell'acciaio ( $\epsilon_{sy} = \epsilon_{yd}$ )
$\epsilon_{ud}$	Deformazione del punto di stato limite ultimo dell'acciaio
$\epsilon_{uk}$	Deformazione caratteristica ultima dell'acciaio
$\epsilon_{yd}$	Deformazione del punto di stato limite elastico dell'acciaio
<b><math>\gamma</math></b>	
$\gamma_c$	Coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo
$\gamma_s$	Coefficiente parziale di sicurezza relativo all'acciaio
<b><math>\eta</math></b>	
$\eta$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fattore nel calcolo della resistenza tangenziale caratteristica di aderenza</li> <li>• Fattore di calcolo</li> <li>• Deformazione, freccia (abbassamento)</li> </ul>
$\eta_a$	Coefficiente di calcolo di una equazione di II grado
$\eta_{A's}$	Fattore correttivo dell'armatura tesa
$\eta_{As}$	Fattore correttivo dell'armatura compressa
$\eta_b$	Coefficiente di calcolo di una equazione di II grado
$\eta_c$	Coefficiente di calcolo di una equazione di II grado

## Simboli utilizzati

---

$\eta_{IH}$	Rapporto di snellezza limite
$\eta_R$	Fattore nel calcolo della resistenza tangenziale di aderenza
<b><math>\Phi</math></b>	
$\varphi$	Rapporto fra la distanza del primo e secondo registro e l'altezza utile della sezione ( $\varphi = f/h$ )
$\varphi(r)$	Rotazione reale in una sezione
<b><math>\lambda</math></b>	
$\lambda$	<ul style="list-style-type: none"><li>• Snellezza di un elemento a sezione costante</li><li>• Parametro di calcolo</li></ul>
$\lambda_{lim}$	Snellezza limite di un elemento a sezione costante
<b><math>\mu</math></b>	
$\mu$	Percentuale geometrica di armatura (rapporto $A_s/Bh$ )
<b><math>\Theta</math></b>	
$\theta$	Inclinazione dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della trave
$\theta_i$	Rotazione del nodo i-esimo di un elemento strutturale
<b><math>\rho</math></b>	
$\rho$	Percentuale geometrica di armatura in zona tesa
$\rho_{comp}$	Percentuale geometrica di armatura in zona compressa
$\rho_l$	Rapporto geometrico di armatura longitudinale
$\rho_r$	Rapporto geometrico di armatura in fessurazione
<b><math>\sigma</math></b>	
$\sigma'_s$	Tensione dell'acciaio in zona compressa
$\sigma_c$	Tensione di compressione
$\sigma_{c,amm}$	Tensione ammissibile del calcestruzzo
$\sigma_{c,CR}$	Massima tensione nel calcestruzzo per la combinazione rara
$\sigma_{c,QP}$	Massima tensione nel calcestruzzo per la combinazione quasi permanente
$\sigma_{cl}$	Tensione di compressione del calcestruzzo
$\sigma_{cp}$	Tensione media di compressione nella sezione considerata

$\sigma_{ct}$	Tensione di trazione del calcestruzzo
$\sigma_{f,amm}$	Tensione ammissibile dell'acciaio
$\sigma_s$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensione dell'acciaio</li> <li>• Tensione dell'acciaio calcolata nella sezione fessurata</li> </ul>
$\sigma_{s,CR}$	Massima tensione nell'acciaio per la combinazione rara
$\sigma_{s,QP}$	Massima tensione nell'acciaio per la combinazione quasi permanente
$\sigma_{sr}$	Tensione dell'acciaio calcolata nella sezione fessurata per la sollecitazione corrispondente al raggiungimento della resistenza a trazione $f_{ctm}$ nella fibra di calcestruzzo più sollecitata in sezione interamente reagente compresa nell'area efficace
$\sigma_t$	Tensione di trazione
<b><math>\tau</math></b>	
$\tau_{c,amm}$	Tensione ammissibile a taglio
$\bar{\tau}_{c,amm}$	Massima tensione ammissibile a taglio
$\tau_{max}$	Tensione massima dovuta alla sollecitazione di taglio T nel calcolo alle tensioni ammissibili
<b><math>\psi</math></b>	
$\psi$	Parametro di calcolo a torsione con il metodo alle tensioni ammissibili
<b><math>\emptyset</math></b>	
$\emptyset$	Diametro
$\emptyset_{L,max}$	Diametro massimo dell'armatura longitudinale
$\emptyset_{L,min}$	Diametro minimo dell'armatura longitudinale
$\emptyset_s$	Diametro delle staffe
<b><math>A</math></b>	
$(A_s)_{zona\ tesa}$	Armatura longitudinale in zona tesa
$(A_s)_{zona\ compressa}$	Armatura longitudinale in zona compressa
$(A_s)_{TA}$	Area totale dell'armatura longitudinale risultante dal calcolo con il metodo delle tensioni ammissibili
$(A_s)_{totale}$	Area totale dell'armatura longitudinale
$A$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Area racchiusa dalla fibra media del profilo periferico</li> <li>• Area del poligono avente vertici nel baricentro dei tondini d'acciaio di una sezione</li> </ul>

a	<ul style="list-style-type: none"><li>• Coefficiente di calcolo di una equazione di II grado</li><li>• Parametro di calcolo a torsione con il metodo alle tensioni ammissibili</li></ul>
$A_1$	Area d'acciaio in zona compressa
$A_2$	Area d'acciaio del secondo registro (sezione a doppio registro): nel presente manuale $A_2 = A_3$
$A_3$	Area d'acciaio in zona tesa (sezione a doppio registro)
$A_c$	Area (geometrica) di calcestruzzo
$A_{c,eff}$	Area efficace di calcestruzzo
$a_l$	Parametro di calcolo a torsione
$A_l$	Area dell'armatura longitudinale (calcolo a torsione con il metodo delle tensioni ammissibili)
$a_s$	Parametro di calcolo a torsione
$A_s$	Area d'acciaio in zona tesa (sezioni a singolo registro)
$A'_s$	Area d'acciaio in zona compressa
$A_{s1}$	Area di un singolo tondino
$A_{sf}$	Area dell'armatura fittizia longitudinale di peso eguale alla spirale
$A_{sl}$	Armatura longitudinale
$A_{sp}$	Area dell'armatura utilizzata per la spirale
$A_{st}$	<ul style="list-style-type: none"><li>• Area del tondino di una staffa (calcolo a torsione)</li><li>• Area delle staffe</li></ul>
$A_{sw}$	Area dell'armatura trasversale per staffe
$(A_{gt})_k$	Allungamento caratteristico dell'acciaio

## **B**

B	Base geometrica di una sezione
b	<ul style="list-style-type: none"><li>• Coefficiente di calcolo di una equazione di II grado</li><li>• Dimensione di una nervatura</li><li>• Dimensione della sezione</li><li>• Parametro di calcolo a torsione con il metodo alle tensioni ammissibili</li></ul>
b'	Dimensione di una nervatura
$B_{pp}$	Dimensione dell'area racchiusa dalla fibra media del profilo periferico
$b_{st}$	Distanza fra i bracci più esterni delle staffe
$b_t$	Larghezza media della zona tesa
$b_w$	Larghezza minima di una sezione

## **C**

C	Sigla per il titolo del calcestruzzo (seguita dalle resistenze $f_{ck}/R_{ck}$ )
---	--

c	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coefficiente di calcolo di una equazione di II grado</li> <li>• Copriferro</li> </ul>
CD "A"	Classe di duttilità "A" (oppure Capacità dissipativa "A")
CD "B"	Classe di duttilità "B" (oppure Capacità dissipativa "B")

## **D**

D	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diametro del nucleo confinato di un pilastro circolare</li> <li>• Diametro esterno di una circonferenza</li> </ul>
$d_G$	Distanza baricentrica

## **E**

$ E _{R\%}$	Errore relativo percentuale assoluto
$(EI)_{(r)}$	Rigidezza reale associata ad un elemento strutturale
$(EI)_I$	Rigidezza associata al primo stadio (sezione interamente reagente)
$(EI)_{II}$	Rigidezza associata al secondo stadio (sezione fessurata)
$(EI)_{III}$	Rigidezza associata al terzo stadio (sezione snervata)
E	Modulo elastico
e	Eccentricità
$e_1$	Eccentricità legata all'azione flettente del primo ordine
$E_{ass. \%}$	Errore assoluto percentuale
$E_c$	Modulo elastico a compressione del calcestruzzo (Cfr. $E_{cm}$ )
$E_{cm}$	Modulo elastico istantaneo del calcestruzzo (non applicabile ai calcestruzzi maturati a vapore)
$E_{ct}$	Modulo elastico a trazione del calcestruzzo
$E_i$	Modulo elastico dell'acciaio ramo incrudente
$e_{max}$	Eccentricità massima
$e_{ni}$	Eccentricità non intenzionale
$E_{R\%}$	Errore relativo percentuale
$E_{Rmax \%}$	Errore relativo percentuale massimo
$E_s$	Modulo elastico dell'acciaio ramo elastico
$e_{tot}$	Eccentricità totale
$E_V$	Errore vero di una grandezza

## **F**

f	Distanza fra il primo e il secondo registro (sezioni a doppio registro)
$f'_{cd}$	Resistenza a compressione ridotta del calcestruzzo d'anima
$f_{bd}$	Tensione tangenziale di aderenza acciaio-calcestruzzo

$f_{bk}$	Resistenza tangenziale caratteristica di aderenza
$f_{cd}$	Resistenza di calcolo a compressione
$f_{cfm}$	Resistenza media a trazione per flessione
$f_{ck}$	Resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo a 28 giorni su provini cilindrici
$f_{cm}$	Resistenza media a compressione del calcestruzzo a 28 giorni su provini cilindrici
$f_{ctd}$	Resistenza di calcolo a trazione (assiale)
$f_{ctk\ 5\%}$	Resistenza caratteristica a trazione corrispondente ad un frattile del 5 %
$f_{ctk\ 95\%}$	Resistenza caratteristica a trazione corrispondente ad un frattile del 95 %
$f_{ctm}$	Resistenza media a trazione semplice (assiale)
$f_{tk}$	Tensione caratteristica di rottura dell'acciaio
$f_{yd}$	Resistenza di calcolo dell'acciaio
$f_{yk}$	Resistenza caratteristica di snervamento dell'acciaio

## **G**

G	Baricentro di una sezione
$G_k$	Carichi permanenti (strutturale e/o non strutturale)

## **I**

I	Momento d'inerzia
i	<ul style="list-style-type: none"><li>• Raggio di inerzia della sezione di calcestruzzo non fessurato</li><li>• Passo delle staffe</li></ul>
$I_n$	Momento d'inerzia rispetto l'asse neutro
$I_p$	Momento d'inerzia di un pilastro
$I_t$	Momento d'inerzia di una trave

## **H**

h	Altezza utile di una sezione
H	<ul style="list-style-type: none"><li>• Altezza geometrica di una sezione</li><li>• Altezza di un elemento strutturale</li></ul>
$H_{pp}$	Dimensione dell'area racchiusa dalla fibra media del profilo periferico
$h_x$	Altezza utile di una sezione in direzione x
$h_y$	Altezza utile di una sezione in direzione y

## **K**

$k$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rapporto di sovrarresistenza (acciaio)</li> <li>• Parametro di calcolo della resistenza a taglio di progetto</li> </ul>
$k_1$	Fattore di calcolo della snellezza
$k_2$	Fattore di calcolo della snellezza
$k_i$	Fattore di calcolo della snellezza relativo all'estremo $i$ -esimo di un elemento

## **L**

$l$	Lunghezza (altezza) geometrica di un elemento
$l_t$	Lunghezza geometrica di una trave
$l_p$	Lunghezza (altezza) geometrica di un pilastro
$l$	Luce di una trave
$L$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spessore di una soletta</li> <li>• Lunghezza di un elemento strutturale</li> </ul>
$l_0$	Lunghezza libera di inflessione
$l_a$	Lunghezza di aderenza
$L_{\min}$	Lato minore di una sezione
$l_u$	Lunghezza di un uncino (in asse alla barra longitudinale)

## **M**

$\bar{m}$	Momento flettente agente adimensionalizzato riferito alla resistenza a trazione del calcestruzzo
$M$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Momento</li> <li>• Momento flettente alle tensioni ammissibili</li> </ul>
$m$	Momento flettente agente adimensionalizzato riferito alla resistenza a compressione del calcestruzzo
$M_{(f)}$	Momento associato alla forza unitaria nella sezione in esame
$M(z)_{(r)}$	Momento reale nella sezione $z$
$M_{01}$	Momento del primo ordine all'estremità di un pilastro (estremità 1)
$M_{02}$	Momento del primo ordine all'estremità di un pilastro (estremità 2)
$M_{A's}$	Momento resistente di progetto dovuto alla armatura $A'_s$ (riferito al baricentro geometrico della sezione)
$M_{As}$	Momento resistente di progetto dovuto alla armatura $A_s$ (riferito al baricentro geometrico della sezione)
$M_{cc}$	Momento resistente di progetto dovuto alla quotaparte in compressione di calcestruzzo (riferito al baricentro geometrico della sezione)

$M_{ct}$	Momento resistente di progetto dovuto alla quota parte in trazione di calcestruzzo (riferito al baricentro geometrico della sezione)
$M_{Ed}$	Momento di progetto dell'azione
$M_{Ed,I}$	Momento agente di progetto del primo ordine
$M_{Ed,II}$	Momento agente di progetto del secondo ordine
$M_{Ed,tot}$	Momento agente di progetto totale (del primo e del secondo ordine)
$M_f$	Momento di fessurazione
$M_p$	Momento agente all'estremo di un pilastro
$M_{Rd,acciaio}$	Momento di reazione del solo acciaio di una sezione
$M_{Rd,calc}$	Momento di reazione del solo calcestruzzo di una sezione
$M_{sy}$	Momento di snervamento
$M_{sy}$	Momento flettente di snervamento
$M_t$	Momento torcente nel calcolo alle tensioni ammissibili
$M_t$	Momento agente all'estremo di una trave
$M_u$	Momento ultimo
$m_x$	Momento flettente agente adimensionalizzato riferito al momento $M_{x,Ed}$
$M_{x,Ed}$	Momento di progetto agente con asse momento X
$M_{x,Rd}$	Momento resistente con asse momento X
$m_y$	Momento flettente agente adimensionalizzato riferito al momento $M_{y,Ed}$
$M_{y,Ed}$	Momento di progetto agente con asse momento Y
$M_{y,Rd}$	Momento resistente con asse momento Y
<b>N</b>	
$\bar{n}$	Sollecitazione assiale adimensionalizzata riferita alla resistenza a trazione del calcestruzzo
$n$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coefficiente di omogeneizzazione (valore convenzionale del rapporto <math>E_s/E_c = 15</math>)</li> <li>• Sollecitazione normale adimensionalizzata riferita alla resistenza a compressione del calcestruzzo</li> <li>• Cifre significative esatte in una stima</li> </ul>
$N$	Sollecitazione normale alle tensioni ammissibili
$N_{ad}$	Sollecitazione trasmissibile per aderenza
$n_{ct}$	Coefficiente di omogeneizzazione (valore convenzionale del rapporto $E_{ct}/E_c = 0.50 \div 0.70$ )
$N_{Ed}$	Sforzo normale di progetto di un'azione
$N_{Rd}$	Sforzo normale di reazione di una sezione
$N_{Rd,acciaio}$	Sforzo normale di reazione del solo acciaio di una sezione

$N_{Rd,calc}$	Sforzo normale di reazione del solo calcestruzzo di una sezione
$n_{st}$	Numero di bracci della singola staffa orizzontale
$n_t$	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rapporto fra il modulo elastico dell'acciaio e quello a trazione del calcestruzzo (valore convenzionale del rapporto <math>E_s/E_{ct} = 25</math>)</li><li>• Numero di tondini d'acciaio di un'armatura</li></ul>
$n_x$	Sforzo normale agente adimensionalizzato riferito alla sollecitazione $N_{Ed}$ in direzione x
$n_y$	Sforzo normale agente adimensionalizzato riferito alla sollecitazione $N_{Ed}$ in direzione y

## **P**

$p$	<ul style="list-style-type: none"><li>• Passo della spirale</li><li>• Perimetro del poligono avente vertici nel baricentro dei tondini d'acciaio di una sezione</li></ul>
$P_d$	Carico verticale concentrato di progetto

## **Q**

$q$	<ul style="list-style-type: none"><li>• Percentuale meccanica di armatura</li><li>• Carico uniformemente distribuito (per unità di lunghezza)</li></ul>
$q_d$	Carico verticale uniformemente distribuito
$Q_k$	Carico variabile
$q_x$	Percentuale meccanica di armatura riferita a $m_x$
$q_y$	Percentuale meccanica di armatura riferita a $m_y$

## **R**

$R$	Raggio di una circonferenza
$r$	Raggio di una barra longitudinale
$r'$	Parametro di calcolo alle tensioni ammissibili
$R_{A's}$	Resistenza di progetto dell'armatura $A'_s$
$R_{As}$	Resistenza di progetto dell'armatura $A_s$
$R_{cc}$	Resistenza di progetto a compressione del calcestruzzo
$R_{ck}$	Resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo a 28 giorni su provini cubici
$R_{ct}$	Resistenza di progetto a trazione del calcestruzzo
$r_u$	Raggio di curvatura di un uncino (in asse alla barra longitudinale)

## S

s	<ul style="list-style-type: none"><li>• Distanza fra le barre longitudinali</li><li>• Parametro di calcolo per <math>w_k</math></li><li>• Passo fra le staffe</li><li>• Rapporto fra la distanza dell'asse neutro dal lembo maggiormente compresso di una sezione e l'altezza utile della sezione stessa (<math>s = x_c/h</math>)</li></ul>
$s_{lim}$	Valore limite del parametro s
$S_n$	Momento statico rispetto l'asse neutro
$s_x$	Passo fra le staffe nella verifica in direzione x
$s_y$	Passo fra le staffe nella verifica in direzione y

## T

t	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rapporto fra la distanza dell'asse neutro dal lembo maggiormente teso di una sezione e l'altezza utile della sezione stessa (<math>t = x_t/h</math>)</li><li>• Spessore della sezione anulare fittizia</li></ul>
T	Sollecitazione di taglio nel calcolo alle tensioni ammissibili
$t'$	Parametro di calcolo alle tensioni ammissibili
$T_{Ed}$	Torsione agente di progetto
$T_{Rcd}$	Torsione resistente di progetto del calcestruzzo
$T_{Rd}$	Torsione resistente di progetto
$T_{Rld}$	Torsione resistente di progetto dell'armatura longitudinale
$T_{Rsd}$	Torsione resistente di progetto dell'armatura trasversale

## U

u	<ul style="list-style-type: none"><li>• Perimetro geometrico esterno di una sezione</li><li>• Rapporto fra l'armatura in zona tesa e quella in zona compressa nelle sezioni a singolo registro (<math>u = A'_s/A_s</math>)</li><li>• Perimetro efficace (verifica a punzonamento)</li><li>• Rapporto fra l'armatura in zona tesa e quella in zona compressa nelle sezioni a doppio registro (<math>u = A_1/A_3</math>)</li></ul>
$u_m$	Perimetro medio del nucleo resistente
$u_x$	Rapporto fra l'armatura in zona tesa e quella in zona compressa nelle sezioni a singolo registro riferito alla direzione x (verifica a pressoflessione deviata)
$u_y$	Rapporto fra l'armatura in zona tesa e quella in zona compressa nelle sezioni a singolo registro riferito alla direzione y (verifica a pressoflessione deviata)

## V

$V_{Ed}$	Taglio agente di progetto
----------	---------------------------

$V_{min}$	Parametro di calcolo dei fattori/addendi per la verifica a taglio
$V_{Rcd}$	Taglio resistente di progetto a “taglio compressione”
$V_{Rd}$	Taglio resistente di progetto
$V_{Rdmin}$	Valore resistente minimo a taglio del calcestruzzo d'anima
$V_{Rp}$	Forza al punzonamento
$V_{Rs d}$	Taglio resistente di progetto a “taglio trazione”

### **W**

$W_k$	Valore caratteristico di apertura delle fessure
$W_{kd}$	Valore caratteristico di progetto di apertura delle fessure
$W_{km}$	Valore caratteristico medio di apertura delle fessure

### **X**

$X_c$	Distanza dell'asse neutro dal lembo maggiormente compresso di calcestruzzo
$X_d$	Estremo destro di un intervallo
$X_G$	Ascissa baricentrica
$X_i$	Valore stimato di una grandezza all'iterazione i-esima
$X_i$	Valore stimato di una grandezza all'iterazione i-esima
$X_{i-1}$	Valore stimato di una grandezza all'iterazione i-esima - 1
$X_{i-1}$	Valore stimato di una grandezza all'iterazione i-esima - 1
$X_s$	Estremo sinistro di un intervallo
$X_t$	Distanza dell'asse neutro dal lembo maggiormente teso di calcestruzzo
$X_V$	Valore vero di una grandezza

### **Y**

$Y_G$	Ordinata baricentrica
$y_i$	Valore stimato di una funzione

### **Z**

$z$	Parametro di calcolo nel taglio alle tensioni ammissibili
-----	---

---

# **CARATTERISTICHE DEI MATERIALI**



**Avvertenze  
introduttive**

La trattazione sulle caratteristiche dei materiali, per una trattazione più estesa, è riportata nel volume “VERIFICHE E DIMENSIONAMENTO DI ELEMENTI STRUTTURALI, sollecitazione assiale, flessione e presso/tenso flessione; Gianni Michele De Gaetanis, Grafill, I Edizione – giugno 2009”.

**Materiali**

I materiali considerati sono, fondamentalmente, due: calcestruzzo e acciaio.

**Calcestruzzo  
Titolo**

Nel presente testo si farà riferimento al calcestruzzo armato normale. I calcestruzzo armato normale è identificato e/o titolato facendo riferimento alla classe di resistenza.

L'identificativo, o titolo o classe di resistenza, è costituito dalla lettera “C” seguita dalle resistenze uniassiali misurate mediante prove su campioni cilindrici/cubici. La “sigla tipo” è di seguito riportata:

$$C f_{ck} / R_{ck}$$

**SLU**

Agli SLU, la progettazione a sforzo normale e/o flessione è condotta sotto le seguenti ipotesi di base (ipotesi formulate relativamente al solo calcestruzzo):

- elementi monodimensionali;
- conservazione delle sezioni piane;
- perfetta aderenza tra acciaio e calcestruzzo;
- resistenza a trazione del calcestruzzo nulla;
- rottura del calcestruzzo determinata dal raggiungimento della sua capacità deformativa ultima a compressione;

Le tensioni nel calcestruzzo si calcolano a partire dalle deformazioni del calcestruzzo stesso [3]. I legami costitutivi utilizzabili sono di tre tipi [4]:

- parabola rettangolo;
- triangolo rettangolo;
- rettangolo o stress-block.

**Legame  
costitutivo  
parabola-  
rettangolo**

Il legame parabola-rettangolo è definito da un arco di parabola passante per l'origine ed avente asse parallelo a quello delle tensioni e da un segmento parallelo all'asse delle deformazioni e tangente alla parabola nel vertice.

Nel caso di distribuzione delle tensioni di compressione uniforme o approssimativamente uniforme, le deformazioni devono essere limitate a  $\epsilon_{c2}$  ( $\epsilon_{c2}$  e  $\epsilon_{cu}$  sono calcolati in relazione al tipo di calcestruzzo).

**Legame  
costitutivo  
triangolo-  
rettangolo**

Il legame triangolo-rettangolo è definito da una spezzata passante per l'origine e da un segmento parallelo all'asse delle deformazioni.

I valori di  $\epsilon_{cu}$  e  $\epsilon_{c3}$  sono calcolati in relazione al tipo di calcestruzzo).

Legame costitutivo rettangolo (stress block)

Il legame rettangolo, o stress block, è costituito da un solo tratto a comportamento plastico. Il legame, utilizzato solo in casi particolari, manca di una descrizione per un range di valori della deformazione. I valori di  $\epsilon_{cu}$  e  $\epsilon_{c4}$  sono calcolati in relazione al tipo di calcestruzzo.

Parametri di calcolo

La resistenza di calcolo si ottiene dal rapporto fra la resistenza caratteristica e il relativo coefficiente parziale per la resistenza.

Le diverse resistenze di calcolo sono indicate nel prospetto seguente (calcolo delle grandezze in daN/cm<sup>2</sup> e legame costitutivo di riferimento parabola-rettangolo).

Parametri caratteristici agli SLU del calcestruzzo		
Grandezza		Calcolo
Resistenza caratteristica a compressione		$f_{ck} = 0.83 \cdot R_{ck}$
Resistenza media a compressione		$f_{cm} = f_{ck} + 80$
Resistenza di calcolo a compressione		$f_{cd} = \alpha_{EP} \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$
Resistenza media a trazione semplice (assiale) con calcestruzzo $\leq$ C50/60		$f_{ctm} = 0.6463 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}$
Resistenza caratteristica a trazione corrispondente ad un frattile del	5 %	$f_{ctk 5\%} = 0.70 \cdot f_{ctm}$
	95 %	$f_{ctk 95\%} = 1.30 \cdot f_{ctm}$
Resistenza media a trazione per flessione		$f_{ctm} = 1.20 \cdot f_{ctm}$
Resistenza di calcolo a trazione		$f_{ctd} = \alpha_{EP} \frac{f_{ctk 5\%}}{\gamma_c}$
Resistenza tangenziale caratteristica di aderenza		$f_{bk} = 2.25 \cdot \eta f_{ctk 5\%}$
Tensione tangenziale di aderenza acciaio-calcestruzzo		$f_{bd} = \frac{1}{\eta_R} \frac{f_{bk}}{\gamma_c}$
Modulo elastico istantaneo del calcestruzzo (non applicabile ai calcestruzzi maturati a vapore)		$E_{cm} = 220000 \cdot \left( \frac{f_{cm}}{100} \right)^{0.30}$

Coefficienti di sicurezza

I coefficienti di sicurezza da utilizzare per il calcestruzzo sono di seguito riportati. Coefficienti assumono valore:

- $\gamma_c = 1.50$ , ordinariamente e, in ogni caso, per il calcolo della tensione di aderenza acciaio-calcestruzzo con esclusione per situazioni eccezionali;
- $\gamma_c = 1.40$ , (ammessa riduzione da 1.50 a 1.40) per produzioni continuative di elementi o strutture, soggette a controllo continuativo del calcestruzzo;
- $\gamma_c = 1.00$ , per situazioni eccezionali incluso il calcolo della tensione di aderenza acciaio-calcestruzzo.
- $\gamma_c = 2.14$ , per le verifiche di pilastri sottoposti all'azione sismica (il valore è ottenuto quale rapporto  $1.50/0.70 = 2.14$ );

- $\alpha_{cc}$ , coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata:
  - $\alpha_{cc} = 0.85$ , ordinariamente;
  - $\alpha_{cc} = 1.00$ , per le verifiche di resistenza al fuoco;
- $\alpha_{EP}$ , coefficiente riduttivo per elementi piani, gettati in opera con calcestruzzi ordinari:
  - $\alpha_{EP} = 1.00$ , ordinariamente;
  - $\alpha_{EP} = 0.80$ , per elementi piani (solette, pareti, etc.) aventi spessore minore di 5 cm;
- $\eta$ , fattore nel calcolo della resistenza tangenziale caratteristica di aderenza:
  - $\eta = 1.00$ , per barre con  $\varnothing \leq 32$  mm;
  - $\eta = \frac{132 - \varnothing}{100}$ , per barre con  $\varnothing > 32$  mm;
- $\eta_R$ , fattore nel calcolo della resistenza tangenziale di aderenza:
  - $\eta_R = 1.00$ , ordinariamente;
  - $\eta_R = 1.50$ , in caso barre di acciaio molto addensate e/o ancoraggio in zona tesa;

**SLE/SLS** Il legame costitutivo del conglomerato in esercizio è, di norma, lineare sia a trazione che a compressione.

In talune situazioni, tuttavia, il legame utilizzato è ancora quello parabolico. Il legame, inoltre, si presenta con un diverso modulo a trazione ed a compressione.

**Parametri di calcolo** Le diverse resistenze di calcolo sono indicate nel prospetto seguente (calcolo delle grandezze in daN/cm<sup>2</sup>):

Parametri caratteristici agli SLE/SLS del calcestruzzo		
Grandezza		Calcolo
Resistenza media a trazione semplice (assiale)	$\leq$ C50/60	$f_{ctm} = 0.6463 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}$
	$>$ C50/60	$f_{ctm} = 21.20 \cdot \ln\left(1 + \frac{f_{cm}}{100}\right)$
Resistenza media a trazione per flessione		$f_{ctm} = 1.20 \cdot f_{ctm}$
Stato limite di fessurazione	Tensione normale di trazione	$\sigma_t = \frac{f_{ctm}}{1.20}$
Stato limite delle tensioni di esercizio	massima tensione di compressione del calcestruzzo per combinazione rara	$\sigma_c = 0.60 \alpha_{EP} f_{ck}$
	massima tensione di compressione del calcestruzzo per combinazione quasi permanente	$\sigma_c = 0.45 \alpha_{EP} f_{ck}$

Coefficienti di sicurezza

I coefficienti di sicurezza ( $\gamma_c$ ) da utilizzare per la determinazione delle resistenze di calcolo sono sostanzialmente unitari.

Relativamente agli altri coefficienti e fattori risulta:

- $\alpha_{EP}$ . coefficiente riduttivo per elementi piani, gettati in opera con calcestruzzi ordinari:
  - $\alpha_{EP} = 1.00$ . ordinariamente;
  - $\alpha_{EP} = 0.80$ . per elementi aventi spessore minore di 5 cm;

**Acciaio**  
Generalità

L'acciaio deve intendersi quello utilizzato nelle strutture di calcestruzzo armato. L'acciaio per calcestruzzo armato è classificato in B450A e B450C.

L'impiego nel calcestruzzo armato delle barre è ammesso solo ed esclusivamente per i seguenti limiti dimensionali delle barre medesime:

Diametri ammissibili in relazione alle barre d'acciaio	
Tipo di acciaio	Diametri ammissibili (mm)
B450A	$5 \leq \varnothing \leq 10$
B450C	$6 \leq \varnothing \leq 40$

SLU

Agli SLU, la progettazione a sforzo normale e/o flessione viene condotta sotto le seguenti ipotesi di base (relativamente al solo acciaio):

- conservazione delle sezioni piane;
- perfetta aderenza tra acciaio e calcestruzzo;
- rottura dell'armatura tesa determinata dal raggiungimento della sua capacità deformativa ultima.

Le tensioni nell'acciaio si calcolano, in relazione al legame costitutivo utilizzato, a partire dalle deformazioni dell'acciaio medesimo.

I legami costitutivi utilizzabili, in relazione alla migliore descrizione del comportamento reale, sono di due tipi [17]:

- bilineare finito con incrudimento;
- elastico perfettamente plastico indefinito.

Legame costitutivo bilineare finito con incrudimento

Il legame bilineare finito con incrudimento è costituito da due distinti tratti rettilinei e si presenta simmetrico rispetto all'origine degli assi di riferimento. Mutuando una posizione dell'EC2, si suggerisce un utilizzo di tale legame per analisi globali. I valori di caratteristici delle deformazioni sono ( $\epsilon_{ud} = 0.90 \cdot \epsilon_{uk}$  con  $\epsilon_{uk} = (A_{gt})_k$ ):

Valori delle deformazioni			
Tipo di acciaio	$\epsilon_{yd}$ (%)	$\epsilon_{ud}$ (%) [17]	$\epsilon_{uk}$ (%) [18] [19]
B450A	0.1863	2.25	2.50
B450C	0.1863	6.75	7.50

Legame costitutivo elasticamente perfettamente plastico indefinito

Il legame elastico perfettamente plastico indefinito è costituito da due distinti tratti rettilinei, di cui quello plastico orizzontale, e si presenta simmetrico rispetto all'origine degli assi di riferimento.

Mutuando una posizione dell'EC2, si suggerisce un utilizzo di tale legame per verifiche locali o per il progetto delle sezioni. I valori caratteristici delle deformazioni sono:

Valori delle deformazioni	
Tipo di acciaio	$\epsilon_{yd}$ (%)
B450A	0.1863
B450C	

Nell'ambito del presente testo, si utilizzerà un legame elastico-perfettamente plastico a deformazione ultima limitata allo 1%: in tal caso i valori di caratteristici delle deformazioni sono:

Valori delle deformazioni		
Tipo di acciaio	$\epsilon_{yd}$ (%)	$\epsilon_{ud}$ (%)
B450A	0.1863	1.00
B450C		

Parametri di calcolo

Parametri caratteristici agli SLU		
	Grandezza	Calcolo
	Resistenza di progetto a trazione ed a compressione dell'acciaio	$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$
Equazione del legame costitutivo	in campo elastico - $\epsilon_{yd} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{yd}$ (traz./comp.)	$\sigma_s = \epsilon_s E_s$
	Legame bilineare in campo incrudente $\epsilon_{yd} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{ud}$ (traz.) - $\epsilon_{ud} \leq \epsilon_s \leq -\epsilon_{yd}$ comp.)	$\sigma_s = \begin{cases} f_{yd} + (\epsilon_s - \epsilon_{yd})E_i & \text{(traz.)} \\ -f_{yd} + (\epsilon_s - \epsilon_{yd})E_i & \text{(comp.)} \end{cases}$
	Legame elastico-plastico in campo plastico $\epsilon_{yd} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{ud}$ (traz.) - $\epsilon_{ud} \leq \epsilon_s \leq -\epsilon_{yd}$ comp.)	$\sigma_s = \begin{cases} f_{yd} & \text{(traz.)} \\ -f_{yd} & \text{(comp.)} \end{cases}$

Coefficienti di sicurezza

I coefficienti di sicurezza da utilizzare per la determinazione delle resistenze di calcolo non dipendono dal tipo di acciaio e per le due tipologie normate si utilizza sempre  $\gamma_s = 1.15$ .

SLE/SLS

Il legame costitutivo, dal punto di vista qualitativo, ed i punti di stato limite sono simili a quelli del diagramma riportato per gli SLU.

Analogamente a quanto già riportato:

Parametri caratteristici agli SLE-SLS per l'acciaio		
	Grandezza	Calcolo
Stato limite delle tensioni in esercizio	Resistenza per la combinazione di carichi caratteristica (rara)	$\sigma_s = 0.80f_{yk}$
	Coeff. di omogeneizzazione per le armature (valore convenz.):	$n = 15$
Equazione del legame costitutivo	trazione e compressione in campo elastico - $\epsilon_{sy} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sy}$ (traz./comp.)	$\sigma_s = \epsilon_s E_s$
	trazione e compressione in campo plastico $\epsilon_{sy} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{su}$ (traz.) e - $\epsilon_{su} \leq \epsilon_s \leq -\epsilon_{sy}$ (comp.)	$\sigma_s = \begin{cases} f_{yd} \text{ (traz.)} \\ -f_{yd} \text{ (comp.)} \end{cases}$

Coefficienti di sicurezza

I coefficienti di sicurezza da utilizzare per la determinazione delle resistenze dell'acciaio sono sempre unitari anche in presenza di azioni eccezionali.

**Riferimenti bibliografici**

L'intero capitolo è riferito a VERIFICHE E DIMENSIONAMENTO DI ELEMENTI STRUTTURALI, sollecitazione assiale, flessione e presso/tenso flessione; Gianni Michele De Gaetanis, Grafill, I Edizione – giugno 2009.