CARLO SIGMUND

CEMENTO ARMATO

Manuale di calcolo agli stati limite

TOMO PRIMO



Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it



SERVIZI GRATUITI ON LINE

Questo libro dispone dei seguenti servizi gratuiti disponibili on line:

- filodiretto con gli autori
- le risposte degli autori a quesiti precedenti
- files di aggiornamento al testo e/o al programma allegato
- possibilità di inserire il proprio commento al libro.

L'indirizzo per accedere ai servizi è: www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF8166

Struttura dell'opera

TOMO PRIMO

Parte prima - Proprietà dei materiali

- 1. Materiali che costituiscono il calcestruzzo armato: considerazioni introduttive
- 2. Tipi di cemento
- 3. Proprietà degli inerti
- 4. Lavorabilità del calcestruzzo
- 5. Resistenza del calcestruzzo
- 6. Schematizzazione matematica della resistenza e delle caratteristiche deformative del calcestruzzo
- 7. Panoramica sulle armature finora impiegate nel calcestruzzo armato ordinario e precompresso

Parte seconda - Calcolo delle strutture

- 8. Introduzione al metodo degli stati limite
- 9. Fondamenti del calcolo non lineare del calcestruzzo armato
- 10. Stato limite ultimo per flessione e per presso-tensoflessione
- 11. Stato limite ultimo per taglio
- 12. Stato limite ultimo per torsione
- Precisazioni sulle interazioni fra le sollecitazioni assiale, flessionale, tagliante e torsionale in un elemento strutturale in calcestruzzo armato
- 14. Sollecitazioni semplici di compressione e trazione allo stato limite ultimo su elementi strutturali in conglomerato armato
- 15. Stato limite ultimo per instabilità
- 16. Stati limite di esercizio

Bibliografia

TOMO SECONDO _

Parte terza - Prontuario delle strutture in cemento armato

- A. Richiami generali sulle unità di misura
- B. Brevi richiami di matematica e fisica
- C. Principali grandezze che caratterizzano le sezioni piane
- D. Diagrammi delle sollecitazioni per i principali elementi strutturali isostatici e iperstatici
- E. Linee di influenza del taglio e del momento flettente per trave a una campata con appoggio alle estremità
- F. Coefficienti di ripartizione per trave di riva secondo Courbon
- G. Tondini per ferri di armatura lenta: diametri, pesi, sezioni
- H. Caratteristiche reti elettrosaldate a maglia quadrata
- I. Caratteristiche meccaniche e tecnologiche degli acciai da armatura e relative prescrizioni
- L. Subsistemi di partizioni orizzontali: i solai
- M. Tabelle pesi dei materiali
- N. Spinte del terreno sui muri di sostegno: generalità

Parte quarta - Appendici

Bibliografia

Indice tomo primo

Pren	nessa	pag.	XV
Avv	ertenze	»	XIX
	PARTE PRIMA		
	PROPRIETÀ DEI MATERIALI		
1. N	fateriali che costituiscono il calcestruzzo armato: considerazioni introduttive		
1.1.	Il calcestruzzo	»	2
	1.1.1. I componenti del calcestruzzo	»	3
1.2.	Le barre d'armatura	»	3
• T	***		
2. 1	ïpi di cemento		
2.1.	Principali caratteristiche dell'impasto e della macinazione dei cementi		4
	2.1.1. La presa		5
	2.1.2. Falsa presa		6
	2.1.3. Finezza di macinazione		6
	2.1.4. Struttura del cemento idrato		10
	2.1.5. Volume dei prodotti di idratazione		11
	2.1.6. Pori capillari		14
	Composizione e caratteristiche chimiche dei cementi Portland		15
	Idratazione dei cementi Portland		16
2.4.	I tipi di cemento Portland		18
	2.4.1. Cemento normale		19
	2.4.2. Cemento a rapido indurimento		20
	2.4.3. Cementi speciali a rapido indurimento		20
	2.4.4. Cementi a basso calore di idratazione		21
	2.4.5. Cementi resistenti ai solfati		21
	2.4.6. Cementi d'altoforno		21
	2.4.7. Cementi soprasolfatati		22
	2.4.8. Cementi pozzolanici e pozzolane		23
	2.4.9. Cemento bianco		24
	Altri cementi Portland		24
	Cementi naturali		25
	Cementi espansivi		25
2.8.	Cemento alluminoso		25
	2.8.1. Proprietà refrattarie		30
	2.8.2. Velocità di presa di miscele di cemento Portland e alluminoso	»	30

5. Resistenza del calcestruzzo

£ 1 D.....

J.1.	Premessa	>>	03
5.2.	Il rapporto acqua/cemento	»	64
5.3.	Rapporto tra il volume della pasta di cemento idratata e la somma del volume del cemento		
	idratato e dei pori capillari	»	66

4.6. Il «bleeding»

Indi	ice		IX
	Acqua effettiva d'impasto		68
	Resistenza a trazione del conglomerato		68
	Comportamento in compressione		68
	Le microlesioni		71
	Influenza degli inerti di grossa pezzatura		71
5.9.	Influenza del tenore in cemento sulla resistenza	»	72
6. S	chematizzazione matematica della resistenza e delle caratteristiche deformative del calcestr	uzzo	
6.1.	La resistenza in funzione del tempo	»	76
6.2.	Correlazione tra resistenza a compressione e a trazione	»	76
6.3.	Resistenza del calcestruzzo in funzione della temperatura	»	77
6.4.	Resistenza a fatica	»	79
6.5.	Resistenza all'urto	>>	83
6.6.	Deformabilità ed elasticità del calcestruzzo	»	84
6.7.	Formule approssimate per la stima del modulo elastico del calcestruzzo	»	85
	Formule per la schematizzazione delle deformazioni differite nel conglomerato		90
	Entità delle deformazioni viscose		96
	Formule per la schematizzazione dell'andamento nel tempo del ritiro del conglomerato		107
6.11	. Tensioni indotte dal ritiro su sezioni in calcestruzzo armato ordinario	>>	121
7.2.	Gli acciai armonici da precompressione 7.2.1. Requisiti e caratteristiche meccaniche 7.2.2. Tipi di acciaio	» » » »	134 136 137 139 139 141
	PARTE SECONDA CALCOLO DELLE STRUTTURE		
8. Iı	ntroduzione al metodo degli stati limite		
8.1.	Premessa		144
	8.1.1. Sicurezza delle strutture e prestazioni attese: principi fondamentali		144
	8.1.2. Il metodo di calcolo a rottura		145
	8.1.3. Principali critiche al metodo a rottura		146
8.2.	Stati limite, azioni, sollecitazioni e resistenze		146
	8.2.1. Premessa		146
	8.2.2. Stati limite per le strutture		147
	8.2.3. Vita nominale, classi d'uso e periodo di riferimento		148
	8.2.4. Azioni e sollecitazioni sulle strutture: definizione e classificazione	»	150
	8.2.5. Classificazione della resistenza dei calcestruzzi e classe d'impiego secondo le Norme		150
	Tecniche		152
	8.2.6. Combinazioni delle azioni e coefficienti parziali di sicurezza		153
	8.2.7. Resistenza delle strutture e obiettivi generali dell'analisi strutturale		154 154
	0.2.0. I THICIPIO ECHICIAIC UI HIISUIA UCHA SICUICZZA SHUUUIAIC	"	134

8.3.	Metodi di misura della sicurezza delle strutture	
	8.3.1. Generalità	>>
	8.3.2. Il metodo dei "valori estremi"	>>
	8.3.3. Il metodo "semiprobabilistico"	>>
8.4.	Valori caratteristici delle azioni e delle resistenze	>>
	8.4.1. Resistenze caratteristiche dei materiali resistenti delle strutture in c.a	>>
	8.4.2. Azioni caratteristiche agenti sulle strutture in c.a	>>
8.5.	Verifiche agli stati limite e alle tensioni secondo la Normativa Italiana	
	8.5.1. Verifiche agli stati limite ultimi	
	8.5.2. Verifiche agli stati limite di esercizio	
	8.5.3. Verifiche alle tensioni ammissibili	
8.6.	Verifiche con il metodo agli stati limite secondo la Normativa Italiana	
	8.6.1. Premessa	
	8.6.2. Verifiche agli stati limite ultimi secondo la Normativa Italiana: azioni e loro combinazioni	
	8.6.3. Verifiche alle tensioni ammissibili secondo la Normativa Italiana: azioni e loro combinazioni	
	8.6.4. Verifiche agli stati limite di esercizio secondo la Normativa Italiana: azioni e loro combinazioni	
8.7.	Verifiche per situazioni transitorie con il metodo agli stati limite secondo la Normativa Italiana	
	Verifiche per situazioni eccezionali con il metodo agli stati limite secondo la Normativa Italiana	
	Verifiche con il metodo agli stati limite secondo l'Eurocodice 2	
	8.9.1. Premessa	
	8.9.2. Verifiche agli stati limite ultimi secondo l'Eurocodice 2: azioni e combinazioni	
	8.9.3. Verifiche agli stati limite di esercizio secondo l'Eurocodice 2: azioni e combinazioni	
	8.9.4. Casi e combinazioni di carico secondo l'E.C.2: considerazioni	
	8.9.5. Metodi di analisi e semplificazioni per il calcolo agli stati limite secondo l'E.C.2	
0 E		"
	ondamenti del calcolo non lineare del calcestruzzo armato	
9.1.	ondamenti del calcolo non lineare del calcestruzzo armato Ipotesi fondamentali assunte per la schematizzazione di calcolo	
9.1.	ondamenti del calcolo non lineare del calcestruzzo armato Ipotesi fondamentali assunte per la schematizzazione di calcolo	»
9.1.	Ipotesi fondamentali assunte per la schematizzazione di calcolo	» »
9.1.	Ipotesi fondamentali assunte per la schematizzazione di calcolo	» »
9.1. 9.2.	Ipotesi fondamentali assunte per la schematizzazione di calcolo	» » »
9.1. 9.2. 9.3.	Ipotesi fondamentali assunte per la schematizzazione di calcolo	» » »
9.1. 9.2. 9.3.	Ipotesi fondamentali assunte per la schematizzazione di calcolo	» » » »
9.1. 9.2. 9.3. 9.4.	Ipotesi fondamentali assunte per la schematizzazione di calcolo	» » » »
9.1. 9.2. 9.3. 9.4.	Ipotesi fondamenti del calcolo non lineare del calcestruzzo armato Schematizzazione matematica dei diagrammi di compressione del conglomerato secondo la Normativa Italiana e l'Eurocodice 2 (E.C.2)	» » » » »
9.1. 9.2. 9.3. 9.4.	Ipotesi fondamenti del calcolo non lineare del calcestruzzo armato Schematizzazione matematica dei diagrammi di compressione del conglomerato secondo la Normativa Italiana e l'Eurocodice 2 (E.C.2)	» » » » »
9.1. 9.2. 9.3. 9.4.	Ipotesi fondamenti del calcolo non lineare del calcestruzzo armato Schematizzazione matematica dei diagrammi di compressione del conglomerato secondo la Normativa Italiana e l'Eurocodice 2 (E.C.2)	» » » » » »
9.1. 9.2. 9.3. 9.4. 9.5.	Ipotesi fondamenti del calcolo non lineare del calcestruzzo armato Schematizzazione matematica dei diagrammi di compressione del conglomerato secondo la Normativa Italiana e l'Eurocodice 2 (E.C.2)	» » » » » » »
9.1. 9.2. 9.3. 9.4. 9.5.	Ipotesi fondamenti del calcolo non lineare del calcestruzzo armato Schematizzazione matematica dei diagrammi di compressione del conglomerato secondo la Normativa Italiana e l'Eurocodice 2 (E.C.2)	» » » » » » »
9.1. 9.2. 9.3. 9.4. 9.5.	Ipotesi fondamenti del calcolo non lineare del calcestruzzo armato Schematizzazione matematica dei diagrammi di compressione del conglomerato secondo la Normativa Italiana e l'Eurocodice 2 (E.C.2)	» » » » » » »
9.1. 9.2. 9.3. 9.4. 9.5.	Ipotesi fondamentali assunte per la schematizzazione di calcolo	» » » » » » »
9.1. 9.2. 9.3. 9.4. 9.5. 9.6. 9.7.	Ipotesi fondamentali assunte per la schematizzazione di calcolo	» » » » » »
9.1. 9.2. 9.3. 9.4. 9.5. 10.1 10.2	Ipotesi fondamentali assunte per la schematizzazione di calcolo	» » » » » » » »
9.1. 9.2. 9.3. 9.4. 9.5. 10.1 10.2 10.3	Ipotesi fondamentali assunte per la schematizzazione di calcolo	» » » » » » » » »
9.1. 9.2. 9.3. 9.4. 9.5. 9.6. 9.7. 10.1 10.2 10.3 10.4	Ipotesi fondamentali assunte per la schematizzazione di calcolo	» » » » » » » » »

Indice XI

10.6. Equazioni di equilibrio allo Stato limite Ultimo per pressoflessione retta	
10.6.1. Equazioni di equilibrio generali nel caso di asse neutro interno o esterno alla sezione	
10.6.2. Procedura di verifica e progetto di una generica sezione resistente	»
10.7.I diagrammi di interazione di calcolo per una generica sezione di calcestruzzo armato	»
10.7.1. Definizione di diagramma di interazione o dominio di rottura	»
10.7.2. Equazioni e diagrammi di interazione per sezioni rettangolari piene	
10.7.3. Equazioni e diagrammi di interazione per sezioni circolari piene	
10.7.4. Equazioni e diagrammi d'interazione per sezioni circolari cave	
10.8. Esempi di progetti e verifiche agli stati limite ultimi di sezioni inflesse e pressoinflesse	
secondo la Normativa Italiana	
10.9. Esempi di progetti e verifiche agli stati limite ultimi di sezioni inflesse e pressoinflesse	
secondo l'Eurocodice (E.C.2)	
10.10. Proposta di progetto e verifica di sezioni quadrate o rettangolari inflesse o presso-tensoinflesse	
tramite equazioni parametriche	
10.10.1. Procedura di calcolo semplificata per sezioni quadrate o rettangolari semplicemente	
inflesse, con rottura di tipo duttile	
10.10.2. Procedura di calcolo semplificata per sezione quadrata o rettangolare pressoinflessa	
con grande eccentricità	
10.10.3. Procedura di calcolo semplificata per sezione quadrata o rettangolare tensoinflessa	
con grande eccentricità	
10.10.4. Procedura di calcolo semplificata per sezione quadrata o rettangolare pressoinflessa	
con piccola eccentricità	
10.10.5. Formule parametriche per il progetto e la verifica di sezioni quadrate o rettangolari	
presso-tensoinflesse	»
10.10.6. Formule parametriche per il progetto e la verifica di sezioni quadrate o rettangolari	
semplicemente inflesse al massimo della duttilità	»
10.10.7. Esempi di progetti e verifiche di sezioni inflesse o presso-tensoinflesse rettangolari	
con il metodo delle equazioni parametriche	
10.10.8. Esempi di progetti e verifiche di generiche sezioni inflesse o presso-tensoinflesse in	
conglomerato armato (rettangolari piene, circolari piene e circolari cave)	
10.10.9. Esempi di progetti e verifiche di sezioni rettangolari semplicemente inflesse tramite	
il metodo tabellare	
11. Stato limite ultimo per taglio	
11.1. Premessa	
11.2. Comportamento resistente ad "arco"	
11.3. Elementi strutturali dotati di apposite armature al taglio: schema del reticolo isostatico	
11.4. "Trazione anticipata" nelle armature longitudinali per effetto del taglio: traslazione del	
diagramma di calcolo del momento flettente	»
11.5. Progetto dell'armatura longitudinale in presenza di sollecitazioni taglianti	»
11.6. Meccanismi di resistenza al taglio in assenza di apposite armature: funzionamento "a pettine"	»
11.7. L'influenza del contributo della compressione assiale alla resistenza al taglio in assenza di	
apposite armature	
11.8. "Effetto spinotto" in elementi strutturali privi di apposite armature al taglio	
11.9. "Effetto ingranamento degli inerti" in elementi strutturali privi di armature al taglio	
11.10. Schematizzazione matematica della contemporaneità dei vari meccanismi di resistenza al	
taglio in assenza di apposita armatura	
11.11. Verifica al taglio di un elemento strutturale in calcestruzzo armato secondo la Normativa	
Italiana	
11.11.1. Generalità	
11.11.2. Metodi di calcolo e formule fondamentali da impiegare per il progetto e la verifica	
11.11.3. Elementi strutturali privi di armature al taglio	>>
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	

11.11.4. Armatura longitudinale prossima agli appoggi in presenza di sollecitazioni taglianti 11.11.5. Procedure per il progetto delle armature al taglio: principali prescrizioni della Normativa Italiana	
11.12. Verifica al taglio di un elemento strutturale in calcestruzzo armato secondo l'Eurocodice 2 (E.C.2)	
11.12.1. Prescrizioni di carattere generale dell'E.C.2.	
11.12.2. Metodo Standard secondo E.C.2-NAD (ENV 1992-1-1)	» 544
11.12.3. Metodo dell'inclinazione variabile delle bielle compresse secondo E.C.2-NAD (ENV 1992-1-1)	
11.12.4. Metodo dell'inclinazione variabile delle bielle compresse secondo EN 1992-1-1	» 548
11.13. Esempi di progetti e verifiche di elementi strutturali sottoposti al taglio secondo la Normativa Italiana	» 559
11.14. Esempi di progetti e verifiche di elementi strutturali sottoposti al taglio secondo l'Eurocodice 2 (E.C.2)	
12. Stato limite ultimo per torsione	
2.1. Premessa	» 668
2.2. Comportamento fino a collasso di un elemento strutturale sottoposto a sollecitazione di torsione pura	» 669
2.3. Schematizzazione di calcolo adottata dalla Normativa Italiana e dall'Eurocodice: il modello del	
traliccio periferico di Raush	» 670
2.4. Procedure per il progetto delle armature a torsione: principali prescrizioni della Normativa	
Italiana	» 674
2.5. Procedure per il progetto delle armature a torsione: principali prescrizioni dell'Eurocodice 2	» 677
2.6. Esempi di progetti e verifiche di elementi strutturali sottoposti a torsione secondo la Normativa Italiana	
2.7. Esempi di progetti e verifiche elementi strutturali sottoposti a torsione secondo l'Eurocodice 2 (E.C.2)	
13. Precisazioni sulle interazioni fra le sollecitazioni assiale, flessionale, tagliante e torsionale in un elemento strutturale in calcestruzzo armato	
3.1.Premessa	» 736
3.2. Interazione sollecitazione flessionale e tagliante	
3.3. Interazione sollecitazione assiale e tagliante	
3.4. Interazione sollecitazione flessionale e torsionale	
3.5. Interazione sollecitazione assiale e torsionale	» 737
3.6. Interazione sollecitazione tagliante e torsionale	» 737
14. Sollecitazioni semplici di compressione e trazione allo stato limite ultimo su elementi struttu n conglomerato armato	rali
4.1. Equilibrio in condizioni di pressione semplice	» 738
14.1.1.Esempi di progetto delle armature di elementi strutturali sottoposti a sollecitazioni	
prevalentemente di pressione	» 740
4.2. Equilibrio in condizioni di trazione semplice	
15. Stato limite ultimo per instabilità	
15.1. Stabilità dell'equilibrio delle strutture	» 752
*	
15.1.1.Premessa	» 752

Indice XIII 15.1.2. Instabilità classica o per "diramazione stabile" » 15.1.4. Instabilità per "cedimento progressivo" » 15.2.2.1. Determinazione della curva $M(\theta)$ in funzione dei valori assunti dalla curvatura θ 15.4. L'instabilità secondo l'E.C.2 (NAD) 15.4.4.1. Generalità » 15.4.7.1. Generalità » 15.5.2. Definizioni 15.6.1. Tabelle "colonna modello" per sezioni rettangolari piene armate con armatura doppia 15.6.2. Tabelle "colonna modello" per sezioni quadrate piene armate con armatura distribuita uniformemente lungo il perimetro (sottoposte a pressoflessione retta)......» 15.6.3. Tabelle "colonna modello" per sezioni circolari piene armate con armatura distribuita 16. Stati limite di esercizio 16.2. Classificazione dell'esposizione ambientale e limitazione delle tensioni sul calcestruzzo 16.2.2. Esempi di verifica di limitazione delle tensioni secondo la Normativa Italiana e l'Eurocodice 2 (E.C.2)

CEMENTO ARMATO – MANUALE

16.3.1. Generalità		891
16.3.2. Stato limite di fessurazione in elementi in c.a.		893
16.3.3. Meccanismi di formazione delle fessure in elementi in c.a.		895
16.3.4. Distanza tra fessure consecutive		898
16.3.5. Stima della massima ampiezza della fessurazione		900
16.3.6. Quantitativi minimi di armatura per sezioni rettangolari	>>	904
16.3.7.Le equazioni per il controllo della fessurazione secondo la Normativa Italiana	>>	905
16.3.8.Le equazioni per il controllo della fessurazione secondo l'E.C.2	»	909
16.3.9. Esempi di verifica a fessurazione secondo la Normativa Italiana	»	915
16.3.10.Esempi di verifica a fessurazione secondo l'Eurocodice 2 (E.C.2)	»	934
16.4. Stato limite di deformazione	»	954
16.4.1. Generalità	>>	954
16.4.2. Valutazione della curvatura media di un elemento strutturale in c.a	»	955
16.4.3. Calcolo della freccia tramite il "principio dei lavori virtuali"	>>	955
16.4.4. Calcolo della freccia tramite il "metodo del modulo effettivo"	»	956
16.4.5. Gli effetti della viscosità del conglomerato sulle deformazioni	»	958
16.4.6. Procedura per il calcolo rapido della freccia	»	959
16.4.7.Esempi di stima della freccia elastica di elementi inflessi di sezione trasversale costante	»	959
Bibliografia	»	969

XIV

Premessa

L'opera raggruppa in forma sintetica e completa tutti gli elementi tecnici e pratici (oltre alle varie procedure di calcolo al momento disponibili) indispensabili per ideare, progettare o dirigere l'esecuzione di una ordinaria costruzione in calcestruzzo armato, rispettando le attuali prescrizioni di normativa e garantendo i livelli di sicurezza stabiliti per legge.

Il volume, anche in virtù del moderno spirito della nuova normativa italiana e della sua impostazione essenzialmente prestazionale, è pensato come raccolta di nozioni tecniche e pratiche, aventi il proposito di mettere al servizio del Professionista e della sua esperienza tutti quegli strumenti di modellazione e di calcolo che possano rendergli più agevole, veloce e semplice un primo proporzionamento della struttura, ai fini della ricerca e dell'individuazione della soluzione ottimale e, quindi, della via verso il metodo più idoneo a garantire i livelli di sicurezza necessari.

L'opera è rivolta non solo a tutti quei professionisti che si occupano quotidianamente di strutture in conglomerato armato, ma anche a tutti coloro che si avvicinano per la prima volta all'argomento o che, nella pratica corrente delle costruzioni, non hanno il tempo o la possibilità di dedicarsi a studi specialistici. A tal fine, è proposta una vasta gamma di esempi svolti – talvolta eseguiti con procedure e tecniche rigorose, altre volte con semplici¹ calcoli di larga massima eseguiti anche con metodi tradizionali – tali da agevolare il *cross check* per la valutazione complessiva dell'affidabilità di eventuali risultati ottenuti con l'analisi automatica. Il testo, infatti, affrontando subito la trattazione agli stati limite, introduce il Lettore al calcolo non lineare e alle relative ipotesi fondamentali, iniziando con l'analisi in successione dei diversi stati limite ultimi: flessione, presso-tensoflessione, taglio, torsione e instabilità.

Per dare una panoramica ampia e dettagliata delle procedure di calcolo a disposizione, nonchè della loro origine, sono presentate varie formulazioni; a partire dalle meno recenti e più rigorose² (vedere esempi ai paragrafi 10.8 e 10.9), sino a quelle più semplificate, idonee ad un utilizzo pratico e immediato. Tale panoramica ha soprattutto il compito di alleviare il lavoro del Progettista nel definire – il più delle volte in tempi forzatamente troppo brevi – i costi delle strutture con la massima esattezza possibile, preservando la pubblica incolumità e la conservazione del bene stesso.

Dopo una introduzione teorica delle varie metodologie di calcolo sono illustrate, per ognuna, le relative codifiche contemplando la Normativa Italiana (D.M. 09.01.96 e, in particolare, il D.M. 14/01/2008 sulle Norme Tecniche per le Costruzioni³), l'Eurocodice 2 (ENV e EN 1992-1-1) e l'Eurocodice 8 (prEN 1998-1).

¹ Semplici procedure di progetto e verifica spedita delle sezioni in c.a. sono anche riportate al paragrafo 10.10.8 (metodo grafico) e al paragrafo 10.10.9 (metodo tabellare).

² Si allude alle equazioni presentate nel prezioso testo: "*Progetto agli stati limite delle strutture in c.a.*" (parte I); di Antonio Migliacci e Franco Mola.

³ Riferimento a G.U. n. 29 del 04.02.2008 – Supplemento Ordinario n. 30.

Adottando per gli argomenti trattati un'esposizione semplificata ma rigorosa con alcune semplificazioni utili ai fini pratici, vengono illustrati gli aspetti teorici e pratici delle varie procedure di calcolo ed evidenziati puntualmente i lati in comune o le discrepanze delle principali prescrizioni, a seconda della normativa utilizzata. Ad ogni argomento affrontato, infatti, sono accostati numerosi esempi di progetto e verifica di elementi strutturali, condotti sia con la Normativa Italiana sia con gli Eurocodici.

Particolare attenzione si è posta nel trattare il problema dell'instabilità; principalmente per gli elementi snelli, quali, ad esempio, le pile dei ponti (come noto, alla non linearità connessa al comportamento dei materiali si aggiunge la non linearità geometrica connessa alle deformazioni). A tal proposito, per alleviare il Tecnico da eccessivi oneri computazionali, si è provveduto a riportare tutte le tabelle disponibili nella letteratura consolidata per un calcolo più veloce possibile di verifica all'instabilità, seguendo l'approssimazione del noto metodo della "colonna modello".

Sebbene all'interno di un manuale, non sono stati trascurati i fenomeni differiti di viscosità e ritiro in virtù della loro notevole influenza ai fini dello stato tensionale e deformativo, in alcuni casi singolari come, ad esempio, negli interventi conservativi o ricostruttivi, laddove debba essere scrupolosamente assicurata la monolicità del nuovo con l'esistente, oppure in talune costruzioni o manufatti quali serbatoi, vasche, tubi, ecc. In particolare, per consentire un'analisi il più possibile attenta al fenomeno, si è ritenuto utile proporre al Lettore diverse formulazioni dei modelli proposti ed utilizzati dalle varie normative europee nell'arco degli ultimi venti anni.

Particolare attenzione, ovviamente, è stata posta a tutta la trattazione delle verifiche agli stati limite di esercizio, sempre tenendo conto delle prescrizioni imposte dalle normative citate. A tal fine, relativamente al calcolo delle frecce di inflessione, si è ritenuto utile riportare all'attenzione alcune procedure semplificate che riducono sensibilmente il carico computazionale. Nello specifico, per il calcolo spedito della freccia di elementi inflessi di sezione trasversale costante, si propone al Lettore la formulazione proposta dal Prof. Ing. Ettore Pozzo dell'Università di Cagliari che, pur operando con gli strumenti del calcolo lineare, riesce ad offrire i medesimi risultati ottenuti con le lunghe procedure che operano in campo non lineare.

Una discreta parte della sezione dedicata al prontuario, poi, affronta l'importante tematica delle costruzioni in calcestruzzo armato in zona sismica: in particolare, viene presentato e spiegato nel dettaglio quanto disposto dall'Eurocodice 8. A tal proposito, sono riportati alcuni esempi completi per il calcolo degli spettri di risposta (elastico e di progetto), per il calcolo delle armature minime per la duttilità locale degli elementi strutturali più comuni (travi e pilastri) e per le verifiche di resistenza dei nodi trave-pilastro. Accanto agli aspetti normativi, inoltre, vengono presentate e descritte le tecniche di calcolo e di modellazione condotte mediante l'analisi dinamica modale, evidenziando anche gli aspetti maggiormente salienti che intervengono in tale tipo di analisi qualora, per modellare le strutture, si utilizzi il metodo degli elementi finiti su modelli tridimensionali.

Infine, una parte del manuale è dedicata allo studio del calcestruzzo e dei singoli materiali che lo costituiscono, analizzando nel dettaglio le loro proprietà ed evidenziando le relative schematizzazioni e spiegazioni scientifiche. Si è cercato, ove possibile, di riportare alla luce quanti più documenti e risultati relativi alle sperimentazioni effettuate nel corso degli anni sui materiali del calcestruzzo, ormai "nascosti" in testi di difficile reperimento e che sarebbe interessante raccogliere e divulgare.

Del calcestruzzo, infatti, si parla molto, ma in genere ci si interessa più delle sue applicazioni che della sua tecnologia; quest'ultima è considerata spesso un fatto scontato ed acquisito. Proprio per questo è stata dedicata la prima sezione del presente volume alle proprietà dei

Premessa XVII

materiali: è infatti innegabile che il successo di tutte le nuove tecniche costruttive dipende prima di tutto dalla conoscenza dei materiali e della relativa tecnologia.

Gran parte della documentazione raccolta in questo lavoro rispecchia la numerosa letteratura esistente sul calcestruzzo e sul calcestruzzo armato ordinario e, quindi, è stato necessario un non indifferente lavoro di sintesi al fine di consentire un utilizzo veloce e preciso della stessa. Non illudendosi di aver fatto una cosa pregevole, si spera fortemente di aver fatto una cosa utile.

Avvertenze

NOTE SUL TESTO

- 1. In adeguamento alle direttive C.E.E. anche in Italia è stato ormai da lungo tempo adottato il Sistema Internazionale di unità di misura (S.I.) in sostituzione del Sistema Tecnico (M.K.S.). Si ricorda, pertanto, che il fattore di conversione dal vecchio sistema al nuovo è 9,80665. Infatti, 1kg_f = 9,80665 N. In particolare, nel settore delle costruzioni, specialmente per il calcestruzzo armato e la muratura, tenuto conto che le ipotesi di calcolo già di per sé ammettono delle approssimazioni e visto che arrotondando a 10 il numero 9,80665 l'errore che si commette è dell'ordine del 2%, è consentito assumere: 1 kg_f = 10 N = 1 daN. In questa pubblicazione, si tiene conto della suddetta posizione in modo da mantenere il concetto fisico e dimensionale di forza derivante dal vecchio Sistema Tecnico.
- 2. Il presente volume fa riferimento in gran parte: all'Eurocodice 0 (EN 1990 Eurocode Basis of structural design; all'Eurocode 2 Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buiding EN 1992-1-1: 2004 e alla UNI EN 1992-1-1: 2005; alla Sezione III della Parte prima del D.M 09.01.96 e alle Norme Tecniche per le costruzioni. Vengono quindi fatti anche riferimenti all'E.C.2 ENV 1992-1-1. Nel seguito, le norme italiane verranno spesso citate brevemente con la dizione "Normativa Italiana" o "Norme Tecniche". In generale, l'Eurocodice 2 verrà indicato scrivendo "E.C.2". In particolare, i relativi NAD (National Application Document) come sezione III della parte I e della parte II verranno indicati scrivendo "E.C.2 (NAD)" oppure "E.C.2-NAD". Infine, relativamente ad alcune sezioni dedicate al prontuario, si è fatto riferimento all'Eurocodice 8 Design of structures for earthquakes resistance Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, Final Draft prEN 1998-1, December.
- 3. Trattando medesimi argomenti secondo differenti Normative e differenti versioni di una stessa normativa, si è cercato di utilizzare una simbologia il più possibile uniforme. Pertanto, in alcuni casi, per non appesantire la trattazione e anche per evidenti ragioni di spazio, alcuni simboli utilizzati non sono identici a quelli presentati all'interno delle varie norme qui trattate.
- Tutti gli esempi di calcolo, proposti come caso-studio e rappresentativi delle situazioni progettuali che più frequentemente si verificano nella pratica tecnica, sono stati concepiti per conglomerati con f_{rk} [Mpa] ∈ [12; 50].
- 5. Tutti gli esempi delle verifiche agli stati limite di esercizio devono intendersi relative a elementi strutturali appartenenti a strutture la cui Vita Nominale sia almeno di 50 anni (Tipo 2) e ricadenti all'interno delle Classi d'uso I o II⁴.

⁴ Ci si riferisce, quindi, a costruzioni il cui uso prevede normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali e, infine, ad industrie con attività non pericolose.

- 6. Per sicurezza e semplicità, soprattutto nelle procedure di progetto delle sezioni degli elementi strutturali condotti secondo la Normativa Italiana, per il materiale acciaio dell'armatura lenta è stato impiegato il cosiddetto modello elastico perfettamente plastico, con plasticità costante al valore di progetto $f_{vd} = f_{vk} / 1,15$.
- 7. Per permettere anche la verifica di elementi strutturali esistenti, tutti gli abachi dei domini di resistenza delle sezioni rettangolari, circolari piene e cave (presentati rispettivamente nei paragrafi 10.7.2; 10.7.3; 10.7.4) sono stati tracciati considerando tensioni di calcolo degli acciai delle armature da 3200 daN/cm² a 4000 daN/cm².
- 8. Tutti gli esempi di progetto, e soprattutto di verifica, di elementi strutturali condotti secondo la Normativa Italiana (Norme Tecniche D.M. 14/01/2008 e D.M. 09.01.96), fanno riferimento ai fini dei soli calcoli di dimensionamento e verifica⁵ ai valori delle tensioni di snervamento tipiche degli acciai noti come⁶ FeB38k ($f_{yk} = 3750 \ daN/cm^2$) ed FeB44k ($f_{yk} = 4300 \ daN/cm^2$).
- 9. Relativamente agli esempi di progetto e verifica condotti seguendo le prescrizioni dell'Eurocodice 2, per identificare la classe del calcestruzzo si è usata la denominazione Cn/m; la quale, si ricorda, indica un calcestruzzo avente resistenza caratteristica cubica pari a "m" N/mm^2 e resistenza caratteristica cilindrica pari a "n" N/mm^2 . Tale classificazione del calcestruzzo, in base al rapporto delle resistenze cilindrica e cubica, ha trovato la sua definizione in 7.3.1.1 della ENV 206. Inoltre, ai fini dei soli calcoli di dimensionamento e verifica riportati negli esempi condotti seguendo l'E.C.2, per le barre di armatura nervate si è fatto riferimento a valori della tensione di snervamento tipiche di acciai noti come FeB44k ($f_{yk} = 4300 \ daN/cm^2$) e alla tensione di snervamento di acciai di classe $S440 \ (f_{yk} = 4400 \ daN/cm^2)$.
- 10. Gran parte dei diagrammi di interazione, tracciati per la verifica delle sezioni allo stato limite ultimo secondo la Norme Tecniche, riportano le limitazioni date dal D.M. 09.01.96 sulla eccentricità assiale limite, e sulla riduzione della forza normale tramite penalizzazione della resistenza a compressione del conglomerato.
- 11. In gran parte degli esempi riportati nel testo, la costruzione del semidominio di interazione è stata condotta calcolando in maniera precisa i punti maggiormente significativi del suo contorno (punti di divisione dei principali campi di rottura) e infine interpolandoli linearmente tra loro.
- 12. Negli esempi riportati nel presente testo, le indicazioni sulle analisi dei carichi e le ipotesi sull'entità delle sollecitazioni di progetto sono da intendersi come orientative e quindi devono essere controllate dall'utilizzatore.

Note su disegni e illustrazioni

13. Tutti i disegni delle proposte di carpenteria esecutiva degli elementi strutturali sono stati quotati in millimetri, e nei disegni delle proposte di carpenteria esecutiva, la quotatura delle staffe è stata riferita all'asse delle stesse.

⁵ Notare che l'attuale Normativa Italiana impone per gli acciai delle armature (B450C laminati a caldo, B450A trafilati a freddo, acciai inossidabili o zincati) una tensione nominale di snervamento, da utilizzare nei calcoli, pari a: $f_{vk} = 4500 \ daN/cm^2$.

⁶ L'acciano FeB38k non è più disponibile sul mercato da alcuni anni ed è praticamente solo una partita di acciaio FeB44k che non ha superato le prove di qualificazione.

Avvertenze XXI

14. In tutte le illustrazioni, le barre di armatura riportate nei prospetti delle carpenterie all'interno dei casseri sono state disegnate considerando il loro spessore e i raggi di piegatura su mandrino (secondo E.C.2-NAD); mentre l'esploso delle armature è stato disegnato "a fil di ferro", riportando le misure reali della lunghezza dell'asse di ciascuna barra.

- 15. In tutti i prospetti delle travate, la larghezza dei pilastri di appoggio è stata assunta indicativamente pari a 300 mm.
- 16. Per poter individuare l'esatta posizione di eventuali spezzoni rettilinei in zona tesa, all'interno dei casseri nei prospetti delle carpenterie, si è deciso di disegnare gli estremi di questi ultimi con delle piegature a 135° all'interno del getto.
- 17. Tutti i disegni di carpenteria esecutiva che accompagnano i testi di questa pubblicazione vengono presentati come proposte che l'utilizzatore deve controllare in funzione delle reali condizioni di progetto di ogni elemento strutturale.
- 18. L'Autore è cosciente che il testo e le illustrazioni possano presentare qualche imprecisione o qualche refuso, per cui sarà lieto di ricevere correzioni e suggerimenti dai Lettori, affinché si possa migliorare nel futuro questo lavoro.

Abbreviazioni e particolari simboli usati

 M_{Rd}

Nel presente lavoro, oltre ai normali simboli previsti dalle norme UNI, vengono frequentemente usati – soprattutto nello svolgimento degli esempi proposti – i seguenti simboli e abbreviazioni:

A (in grassetto)	generico vettore il cui scalare è A
b	larghezza sezione resistente rettangolare
b_m	larghezza minima sezione resistente
c	ricoprimento armature più esterne (staffe per travi e pilastri)
CDM	classe di duttilità media (secondo E.C.8)
CDH	classe di duttilità alta (secondo E.C.8)
CS	coefficiente di sicurezza allo stato limite ultimo
cotg ()	funzione cotangente di un angolo ()
E_f	modulo di elasticità dell'acciaio (considerato $2, 1 \cdot 10^6 \ daN/cm^2$)
exp ()	numero $e = 2,718281828$ elevato al numero ()
ξ	valore asse neutro adimensionale per sezione rettangolare
φοØ	diametro delle barre d'armatura (in mm)
ϕ_{state}	diametro barre delle staffe
ϕ_{long} o \emptyset_{long}	diametro barre longitudinali
$ \begin{array}{c} \emptyset_{stafe} \\ \emptyset_{long} \\ F' \\ F'_{f} \\ Y' \equiv \gamma_{sup} \\ \gamma'' \equiv \gamma_{inf} \end{array} $	area armature in zona compressa (in cm^2)
$F_f^{'}$	area armature in zona tesa (in cm^2)
$\gamma' \equiv \gamma_{sup}$	valore del rapporto h'/h relativo alle armature F'_f
$\gamma'' \equiv \gamma_{inf}$	valore del rapporto relativo alle armature F_f
8	giorno
88	giorni
H	altezza complessiva della sezione rettangolare (o ad essa riconducibile)
h'	distanza baricentro armature superiori F'_f dai casseri (sez. rettangolare)
h''	distanza baricentro armature inferiori F_f 'dai casseri (sez. rettangolare)
h	altezza utile sezione resistente (sezione rettangolare): $h = H - h''$
M_{Sd}	momento flettente di progetto (o di calcolo)
m_{Sd}	valore di M_{Sd} adimensionale
17	. (1

momento flettente resistente ultimo

XXII

valore di M_{Rd} adimensionale m_{Rd}

forza normale di progetto (o di calcolo) N_{Sd}

valore di N_{sd} adimensionale n_{Sd} N_{Rd}^{Sa} forza normale resistente ultima valore di N_{Rd} adimensionale n_{Rd} sec (oppure s) unità di tempo: secondo funzione seno di un angolo (...) *sen*(...) o sin(...)

stato limite di esercizio SLESLDstato limite di danno SLUstato limite ultimo

incognita temporale: $\tau \in [t_0; t]$ (solo al paragrafo 6.8) τ

sforzo tangenziale di aderenza

momento torcente di progetto (o di calcolo)

 $egin{array}{l} au_{ad} \ T_{Sd} \ T_{Rd} \end{array}$ momento torcente resistente ultimo

tonn o t tonnellata (unità di misura della massa gravitazionale)

tan(...) o tg(...) funzione tangente di un angolo (...)

 V_{Sd} taglio ultimo (o di calcolo) V_{Rd}^{Sd} taglio resistente ultimo operatore di moltiplicazione

segno di approssimazione nei risultati delle calcolazioni numeriche

 ∞ segno di proporzionalità. Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

Parte Prima

Proprietà dei materiali

1

Materiali che costituiscono il calcestruzzo armato: considerazioni introduttive

1.1. IL CALCESTRUZZO

Il calcestruzzo è ottenuto miscelando un legante idraulico (calce, cemento, ecc.) con materiali inerti (sabbia, ghiaia, rottami di mattoni, ecc.) e acqua. Il legante, in genere un cemento, in acqua si idrata con formazione di composti in parte colloidali, in parte cristallini; all'idratazione del legante si deve la presa e l'indurimento del calcestruzzo. I materiali inerti hanno la funzione sia di aumentare il volume dell'impasto, e quindi di ridurre il costo del conglomerato, e sia di conferire all'impasto uno scheletro pietroso di notevole resistenza meccanica.

Il calcestruzzo è, quindi, un materiale eterogeneo, le cui caratteristiche dipendono da molti fattori. Tra essi: la quantità del legante (ad esempio, il rapporto acqua/cemento); la quantità e la granulometria degli inerti (ad esempio, la ghiaia).

I requisiti fondamentali richiesti ad un calcestruzzo sono:

- lavorabile, quando ancora fresco;
- resistente, quando indurito.

Il calcestruzzo appena impastato appare come un materiale sciolto, che acquista una forma e una dimensione dopo essere stato gettato e costipato nelle casseforme. Dopo il getto e il costipamento, il calcestruzzo si deve presentare come una massa compatta, senza vuoti o discontinuità. Per ottenere ciò è necessario che esso possieda una certa lavorabilità, termine con il quale si indica appunto l'attitudine di un calcestruzzo ad essere gettato e costipato in massa compatta ed uniforme entro le casseforme. In particolare, il calcestruzzo fresco presenterà una fluidità più o meno marcata in funzione di molti fattori: forma, dimensione e quantità reciproche degli inerti, quantità di cemento, ecc. Ma, a parità di ogni altra condizione, si sottolinea la funzione determinante dell'acqua. Infatti, all'aumentare della quantità di acqua nell'impasto, aumenta la fluidità e in definitiva anche la lavorabilità, e viceversa. Ma si è visto che la quantità di acqua (o meglio, il rapporto acqua/cemento) deve essere il più contenuto possibile poiché questo ha un'influenza importante sulle caratteristiche di resistenza. In definitiva, il calcestruzzo deve avere il minimo di fluidità richiesto dalle condizioni di getto e costipamento.

Dopo il getto e il costipamento nelle casseforme, per effetto del progressivo fenomeno dell'idratazione del cemento, la massa del calcestruzzo indurisce. Dopo un certo periodo di stagionatura, il materiale deve possedere determinati requisiti, il primo dei quali è normalmente la resistenza meccanica. A questo requisito fondamentale a volte si accompagna o si sostituisce qualche altra esigenza, relativa ad esempio all'aspetto estetico e così via.

Elevata resistenza del calcestruzzo significa anche e soprattutto elevata compattezza della sua massa. E un calcestruzzo compatto può essere ottenuto solo con una composizione corretta dei materiali costituenti e con un'accurata esecuzione del getto e costipamento dell'impasto.

1.1.1. I componenti del calcestruzzo

Ghiaia. La ghiaia rappresenta l'inerte avente le più grandi dimensioni all'interno della miscela. Essa è costituita da pietre di grandezza variabile da 5 a 30 mm (per grandi getti si possono trovare anche dimensioni di $50 \div 70$ mm). La ghiaia deve essere scelta in modo da ridurre i vuoti tra i vari elementi che la compongono, ciò fa sì che si riduca anche il volume necessario di malta.

La ghiaia può essere di cava o di fiume, derivare da rocce non friabili e con una resistenza maggiore di quella del calcestruzzo; inoltre, deve essere priva di sostanze polverulente od organiche.

Spesso la ghiaia può essere sostituita dal pietrisco, ottenuto per frantumazione di rocce con le caratteristiche suddette. Infatti, attualmente viene quasi sempre utilizzato questo materiale.

Sabbia. La sabbia può essere di fiume o di cava, di dimensioni variabili da 0,5 a 5 mm. Essa può derivare anche dalla frantumazione della ghiaia o del pietrisco. La sabbia da utilizzare nei calcestruzzi deve essere ben assortita, non proveniente da rocce decomposte o gessose, non lasciare tracce di sporco e non contenere materiale organico.

Cemento. Il cemento è un legante idraulico (cioè fa presa grazie all'aggiunta di acqua). Esso è costituito da calce, silice e allumina. Il cemento comune si ottiene per cottura di calcare ed argilla (cemento artificiale), oppure di marna (cemento naturale), macinando poi il «clinker» risultante dalla cottura. Esistono diversi tipi di cemento; ad esempio:

- il cemento Portland:
- il cemento ad alta resistenza;
- il cemento alluminoso;
- il cemento pozzolanico;
- il cemento d'altoforno

Acqua. L'acqua deve essere limpida, priva di sali (specialmente di magnesio) e di sostanze organiche. L'eccessiva purezza potrebbe però essere dannosa (acque di sorgente), in quanto scioglierebbe la calce.

1.2. LE BARRE D'ARMATURA

Il calcestruzzo armato è una struttura formata da calcestruzzo e barre di ferro; queste ultime hanno essenzialmente il compito di assorbire gli sforzi di trazione, compito che il calcestruzzo, per la sua scarsa resistenza alla trazione, non potrebbe assolvere; spetta, invece, in genere, al calcestruzzo di assorbire gli sforzi di compressione. Le barre di armatura conferiscono inoltre alla struttura proprietà elastiche e statiche che il calcestruzzo da solo non possiede e tali da poter considerare la struttura mista che ne risulta come un corpo a sé con caratteristiche diverse dai singoli corpi componenti. Le barre di armatura per il conglomerato armato ordinario sono di acciaio dolce (lega di ferro e carbonio) con percentuali di carbonio molto basse (circa pari allo 0,2%). Questa proporzione conferisce alla lega una notevole duttilità: grandi deformazioni a rottura.

Il coefficiente di dilatazione termica dell'acciaio è praticamente uguale a quello del calcestruzzo ($\alpha = 0,00001$). In tal modo, è evitata la formazione di tensioni interne per effetto delle variazioni di temperatura: infatti se i due corpi si dilatassero diversamente, le barre d'armatura tenderebbero a scorrere nel calcestruzzo vincendo le tensioni tangenziali di contatto per aderenza e disgregando perciò la struttura.

2 Tipi di cemento

2.1. PRINCIPALI CARATTERISTICHE DELL'IMPASTO E DELLA MACINAZIONE DEI CEMENTI

In generale, i cementi maggiormente utilizzati nell'attività edilizia sono costituiti essenzialmente da materiali calcarei e da allumina e silice sotto forma di argilla e scisti. Possono anche contenere marne, costituite da una mescolanza di materiali calcari e argillosi.

Il processo di produzione consiste nel macinare le materie grezze, miscelarle nelle proporzioni volute e trattarle in un grande forno rotante a circa 1300 ÷ 1400°C; temperature alle quali il materiale sinterizza e fonde parzialmente in piccole masse sferoidali note come clinker. Il clinker viene raffreddato e macinato in polvere sottile con aggiunta di piccole quantità di gesso. Il prodotto risultante è il cemento Portland largamente usato in ogni parte del mondo. Il mescolamento e la macinazione dei materiali grezzi possono essere effettuati sia in acqua che a secco, da cui i nomi dei processi per «via umida» o per «via secca». La scelta del processo dipende dalla natura delle materie prime usate.

Il processo per via umida, adatto soprattutto per crete friabili, viene eseguito disperdendo il materiale in acqua in una vasca circolare con bracci radiali forniti di pale che, con il loro moto di rotazione, rompono gli agglomerati solidi. Anche l'argilla viene trattata in modo analogo. Le due misture vengono miscelate in proporzioni predeterminate e fatte passare attraverso una serie di setacci. Il materiale che ne risulta (poltiglia) viene poi mandato nei serbatoi di raccolta. Se si utilizza il calcare, esso deve essere preventivamente frantumato poi introdotto, con l'argilla dispersa in acqua, in un mulino, dove la macinazione viene completata. Il materiale risultante (poltiglia) viene poi convogliato in serbatoi di raccolta.

La poltiglia è un liquido cremoso con un contenuto di acqua dal 35 al 50%, nel quale solo una piccola parte di materiale (circa il 2%) non passa attraverso un setaccio con maglie da 90 μ m. Il tenore in calce desiderato viene ottenuto dosando le quantità dei materiali calcarei e argillosi come sopra specificato. Un'aggiustamento successivo per ottenere l'esatta composizione voluta viene eseguito rimescolando poltiglie prelevate da serbatoi diversi, ricorrendo a complicati sistemi di serbatoi di miscelamento.

La poltiglia viene poi inviata nel forno rotante consistente in un cilindro in acciaio, rivestito internamente di materiale refrattario, che può raggiungere gli 8 m di diametro con una lunghezza fino a 200 m. Esso ruota lentamente e viene tenuto leggermente inclinato rispetto all'orizzontale. La poltiglia entra dalla parte superiore mentre polverino di carbone, olio combustibile o gas naturale vengono bruciati con aria compressa nella parte inferiore, dove la temperatura raggiunge i $1400 \div 1500$ °C.

La poltiglia, nel suo tragitto verso la parte inferiore del forno, incontra temperature progressivamente crescenti. Inizialmente l'acqua evapora e si libera CO_2 ; successivamente il materiale asciutto subisce una serie di reazioni chimiche finché circa il $20 \div 30\%$ di esso passa allo stato liquido e la calce, la silice e l'allumina si combinano tra loro. Questa massa si agglome-

ra in piccole sfere di diametro da circa 3 a 25 mm, denominate clinker. Il clinker cade nei raffreddatori che permettono il recupero di calore a mezzo dell'aria che viene utilizzata per alimentare la combustione. Un forno di grandi dimensioni può produrre fino a 700 tonnellate di cemento al giorno. La macinazione del clinker avviene in mulini a palle (sfere), dotati di diversi scomparti con palle di acciaio di diametro decrescente. In alcuni impianti viene utilizzato un sistema di macinazione a circuito chiuso che evita l'inconveniente della presenza di alte percentuali di materiale troppo fine o di piccole quantità di materiale troppo grosso. A macinazione avvenuta, il cemento contiene circa $1,1 \cdot 10^{12}/particelle per kg$ ed è pronto per la confezione negli usuali sacchi di carta o per essere trasportato sfuso.

Nel processo per via secca, le materie prime vengono frantumate e introdotte in un mulino, dove vengono asciugate e polverizzate; questa polvere così ottenuta viene chiamata «farina cruda». Tale polvere viene trasportata in un silo di miscelazione dove viene effettuato un aggiustamento della composizione nelle proporzioni richieste per la produzione del cemento. Per ottenere una miscelazione più omogenea viene insufflato dal basso di uno dei quadranti del silo un getto di aria. Ciò fa sì che il materiale dei quadranti non sottoposti al getto d'aria, dotato di densità maggiore, si sposti verso il quadrante arieggiato in cui il materiale, sostenuto dal getto di aria, assume un comportamento fluido. Aereando tutti i quadranti a turno, nel giro di un'ora, è possibile ottenere una miscela perfettamente omogenea.

La farina cruda così miscelata viene inviata in un granulatore insieme a circa il 12% in peso di acqua. Si ottiene così una graniglia costituita da sferette di circa 15 mm di diametro (clinker). Prima di essere immessa nel forno, la graniglia viene consolidata su una griglia di preriscaldamento alimentata da fumi caldi di combustione. Da questo punto in poi il processo è uguale a quello descritto per via umida.

2.1.1. La presa

Con il termine di *«presa»*, si indica il consolidamento dell'impasto fresco, cioè il passaggio della pasta dallo stato fluido a quello rigido. È però necessario distinguere la presa dall' *«indu-rimento»*, che consiste nell'acquisizione di durezza che avviene successivamente alla presa stessa.

La presa si può attribuire all'idratazione selettiva iniziale di alcuni composti e, particolarmente, del C_3A (alluminato tricalcico $3\text{CaO} \bullet \text{Al}_2\text{O}_3$) e del C_3S (silicato tricalcico $3\text{CaO} \bullet \text{SiO}_2$). Il C_3A ha la proprietà di far presa istantaneamente ma, vista l'azione ritardante del gesso su di esso, l'influenza del C_3S diventa di primaria importanza. Infatti il C_3S puro ha tempi di presa iniziale molto simili a quelli del cemento, mentre il C_2S (silicato bicalcico $2\text{CaO} \bullet \text{SiO}_2$) si consolida in modo molto più graduale.

Se il cemento è opportunamente ritardato, la struttura del cemento idrato è determinata dai silicati di calcio, mentre se il C_3A si idrata per primo – in assenza di ritardante – si forma un alluminato di calcio idrato alquanto poroso. La successiva idratazione dei silicati avviene nell'ambito della matrice di alluminati porosi, creando un sistema eterogeneo con possibili conseguenze sulla resistenza finale.

Il processo di presa è accompagnato da effetti termici che comportano variazioni nella temperatura dell'impasto. Infatti, all'inizio della presa si può riscontrare un rapido aumento della temperatura, mentre alla fine della presa stessa si verifica un picco nei valori della temperatura. In corrispondenza di questo picco, si riscontra una brusca caduta della conducibilità elettrica, tanto che si possono utilizzare misure conduttometriche per determinare i tempi di presa. I tempi di presa sono, infatti, influenzati dalla temperatura, essi sono più brevi per temperature crescenti fino a circa $30^{\circ}C$, mentre, temperature superiori ai $30^{\circ}C$ causano un'inversione di tendenza dei tempi di presa.

2.1.2. Falsa presa

Con il termine di *«falsa presa»*, si indica una presa prematura del cemento, che può avvenire nel giro di qualche minuto dopo l'aggiunta di acqua. Diversamente dalla presa rapida sopra descritta, essa non presenta sviluppo di calore e semplicemente rimescolando meccanicamente l'impasto si ristabilisce la plasticità originaria, fino a che non avviene la presa normale, senza conseguenze per il successivo indurimento.

Una delle cause della falsa presa può essere la disidratazione del gesso, quando questo venga macinato con clinker a temperature troppo elevate. In questo caso, si può formare gesso emi-idrato $(CaSO_4 \circ 1/2H_2O)$ o anidrite $(CaSO_4)$, capaci di reidratarsi ed indurire rapidamente quando vengono messi a contatto con acqua.

Un'altra causa può essere attribuita agli alcali, i quali, durante il magazzinaggio del cemento, possono reagire con anidride carbonica per formare carbonati, che reagendo poi con il $Ca(OH)_2$, prodotto per idrolisi dei silicati, portano alla precipitazione del carbonato di calcio $(CaCO_3)$ che crea un irrigidimento della pasta.

Generalmente, le prove di laboratorio eseguite nei cementifici dovrebbero assicurare l'assenza di falsa presa nei cementi commerciali. Ma, se questa dovesse avvenire, si può ovviare al problema con un semplice rimescolamento della massa, anche se ciò non sempre è di facile esecuzione.

2.1.3. Finezza di macinazione

La macinazione del clinker è uno dei processi finali nella produzione del cemento. Poiché l'idratazione inizia sulla superficie dei granuli, è naturale che la superficie totale del cemento rappresenti la parte attiva nella reazione con acqua. D'altronde, la superficie totale dipende dalla finezza con cui il cemento è macinato ed è quindi evidente che vi sia una relazione fra la finezza e la velocità di indurimento (figura 2.1).

Comunque i costi di macinazione non sono trascurabili, e quanto maggiore è la finezza, tanto maggiore è la velocità di deterioramento per esposizione all'atmosfera. Una maggiore finezza, inoltre, aumenta l'effetto della reazione fra alcali ed inerti e rende l'impasto, anche se non il calcestruzzo, più sensibile al ritiro idraulico e alle screpolature. Al contrario, viene diminuita la tendenza alla segregazione. Una maggiore finezza, inoltre, aumenta il fabbisogno di gesso a causa della maggiore disponibilità di C_3A nella fase iniziale dell'idratazione.

In un impasto di consistenza standard, la quantità di acqua aumenta al diminuire del diame-

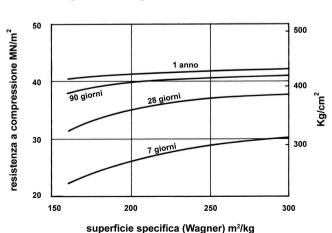


Figura 2.1
Relazione tra finezza
di macinazione
e resistenza a compressione
del cemento in funzione
delle differenti stagionature

tro dei granuli, mentre, al contrario, aumenta leggermente la lavorabilità di un calcestruzzo. Questa caratteristica può essere causata dalle prove di consistenza e di lavorabilità che misurano grandezze fisiche diverse nell'impasto fresco, oppure da un'accidentale ritenzione di aria, la cui quantità può variare in funzione della finezza di macinazione del cemento anidro. È dunque importante che il grado di finezza delle particelle di cemento sia attentamente controllato. A questo scopo, in Italia il D.M. del 3 giugno 1968 limita al 2% il residuo non passante da un setaccio le cui maglie abbiano un'apertura di 0,18 mm (0,18 U.N.I. 2331), e stabilisce le varie modalità di prova. La prova della vagliatura non fornisce informazioni sulla finezza della frazione passante dal setaccio, mentre sono proprio le particelle più piccole che interessano ai fini del processo di idratazione. Infatti, sono stati fatti tentativi usando reti più sottili, ad esempio di 0,053 mm, ma non sono stati riscontrati risultati soddisfacenti, perché esse tendono ad ostruirsi. Per questo motivo, varie norme prescrivono, come indice della finezza di macinazione, la determinazione dell'area superficiale specifica espressa in unità di superficie/unità di peso, normalmente in cm²/g. Un metodo diretto consiste nel misurare la distribuzione del diametro delle particelle per sedimentazione e per elutriazione, metodi basati entrambi sulla dipendenza dal diametro delle particelle della velocità di caduta libera per gravità in un mezzo fluido rispettivamente liquido e gassoso (legge di Stokes). Naturalmente il mezzo fluido deve essere chimicamente inerte rispetto al cemento ed è opportuna una buona dispersione iniziale al fine di evitare una parziale flocculazione delle particelle, che produrrebbe un'apparente diminuzione di area superficiale.

Su questa base è stato sviluppato, negli Stati Uniti, il metodo turbidimetrico di *Wagner* (A.S.T.M. Standard C 115-70), in cui la concentrazione di particelle ad una determinata altezza di una sospensione in cherosene viene determinata dall'intensità di un fascio di luce trasmessa, rilevata con una fotocellula. I risultati sono generalmente attendibili, salvo un errore risultante dal presupporre che tutte le particelle al di sotto di $7.5\mu m$ abbiano uguale diametro. Questo errore può divenire significativo per i cementi attualmente usati, in cui questa frazione è di primaria importanza. Sono stati perciò proposti alcuni miglioramenti del metodo prendendo in considerazione la concentrazione di particelle fino a $5\mu m$ e modificando i calcoli relativi. Una tipica curva di distribuzione granulometrica è riportata nella figura 2.2, che mostra anche il corrispondente contributo delle singole frazioni all'area totale del campione. La curva di distribuzione di un cemento dipende dalle modalità di macinazione ed è diversa per diversi stabilimenti di produzione.

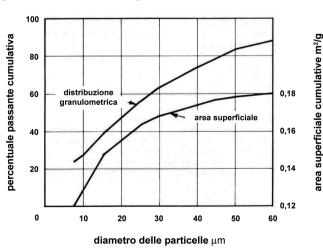


Figura 2.2
Tipica curva di distribuzione
dei diametri delle particelle
e corrispondente contributo
cumulativo all'area superficiale

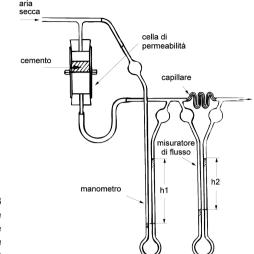


Figura 2.3 Schematizzazione dell'apparecchio di Lea e Nurse impiegato per effettuare misure di permeabilità

In ogni caso, non esiste un criterio preciso per definire una «buona» macinazione, né è stato stabilito se sia meglio che tutte le particelle abbiano la stessa misura o siano distrivuite in modo tale da permettere la massima compattezza.

Tra i vari metodi è interessante osservare quello proposto da *Lea* e *Nurse* descritto nel B.S. 12:1958. Questo metodo si basa sul fatto che, la resistenza opposta a un flusso di aria da una pastiglia di polvere di cemento compressa fino ad avere un determinato volume ed una determinata porosità è proporzionale alla superficie specifica della polvere stessa. Lo schema del dispositivo di *Lea* e *Nurse* è illustrato nella figura 2.3.

Nella cella di permeabilità viene posta una quantità di cemento tale che, una volta compresso per mezzo di un pistone in un volume prefissato, esso abbia una porosità uguale a 0,457. Per porosità si intende il volume degli spazi vuoti rispetto al volume totale. Attraverso il letto di cemento così formato, viene fatto passare un flusso di aria secca a velocità costante. La perdita di carico che il flusso di aria subisce nell'attraversare la pastiglia viene misurata da un manometro collegato tra i due estremi della cella di permeabilità, mentre il flusso totale viene misurato con un flussimetro capillare.

Un'equazione, precedentemente proposta da Carman dà la superficie specifica Sp in cm^2/g , secondo:

$$Sp = \frac{14}{\rho(1-\varepsilon)} \times \sqrt{\frac{\varepsilon^3 A h_1}{KLh_2}}$$

dove:

 ρ = densità del cemento (g/cm³);

 ε = porosità del letto (0,475 nella prova B.S.);

 $A = \text{superficie del letto } (5,066 \text{ cm}^2);$

L = altezza del letto (1 cm);

 h_1 = caduta di pressione attraverso il letto;

 h_2 = caduta di pressione del flussimetro a capillare (vedi figura 2.3);

K =costante del flussimetro.

Per una data porosità e un dato strumento, la formula si semplifica in:

$$Sp = \frac{K_I}{\rho} \times \sqrt{\frac{h_I}{h_2}}$$

dove K_1 è una costante dello strumento impiegato. Una versione modificata del metodo di Lea e Nurse è descritta nello standard A.S.T.M. C 204-68 e nella norma U.N.I. 7374-74. Secondo questa prova, nota con il nome di *Blaine*, un volume noto di aria viene fatto passare attraverso una pastiglia di prova con porosità 0,5. Anziché misurare la caduta di pressione, si misura il tempo t impiegato dal volume di aria per attraversare la pastiglia, e la superficie specifica Sp è data semplicemente da:

$$Sp = K_2 \sqrt{t}$$

dove K_2 è una costante che dipende dalle caratteristiche dello strumento stesso, che viene determinata mediante una taratura con campioni di cemento con superficie a massa volumica noti.

I metodi di Lea e Nurse e quello di Blaine, che coinvolgono tutte le particelle presenti, danno valori in buon accordo tra loro ma sensibilmente più alti di quelli ottenuti col metodo Wagner che risente dell'errore introdotto con l'assunzione che le particelle inferiori a $7.5 \mu m$ siano tutte uguali con un diametro medio di $3.75 \mu m$. I valori sono superiori, in media, di un fattore 1.8 rispetto al metodo Wagner; tra 1.6 e 2.2 a seconda della finezza di macinazione e del tenore in gesso.

Ambedue i metodi hanno comunque una buona rappresentazione delle variazioni relative della finezza del cemento, ciò che in definitiva costituisce il requisito più importante ai fini pratici; il metodo di Wagner dà indicazioni anche sulla distribuzione granulometrica.

Una misura assoluta dell'area superficiale si ottiene con il classico metodo di B.E.T. (Brunauer, Emmet e Teller) basato sull'assorbimento di azoto. Con questo metodo viene misurata anche la porosità interna dei granuli non accessibile al flusso di aria nel metodo a permeabilità, o al fluido di sedimentazione nel metodo turbimetrico. Per questi motivi i valori trovati sono decisamente superiori a quelli ottenuti con altri metodi, come mostra la tabella 2.1.

Tabella 2.1. Superficie specifica del cemento misurata con metodi diversi

Cemento	Superficie specifica m²/kg misurata con		
Cemento	Metodo Wagner	Metodo Lea e Nurse	Metodo B.E.T.
Α	180	260	790
В	230	415	1000

F.M. Lea, The Chemistry of cement and Concrete, London, Arnold, 1970.

Il B.S. 12: 1958 stabilisce che la superficie specifica per il cemento Portland deve essere \geq 225 m^2/kg (metodo di Lea e Nurse) mentre il cemento Portland a rapido indurimento deve essere > 325 m^2/kg . Altre norme stabiliscono 225 m^2/kg come minimo per il cemento d'altoforno (B.S. 146: 1958) e 320 m^2/kg per il cemento a basso calore di idratazione (B.S. 1370: 1958).

Attualmente, però, i cementi Portland commerciali superano normalmente i limiti minimi stabiliti dalle norme. I cementi alluminosi sono generalmente più grossi. Il B.S. 915: 1947 stabilisce un minimo di $225 \, m^2/kg$, sebbene, anche in questo caso, il limite venga generalmente superato.

CARLO SIGMUND

CEMENTO ARMATO

Prontuario delle strutture

TOMO SECONDO



Indice tomo secondo

PARTE TERZA PRONTUARIO DELLE STRUTTURE IN CEMENTO ARMATO

л. к	temani generan sunc unita ur misura		
A.1.	Unità fondamentali sistema di misura internazionale (S.I.)	»	980
A.2.	Unità derivate	»	981
A.3.	Unità supplementari	»	982
A.4.	Multipli e sottomultipli	»	982
A.5.	Unità S.I. comunemente usate – Unità non S.I. ammesse	»	983
A.6.	Conversioni da pendenza (%) in gradi (α°) sessagesimali	»	984
A.7.	Fattori di conversione tra unità di misura	»	984
B. Bı	revi richiami di matematica e fisica		
B.1.	Potenze	»	989
B.2.	Prodotti notevoli	»	989
B.3.	Radicali	»	989
B.4.	Leggi fondamentali della Dinamica	»	989
B.5.	Formule di trigonemetria sui triangoli generici	»	991
B.6.	Funzioni trigonometriche	»	993
B.7.	Superfici di geometrie piane	»	995
B.8.	Volumi e superfici laterali di solidi	»	999
C. Pı	rincipali grandezze che caratterizzano le sezioni piane		
C.1.	Momenti d'inerzia, moduli di resistenza e aree delle principali sezioni piane	»	1002
D. Di	iagrammi delle sollecitazioni per i principali elementi strutturali isostatici e iperstatici		
D.1.	Travi a sbalzo	>>	1008
D.2.	Travi appoggiate	>>	1015
D.3.	Travi appoggiate con sbalzo	»	1026
D.4.	Travi con incastro e appoggio	>>	1032
D.5.	Travi con doppio incastro	»	1036
D.6.	Travi a due campate su tre appoggi	»	1041
D.7.	Travi a due campate con incastri e appoggio intermedio	»	1043
	Travi a tre campate su 4 appoggi		1044
D.9.	Travi a tre campate con incastri e appoggi	»	1046
	. Travi a quattro campate su cinque appoggi		1048
D.11.	Travi con asse inclinato rispetto all'orizzontale	»	1049

D.12. Travi con cedimenti vincolari imposti	>>	1050
D.13. Telai incernierati alla base	>>	1052
D.14. Telai incastrati alla base	>>	1056
D.15. Travi incastrate e telai zoppi	>>	1059
D.16. Telaio zoppo e telaio rettangolare chiuso	>>	1061
D.17. Telai multipli incastrati al piede	»	1066
D.18. Trave continua con piedritti e telai zoppi		1067
D.19. Portale a tre cerniere		1069
D.20. Arco a tre cerniere		1071
D.21. Arco a due cerniere		1073
D.22. Arco incastrato		1074
E. Linee di influenza del taglio e del momento flettente per trave a una campata con appoggio alle estremità	»	1076
F. Coefficienti di ripartizione per trave di riva secondo Courbon	»	1078
G. Tondini per ferri di armatura lenta: diametri, pesi, sezioni	»	1080
H. Caratteristiche reti elettrosaldate a maglia quadrata	»	1081
I. Caratteristiche meccaniche e tecnologiche degli acciai da armatura e relative prescrizioni	»	1082
L. Subsistemi di partizioni orizzontali: i solai	»	1089
M. Tabelle pesi dei materiali	»	1178
N. Spinte del terreno sui muri di sostegno: generalità	,,	1189
	"	1107
N.1. Valori dei coefficienti di spinta statica (attiva e passiva) dei terreni secondo la teoria di Coulomb	»	1213
N.2. Valori dei coefficienti di spinta totale (statica + dinamica) dei terreni secondo la teoria di Mononobe-Okabe	>>	1219
N.3. Valori del coefficiente di spinta "a riposo" secondo la formulazione generalizzata di Kezdi		1241
PARTE QUARTA APPENDICI		
Appendice 1 – Prove particolari sui calcestruzzi		1246
Appendice 2 - Procedimento di taratura della centrale di betonaggio	>>	1247
Appendice 3 – Classificazione dei cementi	>>	1248
Appendice 4 – Principali prescrizioni e metodologie di prova delle materie prime impiegate nel		
calcestruzzo	>>	1251
Appendice 5 – Estratti da UNI EN 1992-1-1: 2005		1259
Appendice 6 – Diagrammi di sollecitazioni flettenti sulle piastre	>>	1263
Appendice 7 – Introduzione all'Eurocodice 8 in zona sismica		1274
Appendice 8 – Estratti da EN1990		1364
Appendice 9 – Note sull'utilizzo delle equazioni parametriche per il progetto delle armature nelle sezioni rettangolari piene (o ad esse riconducibili)		1369
Bibliografia	»	1377

Parte Terza

Prontuario delle strutture in cemento armato

A Richiami generali sulle unità di misura

Nota. Le figure e le formule relative ai richiami generali e ai grafici degli andamenti delle caratteristiche delle sollecitazioni corrispondenti agli schemi strutturali delle strutture isostatiche e iperstatiche sono state rielaborate graficamente e opportunamente riadattate dal testo: "*Prontuario per il calcolo degli elementi strutturali*" di B. Furiozzi, C. Messina e L. Paolini. Maggiori dettagli in bibliografia.

A.1. Unità fondamentali sistema di misura internazionale (s.i.)

Grandezza	Nome	Simbolo	Definizione
lunghezza	metro	m	Lunghezza uguale a 1.650.73,73 lunghezze di onda, nel vuoto, della radiazione corrispondente alla transizione tra i livelli 2p ¹⁰ e 5d ⁵ dell'atomo di cripto 86.
massa	kilogrammo	kg	Massa del prototipo internazionale conservato al Papillon de Breteuil (Sèvres).
tempo	secondo	s	Intervallo di tempo che contiene 9.192.631.770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133.
corrente elettrica	ampere	А	Intensità di corrente elettrica che, mantenuta costante in due conduttori rettilinei, paralleli, di lunghezza infinita, di sezione circolare trascurabile e posti alla distanza di 1 metro l'uno dall'altro nel vuoto, produce tra i conduttori la forza di 2x10 ⁻⁷ N su ogni metro di lunghezza.
temperatura termodinamica	kelvin	К	1
Nell'uso normale il gequivalente: la differenza –273,15°C.			Frazione $\frac{1}{273,16}$ della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua.
intensità luminosa	candela	cd	La candela è l'intensità luminosa, in una determinata direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza 540x10 ¹² hertz la cui intensità energetica in tale direzione è 1/683 watt allo steradiante.
quantità di sostanza	mole	mol	Quantità di sostanza di un sistema che contiene tante entità elementari quanti sono gli atomi in 0,012 kg di carbonio 12. Le entità elementari devono essere specificate e possono essere atomi, molecole, ioni, elettroni, ecc., ovvero gruppi specificati di tali particelle.

A.2. Unità derivate

Grandezza	Nome	Simbolo	Definizione e relazione con le unità S.I. fondamentali supplementari o derivate
frequenza	hertz	Hz	Frequenza di un fenomeno periodico il cui periodo è 1 s. 1 Hz= 1 s ⁻¹
forza	newton	N	Forza che imprime a un corpo con massa di 1 kg l'accelerazione di 1m/s². 1 N = 1 kg m/s².
pressione tensione	pascal	Pa	Pressione esercitata dalla forza di 1 N applicata perpendicolarmente ad una superficie con area di 1 m². 1 Pa = 1 N/m².
lavoro energia quantità di	joule	J	Lavoro compiuto dalla forza di 1 N quando il suo punto di applicazione si sposta di 1 m nella direzione e nel verso della forza stessa.
calore			1J = 1 N m
potenza	watt	w	Potenza di un sistema che produce il lavoro di 1 J in 1 s. 1 W =1 J/s
carica elettrica	coulomb	С	Carica elettrica che attraversa in 1 s una sezione di un conduttore percorso dalla corrente elettrica costante di 1 A. 1 C = 1 A s.
potenziale elettrico differenza di potenziale elettrico tensione elettrica forza elettromotrice	volt	v	Differenza di potenziale elettrico che esiste tra due sezioni di un conduttore che, percorso dalla corrente elettrica costante di 1 A e senza essere sede di altri fenomeni energetici oltre a quello Joule, dissipa nel tratto compreso tra le due sezioni considerate la potenza di 1 W. 1 V = 1W/A.
capacità elettrica	farad	F	Capacità elettrica di un condensatore nel quale la differenza di potenziale elettrico tra le due armature varia di 1 V quando la carica elettrica di 1 C si trasferisce da un'armatura all'altra. 1 F = 1 C/V
resistenza elettrica	ohm	Ω	Resistenza elettrica tra due sezioni di un conduttore che, percorso dalla corrente elettrica di 1 A e senza essere sede di alcuna forza elettromotrice, dà luogo tra le due sezioni considerate alla differenza di potenziale di 1 V. 1 Ω = 1 V/A
flusso luminoso	lumen	lm	Flusso luminoso emesso da una sorgente

982

segue

			puntiforme isotropa di intensità luminosa di un cd nell'angolo solido di 1 sr, avente il vertice nella sorgente stessa. 1 lm = 1 cd sr
illuminamento	lux	lx	Illuminamento di una superficie sulla quale il flusso luminoso di 1 lm, incidente perpendicolarmente, si ripartisce in modo uniforme sull'area di 1 m². 1 lx = 1 lm/m²

A.3. Unità supplementari

Grandezza	Nome	Simbolo	Definizione e relazione con le unità S.I. fondamentali supplementari o derivate		
angolo piano	radiante	rad	Angolo piano al centro che su una circonferenza intercetta un arco di lunghezza uguale a quella de raggio.		
angolo steradiante sr		sr	Angolo solido al centro che su una sfera intercetta una calotta di area uguale a quella del quadrato il cui lato ha la lunghezza del raggio.		

A.4. MULTIPLI E SOTTOMULTIPLI

	pro	efisso		Fattore di moltiplicazione			
	nome	simbolo		Fattore di moltiplicazione			
	exa	E	10 ¹⁸	1 000 000 000 000 000 000			
	peta	Р	10 ¹⁵	1 000 000 000 000 000			
<u>=</u>	tera	Т	1000 000 000 000				
multipli	giga	G	10 ⁹	1 000 000 000			
<u> </u>	mega	M	10 ⁶	1 000 000			
=	kilo	k	10 ³	1 000			
	etto	h	10 ²	100			
	deca	da	10 ⁰	10			

	deci	d	10-1	0,1
=	centi	С	10 ⁻²	0,01
ultipli	milli	m	10 ⁻³	0,001
፮	micro	μ	10 ⁻⁶	0,000 001
o ii	nano	n	10 ⁻⁹	0, 000 000 001
sottor	pico	р	10 ⁻¹²	0, 000 000 000 001
Ň	femto	f	10 ⁻¹⁵	0, 000 000 000 000 001
	atto	а	10 ⁻¹⁸	0, 000 000 000 000 000 001

A.5. Unità s.i. comunemente usate – unità non s.i. ammesse

Grandezza	Unità S.I.	Unità no	on S.I. ammesse
Area	m ²	ettaro, ha,	
(metro quadrato)	""	ara, a	(1a = 100 m ²)
Volume	m ³	litro 1L=1 dm ³ =1/	1000 m ³
(metro cubo)	""	IIIIO TE-T GIII - I7	1000 111
Momento di inerzia	m⁴		
(metro alla quarta)			
Modulo di resistenza	m ³		
(metro al cubo)			
Velocità	m/s	km/ora	1 km/h=1/3,6 m/s
(metro al secondo)			
Accelerazione	m/s ²		
(metro al secondo per secondo)			
Massa	kg	tonnellata, t	1 t = 1Mg = 1000 kg
(kilo)		,	
Massa volumica	kg/m ³	t/m ³	
(kilo a metro cubo) Portata in volume			
	m³/s	l/s	(litri al secondo)
(metro cubo al secondo) Forza peso			
(newton)	N		
Momento di una forza			
(newton per metro)	N m		
Pressione, tensione			
(pascal)	Pa	bar (*)	(1 bar = 100 000 Pa)
(newton a metro quadro)	N/m ²	mbar (millibar)	(1 mbar = 100 Pa)
Resilienza	2		
(Joule a metro quadro)	J/m ²		
Potenza			
(Watt)	W		
Coefficiente di dilatazione lineare	16-1		
(gradi alla meno uno)	K ⁻¹		

Grandezza	Unità S.I.	Unità non S.I. ammesse
Quantità di calore		
Energia libera	J	
(Joule)		
Intensità luminosa	cd	
(candela)	Cu	
Flusso luminoso	lm	
(lumen)	1111	
Quantità di luce	lm·s	
(lumen per secondo)	111175	
Illuminamento	lx	
(lux)	12	

A.6. Conversioni da pendenza (%) in gradi (α°) sessagesimali

Pendenza (%)	Angolo	Pendenza (%)	Angolo	Pendenza (%)	Angolo	Pendenza (%)	Angolo	Pendenza (%)	Angolo
1	0,5729	11	6,2773	21	11,8598	31	17,2234	41	22,2936
2	1,1458	12	6,8428	22	12,4074	32	17,7447	42	22,7824
3	1,7184	13	7,4069	23	12,9528	33	18,2629	43	23,2677
4	2,2906	14	7,9696	24	13,4957	34	18,7780	44	23,7495
5	2,8624	15	8,5308	25	14,0362	35	19,2900	45	24,2277
6	3,4336	16	9,0903	26	14,5742	36	19,7989	46	24,7024
7	4,0042	17	9,6480	27	15,1096	37	20,3045	47	25,1735
8	4,5739	18	10,2040	28	15,6422	38	20,8068	48	25,6410
9	5,1428	19	10,7580	29	16,1722	39	21,3058	49	26,1049
10	5,7106	20	11,3099	30	16,6992	40	21,8014	50	26,5651

A.7. FATTORI DI CONVERSIONE TRA UNITÀ DI MISURA

Moltiplicare	per	per avere
(sessagesimali)	1/57,29	Rad
atm (atmosfere)	760,00 10.333 101.325 1,013 101.325	Mm di Hg kg/m ² N/m ² Bar Pa
bar (bar)	100.000 10.197 100.000 0,987 75,000 1,02	N/m ² kg/m ² Pa atm cm di Hg kg/cm ²
Btu (British Thermal Units)	0,252 107,5 2,928 x 10 ⁻⁴ 3,927 x 10 ⁻⁴ 1055	kcal kg m kWh Hph J
Btu/min (British Thermal Units/minuto)	1,792 0,02356 0,01757	kg m/sec HP kW
kcal (calorie)	3,968 426,9 1,5584 x 10 ⁻³ 1,5805 x 10 ⁻³ 1,1625 x 10 ⁻² 4186,8	Btu kg m Hph Cvh kWh J
kcal/min (calorie/minuto)	7,11 93,51 x 10 ⁻³	kg m/sec HP

continua

segue

•		
	94,84 x 10 ⁻³	CV
	69,78 x 10 ⁻³	kW
	0,1185	kg m/sec
kcal/h	1,5585 x 10 ⁻³	HP
(calorie/ora)	1,5806 x 10 ⁻³	CV
	1,163 x 10 ⁻³	kW
kcal/kg °K	4.19	KJ/g °K
(calore specifico)	4,19	KJ/g K
Kcal/m² h °K		
(coefficiente di	1,16	W/m² °K
trasmissione)		
Kcal/m h °K		
(conducibilità	1,16	W/m °K
termica)		
cv	75,00	Kg m/sec
(Cavalli)	0,7355	kW
(Gavaiii)	0,986	HP
cm	0,0328	Ft
(centimetri)	0,3937	in
dyn	0,00102	g
(dine)	·	9
ft	30.84	cm
(feet)	12	in
ft/min	0,5080	cm/sec
(feet/minute)	0,01829	km/h
	000 7	
g	980,7	Dyn
(grammi)	9,807 x 10 ⁻³	N
(3:,	2,205 x 10 ⁻³	lb
		p.p.m.
g/l	1000	(parti per
(grammi/litri)	1000	milione)
	76.04	kg m/sec
HP	0,7457	kW
(Horse Power)	1,014	CV
	1,017	

Moltiplicare	per	per avere
in (inches)	2,540	cm
in Hg	0,03342	atm
(inches of mercury)	345,3	kg/m²
in H₂O (inches of water)	24,58 x 10 ⁻⁴ 25,40	atm kg/m²
J	23,884 x 10 ⁻⁵ 9,480 x 10 ⁻⁴	kcal Btu
(joule)	0,10167	kg m
	10'	erg

continua

segue		
	2,778 x 10 ⁻⁷	kWh
	1	N m
	1	W sec
_	2,205	lb
kg	9,80665 ≈ 10	N.
(kilogrammi)	10 ⁻²	kN
	7,23	ft lb
lea mo	'	
kg m	9,806	J
(kilogrammetri)	2,342 x 10 ⁻³	Kcal
	9,294 x 10 ⁻²	Btu
Kg/cm ²	0,981	Bar
(kilogrammi/centimetri	0,098 ≈ 0,1	N/mm ²
quadro)	98,068	mPa
km		mim
	0,5396	(miglio
(kilometri)		marino)
Km/h	0,2778	m/sec
(kilometri/ora)	0,9113	ft/sec
	101,97	kg m/sec
	859,84	kcal/h
kW	1,341	HP
(kilowatt)	1,359	CV
(Kilowatt)	56,86	Btu/min
	1000	J/sec
	3,60 x 10 ⁶	J
	3,671 x 10 ⁵	
L-NA/Is		kg m
kWh	859,84	kcal
(kilowattora)	3412,14	Btu
	1,341	HPh
	1,359	CVh
	35,31 x 10 ⁻³	cu ft
(litri)	0,2642	gal
l/sec	3,60	mc/h
(litri/secondo)	ŕ	
lb	0,4536	Kg
(pounds)	4,4482	Ν
lb/cu ft	40.0405	1 /3
(pounds/cubic foot)	16,0185	kg/m³
lb/cu in	07.00	. , 3
(pounds/cubic inch)	27,68	g/m³
,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,		
	0,06804	atm
lb/sq in ovvero psi	703.07	kg/m ²
(pounds/square inch)	6894,76	N/m ²
	0004,70	13//11
	3.281	ft
m m	39,37	in
(metri)	1,094	
	,	yd
mc/h	6341	gal/day

continua

segue

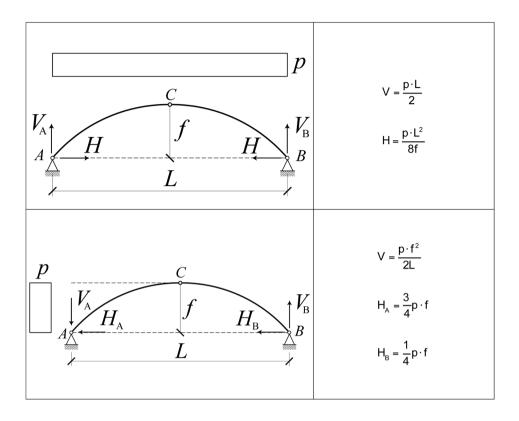
m/sec	3,6	km/h
(metri/secondi)	196,8	ft/min
mm H₂O	9,80665	Pa
(millimetro acqua)	10 ⁻⁴	kg/cm ²
	133,322	Pa
mm Hg	1,359 x 10 ⁻³	Kg/cm ²
(millimetro mercurio)	1,334 x 10 ⁻³	bar
	1,316 x 10 ⁻³	atm
N	0,101972	kg
(Newton)	10 ⁵	dyn
N/mm ²	10,2041	kg/cm ²
Nm	1	J
(Newtonmetro)	0,101972	kg m
	0,06804	atm
	703,07	kg/m ²
psi	6894,76	N/m ²
(pounds/square inch)	703 x 10 ⁻⁴	kg/cm
	698,6 x 10 ⁻⁴	bar
	6894,4	Pa
	1	N/m ²
Pa	9,869 x 10 ⁻⁶	atm
(Pascal)	10,197 x 10 ⁻⁶	kg/ cm ²
(i docui)	75,01 x 10 ⁻⁴	mm Hg
	10,004 x 10 ⁻⁴	bar
Rad (radianti)	57,29	(sessagesimali)

Moltiplicare	per	per avere		
sq ft (square feet)	929,03	cm ²		
sq in (square inches)	6,4516	cm ²		
4	2205	lb		
(tonnellate)	1,102	tons s.		
(tormenate)	0,984	tons I.		
tons s.	2000	lb		
(tons short)	907,185	kg		
tons I.	2240	lb		
(tons long)	1016,05	kg		
tons s./sq in (tons short/square inch)	1,106	kg/mm²		

continua

segue

tons I./sq in (tons long/square inch)	1,575	kg/mm²		
Torr (Torricelli)	133,322 1,316 x 10 ⁻³ 1,359 x 10 ⁻³	Pa atm kg/cm²		
W sec (Watt x secondo)	1 0,10197 1	J kg m N m		
yd (yards)	91,44 3 36	cm ft in		



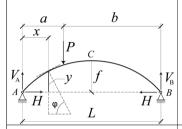
D.21. ARCO A DUE CERNIERE

Le formule contrassegnate con asterisco (*) sono valide per arco a forma parabolica con:

$$y = \frac{4f \cdot x \cdot (i - x)}{L^2} \qquad J_x = \frac{J_0}{sen\varphi}$$

 J_0 = momento di inersia in chiave $\alpha = \frac{a}{L}$ $\beta = \frac{b}{L}$

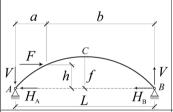
Per gli archi ribassati tale ipotesi coincide praticamente con quella della sezione cos tan te.



$$V_{A} = P \cdot \beta; \qquad V_{B} = P \cdot \alpha; \qquad H = \frac{5}{8} \frac{P \cdot L}{f} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \left(1 + \alpha \cdot \beta\right) \quad \left(*\right)$$

$$M_{C} = \frac{P \cdot a}{2} - H \cdot f \quad \left(per: \quad a \le \frac{L}{2}\right)$$

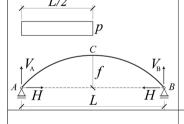
$$M_{C} = \frac{P \cdot b}{2} - H \cdot f \quad \left(per: \quad a > \frac{L}{2}\right)$$



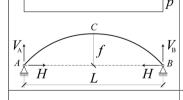
$$V = \frac{F \cdot h}{L}$$

$$H_{A} = \frac{F}{2} \cdot \beta \cdot \left(2 - 3\alpha + 2\alpha^{2} + 12\alpha^{3} - 8\alpha^{4}\right) \quad (*)$$

$$H_{B} = F - H_{A}; \qquad M_{C} = \frac{F \cdot h}{2} - H_{B} \cdot f$$



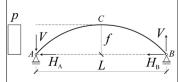
$$\begin{split} V_{A} &= \frac{3}{8} p \cdot I & V_{B} &= \frac{1}{8} p \cdot I \\ H &= \frac{p \cdot L^{2}}{16 \, f} & \left(* \right) : & M_{C} &= \frac{p \cdot L^{2}}{16} & \left(* \right) \end{split}$$



$$V = \frac{p \cdot L^{2}}{2}$$

$$H = \frac{p \cdot L^{2}}{8f} \quad (*)$$

$$M_{c} = 0 \quad (*)$$



$$V = \frac{p \cdot 1}{2L}$$

$$H_{A} = \frac{5}{7} p \cdot f \quad (*); \qquad H_{B} = \frac{2}{7} p \cdot f \quad (*)$$

$$M_{C} = -\frac{1}{28} p \cdot f^{2} \quad (*)$$

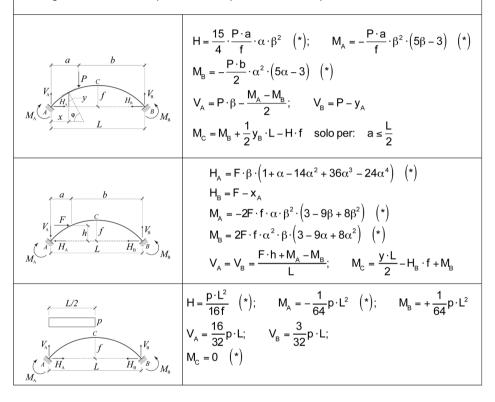
D.22. ARCO INCASTRATO

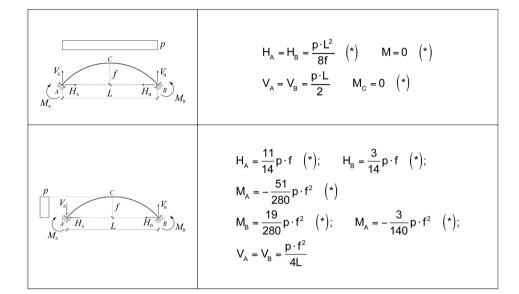
Le formule contrassegnate con asterisco (*) sono valide per arco a forma parabolica con:

$$y = \frac{4f \cdot x \cdot (L - x)}{L^2}$$
 $J_x = \frac{J_0}{sen\varphi}$

 J_0 = momento di inersia in chiave $\alpha = \frac{a}{L}$ $\beta = \frac{b}{L}$

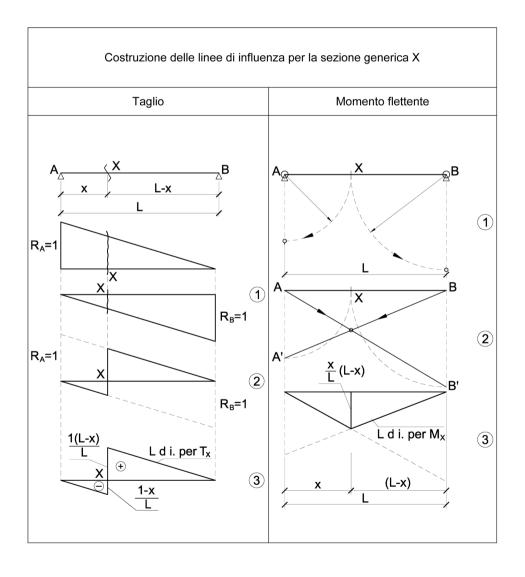
Per gli archi ribassati tale ipotesi coincide praticamente con quella della sezione costante.

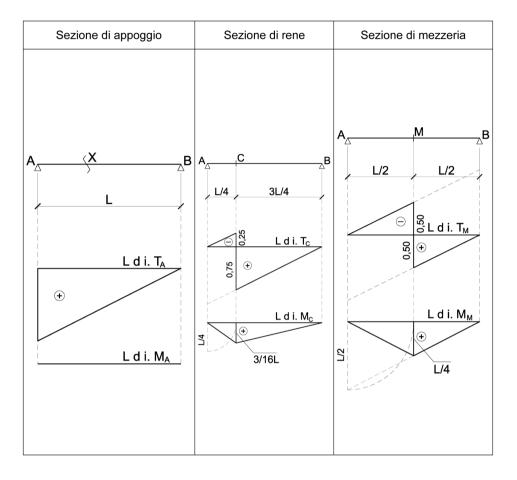




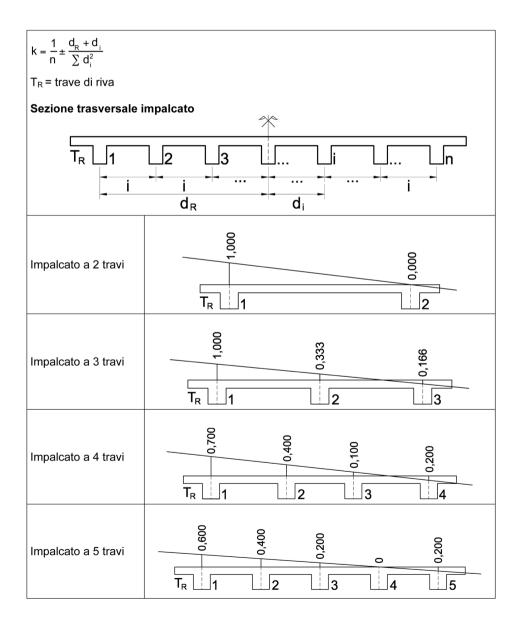
E

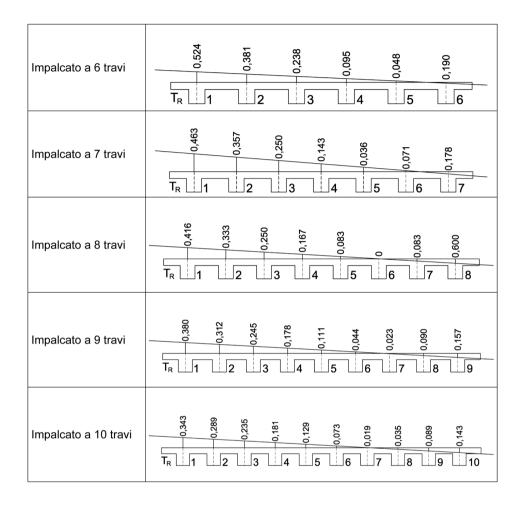
Linee di influenza del taglio e del momento flettente per trave a una campata con appoggio alle estremità





Coefficienti di ripartizione per trave di riva secondo Courbon





G

Tondini per ferri di armatura lenta: diametri, pesi, sezioni

Tabella con diametri in centimetri (diametri più frequenti)

Diametro	Peso		Numero dei tondi e corrispondente sezione in cm ²								
in mm	N/m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	0,98	0,13	0,25	0,38	0,50	0,63	0,75	0,88	1,00	1,13	1,26
6	2,21	0,28	0,57	0,85	1,13	1,41	1,70	1,98	2,26	2,54	2,83
8	3,92	0,50	1,01	1,51	2,01	2,51	3,02	3,52	4,02	4,52	5,03
10	6,13	0,79	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,50	6,28	7,07	7,85
12	8,82	1,13	2,26	3,39	4,52	5,66	6,79	7,91	9,05	10,18	11,31
14	12,01	1,54	3,08	4,62	6,16	7,70	9,24	10,78	12,32	13,85	15,39
16	15,68	2,01	4,02	6,03	8,04	10,05	12,06	14,07	16,08	18,10	20,11
18	19,85	2,54	5,09	7,63	10,18	12,72	15,27	17,81	20,36	22,90	25,45
20	24,50	3,14	6,28	9,42	12,57	15,71	18,85	21,99	25,13	28,27	31,42
22	29,65	3,80	7,60	11,40	15,21	19,01	22,81	26,61	30,41	34,21	38,01
24	35,29	4,52	9,05	13,57	18,10	22,62	27,14	31,67	36,19	40,72	45,24
26	41,41	5,30	10,62	15,93	21,24	26,55	31,86	37,17	42,47	47,78	53,09
28	48,03	6,16	12,32	18,47	24,63	30,79	36,95	43,10	49,26	55,42	61,58
30	55,14	7,07	14,14	21,21	28,27	35,34	42,41	49,48	56,55	63,62	70,69

Nota: per esprimere l'area in termini di m^2 basta moltiplicare i valori letti in tabella per il fattore 10^{-4} m²/cm².

Tabella ^(*) con diametri in pollici (inches): $0,155006$ square inch = 1 cm^2														
φ.	φ φ Peso NUMERO DEI TONDINI E SEZIONI													
Ψ [Pollici]	[mm]	[kg/ml]	1		:	2	;	3	4	ļ		5		6
[[]		sq. in	cm ²										
2/16	3,17	0,06	0,012	0,08	0,024	0,16	0,366	0,24	0,049	0,32	0,061	0,40	0,073	0,47
3/16	4,76	0,14	0,028	0,18	0,055	0,36	0,083	0,53	0,110	0,71	0,138	0,89	0,166	1,07
1/4	6,35	0,25	0,0491	0,32	0,098	0,63	0,147	0,95	0,196	1,27	0,245	1,59	0,295	1,90
5/16	7,94	0,40	0,077	0,50	0,153	0,99	0,230	1,49	0,307	1,98	0,384	2,48	0,460	2,97
3/8	9,52	0,56	0,110	0,71	0,221	1,42	0,331	2,14	0,441	2,85	0,552	3,56	0,662	4,27
7/16	11,11	0,756	0,150	0,97	0,300	1,94	0,450	2,91	0,600	3,88	0,751	4,85	0,901	5,81
1/2	12,70	0,99	0,196	1,27	0,393	2,53	0,589	3,80	0,786	5,07	0,982	6,34	1,178	7,60
9/16	14,29	1,25	0,249	1,60	0,497	3,21	0,746	4,81	0,994	6,42	1,243	8,02	1,492	9,62
5/8	15,67	1,54	0,307	1,98	0,614	3,96	0,921	5,94	1,228	7,92	1,535	9,90	1,841	11,88
3/4	19,05	2,23	0,443	2,86	0,887	5,72	1,330	8,56	1,773	11,44	2,217	14,31	2,660	17,16
7/8	22,23	3,02	0,600	3,87	1,200	7,74	1,800	11,61	2,399	15,48	3,000	19,35	3,600	23,22
1"	25,40	3,95	0,785	5,07	1,571	10,13	2,356	15,20	3,142	20,27	3,927	25,34	4,712	30,40
1" 1/8	28,57	5,00	0,995	6,42	1,990	12,84	2,985	19,26	3,980	25,68	4,976	32,10	5,971	38,52
1" 1/4	31,75	6,19	1,231	7,94	2,461	15,88	3,692	23,82	4,922	31,76	6,154	39,70	7,384	47,64
1" 3/8	34,96	7,47	1,485	9,58	2,970	19,16	4,455	28,74	5,940	38,32	7,425	47,90	8,909	57,48
1" 1/2	38,10	8,89	1,767	11,40	3,534	22,80	5,301	34,20	7,068	45,60	9,835	57,00	10,602	68,40
1" 5/8	41,27	10,44	2,075	13,39	4,151	26,78	6,226	40,17	8,302	53,55	10,377	66,95	12,452	80,34
1" 3/4	44,45	12,13	2,410	15,55	4,820	31,10	7,231	46,65	9,641	62,20	12,051	77,75	14,461	93,30
1" 7/8	47,62	13,88	2,759	17,80	5,518	35,60	8,277	53,40	11,036	71,20	13,795	89,00	16,554	106,80
2"	50,80	15,80	3,140	20,26	6,281	40,52	9,421	60,78	12,561	61,04	15,702	101,30	18,842	121,56

^(*) Dati presi dal testo: "Introduzione alla grafica strutturale"; Giuseppe Ciscato; Ponte Nuovo Editrice Bologna

H

Caratteristiche reti elettrosaldate a maglia quadrata

Diametro	Maglia	Dimer	sioni	Superficie	Sezione	Peso	Peso
in mm	cm	pannello cm		pannello	resistente	pannello	al m ²
"" ""	Citi	Larg.	Lung.	m ²	cm ² /m	kN	kN/m ²
4	10	225	400	9,00	1,26	0,18	0,02
4	15	215	500	10,75	0,84	0,14	0,01
4	20	225	400	9,00	0,63	0,09	0,01
5	15	215	500	10,75	1,31	0,22	0,02
5	20	225	500	11,25	0,98	0,18	0,02
5	25	230	400	9,20	0,78	0,12	0,01
6	10	225	500	11,25	2,82	0,51	0,04
6	15	215	500	10,75	1,88	0,32	0,03
6	20	225	500	11,25	1,41	0,26	0,02
6	25	230	400	9,20	1,13	0,17	0,02
8	15	200	500	10,00	3,35	0,54	0,05
8	20	225	500	11,25	2,51	0,46	0,04
10	20	225	500	11,25	3,93	0,72	0,06