

Aurelio Ghersi

IL CEMENTO ARMATO



Aurelio Ghersi
IL CEMENTO ARMATO

ISBN 978-88-579-0037-7

Seconda edizione: maggio 2010

© 2005 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686 - fax 091525738
www.darioflaccovio.it e-mail info@darioflaccovio.it

Chersi, Aurelio <1951->
Il cemento armato : dalle tensioni ammissibili agli stati limite : un
approccio unitario / Aurelio Ghersi. - 2. ed. - Palermo : D. Flaccovio, 2010.
ISBN 978-88-579-0037-7
1. Cemento armato. SBN Pal0226114
693.54 CDD-21
CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati per tutti i paesi. Nessuna parte di questo può essere riprodotta in alcuna forma, compresi microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editor

Stampa: Priulla, Palermo, maggio 2010

AGGIORNAMENTI - ERRATA CORRIGE - ADDENDUM
Eventuali integrazioni o revisioni al presente testo saranno disponibili all'indirizzo www.darioflaccovio.it/aggiornamenti.
È pertanto consigliabile visitare periodicamente tale pagina o iscriversi dalla home page
www.darioflaccovio.it alla newsletter gratuita informazioni editoriali, che riporta, tra le altre informazioni, anche
gli eventuali aggiornamenti.

Indice

Premessa	13
Capitolo 1	
INTRODUZIONE	17
1. Dall'arte del costruire alla Scienza e Tecnica delle costruzioni	17
2. Definizione del modello di calcolo	20
3. Analisi strutturale	21
4. Verifica delle sezioni	25
Capitolo 2	
SICUREZZA STRUTTURALE E METODI DI VERIFICA	27
1. Variabilità di resistenza e carichi	27
1.1. Variabilità della resistenza	30
1.2. Variabilità dei carichi	31
2. Probabilità di collasso e sicurezza strutturale	33
3. Metodo delle tensioni ammissibili	37
4. Calcolo a rottura	39
5. Approccio semiprobabilistico	40
6. Metodo degli stati limite	42
6.1. Verifiche allo stato limite ultimo	42
6.2. Verifiche allo stato limite di esercizio	43
Capitolo 3	
NORMATIVA	45
1. Normativa tecnica: prescrittiva o prestazionale?	45
2. Sviluppo storico della normativa italiana	47
3. Normativa europea	51
4. Panoramica delle principali normative vigenti	52
4.1. Decreto Ministeriale 14/1/2008 (NTC 08)	52
4.2. EN 1990, Eurocodice 0 (EC0)	54
4.3. EN 1991, Eurocodice 1 (EC1)	55
4.4. EN 1992, Eurocodice 2 (EC2)	55

4.5. Altre normative relative al calcestruzzo	57
5. Sistemi di misura	58
6. Azioni e loro valore di calcolo	58
6.1. Classificazione delle azioni	58
6.2. Valori di calcolo per verifiche agli stati limite ultimi	60
6.3. Valori di calcolo per verifiche agli stati limite di esercizio	61
Capitolo 4	
BREVE STORIA DEL CALCESTRUZZO (ARMATO)	69
1. La preistoria del calcestruzzo	69
2. La muratura romana: l'opus caementicium	71
3. La composizione, da Vitruvio al mix design	76
4. Il calcestruzzo nella rivoluzione industriale	78
5. Il calcestruzzo, i nuovi elementi strutturali e le nuove forme	85
6. Calcestruzzi strutturali ad alta resistenza: il futuro (?)	91
Capitolo 5	
IL CALCESTRUZZO	95
1. Aspetti tecnologici	95
2. Resistenza a compressione	98
2.1. Prova a compressione	99
2.2. Determinazione della resistenza in strutture esistenti	101
2.3. Classi di calcestruzzo	103
2.4. Controlli di accettazione	104
2.5. Valore di calcolo della resistenza a compressione	106
3. Modulo elastico	106
4. Resistenza a trazione	107
4.1. Determinazione sperimentale	107
4.2. Valutazione numerica	109
5. Comportamento del calcestruzzo nel tempo	112
5.1. Stagionatura e resistenza	112
5.2. Ritiro	113
5.3. Scorrimento viscoso	117
Capitolo 6	
L'ACCIAIO PER CEMENTO ARMATO ORDINARIO	123
1. Aspetti tecnologici	123
2. Caratteristiche meccaniche	124
2.1. Tipi di acciaio	125
2.2. Prove di qualificazione e controlli di accettazione	127
2.3. Modulo elastico e resistenza di calcolo	130
3. Aderenza acciaio-calcestruzzo	131
3.1. Tensioni di aderenza	131

3.2. Lunghezza di ancoraggio	133
3.3. Giunzioni per sovrapposizione	136
4. Ricoprimento e distanza tra le barre	138
Capitolo 7	
DURABILITÀ DEL CALCESTRUZZO ARMATO	141
1. Degradamento e durabilità del calcestruzzo armato	141
2. Corrosione dell'armatura	142
2.1. Corrosione promossa da carbonatazione	143
2.2. Corrosione promossa da cloruri	145
3. Degradamento del calcestruzzo	146
3.1. Attacco solfatico	146
3.2. Cicli di gelo e disgelo	147
4. Indicazioni di normativa sulla durabilità	149
4.1. Qualità del calcestruzzo e resistenza minima	151
4.2. Ricoprimento minimo	153
Capitolo 8	
MODELLAZIONE DEL CEMENTO ARMATO	157
1. Comportamento e modellazione del cemento armato	157
2. Simbologia e convenzione dei segni per un'asta	158
3. Modelli di comportamento del materiale	161
3.1. Primo stadio	161
3.2. Secondo stadio	162
3.3. Terzo stadio	163
4. Comportamento e modellazione in presenza di sforzo normale e momento flettente	167
4.1. Calcestruzzo reagente a trazione (1° stadio)	168
4.2. Calcestruzzo non reagente a trazione (2° stadio)	170
4.3. Comportamento non lineare (3° stadio)	172
5. Comportamento e modellazione in presenza di taglio e torsione	173
Capitolo 9	
SFORZO NORMALE	177
1. Modello lineare - calcestruzzo resistente a trazione	177
2. Modello lineare - calcestruzzo non resistente a trazione	179
2.1. Trazione	179
2.2. Compressione	181
3. Modello non lineare	181
3.1. Trazione	181
3.2. Compressione	182
4. Progetto di una sezione compressa e prescrizioni di normativa	183
5. Pilastri cerchiati	187

Capitolo 10

FLESSIONE SEMPLICE	191
1. Modello lineare - calcestruzzo resistente a trazione	191
2. Modello lineare - calcestruzzo non resistente a trazione	195
2.1. Sezione rettangolare	196
2.2. Sezioni riconducibili alla rettangolare	203
2.3. Sezione generica	205
2.4. Flessione deviata	209
3. Modello non lineare	210
3.1. Flessione retta	211
3.2. Valori di β e κ per sezione parzializzata	212
3.3. Sezione rettangolare	215
3.4. Sezione generica	220
3.5. Flessione deviata	223
4. Progetto della sezione	224
4.1. Comportamento ultimo e duttilità	224
4.2. Progetto di sezione rettangolare a semplice armatura	228
4.3. Progetto di sezione rettangolare a doppia armatura	230
4.4. Valori dei coefficienti r ed r'	235
4.5. Indicazioni progettuali	237

Capitolo 11

PRESSO E TENSOFFLESSIONE	241
1. La presso e tensoflessione in una sezione omogenea	241
2. Modello lineare - calcestruzzo resistente a trazione	246
3. Modello lineare - calcestruzzo non resistente a trazione	249
4. Verifica a presso o tensoflessione retta nel 2° stadio	251
4.1. Sezione rettangolare	251
4.2. Sezioni riconducibili alla rettangolare	260
4.3. Sezione circolare	265
4.4. Sezione generica	268
5. Domini $M-N$ per modello lineare del materiale	273
5.1. Domini, diagrammi limite e campi di comportamento	274
5.2. Costruzione dei domini $M-N$ per sezione rettangolare	276
5.3. Comportamento della sezione e influenza dell'armatura	282
6. Presso e tensoflessione deviata nel 2° stadio	283
7. Modello non lineare	285
8. Verifica a presso o tensoflessione retta nel 3° stadio	286
8.1. Valori di β e κ per sezione tutta compressa	288
8.2. Sezione rettangolare	292
8.3. Sezione circolare	296

9. Domini $M-N$ per modello non lineare del materiale	299
9.1. Diagrammi limite e campi di comportamento	299
9.2. Costruzione dei domini $M-N$	302
9.3. Domini $M-N$ per sezione rettangolare	302
9.4. Sezione rettangolare e circolare - formule semplificate	306
10. Presso e tensoflessione deviata nel 3° stadio	322
Capitolo 12	
DUTTILITÀ	329
1. Introduzione	329
2. Legame costitutivo del calcestruzzo	332
2.1. Effetto ed efficacia del confinamento	332
2.2. Resistenza e limiti deformativi in presenza di confinamento	342
2.3. Possibili legami costitutivi per il calcestruzzo compresso	345
2.4. Legame costitutivo del calcestruzzo teso	349
3. Legame costitutivo dell'acciaio	349
4. Determinazione del legame momento-curvatura	351
4.1. Modellazione della sezione	351
4.2. Procedimento generale	352
5. Travi	354
5.1. Legami momento-curvatura per travi	354
5.2. Valutazione approssimata della duttilità delle sezioni	357
6. Legami momento-curvatura per pilastri	363
Capitolo 13	
TAGLIO	369
1. Quale modello di comportamento?	369
2. Il taglio in una sezione omogenea	372
3. Modello lineare - calcestruzzo resistente a trazione	380
4. Modello lineare - calcestruzzo non resistente a trazione	382
4.1. Sezione rettangolare	383
4.2. Altri tipi di sezione	386
4.3. Considerazioni sullo stato tensionale	388
5. Modello lineare - resistenza della sezione e armatura a taglio	390
5.1. Tipologie di armatura a taglio	391
5.2. Modelli per valutare l'armatura a taglio	393
5.3. Armatura con sagomati a 45°	394
5.4. Armatura con staffe (con o senza ferri di parete)	398
6. Modello non lineare - resistenza in assenza di armature	406
6.1. Il modello "a pettine"	406
6.2. Altri contributi alla resistenza del dente	410
6.3. Prescrizioni della normativa	413

7. Modello non lineare - resistenza della sezione e armatura a taglio	416
7.1. Modelli per valutare l'armatura a taglio	416
7.2. Traliccio a inclinazione variabile	418
7.3. Campi di tensione	422
7.4. Verifica della sezione e progetto dell'armatura	425
7.5. Minimi di armatura nel metodo degli stati limite	427
Capitolo 14	
PUNZONAMENTO	433
1. Taglio e punzonamento	433
2. Modello lineare	434
3. Modello non lineare	436
Capitolo 15	
TORSIONE	447
1. Torsione per congruenza e torsione per equilibrio	447
2. La torsione in una sezione omogenea	448
3. Modello lineare - stato tensionale	452
4. Modello lineare - armatura a torsione	456
4.1. Tipologie di armatura a torsione e modelli per valutarle	456
4.2. Armatura con staffe e barre longitudinali	457
5. Modello non lineare	463
6. Torsione e taglio	469
6.1. Modello lineare	469
6.2. Modello non lineare	470
Capitolo 16	
STATI LIMITE DI ESERCIZIO	475
1. Generalità	475
2. Verifica di fessurazione	476
2.1. Comportamento di un'asta al crescere dei carichi	476
2.2. Indicazioni della normativa	483
2.3. Controllo della fessurazione senza calcolo diretto	485
2.4. Determinazione dell'ampiezza delle fessure	488
3. Verifica di deformabilità	492
3.1. Limiti del rapporto luce/altezza	493
3.2. Determinazione della freccia	496
4. Verifica delle vibrazioni	500
5. Verifica delle tensioni di esercizio	501
Appendice	
PROGETTAZIONE COL METODO DELLE TENSIONI AMMISSIBILI	507
1. Il metodo delle tensioni ammissibili	507

Indice	11
2. Sforzo normale	508
2.1. Progetto della sezione	508
2.2. Confronto tra stato limite ultimo e tensioni ammissibili	510
3. Flessione semplice	511
3.1. Progetto di sezione rettangolare a semplice armatura	511
3.2. Progetto di sezione rettangolare a doppia armatura	513
3.3. Valori dei coefficienti r ed r'	515
3.4. Confronto tra stato limite ultimo e tensioni ammissibili	517
4. Presso e tensoflessione	518
4.1. Confronto tra stato limite ultimo e tensioni ammissibili	519
5. Taglio	520
5.1. Progetto delle armature	520
5.2. Confronto tra stato limite ultimo e tensioni ammissibili	523
6. Torsione	525
6.1. Progetto delle armature	525
6.2. Confronto tra stato limite ultimo e tensioni ammissibili	527
Bibliografia	529
E giunti alla fine... ..	531

Premessa

Viviamo in un mondo in cui tutto sembra cambiare con rapidità incredibile e la progettazione strutturale subisce anch'essa gli effetti di tale evoluzione. Nuove normative hanno sostituito quelle a cui eravamo abituati, proponendo impostazioni che ci hanno lasciato all'inizio disorientati ed imponendo calcoli sempre più laboriosi. Nuovi simboli e nuove unità di misura accrescono la confusione (il taglio ora è V , non T , ed il Newton ha sostituito il vecchio chilogrammo). Certo la sostanza è rimasta la stessa, ma che fatica aggiornarsi! E che incubo è stato passare da un libro a un altro e trovare approcci e simboli differenti e quasi mai coincidenti con quelli della normativa! "Fortunatamente" i programmi per computer vengono in nostro soccorso, ma diventa sempre più forte il rischio di delegare tutto a loro, tanto da non capire più cosa si sta facendo. E i venditori di software fanno bene il loro mestiere e rincarano la dose, cercando di convincerci che senza programmi non si può più fare niente.

In realtà le novità, che tanto ci spaventano, sembrano così complicate solo perché non le conosciamo a fondo. Il metodo degli stati limite e le verifiche allo stato limite ultimo presentano alcune differenze concettuali rispetto al metodo delle tensioni ammissibili, ma dal punto di vista operativo seguono le stesse impostazioni del passato e sono addirittura più semplici nelle applicazioni. È vero che per lungo tempo questi argomenti sono stati trattati in libri piuttosto pesanti a leggersi, pieni di simboli rappresentati con lettere greche e di formule lunghissime. Ma il tempo fa da filtro e anni di pratica professionale consentono di accantonare tutto quello che non serve e lasciare il nucleo fondamentale, semplice e concreto. Così è stato per il metodo delle tensioni ammissibili, che

è andato in pensione dopo cento anni di onorato servizio, e così sta ora avvenendo per il metodo degli stati limite, che è ancora un giovincello.

Quando, nel marzo 1995, ho iniziato a tenere il corso di Tecnica delle costruzioni ho passato in rassegna i testi “classici” e quelli più recenti, ma alla fine ho scelto una mia impostazione, che mirava soprattutto a evidenziare l’unitarietà dei diversi metodi di verifica (tensioni ammissibili e stato limite ultimo). Non ho pretese di grande originalità, ma sono rimasto soddisfatto della risposta degli studenti e questo mi conforta nell’idea che la mia sia una delle possibili vie da seguire per l’aggiornamento della didattica in questo settore.

Fin dal primo anno ho sentito la necessità di lasciare agli studenti qualche traccia scritta di quello che andavo insegnando, sotto forma di schemi sintetici degli argomenti principali. Pian piano sono andato organizzando il materiale didattico, fino a dargli la veste che qui si può vedere. Sono stati anni intensi, di grande e a volte anche travagliata maturazione. Ricordo ancora il giorno in cui durante una lezione, nel bel mezzo di una dimostrazione sull’armatura a taglio, mi sono reso conto che lo sviluppo dei passaggi avrebbe portato a conclusioni ben diverse da quelle che davo per scontate. “The show must go on” e in quella occasione da bravo attore ho portato a termine la lezione sorvolando un po’ (“con semplici passaggi si arriva all’espressione finale...”), per poi riprendere il discorso una settimana dopo per esporre, con aria umile e pentita, il frutto di numerose ore di laceranti riflessioni ed autocritiche. Ricordo i momenti entusiasmanti, ed i fine settimana frenetici, di riflessione sulla pressoflessione, che con lo stimolo e l’aiuto di Marco Muratore hanno portato a formule di verifica e progetto di una semplicità sconcertante. E chi ha avuto per le mani versioni precedenti di questo testo si accorgerà di quante pagine sono state buttate via, quando mi sono reso conto di essere caduto anch’io nella trappola della pulizia formale, che porta a espressioni belle ed estremamente sintetiche... ma quasi del tutto incomprensibili per il comune lettore.

Certo, un lavoro come questo non può mai dirsi pienamente compiuto. La definitiva entrata in vigore delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni è stata l’occasione per rimettere mano al testo e quello che sembrava dovesse essere un piccolo lavoro di maquillage ha portato invece ad una completa riorganizzazione del materiale, con ulteriori tagli

e aggiunte. Le ultime radicali trasformazioni sono state fatte addirittura dopo aver comunicato all'editore che il testo era pronto, perché tenendo le prime lezioni del corso, nel marzo 2010, ho notato che l'ordine di trattazione di alcuni argomenti andava cambiato. E probabilmente quando rileggerò il testo pubblicato mi verrà voglia di fare ulteriori modifiche. Sono però contento di questo, perché finché si è vivi c'è tempo per migliorare, e finché c'è voglia di migliorare si è veramente vivi.

Per concludere, vorrei ringraziare tantissime persone. Prima di tutto i miei studenti, che tanto mi hanno insegnato e mi hanno fatto riflettere con le loro domande. Li ringrazio per aver colto il mio entusiasmo verso questa materia e per essersi a loro volta appassionati e, spero, anche un po' divertiti nello studiarla. Li ringrazio per il bel rapporto umano che si è creato tra noi, per la stima reciproca e l'amicizia che va al di là del rapporto docente-studente.

Sono poi grato a tutti coloro che mi hanno dato una mano nel corso e soprattutto a chi è cresciuto (dal punto di vista universitario) vicino a me, come Pier Paolo Rossi ed Edoardo Marino, che hanno ormai acquisito una piena maturità ed autonomia, e Melina Bosco, che è una grande speranza per il futuro. Cito a parte Antonio Perretti, che ha in comune con me una smisurata passione per la didattica e che su vari argomenti costituisce un mio punto di riferimento: è un peccato che nessuna università abbia voluto utilizzare stabilmente le sue grandi capacità.

Non può mancare un pensiero affettuoso agli amici dell'università di Napoli, in particolare a Bruno Calderoni e Pietro Lenza. Un "grazie" di cuore anche a Carlo Majorano, grande amico prima ancora che ottimo professionista, che continua a pormi i suoi problemi, fornendomi l'occasione per utili discussioni e spunti di riflessione.

In ultimo, il ringraziamento più grande a mia moglie Lia, anche per la pazienza con la quale sopporta il fatto che io lavori a 900 chilometri da casa e che dedichi tanto tempo al lavoro anche nei fine settimana.

Vorrei infine dedicare questo mio lavoro ad Aurelio Giliberti. La sua scomparsa ha lasciato un vuoto nel cuore di tutti coloro che sono stati suoi studenti. Indipendentemente dai riconoscimenti accademici, la sensibilità strutturale, la concretezza, la chiarezza didattica e le grandi doti umane che l'hanno contraddistinto hanno plasmato generazioni di ingegneri.

Capitolo 1

INTRODUZIONE

Aurelio Gherzi

1. Dall'arte del costruire alla Scienza e Tecnica delle costruzioni

L'uomo ha realizzato costruzioni fin da tempi antichissimi. Alcune opere hanno resistito per migliaia di anni e destano tuttora la nostra ammirazione. Si pensi ad esempio alle piramidi di Giza e ai templi di Luxor in Egitto, ai templi greci, alle costruzioni civili e religiose romane; o, andando a tempi relativamente più recenti, alle cattedrali gotiche con le loro mirabili forme slanciate. Nessuna di queste costruzioni è frutto di un "calcolo", nel senso che diamo noi oggi a tale parola. Le dimensioni degli elementi ed i particolari costruttivi erano infatti dettati da regole empiriche che si erano andate via via definendo nel tempo. Queste erano basate sull'esame del comportamento delle strutture realizzate e dei problemi da esse presentati. Ogni dissesto dava origine a modifiche che quando mostravano di essere efficaci venivano incorporate nelle regole costruttive. Si è trattato in un certo senso di una continua sperimentazione dal vero sulle cui basi è stata fondata l'arte del costruire. Il ricordo di tale modo di procedere permane anche oggi, tanto che una costruzione ben realizzata viene detta "fatta a regola d'arte".

I primi tentativi di tradurre tali regole in formulazioni matematiche risalgono al 17° e 18° secolo. Fu infatti nel 1638 che Galileo propose le prime formulazioni teoriche della resistenza a rottura di travi inflesse mentre oltre un secolo dopo, nel 1773, Coulomb cercò di definire quanti-

tativamente la resistenza a rottura di archi in muratura. Il principio di elasticità lineare, destinato ad essere uno dei pilastri della Scienza delle costruzioni, fu invece formulato da Hooke nel 1678.

Il 19° secolo vide giungere a piena maturità la teoria dell'elasticità. Nel 1826 Navier propose un metodo organico per il dimensionamento di strutture, basato sull'ipotesi di comportamento linearmente elastico dei materiali costitutivi, e intorno al 1855 De Saint Venant formulò il suo noto principio e fornì la soluzione del problema della relazione tra caratteristiche della sollecitazione e stato deformativo e tensionale in travi prismatiche. Verso la fine del secolo furono infine sviluppati i criteri di resistenza basati sulla crisi puntuale del materiale (Rankine, 1875; Mohr, 1882; Tresca, 1871).

Parallelamente venne affrontato il problema della valutazione delle caratteristiche della sollecitazione nelle strutture iperstatiche. I contributi più rilevanti in questo secolo furono quelli rivolti alla risoluzione di schemi di travi continue col metodo delle forze (Clapeyron, 1852; Mohr, 1860; Bresse, 1865).

All'inizio del 20° secolo vennero redatte le prime normative tecniche (Francia, 1906; Italia, 1907) che seguendo l'impostazione di Navier imponevano un'analisi lineare elastica. Grazie alla linearità di comportamento, il margine di sicurezza tra carico di rottura e carico di esercizio può essere garantito lavorando in termini di tensioni; ciò portò a denominare tale modo di procedere "metodo delle tensioni ammissibili". Successivi sviluppi portarono al *limit design* o calcolo a rottura, finalizzato alla valutazione della capacità portante ultima della sezione (anni '40 e '50), alle analisi di tipo probabilistico, che tengono esplicitamente conto della variabilità dei carichi e delle caratteristiche dei materiali, e al metodo semiprobabilistico (anni '50 e '60).

Per quanto riguarda la risoluzione di schemi iperstatici, nella prima metà del secolo ebbero ampio sviluppo i metodi iterativi, che consentivano l'analisi manuale di telai (Cross, 1930; Grinter, 1937). Il progredire della tecnologia diede infine impulso alla metodologia matriciale, che sfrutta in maniera ottimale le potenzialità offerte dai calcolatori elettronici (anni '60 e '70).

Il progresso teorico, brevemente delineato nelle pagine precedenti, ha portato ad una chiara indicazione del modo con cui il progettista deve

affrontare l'esame di una struttura. Il primo problema è quello della definizione di un *modello* per lo schema geometrico, per il materiale e per i carichi. L'oggetto reale è sempre abbastanza complesso e nel tradurlo in modello matematico è inevitabile fare una serie di semplificazioni; spesso le incertezze sono tali da rendere opportuno l'uso di più modelli limite, per individuare una *fascia* entro cui sia compreso il reale comportamento della struttura. Una volta definito lo schema geometrico e di carico occorre passare alla sua risoluzione, cioè alla determinazione di deformazioni e tensioni (o di spostamenti e caratteristiche di sollecitazioni); questa fase viene usualmente denominata *analisi strutturale*, anche se questo termine è a volte utilizzato con una accezione più ampia. Infine occorre effettuare una *verifica* per controllare che la struttura sia in grado di sopportare le azioni che la solleciteranno durante la sua vita. Le tre fasi qui indicate sono riferite allo studio di una struttura esistente o comunque già idealmente definita dal progettista. Nel caso di costruzioni ancora da realizzare, un compito preliminare è quello del *dimensionamento* degli elementi strutturali. Questo può essere fatto dal progettista sfruttando la sua esperienza diretta, eventualmente tradotta in formule semplici e di uso immediato; oppure mediante un calcolo che segue le linee generali innanzi indicate, ma con modelli estremamente semplificati.

In tempi ormai lontani tutte le problematiche e le conoscenze teoriche citate erano racchiuse in un'unica disciplina, la Scienza delle costruzioni. Con tale nome è intitolata l'opera di Belluzzi, che nonostante gli anni trascorsi (la sua prima edizione risale al 1941) costituisce tuttora un valido riferimento per numerosi problemi di Scienza e Tecnica delle costruzioni. Il progressivo aumento delle conoscenze ha reso necessario la suddivisione in due filoni, per l'appunto Scienza e Tecnica delle costruzioni, che costituiscono nell'attuale ordinamento universitario italiano due raggruppamenti disciplinari, capeggiati dalle omonime discipline, che includono materie quali Calcolo anelastico e a rottura, Teoria delle strutture e Dinamica delle strutture (gruppo Scienza) o Costruzioni di ponti, Progetto di strutture e Costruzioni in zona sismica (gruppo Tecnica).

Proprio per la loro origine comune, Scienza e Tecnica delle costruzioni si presentano nel segno di una unitarietà che non sempre consente una netta distinzione tra l'una e l'altra. Si può dire in linea di massima che la

Scienza delle costruzioni fornisce le basi teoriche generali. Essa, ad esempio, affronta in maniera esaustiva la teoria della trave per materiale omogeneo, isotropo, linearmente elastico e sviluppa le relazioni tra caratteristiche della sollecitazione, spostamenti, deformazioni e tensioni. Per quanto riguarda l'analisi strutturale, affronta lo studio di base dei sistemi isostatici (reazioni vincolari, diagrammi delle caratteristiche di sollecitazione) e iperstatici (metodo delle forze, metodo degli spostamenti) e fornisce strumenti essenziali quali il principio dei lavori virtuali e i teoremi di deformazione per sistemi elastici. La Tecnica delle costruzioni passa ad applicazioni "tecniche", più legate alla realtà concreta. Ad esempio affronta il problema della non omogeneità del materiale (tipico del cemento armato) e dell'influenza di legami costitutivi σ - ε del materiale non linearmente elastici. Nell'ambito dell'analisi strutturale, analizza procedimenti numerici specifici per la risoluzione di schemi strutturali più comuni (travi continue, telai a maglie rettangolari) per passare poi all'impostazione generalizzata dell'analisi matriciale (ma in questo caso la distinzione tra Scienza e Tecnica delle costruzioni diventa meno netta, perché questo argomento può far parte anche del corso di Teoria delle strutture, del gruppo Scienza). Nel corso di Tecnica delle costruzioni vengono inoltre presentati i primi approcci al passaggio da oggetti reali a schemi di calcolo. I corsi successivi del gruppo Tecnica partono invece espressamente dall'esame di oggetti reali (ponte, edificio, ecc.) e propongono modelli, teorici e tecnici, da utilizzare per determinare le caratteristiche di sollecitazione e verificare o progettare le sezioni, nonché tutti i dettagli costruttivi necessari per una corretta esecuzione dell'opera.

2. Definizione del modello di calcolo

La definizione del modello di calcolo è il primo passo necessario per analizzare una struttura. Più precisamente, occorre definire uno schema geometrico ed un modello per i carichi, ma anche un legame costitutivo per il materiale nonché il tipo di analisi da svolgere.

Nel passato le potenzialità di calcolo erano limitate ed era necessario adottare modelli molto semplici. Ad esempio, le travi ed i pilastri di un edificio soggetto a soli carichi verticali venivano analizzati separatamente (con lo schema di trave continua le prime, come singole aste

soggette a sforzo assiale i secondi). In presenza di azioni orizzontali si rendeva necessario ricorrere a modelli più complessi, che tenessero conto delle interazioni tra i diversi elementi, ma difficilmente si andava oltre lo schema di telaio piano. Ovviamente, il progettista era ben consapevole dei limiti del modello utilizzato e cercava di compensarne la grossolanità abbondando nelle sezioni e nelle armature.

Con l'avvento dei calcolatori elettronici è diventato facile utilizzare modelli anche notevolmente complessi, che forniscono indicazioni più dettagliate sul comportamento delle strutture. Non dobbiamo però trascurare alcuni rischi connessi a questa evoluzione. Innanzitutto, il problema della modellazione è diventato molto più rilevante proprio perché molto più numerose di prima sono le possibilità a disposizione; la scelta è ora più delicata ed il rischio di adottare un modello non appropriato è maggiore. In secondo luogo, il computer non commette errori di calcolo ma chi lo utilizza può sbagliare a fornirgli i dati; tanto più il modello è complicato tanto maggiore sarà, in genere, la quantità di informazioni da fornire e corrispondentemente crescerà la possibilità di un errore. Infine, la disponibilità di modelli sofisticati può generare la falsa convinzione di poter conoscere veramente il comportamento delle strutture; non bisogna invece dimenticare che anche il programma di calcolo più avanzato fornisce solo una vaga immagine della realtà, perché quest'ultima è sempre molto più complessa di qualsiasi modello.

Qual è allora il modo più giusto di operare? A costo di sembrare banale, io sono convinto che occorra usare in ogni situazione il modello più semplice (tra quelli validi per il caso in esame) e soprattutto usare solo modelli di cui si capisca bene il significato. Contemporaneamente, è importante utilizzare modelli, anche grossolani, che forniscano immediatamente l'ordine di grandezza delle sollecitazioni, in modo da poter controllare i risultati forniti dai modelli più dettagliati.

3. Analisi strutturale

Un primo aspetto da chiarire nel parlare di analisi strutturale è se e come il comportamento della struttura è influenzato dal modo in cui le azioni che la cimentano variano nel tempo. In generale, una volta supe-

rata la fase transitoria di costruzione una parte dei carichi (ad esempio il peso proprio degli elementi strutturali) si può considerare permanente; un'altra parte invece (i cosiddetti "sovraccarichi") varia nel tempo, ma in maniera abbastanza lenta. Si parla in questo caso di *carichi statici*. Ben diverso è l'effetto delle raffiche di vento su elementi deformabili, come antenne e tralicci, o del moto del terreno durante un sisma. Si parla in tal caso di *carichi dinamici* ed una analisi che tenga espressamente conto della variazione delle azioni nel tempo è detta *analisi dinamica*.

In secondo luogo, occorre esaminare in che modo il comportamento della struttura è influenzato dal legame costitutivo dei materiali con cui sono realizzati gli elementi che la compongono. Un legame elastico lineare consente di ipotizzare una analoga relazione lineare tra azioni e deformazioni. In caso contrario si deve effettuare un'analisi che tenga conto delle non linearità *meccaniche*.

Affinché la relazione tra azioni e deformazioni sia effettivamente lineare è anche necessario che siano trascurabili gli effetti del secondo ordine, ovvero che lo spostamento del punto di applicazione dei carichi non influenzi sostanzialmente l'equilibrio. Quando ciò non avviene, occorre effettuare un'analisi che tenga conto delle non linearità *geometriche*. Altri termini usati per far riferimento a questo problema sono: effetto $P-\delta$, dai simboli tradizionalmente utilizzati per la forza assiale e lo spostamento ortogonale all'asse, oppure effetto instabilizzante dei carichi verticali, perché lo sbandamento orizzontale dei traversi su cui sono applicati carichi verticali, oltre a causare un incremento di sollecitazioni flessionali nei pilastri, può portare alla instabilità globale della struttura (Fig. 1).

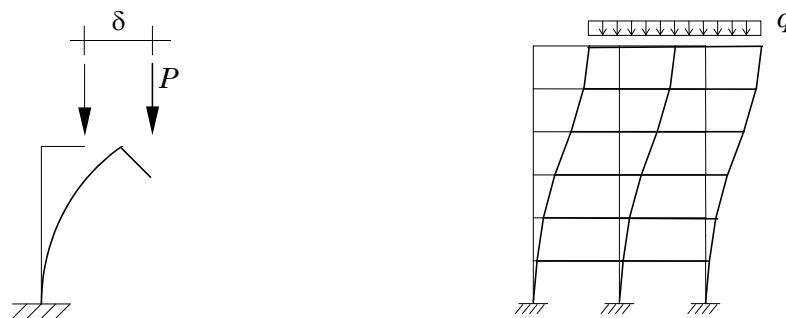


Fig. 1. Effetto $P-\delta$ o effetto instabilizzante dei carichi verticali