

A08  

---

339/I



Paolo Jossa

**Problemi della tecnica  
delle costruzioni**  
**Volume I**

a cura di Claudia Casapulla

*con la collaborazione di Alessandra Maione*



Copyright © MMXI  
ARACNE editrice S.r.l.

[www.aracneeditrice.it](http://www.aracneeditrice.it)  
[info@aracneeditrice.it](mailto:info@aracneeditrice.it)

via Raffaele Garofalo, 133/A-B  
00173 Roma  
(06) 93781065

ISBN dell'opera complessiva  
978-88-548-4106-2

ISBN del primo volume  
978-88-548-4104-8

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,  
di riproduzione e di adattamento anche parziale,  
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie  
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: Liguori, Napoli 2007  
II edizione: giugno 2011

*A Teresa,  
a Federica, Massimo ed Elisabetta*



# Indice del Volume I

*Prefazione alla seconda edizione* ..... 19

*Premessa* ..... 21

## PARTE I

### **Alcuni semplici riferimenti di base**

*Introduzione* ..... 39

#### Capitolo I

*L'operazione primitiva di proiezione. I costrutti: seno, coseno e tangente*

1.1 Introduzione ..... 41

1.2 La proiezione ortogonale ..... 42

1.3 Trigonometria piana ..... 45

#### Capitolo II

*Il costrutto vettore. Il vettore momento. Il baricentro delle masse*

2.1 Introduzione ..... 49

2.2 Il vettore ..... 54

2.3 Il vettore momento ..... 59

2.4	Versori .....	60
2.5	Centro di un sistema di vettori applicati, paralleli, concordi e comunque diretti .....	62
2.6	Coseni direttori .....	64
2.7	Vettore posizione.....	66
2.8	I vettori e le sollecitazioni .....	66

### Capitolo III

#### *Matrici, determinanti e sistemi di equazioni*

3.1	Introduzione.....	69
3.2	Matrici .....	69
3.3	Determinanti.....	72
3.4	Equazioni lineari.....	73

### Capitolo IV

#### *La variazione degli enti in gioco: il concetto di funzione*

4.1	Introduzione.....	75
4.2	La funzione esplicita .....	76
4.3	Generalizzazione .....	78

### Capitolo V

#### *I grandi concetti dell'analisi. Il continuo. Il limite. L'infinitesimo. La derivata. Massimi e minimi. Sviluppi in serie di Taylor e di Fourier*

5.1	Introduzione.....	79
5.2	Continuità, limiti ed infinitesimi .....	81
5.3	La derivata.....	82
5.4	Massimi e minimi.....	86
5.5	Sviluppo in serie di Taylor .....	87
5.6	Funzioni periodiche.....	89



## Capitolo VI

*L'integrale definito e l'integrale indefinito. Le equazioni differenziali a coefficienti costanti*

6.1	Introduzione .....	91
6.2	L'integrale definito .....	92
6.3	L'integrale indefinito .....	93
6.4	Le equazioni differenziali .....	94

## Capitolo VII

*La convenzione per la misura. L'analisi dimensionale come strumento di controllo*

7.1	Le unità di misura .....	99
7.2	L'analisi dimensionale .....	100

## Capitolo VIII

*Un costrutto di pratica utilità. Il momento d'inerzia*

8.1	Il momento d'inerzia.....	103
-----	---------------------------	-----

## Capitolo IX

*Le basi per il trattamento del problema strutturale. Le leggi del moto (dell'equilibrio dinamico)*

9.1	Introduzione .....	105
9.2	Le leggi del moto .....	106
9.3	Onde di deformazione e vibrazioni stazionarie. Il caso limite dell'approssimazione della Statica .....	109
9.4	Il momento della quantità di moto .....	111

## Capitolo X

*I costrutti tensione e deformazione. Le equazioni indefinite dell'equilibrio. L'esperimento fondamentale per la descrizione delle proprietà dei materiali strutturali*

10.1	Introduzione.....	115
10.2	La tensione ed il tensore delle tensioni .....	115
10.3	La simmetria delle tensioni tangenziali.....	120
10.4	Le equazioni indefinite dell'equilibrio .....	121
10.5	Le equazioni ai limiti.....	123
10.6	Le tensioni principali.....	125
10.7	La deformazione.....	132
10.8	Il tensore della deformazione .....	137
10.9	Acciaio. Il legame forza-spostamento ed il legame mono-dimensionale tensione-deformazione .....	138

## Capitolo XI

*Elasticità e plasticità. Materiali duttili e fragili. Verso il concetto moderno di struttura duttile*

11.1	Introduzione.....	141
11.2	Modalità di prova e fase elastica .....	142
11.3	La deformazione plastica.....	143

## Capitolo XII

*I legami deformazioni estensionali-tensioni normali*

12.1	Aspetti generali.....	145
------	-----------------------	-----

## Capitolo XIII

*Il concetto-costrutto di lavoro. Il principio di conservazione dell'energia. Cicli di isteresi e progetto antisismico*

13.1	Introduzione.....	147
------	-------------------	-----

13.2	Lavoro di una forza.....	147
13.3	Il lavoro di deformazione.....	150
13.4	Principio di conservazione dell'energia.....	152
13.5	L'energia cinetica .....	153

Capitolo XIV

*La legge dell'attrito e il cerchio di Mohr*

14.1	Introduzione.....	157
14.2	L'attrito radente .....	158
14.3	Le terre e il cerchio di Mohr .....	160

Capitolo XV

*Il principio dei lavori virtuali*

15.1	Introduzione.....	163
15.2	Definizioni e principi .....	163

Capitolo XVI

*Aspetti variazionali ed energia. Metodi approssimati di analisi delle strutture*

16.1	Introduzione.....	169
16.2	L'energia potenziale totale.....	170
16.3	L'energia complementare .....	173

PARTE II

**Teorie ed esperimenti fondamentali**

<i>Introduzione</i> .....	177
---------------------------	-----

## Capitolo XVII

*I criteri di resistenza*

17.1	Introduzione.....	181
17.2	Il criterio della curva intrinseca di Mohr.....	182
17.3	Il criterio di Huber-Von Mises-Hencky .....	184
17.4	La crisi per compressione del calcestruzzo .....	186

## Capitolo XVIII

*Primi aspetti di teoria elastica della trave*

18.1	Introduzione.....	189
18.2	Aspetti generali.....	190
18.3	Le sollecitazioni .....	191
18.4	Sforzo normale centrato .....	194
18.5	La flessione semplice .....	198
18.6	Sforzo normale e flessione .....	204
18.7	La sezione non resistente a trazione.....	208
18.8	Taglio.....	210
18.9	Torsione.....	213

## Capitolo XIX

*L'analisi elastica delle strutture a telaio*

19.1	Il telaio piano.....	217
19.2	I vincoli.....	218
19.3	Gradi di libertà di una trave nel piano.....	219
19.4	Il metodo delle forze.....	220
19.5	Il metodo degli spostamenti in presenza di sole forze ai nodi.....	221
19.6	Il metodo degli spostamenti con aste direttamente caricate.....	224
19.7	La matrice delle rigidità della trave.....	226

## Capitolo XX

*Verifica e progetto a rottura di strutture in acciaio*

20.1	Introduzione .....	229
20.2	Un esperimento su un modello con tre barre in acciaio.....	230
20.3	L'esperimento fondamentale della plasticità per la trave inflessa .....	232
20.4	Il teorema cinematico del calcolo a rottura.....	236
20.5	Il teorema statico del calcolo a rottura.....	237
20.6	La ricerca del moltiplicatore di crisi .....	239
20.7	Il progetto a rottura .....	239
20.8	La sollecitazione composta di momento e sforzo normale..	241
20.9	Domini di snervamento. Materiale elasto-plastico stabile...	241
20.10	Progetto a rottura in zona sismica.....	244
20.11	Il materiale non resistente a trazione e la verifica a rottura delle murature. ....	246

## Capitolo XXI

*La trave in cemento armato in regime di taglio-flessione*

21.1	L'esperimento-problema.....	249
21.2	Il modello in esperimento .....	250
21.3	Il momento di fessurazione.....	251
21.4	L'altezza delle lesioni .....	254
21.5	Il momento di rottura e la duttilità della sezione .....	256
21.6	L'aderenza e l'evoluzione del quadro fessurativo .....	259
21.7	L'influenza delle tensioni tangenziali.....	263
21.8	I meccanismi resistenti a taglio in assenza di armatura tra- sversale.....	265
21.9	Il meccanismo resistente ad arco .....	267
21.10	La traslazione del diagramma dei momenti.....	268

## Capitolo XXII

*Soluzione elastica della trave in cemento armato*

22.1 Problema – Sforzo normale e flessione.....	271
22.2 Problema – Il taglio nella trave in cemento armato.....	277
22.3 Problema – La torsione nella trave in cemento armato.....	280

### Capitolo XXIII

*Strutture in acciaio di controvento in zona sismica. Gerarchia delle resistenze. Aspetti qualitativi*

23.1 Introduzione.....	285
------------------------	-----

### Capitolo XXIV

*Introduzione al metodo degli elementi finiti*

24.1 Aspetti generali.....	293
----------------------------	-----

### Capitolo XXV

*Introduzione al metodo degli stati limite*

25.1 Aspetti generali.....	299
----------------------------	-----

## Indice del Volume II

### Introduzione

*Problemi semplici ed ordini di grandezza*

### Capitolo I

*Cinematica e legge di Newton*

- 1.1 Problema – Moto circolare uniforme e moto armonico

### Capitolo II

*Equilibri elementari*

- 2.1 Problema – Equilibrio di un mezzo meccanico
- 2.2 Problema – Impronta di una ruota
- 2.3 Problema – La trave ad anello circolare

### Capitolo III

*L'attrito*

- 3.1 Problema – Terre. Spinta attiva e passiva
- 3.2 Problema – L'attrito nelle strutture murarie

### Capitolo IV

*Verifica e progetto a rottura*

- 4.1 Problema – L'arco in muratura
- 4.2 Problema – La trave a sezione variabile

### Capitolo V

*Strutture bidimensionali*

- 5.1 Problema – Piastre. Energia di deformazione
- 5.2 Problema – La piastra e l'energia complementare
- 5.3 Problema – Il pannello murario

## Capitolo VI

### *Equilibrio di modelli non lineari*

- 6.1 Problema – Equilibrio di una fune
- 6.2 Problema – Progetto di una fune
- 6.3 Problema – Tensostrutture
- 6.4 Problema – La catenaria
- 6.5 Problema – Il ponte strallato

## Capitolo VII

### *Moto relativo fra corpi e fluidi*

- 7.1 Problema – Moto di un corpo in un mezzo viscoso
- 7.2 Problema – Urto di un fluido contro una parete e moto di un corpo in un fluido
- 7.3 Problema – Fluidi perfetti. Conservazione dell'energia meccanica. Teorema di Bernoulli

## Capitolo VIII

### *Stabilità*

- 8.1 Problema – Equilibrio di una sfera su una superficie
- 8.2 Problema – La barra compressa ed il carico critico
- 8.3 Problema – Carico critico da peso proprio

## Capitolo IX

### *Cemento armato precompresso*

- 9.1 Problema – Progetto di una sezione di una trave in precompresso

## Capitolo X

### *Lunghezze limiti*

- 10.1 Problema – Altezza limite di strutture soggette al peso proprio
- 10.2 Problema – Luce massima di travi inflesse in acciaio
- 10.3 Problema – Stati limite. Azioni, lunghezza limite e fessurazione di travi inflesse in cemento armato

## Capitolo XI

### *Sismica*



- 11.1 Problema – L'oscillatore elastico elementare
- 11.2 Problema – L'oscillatore sotto azione esterna variabile con legge sinusoidale
- 11.3 Problema – Modello a due gradi di libertà
- 11.4 Problema – Sistema a due gradi di libertà. Moto naturale e sotto azione sismica
- 11.5 Problema – Lo spettro di risposta e lo spettro di progetto. La progettazione in zona sismica
- 11.6 Problema – La linea elastica e le vibrazioni libere (naturali) trasversali delle travi
- 11.7 Problema – Primo modo di vibrazione di una trave. Soluzione approssimata
- 11.8 Problema – Dinamica del blocco rigido
- 11.9 Problema – Sicurezza sotto sisma di un blocco murario
- 11.10 Problema – Duttilità delle strutture in cemento armato
- 11.11 Problema – Telaio in cemento armato in zona sismica

## Capitolo XII

### *Urto*

- 12.1 Problema – L'urto anelastico
- 12.2 Problema – Urto plastico di una massa su una trave incastrata. Fase transitoria
- 12.3 Problema – Urto plastico di una massa su una trave incastrata. Fase stabilizzata

## Capitolo XIII

### *Strutture speciali*

- 13.1 Problema – La fune-trave
- 13.2 Problema – Isolamento alla base
- 13.3 Problema – Arco in muratura di minimo spessore soggetto al peso proprio
- 13.4 Problema – Progetto e verifica di una tensostruttura. Progetto a scala umana e trasformazione in grande
- 13.5 Problema – Compositi e materiali viscosi
- 13.6 Problema – Progetto allo stato limite ultimo di rinforzi a flessione con elementi in FRP di travi in cemento armato

## Capitolo XIV

### *Organizzazione in serie ed in parallelo*

- 14.1 Aspetti generali
- 14.2 Problema – Duttilità e fragilità
- 14.3 Problema – Resistenza e deformabilità caratteristica

## Capitolo XV

### *Ordini di grandezza*

- 15.1 Introduzione
- 15.2 Problema – Rapporti di similitudine ed ordini di grandezza
- 15.3 Problema – Impronte delle ruote
- 15.4 Problema – Peso di un edificio
- 15.5 Problema – Area totale di ingombro ai vari livelli dei pilastri di un edificio in c.a. in zona sismica
- 15.6 Problema – Ordine di grandezza delle sollecitazioni indotte in presenza di azioni sismiche nei pilastri di un edificio
- 15.7 Problema – Complicazione geometrica, analisi ed ordini di grandezza
- 15.8 Problema – Periodo di vibrazione di una corda tesa
- 15.9 Problema – Progetto a rottura di piastre. Ordini di grandezza
- 15.10 Problema – Stabilità. Ordini di grandezza

## Capitolo XVI

### *Operazioni di confronto ed ordini di grandezza*

- 16.1 Introduzione
- 16.2 Problema – Schemi a telaio e schemi controventati
- 16.3 Problema – Effetto P- $\Delta$

## Capitolo XVII

### *Conclusioni. Numeri strutturali e analisi dimensionale*

- 17.1 Introduzione
- 17.2 Problema – Numeri strutturali e ordini di grandezza

## Appendice

### *Norme tecniche ed ordini di grandezza*

## Prefazione alla seconda edizione

Questa seconda edizione è il frutto di una revisione completa del testo originario e contiene numerose aggiunte e modifiche.

Il testo è stato suddiviso in due volumi. Il Volume I comprende la Parte I e la Parte II e nel Volume II sono stati aggiunti due capitoli: il Capitolo XVII dal titolo “Conclusione. Numeri strutturali e analisi dimensionale” e un’“Appendice”.

Il Capitolo XVII affronta in modo più sistematico di quanto precedentemente fatto e col continuo supporto dell’*analisi dimensionale* il tema degli *ordini di grandezza*. Qui però le tecniche allo scopo impiegate sono dichiaratamente attuabili da un non esperto, e così si inquadrano in quello che io chiamo, nell’introduzione dello stesso capitolo, *il ragionamento puro*.

Con tale aggiunta, l’attenzione agli ordini di grandezza sembra assumere nel libro un ruolo dominante. Un’interpretazione che non escludo, anche in ragione del significato di *Tecnica* che essa sottintende, come detto più chiaramente nella “Premessa” del Volume I.

L’“Appendice” è viceversa una puntualizzazione di quegli aspetti delle Norme Tecniche del 14 gennaio 2008<sup>1</sup> che ho giudicato più importanti, con qualche riferimento ancora agli ordini di grandezza. Essa mi è sembrata necessaria per conferire più compiutamente al libro il carattere di manuale pienamente utilizzabile nei corsi universitari.

Quanto alle modifiche, ho rivisto completamente il Capitolo X della Parte I (Volume I) relativo ai “Costrutti tensione e deformazione”. Volevo infatti accentuare, quando possibile, il ruolo del ragionamento e ridurre gli sviluppi matematici. Ho così aggiunto, alla fine degli sviluppi, una sintesi in linguaggio naturale. Ho poi semplificato anche l’analisi della deformazione, limitandomi ad evidenziare le ragioni che rendono complete le tre più tre possibilità di deformazione, al primo

---

<sup>1</sup> MIN.LL.PP., DM 14 GENNAIO, *Norme tecniche per le costruzioni (NTC)*, G.U.R.I., 29, 2008.

MIN.LL.PP., CIRCOLARE 2/02/2009, N. 617, *Istruzioni per l’applicazione delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008*.

ordine, del parallelepipedo elementare. E volevo infine mostrare, già in questa fase di studio, certe possibili correlazioni fra linee isostatiche e scelte, nel progetto a rottura.

Qualche modifica ha interessato anche il Capitolo XVI della Parte I (Volume I), con riferimento al Principio di minimo dell'Energia potenziale totale. Ho poi precisato la mia interpretazione dell'evoluzione del legame di aderenza nella prova sperimentale sulla trave in cemento armato, di cui al Capitolo XXI della Parte II (Volume I).

Altre aggiunte hanno riguardato il Capitolo XXII della stessa Parte II relativo agli elementi di controvento, il Problema 15.1 del Capitolo XV del Volume II con un breve richiamo al tema del *size effect*, e principalmente il Problema 13.6 del Capitolo XIII del Volume II relativo al rinforzo a flessione di travi in c.a. con FRP. Questa aggiunta mi è apparsa opportuna anche al fine di richiamare gli aspetti dominanti delle ultime Istruzioni CNR.

Modifiche diffuse sono poi occorse, sia per attuare qualche necessaria correzione, sia per adeguare i problemi alle nuove norme tecniche. Tali adeguamenti hanno riguardato in particolare i Problemi 10.2 e 10.3 del Capitolo X, "Lunghezze limiti", del Volume II.

## Premessa<sup>1</sup>

Negli anni '80-90 la Scienza e la Tecnica della Costruzioni ad Architettura furono percorse da un'innovativa corrente di pensiero.

Le argomentazioni che furono avanzate da docenti come Edoardo Benvenuto, Salvatore Di Pasquale ed Antonino Giuffrè traevano alimento da studi sulla meccanica delle murature storiche prodotti in Italia da molti di noi studiosi nel settore dopo i terremoti del Friuli e della Campania-Basilicata. Esse tuttavia miravano ad un più esteso obiettivo: conferire alla Scienza ed alla Tecnica ad Architettura un carattere ben distinto da quello che esse assumevano ad Ingegneria, caratterizzandole con più forti riferimenti all'evoluzione storica della scienza e della tecnica del costruire nel suo complesso percorso, con gli aspetti di sistematico progresso accelerati da intuizioni, ma anche ritardati da ritorni ed errori.

La conseguenza fu l'instaurazione di una più stretta correlazione fra Storia e Meccanica nello studio dell'edilizia storica. Cresceva l'esigenza di riconoscimento della regola dell'arte e ancor più ciò accadeva in quanto il monumento, almeno nelle realizzazioni più ardite e innovative, risultava il prodotto di una vera e propria sperimentazione in grande, attuata nel corso della stessa costruzione. Il modello meccanico così si allontanava, lasciando spazio allo studio dei risultati di queste forme storicizzate di lunghi esperimenti.

L'autonomia disciplinare non fu peraltro raggiunta, o forse gli stessi promotori non insistettero allo scopo. Del resto fu anche osservato che il libro di Benvenuto<sup>2</sup>, in qualche modo una sistemazione del pensiero prodotto, non poneva le basi per un facile percorso didattico. La successione delle tappe di conoscenza non si prestava ad essere sem-

---

<sup>1</sup> Questa premessa modifica in parte un lavoro dal titolo: *L'insegnamento fra teoria e pratica della Tecnica delle Costruzioni ad Architettura*, presentato al convegno di Ravenna "Teoria e pratica del costruire: saperi, strumenti, modelli", ottobre 2005. Esso, pur se relativo a questioni proprie delle Facoltà di Architettura, ben si presta a chiarire le ragioni di questo libro.

<sup>2</sup> E. BENVENUTO, *La Scienza delle Costruzioni e il suo sviluppo storico*, Sansoni, Firenze 1981.

plicemente tradotta, senza eliminazioni e riorganizzazioni, in una chiara linea di insegnamento. E comunque il ruolo della conoscenza storica perdeva almeno in parte di peso negli studi rivolti alle più recenti costruzioni in cemento armato ed in acciaio, nate con riferimento a precisi modelli, frutto di più sistematiche conquiste della meccanica delle strutture. Questo ricordo, con i momenti di confronto con le discipline della Storia e del Restauro che lo hanno caratterizzato, è necessaria premessa a quanto dirò.

### **Discipline strutturali e formazione ad Architettura**

È un dato di fatto che il dibattito sul ruolo delle discipline strutturali ad Architettura, al di là dello specifico momento che ho ricordato, non si è mai arrestato.

La convinzione diffusa è che si debbano continuamente sperimentare forme di avvicinamento di queste discipline ad altri insegnamenti ad Architettura, evitando un improduttivo isolamento. È l'eterno problema delle due culture, con l'esigenza di una formazione globalmente più armonica degli allievi ad Architettura.

Personalmente ritengo che l'esigenza di questa sperimentazione oggi ancor più sussista e di essa discuterò, essendo già evidente che:

- 1) *in generale* si debba riconoscere l'unicità di molti problemi di architettura; si debba quindi compiere ogni sforzo per evitare che essi siano deformati nella loro natura da processi di conoscenza, nelle varie discipline, metodologicamente troppo diversi fra loro;
- 2) *in particolare* il predominio nelle discipline scientifiche dei processi verificativi consenta solo ai più forti traduzioni più estese per il progetto, mentre i più deboli rischiano di reagire con eccessiva rigidità, a danno quindi di quella visione critica ed aperta dei fatti, che è aspetto della formazione da garantire *in tutti i corsi di laurea*.

In seguito resterò nell'ambito della Tecnica delle Costruzioni ad Architettura. Tuttavia alcune delle considerazioni che proporrò pongono naturalmente domande alla Statica (titolo oggi modificato che tuttavia in seguito conservo come sintesi, accogliendo in esso anche alcuni necessari aspetti del vecchio corso di Meccanica Razionale); alla Scienza e discipline affini (e dovrebbe essere recuperato qualche aspetto del corso di Fisica più vicino allo studio delle strutture); ed in

parte anche alle discipline delle aree del Restauro e della Tecnologia. Ed è certo che Scienza, Tecnica, Restauro e Tecnologia non dovrebbero percorrere ad Architettura strade fra loro troppo lontane.

### **Le norme ed il significato di “tecnica”**

La maggior parte delle ricerche oggi svolte nell’ambito della Tecnica delle Costruzioni sono orientate a conseguire il progressivo affinamento delle normative tecniche internazionali.

L’affinamento genera differenze. E così le norme sempre più si dividono in parti ed ogni parte in ampi capitoli. Questo processo è inarrestabile e non può essere contestato. L’obiettivo che lo guida è la costruzione macchina quanto più possibile perfetta, o più precisamente: la macchina inversa che meglio risponda alle azioni.

La differenza richiede e genera conoscenze di sottosectore. È quanto oggi richiesto ai ricercatori per il loro inserimento nelle commissioni che redigono la norma. Ed è persino quanto oggi richiesto per le pubblicazioni dalle riviste internazionali, sempre più specializzate.

La norma molto ramificata tende a sua volta a produrre la differenziazione delle competenze nel progetto strutturale. Ed infatti la gestione del progetto da parte del piccolo, tradizionale, studio professionale, almeno nelle manifestazioni più ampie, è caso sempre più raro. L’esperto di collegamenti fra elementi metallici, al di là dell’eventuale ampiezza delle sue conoscenze, rischia sempre più di trovare spazio solo come piccola componente, e quindi come tecnico minore, in una grande organizzazione. Vincono le multinazionali del progetto e del resto l’estesa ramificazione della norma è processo da esse voluto.

Questa separazione da specialismo, l’ho detto, non può essere contestata. Essa è la naturale manifestazione del progresso della tecnica, almeno di una tecnica intesa come *procedura* (una delle sue connotazioni nel Devoto-Oli). Del resto l’affinamento richiede e produce applicazione analitica, cui fortemente credo. Tuttavia l’ininterrotto dibattito che il termine “tecnica” ha alimentato sembra oggi orientarsi, a superamento delle sue manifestazioni più negative per l’uomo e l’ambiente, verso un’unica possibile soluzione: *il rafforzamento del termine stesso, interpretato, con estensione del suo significato più tradizionale, come prioritaria capacità di controllo dei rapporti che*

*intercorrono fra le sue ramificazioni, nella specificità di una situazione reale.*

Il punto è dunque che se la Tecnica delle Costruzioni si vuole qualificare come disciplina attenta all'interpretazione di "tecnica" che la colloca al livello più alto, deve accettare di lavorare con più ampi ed incerti confini, affrontando le *indeterminazioni* e le *alternative* che derivano da obiettivi di controllo più esteso; e ciò avendo cura di non diluirsi in uno squallido generalismo.

Questa impostazione è l'unica che giustifichi la collocazione della Tecnica delle Costruzioni fra le discipline di base ed è quanto richiesto dal suo ruolo di capofila nel raggruppamento concorsuale che da essa prende nome. Ed è l'impostazione che a mio parere deve essere in particolare seguita nei corsi di laurea della Facoltà di Architettura orientati al progetto di architettura. Non seguire questa linea significherebbe accettare il declassamento della Tecnica a disciplina specialistica di secondo livello.

Ecco allora una bozza di definizione generale che in nessun modo intende togliere validità alla ricerca specifica che tutti noi coltiviamo: *oggetto primo della Tecnica delle Costruzioni ad Architettura è il controllo analitico delle possibilità e delle ragioni della struttura, intesa anzitutto come parte integrante della costruzione nel suo complesso e dell'ambiente che la accoglie.*

Chi mi legge a questo punto si sentirà in qualche modo disorientato. Non riuscirà cioè a comprendere il senso di un discorso dal quale emerge che la ricerca ad Architettura è di settore, come ad Ingegneria, e tuttavia che ciò non è quanto principalmente occorre.

La spiegazione del dualismo è semplice. Anzitutto è un fatto che la specializzazione, che sempre occorre per il progresso, consente di acquisire una grande varietà di risultati, anche se conduce a ripetizioni, alimentate da una corsa, senza opposizioni, al numero delle pubblicazioni. L'estensione, per altro verso, è difficile perché più ramificata e più esposta al rischio di perdita di scientificità.

Ciò posto, mi restringo ai soli aspetti di formazione. Devo allora soffermarmi sull'oggetto dominante della disciplina: la struttura di una costruzione.



## Errore e imprecisione

Questa struttura non è la Ferrari in Formula 1. Quest'ultima è un oggetto realizzato in ubbidienza a precise regole e limitazioni, con l'obiettivo di vincere la corsa. La sua configurazione di base è sostanzialmente predeterminata, come assemblaggio di parti in genere univocamente localizzate con funzioni ben definite e non è quasi in discussione. L'affinamento di ogni parte è viceversa continuo, con sottili correzioni che ne modificano, già nel corso di un anno di gare, le prestazioni.

La struttura di una costruzione è quasi l'opposto. Già la sua configurazione di base è all'inizio del tutto indefinita. Così è nella scelta fra varie possibili combinazioni di una ricca varietà di componenti. E così è principalmente per gli aspetti più qualitativi, dovendo la soluzione esprimere la *consistenza materica* delle varietà del progetto.

La norma allora può solo e semplicemente garantire una corretta quantizzazione *a scelte concluse*, in quanto tali scelte sono il risultato di valutazioni quasi del tutto estranee alla *misura*.

Per altro verso la struttura è un fatto concluso non più affinabile come la macchina e ciò comporta, al di là di quanto detto sulle scelte iniziali, che essa è in genere molto più lontana da un'ideale perfezione di quanto normalmente si pensi. Anche il più accurato metodo di *verifica* probabilistica non può escludere l'imperfetto controllo: delle effettive proprietà della struttura come realizzata; delle sue modifiche per degrado; della sua risposta ad azioni mai molto note; della sua capacità di portare in conto l'eccezionalità.

Quindi: scelte iniziali spesso qualitative ed intrinsecamente incerte; e verifiche di secondo livello poco affinabili nel tempo con controlli di funzionalità, quindi ancora piuttosto imprecise.

Quanto accade può allora essere sintetizzato nella relazione fra due parole: *errore* e *imprecisione*. Ed infatti già all'allievo è proibito l'errore, come infrazione della rigida regola quantitativa, mentre anche l'esperto rinuncia spesso al trattamento dell'imprecisione. Così accade che la norma imponga varie decine di combinazioni delle possibili azioni (si vedano le nuove norme sismiche), ignorando classificazioni ordinali, delimitazioni e principalmente *ordini di grandezza*.

Le norme dunque non alimentano un'estesa conoscenza, nel senso

detto. Tale conoscenza in particolare:

- 1) Non può discendere dal loro contenuto. Le norme, infatti, forniscono soltanto *regole da rispettare*. Ma cosa è una regola? Il Devoto-Oli la definisce: «un riferimento normativo dell'agire indotto dalla reale o presunta costanza del fenomeno [...] regola è qualsiasi norma in quanto implica misura [...] o in quanto riconducibile ai concetti di ordine e di regolarità». La norma controlla quindi soltanto la misura.
- 2) Non può discendere dalla loro organizzazione. E qui devo dire che non condivido la tendenza diffusa a normare con regole molto specifiche, anche quando la teoria di base non è ancora consolidata. Un difetto accentuato dalla tendenza a presentare la regola senza giustificazioni, quasi invito all'automatismo, con il computer signore e domino. L'ho constatato proprio in relazione alle norme sulle strutture murarie storiche. Qui ho finanche trovato una lunga formula da rispettare che al controllo è risultata la conseguenza di una semplice *equazione di equilibrio!*

In breve, ormai è chiaro il mio pensiero. La Tecnica delle Costruzioni rischia di tendere, con norme che ormai occupano una libreria, ad un progressivo declassamento.

### **La situazione come fatto e come problema**

L'esigenza di attenzione al fatto storico (e per esso all'esperimento) che ho ricordato poggiava sulla convinzione che esso aprisse più ampi spazi alla conoscenza, almeno in un settore del costruito. Qui il rinvio del modello meccanico caratterizzava la situazione-monumento come meritevole di approfondimenti più ampi per intrinseche indeterminazioni in relazione alle sue ragioni, alle tecniche costruttive ed alle particolarità dell'ambiente del tempo. La conoscenza del monumento si presentava quindi come problema nel senso di Dewey<sup>3</sup>: «come situazione indeterminata che costituisce il punto di partenza dell'indagine».

Il raccordo di questo dato di fatto con i risultati della precedente riflessione intorno al termine "tecnica", consente di tradurre a livello di formazione: nell'insegnamento della Tecnica delle Costruzioni è anzitutto richiesta attenzione alla *intrinseca complessità della situazione*

---

<sup>3</sup> J. DEWEY, *Logic. The Theory of Inquiry*, Holt and Co., New York 1938.

*singolare*, non ancora modellata nei suoi vari aspetti. E questa è fatto, sia esso storico o attuale, mentre il suo trattamento appartiene alla logica del problema da risolvere, alla luce dei necessari riferimenti.

Guardiamo la questione da un altro punto di vista.

Presumibilmente tutti concordano sul fatto che la crescita della conoscenza dell'allievo in discipline di fisica in senso lato, a scala umana, debba attuarsi attraverso un giusto equilibrio di processi razionali di analisi e di sintesi.

L'analisi, come interpretazione dell'oggetto-progetto attraverso gli elementi e le ragioni più semplici che lo esprimono è il metodo che deve dominare alla conclusione del percorso didattico. Essa insegna a risolvere, evidenziando e delimitando le possibilità. Tuttavia una tale attività, almeno nel settore strutturale, non si improvvisa. La crescita della conoscenza deve quindi necessariamente iniziare con l'assimilazione, da parte dell'allievo, di un sistema organico di riferimenti. L'inizio del processo di crescita è dunque necessariamente sintetico, con attenzione ai costrutti, alle leggi ed agli esperimenti di base. Il punto è però che questa fase in qualche modo di *attesa di iniziative* deve essere *breve*, lasciando spazio appena possibile all'analisi, come studio del fatto complesso.

*Trovare i modi per un percorso di sostanziale conciliazione, in termini di tempo, fra analisi e sintesi*, questo è a mio parere l'obiettivo del percorso didattico dell'area strutturale ad Architettura.

Un percorso completo di formazione nel senso detto era certamente realizzabile prima delle varie riforme, quando le discipline dell'area comprendevano in sequenza: Fisica (Statica), Meccanica razionale e Statica grafica, Scienza delle Costruzioni I e II, Tecnologia dei materiali e Tecnica delle Costruzioni. Insegnamenti accompagnati inoltre da Chimica e Mineralogia in settori collaterali. Oggi la situazione è ben più triste, con pochi crediti disponibili nel settore. La conseguenza è il rischio di non riuscire a chiudere i cicli di formazione nei vari corsi di laurea. Un rischio accentuato dal sussistere di continui inviti ad ubbidire soltanto ad una logica di mercato. E qui basta citare la confusione che oggi sussiste intorno all'interpretazione del ruolo della laurea triennale, con la tendenza a ridurne il compito di formazione critica a vantaggio della visione di un architetto pronto all'uso. Catastrofe nazionale. Basta pensare a tre anni di formazione di libertà di pensie-

ro, contro quaranta di non sempre libera attività di lavoro.

Ho detto di una prima breve fase di sintesi. Ciò fatto, gli elementi e gli aspetti ulteriori di conoscenza nel settore possono a mio parere essere conquistati dall'allievo prevalentemente in due modi: 1) attraverso l'acquisizione, per illustrazione del docente attuata in tempi sufficientemente rapidi, di ramificazioni (teorie e modelli) che conseguono in modo più o meno stretto da riferimenti (concetti, costrutti, principi, leggi ed esperimenti) più generali; 2) attraverso la conquista, con impegno di attività, di risultati di problemi teorici e pratici, emergenti da fatti, risolti (con l'aiuto del docente), con progressivo riconoscimento di teorie e modelli, alla luce dei detti riferimenti.

Io penso che la prima linea di lavoro meriti poco spazio, almeno nei primi corsi. È inutile estendere immediatamente, chiedendo all'allievo di acquisire in tempi brevi una visione sintetica di intere branche di una disciplina. La capacità di matematizzazione in progressione, appunto verso sintesi più ampie, è posseduta da pochi; e così ai più tocca una passiva acquisizione. Il quadro astratto e sufficientemente generale spetta agli ultimi anni (e quindi parte della Scienza dovrebbe li trasferirsi), mentre le forme più puntuali e più episodiche che da esso derivano sono compito, come differenza in piccolo nel senso di cui sopra, di una specializzazione post-laurea. Ed è noto che il laureato ben formato le conquista nei pochi mesi dei corsi di specializzazione che l'industria, gli studi e l'impresa sempre promuovono.

La seconda linea di lavoro è la più efficace. Risolvere è parola ben più forte di acquisire. Lo dice Popper<sup>4</sup>: «tutta la vita è risolvere problemi».

La risoluzione, con attività dell'allievo, di situazioni-problemi prima semplici, poi più complessi, è strumento di crescita controllata, in quanto automaticamente misura le capacità acquisite. In più il docente ottimizza il suo impegno cogliendo gli scogli e fornendo i consigli per superarli. Con la risoluzione del resto l'allievo *percepisce sempre il suo sforzo come primo passo per maggiori approfondimenti e sperimenta subito la ricerca.*

---

<sup>4</sup> K.R. POPPER, *Alles Leben ist Problemlosen: über Erkenntnis, Geschichte und Politik*, R. Piper GmbH & Co. KG, Munchen 1995, p. 336. K.R. POPPER, *Tutta la vita è risolvere problemi: scritti sulla conoscenza, la storia e la politica*, premessa all'ed. it. e trad. dal tedesco di D. Antiseri, Rusconi, Milano 1996.

I due indirizzi (sintetico e analitico) di formazione dovrebbero quindi essere attivati in parallelo, o quasi in parallelo, fin dai primi anni di studio. Tanto sarà possibile se si deciderà di lavorare insieme (docenti di Scienza e Tecnica) per definire in dettaglio quali sono i comuni riferimenti fondamentali. Questi probabilmente richiedono meno tempo di quanto si creda. In merito, anche per chiarezza, avanzo una mia indicazione.

## I riferimenti

Sono riferimenti *il lessico e la base strumentale del linguaggio scientifico di una disciplina che precedono la costruzione dei modelli e delle teorie*. È riferimento il concetto di *continuo* ed è modello non sempre utilizzabile *la meccanica del continuo*. Il riferimento è quindi qualcosa di sufficientemente certo e di poco elaborato. In tal senso, magari con un poco di forzatura, lo sono anche risultati di esperimenti fisici e mentali, se acquisibili con immediatezza.

Provo ora a introdurne alcuni. Si potrà così cominciare a verificare, come ho detto, se è possibile costruire con essi un quadro concordato di base nel settore.

Comincio con i *concetti* e mi riferisco ai concetti elementari, dotati di una loro autonomia. Scelgo poi la definizione di Bridgman<sup>5</sup> per orientare il discorso.

Bridgman intende per concetto *un gruppo di operazioni*. «Se il concetto è fisico, come nel caso della (concetto di) lunghezza, le operazioni sono effettive operazioni fisiche cioè quelle mediante cui si misura la lunghezza; se il concetto è mentale, come nel caso della continuità matematica, le operazioni sono operazioni mentali, cioè quelle mediante cui determiniamo se un dato insieme di grandezze è continuo o no. Non intendiamo con ciò che vi sia sempre una divisione netta e fissa fra concetti mentali e fisici».

Bridgman elenca e discute (resto fuori del campo della teoria della relatività) i concetti di lunghezza (di spazio), di tempo, di causalità, di forza, di identità, di velocità, di massa, arrivando fino al concetto, me-

---

<sup>5</sup> P.W. BRIDGMAN, *The logic of modern physics*, The Macmillan Co., New York 1927, p. 228. P.W. BRIDGMAN, *La logica della fisica moderna*, introduzione e trad. it. a cura di V. Somenzi, Bollati Boringhieri, Collana Universale scientifica, Torino 1965, vol. 6.

no immediato, di energia meccanica. Alcuni di questi concetti non meritano probabilmente, proprio per la loro immediatezza, una specifica attenzione ad Architettura. Altri devono essere aggiunti a fornire all'allievo un primo quadro di riferimento. Così i concetti di resistenza, deformazione, fragilità e duttilità, stabilità, stato limite ecc. e concetti mentali come il continuo, l'infinitesimo, il passaggio al limite ed i concetti di funzione, di derivazione e di integrazione.

Per parte mia vorrei solo aggiungere che con la parola *concetto* si dovrebbe comunque intendere qualcosa che deve essere anzitutto compresa nella sua autonoma essenzialità, nel senso di che cosa essa sia. In ogni modo, se l'operatività nel senso di Bridgman significa esperimento, fisico o mentale, vuol dire che già il primo passo ha senso se accoglie una possibilità di *risoluzione*. Quindi il *problema*, già all'inizio, non è lontano.

Si noti che molti di questi concetti sono affrontati nei corsi di matematica e quindi la loro assimilazione è bagaglio da acquisire al primo anno, prima dell'inizio delle discipline strutturali. I concetti si chiariscono con alcune *regole-definizioni* fondamentali. Esse sono ancora prevalentemente di matematica. Sono tali la rappresentazione cartesiana, la funzione univoca, le regole di derivazione, di integrazione e di sviluppo in serie ecc.

Segue il *costrutto*. Abbagnano<sup>6</sup> lo definisce: «entità [...] mai direttamente osservabile o direttamente inferita da fatti osservabili». Esso serve: «a costituire un oggetto ideale per la ricerca, cioè a promuovere il progresso dell'osservazione e a costituire una base per la previsione e la spiegazione dei fatti». Così si può cominciare a pensare, a sostegno di un maggiore approfondimento, che siano costrutti: i modelli elementari; il corpo rigido ed il vincolo liscio; la tensione; il vettore forza concentrata; il tensore; la quantità di moto; il materiale isotropo ed ortotropo, elastico lineare, elastico-viscoso ed elastico-perfettamente plastico; e così via.

Si noti ora che molti di questi costrutti, seppure non direttamente inferiti, come detto, da fatti sperimentali, ne costituiscono spesso un'idealizzazione. Essi sono allora leggibili come frutto di esperimenti

---

<sup>6</sup> N. ABBAGNANO, *Dizionario di filosofia*, TEA (Tascabili degli Editori Associati S.p.A.) su licenza UTET, Milano 1993.

fisico-mentali, con il fatto pratico introdotto in un processo teorico quasi di tendenza al limite.

Seguono *leggi e principi*, non sempre fra loro distinguibili. Così si parla di legge di azione e reazione e di principio di sezionamento; di principio di conservazione della massa; di legge dell'equilibrio dinamico; di legge dell'attrito; dei principi di Archimede e di Pascal; del principio di conservazione dell'energia; del teorema o principio dei lavori virtuali; del principio di De Saint Venant; dei principi di estremo; e così via. Leggi e principi hanno ovviamente (spesso ma non sempre) precise basi sperimentali.

Infine gli *esperimenti generali*, fisici e mentali. È esperimento generale un esperimento che abbia la proprietà di fornire risultati destinati a costituire la base, appunto di riferimento, di una molteplicità di esperimenti più complessi, a sostegno delle teorie. Lo sono le prove fondamentali per ricavare i legami costitutivi monodimensionali, i risultati chiaramente leggibili (non i modelli ad essi associabili) di prove sperimentali su elementi strutturali molto semplici e tipizzati; lo sono anche gli esperimenti fisico-mentali: di costruzione dei cicli di isteresi; di previsione dei modi di evoluzione dell'adattamento plastico e dei quadri fessurativi; e lo sono finanche gli esperimenti mentali di costruzione dei modi naturali di vibrazione dei sistemi complessi. E qui l'allievo intuisce, prevede e comincia a sperimentare il problema.

La bozza di elencazione che ho riportato poteva forse essere evitata e certamente ha le sue imprecisioni. Ma mi è servita per mostrare che il *riferimento*, pur con il suo carattere di base, si apre al *problema*, prima semplice e *ripetitivo*, poi più complesso e *singolare*, per cui i due rami di una prima formazione, che precedentemente ho mantenuto per coerenza distinti, finiscono in pratica per coesistere fin dall'inizio.

### **Materiale per una proposta**

Si noti ora che, se si assume che debbano essere subito acquisiti sia i riferimenti, come strumenti indispensabili di avvio della conoscenza, sia i fenomeni di base, come condizioni indispensabili per la stessa esistenza delle strutture, e se si accetta l'esigenza di un parallelismo, appena possibile, fra analisi e sintesi, si arriva ad una completa modifica dell'organizzazione tradizionale dei corsi di Statica, Scienza e

### Tecnica ad Architettura.

Ad esempio, a me sembra che dovrebbe essere ben fissato in tempi brevi nella mente degli allievi tutto ciò che richiede *una comprensione in sé, prima di ogni possibile estensione e di ogni procedura*, e quindi dovrebbero essere ben fissati sia i concetti ed i costrutti di cui ho detto che i ruoli fondamentali per lo studio delle strutture di alcuni aspetti dominanti della matematica e della fisica che qui elenco:

- il ruolo combinatorio della sovrapposizione degli effetti;
- il ruolo semplificativo degli sviluppi in serie di Taylor e di Fourier;
- il ruolo dominante dell'analisi dimensionale;
- il ruolo classificatorio del moto armonico;
- il ruolo della scrittura a livello infinitesimale delle leggi;
- il ruolo dell'attrito, condizione irrinunciabile per l'equilibrio nostro e di tutto ciò che ci circonda, e condizione base per l'equilibrio delle strutture murarie;
- il ruolo della duttilità, con il conseguente adattamento plastico, condizione di base per la caratterizzazione del materiale come materiale strutturale;
- i più semplici cinematismi di possibile collasso. Non solo aspetti di base della moderna progettazione antisismica ma anche immediati e potenti strumenti per indagare sulle correlazioni fra equilibrio e resistenza. Ed è noto che le prime forme approssimate di calcolo a rottura condotte con essi hanno largamente preceduto nel tempo lo studio in campo elastico delle strutture;
- il ruolo dominante dell'equilibrio e per esso le distribuzioni equilibrate di sforzo nelle strutture iperstatiche. Prima necessaria ricerca, a mio parere, per la comprensione del comportamento di molte strutture e mezzo immediato di prima progettazione di strutture duttili, in pratica del tutto ignoto a molti architetti;
- le basi del comportamento viscoso dei materiali. Altro fattore che precisa il materiale come materiale strutturale;
- il concetto di *onda di deformazione*. Primo strumento per comprendere *il passaggio al limite* con l'interpretazione statica dell'azione;
- gli ordini di grandezza della risposta dinamica di sistemi semplici ad azioni impulsive. Primo strumento per accostarsi, con la dinamica, ai legami rigidità-resistenza ed al significato più generale di *azione* sulla costruzione;



- e principalmente: le molte possibilità di valutazione di *ordini di grandezza*.

E comunque, non dovremmo più in generale domandarci se la conoscenza di questi riferimenti di base non debba precedere la capacità di controllo delle molte possibilità della rappresentazione, delle molte regole di derivazione e di integrazione, dei vari aspetti della teoria delle funzioni, dell'insieme di tutte le possibili articolazioni dei cinematicismi, di tutte le possibili implicazioni dell'analisi tensoriale, e così via? Come dire che la *completezza* debba essere rinviata.

Ma ho paura che in questa direzione non tutti sarebbero disposti a seguirmi. Dico allora che il parallelismo che qui propongo ha anche un ultimo pregio. Consentirebbe ai docenti di Statica, Scienza e Tecnica un reciproco completarsi o meglio, più scherzosamente, una simpatica concorrenza.

In ogni modo dovrebbe ormai esser chiaro cosa occorra affinché l'allievo architetto possa muoversi con capacità nel settore fra il mondo reale (con l'estensione ad aspetti che ad Ingegneria sono trattati nei corsi di Fisica) e lo spazio duale più astratto (con estensione a questioni di Meccanica Razionale), che comunque è punto d'arrivo della formazione.

Sono anche convinto che in quest'ottica potremo trovare più facilmente appoggio affinché le discipline strutturali acquisiscano un più ampio spazio nei piani di studio, almeno nei corsi di laurea che prediligono l'attenzione al progetto di Architettura.

### **Senso comune ed ordini di grandezza**

Il trattamento congiunto per riferimenti e situazioni-problemi:

- mobilita, con la risoluzione, la tendenza all'attività dell'allievo;
- riduce l'ascolto, come dottrina imposta;
- consente *il progressivo affinamento del senso comune*; ovviamente del senso comune di un allievo di Architettura;
- è processo induttivo, con tentativi ed errori, che consente di cogliere i limiti di modelli e teorie, primo passo per il progresso della scienza.

Cito a conforto, riprendendo quanto ho scritto in altra occasione:

Quine<sup>7</sup>: «La scienza è prolungamento del senso comune».

Mach<sup>8</sup>: «Ogni individuo singolo [...] nel suo crescere fino alla piena coscienza, trova già pronta una visione del mondo compiuta, che egli non ha deliberatamente contribuito a edificare [...] Tutti debbono cominciare da qui».

Popper<sup>9</sup>: «La Tecnica è attività che sviluppa la conoscenza, con tentativi ed errori, al fine di risolvere problemi».

Ma vi è molto di più. Esiste infatti una naturale attitudine dell'uomo ad intuire (intuito sensibile, legato all'oggetto fisico, non la creatività dell'intuito intellettuale) il modo di evolversi dell'esperienza fisico a scala umana, anche complesso. Una dote che non è abitualmente ricordata ma che è strumento primario di conoscenza. Questa dote comincia a semplificare a poco alla volta il fatto ancora non scientificizzato, aprendo spazio all'astrazione del modello. Si sviluppa così naturalmente, non soltanto la capacità di comprendere che è dal fatto, e *necessariamente in un secondo tempo*, che il modello deve essere estratto, ma anche la capacità analitica di costruire il modello con il soccorso delle leggi. E quindi il mio motto in aula: *“Tutto ciò che può essere fatto non deve essere insegnato”*.

Infine una riflessione sugli ordini di grandezza.

Non vi è dubbio che chi controlla gli ordini di grandezza nei vari problemi possiede uno strumento essenziale per produrre scelte. Ora è poco noto, o è poco detto, che molti ordini di grandezza sono acquisibili con una certa facilità anche da non esperti. Il punto è però che in genere il non esperto *rinuncia*. In breve egli non ha speranza di poter riuscire. È convinto, a torto, che il problema scientifico appartenga tutto, ed in tutte le sue forme, ad un mondo di specialisti. Eppure si può verificare che esistono spesso *strade collaterali* di primo accostamento, a prima vista del tutto imprevedibili.

Dico allora che l'impegno per la conquista degli ordini di grandez-

---

<sup>7</sup> W.V.O. QUINE, *From a logic point of view; nine logico-philosophical essays*, Harvard University Press, Cambridge (Massachusetts) and London 1953.

<sup>8</sup> E. MACH, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*, F.A. Brockhaus, Leipzig 1883. E. MACH, *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, trad. it. introduzione e note di A. D'Elia, Bollati Boringhieri, Collana Universale scientifica Boringhieri, vol. 161, Torino 1977.

<sup>9</sup> K.R. POPPER, *op. cit.*

za è una splendida esercitazione, non solo di *Tecnica*, ma forse anche di vita. È in breve costruzione di autofiducia, con l'intelligenza che si afferma, non accettando preclusioni.

Qui, lo ripeto, la consuetudine di lavoro è limitata dalla naturale difficoltà dello stesso docente ad accettare di esplicitare una consistente imprecisione. E tuttavia il controllo rapido con ordini di grandezza può rendere anche *felici*, per ricordi arricchiti da lunghe esperienze, molti colleghi di altri settori ad Architettura.

Concludo questa premessa precisando che questo libro è rivolto sia a coloro che devono affrontare per la prima volta la concretezza della *Tecnica delle Costruzioni*, sia a coloro che desiderano acquisire una più ampia capacità operativa nella disciplina.

A tutti consiglio di avere pazienza accettando la lettura della Parte I, in genere richiamo di quanto dovrebbe essere già noto (e così è certamente per gli aspetti elementari che richiamo all'inizio), ma anche occasione, con correlazioni a fatti concreti, per una riorganizzazione di concetti essenziali. Si noterà allora che ho sempre cercato, come ho detto, di appoggiarmi quando possibile al *senso comune* e, per altro verso, di privilegiare l'essenzialità del *concetto*, da comprendere in sé, rispetto alle esigenze di completezza e di dimostrazione. Due obiettivi che uniti all'opportunità, come anche ho detto, di accennare subito a certi aspetti applicativi sono stati una prima ragione che mi ha spinto a sviluppare questa Parte I a sostegno dei problemi della Tecnica.

Vi è però una ragione più forte. Io spero che i riferimenti, con la loro semplificazione e mancanza di completezza, possano funzionare come *basi per l'attività*. Con ciò intendo che il breve quadro che essi propongono dovrebbe fornire allo studioso un primo orientamento che gli consenta di cominciare ad operare da solo: estendendo, confrontando e principalmente approfondendo i vari aspetti della teoria.

Anche la Parte II, in prevalenza rivolta ad aspetti della Tecnica, ha carattere di riferimento e segue la logica della Parte I, cercando di mostrare la semplicità dell'accordo fra alcune teorie, certi esperimenti di base e le indicazioni in normativa.

Con essa lo studioso dovrà cominciare a sviluppare la sua personale iniziativa affrontando l'attività pratica di cui ai problemi che seguono.



## PARTE I

### **Alcuni semplici riferimenti di base**



## Introduzione

I riferimenti che seguono non hanno alcun carattere di completezza, né sono ordinati in modo sistematico. Se tale fosse stato lo scopo sarebbero occorsi interi libri. Qui invece sono introdotti in modo semplice alcuni capisaldi del discorso scientifico, con l'obiettivo di fornire o di richiamare, quel minimo che è indispensabile per avviare appena possibile l'iniziativa del lettore intorno ai problemi della Meccanica strutturale.

In seguito ho sempre cercato di evidenziare la naturalezza del percorso scientifico, quasi unica possibile via. È quanto i livelli di conoscenza oggi acquisiti consentono di constatare, spesso in contrasto con le incertezze ed i rinvii dell'evoluzione nel tempo.

I riferimenti, dopo un breve richiamo storico, sono talvolta introdotti con una descrizione del programma di conoscenza. Seguono quindi le proposizioni, con le necessarie definizioni, a guida degli sviluppi. Aggiungo talvolta commenti ed esempi, e sintesi riassuntive. L'ottica dominante è limitare l'attenzione a quanto effettivamente occorre.

Ho poi cercato sempre di distinguere fra quanto deve essere anzitutto compreso, per significato e per ruolo (esempio: il concetto di infinitesimo: forse la più potente conquista della matematica nell'era moderna), e quanto ha una funzione essenzialmente strumentale (esempio: il momento di inerzia). Quando possibile ho anche cercato di distinguere fra concetti, costrutti e leggi, in accordo con quanto ho detto in premessa.

L'esposizione è all'inizio più lenta e più ricca di applicazioni concrete. Tanto ho fatto al fine di aiutare il lettore poco incline alla matematica, a superare lentamente le difficoltà del passaggio da una visione qualitativa di certi fenomeni ad una visione quantitativa dei modelli della scienza. Sono così a poco a poco introdotte le prime astrazioni: dall'oggetto reale ai simboli della sua rappresentazione; dall'evento alla sua convenzionale descrizione.

Il concetto di variazione ha, come ovvio, il ruolo dominante. È il

fenomeno fisico che lo richiede. Comprendere i molti possibili giochi delle variazioni, nello spazio e nel tempo, è già un primo passo per comprendere la disciplina. La funzione esplicita introduce in tal senso il discorso, evidenziando i più semplici legami fra i parametri in gioco.

Ho poi scelto di esporre in modo più ampio la teoria dei vettori. È questa in realtà una costruzione assiomatica. Ho preferito peraltro un'impostazione più vicina alla Fisica, al fine di mostrare che le applicazioni conducono spesso a scelte che devono essere ben comprese. Ed in verità la capacità di ben distinguere fra vettori applicati, cursori e vettori liberi, e di ben gestirli, è premessa essenziale per la risoluzione di molti problemi.

Seguono i concetti fondamentali di limite e di infinitesimo, di derivata ed di integrale, di sviluppo in serie. Le equazioni differenziali sono quindi appena introdotte. Quelle lineari a coefficienti costanti sono peraltro presentate con la tecnica per la loro risoluzione. Ed in verità esse probabilmente costituiscono il principale strumento per lo studio dei modelli della Tecnica.

Seguono le leggi e gli esperimenti di base, prime regole del mondo delle strutture. Qui si noterà che i molti aspetti dell'equilibrio e della compatibilità geometrica non sono discussi. Ho giudicato infatti, ed è l'ottica di questo libro, di poterli porre nel Volume II come problemi.

Anche il discorso di base della Scienza delle Costruzioni, dalle tensioni e deformazioni ai legami costitutivi, è qui ridotto al minimo indispensabile per procedere oltre. Non avevo altra scelta per non appesantire. Del resto è mia convinzione che la Meccanica del continuo possa essere, in genere, ben compresa solo se presentata più tardi, quando l'attività nel settore dell'allievo si è già sviluppata intorno a molti problemi della Tecnica.

Concludono questa Parte I i concetti di lavoro, la legge dell'attrito, il principio dei lavori virtuali ed un cenno ai principi variazionali in elasticità lineare.

Ovunque, lo ripeto, l'attenzione al concetto prevale sull'esigenza di dimostrare.



## L'operazione primitiva di proiezione. I costrutti: seno, coseno e tangente

### 1.1. Introduzione

La proiezione ortogonale è operazione quasi istintivamente eseguita da chiunque si trovi a dover rappresentare con precisione su un foglio la lunghezza e l'inclinazione sull'orizzontale di un segmento.

È infatti molto più semplice misurare con la riga la lunghezza delle proiezioni di un segmento su due assi ortogonali che misurare l'angolo di inclinazione del segmento con il goniometro. Le funzioni trigonometriche seno, coseno e tangente sono allora la semplice misura dei rapporti che l'operazione fornisce. Tutto in breve è quanto di più naturale, e principalmente di più semplice, si possa fare.

Tuttavia la sistemazione di tali operazioni di misura non è conquista molto antica. Boyer<sup>1</sup> ricorda che, se è vero che il concetto di cotangente (inverso della tangente) era in parte già noto agli egizi, e se è vero che i greci fecero largo uso di operazioni di trigonometria, è un fatto che nelle tavole trigonometriche dell'Almagesto di Tolomeo, nel II secolo della nostra era, il riferimento non era ancora il seno ma la corda dell'arco di cerchio; ed in verità sembra che solo in India, con l'opera Surya Siddhanta, nel IV-V secolo, il termine seno compaia esplicitamente.

Quanto alle coordinate, lo stesso Boyer osserva che l'impiego di rette di riferimento per la misura è già riconoscibile nell'opera di Apollonio di Perga, intorno al II sec. a.C., ma che occorre attendere Descartes (Cartesio), nel 1600, per una chiara indicazione delle coordinate di un punto.

Come si vede, certe operazioni elementari di matematica sono state sistemate lentamente, senza scoperte improvvise.

---

<sup>1</sup> C.B. BOYER, *Storia della Matematica*, Collana Gli Oscar A. Mondadori, Prefazione all'ed. it. di L. Lombardo Radice, trad. it. di A. Carugo, Milano 1982.

Le funzioni trigonometriche non sono oggi patrimonio di tutti. È un fatto che un laureato in discipline umanistiche conosce certamente l'angolo (è senso comune) ma probabilmente non ricorda il significato del più utile coseno dell'angolo.

Strano destino di una matematica non sempre compresa nella naturale essenzialità dei suoi passi!

## 1.2. La proiezione ortogonale

L'uomo ha ben presto compreso il concetto di *lunghezza*, come processo operativo di misura della distanza fra due punti di un oggetto.

Una lunghezza, vista in sé, è soltanto una *grandezza scalare*, rappresentata con un numero. Tuttavia lo scalare non può descrivere *l'orientamento nello spazio di una lunghezza*. Allora occorre qualcosa di più. Nasce così l'esigenza di collocare l'oggetto nello spazio ponendolo in relazione con un *sistema di riferimento*.

Il riferimento non può essere sempre assunto come fisso nello spazio. Talvolta è un riferimento mobile. È evidente infatti che in presenza di moto conviene utilizzare due riferimenti: un primo fisso ed un secondo mobile e solidale con l'oggetto da rappresentare. Il riferimento che più semplifica la rappresentazione è spesso la terna cartesiana ortogonale. La proiezione di un punto con rette per il punto normali agli assi della terna è quanto di più semplice si possa immaginare di fare per la misura. Un punto nello spazio è così descritto con i valori delle sue tre coordinate sui tre assi del riferimento ortogonale. Un segmento di retta con i sei valori delle coordinate dei suoi punti estremi. Un segmento di retta del quale interessa solo l'orientamento, quindi suscettibile di traslazioni, con le tre differenze delle coordinate dei detti punti. La rappresentazione così attuata codifica numericamente e consente archiviazioni, cambiamenti di scala, analisi, e così via.

Può avere interesse una descrizione che distingua esplicitamente fra la lunghezza di un segmento ed il suo orientamento nello spazio. Nascono così le funzioni trigonometriche. Ad esse è assegnato il compito di relazionare le grandezze dei segmenti di retta con le grandezze delle loro proiezioni su piani e su una terna di assi ortogonali.

I punti nel piano o nello spazio possono assumere vari significati. Spesso concorrono a rappresentare una geometria. Altre volte descrivono enti connotati dai valori delle coordinate. Più in generale la rappresentazione di punti con coppie o terne di valori sugli assi specifica una *relazione* fra questi valori. Così si relazionano i valori di parametri rappresentativi di un fatto. Ovviamente una relazione può richiedere spazi a più di tre dimensioni. Oltre alla rappresentazione cartesiana sono possibili molte altre rappresentazioni geometriche.

Un esempio classico di rappresentazione cartesiana è quella in un piano del numero complesso  $a + ib$ , dove  $i$  è l'unità immaginaria ( $i = \sqrt{-1}$ ). Gli assi di riferimento divengono allora l'asse reale e l'asse immaginario, con le rispettive componenti  $a$  e  $b$  del numero. I numeri complessi sono peraltro più frequentemente rappresentati in coordinate polari.

È significativo che la grande semplicità di una rappresentazione per coordinate di punti si accoppi ad una grande ricchezza di possibilità. Sussistono, infatti, moltissime *tecniche di rappresentazione* che caratterizzano un settore di ricerca in continuo sviluppo. Così accade che molti cerchino quotidianamente di individuare i modi visivamente più efficaci, con diagrammi ed abachi, al fine di una descrizione.

In quanto segue i concetti sono esplicitati dalle singole operazioni.

#### PROIEZIONE ORTOGONALE SU UN PIANO

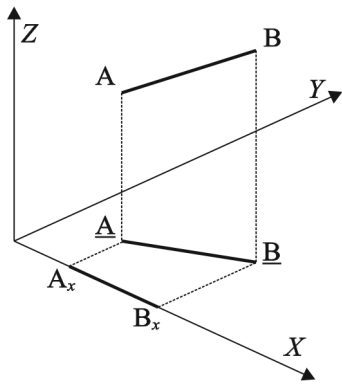
Un punto si proietta su un piano conducendo per esso la normale (la retta perpendicolare) al piano.

#### PROIEZIONE ORTOGONALE SU UNO DEGLI ASSI DI UN RIFERIMENTO CARTESIANO ORTOGONALE

Un punto si proietta su un asse conducendo per esso la normale all'asse. Si può anche proiettare il punto prima su un piano che contiene l'asse e poi proiettare la proiezione così ottenuta sull'asse.

#### *Commento*

Tutti abbiamo esperienza dell'ombra proiettata su una parete dal Sole e dell'operazione di riflessione di un'immagine in uno specchio. E tutti ricordiamo dai primi tempi di scuola l'impiego della squadretta. Con questa tracciavamo le perpendicolari a due rette ortogonali di ba-



piano e nello spazio, è immediata. I punti e le rette sono i primi simboli astratti che traducono l'oggetto reale nella rappresentazione convenzionale del disegno.

### *Commento*

Da quanto detto risulta con evidenza che le *tre* lunghezze delle proiezioni di un segmento sono sufficienti per descriverne l'orientamento, ma non la precisa collocazione nello spazio. Per questo secondo scopo il segmento deve essere precisato attraverso le *sei* coordinate dei suoi punti estremi.

### *Alternative*

In certe circostanze può convenire il riferimento a sistemi diversi di coordinate. Così le rappresentazioni con assi rettilinei e non ortogonali fra loro possono facilitare la visione spaziale degli oggetti.

È significativo che la proiezione di un oggetto su un piano coincida con l'ombra prodotta sul piano da una lontana sorgente di luce. Così la geometria ubbidisce alla fisica, e viceversa.

Infine possono impiegarsi le coordinate polari, con le quali un punto è rappresentato dal segmento sua distanza dall'origine e dagli angoli di tale segmento con due dei tre piani definiti dagli assi (il terzo angolo è funzione degli altri due). Le coordinate polari possono facilitare la rappresentazione di figure curve.

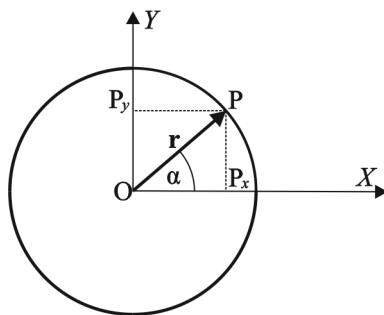
## **1.3. Trigonometria piana**

Molti problemi richiedono che si descriva l'orientamento di un ente nello spazio. L'ente più semplice è il segmento di retta.

L'operazione di proiezione precedentemente sviluppata ha già mostrato che l'orientamento di un segmento è descritto dalle sue proiezioni sui tre piani di un riferimento ortogonale e sugli assi.

Può però interessare anche il verso del segmento. Lo vedremo ben presto con i vettori. Potrà allora interessare l'angolo che il segmento, col suo verso positivo, forma con gli assi orientati.

L'angolo a sua volta rinvia al concetto di periodo. Sappiamo infatti che l'aggiunta di un angolo giro conduce le componenti di un segmen-

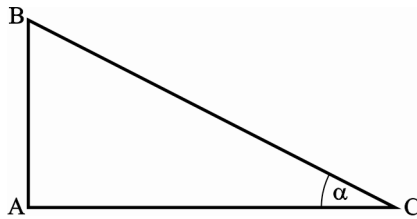


$$\text{sen}\alpha = AB/BC \quad \text{cos}\alpha = AC/BC$$

$$\text{tan}\alpha = AB/AC$$

$$AB^2 + AC^2 = BC^2 \quad BC^2 \text{sen}^2 \alpha + BC^2 \text{cos}^2 \alpha = BC^2$$

$$\text{sen}^2 \alpha + \text{cos}^2 \alpha = 1$$



$$\frac{AB}{\text{sen } \alpha} = \frac{BC}{\text{sen } \beta} = \frac{AC}{\text{sen } \gamma}$$

