

# Architettura strutturale ed etica tecnologica

di Massimo Majowiecki

Dida: IV di copertina  
Approccio olistico alla progettazione

## Architettura strutturale

In un interessante trattato del 1956, Francesco Vera affermava che lo sviluppo della scienza e della tecnica nella civiltà occidentale non era correlato nel tempo come, al contrario, avveniva, con armonia e coerenza, nelle civiltà orientali.

Dall'epoca greco-romana, infatti, inizia un fenomeno di accelerazione della tecnologia rispetto all'associato campo scientifico. Questa dicotomia diventa molto evidente nell'epoca moderna dove ricerca e produzione tecnologiche non sono più "filtrate" o integrate con continuità dal parallelo processo di sintesi scientifica. Le scoperte tecniche non accompagnate da controllo scientifico spesso risultano "inquinanti"; l'innovazione tecnologica ci appare discontinua e si presenta come rivoluzione industriale manifestandosi in maniera discreta e impulsiva, dopo aver raggiunto una soglia inerziale rappresentata dalla tradizione e convenzionalità scientifica corrente.

Dall'ultima rivoluzione industriale il processo tecnologico è stato rapidissimo. Mentre nello stesso periodo si è passati, tanto per citare esempi paralleli in altri campi della tecnica, da velocità ferroviarie pari a cento chilometri orari a velocità superiori ai trecento chilometri orari, da navi di ottantamila tonnellate a navi da due milioni di tonnellate, da aerei a elica a veicoli lunari, nel campo degli edifici alti si è giunti a costruire fin oltre i quattrocento metri (ad esempio la Sears Tower di Chicago e le torri Petronas di Kuala Lumpur), e si progettano ora megastrutture di oltre ottocento metri di altezza. Parallelamente, le luci massime dei ponti in cemento armato sono state portate dai centottantasette metri degli archi del ponte di Plougastel (Brest) ai trecentoquattro del ponte della Baia di Sydney, così come nel campo dei ponti metallici si stanno realizzando campate di circa duemila metri in Giappone e ponti a campata unica di tremila metri per lo Stretto di Messina e a multicampata di 5000m. per lo Stretto di Gibilterra.

Il contributo tecnologico degli ultimi anni ha attraversato l'architettura iniziando un processo di innovazione e, per certi versi, influenzandola talmente da essere soprannominato "processo di ingegnerizzazione dell'architettura". In realtà, il fenomeno può essere interpretato come una nuova, storica, sintesi scientifica, ottenuta mediante l'integrazione del contenuto tecnologico, apportato specialmente dai nuovi materiali di costruzione, dall'associazione di questi con tipologie e metodologie costruttive appropriate (nominate Hi-tech) e da una metamorfosi del linguaggio di progettazione prodotta dalle tecniche informatiche interattive grafiche (CAD).

## I materiali e le tipologie costruttive

Con la attuale disponibilità di materiali metallici quali gli acciai ad alta resistenza neri o inox, le leghe di alluminio ed il titanio, di materiali ceramici, di laminati, di compositi di alta tecnologia a matrice metallica (MMC), epossidica e polimerica (FRP) quali le fibre aramidiche ed al carbonio, fino agli avanzatissimi smart materials (recentissimi ritrovati che modificano le loro caratteristiche fisico-meccaniche se sottoposti a sollecitazioni elettromagnetiche e termodinamiche), associati a tipologie strutturali che possano fare lavorare i materiali essenzialmente in regime membranale di trazione con risposta meccanica in hardening geometrico, è stato possibile sviluppare una nuova tradizione costruttiva: le "strutture leggere".

Le realizzazioni più rappresentative di questa nuova tradizione costruttiva, nate dall'associazione di materiali ad alta tecnologia con schemi tensostrutturali ottenuti scientificamente dalle possibili configurazioni geometrico (iperboliche) tensionali (ellittiche), sono state ottenute nel campo degli alti edifici, nelle coperture e nei ponti di grandi dimensioni.

In particolare i sistemi strutturali di copertura, facilmente associabili ai momenti storici dell'architettura strutturale, si prestano ottimamente ad illustrare l'influenza innovatrice della scienza e della tecnica del costruire. È interessante notare la rappresentativa evoluzione storica (Fig.1), identificata dalla riduzione di tipo esponenziale dei pesi propri o pesi portanti strutturali, detti propriamente anche pesi morti (dead loads=DL) dagli Anglosassoni.

La causa principale degli enormi pesi strutturali impiegati dagli Assiri, dai Romani e durante il periodo gotico è da attribuirsi soprattutto ai modesti valori di resistenza/peso dei materiali impiegati. Mattoni e materiali litoidi,

potendo solo resistere a sforzi di compressione semplice, dovevano obbligatoriamente essere associati a schemi costruttivi che si basassero essenzialmente sull'effetto stabilizzante della gravità.

Cupole, archi e volte venivano eseguiti con enormi spessori, in modo che la curva delle pressioni originata dal peso proprio (DL) della struttura fosse poco influenzata, in direzione ed intensità, dall'effetto provocato dai carichi accidentali (pesi portati=Live Load=LL), garantendo la stabilità centrando le successive risultanti all'interno della sezione strutturale.

L'impiego di materiali che lavorano essenzialmente in regime di soli sforzi di compressione, associati a schemi strutturali e tipologie costruttive basate sull'effetto stabilizzante della gravità, agente su masse strutturali di notevoli dimensioni, individuano una tradizione costruttiva "massiva", dove il rapporto tra "peso portante" e "peso portato" è molto maggiore dell'unità ( $DL/LL \gg 1$ ) comportando, in senso energetico, un basso rendimento strutturale.

Il passaggio dalla tradizione costruttiva "massiva" a quella "leggera" ( $DL/LL=1$ ) avviene in corrispondenza della seconda rivoluzione industriale con l'avvento dell'acciaio nelle costruzioni. Con i materiali ad alta resistenza ed i sistemi tensostrutturali il rapporto si riduce drasticamente ( $DL/LL \ll 1$ ); il peso strutturale è ora, orientativamente, cento volte minore rispetto a quello delle strutture in cemento armato e dieci volte minore delle convenzionali strutture metalliche. A

Struttura	Volume (m³)	Superficie (m²)	Spessore (m)	Peso (t)	DL/LL
Cattedrale di Amiens	100.000	10.000	10	10.000	10
Cattedrale di Chartres	120.000	12.000	10	12.000	12
Cattedrale di Reims	150.000	15.000	10	15.000	15
Cattedrale di Sens	180.000	18.000	10	18.000	18
Cattedrale di Troyes	200.000	20.000	10	20.000	20
Cattedrale di Auxerre	220.000	22.000	10	22.000	22
Cattedrale di Langres	250.000	25.000	10	25.000	25
Cattedrale di Meaux	280.000	28.000	10	28.000	28
Cattedrale di Soissons	300.000	30.000	10	30.000	30
Cattedrale di Tournai	350.000	35.000	10	35.000	35
Cattedrale di Trier	400.000	40.000	10	40.000	40
Cattedrale di Speyer	450.000	45.000	10	45.000	45
Cattedrale di Bamberg	500.000	50.000	10	50.000	50
Cattedrale di Ely	550.000	55.000	10	55.000	55
Cattedrale di Salisbury	600.000	60.000	10	60.000	60
Cattedrale di Wells	650.000	65.000	10	65.000	65
Cattedrale di Exeter	700.000	70.000	10	70.000	70
Cattedrale di Hereford	750.000	75.000	10	75.000	75
Cattedrale di Lincoln	800.000	80.000	10	80.000	80
Cattedrale di Ely	850.000	85.000	10	85.000	85
Cattedrale di Peterborough	900.000	90.000	10	90.000	90
Cattedrale di Leicester	950.000	95.000	10	95.000	95
Cattedrale di Lichfield	1.000.000	100.000	10	1.000.000	100

## L'impostazione unitaria delle teorie della meccanica strutturale e l'analisi automatica

A partire dagli anni '50-'60 la metodologia progettuale dell'ingegnere strutturista è stata notevolmente influenzata da due importanti avvenimenti: l'impostazione unitaria delle diverse teorie della meccanica strutturale e l'introduzione degli elaboratori elettronici accompagnati dai linguaggi simbolici, matriciali e dei metodi agli elementi finiti.

È interessante notare che, osservando lo sviluppo storico della scienza delle costruzioni, il processo di sintesi unitaria delle diverse teorie della meccanica dei corpi elastici, ottenuta solo nell'ultima metà di questo secolo, a merito principalmente dei metodi energetici, era già possibile molto prima, giacché i procedimenti risolutivi hanno conservato l'impianto generale che gli scienziati dell'Ottocento avevano già compiutamente immaginato: infatti, il modello fisico è rimasto invariato dal tempo di Cauchy (1828); il metodo delle forze impostato da Navier (1826) fu definitivamente sviluppato da Maxwell (1864), Müller-Breslau (1886) e O. Mohr (1892); il metodo dell'equilibrio viene applicato da A. Clebsch (1862) su problemi particolari e la sua grande potenzialità viene riscoperta, dopo circa novant'anni dalla segnalazione di Navier e dopo venti dalla nota di Mohr, da A. Bendixen (1914) e A. Ostenfeld (1926), i quali introdussero il metodo dell'equilibrio nella pratica corrente degli ingegneri; i metodi basati su valutazioni di carattere energetico che, per loro comune fondamento vengono di solito detti «del lavoro di deformazione», sono apparsi con Menabrea (1875), Castiglione (1873) e Maxwell (1864).

Il ricongiungimento con quanto predisposto nell'Ottocento e l'impostazione unitaria delle diverse teorie è stata tuttavia una conquista laboriosa consentita, oltre che dall'apporto sempre più massiccio del linguaggio simbolico, soprattutto dalle enormi capacità degli elaboratori, avvalendosi del linguaggio matriciale e dei metodi di discretizzazione, specialmente quello agli elementi finiti.

Siamo nell'era della «metamorfosi del linguaggio», come viene denominata da E. Benvenuto nella sua recente storia della scienza delle costruzioni, dove il linguaggio simbolico e il formalismo matematico hanno attraversato la meccanica delle strutture per tradurla a servizio del calcolo automatico. E così mutata la «mentalità», alle radici dell'empirismo scientifico.

J.T. Oden e K.J. Bathe ravvisano in questa svolta l'inizio di «un'era di empirismo computazionale». In un loro interessante articolo si legge: «La comunità degli ingegneri di 20 anni fa era consapevole che l'uso dei metodi analitici classici offriva limitatissimi strumenti per lo studio del comportamento meccanico e, conseguentemente era necessario che l'ingegnere arricchisse le sue analisi con il soccorso di molto giudizio e intuizione accumulati in molti anni di esperienza. L'empirismo giocava un grande ruolo nella progettazione; benché fossero disponibili alcune teorie generali, i metodi per applicarle erano ancora in fase di sviluppo ed era inevitabile ricadere in schemi approssimati e far appello a indicazioni provenienti da numerose prove e conferme. Oggi è diffusa l'opinione che l'avvento del calcolo automatico abbia posto fine a tale epoca semiempirica dell'ingegneria: ormai, possono essere costruiti modelli matematici raffinati su alcuni dei più complessi fenomeni fisici e, se la potenza del calcolatore è sufficiente, si possono produrre risultati numerici credibili sulla risposta del sistema esaminato».

## Tecniche interattive grafiche nella progettazione strutturale

I vantaggi offerti dagli elaboratori elettronici possono, d'altro canto, creare un'esaltazione incontrollata del calcolo automatico e dare l'illusione che l'uomo venga superato dalla macchina e la logica dall'automatismo. A questo punto assistiamo ad una inversione di tendenza nella velocità di sviluppo della scienza e delle tecnologie associative. Quando la tecnologia presenta un'alta velocità di sviluppo, la storia della scienza lo insegna, si incominciano a intravedere periodi di «pollution tecnologica» e si rende, pertanto, necessario un controllo del processo.

Nell'attuale situazione di sviluppo di sofisticate elaboratori automatici e di generali programmi elettronici indirizzati alla progettazione architettonica e strutturale, il rapporto ottimale tra uomo e macchina sembra essere raggiunto mediante le moderne tecniche di «interazione grafica».

L'interattività tra progettista ed elaboratore elettronico che, nel campo dell'applicazione che ci interessa, sono definite da varie sigle sempre più conosciute quali: CG (computer graphics); CAD (computer aided design); CAAD (computer aided architectural design); CASD (computer aided structural design); CAM (computer aided structural manufacturing) ha rivoluzionato la tecnica del disegno e, implicitamente, il linguaggio ed il supporto della documentazione progettuale. L'elaborazione progettuale viene interfacciata da hardware e software

interattivi. Il supporto topologico e geometrico del progetto architettonico e delle strutture diviene necessariamente integrato.

La tecnica interattiva tra uomo e macchina mette in rilievo i contributi più salienti delle parti permettendo di raggiungere simultaneamente i seguenti obiettivi:

Ottimo rapporto per la fase di ANALISI (operazione affidata alla macchina utilizzandone la potenza, capacità e velocità di calcolo);

Ottimo rapporto di SINTESI (operazione affidata al progettista responsabile del controllo della validità dei dati e della critica dei risultati).

“Il cemento armato è il più bel sistema costruttivo che l’umanità abbia saputo trovare fino ad oggi. Il fatto di poter creare pietre fuse, di qualunque forma, superiori alle naturali in termini di resistenza a trazione, ha in sé qualche cosa di magico.”

“L’ideazione di un sistema resistente è atto creativo che solo in parte si basa su dati scientifici; la sensibilità statica che lo determina, se pure necessaria conseguenza dello studio dell’equilibrio e della resistenza dei materiali, resta, come la sensibilità estetica, una capacità puramente personale. Anche per la progettazione statica la chiara visione del fine da raggiungere e la serena indipendenza di spirito nei riguardi di soluzioni già attuate in casi analoghi, sono indispensabili condizioni di buon successo. Indipendenza che non è la ricerca di una originalità fine a se stessa”

Dida pag. 6

M. Majowiecki, esempi di strutture leggere

## Architettura strutturale

Nel contesto di questa terza impressionante rivoluzione tecnologica ci interessa analizzare l’evoluzione dell’interazione tra architettura ed ingegneria strutturale. A questo scopo siamo fortunati giacché i primi navigatori moderni nel campo dell’architettura strutturale sono principalmente, a parte E. Torroja, Italiani: Pier Luigi NERVI, Riccardo MORANDI e Sergio MUSMECI.

Nervi ha poche perplessità compositive; nel progettare egli mira direttamente alla “costruzione” sostenuta dalla convinzione, tradotta in filosofia, che l’ubbidienza alle leggi della statica sia per sé garanzia di riuscita estetica.

“La progettazione è il fatto fondamentale della creazione edilizia. Essa si può definire, in senso vasto, come l’invenzione e lo studio dei mezzi necessari a raggiungere un determinato scopo con la massima convenienza.”

Morandi avverte ed intuisce la possibilità di “plagio” da parte dell’analisi automatica delle strutture nel processo di progettazione rispetto al potere di sintesi fisico- intuitiva:

“Basta possedere anche una modesta dimestichezza con la progettazione per sapere che è sempre possibile l’entro certi limiti, risolvere un tema in più maniere perfettamente equivalenti, funzionalmente, staticamente ed economicamente. A questo punto la scelta definitiva della soluzione fra tante valide, e l’amorosa cura del dettaglio formale (questo quasi sempre indipendente dall’imperativo del calcolo) trascendono il fatto puramente tecnico e, intenzionalmente o inconsciamente, partecipano alla creazione artistica”.

Andò maturando in Lui la negazione di ogni validità sia della tecnologia fine a se stessa sia dei preconcetti formali, a favore di un disegno architettonico chiaro e aderente all’ideale di equilibrio (non compromesso) tra funzionalità dell’impostazione, rigore della soluzione strutturale e qualità dell’immagine finale.

Le consapevoli scelte costruttive che ne precisano l’identità raggiunta, derivando dalla esplicita adozione di “schemi statici semplici facilmente controllabili, anche nei riguardi di una sempre imperfetta esecuzione, e in cui la disposizione e la forma delle varie membrature esprimano chiaramente la funzione statica, cioè in ultima analisi la loro ragione di esistere”.

“Il calcolo, questa parola misteriosa per i non iniziati e in nome della quale si sono sciupate e si seguivano a sciupare tante realizzazioni di bellissimi temi, può mai essere considerato un fattore assoluto di determinazione della forma di una struttura, quando risulta ampiamente dimostrato che essa è fondata sulla consapevole sensibilità di chi progetta, architetto o ingegnere che sia?”

Con Sergio Musmeci le impostazioni concettuali di Nervi e Morandi, che richiedono alla struttura un “linguaggio” espressivo in termini di funzionalità statica, vengono supportate da dimostrazione matematiche.

Musmeci introduce il concetto della ricerca della “forma strutturale” in funzione della minimizzazione della materia richiesta per opporsi alla energia potenziale di un sistema di forze esterne.

“La ricerca della forma strutturale non è innescata da un atto intuitivo o capriccioso, ma da un processo che ricerca la necessaria configurazione della materia nello spazio, atta a risolvere un determinato compito strutturale impiegando il minimo indispensabile delle risorse”.

“La struttura, attraverso la sua forma, rivela con immediatezza i flussi delle forze interne che le percorrono e che non sono dunque rinchiusi e nascosti entro il volume di una morfologia concepita astrattamente, secondo pregiudizi estetici e statici in cui gran parte della materia e dello spazio impiegati è superflua”.

Secondo Musmeci esiste una sola quantità minima di una determinata materia con cui ogni struttura può essere realizzata, una volta definito il sistema delle forze esterne. Tale invariante è connessa direttamente al concetto di minimo strutturale.

E' la forma che, con il minimo impiego di una certa materia, occupa il minimo volume nello spazio.

Dice "mi sono divertito a determinare la forma dell'arco limite..

$y = \log \cos X$

equazione che asintoticamente tende a rappresentare una colonna ad uniforme resistenza la cui sintope è la luce limite per il materiale.

Risulta semplicemente:

s/g

dove s è la tensione limite del materiale e g è il peso specifico

Dopo la prematura scomparsa di Sergio Musmeci, con l'avvento dei primi minicomputer, mi è stato possibile sviluppare la teoria della ricerca della forma strutturale "lo Stato 0". Gli algoritmi di calcolo, tramite programmazione interattiva e mediante particolari periferiche grafiche, rendevano possibile la visualizzazione delle superfici strutturali generate da "condizioni di equilibrio" e non da predefinite geometrie, ribaltando la classica analisi strutturale considerando: note le sollecitazioni e ricercando, quale incognita, la forma strutturale. Si arriva alla definizione di superfici membranali minimali, presollecitate, pneumatiche, idrostatiche, campo applicativo delle strutture leggere e alla ottimizzazione della forma strutturale, in funzione della distribuzione tensionale, nel campo dell'ingegneria meccanica ed aeronautica.

## Architettura strutturale ed etica tecnologica.

Attualmente si assiste ad una libera espressività formale che origina "oggetti architettonici" (torri inclinate; ponti scultura, nuvole) la cui forma, in alcuni casi, non ha nessun nesso con principi di tipo strutturale. In accordo con l'impostazione filosofica tecnico-scientifica di Nervi, Morandi e Musmeci, questi sarebbero "falsi strutturali".

Molte di questi nuovi oggetti architettonici ci hanno meravigliato e, nel nome della definizione stessa del termine architettura, quale attività tecnico-intellettuale volta a modificare l'ambiente fisico in relazione alle esigenze della vita associata, sono stati largamente apprezzati; non si può negare che alcune costruzioni raggiungono livelli di arte architettonico-scoltorea ed il ruolo della struttura è unicamente quello di ente resistente dell'oggetto di "design architettonico". Queste nuove realtà architettoniche, basate essenzialmente su capacità artistiche individuali possono, d'altro canto, risultare didatticamente devianti: un "falso strutturale" Calatraviano può indurre studenti e professionisti ad elaborare imitazioni progettuali con l'introduzione di pericolosi "equilibri strutturali" mentre le artistiche aggregazioni morfologiche alla Gehry possono fare ritenere fuori moda ogni edificio a configurazione prismatica.

In molte moderne realtà costruttive, influenzate da nuove variabili progettuali pittorico-scoltoree, scenografiche, fumettistiche, la correlazione disciplinare architettonico-strutturale, intesa quale linguaggio progettuale integrato, può dichiaratamente non esistere o essere falsamente dichiarato.

La statua della libertà, nella quale tutti vedono esternamente una formale scultura mentre all'interno esiste una complicata struttura resistente progettata da Eiffel, dichiara esplicitamente il disaccoppiamento funzionale scultura-struttura.

Gli esempi moderni di architettura strutturale non sono più chiaramente correlati come in passato in termini disciplinari. L'introduzione di argomentazioni di etica scientifico-tecnologica potrebbe evitare alcuni stereotipi architettonico-strutturali quali, per esempio, il Millennium Bridge di Londra dove si è sacrificata la stabilità strutturale alla generazione di uno "stupore tecnologico" o il Ponte Alamillo in Sevilla dove al riuscito design quale "oggetto nel territorio", si accompagnava una falsa impostazione concettuale strutturale che asseriva che il peso del pilone era sufficiente a controbilanciare l'impalcato; la realtà è che gran parte del materiale utilizzato per la "funzione ponte" era energeticamente inutile essendo esso dedicato ad ottenere, principalmente, un risultato scultoreo.

La progettazione moderna trans-multi ed interdisciplinare, infatti, non può prescindere dal considerare che il processo progettuale deve fornire una soluzione globale del problema considerando, simultaneamente, tutte le ipotesi e vincoli di fattibilità. Il progetto concettuale, perciò, deve essere ottenuto da un processo di sintesi basato sulla esperienza e conoscenza di un team integrato di progettazione da sottoporre, successivamente, ad un controllo analitico. La posizione classica, di analisi separata delle variabili progettuali, porta alla scorrelazione concettuale del progetto ed a maturazioni temporalmente differite, e, di norma, ad una qualità globale inferiore. L'architettura strutturale si propone come Metodo, quale cognizione riflessiva che mostra in qual modo sia da indirizzarsi la mente secondo la norma di una data vera idea, inquadrata nell'etica della responsabilità della civiltà tecnologica.