

PREMESSA

L'esercitazioni desiderano contribuire ai nuovi piani di studio ,più personalizzabili, in modo da mantenere le radici culturali caratteristiche della progettazione strutturale.

In tale ottica si è cercato di delineare i fondamenti riguardanti le caratteristiche meccaniche dei materiali, con particolare riguardo ai criteri di sicurezza e di delineare i vantaggi e gli svantaggi delle ipotesi poste alla base dei modelli, in modo da tenerle ben presenti prima dell'inizio di ogni valutazione(Parte I)

Si accenna poi alla storia del calcolo con il fine di evidenziare l'evoluzione del linguaggio Matematico per valutare sempre gli stessi aspetti statici ,in particolare si evidenzia come l'antico calcolo pseudostatico grafico presenti uno stretto legame interpretativo dei fenomeni riguardanti il comportamento statico delle strutture, aspetto non altrettanto .immediatamente percepibile con l'equivalente calcolo matriciale (Parte II).

Nella Parte 3 sono riportati i calcoli per il dimensionamento dei principali elementi di un edificio in c.a. secondo il vigente metodo semiprobabilistico agli stati limite e cercando di delineare i contributi della Statica ,Scienza delle Costruzioni,Tecnica delle Costruzioni, Geotecnica, secondo la suddivisione didattica tradizionale.

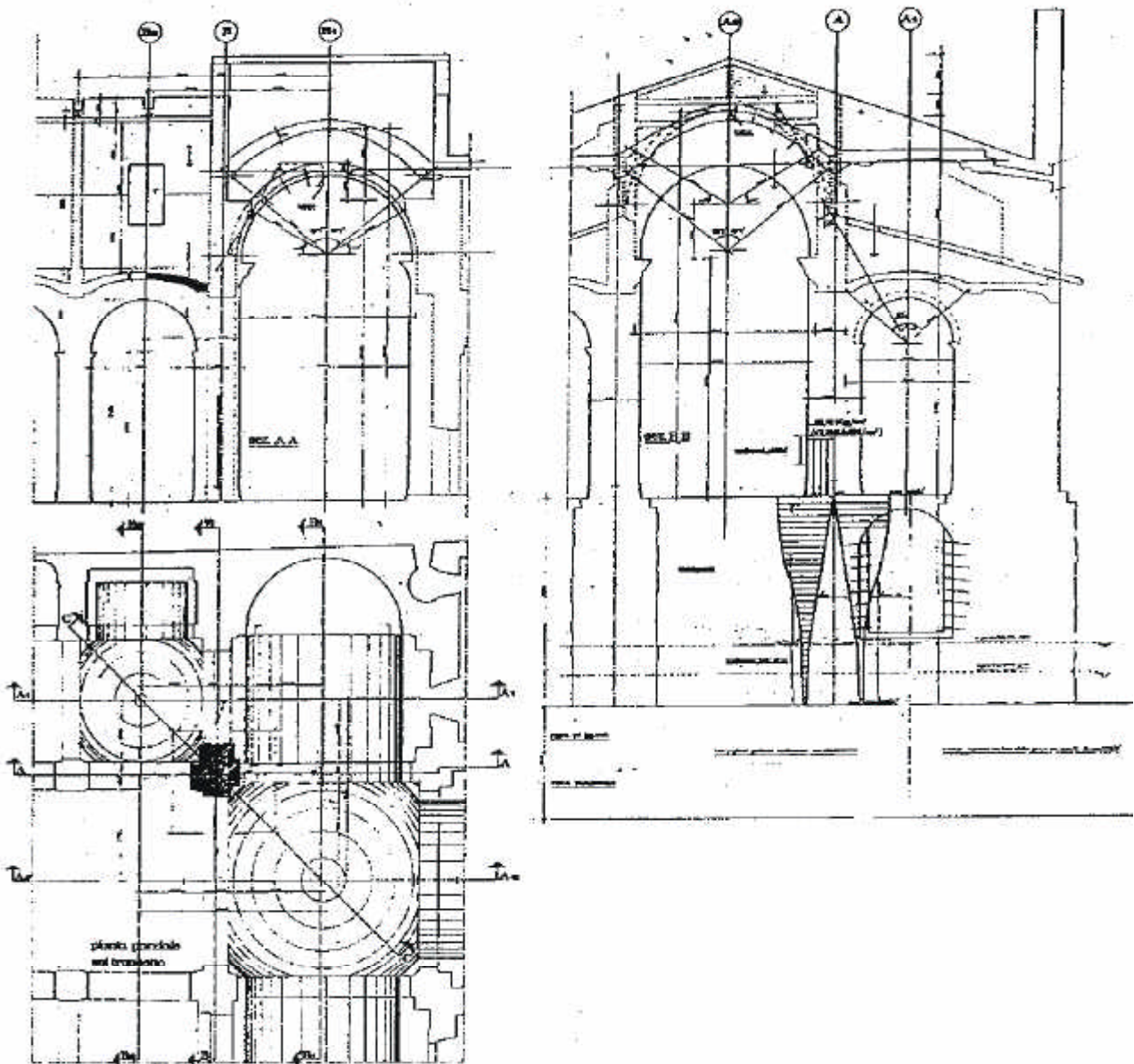
Il testo è proteso al dialogo multidisciplinare e cerca di tratteggiare come l'arte e l'umanesimo esistono anche nei calcoli strutturali, visti come il linguaggio con cui si esprimono le varie discipline dalla Statica sino alla Geotecnica.

Si ringrazia l'Arch Domenico D'Olimpio per gli elaborati di Tecnologia e Bioarchitettura e l'Arch Paolo Antonimi per gli elaborati riguardanti le carpenterie del conglomerato e delle armature (Parte III).

Tali elaborati insieme al testo sono scaricabili dal sito internet della prima Facoltà di Architettura, Dipartimento d' Ingegneria Strutturale e Geotecnica : disg.uniroma1.it/mele oppure/ sylos.labini in modo da avere degli esempi per gli elaborati personali degli studenti afferenti ai Laboratori 2° di Costruzioni dell' Architettura della laurea specialistica quinquennale U.E.,riconosciuta in Europa insieme a quella degli Ingegneri Edili per progettare costruzioni.

Si invitano i lettori a segnalare correzioni ed a proporre suggerimenti od elaborati utili per favorire il coordinamento multidisciplinare.

Pierfranco Ventura



Analisi Statica Grafica di un Pilone di una Chiesa

PARTE I

IL RUOLO DELLA MODELLAZIONE MECCANICA

INDICE

INTRODUZIONE

I.1 CENNI STORICI

I.2 IL RUOLO DELLA MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA
E DEI VINCOLI

I.3 IL RUOLO DELLA MODELLAZIONE DEI MATERIALI

I.4 IL RUOLO DELLA MODELLAZIONE DELLE AZIONI

I.5 IL RUOLO DELLA MODELLAZIONE NEI CRITERI DI
SICUREZZA

I.6 IL RUOLO DEGLI ASPETTI TECNOLOGICI, ECONOMICI
E DI CANTIERE

INTRODUZIONE

Il testo desidera offrire un contributo allo sviluppo dei Laboratori di Costruzioni dell'Architettura e di Progettazione Architettonica, sorti nella Facoltà di Architettura ed Ingegneria Edile, per coordinare nella progettazione il contributo strutturale con quello architettonico, da affiancare naturalmente ai contributi tecnologico, impiantistico, storico, urbanistico nonché economico, trattati anche in altri Laboratori.

I nomi dei Laboratori sottolineano le combinazioni scaturenti dalle varie interazioni fra le singole discipline bilanciando i ruoli dell'Architetto e dell'Ingegnere con gli etimologici "primo costruttore" ed "artefice d'ingegno".

Ci si limita ad elementi strutturali semplici cercando di evidenziare i contributi di base della Statica, della Scienza delle Costruzioni, della Tecnica delle Costruzioni, nonché della Geotecnica e delle Costruzioni Asismiche, passando in rassegna i vari metodi di calcolo sviluppatisi nel XX secolo, con particolare riguardo ai criteri di sicurezza.

Il lavoro di progettazione, tipicamente di équipe per coglierne la reale complessità, si spera possa trovare nei Laboratori universitari le libere radici della ricchezza dell'unità nella diversità.

Purtroppo però la realtà attuale dei Laboratori risente ancora troppo delle gravi mancanze di coordinamento della didattica nei vari anni di corso, aspetto che rende non realistico lo svolgimento di progetti integrati per cogliere le istanze che di seguito si cerca di delineare.

La ripartizione armonica fra teoria e pratica progettuale è eternamente disattesa, come pure sono scoordinati gli apporti multidisciplinari.

Il fascino di persone che hanno racchiuso in sé la capacità progettuale dell'Architetto, del Geologo e dell'Ingegnere rimane una meta di conoscenza per il dialogo, senza peraltro cadere nel mito dell'eclettismo. .

S'invitano gli studenti dei Laboratori a leggere i testi classici delle discipline strutturali, seguendo il ruolo della modellazione meccanica delineato nella Parte I e perdonando le varie digressioni.

Si cerca di analizzare i presupposti ed i limiti delle ipotesi scientifiche con il fine di non separarle dalle applicazioni tecnologiche ed in modo da far interagire i modelli perfetti con la realtà complessa. L'attuale tendenza, specie nelle scuole superiori, a separare la Tecnologia dalla Scienza, non è in sintonia con la tradizione culturale italiana e con le finalità stesse dei Laboratori universitari.

La progettazione delle opere presenta una profonda analogia con il progetto di vita al quale può tendere ciascuna persona.

Come l'individuo si completa nel valore personalistico basato su un rapporto armonico non solo fra corpo, ragione, e psiche, ma anche spirito, così il progetto si realizza nel corrispondente rapporto armonico fra la tecnologia, la scienza, l'arte e l'amore per l'opera utile. Il prevalere o la carenza di qualsiasi branca fra le predette crea gravi scompensi nella vita e nel progetto, ancor peggio se la coscienza si confina solo in ideologie che si ammantano di armonie o si manifestano in integralismi settari.

Il forte divario fra la modellazione e la realtà viene superato validamente specie con il predetto equilibrato rapporto armonico, mosso pertanto da una giusta causa di lavoro da realizzare con equi costi.

La frammentarietà delle eccessive specializzazioni, come l'individualismo, il riduzionismo di livellanti interdisciplinarietà, come il totalitarismo, sono le più note cause estreme del degrado della qualità rispettivamente della progettazione e della vita senza amore, tanto da renderle le più aggredite dal male.

Pur se le aspirazioni di non frammentare non sono interamente colte in quel che segue, nello specifico si cerca di richiamare le tappe essenziali dell'evoluzione del calcolo delle strutture, studiato secondo gli schemi indicati nella premessa, in modo da contemperare la cultura acquisita del passato con l'evoluzione presente, basata anche sull'impiego del calcolatore.

I fenomeni meccanici sono analizzati pertanto sia con il linguaggio del *Calcolo Grafico* che viene confrontato con il *Calcolo Algebrico* classico in forma chiusa, basata sulla teoria dei vettori, che consente di cogliere con delle formule l'ordine di grandezza del problema: specie per il predimensionamento. Il confronto prosegue sia con il linguaggio infinitesimale del *Calcolo Differenziale*, qui appena accennato, peculiare

della Meccanica del Continuo, sia infine con quello numerico o *Calcolo Matriciale*, che consente di esaminare meglio le variazioni della complessità essendo non vincolati a difficoltà di calcolo molto esteso o non solubile in forma chiusa.

A tal fine alcuni elementi strutturali semplici vengono utilizzati come mezzo per effettuare il confronto fra i vari modelli e linguaggi fisico – matematici: gli elementi sono collegati in modo da realizzare un edificio esemplificativo costruito da vari materiali.

Il contributo al progetto tramite l'etimologico "gettare in avanti" la ragione per precedere la realizzazione necessita, come detto nella premessa, dei contributi tecnologico, architettonico, sociale. Tale temperazione consente il fiorire della meccanica, sia "delle terre in fondazione", sia "delle pietre in elevazione" per lo sviluppo dell'Architettura.

All'antico criterio di progettare per *similitudine* con opere già realizzate da Maestri e Maestranze, si affianca allora il progetto basato sulla *modellazione meccanica* supportata, quanto più i corpi non sono omogenei ed isotropi, da criteri di progettazione *sperimentale*, cioè supportata da prove su campioni, prototipi o addirittura tramite il monitoraggio in vera grandezza, come ad esempio in presenza di terreni od ammassi rocciosi complessi.

Si premette una panoramica sulla modellazione meccanica con particolare riguardo all'analisi della sicurezza e durabilità in termini di costi – benefici che davanti alla salvaguardia della vita umana devono essere mutati più in termini di rischi – benefici. Prevenire, come per la salute umana, è oltretutto meno costoso per la comunità anche per le costruzioni e l'ambiente in un continuo tirocinio ed aggiornamento anche tramite network specifici.

La Didattica non si ferma alle aule universitarie, ma prosegue per imparare a progettare ,con la rinnovata curiosità di trovare soluzioni semplici che era peculiare del Prof Carlo Cestelli Guidi .

La conoscenza tecnica che sembrerebbe oggi prossima alla stabilizzazione è invece in continuo sviluppo ,come evidenziava il Prof Mario Silvestri nella prefazione al Manuale dell'Ingegnere "Colombo" Hoepli, prendendo a indicatore dello sviluppo il tutt'altro che asintotico crescere delle pagine del manuale dalla 1^a edizione del 1881 alla attuale 84^a.

I.2 CENNI STORICI

La vasta interazione fra le varie branche della Scienza per interpretare la realtà trova importanza, ai fini del testo, anzitutto nell'uso del linguaggio Matematico per interpretare la Fisica o più in dettaglio la Statica e la Scienza delle Costruzioni.

Il rendere quantitativo il qualitativo trova la sua pietra miliare in Galilei con i "Discorsi e dimostrazioni Matematiche, intorno a due nuove Scienze attinenti alla Meccanica" sia quella celeste che proprio dei materiali, pubblicato a Leida nel 1638.

La ricerca della "certezza" cominciò a basarsi sulla coincidenza del dato sperimentale con quello del modello fisico - matematico ipotizzato.

Si evidenzia subito che tale "certezza", o meglio per i presenti fini "sicurezza", ha un limite e comporta, come affermò Borges, che ogni idea valutata dalla Scienza sia la penultima versione della realtà, o, come più di recente affermò Popper, sia tanto più valida quanto più resistente alla confutazione come si preciserà esaminando i criteri di sicurezza. L'accettazione del criterio che nuove leggi possono modificare quelle presenti del resto consentì al Cardinale Bellarmino di scagionare Galilei dalla confutazione eliocentrica dell'inquisizione. Sempre Galilei nella lettera a Cristina di Lorena nel 1615 peraltro già evidenziava la maggiore libertà degli Scienziati nello studio rispetto proprio agli Architetti ed ai Medici, in parte costretti ad un "determinismo" non ammissibile nella Ricerca Scientifica.

Il linguaggio matematico, sempre nel crogiuolo fiorentino, viene introdotto dai fratelli Pacioli nelle Arti figurative, antesignane si può dire della grafica con l'elaboratore.

Si arriva poi con Cartesio alla Geometria Analitica in cui l'Algebra vettoriale viene sistematicamente applicata alla Geometria e viceversa, per rappresentare la realtà.

L'Algebra si arricchisce allora dei "versori" che caratterizzano la direzione e verso delle grandezze "scalari" trasformandole, insieme alle operazioni, in grandezze "vettoriali".

Contributo importante è poi quello di D'Alembert che oltre a definire le forze d'inerzia, fondò nel 1770 la "Meccanica Razionale" ed effettuò la prima grande divulgazione scientifica insieme a Diderot, tramite la famosa "Enciclopedia", nella quale in particolare erano disegnati gli strumenti di

lavoro di tutti i principali mestieri ed arti, nello spirito peraltro positivista dell'uomo "faber" più che lo spirito personalistico dell'uomo "sapiens".

Nell'evoluzione del linguaggio matematico, emblematica è la figura di Lagrange che nel 1788 scrisse la "Meccanica Analitica" senza impiegare una figura ma solo formule, che per non far disperare gli Architetti vanno fatte rivedere in termini di Statica Grafica.

L'Analisi Infinitesimale di Leibniz apre parallelamente le porte alla Geometria Differenziale ed alla "Meccanica del Continuo" in cui lo stato solido, liquido e gassoso sono trattati unitariamente, specie sotto gli aspetti Termodinamici. Tali precedenti hanno consentito di raggiungere nella Scienza delle Costruzioni le sintetiche formulazioni energetiche di Beltrami e Ritz per descrivere il legame fra tensioni e deformazioni nella materia, peraltro di difficile risoluzione in forma chiusa anche per semplici condizioni al contorno, per cui si è dovuto far ricorso alla suddivisione della materia con il metodo degli elementi finiti.

Si deve inoltre sempre a Leibniz l'ideazione del sistema binario attualmente usato nei software; il filosofo infatti ispirandosi alla considerazione che 1 è "l'essere" e 0 è il "non essere" pensò di esprimere tutti i numeri solo con queste due cifre, così 5 diventa 101 ovvero $2^0+0^1+2^2$ mentre 7 diviene 111 ovvero $2^0+2^1+2^2$.

Parallelamente il linguaggio matematico è divenuto quello delle matrici che descrivono tali elementi e che ben si adattano ad organizzare il reticolo dei fogli elettronici del calcolatore in cui ogni pixel è un "elemento finito" del video comandato vettorialmente.

Così i metodi di Gauss, Jacobi, Laplace, per risolvere le matrici dei vettori sono ritornati in auge nei programmi di calcolo strutturale automatico.

Nel testo si riparte peraltro dalla Statica Grafica sviluppata specie da Culmann, essendo il linguaggio della "Geometria della Masse" quello più vicino alla realtà statico - architettonica, come verrà approfondito in seguito trattando la modellazione dei materiali.

Dagli studi sulla forma isostatica delle trabecole delle ossa, iniziati da Eiffel sulla torre parigina, si è arrivati alla Bionica ed allo studio delle forme strutturali che s'ispirano alla natura.

L'appena delineato percorso storico fisico - matematico è permeato anche dalla Tecnologia, dall'Arte, dall'Etica, come evidenziato nell'introduzione

per non cadere nel positivismo privo della meraviglia del progettista che non "inventa" ma "scopre" la Scienza e l'Arte nella Natura creata trascendendo l'uomo, ma per l'uomo.

La diversificazione degli studi fra Ingegneri ed Architetti che storicamente si attribuisce alla nascita nel 1880 della Scienza delle Costruzioni di Navier e De Saint Venant, presso l'Ecole de Pont e Chaussées di Parigi, o quella fra Ingegneri e Geologi dovuta alla nascita della Geotecnica nel 1936 con Terzaghi, è una ricchezza solo nell'unità complessiva che umilmente riconosce i propri limiti.

Non a caso il progettista di navi segue anche oggi l'antica scuola di Architettura Navale e Galilei andava all'arsenale navale di Venezia per confrontare le diverse dimensioni dei fasciami di legno, o comparava le diverse dimensioni delle ossa animali ispirandosi al progetto della Natura.

Il divorzio fra le varie discipline e politiche ne fa solo soffrire i figli, sacrificandone i frutti di scambio, e provoca gravi carenze per cui gli studenti e gli amministratori disorientati si disimpegnano e la qualità urbanistica delle nostre città ancora ne paga il prezzo. Persino Voltaire dopo il terremoto di Lisbona del 1775 descrisse nel Candido il vacillare delle certezze basate solo su valori illuministici; benché già Cartesio nel 1624 si era chinato a Loreto.

Le difficoltà del progettare, oltre che da Galilei, sono espresse anche nei pensieri di Pascal che ci ricorda che: " la natura possiede perfezioni per mostrare che è l'immagine di Dio, e difetti per mostrare che ne è solo l'immagine, come l'Uomo".

Così le nostre costruzioni sono "mortalì" ed il progetto ad esempio di consolidamento non può trasformarsi in accanimento terapeutico, specie per inserire le nuove impiantistiche in vecchie murature o impiegando tecnologie invasive per giunta a volte inefficaci.

L'antitesi predetta da Pascal, peraltro disperante sui difetti, deve essere interpretata in maniera più distensiva come delineato da Soeren Kierkegaard il quale evidenziava che il continuo scontro fra questi due aspetti infiniti dell'uomo promuove il sano ingrediente della vita.

I.2 IL RUOLO DELLA MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA E DEI VINCOLI

L'iter classico dell'analisi strutturale e del terreno di fondazione sia statica che dinamica è articolata in:

- 1) modellazioni della struttura e profilo del sottosuolo:
geometrica delle masse, delle rigidità e scelta dei vincoli;
- 2) leggi costitutive o tensione - deformazione e resistenza dei materiali;
- 3) campo delle azioni e combinazioni più "gravose"
semiprobabilistiche;
- 4) condizioni al contorno dei dati predetti;
- 5) equazioni di equilibrio nei casi isostatici;
- 6) equazioni di congruenza nei casi iperstatici;
- 7) analisi delle sollecitazioni e degli spostamenti e rotazioni;
- 8) analisi delle tensioni e delle deformazioni;
- 9) analisi degli stati limite per la sicurezza di esercizio;
- 10) analisi degli stati limite per la sicurezza a rottura.

Nel primo punto è concentrata la parte più importante dell'arte del progettare: fra tutte le possibili soluzioni architettoniche, funzionali, tecnologiche, di adattabilità alla realtà delle capacità di cantiere ed economiche, solo alcune sono valide per essere verificate con il predetto iter "meccanico" per il dimensionamento.

In tale ottica si preferisce parlare di verifiche di calcolo, più che di un dimensionamento che scaturisce direttamente dal calcolo di progetto con il computer.

Tale istanza è ancora più cogente nel campo geotecnico essendo il terreno un "materiale" con caratteristiche non da progettare artificialmente, ma naturale da rispettare con opportuni adattamenti, ad esempio sotto l'aspetto della filtrazione, consolidazione e drenaggio del regime delle pressioni interstiziali u per contemperare la presenza della fase fluida e solida. Si richiama che tali pressioni sottratte alle tensioni totali σ forniscono le tensioni efficaci $\sigma' = \sigma - u$ caratterizzanti il comportamento meccanico dello

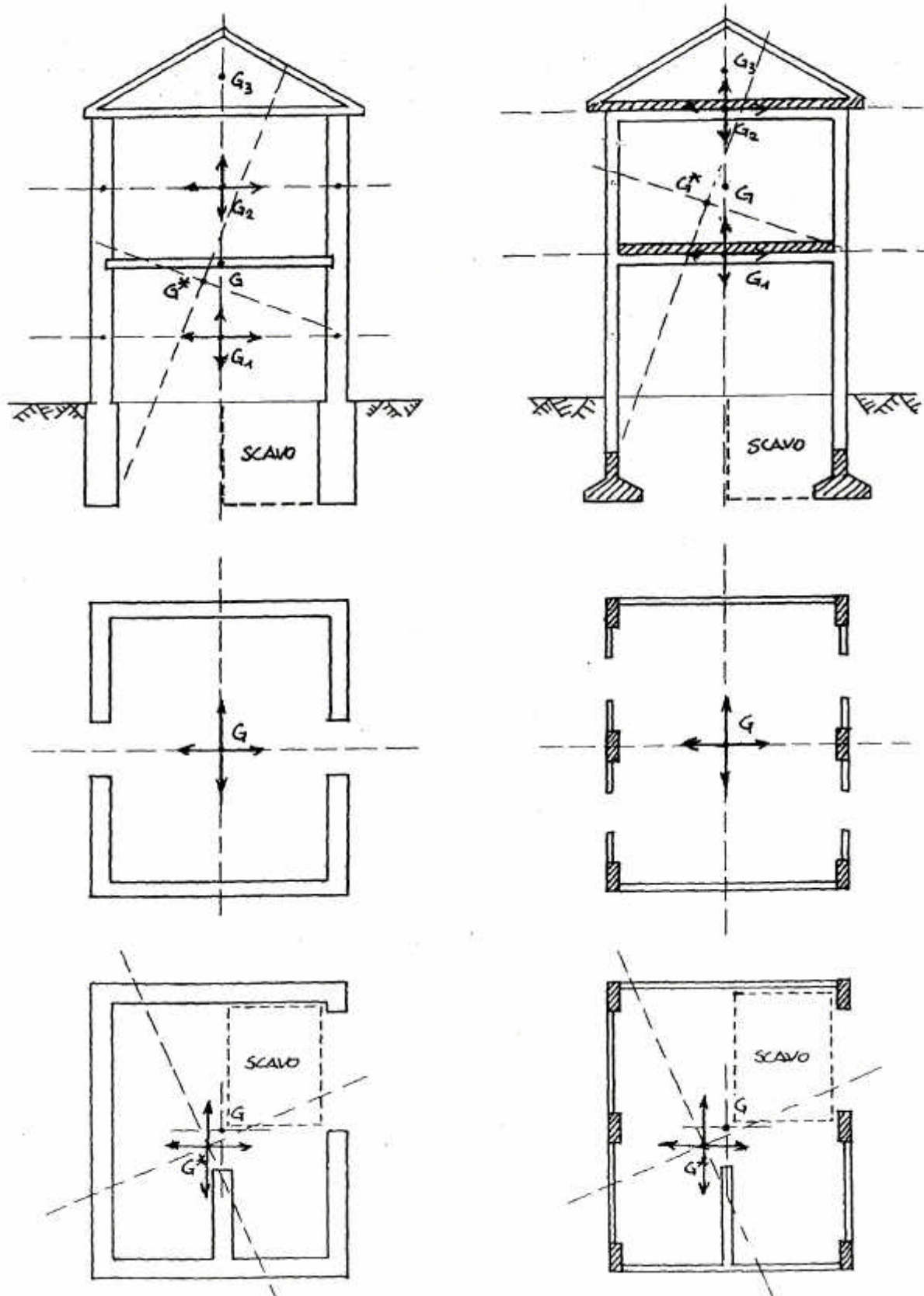


Fig.1 Il ruolo della distribuzione delle masse e delle rigidezze di un edificio in muratura ed in c.a, e modifica dei baricentri e degli assi principali di inerzia alle azioni sismiche per effetto di casuali ristrutturazioni.

scheletro solido del mezzo poroso terreno, come analizzato da Terzaghi con la prova edometrica, assicurante il drenaggio permanenti ($u = 0$) al campione che si consolida sotto il carico.

Qualsiasi complesso struttura - terreno può essere calcolato per sostenere carichi nel tempo, ma solo alcune sono prive di "protesi statiche" per tutta la vita, e non sono molto vulnerabili al modificarsi reale delle condizioni al contorno specie delle azioni sismiche. La struttura valida, personalizzata alla realtà spesso unica, va scelta pertanto prima di essere modellata per elaborarla specie al computer.

La figura 1 mostra il confronto, fra un edificio in muratura ed uno in cemento armato, in base alla distribuzione geometrica delle masse, da cui scaturiscono le forze d'inerzia in caso di sisma, e della modifica della verticale gravitativa degli assi inerziali in caso di ristrutturazione che possono essere fatali in caso di scossa. Anche nel modello di calcolo, assimilare le rigidità di un edificio in muratura pesante con i solai lignei appoggiati a quello di un edificio con pilastri leggeri in c. a. e con solai rigidi, conduce ad ubicazioni errate di un semipiano degli assi inerziali come evidenziato sempre in figura 1.

Ciò accade impegnando programmi di calcolo per le opere in cemento armato, senza adattarli alle opere in muratura. Altrettanto importante, in tale ottica, è per di più la scelta dei vincoli.

La modellazione delle strutture tradizionalmente si suddivide fra quelle isostatiche e quelle iperstatiche, ovvero quelle assimilabili a "rigide" globalmente e le altre interamente deformabili.

Le isostatiche presentano il numero delle reazioni vincolari (o dualmente il numero dei gradi di libertà lagrangiani impediti) incognite corrispondente al numero delle equazioni di equilibrio in forma scalare, per cui il sistema algebrico lineare è matematicamente (Rouchè e Capelli) solubile con le sole regole della Statica espresse dall'annullamento della risultante e del momento risultante: ($\underline{R} = 0$; $\underline{M} = 0$).

Le iperstatiche necessitano invece per il calcolo delle reazioni vincolari incognite anche delle equazioni di compatibilità cinematica dello spostamento e delle rotazioni fra le varie membrature e con i vincoli.

La realizzazione di strutture isostatiche per cercare di adattare il modello alla realtà è uno degli esempi più emblematici *dei vantaggi e degli svantaggi della Statica* nell'iter della progettazione e della valutazione della sicurezza. Gli spostamenti e le rotazioni da limitare sono quelle solo di ciascun corpo, mentre l'insieme vincolato è privo di cinematicismi che ridistribuiscono le reazioni: ovvero ogni elemento strutturale "bada a sé" in un criterio di assemblaggio vincolare uguale per tutti.

Esempio tipico dei vantaggi sono le travi appoggiate dei ponti fatte per usufruire della "certezza" di avere una catena cinematica di corpi "rigidi" con reazioni e sollecitazioni ben note che non risentono dei cedimenti fondali e delle dilatazioni termiche di difficile valutazione.

Si hanno però gli svantaggi notevoli dei costi di manutenzione specie dei vincoli e ancor più ridotta inerzia alle azioni sismiche e ridotta durabilità, fattori quasi ignoti alla sequenza dei memorabili ponti ad arco del passato. Si perde l'enorme vantaggio delle strutture iperstatiche i cui vincoli sovrabbondanti allontanano fortemente l'inizio del collasso, specie in caso di evento sismico, per cui i ponti oggi si ritornano a costruire a travate continue. Per le strutture isostatiche la perdita di un solo grado di libertà lagrangiano, specie vincolare, significa la labilità ed il crollo. Così come accade alle persone prive di riserva d'animo provvidenziale e prive di vincoli di amicizia fraterna in cui l'altro è solidale nell'aiuto e non è "assemblato" socialmente nell'indifferenza di tutti.

La scelta ed il progetto dei particolari costruttivi dei vincoli sono di evidente importanza, ma sono proprio quelli non disegnati dagli usuali programmi di calcolo e disegno automatico delle strutture, che danno ad esempio l'estratto dei ferri delle aste ma non dei nodi che vanno invece decisamente disegnati anche con il CAD (Computer Aided Design).

L'iperstaticità è invece "solidale" e valorizza la "ricchezza" di ognuno senza isolarla, se però diventa eccessiva imprigiona l'univocità di ciascuno, ovvero tornando alle strutture l'eccesso di rigidità fa perdere la duttilità ad adattarsi ai "piccoli" spostamenti e rotazioni che creano l'aiuto armonico.

Il calcolo delle reazioni iperstatiche è peraltro complesso ed è attendibile di fatto solo in campo lineare elastico. L'avvento infatti delle prime plasticizzazioni locali anche le coazioni impresse, quale ad esempio la diversa maturazione del calcestruzzo o il diverso assestamento dei casseri

durante la presa, o le variazioni termiche o i fenomeni di ritiro e viscosità o ancor più i cedimenti differenziali - fondali anche piccoli (maggiori di circa 2 cm), possono rendere illusorio il calcolo delle reazioni iperstatiche reali.

Il calcolo elastico va però comunque percorso in quanto è un modello che anzitutto consente di scegliere le rigidezze di *predimensionamento* che, come si preciserà nel paragrafo successivo, si basa sull'imporre "piccoli" gli spostamenti, ovvero le rigidezze non devono essere né in eccesso verso il modello rigido statico, né in difetto verso il modello instabile labile. Allorquando non esisteva il calcolatore un semplice telaio richiedeva giorni di calcoli, pur ricorrendo alle brillanti soluzioni iterative di Cross (nodi fissi) o Kani (nodi spostabili) per ripartire le sollecitazioni da nodo a nodo e da piano a piano, cosa che oggi si risolve in pochi istanti con il computer, salvo peraltro la fatica per implementarlo con il modello del telaio e dei carichi.

E' istruttivo comunque ricordare gli sforzi semplificativi del passato per comprendere il funzionamento dei modelli delle strutture.

Per le strutture con prevalenza delle sollecitazioni di sforzo normale N , come accade negli archi antofunicolari dei carichi (ovvero nelle funi) e nelle strutture reticolari rettilinee caricate solo nei nodi e con vincoli che ne consentono le rotazioni, l'effetto delle reazioni iperstatiche flessionali M è inessenziale. E' sufficiente infatti il calcolo delle reazioni e degli sforzi normale N del sistema isostatico più prossimo al reale o "principale" (Verifiche grafiche di Mery negli archi o di Culmann nelle strutture reticolari) .

Per attuare le predette "piccole" rotazioni delle aste nei nodi significa che la struttura deve essere sufficientemente snella senza peraltro cadere nel campo instabile come verrà presentato nel paragrafo successivo. Oppure il materiale può consentire limitate plasticizzazioni come le murature con malta nelle quali un chiodo infisso non crea lesioni come nel calcestruzzo (il modulo elastico di figura 3 e quindi la rigidezza è infatti 10 volte inferiore per le malte). E' evidente come *vincoli "leggermente cedevoli"*, ma iperstatici conservano i vantaggi delle strutture isostatiche e quelli delle strutture iperstatiche essendo duttili specie al variare dei carichi. L'eccesso di rigidezza nei vincoli è controproducente addirittura per la sicurezza in quanto esaspera le sollecitazioni iperstatiche specie nei vincoli.

Un bellissimo esempio è rappresentato dalle 6 ossa del cranio dei neonati (v. dopo gradi di libertà) "incernierate" nelle fontanelle per potersi adattare al

parto ed "incastrate" per ossificazione durante la vita a protezione dagli urti, fortemente ammortizzati anche dal liquido che circonda la massa cerebrale che trasforma eventuali colpi "vettoriali" in pressioni "scalari" meno traumatizzanti.

Analoga meraviglia desta la disposizione del cordame fra le tavole costituenti il fasciame dello scavo della nave romana rinvenuta a Comacchio, in modo da renderlo più flessibile a solcare onde tempestose.

Nelle strutture iperstatiche in cui invece prevalgono le sollecitazioni flessionali M , quali le travi ed i telai, si possono considerare le aste rigide nei riflessi dello sforzo normale N e sempre poco distorte dal taglio T , specie per i carichi uniformi e non concentrati, per cui il calcolo può limitarsi a valutare solo i momenti M di incastro iperstatici, trascurando nell'analisi delle sollecitazioni iperstatiche il contributo deformativo indotto da N e T .

Le predette semplificazioni sul numero delle equazioni di congruenza da aggiungere a quelle di equilibrio non sono possibili in presenza di vincoli cedevoli, come per carenza di fondazioni, o se i nodi sono spostabili, come per effetto delle azioni con prevalente componente orizzontale quali i terremoti. I casi più complessi sono di solito proprio quelli più aleatori (v. sicurezza) in cui la perdita del modello elastico è la regola e pertanto è necessario far ricorso a calcoli non lineari anziché lineari, specie per le più gravose combinazioni dei carichi. In base a quanto prima delineato tale calcolo è complesso e pur se fattibile con il calcolatore, che accetta un numero qualsiasi di equazioni, di condizioni di carico e di leggi costitutive, va orientato verso studi parametrici di ricerca per tarare metodi semplici, anziché per complicare la normale analisi. In tale ottica conviene fare ricorso, pur se solo formale, al più sicuro predimensionamento in campo lineare visto come modello "standard" convenzionale, come del resto lo è la valutazione delle azioni in campo sismico (v. figura 7) o della redistribuzione delle sollecitazioni per effetto dei cedimenti differenziali del terreno in parte sempre incogniti. Si usufruisce così dei *vantaggi della Scienza delle Costruzioni e non degli svantaggi* di calcoli onerosissimi pur se la ricerca vorrebbe meglio rispecchiare la realtà, come prima detto per la Statica. Si lascia così alla vita dell'opera di scegliersi le iperstatiche reali per adattamento dei vincoli nel giusto predetto dosaggio delle rigidità. E' più

importante allora eventualmente studiare solo i vincoli in campo non lineare, ovvero renderli duttili.

Le difficoltà predette hanno dato vita anche ad una modellazione dell'analisi delle strutture a rottura, anziché in campo elastico, ovvero al *limit design*.

In tal caso si modella la struttura iperstatica maggiorando i carichi in modo che si formino tante cerniere plastiche o tanti appoggi al limite dello scorrimento attritivo (vedere resistenze materiali) in modo da rendere la struttura isostatica non più influenzata da precedenti complesse coazioni, e tale da simulare virtualmente la configurazione prossima al collasso.

Tale calcolo, se la struttura è molto duttile, specie ad esempio allo scorrimento dei ferri nel c. a., consente di non valutare le reazioni iperstatiche ma direttamente le reazioni isostatiche massime da confrontare con quelle limite a rottura.

In tale studio è importante l'uso del teorema di Drucker e Prager per la ricerca dell'univocità del moltiplicatore dei carichi statico η , con quello cinematico, moltiplicatori che rendono minimo il lavoro complessivo per raggiungere il collasso. Tale calcolo a rottura prende le prime mosse nelle verifiche di equilibrio ultimo a scorrimento e ribaltamento (v. § sicurezza).

Si deve evidenziare però che il limit design non va scambiato con il calcolo *agli stati limite* di seguito descritto trattando la sicurezza in termini semiprobabilistici.

Si anticipa subito che si maggiorano di un fattore di sicurezza i valori delle sollecitazioni scaturenti dal calcolo iperstatico elastico, le quali si confrontano con i valori delle sollecitazioni resistenti, opportunamente ridotte da un altro fattore di sicurezza. Tali sollecitazioni ultime sono ben misurabili sperimentalmente, al contrario delle sollecitazioni ricavabili dallo stato tensionale ideale (v. figura 8) indotto specie dalle reazioni iperstatiche.

In comune quindi fra il limit design e le sollecitazioni di calcolo a rottura semiprobabilistico c'è solo il confronto con le sollecitazioni a rottura misurate su prototipi, ma i valori delle sollecitazioni scaturiscono da analisi diverse peraltro in prima approssimazione consimili nel percorso dei carichi sino a rottura, (v. figura 8). Si raggiungono in tal modo *i vantaggi della Tecnica delle Costruzioni* nel cercare di legare meglio i modelli alla realtà

sperimentale (v. figura 3) confinando gli svantaggi agli "stati limite" dell'umano operare.

E' interessante evidenziare poi che può essere vitale nelle scelte strutturali adottare in cantiere delle strutture isostatiche da rendere poi in esercizio iperstatiche. In tal modo tutti gli assestamenti sotto i pesi propri sono scontati, e la preziosa riserva di sicurezza iperstatica viene riservata tutta proprio verso le azioni accidentali. Mirabili in tal senso sono gli arcotravi di Krall nei quali l'impalcato collabora con l'arco in c. a. solo dopo che questi è maturato e la sua spinta per peso proprio è stata eliminata al disarmo, in modo che il ponte completo sopporti solo le distorsioni dei carichi accidentali. Tali considerazioni ben si prestano in particolare in caso di prefabbricazione ancor più usando cavi di precompressione per realizzare vincoli che contrastano proprio le reazioni iperstatiche in modo da avere una rigidezza "artificialmente" elevata e controllata.

Si imita così lo scheletro umano in cui il gioco dei muscoli e tendini rende di volta in volta il corpo labile, isostatico e iperstatico, ma con la risultante delle forze muscolari sempre coincidente con gli assi principali d'inerzia del corpo in movimento. Come è mirabile nella danza e nell'assetto inerziale del volo degli uccelli nell'aria.

Infine i criteri di modellazione dei vari corpi che costituiscono le strutture, scaturenti sia dalla Statica (Geometria delle masse) che dalla Scienza delle Costruzioni (Distribuzione delle rigidzze), che dalla Tecnica delle Costruzioni (incidenza delle imperfezioni reali) vengono delineati nel successivo paragrafo riguardante il ruolo dei materiali (v. figura 3) nella progettazione.

I vincoli soprattutto devono essere analizzati nella loro dualità statico - cinematica, ovvero come sede di reazione ed assenza di movimenti e viceversa.

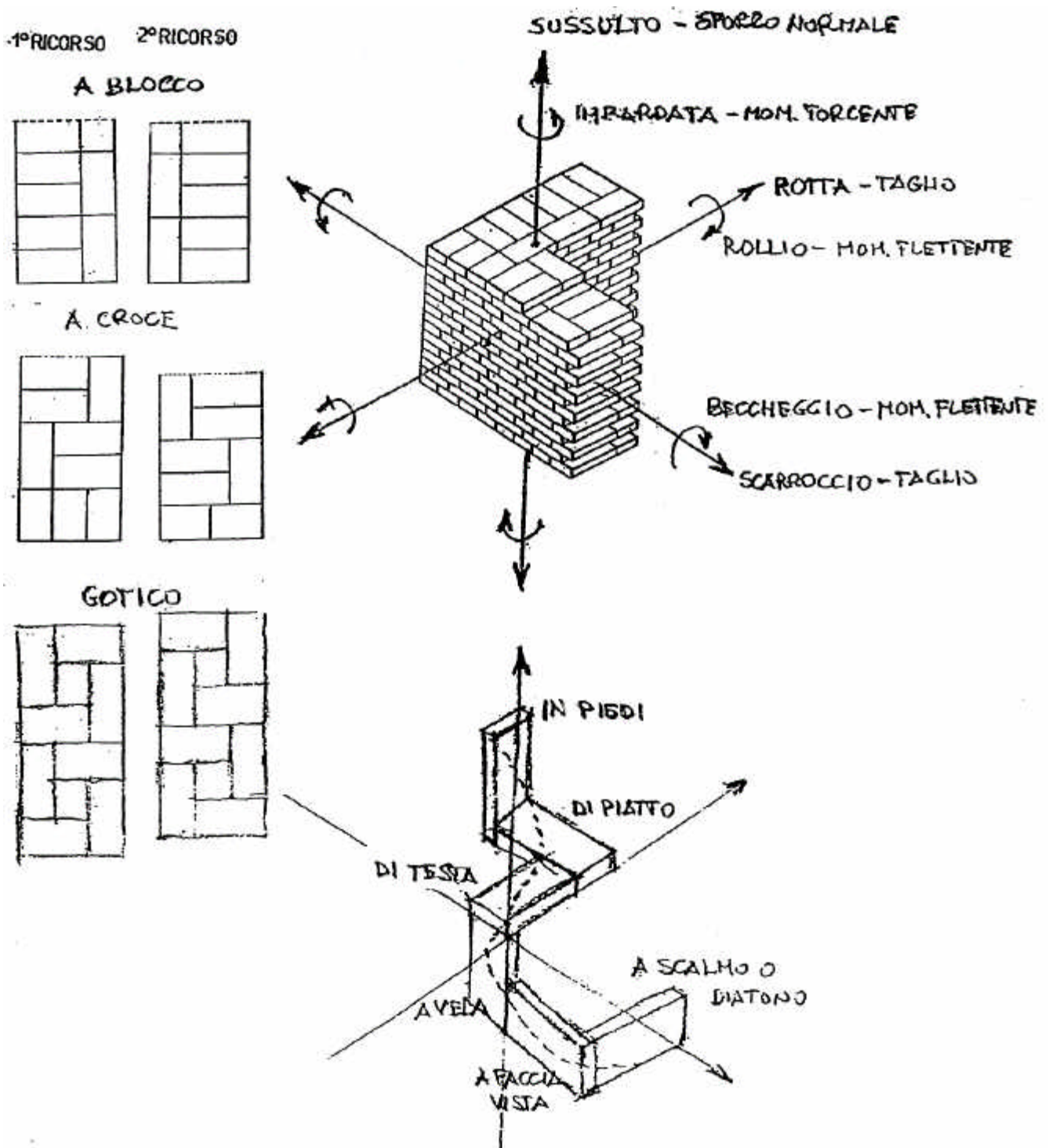


Fig.2 Lesione impedita disponendo i mattoni nella tessitura muraria in modo da bloccare tutti e 6 i gradi di libertà duali delle 6 componenti di sollecitazione.

I 6 gradi di libertà lagrangiani di un corpo rigido nello spazio sono caratterizzati dalle 3 componenti di traslazioni di "rotta", "scarroccio" e "sussulto" e dalle 3 componenti di rotazione di "rollio", "beccheggio" e "imbardata", per usare il gergo navale anziché i termini euleriani, tutte e 6 vanno sistematicamente bloccate.

Con una muratura di mattoni ciascuno di questi 6 gradi di libertà, dapprima nelle mani del muratore, se incastrati di "piatto", "di testa", "in piedi" o "a faccia vista", "a scalmò" (o diatono), "a vela", consentono di realizzare una consistenza muraria di elevatissima durabilità essendo bloccato ogni cinematismo.

La figura 2 esplicita tale realizzazione della consistenza muraria in modo da impedire il formarsi di lesioni indotte da ciascuna delle 6 sollecitazioni, come con i ricorsi murari specie gotici; la lesione tratteggiata ad elica è allora innescabile con molta difficoltà.

Le scelte strutturali rappresentano l'essenza della "firmitas" vitruviana sino ad arrivare al dualismo statico-estetico della recente Storia della Architettura; scelte che devono essere ancor più controllate proprio dai destrutturalisti per realizzare liberamente una valida "vetustas", sempre valorizzando la "utilitas", sino all'emblematico funzionalismo di Gropius.

Analoga problematica presentano le scelte strutturali nel campo della Conservazione del Patrimonio Architettonico e Paesaggistico, per cui i corsi di Consolidamento non possono essere alternativi ai presenti; il Geriatra rischia molto di più di un Medico di base, specie se evita l'accanimento terapeutico, ovvero il rispetto dell'opera.