

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 rigidzze 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

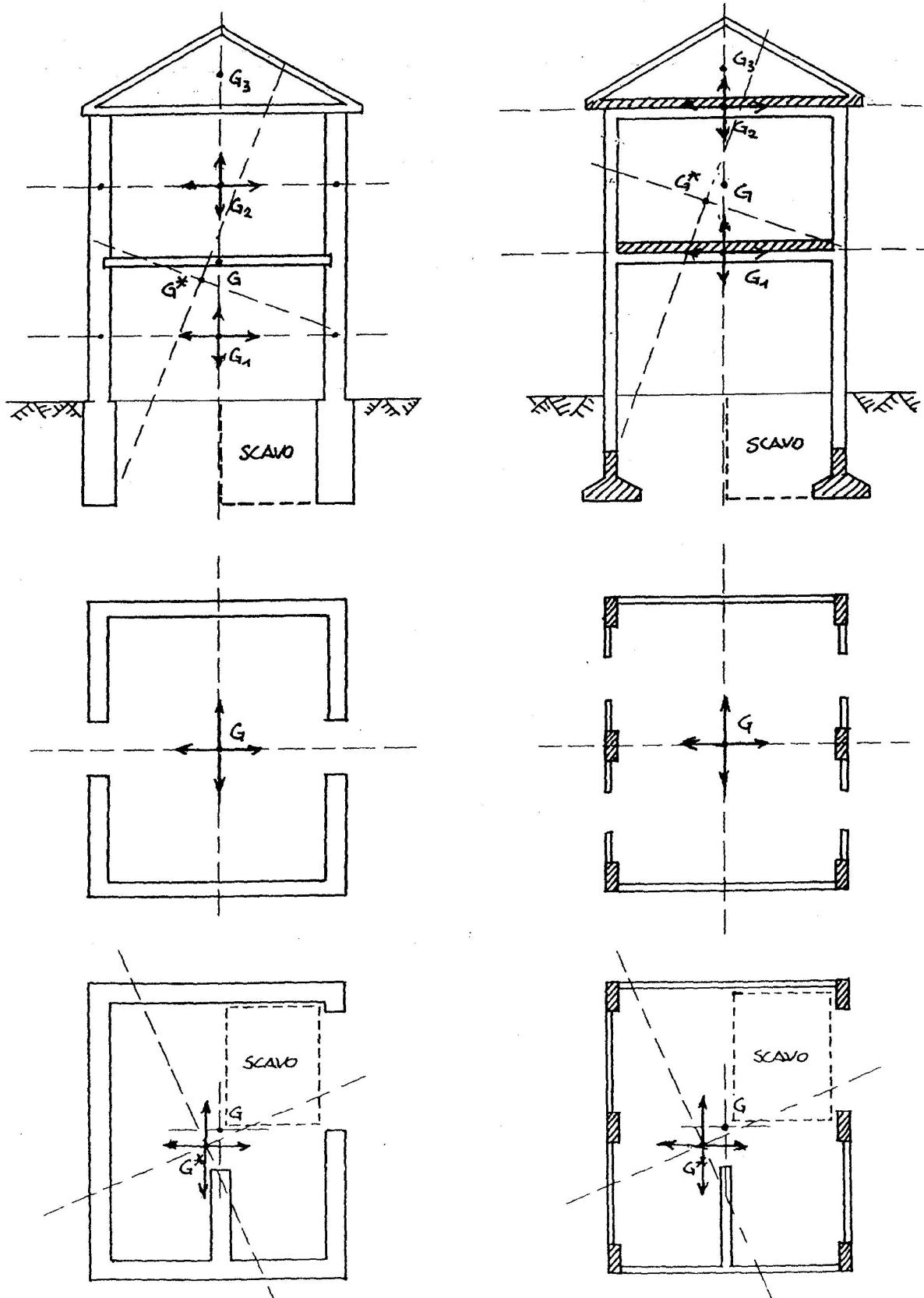


Fig.1 Il ruolo della distribuzione delle masse e delle rigidezze di un edificio in muratura ed in c.a, e modifica dei baricentri e degli assi principali di inerzia alle azioni sismiche per effetto di casuali ristrutturazioni.

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 (v , figura 4 a).

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 cinematismi 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 rigidità di *predimensionamento* che, come si preciserà nel paragrafo successivo, si basa sull'imporre "piccoli" gli spostamenti, ovvero le rigidità 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 rigidità 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 rigidità 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.

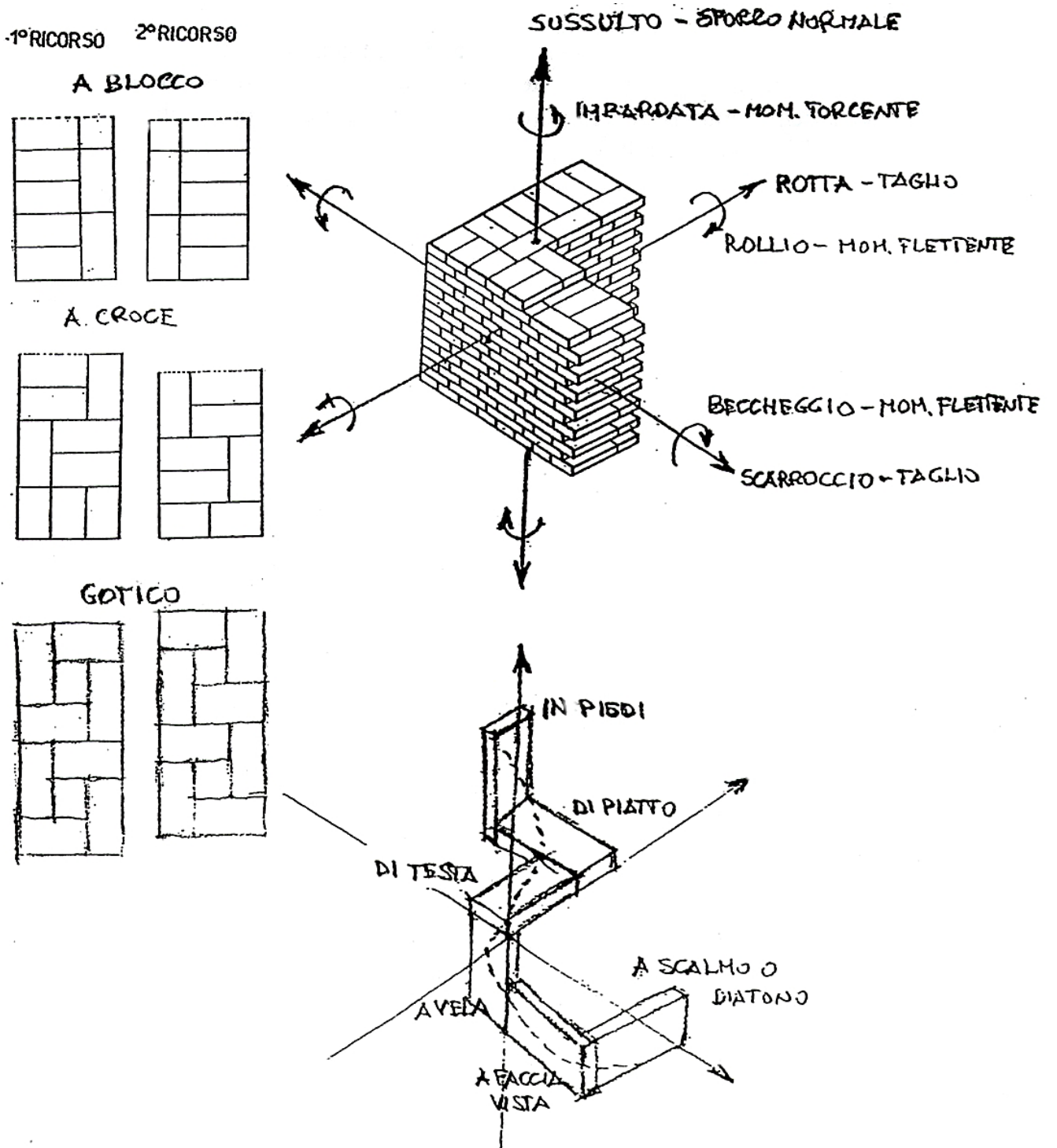


Fig.2 Lesione impedita disponendo i mattoni nella tessitura muraria in modo da bloccare tutti e 6 i gradi di libertà duali delle 6 componenti di sollecitazione.

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.