

Esoscheletri per le costruzioni esistenti in muratura

AUTORE: Paolo Foraboschi, Ingegnere e Professore di Tecnica delle Costruzioni

SOMMARIO

La presente nota fa seguito a quella del 2024 dal titolo “Prevenzione sismica e rigenerazione architettonica mediante esoscheletri”, anch’essa pubblicata sulla piattaforma InGenio. Quella trattava gli esoscheletri in generale, questa gli esoscheletri per gli interventi strutturali sull’esistente, con riferimento alle costruzioni in muratura e a come le loro caratteristiche ne condizionano il progetto. Per le definizioni generali e l’inquadramento si rimanda alla nota precedente.

1. Definizione di esoscheletro per gli interventi sulle murature

La nota precedente si apriva con la definizione di esoscheletro per il nuovo e per il costruito. Questa restringe tale definizione agli esoscheletri utilizzati per gli interventi sulle costruzioni murarie. Prima può essere utile richiamare le prestazioni richieste a una muratura.

Ogni costruzione deve soddisfare gli Stati Limite Ultimi statici, ossia deve garantire un’adeguata portanza. Nelle murature – nuove o esistenti – ciò comporta la determinazione della minima stesa di carico che innesca un modo di crisi – capacità statica – e la verifica che essa sia maggiore del carico di progetto – domanda. I coefficienti parziali per le azioni sollecitanti (sfavorevoli) sono $\gamma_{G1} = 1.3$, $\gamma_{G2} = 1.5$, $\gamma_Q = 1.5$; per le azioni resistenti (favorevoli), sono $\gamma_{G1} = 1.0$, $\gamma_{G2} = 0.8$, $\gamma_Q = 0.0$; per i materiali sono, di solito, $\gamma_M = 3.0$ e $\gamma_M = 2.0$, rispettivamente nelle verifiche statiche e sismiche.

Una nuova costruzione deve soddisfare gli Stati Limite di Esercizio statici, ossia deve garantire una serie di prestazioni connesse alla fruizione e alla durabilità. Per il costruito, invece, il paragrafo 8.3 delle NTC/2018 riporta: “La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi sulle costruzioni esistenti potranno essere eseguite con riferimento ai soli SLU”, sottinteso statici e sismici. Quella deroga, mentre può comportare una freccia dei solai post-operam maggiore di quella prescritta per i solai ex-novo, non comporta mai che un elemento murario disattenda gli SLE. Infatti, tutti gli elementi murari, tacitamente e implicitamente, hanno sempre e comunque un comportamento di esercizio largamente confacente. Più nello specifico:

- Una struttura muraria lavora con sforzo normale contenuto nel proprio spessore e quindi in regime prevalentemente assiale. Perciò, esibisce deformate modeste e irrilevanti (là dove non lo fossero, significherebbe che la struttura è sull’orlo del collasso).
- Le fessure non mettono a nudo alcun componente metallico interno. Quindi non ci sono materiali suscettibili al degrado che, come tali, devono essere protetti evitandone l’esposizione all’aria.
- Il livello delle tensioni di compressioni in una muratura non incide sulla sua durabilità.

Ogni costruzione deve soddisfare gli SLU sismici (SLV e/o SLC). Nelle nuove costruzioni, a fronte della

azione sismica definita al paragrafo 3.2 delle NTC/2018; negli interventi sull'esistente, a fronte della azione sismica definita al paragrafo 8.4, che permette riduzioni, a parte l'adeguamento con $\zeta_E \geq 1$. Una nuova costruzione deve soddisfare gli SLE sismici (SLD o SLO). Un intervento sull'esistente, in base al succitato passaggio del paragrafo 8.3, non ha invece tale obbligo (a parte la classe d'uso IV). La definizione di esoscheletro per gli interventi sul costruito in muratura deve quindi essere raggugliata agli obiettivi prestazionali sopra richiamati.

Sistema strutturale ex-novo, esterno e collegato alla costruzione in muratura esistente, che ne incrementa la capacità alle azioni orizzontali (sismiche) e la portanza alle azioni verticali (gravitazionali e sismiche), e che può sia incrementarne la rigidità (classe d'uso IV) sia ridurre la traslazione orizzontale ultima in domanda (SLC).

2. Potenzialità dell'esoscheletro nel costruito

La nota del 2024 ha illustrato i benefici offerti da un esoscheletro applicato al patrimonio edilizio. Di seguito il riepilogo, articolato in sette categorie. Le prime tre riguardano le prerogative strutturali derivanti dalla definizione sopra riportata, mentre le ultime quattro rappresentano le opportunità architettoniche conseguibili con limitati oneri aggiuntivi.

- 1- Prestazioni: incremento della portanza statica (SLU statici) e della capacità sismica (SLV e SLC); riduzione della deformabilità (sia per gli SLO ed SLD, sia anche per lo SLC). Impiego di elementi predisposti per dissipare, facilmente sostituibili dopo aver espletato la loro funzione durante un sisma.
- 2- Ingombri: nessuna nuova struttura negli spazi interni, che quindi non vengono modificati o alterati. Non si hanno perciò impatti su fruibilità, funzionalità, vivibilità e accessibilità.
- 3- Esecuzione: nessuna lavorazione all'interno dell'edificio, che resta pienamente fruibile anche durante la messa in opera. L'uso dell'edificio non viene quindi mai interrotto.
- 4- Efficientamento: un nuovo involucro per l'ottimizzazione energetica e il miglioramento di salubrità, climatizzazione e comfort degli ambienti interni.
- 5- Distribuzione: addizioni esterne localizzate in cui possono essere collocati nuovi collegamenti verticali (scale e ascensori) e nuovi servizi (bagni e locali tecnici).
- 6- Espansione: aumento della volumetria con ampliamenti verso l'esterno (esoscheletro tridimensionale), o verso l'alto (sopraelevazioni).
- 7- Riconfigurazione: riqualificazione architettonica dell'edificio: rimodulazione del carattere, della morfologia e della tettonica.

L'esoscheletro può rappresentare la soluzione ottimale anche quando offre solo una parte dei benefici e delle opportunità strutturali sopra richiamati.

Ad esempio, può rimanere una scelta valida anche qualora siano necessarie lavorazioni all'interno dell'edificio: se sono di piccola entità e breve durata, la riduzione dei benefici esecutivi risulta solo marginale. Analogamente, può mantenere la propria validità anche qualora, oltre all'esoscheletro, debba essere realizzato un endoscheletro ex-novo, che si aggiunge all'endoscheletro costituito dalla struttura esistente. Se l'endoscheletro di nuova realizzazione è composto esclusivamente da elementi orizzontali (di rapida messa in opera), i vantaggi in termini di ingombri non risultano compromessi.

3. La pratica corrente degli esoscheletri nel costruito

Nel nuovo, l'esoscheletro viene introdotto nell'ambito del progetto architettonico, come illustrato nella nota precedente: permette di dare corpo a una specifica concezione architettonica, e a una idea progettuale complessiva improntata sull'assenza di strutture interne all'edificio.

Negli interventi sul patrimonio edilizio, l'esoscheletro dovrebbe essere introdotto, pure qui e a maggior ragione, nell'ambito del progetto architettonico, specie per le costruzioni in muratura, dove implica il completo cambiamento del carattere dell'edificio. E, ancor più, nell'ambito del progetto generale, comprendente il programma funzionale, fruitivo, energetico ed economico, nonché la pianificazione urbanistica della costruzione, tenendo conto dei benefici e delle opportunità offerti.

Invece negli interventi sul patrimonio edilizio, l'esoscheletro viene generalmente introdotto unicamente perché occorre incrementare la capacità statica o sismica, senza interferire con la fruizione e senza modificare gli spazi interni (le prime tre categorie del paragrafo 2 precedente).

Dei benefici e delle opportunità offerti vengono recepiti soltanto quelli strutturali, mentre solo raramente vengono considerati quelli architettonici (le ultime quattro categorie del paragrafo 2).

Ciò comporta non solo che le potenzialità degli esoscheletri rimangano inesprese, ma anche che essi risultino architettonicamente avulsi e disgiunti dal contesto preesistente.

Specie nelle costruzioni murarie, l'intervento provoca spesso una cesura tra la nuova addizione e l'edificio originario, che impoverisce la qualità architettonica dell'edificio.

4. Paragrafo 8.4 delle NTC/2018: miglioramento o adeguamento

Negli edifici in CA e in acciaio, un intervento mediante esoscheletro non rientra nella categoria "Riparazione o intervento locale" (§ 8.4.1 delle NTC/2018) perché modifica significativamente il comportamento dinamico della costruzione. Nelle murature, se l'esoscheletro è un telaio, esso non modifica significativamente il comportamento dinamico della costruzione, almeno finché le strutture verticali non hanno raggiunto una condizione prossima alla labilità (le murature sono molto più rigide dei telai). Tuttavia, difficilmente l'intervento riguarderà "singole parti e/o elementi della struttura". Farlo rientrare in quella categoria sembra pertanto molto forzato.

Ad ogni modo, chi scrive ha una forte idiosincrasia verso l'approccio giuridico alle normative tecniche e alla loro lettura da legale, in controluce. Lasciando i cavilli normativi ad Altri, si assume che, anche per le murature, un intervento esoscheletrico non possa collocarsi nella categoria "Riparazione o intervento locale".

Ciò premesso, occorre stabilire se un intervento mediante esoscheletro implichi l'adeguamento (ai sensi del § 8.4.3 delle NTC/2018) oppure sia sufficiente il miglioramento (ai sensi del § 8.4.2).

Può essere utile ricordare che le NTC, col termine "miglioramento" sottintendono la locuzione "adeguamento statico e miglioramento sismico" (oppure "restrizione dell'uso" e miglioramento sismico), e col termine "adeguamento" sottintendono la locuzione "adeguamento statico e sismico".

Ciò precisato, per rispondere alla domanda è necessario procedere a una analisi esegetica del § 8.4.3 delle NTC/2018, seguita dalla sua interpretazione; un'operazione tutt'altro che appassionante; ma a questo ci hanno ridotto dal maggio 2003. Cui si aggiunge che le interpretazioni sono soggettive e talvolta capziose.

Per gli esoscheletri, il comma cruciale di quel punto normativo è il *b*, che prescrive l'adeguamento allorquando si esegua un ampliamento connesso alla costruzione esistente, tale da alterarne significativamente la risposta. Occorre allora decifrare i termini "ampliamento" e "risposta".

Per quel punto normativo, una variazione dell'altezza che non comporti incrementi di superficie abitabile (cordoli sommitali, nuova copertura) non è considerata un ampliamento. Allo stesso modo, una variazione della pianta che non comporti incrementi di superficie abitabile non è da considerarsi un ampliamento, indipendentemente dalle eventuali variazioni di risposta comportate.

Pertanto, un esoscheletro bidimensionale non rientra nel comma *b*.

Invece, un esoscheletro tridimensionale ci rientra, poiché è un ampliamento; occorre allora valutare se modifica la risposta. Sennonché il comma *b* non specifica a quale risposta si riferisca. Tuttavia, i commi *c* e *d* vertono esplicitamente sulla risposta statica, cioè ai carichi gravitazionali. Per estensione, anche il comma *b* non può che riferirsi alla risposta statica. Anche perché, solo un "intervento di riparazione o locale" non modifica il comportamento dinamico, mentre quella modifica è implicita non solo in un intervento di adeguamento ma anche in un intervento di miglioramento.

Dunque, nemmeno l'esoscheletro tridimensionale rientra nel comma *b*.

Ciò precisato, un intervento con esoscheletro (bi- o tridimensionale) ricade nel miglioramento se: non comporta una sopraelevazione della costruzione (comma *a*), non implica un aumento dei carichi statici superiore al 10 % (comma *c*), non modifica il flusso dei canali statici più del 50 % (commi *b* e *d*), non modifica la destinazione d'uso a scuola o a edificio strategico (comma *e*).

5. Criterî di progettazione degli esoscheletri per il costruito in muratura

La nota del 2024 ha mostrato che la progettazione di un esoscheletro per il costruito comporta una serie di scelte: la conformazione spaziale, il tipo strutturale, i materiali e le strategie per superare alcune criticità congenite. Questo paragrafo accenna a come orientare quelle scelte per le murature. A tali scelte si dovrebbero aggiungere due opzioni di fondo previste dalla normativa: progettazione dissipativa o non-dissipativa, ed elementi primari o secondari. Per gli esoscheletri, tuttavia, quella non è generalizzabile, questa è una scelta, di fatto, obbligata.

Sulla scelta tra una progettazione per comportamento dissipativo o non-dissipativo, infatti, nulla può essere stabilito a priori: l'opzione migliore dipende dalla situazione contingente, in particolare dall'accoppiamento tra l'esoscheletro e il sistema costruttivo originario.

Con riferimento agli elementi primari o secondari, l'edificio esistente potrebbe essere considerato quale sistema strutturale "secondario" ai sensi del primo comma del § 7.2.3 delle NTC/2018. Fatta quella posizione, il sistema strutturale primario è costituito dal solo esoscheletro.

Sennonché, il succitato punto normativo giustamente prescrive che l'esistente trattato come secondario sostenga i carichi gravitazionali anche quando è soggetto agli spostamenti più sfavorevoli allo SLC. Perciò, il progetto deve comunque occuparsi dell'esistente e, se necessario, deve adottare magisteri costruttivi che gli permettano di mantenere la portanza anche nelle configurazioni deformate estreme.

Per inciso, anche se qualcuno – e speriamo non ce ne siano – orientasse le scelte progettuali unicamente a ridurre gli oneri di calcolo, non otterrebbe alcun vantaggio dal trattare l'esistente come secondario. Infatti, la normativa esenta dall'effettuare le verifiche di gerarchia delle resistenze e dei

particolari costruttivi richieste per il nuovo. La suindicata verifica coincide quindi con la verifica post-operam dell'esistente.

Pertanto, ascrivere l'esistente a struttura secondaria comporta un significativo svantaggio – si trascura il suo contributo alla capacità sismica – senza ricevere alcun beneficio – l'iter progettuale rimane il medesimo – e quindi questa opzione non è mai conveniente.

Esiste però un'altra possibilità, che sparglia l'intero scenario. Il secondo comma del succitato § 7.2.3 contempla gli elementi costruttivi non-strutturali. Ebbene, le strutture orizzontali (travi primarie e secondarie) e verticali (pareti e pilastri) esistenti possono essere considerate come elementi costruttivi che, pur avendo rigidezza, resistenza e massa tali da influenzare in maniera significativa la risposta strutturale, non hanno alcun ruolo portante nella condizione post-operam. Dell'esistente, dunque, solo i solai vengono considerati come strutture. Va da sé che questa posizione comporta un intervento di adeguamento (comma *d* del § 8.4.3) e che l'esoscheletro deve portare, non soltanto l'intera azione sismica, ma anche tutti i carichi gravitazionali.

Tuttavia, il solo esoscheletro è insufficiente, a parte il caso di strutture verticali esistenti collocate esclusivamente lungo il perimetro (nessuna struttura verticale di spina). In genere, è necessario anche un endoscheletro ex-novo, deputato al supporto dei solai.

A meno che la larghezza dell'edificio in pianta non sia notevole, l'endoscheletro può essere costituito esclusivamente da elementi orizzontali collegati all'esoscheletro: perde una prerogativa – evitare lavorazioni dentro l'edificio – ma conserva quella principale – assenza di strutture verticali negli spazi interni. Un endoscheletro costituito da travi può essere incassato nei solai e, qualora emerga, può essere occultato con una controsoffittatura.

Chi scrive ha adottato questa soluzione per un plesso scolastico in CA (Figura 1). L'endoscheletro, che ribassava di 15 cm, è stato celato con una controsoffittatura, che ha anche fornito la protezione al fuoco. La scelta si è confermata valida anche economicamente. Difatti, il costo per l'adeguamento statico e sismico, più la riqualificazione architettonica (infissi, bagni, coperto), nel 2009, è risultato 378 €/m² per 2332 m², ovvero 109 €/m³ per 8030 m³. È però anche da dire che, con CSP e CSE attenti più alla forma che alla sostanza, occorre individuare un espediente per evitare la spesa inutile di puntellare le strutture esistenti durante i lavori, come se fossero davvero prive di capacità portante. Questa soluzione è tuttavia estrema; perciò, nel prosieguo non sarà più considerata. Fermo restando che, là dove si intenda minimizzare le lavorazioni all'interno dell'edificio, può risultare vantaggiosa. Infatti, l'esistente assunto come non-strutturale deve solo garantire la propria stabilità ai sensi del § 7.3.6.2 delle NTC/2018, ma non deve portare alcun carico in condizione deformata.

5.1 Conformazione spaziale e tipo strutturale di esoscheletro

Un esoscheletro è caratterizzato dalla sua conformazione nella terza dimensione, quella ortogonale alle superfici a cui è addossato; come già osservato, può essere bidimensionale, tridimensionale o misto, ossia con parti bi- e parti tridimensionali. In genere, la scelta è di natura architettonica, urbanistica ed economica; come tale è dettata o dalla committenza oppure dal progetto architettonico. Ma c'è un caso dove la scelta è dettata dal progetto strutturale: se i solai dell'esistente non sono sufficientemente rigidi e resistenti nel piano, e non è possibile eseguire lavorazioni all'interno per

irrigidirli e irrobustirli. In questo caso occorre necessariamente adottare un esoscheletro tridimensionale oppure misto, e dotarlo di impalcati sufficientemente rigidi e resistenti (paragrafo 5.3).

Altra situazione tecnica che può obbligare alla conformazione tridimensionale è quando occorre un efficientamento energetico radicale.

Naturalmente, una terza dimensione impiegata unicamente per avere impalcati rigidi e resistenti rappresenterebbe uno spreco di risorse; deve essere usata anche dall'architettonico. Negli edifici in muratura, però, i collegamenti dei volumi creati dalla terza dimensione con l'interno dell'edificio possono richiedere numerose ed ampie aperture nelle pareti perimetrali, le quali aggravano le carenze statiche e sismiche.

I tipi strutturali ricorrenti sono tre: reticolare, intelaiato e ibrido. Oltre a questi, lo scrivente ha anche realizzato esoscheletri definibili come "integrati all'esistente".

Se l'esoscheletro è utilizzato per l'adeguamento statico, mentre per la sismica è sufficiente incrementare ζ_E di 0.10, tutti e tre i tipi sono appropriati; la scelta è allora dettata dall'architettonico, che generalmente predilige il telaio.

Se l'esoscheletro è invece utilizzato per conseguire un cospicuo aumento di ζ_E partendo da un valore basso e portandolo a 0.60, 0.80 o 1.0, il tipo reticolare permette di ottenere i maggiori incrementi. Nella conformazione bidimensionale, le aste compresse possono essere vincolate al sistema strutturale preesistente, così da interdire l'instabilità.

Tuttavia, il tipo reticolare comporta aste diagonali, che spesso non si conciliano con le aperture. In ogni caso, deve essere progettato da un architetto di talento, altrimenti il risultato è poco più di una misera stampella.

Tutto l'opposto per il tipo intelaiato: meglio gestibile architettonicamente, ma meno performante strutturalmente. Già dotare un telaio della resistenza richiesta non è facile; dotarlo pure di una rigidità paragonabile a quella dell'edificio murario può risultare assai oneroso. In generale, il telaio comporta soluzioni massicce e voluminose, altrimenti i suoi contributi diventano apprezzabili solo dopo un'estesa fessurazione delle murature, la sua capacità viene raggiunta solo dopo il parziale collasso delle stesse, e la sua dissipazione avviene solo dopo l'avanzato collasso delle stesse.

Per bilanciare i punti di forza e di debolezza di quei due tipi, il progetto spesso adotta il tipo ibrido: reticolare con eccezioni in corrispondenza delle aperture. Nell'esoscheletro ibrido, le aste trasmettono un cospicuo sforzo normale, ma anche momento e taglio non trascurabili.

La scelta ottimale dipende dall'accoppiamento con l'edificio esistente, di cui al paragrafo 5.3.

Gli esoscheletri integrati all'esistente in muratura consistono in rinforzi in materiale composito (FRP o FRCM) applicati alle pareti murarie esterne, così da realizzare una sorta di scatola (Figura 2). Questo tipo non è quindi ex-novo ma deriva da una integrazione della costruzione originaria.

I rinforzi applicati solo sulla superficie esterna di una parete ma non su quella interna sono asimmetrici. In genere quella condizione è da evitare, ma qui non implica alcuna apprezzabile riduzione della capacità sismica rispetto all'applicazione su entrambe le facce, a parità di quantitativo di rinforzo.

La disposizione dei rinforzi deve realizzare un ideale sistema reticolare nel quale le aste compresse sono in muratura e quelle tese sono in composito: reticolari piane virtuali.

Gli esoscheletri integrati all'esistente possono essere declinati in modo specifico per gli edifici inte-

laiati, in CA o in acciaio, fortemente danneggiati da un terremoto: il sistema sismo-resistente originario può essere trasformato da telaio a pareti murarie armate, sostituendo i tamponamenti esterni con muratura armata disposta all'interno di ciascun campo dei telai.

L'intervento dà luogo a un edificio che porta le azioni sismiche tramite i pannelli perimetrali – un esoscheletro – mentre la struttura preesistente viene declassata da primaria a secondaria, evitando così di doverne stimare la capacità sismica residua.

Se la struttura preesistente non garantisce affidabilità nemmeno ai carichi verticali, l'intervento può essere esteso ai tramezzi, creando un endoscheletro che, insieme all'esoscheletro, porta anche le azioni gravitazionali. L'esistente viene quindi declassato da struttura portante a bordatura non portante. Ciò implica ovviamente l'adeguamento.

Questa soluzione è ancora più vantaggiosa perché una sola lavorazione permette di riparare il danno e di adeguare l'edificio prescindendo dalla capacità del sistema strutturale esistente (Figura 3).

5.2 Materiali

Gli esoscheletri per il costruito murario possono essere realizzati in CA, in acciaio, o in acciaio-calcestruzzo; invece il legno, specie quello massiccio, non si presta, soprattutto se sono volti alla prevenzione sismica. A ciò si aggiungono i materiali compositi e la muratura armata degli esoscheletri integrati introdotti nel precedente paragrafo 5.1 (Figure 2 e 3).

Di seguito, l'autore condivide alcune esperienze personali sul tema.

L'acciaio appare il materiale più adatto per gli esoscheletri, in ragione della sua versatilità. Per sfruttare pienamente le potenzialità è però opportuno non limitarsi alle soluzioni standard, ma valutare anche configurazioni meno convenzionali, quali le sezioni piegate a freddo e i profilati ottenuti mediante la saldatura di lamiera.

L'esoscheletro d'acciaio richiede un trattamento superficiale per inibire la corrosione e, se porta i carichi verticali, la protezione passiva al fuoco (di solito non sono previsti sistemi attivi, come gli sprinkler). Questi trattamenti devono essere progettati anche in termini cromatico-estetici.

Il CA si presta bene per il telaio, mentre risulta meno indicato per la reticolare o il tipo ibrido. Infatti, il comportamento reticolare può essere ottenuto soltanto con pareti (il cui funzionamento è equivalente a una reticolare), ma il loro inserimento nell'architettonico è spesso ostico.

La soluzione ottimale sotto il punto di vista strutturale, architettonico ed economico frequentemente è quella composta acciaio-calcestruzzo, soprattutto quando l'acciaio è realizzato con soluzioni non convenzionali e il calcestruzzo è autocompattante (Figura 1).

Talvolta, questa soluzione può semplificare la protezione al fuoco, poiché il cls, debitamente armato, può riuscire a portare da solo, senza lavorare in composizione con l'acciaio da carpenteria (ma solo con le armature), i carichi verticali ridotti dal coefficiente di combinazione Ψ prescritto per l'azione eccezionale incendio.

5.3. Condizionamenti, limiti e impedimenti dovuti all'edificio esistente

Le caratteristiche dell'edificio esistente influenzano drasticamente la concezione dell'esoscheletro, riducendo il numero di opzioni e comprimendo lo spazio di manovra della azione progettuale.

5.3.1 Curva di capacità dell'esistente

L'informazione più utile sarebbe la curva di capacità della struttura esistente (nelle due direzioni), cioè il diagramma $F_b - d_c$ di cui al § 7.3.4.2 delle NTC/2018. Siccome negli ultimi trent'anni l'ingegneria si è trasformata in ragioneria – non una rima, ma una cacofonia – è opportuno precisare che tale curva può essere determinata solo in modo convenzionale, ossia in via largamente approssimativa, e, nelle costruzioni murarie, in maniera qualitativa con stime grossolane.

Più nello specifico, le relazioni forza-spostamento teoriche dei componenti murari ottenute mediante i modelli reperibili nella letteratura sono poco rappresentative del comportamento reale.

Di conseguenza, le curve di capacità che se ne ottengono non colgono nemmeno gli ordini di grandezza. Non si tratta di una lacuna scientifica bensì di una condizione fisiologica: la dispersione delle curve forza-spostamento sperimentali di murature uguali per geometria e materiali è così ampia da rendere impossibile la definizione di modelli predittivi affidabili.

Va da sé che le formulazioni prescritte dalla normativa, le quali appoggiano semplificazioni operative a quei modelli, sono ancor più sommarie; convenzionali, appunto.

In generale, quella lacuna non limita l'azione progettuale, poiché gli interventi sul costruito si basano sull'interpretazione strutturale, sul senso fisico, sul giudizio ingegneristico, su considerazioni qualitative, sull'esperienza e sulla conoscenza operativa. Per contro, la normativa, le formulazioni di calcolo e i software fanno solo perdere tempo con analisi, elaborazioni e verifiche prive di significato, oltre a dare vita a teatrini con gli enti di controllo.

Nel caso degli esoscheletri per il costruito in muratura, invece, quella lacuna pone seri problemi. Infatti, la progettazione deve riferirsi almeno alla rigidezza iniziale dell'esistente (derivata all'origine della curva di capacità) e alla sua traslazione orizzontale ultima (massima ascissa della curva di capacità). Tuttavia, di quella può essere ottenuta solo una quantificazione di larga massima, mentre di questa non è possibile stimare nemmeno l'ordine di grandezza. L'approccio progettuale tipico è quindi insufficiente per gli esoscheletri. Un modo per colmare la lacuna è di integrare quell'approccio con "modellazioni limite".

Le modellazioni limite, peraltro applicabili non solo agli esoscheletri, si basano sull'individuazione di tutte le ragionevoli condizioni limite di geometria, vincoli, rigidezze, comportamenti, parametri e azioni. Dopodiché, si costruiscono tutti i modelli numerici derivanti dall'incrocio di tali condizioni, ottenendo uno spettro di risposte teoriche; il progetto deve considerarle tutte.

In sintesi, le modellazioni limite inglobano tutte le incertezze plausibili, intrinseche all'edificio in oggetto, e l'esoscheletro viene progettato in modo che tutte le risposte teoriche limite siano confacenti. Dunque, anziché basarsi su previsioni largamente incerte, ci si riferisce a condizioni sì limite, ma relativamente certe. Se è vero che quelle soluzioni progettuali sono più costose, è però anche vero che i maggiori costi, di solito, sono percentualmente modesti. Anche l'analisi è più onerosa, ma i risultati giustificano il maggior impegno. Per inciso, le modellazioni limite giustificerebbero riduzioni dei coefficienti parziali (pareggiando i costi); ma ciò non trova riscontro nelle normative.

La lacuna può essere parzialmente colmata anche mediante prove dinamiche (o statiche), sulla costruzione esistente. Per inciso, tali prove dovrebbero essere adottate in tutti gli interventi complessi. Stranamente, però, la normativa continua ad associare il livello di conoscenza solo alle prove sui materiali, ma non alle prove sulle strutture, mentre nelle murature queste incrementano il livello di conoscenza molto di più di quelle, specie se la portanza è dettata da un meccanismo cinematico.

Il funzionamento ottimale richiede che la traslazione orizzontale al limite elastico dell'esoscheletro sia quantomeno inferiore alla traslazione orizzontale ultima in capacità dell'esistente. Altrimenti, l'esoscheletro non può attingere la capacità portante alle azioni orizzontali. Se poi la progettazione è dissipativa, quella deve essere molto minore di questa (Figura 4).

Un edificio in muratura integro o, per meglio dire, con le sole fessurazioni fisiologiche, è estremamente rigido. In quella condizione, le traslazioni orizzontali sono piccolissime; diventano apprezzabili solo quando l'edificio esibisce quadri fessurativi ampi ed estesi (Figura 4), e una parte delle strutture verticali ha perso l'equilibrio, dando luogo a moti rigidi (rotazioni con schiacciamenti, fessure pseudo-verticali e dislocazioni nelle compagini sede dei perni; traslazioni con fessurazioni da taglio). Affinché la traslazione al limite elastico dell'esoscheletro, specie se intelaiato, sia inferiore a quella ultima della struttura esistente occorrono aste con sezioni spesso eccessive.

Per avere un esoscheletro che raggiunga l'intera resistenza e, a maggior ragione, che dissipati, si deve stabilire se siano del tutto escluse lavorazioni all'interno dell'edificio. Se almeno piccole lavorazioni di breve durata sono ammesse, la traslazione orizzontale ultima in capacità dell'esistente può essere incrementata anche in misura considerevole.

5.3.2 Resistenza e rigidità degli orizzontamenti nel piano: solai esistenti

I solai, oltre a portare i carichi verticali, compongono gli orizzontamenti, i quali trasferiscono le azioni orizzontali alle strutture verticali sismo-resistenti. Il funzionamento ottimale di un orizzontamento è di piano infinitamente rigido: rigidità e resistenza nel piano medio sufficientemente grandi, in rapporto alle strutture verticali, da poter assimilare il suo moto a una roto-traslazione.

Il piano rigido fa sì che, a meno dell'eccentricità del baricentro di piano rispetto al centro delle rigidità (traslazione senza rotazione), le azioni orizzontali sono trasferite alle strutture verticali in base alle rigidità di quest'ultime anziché secondo le aree d'influenza. Ma soprattutto, nelle costruzioni murarie il piano rigido fa sì che le azioni orizzontali siano trasferite quasi interamente alle strutture verticali in cui generano momenti e tagli nel piano (oltre agli sforzi normali), mentre a quelle in cui generano momenti e tagli fuori dal piano ne viene trasferita solo una frazione trascurabile.

Con un esoscheletro il funzionamento resta quello, ma cambiano le condizioni al contorno, col risultato che l'impegno statico degli orizzontamenti è maggiore. Logica conseguenza, gli esoscheletri impongono di occuparsi della rigidità e della resistenza dei solai nel piano.

Senonché, la ricerca scientifica sul tema è poco sviluppata, specie riguardo ai solai degli edifici storici. In particolare, in letteratura c'è un vuoto sull'aspetto più importante: la sperimentazione. Quella lacuna si riflette nella normativa, dove la modellazione dei solai nel piano non è trattata e la condizione di orizzontamento infinitamente rigido e resistente nel piano è definita in modo convenzionale, in base solo ai materiali e agli spessori. Per inciso, le NTC/2008 menzionavano solo la rigidità e non consideravano la resistenza, che è stata inserita soltanto dalle NTC/2018, nonostante la rotura dei solai nel piano, specie ai livelli inferiori, sia tutt'altro che rara (Figura 5).

Che, almeno su quello, la normativa non imponga calcoli è cosa buona. Ma una lacuna nella letteratura scientifica ha sempre ripercussioni negative sulla pratica, poiché non permette di conoscere le esperienze precedenti, impedendo la stratificazione dei saperi. Mancano quindi riferimenti consolidati e un pensiero critico su questa tematica, il che rende ogni caso un nuovo inizio.

Ciò premesso, si passa ai problemi specifici.

L'esoscheletro tridimensionale è dotato di impalcati la cui rigidezza e resistenza nel piano possono essere progettate in modo tale da farli funzionare come piani rigidi e, soprattutto, da imporre un comportamento di piano rigido agli orizzontamenti esistenti ai quali sono collegati.

L'esoscheletro bidimensionale non ha invece alcun impalcato e quindi il suo comportamento fuori dal piano di ciascuna delle facciate a cui è addossato è sempre governato dalla flessione delle sue aste, anche se reticolare. Perciò, la configurazione bidimensionale non funziona a piano rigido: sono gli orizzontamenti della costruzione esistente a dettare il trasferimento delle azioni orizzontali.

L'esoscheletro bidimensionale funziona dunque congiuntamente agli orizzontamenti esistenti. Nello spirito dell'analogia zoologica, il sistema sismico complessivo (primario) si compone di un esoscheletro più un endoscheletro, quello ex-novo, questo preesistente. Tuttavia, l'endoscheletro, in genere, non è stato progettato a piano rigido.

Di conseguenza, anche orizzontamenti che avrebbero un comportamento a piano rigido sulle luci delle strutture verticali esistenti possono non averlo sulle luci imposte dall'esoscheletro.

Un esoscheletro bidimensionale con funzionamento prevalentemente assiale (reticolare o ibrido) ha un'elevata rigidezza nei piani delle facciate a cui è addossato. In questa configurazione, ciascun orizzontamento lavora sulla luce pari alla distanza dei due prospetti dell'edificio paralleli all'azione orizzontale (Figura 6); la sua luce nel piano è dunque pari alla lunghezza o alla larghezza dell'edificio. Su luci così grandi, la rigidezza e/o la resistenza dell'orizzontamento spesso sono insufficienti.

Una osservazione, ancorché ovvia. La resistenza e la rigidezza di un solaio nel piano sono correlate: lavorando nel piano, la rigidezza è sempre molto grande, ma solo sino alla rottura, che può avvenire per flessione nel piano o taglio nel piano (Figura 6). Dopodiché, il solaio diventa labile.

Qualora il comportamento dei solai nel piano risulti carente, si può adottare una configurazione tridimensionale, come anticipato al punto 5.1, una configurazione mista, oppure intervenire sui solai. Optare per una configurazione tridimensionale solo perché gli orizzontamenti sono deboli nel piano, senza sfruttarne le prerogative, è però una scelta povera, da adottare solo in assenza di alternative. Se la tridimensionalità serve solo per supplire alle carenze degli orizzontamenti, può convenire la configurazione mista: esoscheletro bidimensionale con moduli tridimensionali aventi sviluppo in orizzontale, in verticale, o in entrambe le direzioni.

Moduli orizzontali (Figura 7): rinforzo del perimetro degli orizzontamenti esistenti con elementi aventi elevata resistenza e rigidezza fuori dal piano della facciata a cui sono addossati. Trattasi di travi di bordo che fuoriescono dalle facciate, dando luogo a marcapiani o, anche, ad aggetti.

Moduli verticali (Figura 8): parti tridimensionali che riducono le luci degli orizzontamenti nel piano, e quindi le loro sollecitazioni. Questa soluzione risente meno dei vincoli a terra (paragrafo 5.3.3).

Moduli orizzontali e verticali (Figura 8): la combinazione delle due soluzioni sopra indicate.

Intervenire sui solai esistenti comporta lavorazioni all'interno dell'edificio (a parte, eventualmente, la copertura). Però, la resistenza di un orizzontamento nel piano può essere incrementata con lavorazioni poco impattanti; ad esempio, applicando, all'intradosso o all'estradosso, rinforzi sottili (in acciaio o in composito), come tali rispettosi delle quote. L'incremento di rigidezza nel piano richiede invece lavorazioni invasive, specie se occorre rispettare le quote preesistenti. Tuttavia, l'incremento di resistenza, pur non modificando la rigidezza, può rendere l'orizzontamento sufficientemente rigido, poiché permette di mantenere la rigidezza iniziale anche per azioni orizzontali elevate.

5.3.3 Zone del contorno interdette all'esoscheletro

Non tutti gli spazi attorno al contorno dell'edificio possono essere invasi dalle strutture dell'esoscheletro. In primo luogo, le aperture debbono rimanere libere. Poi, la pianta al suolo può presentare vincoli di varia natura che impediscono la collocazione di strutture verticali a terra. Oltre a ciò, sbalzi, rientranze, sporgenze e altre irregolarità della sagoma dell'edificio possono richiedere adattamenti geometrici delle strutture ex-novo.

I vincoli in pianta, a terra, limitano maggiormente la configurazione tridimensionale rispetto a quella bidimensionale, mentre gli altri vincoli limitano maggiormente quella bidimensionale.

Tali vincoli possono implicare un esoscheletro fortemente irregolare in pianta e/o in altezza.

Le irregolarità originano sollecitazioni sismiche parassite, che possono richiedere dimensionamenti assai onerosi. Soprattutto, originano una torsione ad asse verticale, a cui consegue una rotazione torsionale dell'edificio (Figura 9). Tale rotazione comporta che solo le porzioni periferiche dell'esistente (i bordi della pianta) raggiungano lo spostamento ultimo in domanda, determinando un minore sfruttamento dell'esoscheletro.

6. Due osservazioni finali leggermente enfatiche

La prima. Negli esoscheletri applicati alle murature, gli obiettivi strutturali – l'incremento della capacità statica e sismica, nuove strutture non invasive degli spazi interni, e nessuna lavorazione all'interno – richiedono una progettazione fuori dalla prassi, fondata su criteri non convenzionali, sviluppata al di là di schemi precostituiti, capace di proporre soluzioni innovative, che debbono essere analizzate e verificate con metodi di calcolo ad hoc, spesso non governabili con i software.

Sennonché, viviamo in un'epoca che tende a limitare, penalizzare e ostacolare le soluzioni strutturali non direttamente inquadrabili nelle normative, non gestibili mediante i codici di calcolo numerico, non riconducibili alle pratiche consolidate.

Da molti anni, il progettista strutturale non è più sovrano nel proprio operato, né libero di agire in autonomia, secondo la propria capacità ed esperienza. È prevista una pletora di controlli, nei quali il progettista, pur avendo la responsabilità delle scelte, è costretto a giustificare e difendere il proprio progetto davanti a "Terzi". E questi Terzi emettono giudizi arbitrari che sono vincolanti, senza tuttavia nessuna responsabilità da parte loro.

Sfortunatamente, questi Terzi, spesso, sono dei "Simplicio": persone dogmatiche, i cui assiomi, oltre tutto, non si fondano su Aristotele, ma sulla normativa e sui codici di calcolo. Per loro esiste solo la conformità; una sottomissione pedissequa e acritica alle normative e alle formalità. I Simplicio difficilmente riescono a comprendere soluzioni strutturali non stereotipate e non convenzionali, e ciò che non capiscono per loro è automaticamente sbagliato.

Purtroppo, fra i Terzi, scarseggiano i "Sagredo": pochi possiedono un'apertura mentale che li porti a porsi e porre domande, a cercare di comprendere, ad analizzare e ad approfondire.

E se al progettista capita di essere "Salviati", la sua azione è soffocata, ora come lo era quattrocento anni fa: allora dall'ortodossia della chiesa alle dottrine, ora dall'ortodossia dei burocrati alle normative. Però con una differenza. La chiesa, a cominciare dal cardinale Bellarmino, sapeva che la scienza aveva ragione; però riteneva che le verità scientifiche non potessero essere divulgate. I Simplicio del mondo delle costruzioni di oggi, ritengono invece che la verità risieda tutta e solo nelle normative.

James Joyce si è posto una domanda sul più grande eroe di tutti i tempi: Ulisse, ovvero Odisseo. Come sarebbe se visse nel 1904? La sua risposta è stata che sarebbe Leopold Bloom: il capovolgimento dell'eroe omerico, l'antitesi dell'eroe greco.

Ebbene, dovremmo porci la stessa domanda sui grandi ingegneri strutturisti del passato, a partire da quando le figure dell'ingegnere e dell'architetto furono istituzionalizzate, nel 1747, anno in cui, in Francia, furono create due scuole distinte (*École Nationale des Ponts et Chaussées* ed *École des Beaux-Arts*), e soprattutto da quando le due figure iniziarono ad allontanarsi l'una dall'altra, nella seconda metà del XIX secolo (brevetto del cemento Portland: 1824; brevetto del processo Bessemer: 1856). Tra questi: Ove Arup, Isambard Kingdom Brunel, Andrea Chiarugi, Gino Covre, William Cubitt, Fabrizio de Miranda, Gustave Eiffel, Leo Finzi, Eugène Freyssinet, Edmund Happold, Fazlur Rahman Khan, Giulio Krall, Robert Maillart, Riccardo Morandi, Emil Mörsch, Sergio Musmeci, Pier Luigi Nervi, Piero Pozzati, Peter Rice, John Augustus Roebling, Jörg Schlaich, Joseph Baermann Strauss, Vladimir Grigor'evič Šuchov, Eduardo Torroja, Jules Arthur Vierendeel, Silvano Zorzi.

Come sarebbero quei Maestri "dal multiforme ingegno" se vivessero in questi tempi?

Ebbene, da un lato non diventerebbero dei Leopold Bloom ma rimarrebbero Odisseo. Dall'altro lato, però, non sarebbero destinati a imprese epiche; svolgerebbero sempre un lavoro d'eccellenza, ma rimarrebbero monadi nella mediocrità.

E difatti, anche in quest'epoca ci sono strutturisti di altissimo profilo, che non si sono appiattiti alla routine, e che non si fanno condizionare dalle sovrastrutture create dal sistema. Solo che questi strutturisti sono condannati a navigare controcorrente, e ciò finisce per tarparne l'azione.

Nell'*Ulysses* è per colpa dei tempi se Odisseo diventa Leopold Bloom. Analogamente, è per colpa dei tempi se l'ingegneria è diventata convenzionalità, ragioneria, formalità.

Mentre in passato l'ingegneria strutturale ha migliorato tantissimo la qualità della vita, facendo la storia dell'umanità, questa epoca l'ha pietrificata nella sua prima missione: la verifica di sicurezza. Medusa di quella pietrificazione è l'idea balzana secondo cui il modo migliore per governare il settore è confinarlo in norme, regolamenti, protocolli e procedure.

L'effetto prodotto è stato che, da una ventina d'anni, soprattutto in Europa, la costruzione reale è stata rimpiazzata dalla costruzione virtuale, composta da elaborati grafici, modelli numerici, certificati, marcature, documenti, dichiarazioni. Il materiale strutturale più importante è diventato la carta, che per fortuna viene sostituita dai PDF: almeno non incide sull'Amazzonia.

Agli elaborati grafici è richiesto un grado di definizione irrealistico per il cantiere, che non può trovare riscontro nella fase esecutiva. I modelli numerici vengono trattati senza considerare le incertezze di cui sono affetti. Soprattutto, si ignora che, di ogni numero restituito dal software con enne cifre decimali, se la prima cifra della parte intera del numero, quella più a sinistra, è giusta, allora quel calcolo ha colto nel segno come meglio non avrebbe potuto fare. Materiali e prodotti vengono corredati di certificazioni che nulla aggiungono alla qualità e alla sicurezza, mentre distolgono l'attenzione dai problemi concreti e importanti, oltre a dare una falsa confidenza. Le procedure prevedono protocolli tanto rigidi e lunghi quanto inutili e astrusi, che non aumentano l'affidabilità ma sottraggono tempo ed energie agli addetti ai lavori, oltre a dare l'idea di alleviare le responsabilità. Piero Pozzati, uno dei creatori della materia che chi scrive ignobilmente insegna, a lezione usava il regolo, con cui peraltro ha progettato tutte le sue opere. Era un messaggio agli studenti: i computer hanno permesso all'uomo di conseguire traguardi altrimenti irraggiungibili, ma il calcolo strutturale

può cogliere solo gli ordini di grandezza, indipendentemente dallo strumento usato. E il Professore si riferiva agli argomenti di lezioni, che erano il CA e l'acciaio in campo statico. Figuriamoci le muraure, il costruito e, soprattutto, la sismica, che introducono ulteriori ordini di incertezza.

Molti operatori del settore vivono nel mito della caverna di Platone (VII libro de La Repubblica): rinchiusi, fin dall'infanzia, in una caverna, incatenati e quindi prigionieri. Alle loro spalle ci sono oggetti, di cui però vedono solo le ombre proiettate dalla luce di un fuoco, anch'esso dietro di loro. Per i prigionieri, quelle ombre sono oggetti reali; non possono immaginare che siano proiezioni. Le costruzioni virtuali sono come quelle ombre: rappresentazioni che molti scambiano per la realtà.

Nel dialogo di Platone, un prigioniero liberato che tornasse nella caverna e dicesse ai prigionieri che essi vedono solo ombre non verrebbe creduto. I prigionieri preferiscono rimanere nelle loro false certezze e, se ne avessero l'opportunità, ucciderebbero chi cerca di mostrargli la realtà. *Mutatis mutandis* questo è ciò che accade nel mondo delle costruzioni. Sempre nella metafora di Platone, chi distingue le costruzioni virtuali – ombre – dalle costruzioni concrete – reali – non viene preso in considerazione e viene trattato con scetticismo, se non addirittura fatto fuori professionalmente.

Un politico della cosiddetta Prima Repubblica (quella italiana, non quella di Platone) diceva: "l'importante non è avere ragione ma trovare uno che te la dia". Difatti, chi vede la differenza tra la costruzione virtuale e la costruzione reale non è un privilegiato ma un condannato all'incomprensione, un esule nella propria professione, e chi denuncia quella differenza è destinato all'ostilità.

La seconda. Gli obiettivi architettonici – la rimodulazione del carattere dell'edificio, della sua morfologia e della sua tettonica, la realizzazione di addizioni esterne e di ampliamenti, l'efficientamento energetico – richiedono una lungimiranza e una visione del futuro che la nostra società ha perso, o forse non è più interessata ad avere. Ma qui il discorso esula dall'ambito ingegneristico e richiede orizzonti culturali ben al di là di quelli di un semplice operatore del settore quale è chi scrive.

Di certo, la società contemporanea ha smarrito ogni progettualità: il futuro non è più una costruzione collettiva, ma una semplice estensione del presente, dove la logica dell'immediato, oltre che dell'effimero, domina ogni dimensione dell'esistenza. Siamo una società liquida (Zygmunt Bauman), in cui identità, istituzioni, relazioni e lavoro sono mutevoli, precari, instabili e in continuo cambiamento. Inevitabile conseguenza, la società ha sostituito la pianificazione e la programmazione con l'emergenza e la gestione dell'urgenza: si limita a reagire, poiché la progettualità richiede invece una società solida. Ogni azione è orientata alla sopravvivenza immediata, alla risposta rapida, alla produttività istantanea. L'idea stessa di lungo periodo appare obsoleta.

Gli esoscheletri rientrano pienamente in questa condizione. In genere, i committenti percepiscono la necessità di eseguire interventi strutturali come una tegola caduta sulla loro testa, e si limitano a risolvere i problemi contingenti, senza alcuna visione proiettiva e senza cogliere le opportunità che l'intervento potrebbe offrire. L'intervento viene visto solo come una spesa immediata, da minimizzare, quasi mai come un investimento di cui massimizzare il rendimento futuro.

Eppure, esistono eccellenti esempi di ampliamenti che, pur finalizzati esclusivamente alla riqualificazione architettonica, hanno comunque aggiunto enorme valore agli edifici, a partire dagli interventi degli architetti Anne Lacaton e Jean-Philippe Vassal, le cui opere erano ben note anche prima che loro vincessero il premio Pritzker nel 2021.

Ebbene, interventi mediante esoscheletri che, simultaneamente, integrino gli obiettivi strutturali con quelli architettonici aggiungerebbero ancora più valore agli edifici.



Figura 1 – Adeguamento di un plesso scolastico (Pesaro Urbino) mediante esoscheletro (bidimensionale, flessionale) più endoscheletro (travi primarie, che poggiano sull'esoscheletro, e secondarie, che supportano i travi dei solai), con l'esistente assunto come non strutturale nello stato post-operam.

Il sistema ex-novo porta tutti i carichi verticali e l'intera azione sismica. Esoscheletro: aste composte acciaio-calcestruzzo (profilati ottenuti con lamiere saldate e calcestruzzo autocompattante, più connettori) e pareti in CA. Endoscheletro: profili metallici piegati a freddo, conformati per entrare negli scassi praticati nelle pignatte e profili laminati. Solai: rinforzati con rete in FRP a fibra di vetro, per garantire la portanza nella condizione di appoggio sull'endoscheletro.



Figura 2 – Sinistra e centro: edificio ad Amatrice (Rieti), danneggiato dalla sequenza sismica del Centro Italia del 2016-2017. Destra: edificio a Brescia, migliorato sismicamente. Rinforzi in FRP a fibra di carbonio applicati sulle pareti murarie perimetrali con connettori trasversali infissi nelle pareti. Il rinforzo ha realizzato un esoscheletro in muratura armata, progettato per portare l'azione sismica. Ad Amatrice, le pareti erano danneggiate in misura moderata ed è stato possibile ripararle. A Brescia, i laterizi dei tamponamenti sono stati provati in laboratorio così da definirne le caratteristiche meccaniche.



Figura 3 – Palazzina Vittorini, a L'Aquila, fortemente danneggiata dal terremoto del 2009. La struttura è stata trasformata da telaio in CA a esoscheletro ed endoscheletro in muratura armata. I tamponamenti e i tramezzi, che erano danneggiati e quindi da sostituire, sono stati rimpiazzati, anziché con componenti analoghi, con elementi strutturali (Poroton armato) progettati per portare tutti i carichi verticali e l'azione sismica. Al centro: serraggio di ciascun campo di telaio con mattoni a elevata resistenza e rigidità, e malta di cemento espansivo, lungo i lati verticali e il bordo superiore, a contrasto con le travi e i pilastri esistenti.

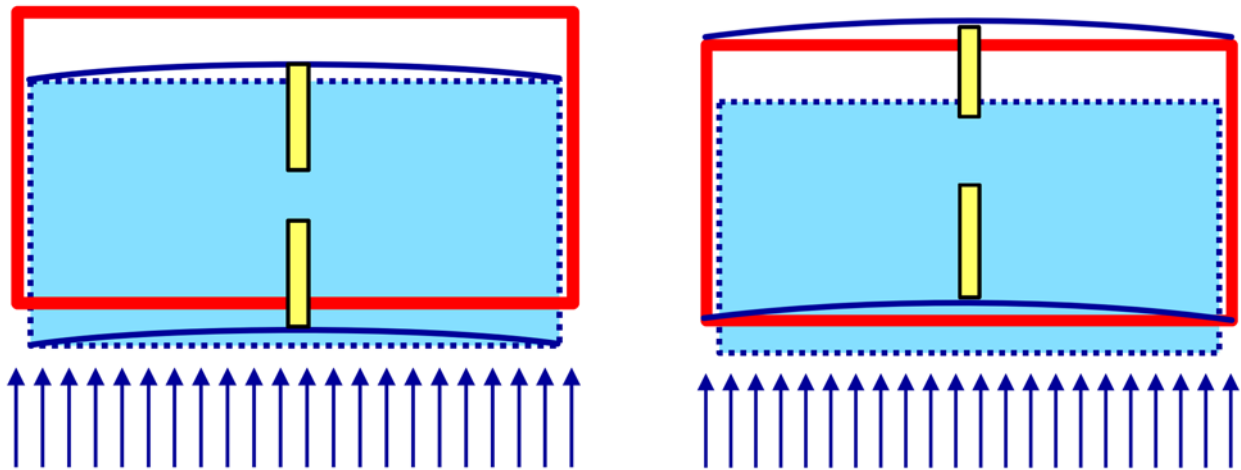


Figura 4 – Schemi sinottici in pianta, che rappresentano l'esistente sintetizzato con due pareti murarie. Sinistra: deformata ultima dell'esistente e traslazione dell'esoscheletro al suo limite elastico. Le due deformate non sono congruenti: la prima è minore della seconda. Destra: ripristino della congruenza tra le due deformate. Al raggiungimento del limite elastico dell'esoscheletro, la traslazione delle pareti è molto maggiore che nello schema di sinistra. Pertanto, le pareti sono in condizione di collasso. Ovviamente, quando l'esoscheletro inizia a dissipare, il collasso delle pareti è ancora più avanzato.



Figura 5 – Solaio in laterocemento al primo piano di un edificio a L'Aquila, danneggiato dal sisma del 2009. Il funzionamento a piano rigido ne ha provocato una fessura diagonale passante, che lo ha reso labile nel piano. Dalla fessurazione in poi, quel solaio e gli altri analogamente fessurati hanno cessato di lavorare nel piano.

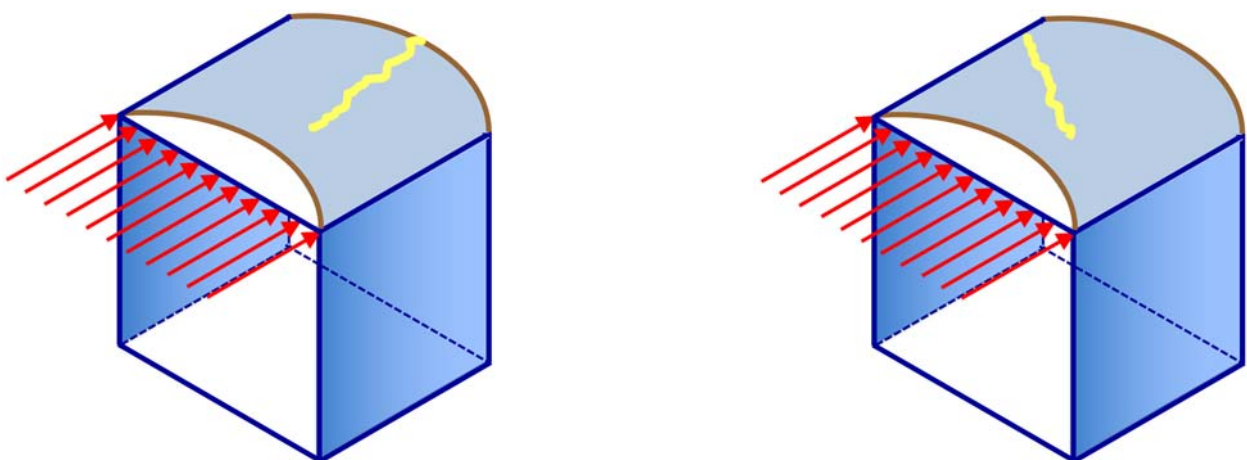


Figura 6 – Orizzontamento che trasferisce l'azione orizzontale ai due prospetti paralleli alla direzione della azione. Su una luce pari a una delle dimensioni in pianta dell'edificio, l'orizzontamento può non riuscire a portare le azioni orizzontali; quindi, si fessura a flessione nel piano (sinistra), oppure a taglio nel piano (destra), come in Figura 5. Dopodiché, l'orizzontamento diventa labile e non svolge più la funzione di piano rigido.

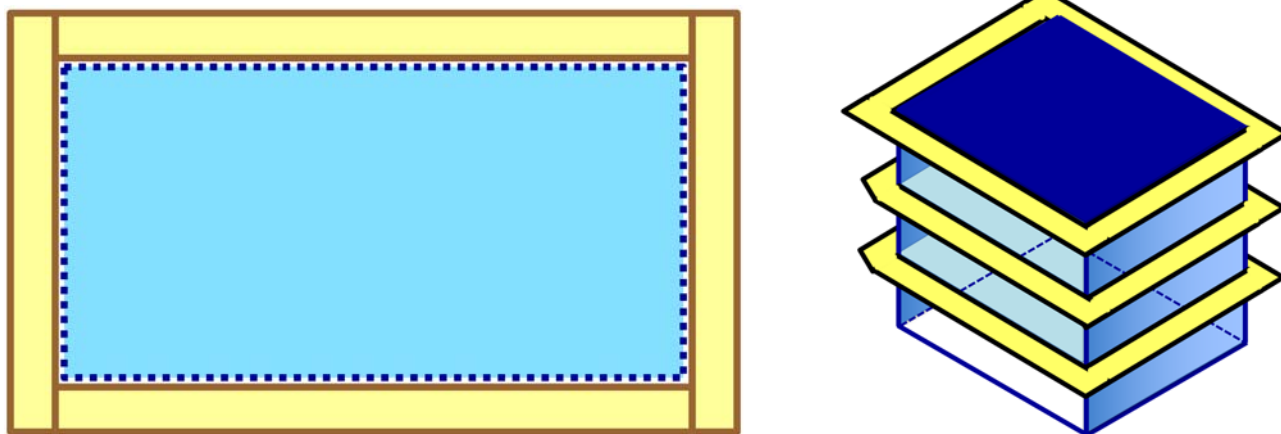


Figura 7 – Esoscheletro misto con tridimensionalità in orizzontale: rinforzo degli orizzontamenti esistenti mediante travi aggettanti (che possono essere configurate come balconi). Il dimensionamento è spesso dettato dalla verifica di instabilità flessio-torsionale. Questa soluzione è condizionata dalle irregolarità in pianta.

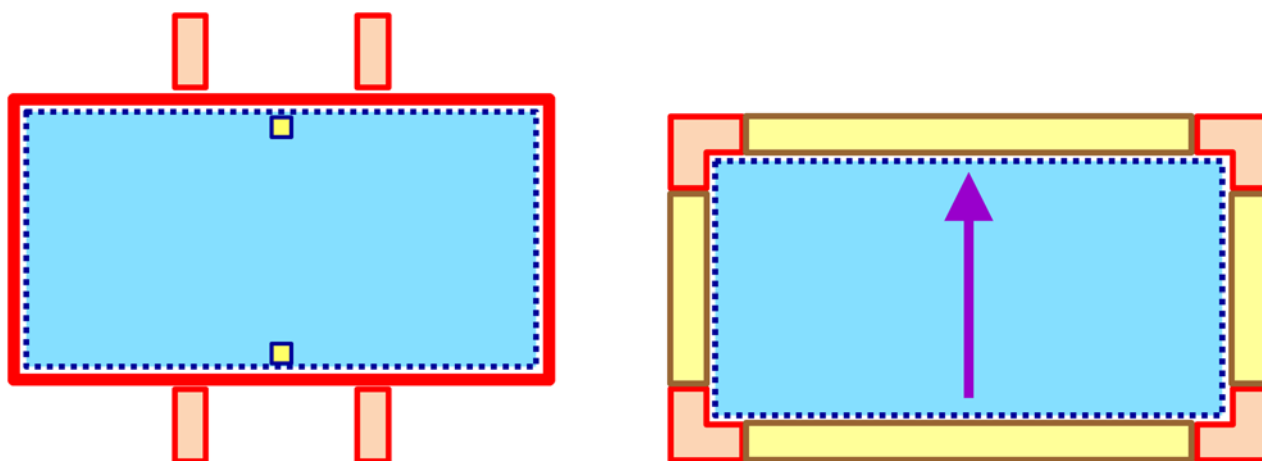


Figura 8 – Piante. Sinistra: Esoscheletro misto con tridimensionalità in verticale: moduli che riducono le luci degli orizzontamenti esistenti a un terzo. Destra: esoscheletro con tridimensionalità in entrambe le direzioni: moduli verticali ai vertici ed elementi orizzontali ai piani (con sporgenza minore di quelli di Figura 7).

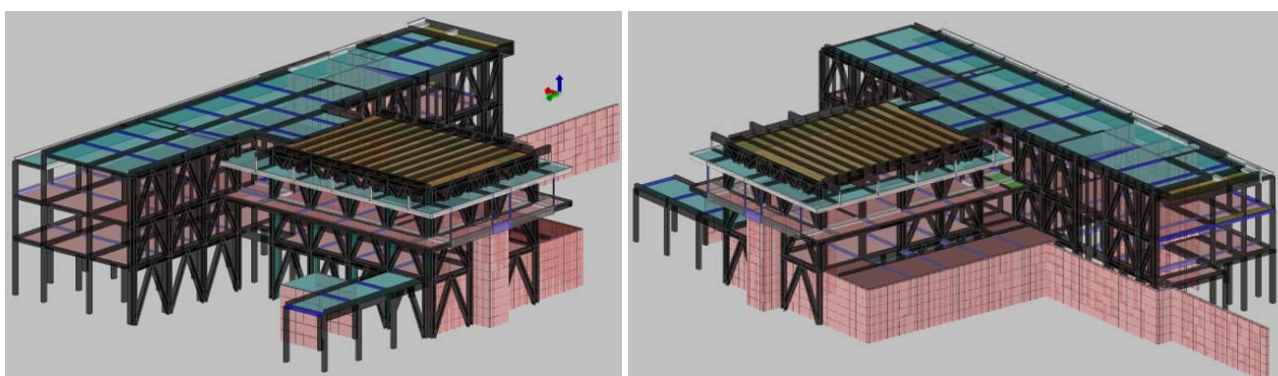


Figura 9 – Adeguamento di un padiglione ospedaliero a Rimini, destinato a sale operatorie. Intervento eseguito in collaborazione con lo studio EN7 srl di Bologna – Ing. Alessio Giammarruto e Ing. Andrea Gnudi. Le irregolarità in pianta dell'esoscheletro, dovute ai vincoli posti dalle aperture, congiuntamente a quelle dell'edificio esistente, hanno comportato elevati momenti torcenti (ad asse verticale). Per soddisfare le verifiche, in particolare quelle allo SLO, sono stati necessari profili HEM di grande sezione, atipici per gli edifici.