

# Prevenzione sismica e rigenerazione architettonica mediante esoscheletri

---

*Paolo Foraboschi, Professore di Tecnica delle Costruzioni*

*Questo articolo tratta le nuove strutture realizzate all'esterno degli edifici esistenti, per la prevenzione sismica. Queste addizioni sono chiamate "esoscheletri", con parziale corrispondenza alla zoologia; parziale perché, nelle costruzioni gli esoscheletri sono solo l'ossatura che dà sostegno, mentre nella zoologia sono anche una corazza protettiva.*

*L'esoscheletro viene analizzato e considerato non solo per la mitigazione del rischio sismico ma anche per l'adeguamento statico, non solo quale mera soluzione strutturale ma anche come soluzione architettonica, e non solo come necessità ma anche come opportunità per una progettazione integrata volta alla rigenerazione degli edifici, anche là dove sono possibili soluzioni tradizionali. L'articolo parte dagli esoscheletri del nuovo, i quali rappresentano i riferimenti per il costruito (per gli edifici le cui fotografie più emblematiche sono coperte da copyright, si rimanda tacitamente al WEB).*

## 1. Definizione di esoscheletro e riferimenti

**Costruito.** Sistema strutturale esterno all'edificio che, con la collaborazione degli orizzontamenti (solai) esistenti, fornisce una parte della rigidità e della portanza alle azioni orizzontali (sismiche o eoliche), e può portare a terra una frazione delle azioni verticali (gravitazionali: pesi).

Se si assume che l'esistente nominalmente non abbia più alcun ruolo strutturale ma consista formalmente in componenti portati (non-strutturali), l'esoscheletro fornisce l'intera rigidità e portanza alle azioni orizzontali e verticali. Questo però solo nelle verifiche e nella relazione di calcolo. Di fatto il sistema strutturale esistente continua a portare i carichi di servizio (azioni verticali e orizzontali quasi permanenti o frequenti).

**Definizione per il nuovo.** Sistema strutturale al contorno dell'edificio (perimetrale) che, con la collaborazione degli impalcati (strutture orizzontali – travi, travate, etc. – e degli orizzontamenti – solai), fornisce tutta la rigidità e la portanza alle azioni orizzontali (sismiche o eoliche), e porta a terra tutte le azioni verticali.

Nel nuovo, l'esoscheletro forse più emblematico è il *Centro Georges Pompidou*, a Parigi, degli Architetti Renzo Piano e Richard Rogers, e degli Ingegneri Edmund Happold e Peter Rice. La data di inaugurazione – 1977 – è meno significativa. La data più significativa è l'anno in cui il progetto vinse il concorso: 1971. Il progetto è sessantottino: rivoluziona l'idea e la concezione di museo. Da edificio massivo, austero e sacrale, a involucro autonomo dalla storia e dal contesto, contenitore di uno spazio totalmente libero; come autonoma e libera è l'arte che l'edificio è destinato a ospitare. Ebbene, l'esoscheletro ha permesso di ottenere 7500 m<sup>2</sup> a piano per 5 piani totalmente liberi, riconfigurabili di volta in volta a seconda di ciò che deve essere esibito.

Occorre porre un confine. Gli involucri strutturali che rinviano le azioni orizzontali a strutture verticali interne non sono esoscheletri; e difatti non rientrano nella definizione data. Un esempio è la *Central Library* di Seattle (USA), di Rem Koolhaas (OMA), del 2004, che, appunto, non è un esoscheletro ma un involucro strutturale.

Confini geografici invece l'esoscheletro non li ha: dai *Dormitory* di Berkeley (Fig. 1) sino al Giappone, dove l'esoscheletro è promotore di una contro-tendenza storica (Fig. 2). La tradizione nipponica nella prevenzione è di demolire gli edifici circa ogni trent'anni. Nel caso degli edifici monumentali, essi vengono ricostruiti tali e quali. Questo atteggiamento è sintetizzato da Italo Calvino nel suo *Diario giapponese*: "L'antico è ciò che perpetua il suo disegno attraverso il continuo distruggersi e rinnovarsi degli elementi perituri". Grazie all'esoscheletro, dunque, in Giappone è in atto un cambio di strategia nella prevenzione e nella conservazione. L'esoscheletro è la naturale risposta a molte richieste per il costruito e per il nuovo; logica conseguenza, è presente sulla scena urbana come prassi ancor prima di una sua teorizzazione, che ancora manca. In effetti, le esperienze ne confermano la liceità. Però, in assenza di un paradigma critico, le applicazioni sono ancora delle monadi. Non riconoscendo le esperienze precedenti, vengono meno i riferimenti, viene meno la stratificazione dei saperi. Ogni applicazione sembra essere un nuovo inizio. Inoltre, molte architetture ex-novo che sono esoscheletri non vengono riconosciute come tali, a meno che non lo denuncino in modo palese, come il *Centro Pompidou*. Gli esempi potrebbero moltiplicarsi. Tra questi, la *Sede Mondadori* (Segrate, Milano), una architettura arcinota di uno dei Maestri del XX secolo, Oscar Niemeyer, ultimata nel 1975, che spesso non viene riconosciuta come esoscheletro, mentre è un esoscheletro usato per appendere una scatola interna.

## 2. Rischio sismico del patrimonio edilizio: due problemi ancora aperti

Potenzialmente, la mitigazione del rischio sismico è un problema per lo più risolto. L'ingegneria sismica, pur essendo una disciplina relativamente giovane, ha raggiunto quasi tutti i risultati che può fornire a chi costruisce. Anche perché, costruire è un'arte più che una scienza; o meglio, un'arte fondata su solide e ampie conoscenze scientifiche e tecniche. L'ingegneria delle strutture è basata su quelle straordinarie e ineguagliabili virtù dell'uomo che sono l'intuizione, l'immaginazione creativa, la capacità di interpretare la realtà fisica, e si attua, specie per l'esistente, con i disegni e nel cantiere, mentre gli apparati teorici e formali servono soltanto per rifinire e giustificare il progetto. Nella sismica, in particolare, i modelli numerici non sono in grado di prevedere nemmeno l'ordine di grandezza dei comportamenti che si prefiggono di riprodurre e simulare. Il rischio sismico è stato adeguatamente definito e contemplato anche in termini economici ed erariali, da cui i recenti dispositivi legislativi. Questo sul piano teorico. L'applicazione sul piano dei fatti dipende soltanto dalla volontà, dai bilanci, dalla consapevolezza. Però, qualche problema scientifico ancora irrisolto rimane. Questo articolo si riferisce appunto a due problemi che sono ancora aperti: 1- gli edifici il cui contenuto è di pregio o il cui servizio erogato è importante; 2- gli edifici che, all'interno, ammettono solo poche lavorazioni o modifiche. Gli esempi più emblematici per entrambe le categorie sono gli edifici sanitari e ospedalieri, e molti manufatti per la produzione. Alla seconda categoria appartengono anche molti condomini. La prestazione più importante per la prima categoria spesso è che la domanda allo Stato Limite di Operatività sia inferiore alla capacità; ma a quella effettiva, che può essere più severa dei limiti di normativa, i quali sono generali (se non generici), mentre dovrebbero dipendere dalle specifiche esigenze dei componenti portati da proteggere (costruttivi, impiantistici, di arredo). Per inciso, la normativa definisce i limiti dello SLO solo con il drift, mentre alcuni limiti dovrebbero essere definiti dalla velocità, altri dall'accelerazione. Per la seconda categoria l'intervento deve consistere in un esoscheletro; che spesso è la soluzione migliore, se non l'unica, anche per la prima categoria, poiché irrigidire una struttura esistente è un'impresa assai ardua.

## 3. Teoria sulla progettazione degli esoscheletri

Il parallelo tra gli esoscheletri del costruito e del nuovo, oltre a fornire i riferimenti, mette in luce una doppia reciprocità. Prima reciprocità: l'esoscheletro viene introdotto, nel nuovo come soluzione architettonica, mentre nell'esistente come soluzione strutturale. Seconda reciprocità: affinché il nuovo dia luogo a un armonico equilibrio della triade vitruviana (la *concinnitas* dell'Alberti), il progetto architettonico deve contemplare le

potenzialità e le prerogative strutturali dell'esoscheletro. Affinché l'intervento sul costruito non sia una mera e misera stampella, il progetto strutturale deve essere, non solo parte, ma anche partecipe di un progetto architettonico, e la pianificazione deve contemplare le potenzialità architettoniche dell'esoscheletro.

Se è vero che, nel nuovo, è l'assenza di strutture verticali nel corpo di fabbrica a promuovere l'esoscheletro (prima reciprocità), è però altrettanto vero che solo una integrazione fra progetto architettonico e progetto strutturale crea una architettura di pregio (seconda reciprocità). Il *Centro Pompidou* esemplifica perfettamente il concetto. Un altro esempio – e qui siamo alle vette della architettura – è la *Crown Hall*: 2450 m<sup>2</sup> coperti, senza appoggi interni (tipo ad aula). A differenza di quanto potrebbe sembrare a prima vista, la struttura è tutt'altro che semplice. Mies ha potuto dare corpo al suo motto – “*less is more*” – solo grazie a una eccellente progettazione strutturale, perfettamente integrata alla progettazione architettonica (Fig. 3).

Nel costruito l'esoscheletro permette di ottenere una serie di benefici in forma integrata (prima e seconda reciprocità): incremento della portanza statica (SLU) e della capacità sismica (SLV, SLC); incremento di rigidità (sia per gli SLO e SLD, sia per proteggere l'esistente dallo SLC); nuove strutture non invasive degli spazi interni; lavorazioni che non interrompono l'uso; previsioni dei costi più affidabili; sostituibilità degli elementi predisposti per dissipare (quindi concepiti come fusibili); efficientamento energetico; rimodulazione del carattere architettonico dell'edificio; se tri-dimensionali, addizioni esterne e modifiche del distributivo.

Rimanendo nell'analogia con la zoologia, un esoscheletro presuppone anche un endoscheletro, salvo eccezioni (edifici monopiano o “scatole”). Nel nuovo l'endoscheletro è costituito dalle strutture orizzontali e dagli orizzontamenti: esoscheletro ed endoscheletro entrambi ex-novo. Nel costruito, l'endoscheletro è il sistema strutturale esistente, strutture verticali incluse: esoscheletro ex-novo ed endoscheletro esistente. Ebbene, l'endoscheletro esistente pone tre categorie di vincoli, le quali dettano e condizionano drasticamente il progetto (paragrafo 4): **I**- resistenza e rigidità degli orizzontamenti; **II**- traslazione orizzontale ultima in capacità dell'esistente; **III**- porzioni in pianta e in altezza non-occupabili dall'esoscheletro.

Gli esoscheletri si differenziano in base (paragrafo 5): **1**- alla terza dimensione, **2**- ai materiali, **3**- al funzionamento strutturale. Quelle caratteristiche definiscono il tipo di esoscheletro.

## 4. Vincoli degli esoscheletri

Questo paragrafo analizza il ruolo che le tre categorie di vincoli di cui al paragrafo 3 rivestono nella progettazione degli esoscheletri per il costruito. Anche qui, i riferimenti sono forniti dagli esoscheletri del nuovo.

### 4.1 Orizzontamenti

In un sistema esoscheletrico, un orizzontamento, in generale, deve svolgere la funzione di piano rigido: ripartire l'azione orizzontale ai paramenti paralleli all'azione stessa, i quali lavorano nel-piano e quindi col funzionamento ottimale. Per contro, i paramenti ortogonali all'azione orizzontale lavorerebbero fuori-dal-piano e quindi con un funzionamento drasticamente meno efficace. Ciascun orizzontamento deve inoltre interdire la instabilità dell'esoscheletro fuori-dal-piano (da sforzo assiale o momento flettente). Le porzioni periferiche degli orizzontamenti possono anche completare l'esoscheletro dando luogo a maglie chiuse, molto più efficienti delle maglie aperte (se le maglie chiuse sono triangolari, il funzionamento dell'esoscheletro è reticolare; altrimenti è misto reticolare-flessionale). Due edifici che mostrano tutti i ruoli svolti dagli orizzontamenti sono il *Tod's flagstore* a Tokio (Toyoo Itō; 2004) e il *Beinecke Rare Book and Manuscript Library* (Fig. 4).

Quelle funzioni non sono però imprescindibili; se l'esoscheletro è tri-dimensionale, possono essere demandate a strutture orizzontali nella terza dimensione dell'esoscheletro, come per esempio nel *Centro Pompidou*, dove l'azione eolica (Parigi non è sismica) sul lato lungo (166 m) viene in parte rinviata ai lati corti da reticolari orizzontali contenute nella tridimensionalità dell'esoscheletro (la parte restante viene portata dalle colonne). Se invece l'esoscheletro è bi-dimensionale, le azioni orizzontali possono essere ripartite per aree di influenza,

a telai longitudinali e trasversali (o portali, se l'edificio è monopiano), quindi senza il piano rigido. Un esempio è la *Crown Hall* (Fig. 3), la cui copertura è appesa – quindi è labile nel piano – e perciò i portali trasversali estradossati e i telai longitudinali di bordo portano il vento (l'Illinois non è sismico) che gli viene rinviato dalla baraccatura laterale. Per inciso, la *Crown Hall*, così come il *Beinecke Rare Book and Manuscript Library*, essendo quella un tipo ad aula e questo un tipo a scatola, sono esoscheletri puri, senza l'endoscheletro, dato che gli orizzontamenti sono anch'essi esterni.

Si porta a sintesi la questione. Le azioni orizzontali inducono, nell'orizzontamento, momenti ad asse verticale e tagli nel-piano (Fig. 5), i quali determinano, rispettivamente, inflessione e scorrimento nel-piano. L'orizzontamento deve innanzitutto portare quelle azioni interne; se poi la sua deformata è trascurabile, dà luogo al piano rigido. Si noti che la normativa ha esplicitato la richiesta di resistenza degli orizzontamenti solo con le NTC/2018; prima, parlava solo di rigidità; e invece, la resistenza è ancora più importante della rigidità (a chi scrive sono capitati solai di edifici terremotati con fessure verticali passanti, ad andamento diagonale in pianta, causate dalla crisi a taglio nel-piano a seguito dal funzionamento a piano rigido).

L'orizzontamento lavora sulle luci delle strutture verticali consecutive. Negli edifici con esoscheletro, dunque, l'orizzontamento lavora su luci pari ai lati dell'edificio, quindi grandi. Questa categoria di vincoli sussiste anche nel nuovo; lì, però, gli orizzontamenti nascono per lavorare in composizione con l'esoscheletro, mentre nel costruito sono pre-esistenti e quindi sono nati per lavorare con la struttura esistente, per campi di solaio. Nel costruito, pertanto, l'orizzontamento può richiedere un incremento di resistenza e/o di rigidità. La resistenza può essere incrementata con lavorazioni poco onerose (per esempio nastri in FRP o tecnologie analoghe), però da effettuarsi all'interno dell'edificio (a parte l'orizzontamento di copertura). La rigidità può invece essere incrementata solo con lavorazioni onerose (in genere occorre rispettare le quote), oltre che, anch'esse, all'interno. Tuttavia, di solito la rigidità diventa inadeguata solo dopo che l'orizzontamento si è labilizzato a seguito della rottura e quindi può essere garantita rinforzando l'orizzontamento.

Negli edifici con orizzontamenti deboli dove non sono ammesse neppure piccole lavorazioni all'interno, l'esoscheletro deve ridurre la luce degli orizzontamenti. Ciò può essere fatto con strutture verticali lungo i lati dell'edificio. Quelle strutture devono avere dimensioni adeguate a lavorare sulla luce pari all'altezza dell'edificio e devono essere controventate fuori-dal-piano; ciò implica un esoscheletro tri-dimensionale (Fig. 5).

Dove il terzo vincolo (paragrafo 4.3) non permette di collocare quelle ingombranti strutture verticali – in genere sono le aperture a impedirlo – è possibile collocare strutture verticali tridimensionali ai vertici dell'edificio – dove generalmente non ci sono aperture – e tra queste ordire strutture orizzontali ai piani: travi o travature reticolari al contorno di ciascun orizzontamento. Quelle travi o travature debbono ovviamente essere controventate fuori-dal-piano; anche qui, dunque, l'esoscheletro diventa tri-dimensionale (Fig.6).

## 4.2 Traslazione orizzontale ultima in capacità dell'esistente

Il funzionamento ottimale richiede una traslazione orizzontale al limite elastico dell'esoscheletro apprezzabilmente inferiore alla traslazione orizzontale ultima in capacità dell'esistente, altrimenti l'esoscheletro non può attingere la capacità portante alle azioni orizzontali e la risposta sismica non può essere dissipativa.

Siccome la traslazione ultima dell'esistente solitamente è modesta, e ancora più piccola è quella riconosciuta dalla normativa, quel vincolo comporta dimensioni spesso eccessive dell'esoscheletro, specie se è d'acciaio e/o lavora a flessione. Questa categoria di vincoli pone dunque problemi grossi, se non insolubili. Più di talvolta occorre accettare che l'esoscheletro non sfrutti tutta la sua capacità oppure che dissipi poco o nulla.

Se sono ammesse lavorazioni all'interno, questo vincolo può essere allentato incrementando la traslazione orizzontale ultima in capacità dell'esistente, cinturando le strutture verticali (con FRP, FRCM o acciaio).

Un'altra possibilità è di disaccoppiare il progetto dalla relazione di calcolo. Quello considera il sistema reale: esoscheletro più struttura esistente. Questa considera l'esistente quale insieme di componenti portati (non-

strutturali). La duplicazione del sistema strutturale permette di liberarsi dai vincoli formali – la normativa – così da focalizzarsi solo sui vincoli reali – la costruzione. In particolare, il progetto può riferirsi alla traslazione orizzontale ultima attesa per l'esistente (maggiore di quella riconosciuta dalla normativa) e può liberamente occuparsi del passaggio dei carichi verticali dalla struttura esistente all'esoscheletro a seguito della crisi di quella. Tale strategia implica però che l'esoscheletro debba portare tutti i carichi – le intere azioni orizzontali e verticali – e quindi occorre anche un endoscheletro; pure qui, dunque, lavorazioni all'interno dell'edificio (a meno che non sia monopiano). Ulteriore implicazione, richiede l'adeguamento (punto 8.4.3 delle NTC). Considerare invece la struttura esistente come secondaria ai sensi del punto 7.2.3. delle NTC/2018 non soltanto non dà benefici, ma in più toglie il contributo portante che l'esistente può dare.

### 4.3 Porzioni in pianta e in altezza non-occupabili dall'esoscheletro

Questa categoria include tutti i vincoli che limitano le possibilità spaziali dell'esoscheletro. In primo luogo, ovviamente, il rispetto delle aperture (Fig. 1); ma ci sono tante altre esigenze per le quali l'esoscheletro è ammesso solo in alcune porzioni in pianta e/o in altezza, mentre è escluso nelle altre.

Questa categoria di vincoli può implicare un esoscheletro irregolare in pianta e/o in altezza, da cui scaturiscono extra sollecitazioni, specie e fronte delle azioni sismiche. Mentre l'esoscheletro può essere progettato in modo da portare queste extra-sollecitazioni, l'esistente può non tollerarle. In particolare, l'irregolarità può comportare extra-traslazioni torsionali, che acuiscono le problematiche di cui al punto 4.2.

## 5. Tipi di esoscheletro

La suddivisione degli esoscheletri per tipi è valida sia per il costruito sia per il nuovo.

### 5.1 Terza dimensione

Un esoscheletro è bi-dimensionale (e.g. Figg. 1 e 2) o tri-dimensionale (e.g. il *Centro Pompidou*). Il punto 4.1 ne ha evidenziato le implicazioni relativamente agli orizzontamenti e il paragrafo 3 riguardo all'architettoneco. Ulteriore implicazione, l'esoscheletro tridimensionale può consentire un radicale miglioramento energetico.

### 5.2 Materiale

Nel nuovo e nel costruito gli esoscheletri possono essere realizzati in CA, in acciaio, o misti. Il legno massiccio, invece, non si presta per gli esoscheletri, specie se volti alla prevenzione sismica. Gli esoscheletri finalizzati al costruito, in più, possono essere in muratura armata; ulteriore tecnologia, possono utilizzare rinforzi esterni. La muratura armata è una valida soluzione per gli edifici intelaiati che sono stati danneggiati da un terremoto, i cui tamponamenti sono quindi da sostituire e la cui struttura esistente ha una capacità residua difficile da stimare. Tutto ciò considerato i tamponamenti possono essere rimpiazzati con una muratura armata disposta dentro ogni campo di telaio, a contrasto con le travi e i pilastri esistenti (chiudendo ciascun campo con mattoni duri). L'intervento dà luogo a un esoscheletro che porta le azioni orizzontali con un funzionamento nominale di struttura a pannelli portanti, quindi autonomamente dalla struttura esistente. L'intervento può poi essere esteso ai tramezzi (specie delle parti comuni), in modo che l'esoscheletro e l'endoscheletro portino a terra tutti i carichi verticali, anche qui con un funzionamento nominale di struttura a pannelli portanti, quindi autonomamente dalla struttura esistente, che viene nominalmente trasformata in componenti portati.

Là dove la struttura esistente garantisce la portanza dello sforzo assiale, l'intervento può essere il medesimo, ma il funzionamento nominale dei tamponamenti ex-novo può essere di controvento: una ideale struttura reticolare spaziale i cui elementi orizzontali e verticali sono le travi e i pilastri esistenti, e i cui elementi diagonali sono ideali puntoni all'interno di ciascun tamponamento ex-novo (o tiranti, dato che la muratura è

armata; oppure entrambi; è soltanto una assunzione del calcolo). Questo funzionamento è più efficiente. Questa modalità di intervento richiede l'adeguamento (punto 8.4.3), ossia il miglioramento non è ammesso. Quelli suindicati sono i funzionamenti nominali. In esercizio è però la struttura esistente che continua a portare i carichi verticali e una frazione delle azioni orizzontali; è quindi opportuno ripararla e rinforzarla. I rinforzi esterni sono una valida soluzione per la prevenzione sismica degli edifici in muratura: applicandoli al contorno dell'edificio, l'involucro viene trasformato in un esoscheletro capace di portare le azioni sismiche.

### 5.3 Funzionamento

Il funzionamento di un esoscheletro può essere: assiale, flessionale o misto. Gli esoscheletri a funzionamento assiale ottimizzano le prestazioni strutturali (come noto una reticolare ha quasi la stessa rigidità e resistenza che avrebbe se fosse una trave piena) ma sono spesso poco armonizzabili con le aperture, al contrario degli esoscheletri a funzionamento flessionale, che sono meglio armonizzabili con la composizione dell'edificio.

Per conciliare gli esoscheletri assiali e flessionali, sono stati introdotti esoscheletri a funzionamento misto (e.g., il predetto *Tod's flagstore*; la *Prada Boutique Aoyama*, anch'essa a Tokyo, di Jacques Herzog e Pierre de Meuron; 2003): reticolari con eccezioni. Le aste trasmettono momento e taglio, ma anche un cospicuo sforzo normale. Quest'ultimo dà luogo a coppie interne che si ripartiscono una rilevante frazione dei carichi.

Gli esoscheletri a funzionamento assiale, fermo restando che debbono conciliarsi con l'involucro esistente, più di talvolta sembra che eludano o disattendano il nesso forma–funzione di Louis Henry Sullivan (*"form follows function"*) e che per essi la funzionalità non sia una condizione sufficiente per una buona architettura, per cui quanto affermato da Otto Wagner (*"Niente che non sia funzionale potrà mai essere bello"*) non valga all'inverso. La realtà è invece che la reticolare d'acciaio richiede una progettazione di alto valore architettonico (come peraltro la progettazione sismica, poiché il diagonale compresso deve essere governato con accorgimenti ad hoc). Esempi di reticolari che hanno dato luogo ad architetture di valore ce non sono tanti, tutti arcinoti; la Fig. 7 ne mostra uno meno noto. Nel costruito, per contro, esempi di reticolari che soddisfino la triade vitruviana ce ne sono pochissimi: sì, assicurano la *firmitas*; ma spesso garantiscono la *utilitas* solo in parte (più di talvolta interferiscono con le aperture), mentre di *venustas* non se ne può nemmeno parlare.

Uno degli esempi più eclatanti in cui la reticolare dà luogo ad architetture che sono espressione di valori, che suscitano emozioni, che sembrano sculture abitate è l'involucro reticolare per gli edifici alti, denominato *diagrid*. Questo tipo architettonico è comparso nel 2004 con l'edificio *30 St. Mary Axe*, a Londra (nella City), detto anche *The Gherkin*, progetto architettonico di Norman Foster (and Partners) e progetto strutturale di Arup, alto 180 m per 41 piani. L'edificio è diventato iconico (è spesso presente nei film che si svolgono a Londra). Seguì nel 2006 dalla *Hearst Tower*, a New York (8<sup>th</sup> Avenue; Midtown Manhattan), sempre di Norman Foster (e Partners; progetto ingegneristico: WSP Group), alto 182 m per 46 piani, costruito su una pre-esistenza mantenuta (e valorizzata). Ma come tipo strutturale il *diagrid* era stato introdotto nel 1896 per l'esposizione di Gorkij (Russia), dall'ingegnere russo Vladimir Grigor'evič Šuchov, il quale progettò e realizzò un serbatoio a *diagrid* (tutt'ora esistente, spostato in un altro luogo) e un padiglione a *diagrid* (purtroppo demolito).

La storia ingegneristica e la storia architettonica del *diagrid* – tanti piccoli balzi in avanti quella, un unico grande balzo questa – fanno riflettere su una sostanziale differenza fra le due professioni. Gli architetti possono (forse debbono) vivere sulla frontiera, e ogni tanto attraversarla per esplorare cosa c'è dall'altra parte. Mentre gli strutturisti possono farlo assai meno, poiché l'innovazione può essere nemica della sicurezza.

Il *30 St Mary Axe* e la *Hearst Tower* sono stati un modello adottato per molti edifici alti, alcuni opera di Pritzker Architecture Prize (e.g., la torre principale della *Poly International Plaza*, a Pechino, studio SOM, 2016). Non solo; l'esoscheletro a *diagrid* è stato attivatore e generatore di volumi inediti per gli edifici; forme che, senza il *diagrid*, non avrebbero potuto esistere (e.g., *China Central Television*, Pechino, Rem Koolhaas, 2008; *Capital Gate* e *Aldar Headquarters building*, entrambi ad Abu Dhabi).

## 6. Miglioramento e adeguamento ai sensi delle NTC

Questo paragrafo inquadra l'esoscheletro ai sensi dei punti 8.4.2 e 8.4.3 delle NTC/2018.

### 6.1 Intervento di adeguamento o di miglioramento

Si stabilisce se l'esoscheletro implichi l'adeguamento oppure sia sufficiente il miglioramento, laddove è ovvio che non può rientrare nella "Riparazione o intervento locale", poiché modifica il comportamento dinamico. È appena il caso di ricordare che "miglioramento" sottintende la locuzione "adeguamento statico e miglioramento sismico" e adeguamento sottintende la locuzione "adeguamento statico e sismico".

I commi di interesse a tale proposito sono il *b)* e il *d)* del punto 8.4.3, i quali stabiliscono, rispettivamente, che l'adeguamento è obbligatorio se l'edificio viene ampliato alterandone significativamente la risposta, oppure se si impiegano nuovi elementi verticali che portano più del 50 % dei carichi gravitazionali complessivi. L'esoscheletro tri-dimensionale amplia l'edificio, oltre a modificarne il comportamento dinamico; alla lettera richiede quindi l'adeguamento. Forse, però, nello spirito del comma *d)*, anche il comma *b)* intende che la risposta da non variare sia solo quella statica; ma non è dato saperlo. Ad ogni modo l'esoscheletro tri-dimensionale spesso consente di ottenere l'adeguamento senza oneri eccessivi rispetto al miglioramento.

L'esoscheletro bi-dimensionale non porta più del 50 % dei carichi gravitazionali complessivi, ossia modifica il comportamento dinamico ma non quello statico; quindi permette di limitarsi al miglioramento.

Cosa diversa è se c'è anche un endoscheletro ex-novo, oltre all'esoscheletro bi-dimensionale. Come già osservato, se l'esistente viene considerato nominalmente portato, occorre l'adeguamento. Se invece la struttura esistente è considerata portante – primaria o secondaria – e l'esoscheletro porta solo le azioni orizzontali (al più una moderata frazione dei carichi gravitazionali), è possibile limitarsi al miglioramento. Esistono anche situazioni intermedie; queste richiedono una esegesi della normativa che però non entusiasma chi scrive.

### 6.2 Intervento di miglioramento

Come noto, il miglioramento richiede  $\zeta_E > 0.6$  oppure di incrementare  $\zeta_E$  più di 0.1. Il rapporto  $\zeta_E$  "tra l'azione sismica massima sopportabile dalla struttura e l'azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione" viene calcolato usando le PGA. Così facendo si ha però una stima fuorviata della sicurezza, poiché il rischio sismico non è misurato da  $\zeta_E$  dato dalle PGA ma dato dai periodi di ritorno. Si considera la seguente relazione statistica fra PGA e periodi di ritorno  $T_r$ , in capacità (pedice C) e in domanda (pedice D), la quale è del tutto generale a meno dell'esponente, che è calibrato per la sismicità dell'Italia:

$$\frac{T_{rC}}{T_{rD}} = \left( \frac{PGA_C}{PGA_D} \right)^{1/0.41} \equiv \left( \frac{PGA_C}{PGA_D} \right)^{2.44}$$

La relazione mostra che, se la capacità in PGA è il 60 % della domanda in PGA, il periodo di ritorno in capacità è il 29 % del periodo di ritorno in domanda. Migliorare al 60 % significa perciò garantire il 29 % della sicurezza garantita dall'adeguamento:  $\zeta_E$  reale sarebbe 0.29 e non 0.60. Considerando, per esempio, un edificio di classe II, se è adeguato (senza ulteriori margini di sicurezza), raggiunge lo SLC mediamente ogni 975 anni, mentre se è migliorato al 60 % lo raggiunge mediamente ogni 283 anni e non ogni 585 anni come potrebbe sembrare. Che può anche andare bene, ma andrebbe dichiarato, mentre il rapporto fra le PGA è fuorviante.

## 7. Perdita Annuale Media – PAM

La PAM – che il cosiddetto *SismaBonus* (cui si rimanda per i simboli di Fig. 8) ha mutuato dalla matematica finanziaria (*Expected Annual Loss*) – può essere considerata indipendentemente da quel dispositivo fiscale, ed essere utilizzata per indirizzare la progettazione degli interventi di mitigazione del rischio sismico.

L'area inscritta nella curva di sinistra di Fig. 8 moltiplicata per il costo di ricostruzione quantifica gli €/anno che il "bravo padre di famiglia" deve mettere da parte per fare fronte ai danni sismici che l'edificio mediamente subirà nella vita di servizio (rectius: stanti i tempi di ritorno dei terremoti, il padre, il figlio e il nipote). Come tale, quell'ammontare risulta essere una perdita annuale media del valore dell'edificio. Inoltre, supponendo di prevedere un intervento di mitigazione del rischio sismico, la differenza fra la PAM ante- e post-operam rapportata al costo dell'intervento permette di stabilire se convenga dare corso a quell'intervento. Non solo. Quella differenza dipende dall'incremento di capacità di ciascuno Stato Limite sismico. A parità di costo d'intervento e a parità di incremento dello SLC, ossia fatta salva la vita umana, un intervento può essere rivolto maggiormente a irrigidire oppure a rafforzare; nel primo caso incrementa maggiormente lo SLO e lo SLD, nel secondo lo SLV. L'intervento ottimale è quello che massimizza la differenza di area fra le due PAM. La PAM del *Sismabonus*, volta agli incentivi fiscali, considera solo il costo di ricostruzione dell'edificio. Se si intende usare la PAM come strumento della matematica finanziaria occorre considerare, non solo il costo di ricostruzione, ma anche il costo del contenuto e le perdite economiche dirette e indirette derivanti dall'interruzione del servizio. La PAM così ridefinita indica assai meglio se convenga intervenire, e come; in particolare, nel caso degli edifici il cui contenuto è di pregio e/o il cui servizio erogato è importante è estremamente più efficace della PAM definita dal *Sismabonus*, poiché mostra le ricadute economiche degli SLO e SLD. In una piccola ricerca, lo scrivente ha adottato due ospedali, di cui si era occupato professionalmente, come casi studio, e a essi ha applicato la PAM così ridefinita. Per la precisione, la PAM ha considerato, oltre al costo di ricostruzione, il costo del contenuto, in ordine alla cui stima esiste una vasta letteratura, mentre non ha considerato le perdite economiche dirette e indirette per l'interruzione del servizio, poiché non esiste alcun credibile supporto teorico. I risultati, generalizzabili a tutti gli ospedali tecnologicamente avanzati, sono che: 1- procrastinare l'intervento è un grave errore economico 2- è molto più conveniente migliorare lo SLO e lo SLD piuttosto che lo SLV (fatto salvo lo SLC e la vita umana). Convien dunque irrigidire piuttosto che rafforzare (mentre la PAM di cui al *Sismabonus* non coglie adeguatamente i riflessi dello SLO e dello SLD sui danni). Un irrigidimento può essere a parità di costo con un rafforzamento solo se l'intervento è improntato sull'esoscheletro. Diversamente, irrigidire un edificio esistente è estremamente oneroso. Per cui la questione si pone solo in abbinamento all'esoscheletro: la progettazione di un esoscheletro per la mitigazione del rischio sismico dovrebbe essere guidata dalla riduzione di PAM procurata.

## 8. Conclusioni

La mancanza di un pensiero critico sull'esoscheletro e di una teorizzazione comporta un limitato accesso alle sue potenzialità. In particolare è spesso sottovalutato il virtuoso processo di progettazione integrata che offre: l'esoscheletro quale soluzione non solo strutturale ma anche architettonica. Con oneri poco superiori, infatti, l'esoscheletro proposto per mitigare il rischio sismico può essere l'occasione sia per la rimodulazione dei caratteri architettonici, distributivi e urbani dell'edificio, sia per il miglioramento delle prestazioni energetiche: rigenerazione di un edificio in forma integrata.

L'articolo ha separato gli elementi di permanenza dai caratteri di variazione degli esoscheletri del nuovo e del costruito, presenti sulla scena urbana. Quelli individuano un numero sufficientemente limitato di tipi, le cui definizioni si configurano quali matrici per la progettazione degli esoscheletri. Questi danno luogo a una molteplicità di proficue soluzioni architettoniche, che forniscono spunti per ulteriori variazioni.

L'analisi tipologica ha anche permesso di individuare i principali vincoli che dettano la progettazione di un esoscheletro finalizzato al rafforzamento statico o sismico di un edificio esistente.

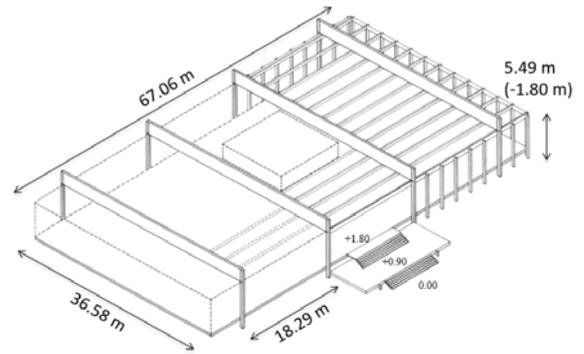
In chiusura, non si può non menzionare il lavoro di Anne Lacaton e Jean-Philippe Vassal. Non si tratta esattamente di esoscheletri, ma la loro è una attività innovativa e di valore che può essere di riferimento alla progettazione di un esoscheletro per l'esistente.



**Figura 1** – Berkeley University, USA; dormitory; 2005. Uno dei primi esoscheletri per la prevenzione sismica.



**Figura 2** – Tokyo. Centro commerciale, 1952; esoscheletro, 2006. Plesso residenziale, 1972; esoscheletro, 2009.



**Figura 3** – Crown Hall; Illinois Institute of Technology, Chicago. Ludwig Mies van der Rohe; 1956.



**Figura 4** – Beinecke Rare Book and Manuscript Library; Yale University, New Haven (Connecticut); SOM; 1963.

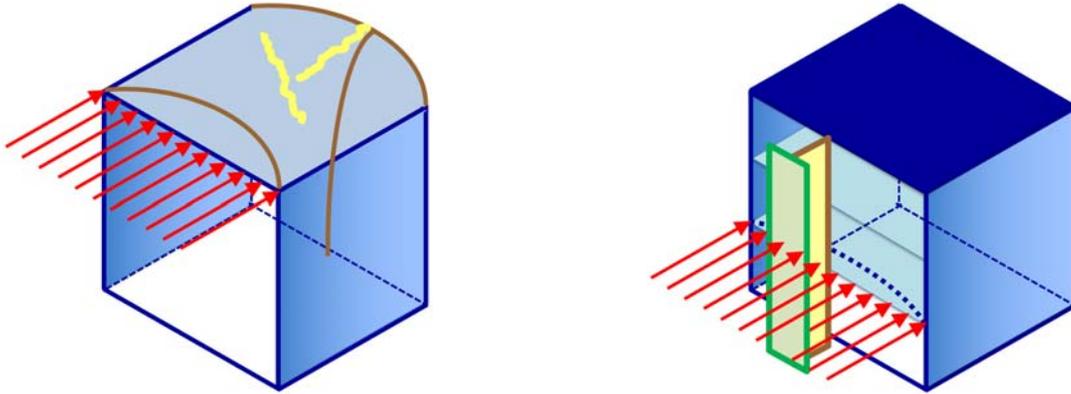


Figura 5 – Orizzontamenti: rottura a flessione e a taglio nel-piano; struttura verticale per ridurre la luce.



Figura 6 – Esoscheletro con strutture verticali ai vertici (ad "L") e strutture orizzontali controventate ai piani.

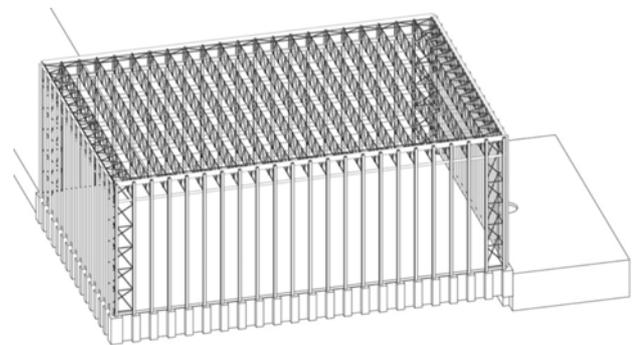


Figura 7 – Meggen (Lucerna, Svizzera); chiesa san Pio; Franz Füg; 1966.

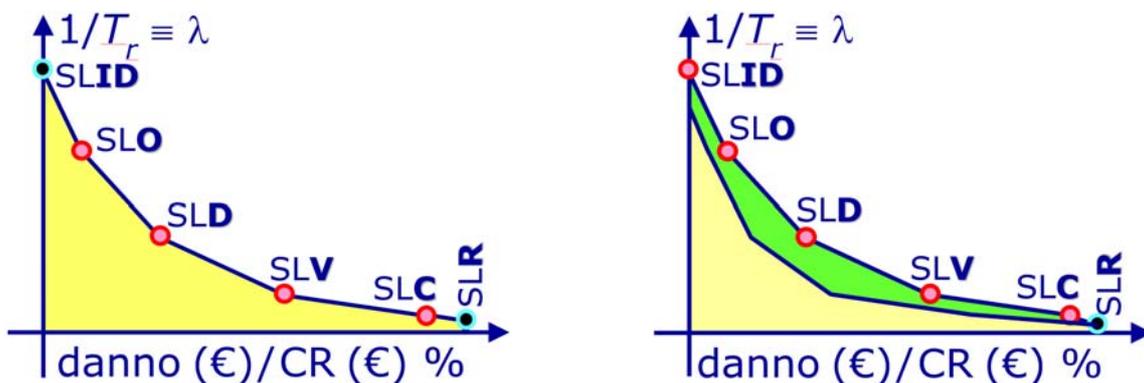


Figura 8 – L'area inscritta è la PAM percentuale. Ante- e post-operam: la differenza è il risparmio.