

L'innovazione nel settore delle strutture

Paolo Foraboschi, Ingegnere – Università IUAV di Venezia; Dipartimento di Culture del Progetto

A grandi linee l'innovazione nel settore delle strutture può sembrare analoga a quella di tutti gli altri settori; a ben vedere, invece, si differenzia drasticamente. L'articolo presenta il pensiero dell'autore sul tema, nella speranza che, un po', possa contribuire a riportare l'ingegneria strutturale a quel ruolo centrale per la società che aveva in passato, prima di trasformarsi da ingegneria a ragioneria.

1. Definizione di innovazione nel settore delle strutture

Le innovazioni nel settore delle strutture sono classificabili in quattro categorie.

Prima categoria: inventiva progettuale

Questa categoria verte sulla concezione strutturale, sui criteri di progettazione e analisi, sui tipi e sulle forme. La definizione è quella corrente, che deriva dal latino *invenio*: trovare, scoprire soluzioni strutturali nuove.

Seconda categoria: materiali, componenti, tecniche, sistemi

Questa categoria verte sui prodotti da costruzione. La definizione è legislativa, non linguistica: è innovazione tutto ciò che non rientra in una norma armonizzata (i.e., stampata sulla Gazzetta Ufficiale Comunità Europea). Una norma armonizzata è emanata da un ente di normazione europeo; indica come verificare i requisiti fissati da una Direttiva in materia di sicurezza, salute e tutela dell'ambiente. Deve essere recepita delle legislazioni nazionali. Lo stesso può essere fissato da una Raccomandazione; il suo recepimento è però facoltativo.

Gli Eurocodici conseguono a una Raccomandazione (del 2003): sono norme volontarie emanate dal Comitato Europeo di Normazione. L'Italia ha però voluto una normativa propria: le Norme Tecniche sulle Costruzioni.

Terza categoria: modalità, metodi e strumenti di lavoro

Questa categoria comprende le innovazioni sulle modalità costruttive e di varo, sui metodi di controllo e di monitoraggio, sul cantiere, sulle manutenzioni, sugli strumenti di progettazione, di analisi e di calcolo.

Qui però, l'innovazione è solo nel settore di provenienza, mentre nel settore strutturale trattasi solo di avanzamenti: modalità, metodi e strumenti per migliorare la qualità della progettazione, del lavoro e delle opere.

Quarta categoria: normative

Che l'evoluzione delle normative strutturali comporti cambiamenti nel settore è fuori discussione. La OPCM 3274/2003 in particolare lo ha modificato drasticamente, come mai era accaduto in quasi cento anni di norme strutturali. Tanto che le normative da quella in avanti possono essere denominate "di nuova generazione".

Che quei cambiamenti siano da ascrivere a un progresso è invece largamente discutibile. L'aver riconosciuto l'effettiva pericolosità sismica delle zone italiane è stato sicuramente un avanzamento. Al contrario i pesanti apparati di analisi e di verifica introdotti dalle normative di nuova generazione sia riducono l'ingegneria alla ragioneria – i due termini non fanno rima ma solo una cacofonia (vedasi la frase conclusiva dell'articolo) – sia non garantiscono un livello di sicurezza e una qualità costruttiva maggiore rispetto alle normative precedenti.

2. Innovazione nel settore delle strutture vs. innovazione negli altri settori

In qualsiasi settore, compreso quello delle strutture, l'innovazione non può che procedere in modo *try and error*, poiché comporta sempre effetti imprevedibili o comunque non previsti. Nel settore delle strutture, tuttavia, sia la fase *try* sia la fase *error* assumono connotazioni assai diverse rispetto a qualsiasi altro settore. Una cosa è provare una innovazione in una produzione seriale (industria, manifattura) oppure in applicazioni seriali (medicina, biologia). Ben altra cosa è provarla per le strutture, le quali sono sempre pezzi unici, uno diverso da tutti gli altri, dove l'innovazione si declina in modo differente a seconda della situazione specifica. Una cosa è testare una innovazione che può essere sperimentata completamente e in tutte le sue condizioni, compreso quelle estreme. Ben altra cosa è testare una struttura reale, la quale non permette sperimentazioni che comportino danneggiamenti e le cui dimensioni consentono solo prove parziali e limitate. Una cosa è un errore che comporta il malfunzionamento o la difettosità di un apparato o di un dispositivo. Ben altra cosa è un errore che comporta il crollo o il danneggiamento di una costruzione. Una cosa è un errore su manufatti la cui vita di servizio è di qualche anno e che quindi viene individuato dopo poco tempo. Ben altra cosa è un errore su manufatti la cui vita di servizio è di qualche decennio e che quindi viene individuato quando l'innovazione è stata largamente applicata. Si pensi ai copriferri del CA, alle iniezioni dei cavi da CAP, ai bulloni, alla fatica nell'acciaio: *error* che furono individuati molto tempo dopo il loro *try*.

3. *Try and error* nel settore delle strutture e collassi strutturali

Se è vero che anche il settore delle strutture non può che procedere in modo *try and error*, è però anche vero che, stante il ruolo assunto dall'*error* per le strutture, occorrerebbero cautela e prudenza. Prima di adottare un'innovazione strutturale si dovrebbe valutare quanto sia stata testata preliminarmente, quanto si discosti dalle applicazioni precedenti, quali potrebbero essere le conseguenze negative e dopo quanti anni.

Quelle attenzioni e quelle precauzioni non sono state però adottate in passato. Logica conseguenza, tutte le principali innovazioni strutturali hanno dato luogo a collassi causati da fenomeni non previsti. Esempi: la carpenteria metallica, il telaio, le reticolari, il CAP, le bullonature, le saldature, i ponti sospesi e strallati, le travi acciaio-calcestruzzo, i pilotis e la prefabbricazione in zona sismica, le costruzioni leggere, le strutture in parete sottile, i compositi, il vetro strutturale. I fenomeni che hanno causato il collasso di quelle innovazioni, allora furono sorprese negative, ora fanno parti dei corsi universitari di base. Esempi: l'instabilità, la propagazione della frattura, le cadute e le perdite del tiro della precompressione, i carichi della neve, il taglio del CA, l'interazione vento-struttura, il piano soffice e il pilastro debole in zona sismica, la robustezza, la risonanza.

La cautela e la prudenza sopra auspicata non sono state adottate neppure di recente: molte nuove soluzioni nel settore della sismica sono state immesse nel mercato forse un po' frettolosamente. In occasione dei futuri terremoti speriamo di non dover assistere a collassi strutturali causati da altri fenomeni non previsti.

Anche le innovazioni che sembrano controllabili possono comportare fenomeni non previsti. Emblematica è la diga a gravità. Il suo funzionamento sembrerebbe semplicissimo. In realtà una diga comporta un fenomeno di non immediato riconoscimento: la riduzione di resistenza al ribaltamento e allo scorrimento causata dalle sottopressioni dell'acqua che filtra. Agli inizi (primo '900), il fenomeno non era stato previsto e più di qualche diga a gravità collassò. Solo dopo alcuni crolli, quelle che prima erano cause occulte di fenomeni luttuosi – le sottopressioni idrauliche – furono scoperte e diventarono parte delle azioni di progetto (Fig. 1).

Una delle poche eccezioni sembrerebbe essere il CA. Tuttavia, se è vero che il CA non ha fatto morti in modo sistematico e diretto, è però anche vero che ha richiesto e richiede nel mondo miliardi di euro/dollari all'anno per il ripristino, poiché i fenomeni che dettano la durabilità sono diventati noti solo sul campo a partire dagli anni '70 e la durabilità rientra pienamente tra gli obiettivi della progettazione solo dalla fine degli anni '90.

Una cosa deve però essere detta. Sì, tutte le innovazioni strutturali hanno dato luogo a collassi. Tuttavia, il numero di strutture che sono collassate è infinitamente minore rispetto al numero di strutture che teoricamente avrebbero dovuto (e dovrebbero) collassare. Se si ha una visione animista del mondo, le strutture

sono da ritenersi spiriti benigni: anche se malprogettate, maldimensionate, maltrattate, sfruttate, abusate, tormentate, depauperate, trascurate, le strutture non serbano rancore, a differenza degli uomini, ma sempre approfondono una generosità estrema. E difatti resistono al collasso, non solo dando fondo a tutte le risorse che possiedono, ma anche trovando forze inaspettate, contributi che a priori sembrerebbero impossibili.

Un esempio è dato degli edifici alti d'acciaio americani. Il primo grattacielo al mondo è l'*Home Insurance Building* (Fig. 2), realizzato a Chicago nel 1885 (inizio lavori nel 1884), purtroppo demolito nel 1931 (il termine *skyscraper* verrà introdotto qualche anno dopo). Inizialmente i piani in elevazione erano 10, per una altezza di 42.1 m. Nel 1890 fu sopraelevato di 2 piani e raggiunse i 54.9 m. I muri perimetrali furono considerati come una pelle. Fu il primo edificio al mondo sia con tante e ampie finestre sia progettato per portare tutti i carichi con un telaio: pilastri in ghisa, travi in acciaio (anche qui, primo edificio al mondo a prevederle) o in *wrought iron* (acciaio povero, di prestazioni scarse) incernierate (appoggiate) ai pilastri. Ebbene, la struttura non era controventata (telaio con nodi a cerniera). Quella struttura era dunque teoricamente labile: avrebbe dovuto crollare, e non solo per l'azione del vento ma già solo per il peso proprio (per instabilità).

Il primo edificio americano a struttura metallica che prevede esplicitamente il controventamento è il *Manhattan Building* (Fig. 3), realizzato a Chicago nel 1891 (inizio lavori nel 1889), tuttora esistente (restaurato nel 1982). I piani in elevazione inizialmente erano 12 (9 nelle ali). Poi, nel 1891, furono aggiunti 4 piani: fu il primo edificio al mondo a raggiungere 16 piani (52 m di altezza). La struttura è composta da pilastri di ghisa e travi d'acciaio più controventi metallici a croce di sant'Andrea. Ai livelli inferiori i controventi consistono addirittura in cavi pretesati.

Dunque, tutti gli edifici alti costruiti in America tra il 1885 e il 1889, e pure un po' dopo (e anche tanti telai metallici di edifici ordinari), non erano controventati e avevano i nodi incernierati: erano teoricamente labili. Per fortuna i tamponamenti e i tramezzi, quantunque sia leggeri sia con numerose e ampie aperture, riuscirono a prevenire la crisi per instabilità dei pilastri e a portare l'azione del vento. Quindi non si registrano crolli. A ben vedere, però, già prima del 1891 gli Americani si ritrovavano in casa una costruzione metallica controventata: la Statua della Libertà. Infatti, la struttura del monumento che Gustav Eiffel aveva progettato consisteva in un telaio (travi e pilastri) con controventamento: una reticolare verticale. Quando nel 1886 assemblarono i pezzi costituenti il monumento, gli Americani vennero quindi a conoscenza del controventamento metallico. A quanto pare, però, non scattò l'illuminazione e il sistema non fu subito esportato negli edifici.

4. Innovazione e riproposizione o riconfigurazione

Nel settore strutturale l'innovazione è spesso un qualcosa che già esisteva e che viene riproposto in un contesto diverso. Un esempio è l'edificio alto con struttura a *diagrid*. Questo tipo strutturale è comparso sulla scena urbana nel 2004, per opera di Norman Foster (Fig. 4): *30 St. Mary Axe*, a Londra nella *City*, detto *The Gherkin* (180 m, 41 piani; progetto strutturale: Arup). Seguì nel 2006 dalla *Hearst Tower*, a New York (8th Avenue; Midtown Manhattan), sempre di Foster (182 m, 46 piani; progetto strutturale: WSP Group).

L'innovazione è però soltanto nell'uso del *diagrid* nell'edificio alto. Il *diagrid* in sé fu proposto nel 1896 dall'ingegnere russo Vladimir Grigor'evič Šuchov, il quale, per l'esposizione di Niznij Novgorod (Gorkij, Russia), progettò e costruì un serbatoio a *diagrid* (tuttora esistente, spostato in un altro luogo) e un padiglione, sempre a *diagrid* (Fig. 5). Il *diagrid* debutta dunque tra gli edifici alti nel XXI secolo ma fu introdotto alla fine del XIX.

Il *diagrid* si presta molto per i grattacieli, perfino più delle strutture a tubo. Viene da domandarsi se i 108 anni di attesa del *diagrid* prima di esordire negli edifici alti siano da ascrivere a quella prudenza prima auspicata, dato che la riproposizione in un contesto diverso di un qualcosa che già esiste è anch'essa un'innovazione.

Quei due edifici sono stati un modello di riferimento per un largo numero di edifici alti (l'architettura più di qualche volta copia, se non addirittura "ruba"): il *diagrid* è stato adottato in molti grattacieli, alcune opere di

Pritzker Architecture Prize. Questa è un'altra responsabilità che grava sull'innovazione strutturale: viene replicata. Perciò gli eventuali *error* si moltiplicano.

Una innovazione diventa un modello di riferimento non solo per essere copiato (Fig. 5) ma anche per essere variato. Sennonché una variazione sul tema è una innovazione ulteriore; quindi, aggiunge incertezza.

Esempi di variazioni sul tema dei due edifici sopra citati sono il *Tod's flagstore* a Tokyo, progettato da Toyoo Itō e realizzato nel 2004, e il *Prada Aoyama* (o *Prada Boutique Aoyama*) sempre a Tokyo, progettato da Jacques Herzog e Pierre de Meuron e realizzato nel 2003 (Fig. 6). Le strutture dei due edifici sono *pseudo-diagrid*: oltre alle maglie triangolari includono maglie a 4 o 5 lati. Quelle sono assoggettate soltanto a forze assiali, mentre queste anche a momento flettente e taglio (entrambi gli edifici sono isolati sismicamente alla base). Se è vero che il *diagrid* altro non è che una reticolare spaziale e come tale l'innovazione rientra nell'inventiva progettuale, la quale comporta rischi minori, è però anche vero che il *diagrid* rende possibili forme che prima non lo erano. Si pensi (Fig. 6) alla *China Central Television* a Pechino, progettata da Rem Koolhaas e realizzata nel 2008 (234 m; 51 piani) e a *Capital Gate (Leaning Tower)* ad Abu Dhabi, realizzato nel 2011 (160 m; 35 piani; uffici). Trattasi di forme che, prima dell'avvento del *diagrid*, non erano possibili.

Tirando le somme, una innovazione ha molteplici responsabilità. Oltre a quella diretta, relativa alla costruzione che la propone e la ospita, è indirettamente responsabile di tutto ciò che suggerisce. In particolare, certe innovazioni possono permettere morfologie mai viste prima. Ad esempio, il rinforzo delle volte in muratura con materiali compositi rende possibili rapporti spessore/luce che non esistono nel costruito storico. Talvolta l'innovazione nel settore strutturale è la mera riconfigurazione di una tecnica nota da anni. Un esempio è il rinforzo del CA mediante materiali compositi. Trattasi infatti del *béton plaqué* col composito al posto dell'acciaio. Il risultato è una tecnica meno invasiva e più facile da mettere in opera rispetto al *béton plaqué*. Tuttavia, anche la mera riconfigurazione implica un *try* e quindi può dare luogo a un *error*. Nell'esempio sopra menzionato il *try* consiste nella sostituzione degli spinotti d'acciaio con l'incollaggio epossidico. Immaneabilmente, ciò ha già dato luogo a *error*: impreviste crisi per perdita di aderenza del rinforzo (*debonding*).

5. Burocratizzazione della Ingegneria delle Strutture

L'opinione di chi scrive sulle normative espressa nel paragrafo 1 riguarda quelle lì definite "di nuova generazione". Sulla scelta italiana di avere una normativa strutturale cogente, chi scrive non è in grado di esprimere alcuna opinione. Nell'Unione Europea, come noto, le norme strutturali sono legge – e quindi sono vigenti e cogenti – solo in Italia, Spagna e Grecia. Negli altri paesi dell'Unione, così come nel Regno Unito e nella quasi totalità dei paesi extra europei (e.g., gli Stati Uniti), sono soltanto un aspetto contrattuale, laddove la sicurezza strutturale e la qualità dell'opera vengono tutelate attraverso un procedimento assicurativo. Fatto sta che in Italia, dal 1907, la sicurezza strutturale delle costruzioni è stata considerata una questione sociale di rilevanza tale da dover essere regolamentata *ex lege* (D.M. 10 gennaio 1907; G.U. n. 28 dello 02.02.1907).

Una cosa è certa. Quella norma, così come il Regio Decreto Legge n. 2229 del 16.11.1939 – che è stato il riferimento normativo della ricostruzione post-bellica – e la Legge n. 1086 dello 05.11.1971 – tuttora vigente, che definisce "Il giuoco delle parti" con lo stesso rigore dell'omonima opera di Luigi Pirandello – sono scritti molto bene e con la dovuta sintesi; perciò sono proficuamente fruibili. Alto aspetto importante, quelle norme non danno adito a interpretazioni; quindi non permettono, a chi giudica, di arrogarsi anche il potere legislativo, oltre a quello giudiziario.

Chi scrive non intende certo fare apologia di monarchia, fascismo o Democrazia cristiana; semplicemente vuole dire che, una norma ben fatta è di aiuto all'Ingegnere, mentre un D.M. più Circolare di 244720 parole (la Divina Commedia ne ha meno di 100000), cui si aggiungono le formule e le figure, non solo non aiutano, ma sono un enorme intralcio per l'Ingegnere. Per di più, il D.M. e la Circolare includono soltanto i materiali, i prodotti e le soluzioni strutturali tradizionali, mentre per il resto rimandano ad altri documenti.

Le normative strutturali non contemplano dunque, giustamente, le innovazioni ma ne attendono la maturazione. Per esempio, il rinforzo delle strutture esistenti con materiali compositi FRP si è diffuso in Italia nella seconda metà degli anni '90, ma le relative istruzioni normative sono state emanate nel 2004 (CNR-DT 200). Le innovazioni sono invece disciplinate da Enti appositi, mediante certificazioni che ne legittimano l'uso strutturale: Certificati di Valutazione Tecnica (CVT), rilasciati dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici; European Technical Assessment (ETA), rilasciati da Technical Assessment Bodies (TABs) appartenenti alla European Organisation for Technical Assessment (EOTA); marcatura CE.

Quale che sia il livello di idiosincrasia verso le norme e la burocrazia, si deve comunque condividere che il giudizio sulla idoneità di una innovazione non può che essere dato da un ente terzo. Sennonché, per come quegli Enti operano, le certificazioni rilasciate non danno le dovute garanzie di sicurezza. Infatti il loro operato non si occupa direttamente degli effetti perniciosi e occulti che quasi sempre ci sono, inizialmente allo stato latente, ma che poi si manifestano e talvolta possono essere esiziali.

Oltre a essere poco utili, quegli Enti sono in antitesi con le "pari opportunità", poiché i processi per ottenere il CVT, l'ETA e la marcatura CE sono lunghi e costosi. Pertanto solo le aziende che hanno la forza per assorbire quegli oneri possono impegnarsi nell'innovazione, mentre chi avrebbe inventiva ma non ha quella forza non può permetterselo. A ciò si aggiunge che, dopo aver investito tanto per ottenere quelle certificazioni, poi le aziende debbono difenderle strenuamente. Anche perché, i brevetti nel settore strutturale sono facilmente copiabili. E lo fanno fornendo sia assistenza tecnica sia software e tabelle di progettazione e verifica. Mentre quella è spesso di aiuto, questi più di talvolta sono inaffidabili e fanno perdere di vista la realtà (si pensi ai tanti software sugli FRP o sugli ancoraggi che forniscono risultati improbabili se non inattendibili).

Ciò che, banalizzando, chiamiamo burocrazia ha contaminato anche l'innovazione sull'inventiva progettuale. Lì la situazione è addirittura peggiore. In Italia, un progetto strutturale deve ricevere l'approvazione dei competenti Uffici tecnici, in particolare la "Autorizzazione sismica". Purtroppo, questi Uffici spesso richiedono numerose e ampie integrazioni e modifiche, al progetto e alla relazione di calcolo, tanto che l'approvazione spesso richiede moltissimo tempo. Inoltre, dal 2006 i progetti di opere pubbliche richiedono la "Validazione" da parte di un soggetto accreditato (Validatore). Quasi sempre il Validatore formula una pleora di richieste di integrazione il cui soddisfacimento comporta la perdita di tantissimo tempo ai progettisti.

In genere i processi di autorizzazione e di validazione sono nemici dell'innovazione. Una tipica frase di quei pigmei che muovono la gigantesca macchina burocratica è: "non lo ho mai visto fare così".

Inevitabile conseguenza, da anni, il progetto strutturale preferisce adottare soluzioni standard, di prassi, stereotipate, di routine: quelle che più facilmente ricevono l'Autorizzazione sismica e la Validazione.

Si può affermare che tutti i controlli imposti negli ultimi vent'anni ai progettisti hanno avuto tantissimi effetti negativi, senza però migliorare la qualità del costruito: hanno inibito l'innovazione, hanno creato un equivoco gioco di responsabilità, e hanno comportato l'incremento dei tempi e dei costi di progettazione e costruzione. Anziché stigmatizzare il reddito di cittadinanza, che dà soldi a persone impossibilitate a lavorare, occorrerebbe stigmatizzare gli stipendi dati a chi, oltre a non produrre alcunché, soprattutto ostacolano chi produce. L'autore non riesce a capacitarsi di come sia possibile che gli addetti ai lavori non si rendano conto (o che non lo esternino) degli effetti di quella burocrazia: se il nostro Paese riducesse all'essenziale le certificazioni sui prodotti da costruzione e se abolisse quei controlli sulla progettazione, il Prodotto Interno Lordo incrementerebbe tanto, senza alcuna riduzione né della sicurezza né della qualità del costruito.

6. Il ruolo dell'Università nell'innovazione

Guardando le cose in controluce si scopre una stortura: di solito l'ambiente in cui le innovazioni nel settore delle strutture vengono concepite e sviluppate non è quello accademico. Spesso, l'Università contribuisce alle innovazioni solo in ragione dei suoi laboratori accreditati, i quali hanno titolo per certificare le prestazioni.

Questa aberrazione è la diretta conseguenza di come l'Università, da qualche anno, valuta l'attività scientifica di ciascun ricercatore: in base al numero di pubblicazioni su rivista e in base al numero di citazioni sia delle pubblicazioni sia delle riviste su cui sono pubblicate. Il risultato è che la ricerca universitaria è deviata verso il mero soddisfacimento di quel criterio di giudizio, che però è antitetico alla qualità della ricerca. Chi pubblica quattro (o più) articoli in un anno valutati come "eccellenti" dall'ANVUR risulta essere uno scienziato dello stesso livello (o superiore) di Albert Einstein, il quale nel 1905 pubblicò quattro articoli davvero d'eccellenza. Se poi quello è il ritmo di produzione annuale per enne anni, quel ricercatore è Einstein elevato alla enne. Fatto sta che la quasi totalità dei prodotti cosiddetti scientifici di Ingegneria strutturale non aggiunge niente alle conoscenze: pubblicazioni inutili alla cultura, alla professione o all'industria, consistenti in applicazioni acritiche di software o di formulazioni classiche, astrusi artifici matematici avulsi dalla realtà, sperimentazioni senza interpretazioni spesso usate solo per calibrare modelli spacciati per previsionali. Per fortuna adesso gli articoli non sono cartacei ma on-line: almeno non contribuiscono alla deforestazione dell'Amazonia. Cui si aggiunge che molti ricercatori non praticano la professione. Pertanto, i temi di ricerca vengono spesso scelti non in riferimento a problemi reali, individuati sul campo, ma così da avere facilità di pubblicazione. Il già menzionato rinforzo delle strutture esistenti in CA mediante rinforzi in materiale composito è un esempio tra i tantissimi: migliaia di articoli sul tema del debonding che, salvo eccezioni, non considerano la carbonatazione del copriferro, e quindi altro non sono se non un inutile spreco di lavoro.

7. Innovazione e sicurezza

L'autore non intende passare per quelli che Francesco Guccini definisce "abbaiarluna" e quindi non si limita alla *lamentatio* ma formula anche la sua proposta su come innovazione e sicurezza possano essere conciliate. Anziché demandare la garanzia della sicurezza di una innovazione alla burocrazia con le sue procedure spesso ottuse, il *try* e l'*error* dovrebbero essere trattati come processi stocastici: valutare i rischi, in particolare gli effetti degli *error*, mediante metodologie probabilistiche. Cosa che le procedure per l'ottenimento dei certificati menzionati nel paragrafo 5 non contemplano, se non in modo basilico.

Poi, una volta applicate, le innovazioni dovrebbero essere monitorate e i dati del monitoraggio dovrebbero essere trattati con modellazioni a-posteriori (probabilità condizionata). I relativi oneri sarebbero accettabili, poiché a beneficiarne non sarebbe soltanto la singola applicazione ma anche la ricerca sul tema.

Oltre a ciò un progetto strutturale contenente un'innovazione dovrebbe essere *fail safe*, ossia, oltremodo la cui antitesi terminologica può essere risolta traducendolo come "crisi protetta". Un progetto strutturale si definisce *fail safe* se assicura una fase di post-crisi sufficientemente soft, robustezza adeguata, gerarchia e ridondanza. Un progetto *fail safe* garantisce dunque un ramo *softening* della curva carico-spostamento che va dal picco di portanza al crollo non eccessivamente ripido (cosicché il collasso non sia né repentino né esplosivo). Inoltre garantisce sufficiente robustezza, cosicché gli effetti di una crisi siano commisurati alla causa (un evento di modesta portata deve produrre al più un collasso locale). E ancora, dà gerarchia ai componenti strutturali, così da modulare i coefficienti di sicurezza in relazione alle conseguenze del crollo di ciascun componente (occorre assumere che ogni componente possa uscire di scena a prescindere dalle possibili cause). Infine presenta ridondanza nelle sezioni, nei componenti e nel sistema strutturale, cosicché sussistano sistemi resistenti alternativi a quello di progetto. Allo SLE e allo SLU, tali sistemi sono silenziosi e passivi; ma se il sistema resistente di progetto va in crisi, uno dei sistemi alternativi entra in azione e porta una apprezzabile frazione delle tensioni, delle azioni interne e dei carichi (se possibile dovrebbe portare tutti i carichi G_1 e G_2).

Si precisa che la progettazione *fail safe* non deve occuparsi della struttura a fronte di azioni esterne maggiori di quelle di progetto allo SLU, ma a fronte di eventi non direttamente contemplati dallo SLU e dallo SLE.

Per dirla tutta, la progettazione *fail safe* dovrebbe essere prescritta per tutte le strutture. In effetti, sorprende che, in un corpus normativo così vasto, l'unico documento che impone una progettazione *fail safe* sia quello

sul vetro strutturale (CNR-DT 210/2013).

L'unica figura che dovrebbe avere titolo per controllare e certificare il progetto e la costruzione, innovazioni comprese, dovrebbe essere il Collaudatore. Anche perché, il Collaudatore, a differenza della burocrazia, ha competenze pari e analoghe a quelle dei Progettisti (se non superiori, in virtù dei 10 anni di iscrizione all'Albo). Dal R.D. n. 2229 del 16.11.1939, le norme strutturali italiane prevedono la figura del Collaudatore e richiedono il collaudo statico delle costruzioni. Il termine "collaudo" proviene dal latino: *cum* (insieme) e *laudare* (lodare). Dunque, giudicare un'opera regolarmente eseguita. Certificazioni e controlli ulteriori al collaudo sono più dannosi che inutili. La pleora di documenti che il Collaudatore è costretto a richiedere e verificare, come pure tutti gli altri controlli formali che è tenuto a espletare tendono a spostare la sua attenzione dalla costruzione reale a quella virtuale. Le interferenze della burocrazia con il collaudo insinuano l'idea che, se la costruzione rispetta tutte le formalità, allora è sicura, idonea, durevole, ben progettata e ben eseguita. È appena il caso di accennare che, invece, quella condizione non è né necessaria né sufficiente.

8. Avanzamenti del settore delle strutture

Logica conseguenza di quanto sopra, l'innovazione strutturale riguarda essenzialmente i materiali, i prodotti, i sistemi e le tecnologie edilizie – in breve, i prodotti da costruzione – ma poco il progetto. Infatti, se pure in un contesto normativo e burocratico non favorevole all'innovazione, la velocità di avanzamento nel campo dei prodotti da costruzione è comunque assai elevata, poiché il contesto generale è invece favorevole. Prova ne è che, se un professionista decidesse di non esercitare per cinque-sei anni, al suo rientro nella professione scoprirebbe che le sue competenze sono diventate obsolete.

Negli ultimi anni un ulteriore aspetto si è aggiunto. Lo strutturista, preso fra le tante incombenze formali, tende a rivolgersi alle soluzioni "chiavi in mano"; ossia, spesso demanda alcuni segmenti della progettazione alle aziende. Ebbene, le aziende sanno che, se sono in grado di fornire nuove soluzioni strutturali comprensive di disegni esecutivi e di relazione di calcolo, normalmente trovano le porte spalancate da parte del professionista; così facendo, inoltre, interdicono l'azione di chi li copia. E tutto questo stimola gli avanzamenti. Quanto sopra non è affatto da stigmatizzare a parere dello scrivente. In questi ultimi venticinque-trenta anni le aziende del settore hanno introdotto tante e valide innovazioni, che hanno elevato la qualità delle lavorazioni e quindi delle opere. In più le aziende interagiscono con il professionista non soltanto mediante i venditori ma anche mediante i tecnici, con benefici per la progettazione. Come già detto, ciò che chi scrive disapprova è l'uso acritico di software e di tabelle fatti dalle aziende, specie se applicati dalle aziende stesse.

9. Osservazioni conclusive

Un lapidario aforisma, la cui paternità non è chiara, tradotto dall'inglese all'italiano recita: "Un progetto strutturale è tanto migliore quanto minore è l'innovazione che contiene". Indiscutibilmente, se il termine "migliore" viene rimpiazzato con "più sicuro", l'aforisma non può che essere condiviso. Vale a dire, se "è tanto migliore" significa "comporta tanti rischi in meno", non si può che essere d'accordo.

Ma allora, dato che la sicurezza è il fine principale di un progetto strutturale (e in più tutti teniamo famiglia), sembrerebbe che non ci sia spazio per l'innovazione strutturale. In effetti così è se la visuale viene ristretta al singolo progetto e alla convenienza diretta degli addetti ai lavori.

Se però la prospettiva viene ampliata così da includere l'umanità e la civiltà, le cose cambiano. Nella seconda metà del XVI secolo l'Europa decise di profondere energie e mezzi nell'acquisizione di conoscenze sulla natura: Rivoluzione scientifica (Copernico, 1543). Quella scelta determinò uno straordinario sviluppo di tutte le scienze, cui conseguirono avanzamenti della tecnica e della tecnologia, che migliorarono la qualità della vita. Ma più di tutto la Rivoluzione scientifica generò un drastico progresso della civiltà. Sino al XVI secolo la cultura

europea era in ritardo rispetto a grandi civiltà come quella araba, cinese, indiana e turca. Grazie alla Rivoluzione scientifica, l'Europa, prima recuperò rapidamente il ritardo rispetto a quelle civiltà, poi acquisì un'egemonia culturale rispetto al resto del mondo. Da lì, per quattro secoli la cultura europea non solo è stata quella dominante, ma è stata anche identificata con la modernità, in parte venendone riconosciuta e in parte essendosi attribuita una superiorità rispetto alle altre culture (Eurocentrismo). Dopodiché, quella egemonia è terminata e adesso, fortunatamente, nessuno può ritenersi portatore di alcuna cultura superiore.

Ebbene, quello è il punto: l'innovazione non determina soltanto avanzamenti della scienza e della tecnica, e miglioramenti della qualità della vita, ma prima di tutto determina un avanzamento della civiltà.

Un settore che rinunciasse all'innovazione arroccandosi in una posizione conservativa priverebbe pertanto il progresso della civiltà del proprio contributo. E questo l'Ingegneria delle Strutture non può proprio permetterselo, anche pensando al suo passato.

Non solo nessun altro settore ha migliorato la qualità della vita più di quanto abbia fatto, da sempre, il settore delle strutture, ma soprattutto le innovazioni strutturali hanno spesso fatto la storia dell'umanità. Si pensi alla cupola di *Santa Maria del Fiore*, a Firenze, di Filippo Brunelleschi. La sua realizzazione fu il risultato di una doppia innovazione: 1- una concezione strutturale d'avanguardia (soprattutto l'apparecchiatura a corda branda e la struttura a sandwich); 2- la separazione e l'anticipazione del progetto rispetto alla costruzione (mentre prima le opere venivano decise in cantiere). *Filippo di ser Brunellesco Lapi*, con il suo progetto della Cupola del 1418, fu dunque il primo ingegnere strutturista della storia (a titolo di par condicio, il primo architetto della storia, a parere di chi scrive, fu Leon Battista Alberti).

Se Brunelleschi avesse dato peso solo ai rischi cui andava incontro avrebbe rinunciato. Invece, fortunatamente, andò avanti, nonostante le enormi difficoltà tecniche e a dispetto di una amministrazione che lo sottopagava e che, quando poteva, gli preferiva Lorenzo Ghiberti. E il risultato non fu soltanto l'opera in sé ma la grandissima risonanza che la Cupola e soprattutto la sua realizzazione ebbero: il mondo di allora sentì che l'umanità aveva fatto un gigantesco balzo in avanti. E sulla spinta di quel fervore nacque il Rinascimento, uno dei più importanti movimenti culturali della storia non solo in Italia e non solo in architettura.

Insomma, se è vero che i rischi implicati dalle strutture sono grandi è però anche vero che l'innovazione nelle strutture può produrre avanzamenti che travalicano il settore e riverberano sull'intera collettività.

Chi scrive non condivide pertanto l'aforisma in incipit a questo paragrafo, pur ritenendo che non sia totalmente da rigettare. Forse può essere così riformulato: "Un progetto strutturale è tanto migliore quanto più è *custom* e quanto meno è *prêt-à-porter*" (Coco Chanel è stata un'assoluta eccellenza, ma nella moda).

Sì, certo l'innovazione nel settore delle strutture comporta rischi elevati. Ma se si evitano accelerazioni rispetto al passato, se l'innovazione viene adeguatamente ponderata, analizzandola con metodi probabilistici raffinati e monitorandola, e se la progettazione è *fail-safe*, allora i rischi rientrano nell'accettabilità.

Sembra un banale gioco di parole ma per promuovere l'innovazione occorre tornare al passato. Occorre fare sì che l'ingegno del progettista non sia più inibito dalle normative e tantomeno soffocato dalla burocrazia, che il ricercatore universitario torni a lavorare su tematiche centrali alla costruzione, anche abolendo la assurda Valutazione sulla Qualità della Ricerca (chi scrive ha sempre ricevuto eccellente, nella VQR; questa proposta non è quindi a titolo personale ma solo per riqualificare l'Università), che il progetto strutturale sia promotore di innovazioni e che cessi di essere a rimorchio delle aziende, con le loro soluzioni "chiavi in mano". Occorre facilitare l'introduzione di nuovi prodotti da costruzione, fermo restando che l'innovazione deve comunque essere largamente controllata, oltre che disciplinata e regolamentata. Occorre ridare al Collaudatore il ruolo centrale nel controllo e verifica di un'opera, liberandolo da tutte le inutili incombenze formali sulla costruzione virtuale e facendo sì che si concentri sulla costruzione reale, innovazione compresa.

Ma soprattutto occorre eliminare la burocrazia dall'ingegneria, anche qui non una rima ma una cacofonia.

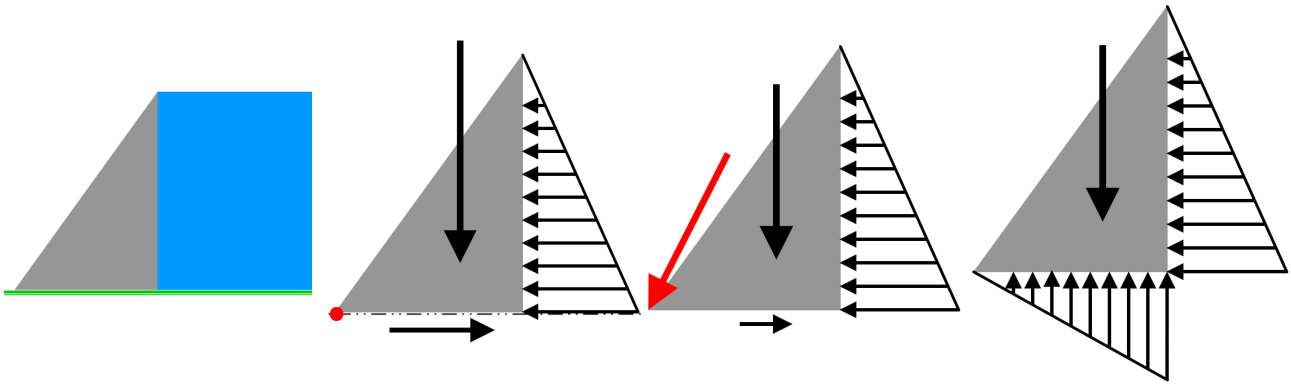


Figura 1 – Da sinistra a destra: sezione verticale semplificata di una diga a gravità (in genere, anche il paramento di monte è obliquo); carichi considerati ai primi del '900 e relativi equilibri limite (in rosso la forza risultante); carichi effettivamente agenti sulla diga (sottopressioni idrauliche alla base).

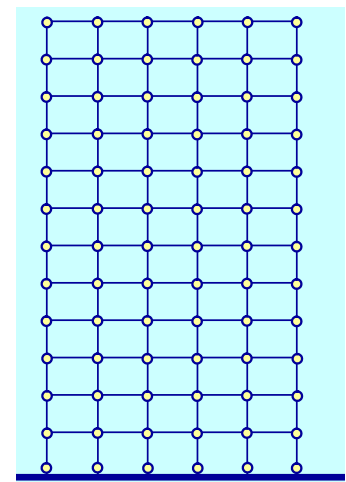


Figura 2 – Da sinistra a destra: *Home Insurance Building* nel 1885 e nel 1890, rispettivamente; schema statico.



Figura 3 – *Manhattan Building*: immagini in successione temporale da sinistra a destra.



Figura 4 – Sinistra e centro: 30 St. Mary Axe (in rosso due maglie del *diagrid*). Destra: Hearst Tower.

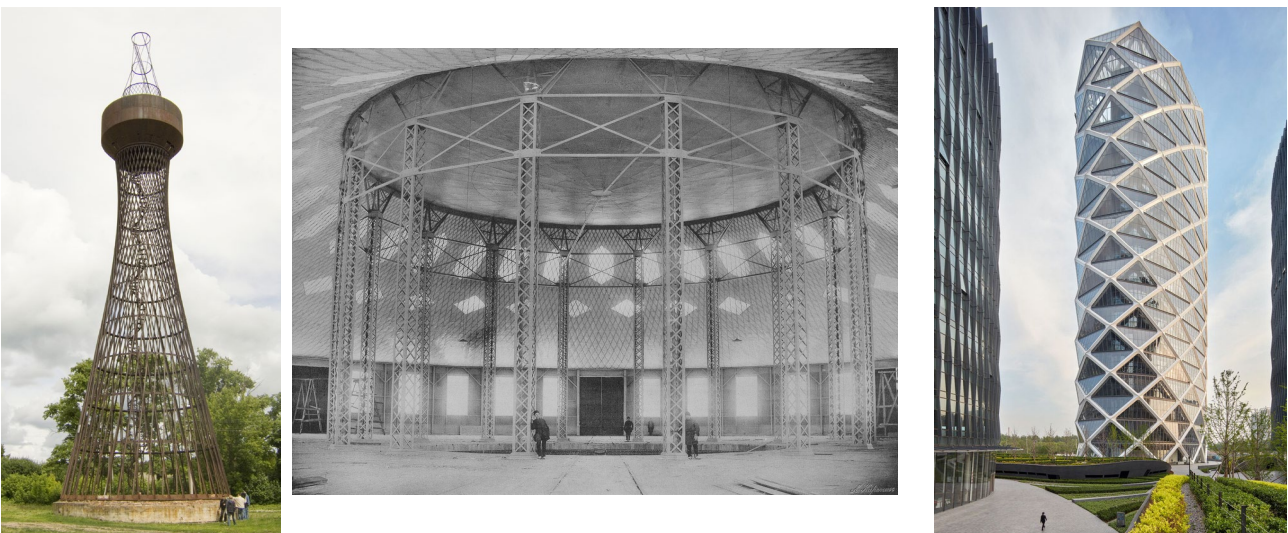


Figura 5 – Sinistra e centro: serbatoio e padiglione entrambi a *diagrid*, del 1896. Destra: edificio alto a *diagrid*.



Figura 6 – Da sinistra a destra: *Tod's flagstore*, *Prada Aoyama*, *China Central Television*, *Capital Gate*.