

Entriamo ora nell'anno 2010, consci dell'incombere sempre più pressante di varie emergenze gravanti sul nostro pianeta, talvolta mascherate dai sensazionali passi in avanti prodotti dalla scienza.

Come è ben noto, le emergenze del nostro pianeta possono essere così elencate, senza che ciò rappresenti un ordine di priorità, ma nel contempo riconoscendo strette interconnessioni e seri motivi di reciproca esaltazione: gli incrementi e gli squilibri demografici, il riscaldamento globale e la destabilizzazione climatica, le emissioni inquinanti e l'accentuazione dell'effetto serra, gli assetti energetici mondiali, il ruolo dell'alimentazione idrica, la questione dei profughi ambientali.

Da tempo sono state intraprese varie iniziative per vedere di fronteggiare tali emergenze, per quelle relative al clima e all'ambiente, che parrebbero svincolate da problemi politico-demografici, giungendo a sancire risoluzioni concrete, che abbiano anche a premiare le scelte operative orientate alla difesa ed al miglioramento del patrimonio mondiale.

In particolare, nella Conferenza di Copenhagen, testè conclusasi, si è ribadito l'obiettivo prioritario di fermare la tendenza all'aumento del riscaldamento globale, vedendo anzi di ridurlo. Anche se questa priorità è stata riconosciuta da quasi tutti i Paesi del mondo già nella Convenzione di Kyoto negli anni novanta del secolo scorso, v'è da dire che ad oggi sono invero limitati i risultati raggiunti, da un lato per l'impetuoso sviluppo di alcuni grandi Paesi, che nello spasmodico bisogno d'energia non si sono fatti scrupolo d'impiegare massivamente il carbone (altamente inquinante) fra i combustibili fossili, dall'altro lato per la staticità tecnico-economica dell'Industria dei Paesi già sviluppati, e anche di quelli meno sviluppati, che non si è lasciata avventurare facilmente nella riconversione "verde", perché colma d'incertezze tecnico-economiche e finanziarie.

In sostanza, anche se politici ed amministratori hanno mostrato di avere presa buona nota delle esigenze mondiali e di condividere totalmente la necessità di farvi fronte, ed anche se ormai in parecchi Paesi si è programmato un piano serio e concreto per l'introduzione di fonti di energia rinnovabile (eolica, solare, geotermica, marina), in pratica appare ad oggi

ancora lontana la conversione del modello di sviluppo da quello illimitato a quello sostenibile.<sup>(\*)</sup> Pertanto, l'operare nell'ottica della sostenibilità anche nello stretto Mondo delle Costruzioni può apportare un contributo a tale auspicata conversione, non certo determinante come quantità, ma invece fondamentale perché contribuisce ad accendere le coscienze verso la cultura della responsabilità.

In particolare nel campo delle Strutture, per “muoversi” nell'ottica della sostenibilità, in linea di principio occorre:

- una corretta e coerente concezione del progetto (**Conceptual Design**), al fine di garantire alle strutture resistenza, rigidità, tenacità, robustezza – anche sotto eventi eccezionali – durabilità, versatilità (adattabilità, riparabilità, sostituibilità), ispezionabilità, manutentabilità,
- una corretta e coerente concezione esecutiva (**Efficient Construction**), con materiali e tecnologie eco-compatibili, impiego del riciclo, prefabbricazione, ottimizzazione dei cantieri, industrializzazione,
- consone e sicure modalità di servizio (**Consistent Use**), al fine di garantire un esercizio coerente a quanto programmato, nel contesto in cui esso si svolge.

Questa strategia operativa ha lo scopo di ottenere strutture la cui realizzazione possa appartenere all' “insieme” rappresentato nella figura sottostante quale intersezione dei tre insiemi rispettosamente singolarmente degli aspetti sociali, ambientali ed economici, cioè in sostanza si afferma che le operazioni del costruire vanno orientate all'ottimizzazione: (a) delle esigenze sociali, in specie per la sicurezza (salvaguardia della vita umana) ed il rispetto in servizio delle necessità fisiologiche delle persone (comfort d'esercizio); (b) delle esigenze

---

<sup>(\*)</sup> Si rammenta che lo sviluppo sostenibile ha ricevuto la sua prima definizione nel Rapporto del Presidente, Sig.ra Gro Harlem Brundtland, della WCED, World Commission on Environment and Development-UNESCO, 1987, nel modo seguente: “Lo Sviluppo Sostenibile è uno sviluppo che garantisce i bisogni delle generazioni attuali senza compromettere la possibilità che le generazioni future riescano a soddisfare i propri”.

Tale formulazione stabilisce le regole di un progetto di vita per tutti i popoli della Terra, allineato alla cultura o etica della Terra, riconosciuta sin dal 1949 dall'americano Aldo Leopold nel suo saggio avente proprio il titolo “The Land Etic”.

Questo progetto è però solo un contributo alla salvezza del pianeta dalla catastrofe in cui mostra di avviarsi, anche se si tratta di un contributo fondamentale poiché accende le coscienze instaurando quella che in un saggio illuminato il prof. Piero Pozzati di Bologna ed altri chiamano la “cultura della responsabilità”. Infatti, nel corso dei decenni che si sono succeduti a tale prima dichiarazione d'intenti, lo Sviluppo Sostenibile ha trovato parecchi contrasti, ma anche sostenitori convinti, ad esempio, con il consenso allargato ottenuto nella Conferenza di Rio de Janeiro del 1992 nell'Agenda 21: Masterplan per la sostenibilità del 21° secolo, nel rispetto almeno del “principio di precauzione” sancito a Stoccolma nel 1972.

ambientali, in specie per il rispetto e la conservazione del mondo naturale; (c) delle esigenze economiche, per i costi e gli oneri sia diretti che indiretti gravanti sulla società.



In particolare negli ultimi decenni, come si è sopra indicato, gli interessi del **Conceptual Design** si sono ampliati a partire dalle tradizionali caratteristiche meccaniche dei materiali verso la sicurezza e la durabilità, sempre all'interno della sostenibilità, invero con qualche problema di adattamento in Paesi piuttosto tradizionali come l'Italia, dove il calcestruzzo – ad esempio – è stato considerato da sempre come “eterno” e compatibile con il mondo naturale. Ma così non è! Senza nulla togliere ai pregi del calcestruzzo, è ormai riconosciuto come tale materiale si deteriora né più né meno delle pietre naturali. Inoltre, l'impatto delle cave sul territorio ed il consumo energetico nella produzione del cemento, unito all'emissione di anidride carbonica, spingono sempre più verso lo sviluppo di conglomerati cementizi ultraperformanti, ottenibili con minori quantitativi di cemento, e di materiali alternativi.

La durabilità e la sostenibilità hanno portato all'introduzione di nuove parole-chiave, come “ciclo di vita”, rapporto “costo-benefici”, “compatibilità ambientale”, “progettazione ecologica”, “riutilizzo”, “riciclo”, “riduzione dell'impatto locale”, “ottimizzazione dei cantieri”, “risparmio energetico”, “inerzia termica”, “priorità locali”, “materiali ecologici”, .....). Queste parole chiave stanno avendo un notevole impatto sullo sviluppo dei materiali di costruzione, ma anche sulla stessa progettazione strutturale, sebbene l'orientamento attuale della ricerca sia soprattutto focalizzato sui materiali.

In effetti, i materiali strutturali continuano a giocare un ruolo predominante in riferimento a: (a) costruzioni esistenti (→ ripristino, rinforzo ed adeguamento); (b) costruzioni future (→ versatilità, durabilità, riduzione dell'impatto locale, risparmio energetico); (c) tecnologie di produzione e movimentazione (→ dalla cava al cantiere, nel caso del calcestruzzo). In dettaglio:

- Costruzioni esistenti: il costo e la criticità (specialmente in aree urbanizzate o di interesse storico) della demolizione e ricostruzione di edifici esistenti propone assai spesso il recupero di tali edifici e quindi l'uso di materiali innovativi (quali polimeri fibrorinforzati e conglomerati cementizi ad alte/altissime prestazioni) per ripristinare/rinforzare/adequare le loro strutture, anche a fronte di condizioni ambientali gravose (→ alta temperatura, vibrazioni, carichi sismici) e, comunque, in condizioni di cantiere spesso difficili.
- Costruzioni future: la durabilità richiede sempre più di progettare, produrre ed impiegare materiali "ingegnerizzati" (cioè materiali artificiali "ritagliati" su specifiche esigenze), al fine di garantire un'adeguata vita strutturale utile, senza necessità di gravosi interventi manutentivi, pur in presenza spesso di condizioni ambientali estreme (→ incendio, bassissime temperature, radiazioni, sismicità).
- Tecnologie di produzione e movimentazione: le nuove costruzioni devono essere realizzate in ossequio alla sostenibilità, e quindi le loro strutture devono essere progettate e costruite in modo tale da garantire non solo prestazioni adeguate (→ sicurezza e durabilità), ma anche un ridotto impatto sull'ambiente e sulla Società nel suo complesso (→ riduzione delle emissioni di anidrite carbonica durante la produzione dei materiali; riutilizzo dei materiali risultanti dalle demolizioni; riciclo di sottoprodotti industriali; contenimento delle aree di cantiere; controllo dei tempi di costruzione; scelta dei materiali e delle tecniche costruttive sulla base della loro disponibilità in prossimità del cantiere; .....

Tutte queste esigenze e le regole per soddisfarle, che traducono nella pratica delle Costruzioni i principi strategici sopra indicati, vengono raccolti convenientemente in "codici" fra i quali si può ricordare quello applicato negli USA con la sigla LEED (Leadership for Energy and Environmental Design), in attesa che venga approntato in Regione Lombardia quello commissionato alla Fondazione Politecnico ed al Consorzio CIS-E.

Fatte queste premesse, vale la pena di ricordare ciò che ogni strutturista cerca di ottenere attraverso una scelta ragionata e razionale dei materiali e delle tipologie strutturali (**Conceptual Design**), al di là delle prestazioni veramente eccezionali dei nuovi materiali (calcestruzzi ultraperformanti ed acciai ad alta resistenza o, se occorre, inossidabili): precisamente, l'ambizione di uno strutturista sarebbe quella di mettere in opera solo e soltanto il materiale strettamente necessario a soddisfare la funzione statica richiesta. Quindi, facendo in modo che tutte le fibre del materiale nelle sezioni strutturali e poi lungo le superfici strutturali siano chiamate in ugual guisa a partecipare alla resistenza e a contenere le deformazioni: in una parola, si vorrebbe che nelle strutture lineari si avessero solo forze normali centrate, ossia

unicamente un regime di forze assiali, e nelle strutture di superficie solo sforzi normali centrati, ossia unicamente un regime di sforzi membranali. Invero, questi regimi assiale e membranale possono essere talvolta attuati, seppure solo nelle strutture di particolari costruzioni aventi funzionalità speciali, come possono essere ad esempio le coperture di grandi spazi pubblici (saloni espositivi, edifici di culto).

Pur tuttavia, anche nell'evenienza di forze e sforzi non assiali, che è quella concreta nella quale sempre si imbattono gli strutturisti, qualcosa si può certamente fare per migliorare la risposta della struttura sotto le azioni applicate. Ed è opportuno far questo poiché, per sostenere le azioni e riportarle al suolo, nella struttura si destano forze e sforzi addizionali di flessione, torsione e tagli i quali impediscono l'ottimizzazione d'impiego del materiale, rendendone inerti parecchie fibre. In tale situazione, allora, il rapporto  $c$  fra il carico totale portato (peso strutturale e carico di utilizzo) ed il peso strutturale diminuisce sensibilmente sempre di più al crescere delle dimensioni delle strutture: vertiginosamente ci si approssima all'unità, finendo col realizzare strutture quasi solo fine a sé stesse (in grado, cioè, di portare quasi unicamente il loro peso), col limite certo di una dimensione massima oltre alla quale, per un dato materiale e schema strutturale, non si può più andare (si ricordino le affermazioni di Galileo Galilei ai suoi discepoli sui limiti dimensionali delle creature della terra e delle costruzioni dell'uomo).

Orbene, per migliorare la risposta della struttura, il primo criterio da seguire, laddove è appena possibile, riguarda la scelta della "forma" strutturale, nel senso che è bene cercare di fare in modo che le azioni applicate siano sorrette nella maggior parte possibile della struttura da regimi di forze o sforzi assiali.

Pertanto, si deve cercare di far scendere i carichi in fondazione secondo linee o secondo superfici attorno alle quali disporre il materiale strutturale: in altre parole, il materiale va disposto attorno all'ipotetica linea o superficie delle pressioni (calcestruzzo) o delle trazioni (acciaio). Così facendo, per buona parte della struttura si può realizzare l'ambizioso programma di avere unicamente forze e sforzi assiali agenti sulle sezioni, con l'ottimizzazione dell'utilizzo delle sezioni resistenti e la conseguente minimizzazione delle deformazioni.

Questo obiettivo, come è ben noto, è raggiungibile negli archi, purtroppo per una sola determinata condizione di carico, se si attegge l'asse dell'arco secondo la funicolare rovescia che corrisponde a tale condizione di carico, e in maniera sorprendentemente efficace nelle strutture di rivoluzione, entro alle quali i meridiani possono essere funicolari diritte o rovesce per qualsiasi condizione di carico diffuso, in virtù dell'azione di cintura realizzata dai paralleli, i quali lasciano ai meridiani proprio quella parte di carico per cui essi sono funicolare.

Il secondo criterio riguarda l'assunzione di schemi statici anche altamente iperstatici, e come tali sensibili invero alle azioni di natura geometrica, in primis alle distorsioni fondazionali ed alle distorsioni termiche, ma in grado di fruire dei benefici connessi alla possibile redistribuzione delle sollecitazioni interne entro alla struttura, dalle zone più sollecitate a quelle meno sollecitate, in virtù delle plasticità. In tal modo, il cosiddetto guadagno plastico non riguarda solo le sezioni strutturali, per le quali sono comunque da raggiungere rendimenti sezionali ben maggiori del valore  $1/3$  relativo alle sezioni rettangolari (ad esempio, per le sezioni a cassone o a doppio T, valori dell'ordine di  $0,5$  o qualcosa di più, se in calcestruzzo, e valori anche superiori ai  $2/3$ , se in acciaio), ma tale guadagno interessa l'intera struttura in dipendenza del suo schema iperstatico, sempreché il materiale abbia ovviamente una sufficiente duttilità.

Al riguardo è emblematico il caso delle travate GERBER ottenute da travate continue isostatiche con l'introduzione di opportune cerniere (le cosiddette selle GERBER) tali da rendere isostatica la travata. Si ottiene invero il vantaggio di rendere la struttura insensibile, ad esempio, ai cedimenti fondazionali (il che era un tempo di grande interesse per le costruzioni in zone paludose con terreni molto e impensatamente cedevoli), ma si va a penalizzare enormemente la funzionalità statica della struttura in quanto i diagrammi dei momenti flettenti sono sempre costretti a passare per le sezioni ove sono poste le cerniere, senza alcuna possibilità di redistribuzione: in tal modo, la duttilità del materiale può giocare solo sul guadagno plastico sezionale, che, per le sezioni ben studiate, è poca cosa in confronto all'adattamento plastico strutturale.

Poiché attualmente si ha la possibilità di realizzare opere fondazionali che garantiscono la pratica assenza di cedimenti, mentre almeno per le strutture all'interno di una determinata volumetria gli sbalzi termici sono praticamente assenti, l'interesse di avere schemi isostatici è in sostanza decaduto, a tutto vantaggio, come si è detto, della funzionalità statica della struttura. Peraltro laddove si dovesse proprio conteggiare le distorsioni termiche, i mezzi di analisi attualmente a disposizione consentono di valutarne gli effetti in maniera attendibile, ciò anche nel caso di un comportamento elasto-viscoso del materiale, come avviene per il calcestruzzo.

Questa ultima parte del discorso, fa capire bene come agli strutturisti si richieda un impegno concreto nel momento della progettazione per potere ottenere strutture soddisfacenti ai diversi aspetti che insieme formano l'essenza della sostenibilità.