

L'influenza dell'ambiente, dell'economia e della sicurezza nella progettazione delle strutture

Franco ANGOTTI

Il tema che il titolo evoca può apparire generico perché è evidente che poco o nulla resta nel progetto delle opere, oltre ambiente, economia e sicurezza, se non la maestria, la perizia e la preparazione del progettista oggi sempre più carico di responsabilità come cercherò di sottolineare nel seguito. L'economia è sempre alla base di tutte le scelte e strategie di sviluppo e gli aspetti economici sono tradizionalmente presenti nella testa dell'ingegnere il quale è tuttavia ben consapevole che egli deve comunque fare i conti, e con molta attenzione, con gli imprescindibili requisiti di sicurezza che da un po' di tempo ha anche imparato ad estendere alla durata di vita dell'opera ossia agli aspetti della durabilità.

Il tema dell'influenza dell'ambiente nella progettazione delle strutture può apparire una novità, anche se sotto l'aspetto strettamente tecnico è da molto tempo che nell'ingegneria strutturale si parla di interazione ambiente-struttura. Aspetto questo che è da intendersi in senso unidirezionale ossia l'effetto dell'ambiente sulla struttura ed in questa accezione l'interazione vuol dire valutare le azioni, tipicamente vento, variazioni termiche, sisma, degrado, ecc., alle quali la struttura è chiamata a resistere con adeguata sicurezza.

Ma non è di questo che si intende parlare, né della valutazione dell'impatto ambientale di un'opera, la cosiddetta VIA, ma piuttosto delle conseguenze sull'ambiente che l'opera da costruire può produrre e nella valutazione della sostenibilità di queste conseguenze.

Ma cerchiamo di mettere ordine e di precisare meglio.

Intanto osserviamo che il tema è di grande attualità, si registrano molte iniziative, intere riviste sono dedicate alla questione ambientale, i congressi si susseguono con una notevole intensità. Nel settore delle costruzioni l'argomento ha acquistato una certa urgenza e cercheremo di spiegarne i motivi.

Proprio in questi giorni si sta svolgendo a Milano una conferenza CEN, presso UNI, sulle nuove sfide che l'uso sostenibile delle risorse naturali pone alla normazione nel settore delle costruzioni in relazione anche al futuro Regolamento comunitario.

È abbastanza evidente inoltre che i 3 aspetti, ambiente, economia e sicurezza sono strettamente collegati, non facilmente separabili e tuttavia uno solo di essi costituisce la vera novità di questi ultimi anni e che ancora fa fatica a conquistare, nella mentalità del progettista e ancor di più del Committente, il ruolo preminente oggi reso urgente.

Tradizionalmente la parola d'ordine del progettista è stata "sicurezza" a questa si è aggiunta, da non molti anni, la parola d'ordine "durabilità", oggi la parola d'ordine deve essere "ambiente", tenendo presente però che già da qualche decennio, esattamente dalla fine del 1987 (rapporto di Brundtland) l'attenzione si è spostata dalla *protezione dell'ambiente* allo *sviluppo sostenibile*, ossia a nuovi modelli di sviluppo economico.

Infatti il termine *sviluppo sostenibile* coniuga le aspettative di benessere e di crescita economica con il rispetto dell'ambiente e la tutela delle risorse naturali.

Ma vediamo quali sono stati i passaggi fondamentali di questa evoluzione.

Diceva Theodor Von Karman: "Gli scienziati scoprono il mondo che esiste, gli ingegneri creano il mondo che non c'è mai stato". Egli focalizzava così l'attenzione su un aspetto rilevante dell'attività dell'ingegnere che storicamente lo ha messo al centro dello sviluppo.

Su questo ruolo centrale del Tecnico (ingegnere) penso ci possa essere un'ampia condivisione, senza la necessità di richiamare i grandiosi contributi dati dalla Tecnica in favore del genere umano. Ad un certo punto di questa storia però è successo qualcosa che ne ha messo in discussione il ruolo.

Hanno cominciato ad affacciarsi ed a farsi strada più cruciali considerazioni che piano piano hanno finito col prendere il sopravvento.

Ad un certo punto della storia si è capito che lo sviluppo non era più un valore di per sé positivo, ma ha cominciato a trovare restrizioni a causa di una vera e propria esplosione di quella che possiamo definire la potenza della tecnica.

Ma come mai siamo giunti a questa svolta?

LO SVILUPPO SOSTENIBILE

Pozzati e Palmeri nel libro "Verso la cultura della responsabilità, ambientale, tecnica, etica" [1] conducono un'interessante analisi di questa evoluzione.

Osservano che "con l'irrompere a metà del 900 della potenza della tecnica e con il successivo verificarsi di imprese arrischiate sino all'estremo (ne offrono chiari esempi le vicende della fisica nucleare, dell'ingegneria genetica e di alcuni incidenti ambientali) si è via via consolidata la coscienza dei pericoli e delle necessarie tutele". Questo processo ha determinato una evoluzione dei rapporti dell'uomo con l'ambiente, contrassegnata da alcune svolte fondamentali, l'ultima delle quali, quella dei grandi rischi e dei rischi ambientali ha fatto dire al sociologo tedesco Ulrich

Beck [2] che, a partire dagli anni 70, “i conflitti sociali di una società distributrice di ricchezza iniziano ad intersecarsi con quelli di una società distributrice di rischi”.

I passaggi fondamentali che hanno segnato l'avvio dell'attenzione alla questione ambientale ed al parallelo sviluppo delle strategie per la sostenibilità sono stati molteplici, sintetizzati in questa figura, tratta dal documento "The Eurocodes and the Construction industry - Medium-term strategy - 2008 – 2013", gennaio 2009, elaborato dal TC250 (Jean-Armand Calgaro) [3] sono mostrati gli eventi chiave internazionali che hanno determinato le strategie politiche e le decisioni per la sostenibilità, l'evoluzione di concetti ed idee ed il graduale coinvolgimento dei vari portatori di interessi.

Fra gli eventi riportati nella Fig. 1 il più importante è certamente il Protocollo di Kyoto. In base a questo protocollo 24 paesi industrializzati e 14 paesi ad economia in transizione si impegnano a conseguire gradualmente, nel periodo 2008-2012, una riduzione di almeno il 5,2% rispetto al livello emesso nel 1990, delle loro emissioni complessive di CO₂. L'impegno è diverso per i diversi paesi. Come è noto la ratifica definitiva del protocollo è avvenuta il 16 febbraio 2005 con la firma della Federazione Russa del novembre 2004.

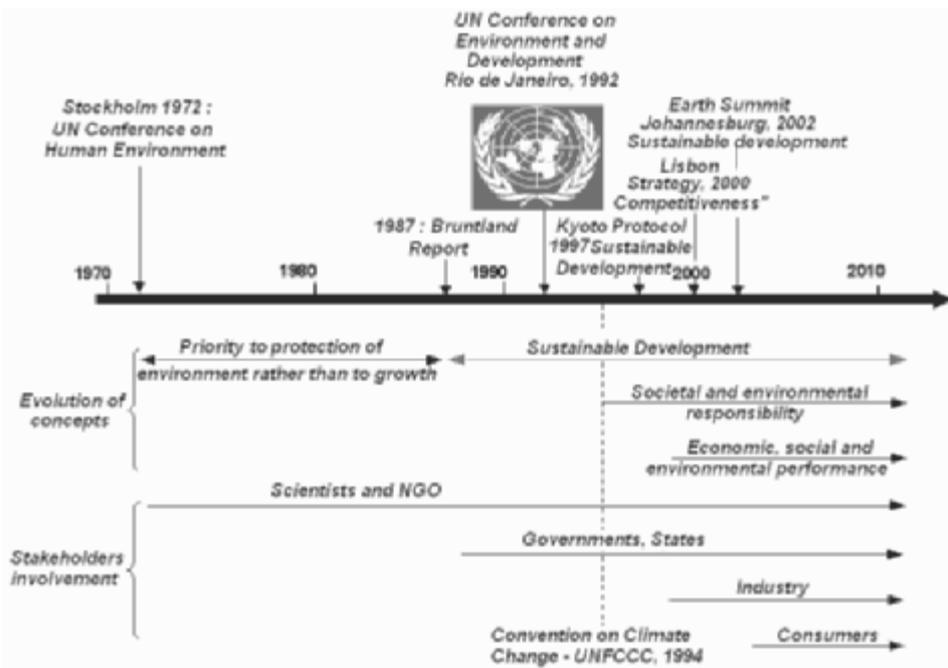


Fig. 1 - Eventi internazionali - strategie politiche e decisioni sulla sostenibilità.

L'impegno per l'Italia è quello di ridurre, rispetto al 1990, del 6,7% le emissioni di gas serra entro il 2010. Nel frattempo però le emissioni nel periodo 1990-2003 sono aumentate dell'11%.

Per tutta l'Europa gli impegni sono molto stringenti ed è urgente prender provvedimenti. Da qui nasce la crescente attenzione al tema.

Il TC 250 è interessato ad elaborare una strategia, resa ormai impellente proprio dalle imminenti scadenze, per ottenere i relativi mandati dalla Commissione UE. È quindi evidente che il mondo degli eurocodici si sta muovendo in senso operativo verso una generazione di eurocodici, su spe-

cifici argomenti, legati alla evoluzione della questione ambientale.

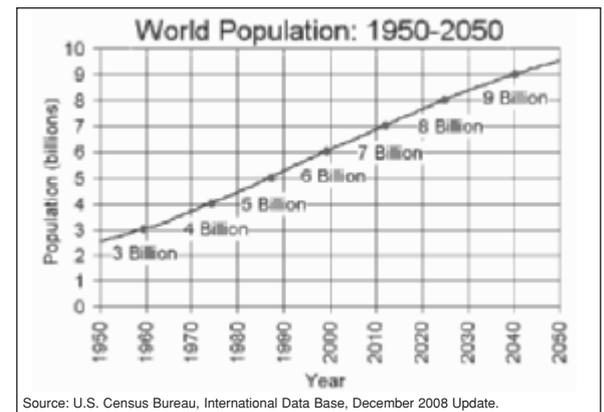
Ricordiamo subito che il nuovo draft della Direttiva sui Prodotti da Costruzione ai 6 ben noti requisiti essenziali

1. Resistenza meccanica e stabilità (TC250)
2. Sicurezza in caso di incendio (TC250)
3. Igiene, salute ed ambiente
4. Sicurezza nell'uso (TC250)
5. Protezione contro il rumore
6. Risparmio energetico e isolamento termico

ne ha aggiunto un 7°:
7. Uso sostenibile delle risorse naturali (TC250)

Kumar Metha [4] sostiene che il danno ambientale subito dal nostro pianeta è strettamente legato a tre fattori: popolazione, industrializzazione ed urbanizzazione e sfruttamento delle risorse naturali.

Su crescita della popolazione e sul processo di urbanizzazione che la accompagna le previsioni sono piuttosto pessimistiche come si vede dai dati riportati nelle seguenti Fig. 2-a e 2-b.



Source: U.S. Census Bureau, International Data Base, December 2008 Update.

Fig. 2a - Previsioni di crescita della popolazione.

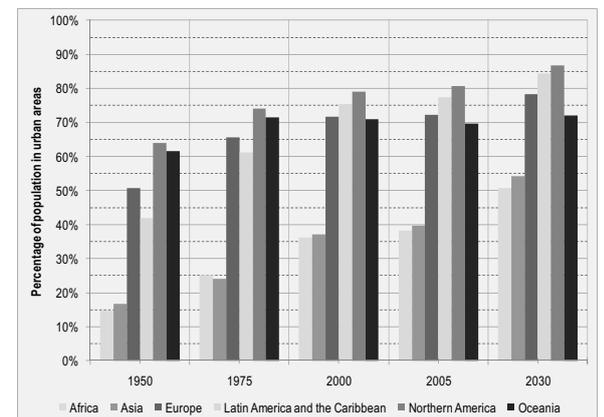


Fig. 2 b - Processo di urbanizzazione - Source: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2005 Revision.

Dal 1950 a oggi gli abitanti delle città sono cresciuti di quattro volte e nel 2030 raggiungeranno i 5 miliardi. L'aumento maggiore avverrà in Asia e Africa. L'urbanizzazione più forte sta avvenendo in Cina, dove ogni anno 18 milioni di persone si stabiliscono in città.

Pertanto per rendere minimo il danno ambientale provocato dallo sviluppo socio-economico non resta che agire sullo sfruttamento delle risorse naturali, attraverso il loro massimo risparmio.

Come conseguenza di tutto ciò cominciamo tutti a renderci conto, l'industria delle costruzioni per prima, che il problema della limitazione nell'uso delle risorse è divenuto un problema strategico di sviluppo.

Si inizia così a parlare di **sostenibilità** e di **costruzione sostenibile**.

Assistiamo all'ingresso dell'ambiente nell'industria delle costruzioni e ciò si porta dietro inevitabilmente economia e sicurezza.

Anticipando un po' la conclusione, vedremo che questa attenzione all'ambiente porta, come risvolto positivo, a rivolgere l'attenzione verso l'innovazione delle tecniche e della tecnologia nella produzione ad iniziare da quella del calcestruzzo.

ASPETTI AMBIENTALI LEGATI AI MATERIALI

Trattando di costruzioni in calcestruzzo il primo aspetto da esaminare è quello ambientale legato ai materiali componenti il calcestruzzo: cemento, acqua ed aggregati.

La domanda da farsi è se e quanto inquina l'industria delle costruzioni in calcestruzzo ad iniziare dalla produzione di cemento.

Inoltre occorre chiedersi se abbia senso porsi il problema della riduzione dell'inquinamento in questo settore.

La risposta è nella Prefazione di Koji Sakai al Bollettino n. 47 della *fib* "Environmental design of concrete structures – general principles" (agosto 2008) [5] dove si legge:

"Sebbene sia uno dei più importanti materiali nel settore delle costruzioni, il calcestruzzo produce un impatto ambientale negativo". Tuttavia, prosegue la prefazione, poiché il calcestruzzo non può essere rimpiazzato da altri materiali è necessario continuare a produrlo ed utilizzarlo. È pertanto necessario sfruttare ogni mezzo per ridurre questo impatto.

Questa affermazione, in perfetto stile giapponese come il suo autore, è il segnale che il problema va affrontato e che l'industria delle costruzioni deve farsene carico, come del resto ha già da tempo iniziato a fare.

Anche la *fib*, a partire dal 2002, ha dedicato al tema ben 5 bollettini tutti strettamente legati alla questione ambientale.

Il problema è quindi all'attenzione e se osserviamo alcuni dati ci rendiamo facilmente conto della sua portata.

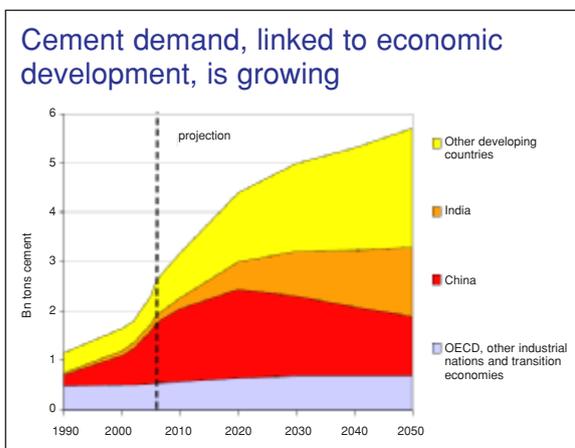


Fig. 3 - Richiesta di cemento nei vari paesi.
The European Cement Association (May 2006). Activity report 2006, dal sito Cem-bureau.

| | Asia | Oceania | Europa | Ex URSS | America | Africa | Totale |
|------|-------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|
| 2002 | 1.060 | 11 | 270 | 65 | 215 | 75 | 1.696 |
| 2020 | 1.317 | 13 | 290 | 154 | 259 | 99 | 2.132 |

Tabella 1 – Consumo di cemento nel 2002 e stima nel 2020, in milioni di tonnellate (da: Japan Cement Association 2003)

CEMENTO

Il primo dato da esaminare è la produzione di cemento.

Nella Fig. 3 è riportata la crescita nella produzione mondiale di cemento con una previsione fino al 2050 e nella Tab. 1 la crescita fino al 2020 distribuita fra le varie parti del mondo.

Secondo questa stima l'aumento più significativo si avrà in Asia e nella Russia con incrementi valutati nel 24% e nel 137%, mentre la produzione totale stimata per il 2020 è di 2,132 10⁹ di tonnellate di cemento.

Questo dato è importante da tener presente perché alla produzione di cemento si associa una rilevante emissione di CO₂. Secondo K. Humphreys and M. Mahasenan [8] le emissioni variano da 1 kg di CO₂ per kg di cemento degli USA a 0,77 kg di CO₂ per kg di cemento del Giappone.

L'Europa si colloca a 0,83 kg di CO₂ per kg di cemento.

Oggi il World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) valuta che l'industria del cemento emetta il 5% della quantità di anidride carbonica prodotta dall'uomo a livello mondiale.

In UK, che è un modesto consumatore di calcestruzzo rispetto alla popolazione ed alla sua economia (vedi Tab. 2), si stima che la produzione di calcestruzzo contribuisca per il 2,5% nell'emissione totale di CO₂. In Italia questo contributo supera il 5,8%.

| Germania | Italia | Spagna | Gran Bretagna |
|----------|--------|--------|---------------|
| 331 | 782 | 1268 | 239 |

Tabella 2 – Consumo di cemento in kg pro capite nel 2007 (dati Cem-bureau - maggio 2008)

L'emissione di CO₂ è dovuta a due fattori, il primo, diretto, discende dalla reazione chimica che porta alla formazione di ossido di calcio (CaO) dal carbonato di calcio (CaCO₃), il secondo, indiretto, è conseguente al consumo di energia per raggiungere la temperatura (circa 1.400 °C) necessaria alla produzione del clinker.

Come sostiene M. Collepari [6], in prospettiva futura, una riduzione di CO₂ dovuta alle emissioni dirette può essere realizzata producendo un clinker "belitico", ovvero più ricco di C₂S e quasi privo di C₃S con il duplice vantaggio di essere cotto ad una temperatura più bassa, con una percentuale minore di calcare nelle materie prime e pertanto minore emissione di CO₂.

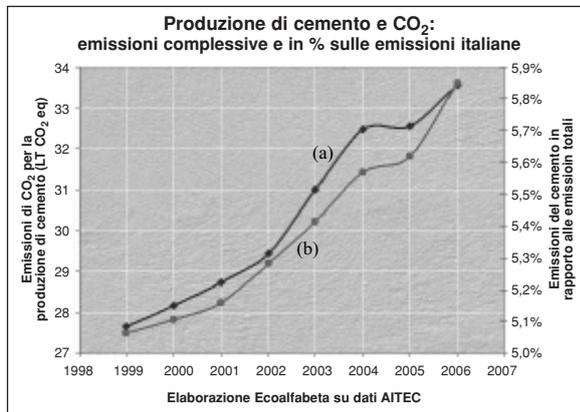


Fig. 4 - Produzione di cemento ed emissioni di CO₂.
(a) Emissioni di CO₂ per la produzione di cemento (10⁶ tonnellate)
(b) Emissioni nella produzione di cemento in rapporto alle emissioni totali.

Mentre va osservato che l'uso di prodotti riciclati quali farine animali, rifiuti solidi, rottami di copertoni per autovetture, ecc. come combustibili, in luogo di combustibili fossili porta certamente ad un ciclo industriale integrato, virtuoso, nel quale i sottoprodotti o gli scarti di un'industria diventano un prezioso input per un'altra, ma non ha alcuna influenza sul carico di CO₂ emessa con i fumi della combustione.

Occorre poi riconoscere che nel processo produttivo del calcestruzzo, dalla cava alla centrale di betonaggio, la fase in cui si sono fatti gli interventi più importanti ed efficaci in favore di uno sviluppo sostenibile è stata la macinazione del clinker con l'aggiunta di altri materiali quali ad esempio la **cenere volante**, sottoprodotto della combustione di carbone polverizzato nelle centrali termoelettriche, la **loppa d'altoforno** proveniente dal raffreddamento rapido in acqua della scoria d'alto forno per la produzione d'acciaio ed il **fumo di silice**, scarto nella produzione del silicio e di leghe metalliche di ferro-silicio.

Questi materiali hanno un comportamento pozzolanico e pertanto prendono parte alla reazione di idratazione del cemento. In questo modo si ottiene un vantaggio multiplo, infatti non solo si riduce la quantità di CO₂ emessa durante la cottura di argilla e calcare e si riduce il consumo di materie prime, ma vengono riutilizzati materiali di scarto di altri processi industriali altrimenti destinati ad aumentare l'inquinamento ambientale.

Naturalmente, con queste varianti, il calcestruz-

zo, da unico materiale, si trasforma in una famiglia di materiali.

Vi è infatti un gran numero di permutazioni che possono essere giocate fra i vari componenti e questo significa che il calcestruzzo può e deve essere progettato a seconda delle applicazioni previste.

Quindi non solo progetto della struttura come tradizionalmente siamo abituati a fare ma, in un tutt'uno, progetto del materiale per quella specifica struttura.

Allargando ulteriormente lo sguardo all'efficienza energetica complessiva nella costruzione degli edifici è poi evidente che il progettista deve utilizzare tutte le proprietà peculiari e specifiche del calcestruzzo: resistenza meccanica, inerzia termica, isolamento acustico, flessibilità delle forme, per ottenere una costruzione sempre più sostenibile.

In questo modo possiamo tenere insieme i due pilastri su cui si basa un'attenta politica ambientale:

- Riduzione dell'impatto ambientale nella produzione del cemento e nell'emissione di CO₂
- Ottimizzazione dell'uso delle risorse naturali, ovvero massimo risparmio delle materie prime e delle risorse energetiche.

L'aspetto, certamente vantaggioso, dell'inerzia termica del calcestruzzo non è sempre tenuto presente e nella dovuta considerazione quando si valuta il risparmio energetico nell'industria delle costruzioni.

NUOVO MODEL CODE

È questa l'impostazione che caratterizza il Nuovo Model Code (di prossima uscita) a cui sta lavorando un Gruppo della *fib* coordinato da Walraven: una progettazione di struttura e materiale insieme, come sopra ricordato.

Nel passato il calcolo strutturale si è unicamente basato sulla resistenza. Ora forse la resistenza passa quasi in secondo ordine perché dobbiamo studiare ad esempio un calcestruzzo che abbia una buona sicurezza al fuoco o, in certe condizioni, dobbiamo progettare un calcestruzzo che abbia una grande resistenza contro gli attacchi di solfati. Ora che un grande sviluppo tecnologico è stato raggiunto siamo in grado di progettare calcestruzzi speciali, tutti i tipi di calcestruzzi speciali, e quindi anche il "green concrete" il calcestruzzo verde ossia un calcestruzzo con molto meno cemento, utilizzando scorie d'alto forno, fly ash, silice fume, come sopra accennato, con una composizione totalmente differente da quella tradizionale che ha il vantaggio di ridurre le emissioni di CO₂.

Il Nuovo Model Code apre una porta, importante e moderna, a questo tipo di sviluppo.

Ma il Nuovo Model Code coglie un altro importante aspetto che si lega al contenuto di questa relazione e cioè che esso è basato sul concetto di **ciclo di vita**. Questo concetto introduce la variabile tempo nella progettazione ben oltre l'aspetto della durabilità.

In altri termini, non basta più progettare una struttura pensando di avere esaurito il compito al momento della sua realizzazione. È importante seguire la struttura nel tempo prevedendo quando ripararla ed anche quando demolirla e in questo secondo caso cosa farne del materiale di risulta.

La manutenzione diviene quindi un elemento fondamentale di sostenibilità ambientale.

Ma che cos'è una costruzione sostenibile?

È questo il concetto che ora brevemente viene illustrato.

COSTRUZIONE SOSTENIBILE

Premessa

Abbiamo già più volte sottolineato che l'industria delle costruzioni può giocare un ruolo importante per lo sviluppo sostenibile.

Occorre naturalmente tenere presente che le strutture dell'ingegneria civile, ai fini della sostenibilità, non vanno considerate alla stregua di prodotti di massa sia perché esse hanno una lunga durata sia perché hanno un ben evidente profilo di pubblica utilità.

Occorre però anche rendersi conto che il settore delle costruzioni rappresenta una delle più grandi industrie di tutto il mondo e che esso esercita, come abbiamo già osservato, un impatto pesante sull'ambiente globale poiché le costruzioni sono il principale consumatore di territorio e di materie prime ed il funzionamento degli edifici implica un consumo di energia molto elevato.

Il tradizionale progetto e l'approccio nella valutazione economica di strutture si è basato su tre fattori fondamentali: qualità, costo e tempo.

Tuttavia, secondo l'Agenda 21 (Protocollo di Kyoto), nel progetto, nella costruzione, nell'uso e nella fase successiva al ciclo di vita, dovrebbero essere presi in conto i 3 principali pilastri della sostenibilità, cioè

1. esiti ambientali
2. vincoli economici
3. aspetti socio culturali

Avremo realizzato una costruzione sostenibile quando saranno stati messi in debito conto i seguenti fattori:

1. uso di materiali amici dell'ambiente
2. efficienza energetica e minimizzazione nel consumo di risorse
3. costruzione prima e successiva gestione del materiale di demolizione poi.

I materiali da costruzione producono, in diversa misura, un impatto ambientale in ogni stadio del ciclo di vita della struttura, come l'estrazione delle materie prime, il processo di lavorazione, la distribuzione, e la messa in opera.

Per ridurre questi impatti, la prima cosa da fare è quella di minimizzare la quantità di materiali non riciclati e di evitare sovradimensionamenti.

Ma è altresì evidente che la scelta dei materiali, la concezione della struttura, la costruzione, la

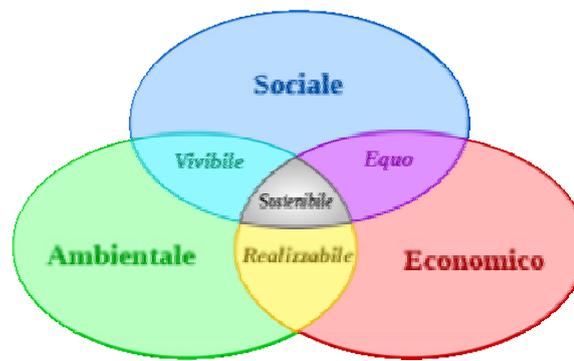


Fig. 5 - I 3 pilastri della sostenibilità.

manutenzione e la demolizione, incluso il riciclaggio, devono essere stabiliti avendo in mente l'obiettivo di minimizzare l'uso di risorse e di energia, di ridurre le emissioni di gas serra e di altre sostanze rischiose e di controllare la costruzione ed i materiali che si recuperano dalla demolizione.

Il calcestruzzo è una miscela di cemento, acqua ed aggregati. Abbiamo già sottolineato come la produzione di cemento consumi molta energia ed emetta una grande quantità di CO₂, ma anche l'estrazione degli aggregati produce distruzione di ambiente naturale in quanto implica uso del territorio, perdita di eco sistemi, perdita di paesaggio, ecc. Da qui l'interesse ad utilizzare i sottoprodotti industriali e materiali provenienti da demolizioni. Tutto ciò significa costruire con calcestruzzo verde, affidando così a questo materiale un importante ruolo per la costruzione sostenibile.

È stata coniata la nuova parola *environmentality* dalla fusione di: *environment* e *mentality* ossia ambiente e mentalità a sottolineare che nella progettazione strutturale il progettista deve acquisire una mentalità ambientalista.

Per valutare la sostenibilità al fine di ottenere vantaggi in termini di prestazioni ambientali, occorre fissare obiettivi ed indicare in che modo si possano raggiungere.

Gli obiettivi naturalmente sono: le risorse, l'energia e le emissioni ed i mezzi stanno nelle parole: riduzione, riuso e riciclo.

I requisiti delle prestazioni ambientali possono riferirsi a scelta dei materiali, metodi costruttivi, procedure di manutenzione, procedure di riciclo, quantità di consumo di energia, limiti di emissione di CO₂, inquinamento dell'acqua, contaminazione del suolo, emissioni di polvere, rumore, vibrazioni, sostanze chimiche, ecc.

Ma qualunque giudizio sulla sostenibilità di una struttura non può prescindere dal costo riferito al suo intero ciclo di vita.

Tuttavia, gli aspetti economici, in tutti i documenti che trattano il problema della sostenibilità, compreso il Report *fib* n. 47 [5], già citato, non sono trattati come un requisito prestazionale poiché essi dovrebbero rappresentare il requisito più importante da tenere presente in un primo stadio e perché essi possono cambiare in dipendenza di altri fattori legati alla particolare destinazione della costruzione.

A questo punto però occorre stabilire a chi spetta fissare i requisiti delle prestazioni ambientali di un'opera anche perché solo così sarà possibile verificare se essi sono stati rispettati.

Ma chi decide può evidentemente muoversi sulla base di leggi, di accordi internazionali oppure su particolari intenzioni del Committente.

Il Ruolo del Committente

È del tutto evidente che spetta al Committente definire il progetto nelle sue dimensioni globali ivi compreso gli aspetti ambientali. Se egli non ha tale sensibilità o un tale obbligo, la probabilità che siano gli altri soggetti coinvolti nel processo costruttivo a farli propri è evidentemente molto bassa.

Il Committente potrebbe avere più motivazioni, come:

- Soddisfare regolamenti e regole esistenti.
- Ottenere benefici economici a breve od a lungo termine.
- Ottenere prestazioni ambientali migliori, al di là delle regole e dei regolamenti e dei vantaggi economici, guidato da una vocazione ideale verso una costruzione sostenibile, oppure per migliorare la sua immagine (marketing).

Non è da escludere che soluzioni rispettose dell'ambiente possono aumentare i costi di investimento ma parimenti possono fornire economie in una visione di prospettiva nel ciclo di vita.

È importante comunque che il Committente senta la responsabilità di fare almeno una valutazione dei benefici ambientali insieme a quelli economici nella prospettiva dell'intero ciclo di vita della costruzione.

Avendo in mente il raggiungimento di determinati obiettivi ambientali il Committente:

- dovrebbe prevedere o fissare la percentuale di riutilizzo, di riciclo e/o di utilizzazione di materiali riciclati sia nel caso di demolizione e ricostruzione sia di riparazione.

È evidente che il riutilizzo rappresenta una soluzione più rispettosa dell'ambiente in quanto riduce il trasporto, i materiali di risulta e l'uso di materie prime.

Ma occorre prestare molta attenzione ai rischi che si corrono nel riutilizzo di materiali riciclati, se non se ne verificano prima le proprietà fisico chimiche. Questa verifica è semplificata se viene pianificata prima di qualunque riutilizzo o riciclo.

Qui si aprirebbe l'importante capitolo della bonifica dei suoli.

- dovrebbe valutare quale può essere il massimo volume di materiale di risulta da mandare a discarica ed in che misura prevede di utilizzare sottoprodotti. Ne potrebbe derivare una riduzione di impatto ambientale risparmiando materie prime e riducendo consumo di energia e l'uso di territorio per il trattamento dei rifiuti.

– dovrebbe valutare il ciclo di vita (LCA) dei materiali utilizzati e privilegiare scelte alternative che allungano la durata del ciclo.

La valutazione del ciclo di vita (LCA) è lo strumento più pratico per valutare l'impatto ambientale

di una struttura durante il suo totale ciclo di vita, dalla materia prima al termine della sua utilizzazione.

– dovrebbe valutare e documentare le emissioni nell'aria, nell'acqua e nel suolo allo scopo di prevenire l'emissione di materiale tossico durante l'intera vita della struttura.

– valutare il rumore, le vibrazioni e le emissioni di polvere durante l'esecuzione dei lavori. Questa valutazione è particolarmente importante nel caso di frantumazione e riciclo in situ.

Naturalmente quando si passa dal progetto all'esecuzione è necessario mettere a punto un sistema di gestione ambientale per assicurare il raggiungimento degli obiettivi fissati nel progetto. Si profila così la nascita di una nuova figura professionale con un ruolo importante nel processo costruttivo.

Non sarà sfuggito che negli obiettivi ambientali via via citati vi sono aspetti a diversa scala:

– **scala globale** (riscaldamento del pianeta, uso delle risorse ecc), **scala regionale** (rifiuti a discarica) e **scala locale** (rumori, vibrazioni, polvere ecc.). Tutti vanno tenuti in debita considerazione.

Giungiamo così alla progettazione ambientale.

LA PROGETTAZIONE AMBIENTALE

Abbiamo già osservato che la progettazione corrente delle strutture in c.a. è principalmente focalizzata sugli aspetti della resistenza e stabilità e da non molto della durabilità, mentre si deve constatare che è totalmente assente il punto di vista ambientale.

È ben noto che nel progetto strutturale la resistenza e la stabilità (sicurezza strutturale) sono verificate da relazioni del tipo

$$S_d \leq R_d,$$

dove S_d è la sollecitazione (effetto delle azioni) di progetto e R_d la corrispondente resistenza di progetto, mentre la verifica della durabilità è eseguita mettendo a confronto un determinato processo di degrado con un suo valore limite prestazionale.

Il progetto della vita di servizio è eseguito considerando la vita di servizio richiesta alla struttura, il piano di manutenzione e di gestione, le condizioni ambientali e la durabilità ed infine l'efficienza economica ritenuta accettabile.

Porsi come obiettivo la riduzione dell'impatto ambientale nel suo aspetto globale e la razionalizzazione nell'uso delle risorse può considerarsi un'operazione concettualmente identica a quella relativa al progetto della resistenza meccanica e stabilità e della durabilità anche se le grandezze a base di queste due verifiche si riferiscono a caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche completamente differenti.

Infatti, mentre il raggiungimento di una condizione di collasso è la situazione limite della resistenza, per la durabilità può essere, ad esempio, il limite di concentrazione di ione cloro la condizione limite perché non si manifesti la corrosione nelle armature,

oppure l'entità del ricoprimento determinato dalla velocità con cui la carbonatazione progredisce all'interno del calcestruzzo verso la posizione dell'armatura.

Analogamente nel progetto ambientale di una struttura di calcestruzzo occorre scegliere degli indici ai quali riferire la verifica e fissarne i valori limite. Con riferimento all'**ambiente globale** certamente un indice su cui oggi sono tutti concordi è la quantità di emissione di gas serra.

Abbiamo visto che l'Italia, aderendo al protocollo di Kyoto, si è impegnata a ridurre del 6,7% rispetto al 1990, le emissioni di gas serra entro il 2010.

Ma se la verifica è condotta con riferimento all'**ambiente locale**, è noto ad es. che i limiti per il rumore e per l'emissione di sostanze tossiche (nell'aria, nell'acqua o nel suolo) sono fissate da leggi perché legate alla salvaguardia della salute. Anche se i valori di questi indici possono essere discutibili.

Comunque in generale questi limiti possono essere posti dal committente, per legge, dal progettista o da altri soggetti.

Anche se a tutt'oggi non vi sono specifiche da rispettare, né si sono definiti esattamente gli indici ambientali da prendere in considerazione, è tuttavia ugualmente importante mettere a punto una metodologia di progettazione che incorpori questi aspetti.

In altri termini, si può già fin da ora impostare una progettazione strutturale che metta come obiettivo ad es. la riduzione delle emissioni di CO₂.

Naturalmente la stessa cosa può essere fatta con riferimento ad altri indici ambientali.

Nella progettazione così concepita, per migliorare la durabilità e per ridurre la quantità di materiale utilizzato, posso decidere ad es. di impiegare calcestruzzi di elevate prestazioni invece di quelli tradizionali, senza con ciò compromettere naturalmente le prestazioni in termini di Stati Limite Ultimi (SLU) e di Esercizio (SLE) e le prestazioni ambientali.

Ma è evidente che posso altresì indirizzare la progettazione verso un'altra scelta e cioè verso l'impiego di un calcestruzzo ordinario, tradizionale, con l'uso di sottoprodotti industriali. Anche con questa seconda scelta posso soddisfare SLU, SLE, durabilità e prestazioni ambientali.

Sebbene questi due approcci progettuali soddisfino tutte le prestazioni richieste comprese quelle ambientali, essi differiscono completamente dalla progettazione convenzionale in quanto nel progetto è incorporato, per così dire, l'ambiente. Così il "*progetto ambientale*" può essere utilizzato come un termine per indicare una nuova concezione del progetto che include appunto il progetto che soddisfa i requisiti imposti dalle prestazioni ambientali.

Riassumendo il progetto ambientale si può sviluppare nelle seguenti fasi:

1. Input dal Committente
2. Scelta dei requisiti prestazionali
3. Valori degli indici prestazionali: resistenza e stabilità - durabilità - indici ambientali
4. Scelta dei materiali, della forma e delle dimen-

sioni della struttura, delle modalità di esecuzione, del piano di manutenzione e del piano di riciclo.

5. Verifiche delle prestazioni strutturali, di durabilità ed ambientali.

Una volta completato il progetto ambientale si passa all'esecuzione, al controllo e quindi al servizio.

È estremamente importante conservare memoria di tutte le fasi per la comprensione dell'intero progetto e per eseguire la successiva manutenzione. È necessario quindi predisporre una sorta di *certificato di nascita* dell'opera.

Sul termine *prestazione ambientale*, Koji Sakai [7] dice:

"se un'automobile percorre 20 km/litro possiamo dire che essa ha una prestazione ambientale eccellente, ossia che è amica dell'ambiente".

Allo stesso modo, se la produzione di un certo materiale ha una emissione di CO₂ bassa, possiamo classificare questo materiale fra quelli ad alte prestazioni ambientali. Fra i materiali che contengono sostanze tossiche, quelli a basso contenuto delle medesime sostanze saranno classificati come materiali ad alte prestazioni ambientali. Si può anche dire che una macchina silenziosa o un utilizzo di territorio pianificato in maniera razionale, a basso impatto sulla biodiversità, sono classificati come scelte di eccellenti prestazioni ambientali.

Si deve riconoscere che oggi non vi è una esperienza ed una competenza diffuse fra i progettisti in questa materia.

Ciò può suggerire di procedere in maniera olistica, spezzando cioè la progettazione nelle tre fasi:

Progettazione Strutturale, progettazione della durabilità e **progettazione ambientale**, anche se questa separazione è, per molti aspetti, alquanto arbitraria.

La **progettazione strutturale** è quella più esplorata e familiare e quindi non diciamo nulla.

PROGETTAZIONE DELLA DURABILITÀ

Sulla **progettazione della durabilità** vorrei ricordare che il problema è all'attenzione ormai da molti anni.

Si è registrata una sempre maggiore attenzione al problema dai nostri DM, ad iniziare dal DM 26 marzo 1980, fino al DM 9 gennaio 1996.

Tuttavia è col DM 14 gennaio 2008 che la durabilità viene messa al centro della progettazione strutturale, quale principio fondamentale (Paragrafo 2.1 "Principi fondamentali").

Vorrei poi ricordare il contributo della Commissione Norme del CNR che, sotto la Presidenza di Pozzati, nella seconda metà degli anni 90, coordinò il Progetto Strategico "Sicurezza e qualità nelle costruzioni civili e meccaniche" per la parte riferita alla durabilità delle costruzioni in c.a. e c.a.p..

Sulla durabilità va naturalmente ricordato il più recente contributo AICAP con la pubblicazione del bel volume di Pietro Pedferri, recentemente scomparso, su "*La corrosione nel calcestruzzo, fenomenologia, prevenzione, diagnosi, rimedi*".

Inoltre l'AICAP si è fatta promotrice di 2 progetti di ricerca su

1. "Utilizzo della cenere volante per il miglioramento della durabilità delle strutture in c.a. e c.a.p. e per un progresso sostenibile"

2. "Vita residua delle strutture in calcestruzzo armato danneggiate dalla corrosione"

ESEMPI DI PROGETTAZIONE AMBIENTALE

Vorrei ora avviarmi alla conclusione, illustrando brevemente 2 esempi di progettazione ambientale ripresi dal Bollettino *fib* N. 47 [5], che mi paiono particolarmente interessanti per la metodologia utilizzata.

ESEMPIO 1 - Viadotto a telaio in c.a.

Si tratta di un sovrappasso ferroviario in un'area residenziale urbana realizzato con una struttura a telaio in c.a.

Il viadotto è a 4 campate di 15,00 m ciascuna per una lunghezza totale 60,00 m (Fig. 6 a).

Soluzione classica

La soluzione classica prevede una trave di collegamento fra i pali di fondazione e le colonne come nella figura (Fig. 6 b)

Questa trave di fondazione ha la funzione di assorbire le differenze nella capacità portante dei 2 pali e ad assicurare le richieste prestazioni sismiche.

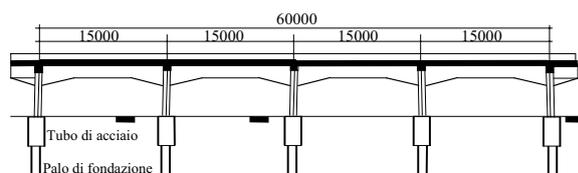
Requisiti prestazionali ambientali:

Emissioni di CO₂: riduzione del 20%

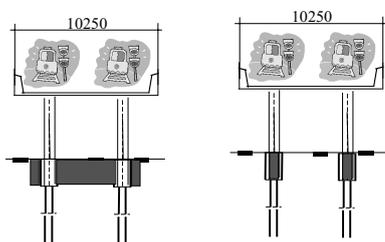
Limitazioni di rumore, vibrazioni e di polvere a certi valori prefissati

Soluzione alternativa:

Per soddisfare i requisiti ambientali è stata studiata la soluzione alternativa - senza trave di collegamento - che assicura le prestazioni sismiche, incrementando la capacità portante dei pali di fondazione e rinforzando le unioni tra pali e pile con tubi di acciaio, come indicato nella Fig. 6 c.



(a) - Sezione longitudinale (senza trave di collegamento in fondazione)



(b) - Sezione trasversale (senza trave di fondazione)
(c) - Sezione trasversale (con trave di fondazione)

Fig. 6 - Viadotto ferroviario a telaio in c.a.

Per entrambe le soluzioni sono state valutate le emissioni di CO₂ dovute ai materiali, al trasporto e all'esecuzione, riferite a ciascun elemento costruttivo del ponte: travi e pali di fondazione, impalcature, pile, travi di implacato, solette, ecc.

Le emissioni di CO₂ con le travi di collegamento delle teste dei pali di fondazione sono state valutate in 450 t, mentre quelle senza le suddette travi sono state valutate in 320 t.

Conseguendo così una riduzione complessiva di circa il 28%.

Contemporaneamente la soluzione adottata ha implicato anche una riduzione di impatto su scala locale in termini di congestione di traffico, rumore, vibrazioni ed inquinamento dell'aria.

ESEMPIO 2 - Passerella pedonale di 50 m di luce.

Requisiti ambientale richiesto: riduzione del 20% di CO₂ rispetto ad una soluzione convenzionale.

La soluzione convenzionale è una passerella a 3 campate in c.a.p. schematicamente rappresentata in Fig. 7 a.

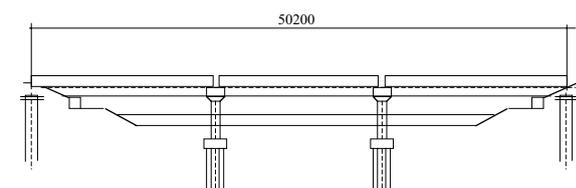


Fig. 7a - Passerella pedonale - soluzione convenzionale in c.a.p.

La soluzione adottata è una passerella a campata unica in calcestruzzo ad altissima resistenza "Super High Strength (SHS)" rinforzato con fibre d'acciaio, schematicamente rappresentata in Fig. 7 b..

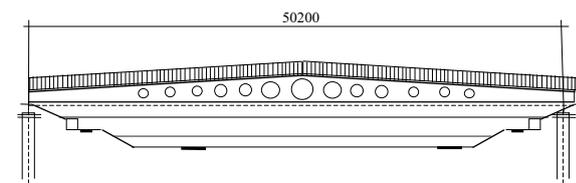


Fig. 7b - Passerella pedonale - soluzione alternativa in SHS.

Questa soluzione ha consentito di ridurre il peso proprio della passerella, per l'elevata resistenza del calcestruzzo, da 2.780 kN a 560 kN e di conseguenza di ridurre le dimensioni delle fondazioni ed i costi di esecuzione.

La maggiore durabilità inoltre ha ridotto i costi di manutenzione.

Con questo esempio si prova che l'uso di calcestruzzo ad altissime prestazioni, oltre ad assicurare i requisiti di sicurezza e durabilità, riduce il carico ambientale.

Il risultato è una riduzione di emissione di CO₂ del 25% rispetto alla soluzione classica.

Come si vede, si tratta di 2 esempi che hanno avuto come obiettivo quello di ridurre l'impatto ambientale.

Nel primo esempio il risultato è stato raggiunto con la eliminazione di una trave di fondazione, mentre nel secondo mediante l'impiego di nuovi materiali.

Entrambi gli esempi mostrano come si possa ridurre l'impatto ambientale con scelte adeguate nella fase di concezione dell'opera.

È evidente quindi l'utilità, ovvero la razionalità, di aggiungere ai requisiti di resistenza, stabilità e durabilità quello ambientale.

Restano naturalmente aperti ampi spazi di ricerca, sui materiali e sul loro ciclo di vita, sulla concezione strutturale delle opere ed in generale sulla ottimizzazione nei confronti degli indici ambientali.

Oggi sono disponibili software adeguati ad analizzare un determinato processo considerando l'intero ciclo di vita di un certo prodotto.

Una tesi di laurea discussa nel mio Dipartimento (Dipartimento di ingegneria civile ed ambientale dell'Università di Firenze) ha utilizzato un programma denominato SIMAPRO. Questo software è in grado di analizzare un determinato prodotto edilizio, considerando le fasi di costruzione, di esercizio e di dismissione.

Il database di questo software contiene tutti i dati necessari al calcolo delle energie di produzione dei materiali impiegati nel processo e degli impatti potenziali associabili ai sottoprocessi previsti nell'analisi d'inventario.

Concludo ricordando che, il 4 luglio 2006, 3 fra le più importanti associazioni americane dell'ingegneria civile:

- ASCE (American Society of Civil Engineers)
- ICE (Institution of Civil Engineers),
- CSCE (Canadian Society for Civil Engineering)

hanno firmato un protocollo che esordisce così:

ASCE, ICE e CSCE ritengono che l'attuale approccio allo sviluppo sia insostenibile. Stiamo consumando le risorse naturali della terra oltre la possibilità di una loro rigenerazione. Questo, insieme con la sicurezza e la stabilità, è il problema

più critico che sta dinanzi alla nostra professione ed alle associazioni che rappresentiamo.

Lo sviluppo sostenibile deve costituire il cuore della nostra pratica professionale.

Mi pare che l'AICAP, ponendo al centro di questo convegno la progettazione e l'esecuzione delle opere strutturali nell'ottica della sostenibilità, sia in perfetta linea con le politiche delle più prestigiose associazioni internazionali ed inoltre le interessanti memorie che verranno presentate ed entrambe le sessioni che si svolgeranno domani rappresentano un importante contributo di conoscenze nella evoluzione della moderna progettazione di strutture in c.a..

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] P. POZZATI E F. PALMERI - *Verso la cultura della responsabilità, ambientale, tecnica, etica*, Ed. Ambiente, 2007.
- [2] ULRICH BECK - *La società del rischio. Verso una seconda modernità*, Carocci, Roma, 2000
- [3] The Eurocodes and the Construction industry - Medium-term strategy - 2008 – 2013", gennaio 2009, elaborato dal TC250 (Jean-Armand Calgaro)
- [4] P. K. MEHTA: *Reducing the environmental impact of concrete*; Concrete International, Ottobre 2001, pag. 61 – 66.
- [5] *Environmental design of concrete structures – general principles*, Technical Report, Bollettino n. 47 fib.
- [6] M. COLLEPARDI - *Progresso sostenibile nelle costruzioni in calcestruzzo*, Enco Journal, n° 30, anno X, pagg. 7-10.
- [7] KOJI SAKAI - *Environmental Design for Concrete Structures*, J. of Advanced Concrete Technology, Vol. 3, No. 1, 17-28, 2005.
- [8] K. HUMPHREYS AND M. MAHASANAN - *Toward a Sustainable Cement Industry, Climate Change Sub-Study 8*, World Business Council for Sustainable Development, 2002.

Franco ANGOTTI, laureato in ingegneria civile presso l'Università di Pisa, è ordinario di scienza delle costruzioni nella Facoltà di Ingegneria di Firenze; è Presidente della UNI/CIS/SC2 "Strutture in calcestruzzo", membro del Gruppo di lavoro del Consiglio Superiore dei LL.PP. per la definizione delle Appendici Nazionali agli Eurocodici e membro della Commissione di studio del CNR per la predisposizione e l'analisi di norme tecniche relative alle costruzioni. Si occupa di aspetti innovativi nel campo delle strutture in c.a.