# INNOVAZIONI E FUTURO DEI PONTI DI GRANDE LUCE

Mario Paolo Petrangeli

**Mario Petrangeli & Associati S.r.l.**

## Introduzione

La fine del '900 ha visto nascere in tutto il mondo un grande numero di ponti con grandi luci, superiori a 200-300 m, fino ad allora riservate a pochissime opere eccezionali.
Contemporaneamente le Amministrazioni ed i Tecnici incaricati della gestione di questi ponti hanno preso coscienza della fondamentale importanza che hanno i problemi legati alla manutenzione di tali opere ( e delle opere di ingegneria civile in generale ) e ciò ha modificato la filosofia progettuale fino a portare il ponte ad assomigliare sempre di più ad una vera e propria macchina.
Questi fenomeni hanno interessato Paesi con storie e culture molto diverse, dalla Cina alla Norvegia, portando ad una relativa uniformità, anche formale, dei ponti di grande luce.
Proprio l'analisi critica di questi fenomeni suggerisce qualche ipotesi sui futuri sviluppi per quelle che, da sempre, costituiscono una delle sfide tecnologiche più affascinanti dell'uomo.

## La lezione del passato

*Le quattro "stagioni"*
Come in ogni processo evolutivo, per cercare di intuire il futuro è indispensabile analizzare a fondo il passato, caratterizzato in modo determinante dall'impiego dei materiali che si rendevano via via disponibili.
Da questo punto di vista la storia dei ponti può essere suddivisa in quattro grandi capitoli: (i) il periodo preromano, dalle origini fino al II-III secolo a.C.; (ii) l'età dell'arco, dal tempo dei Romani fino alla fine del '700; (iii) la rivoluzione industriale con i suoi grandi ponti metallici; (iv) il novecento.
Per i primi manufatti l'uomo utilizzo' materiali reperibili direttamente in natura, quali il legno e le funi vegetali, organizzati in schemi statici ripresi in epoca moderna: le travate ed i ponti sospesi. Purtroppo la deperibilità di questi materiali ha impedito la conservazione di tali opere che, peraltro, troviamo riprodotte in alcune antiche effigi od in ponti recenti ma costruiti seguendo tradizioni millenarie (Fig. 1).

Figura 1 - Un ponte di liane in Gabon

L'arco, pur se già noto in precedenza, e' strettamente legato ai Romani i quali, grazie alla messa a punto di murature con malte molto resistenti lo utilizzarono per opere grandiose tutt'ora perfettamente conservate. (Fig. 2)
Il ponte ad arco e' rimasto praticamente l'unico schema adottato per circa mille anni poiché consente l'impiego di materiali non resistenti a trazione, come la muratura di pietrame o quella di mattoni. Le uniche variazioni apportate nel corso dei secoli sono relative alle sovrastrutture

ed alle decorazioni: le prime (torri di guardia ed edicole sacre) introdotte nel Medio Evo; le seconde (fregi, statue, stemmi nobiliari) nel Rinascimento.

Figura 2 - Ponte Fabricio (Roma - 69 a.c. circa)

Una svolta drammatica nello sviluppo di queste opere fu impressa dalla rivoluzione industriale, allorché furono disponibili i materiali ferrosi nel campo delle opere civili e nacque la ferrovia: il ferro (e poi l'acciaio), resistente a trazione, liberarono il Progettista dall'unico schema fino ad allora possibile, l'arco; la ferrovia, con la sua rigidità di tracciato, richiese grandi luci per superare ostacoli che fino ad allora, con la trazione animale, erano stati aggirati. (Fig. 3) I rilevanti progressi nel campo dei ponti metallici continuarono per tutto il secolo scorso, durante il quale furono impostati tutti i temi ripresi nelle grandi opere in acciaio del novecento.

Figura 3 - Menai Suspension Bridge (Galles - 1826)

L'ultimo periodo, il novecento appunto, ha visto nascere e diffondersi in tutto il mondo il cemento armato normale e, principalmente, quello precompresso.

Oltre all'utilizzo di nuovi materiali, lo sviluppo nel campo dei ponti è stato in realtà influenzato (anche se in misura minore) da altri due fattori:

a) la disponibilità di mezzi di cantiere via via più potenti e diversificati;
b) la messa a punto di linguaggi matematici sempre più sofisticati, capaci di modellare la struttura per capirne a fondo il funzionamento e di riprodurre in modo appropriato gli effetti delle azioni agenti su di essa.

Non risultano invece, contrariamente a quanto si è portati a credere istintivamente, progressi sostanziali legati all'ideazione di nuovi schemi statici: quelli che ci appaiono come i più moderni, quali ad esempio i ponti sospesi o quelli strallati, sono in realtà antichissimi e furono adottati dalle civiltà primitive in quanto utilizzavano principalmente le funi vegetali.
Tutte le grandi innovazioni nel campo dei ponti sono sempre maturate grazie al contributo di più persone nel corso di decenni, a volte di secoli. Di esse però hanno preso per primi coscienza, e se ne sono fatti interpreti, alcuni Pionieri dotati di particolare sensibilità, intuizione e visione critica dei problemi che hanno prodotto opere che costituiscono pietre miliari nella storia dei ponti.

*I ponti in cemento armato ordinario*

L'idea di realizzare una pietra artificiale che assumesse le forme volute dall'uomo e' antichissima. Il calcestruzzo era noto agli Egiziani ed ai Greci almeno dal 500 a.C., ma la grossa innovazione venne con i Romani: l'introduzione della pozzolana, come legante, permise di ottenere un materiale di altissima resistenza e, cosa più importante, durevole, come testimoniano i numerosi manufatti arrivati a noi in ottimo stato, anche se esposti a condizioni ambientali severe.

L'idea di conferire al calcestruzzo quella resistenza a trazione che, di per se, ha in misura limitata, può farsi risalire ad un brevetto del 1854 del costruttore inglese W.Wilkinson, che prevedeva l'impiego di inserti metallici.(In realtà già nel 1846 il francese J.L. Lambot costruì il guscio di una barca <spalmando> il calcestruzzo su una rete metallica).

Il rapido diffondersi del cemento armato si ha tuttavia all'inizio del '900, principalmente ad opera del tedesco Emil Mörsch (1872-1950) e del francese François Hennebique (1843-1921), che assumono quel ruolo di Grandi Pionieri di cui si è detto.

E' proprio con essi che inizia la storia dei grandi ponti in cemento armato del novecento: il primo progetta, nel 1904, il Gmünder Tobel (Svizzera), arco da 79 m di luce; Hennebique, nel 1908, disegna ponte Risorgimento sul Tevere a Roma, un arco di 100 m di luce e soli 10 m di freccia, soggetto a carichi mobili rilevanti (vi passava il tram); un'opera simile poteva essere realizzata, fino ad allora, solo in acciaio. (Fig. 4)

Figura 4 - Ponte Risorgimento di Hennebique (Roma - 1908)

Questo ponte costituì una importante innovazione anche per quanto riguarda la scelta della sezione trasversale, che risulta essere a cassone con pareti sottili: una forma moderna, appropriata al nuovo materiale, ed ancora oggi validissima.

La struttura di calcestruzzo, pur cosi' moderna ed elegante nelle sue linee, fu ricoperta con intonaco riproducente lastre di pietra, lesene e fregi, e ciò può offrire due chiavi di lettura affatto diverse.

La prima è che le novità, sia estetiche che tecnologiche, vengono spesso accettate con diffidenza dal gusto corrente e quindi l'intonaco serviva a mascherare il nuovo materiale, quasi ci si vergognasse di mostrarlo.

La seconda, forse più azzardata, è che Hennebique avesse già in qualche modo intuito i problemi legati alla durabilità del materiale e quindi, come poi è accaduto, lo volesse proteggere dal contatto diretto con l'atmosfera.

L'affermazione esplicita della validità del cemento armato anche dal punto di vista formale, si deve ad un altro grande Progettista, lo svizzero Robert Maillart (1872-1940), che negli anni venti realizzo' diversi ponti ad arco con trave collaborante lasciando il calcestruzzo in vista e raggiungendo quella sintesi tra efficienza strutturale ed armonia delle forme propria delle grandi opere. (Fig. 5)

Figura 5 - Il Salginatobel di Robert Maillart (1930)

Il cemento armato è stato utilizzato fino agli anni '60 principalmente per schemi ad arco, raggiungendo luci ragguardevoli ( 390 m a Krk nel 1979 in Croazia) o consentendo eleganze formali quali quelle del ponte sulla Fiumarella (Catanzaro) di Riccardo Morandi (1902-1989) del 1960.(Fig. 6)

Figura 6 - Il ponte sulla Fiumarella di R. Morandi (1960)

L'elevato costo delle centine e' stato sempre il punto debole di queste strutture a cui si sono preferite, a partire dal '60, le grandi travate in c.a.p.
Una interessante proposta per eliminare le costose centine fu quella di Morandi che realizzò due ponti ( uno nella Carfagnana e l'altro in Sud Africa ) costruendo i due semiarchi in posizione verticale, addossati alle pile di riva, per poi ruotarli fino a congiungerli in chiave.
La soluzione che si è affermata è però quella di costruire l'arco a sbalzo sorreggendolo con stralli provvisori, come fatto per il già citato ponte di Krk e per tutti gli altri costruiti dopo gli anni '80. Questa modalità costruttiva appare, di fatto, come l'unica proponibile nei nostri giorni, per mantenere in vita una forma elegante ed antica quanto la storia stessa dei ponti. (Fig. 7)

Figura 7 - Ponte ad arco costruito a sbalzo con stralli provvisori

Il cemento armato ordinario, mentre ha consentito fin dall'inizio la realizzazione di grandi luci con lo schema ad arco, ha mostrato subito i suoi limiti nel campo dei ponti a travata, nei quali le

azioni di flessione e taglio sono dominanti. Per questo ha ceduto il passo, già nella prima metà del secolo, al nuovo materiale più adatto a resistere alle tensioni di trazione, il Cemento Armato Precompresso.

*Gli impalcati da ponte in C.A.P.*

L'uso delle coazioni impresse ad una struttura per migliorarne le prestazioni e' antichissimo: si pensi ai cerchi metallici che, raffreddandosi dopo essere stati scaldati, precomprimono le botti conferendo alle doghe la capacita' di resistere alle pressioni radiali oppure tengono unite le parti in legno delle ruote dei carri.

L'idea di utilizzare un appropriato stato di presollecitazione per conferire al calcestruzzo la capacita' di resistere a sforzi di trazione senza fessurarsi, come inevitabilmente accade nel cemento armato ordinario, si concretizza in due brevetti della fine dell'800: quello di P.H. Jackson del 1886 negli Stati Uniti e quello di C.E.W. Döhring del 1888 in Germania.

Molti altri brevetti furono poi depositati sia in Europa che negli USA all'inizio del novecento, ma la diffusione su larga scala del precompresso era ostacolata dalla scarsa conoscenza dei fenomeni lenti, la viscosità ed il ritiro del calcestruzzo ed il rilassamento dell'acciaio, che tendono nel tempo ad annullare gli effetti benefici delle coazioni impresse.

Si deve al francese Eugène Freyssinet (1879-1962), giustamente considerato il vero padre del precompresso, l'avere studiato fin dal 1911 l'importanza dei fenomeni lenti; il suo brevetto del 1939 relativo ai coni di ancoraggio di cavi post-tesi segnò l'inizio della diffusione di questa tecnica costruttiva che si affermò poi su larga scala nel dopoguerra, favorita dalla carenza di acciaio per carpenteria metallica.

Anche nel campo dei ponti in precompresso Freyssinet getta le basi per tutte le future innovazioni: nel 1943 viene completato quello di Longroy sul fiume Bresle, primo esempio di applicazione di cavi post-tesi; negli anni 1945/49 ne progetta cinque sulla Marna ed il primo ad essere costruito, il Luzancy, costituisce il primo vero esempio di prefabbricazione. (Fig. 8)

Figura 8 - Un ponte sulla Marna di E. Freyssinet (1946)

In Italia sono primi interpreti e realizzatori di cospicui esempi di ponti in c.a.p., fin dalla fine degli anni quaranta, il già citato Riccardo Morandi, Silvano Zorzi (1921-1994) e Carlo Cestelli Guidi (1906-1995), al quale si deve anche il primo testo sistematico sull'argomento, che tanto ha contribuito alla diffusione di questa tecnica.

A queste prime applicazioni farà seguito una impressionante produzione di serie, favorita dalla ricostruzione dei ponti distrutti dalla guerra e poi, a partire dalla fine degli anni '50 fino alla meta' degli anni '70, dalla formazione della rete autostradale Europea.

La necessita' di costruire un elevato numero di ponti in un tempo molto limitato ha portato a sviluppare al massimo la prefabbricazione: il ponte, salvo eccezioni, non e' più un'opera d'arte singolare ma diviene prodotto industriale. Viene favorita la tipologia del ponte a travata, con l'impiego di elementi spesso prefabbricati in stabilimento. La standardizzazione e' tale che alcune amministrazioni, specie negli Stati Uniti, individuano una serie di profili normalizzati di travi in c.a.p., cosi' come avviene da tempo per i profilati metallici.

Contemporaneamente a questa produzione di serie, valida per ponti di luce medio-piccola (30-40 m circa), si cercano nuove soluzioni per utilizzare vantaggiosamente il precompresso anche sulle grandi luci. Ciò e' reso possibile dalla ideazione di nuove tecniche costruttive e dalla disponibiltà di attrezzature di cantiere sempre più potenti e sofisticate.

Agli inizi degli anni 50 Ulrich Finsterwalder (1899-1987) progetta e realizza sul fiume Lahn a Balduinstein, in Germania, il primo ponte costruito a sbalzo per conci successivi gettati in opera. Questa tecnica consente di realizzare impalcati in c.a.p. senza l'ausilio di centine

poggiate a terra, svincolandosi cosi' da tutti gli impedimenti sottostanti e dall'altezza dal suolo. ( Fig. 9 )
Le fasi costruttive dei ponti sui grandi fiumi non interferiscono più con la navigazione, come mostra la realizzazione del ponte sul Reno a Worms, nel 1952, con tre luci di 100-113-104 m, che sancisce il pieno successo di questa tecnica: tra il 1950 ed il 1965, in Europa, vengono costruiti più di 300 ponti di questo tipo con campate superiori a 76 m. Si raggiungono luci già dominio esclusivo dell'acciaio, per arrivare nel 1985 ai 260 m del Gateway di Brisbane, Australia, che costituisce il record del nostro secolo per ponti a travata in c.a.p.

Figura 9 - Costruzione a sbalzo con conci gettati in opera

Nelle prime realizzazioni lo schema a mensola veniva mantenuto anche in esercizio ed i due sbalzi contigui venivano collegati o con una cerniera o con una piccola trave appoggiata. Le deformazioni viscose, però, provocavano in mezzeria cuspidi inaccettabili per il traffico e quindi nei ponti più recenti gli sbalzi vengono solidarizzati con conseguente cambio dello schema statico.
Questo schema, peraltro, parrebbe avere ormai raggiunto (e forse superato) i limiti consentiti dai materiali attuali: il ponte Skye , inaugurato nel 1995 in Scozia, ha una altezza di impalcato all'imposta di m 12,60, per una luce di 250 m. Un ponte strallato in c.a.p. di eguale luce avrebbe un impalcato con spessori di 1,50 ÷ 2 m al massimo.
I primi ponti a sbalzo avevano tutti i conci gettati in opera. L'idea di impiegare conci prefabbricati si deve ai francesi che nel 1962 costruirono il ponte di Choisy-le-Roi sulla Senna, progettato da Jean Müller, allievo di Freyssinet. In questo ponte a tre luci (37.5-55-37.5 m) i conci furono messi in opera per mezzo di gru da pontoni che li prelevavano direttamente dal campo di prefabbricazione.
Va peraltro ricordato che già nei primi anni '50 Morandi aveva progettato ponti con conci prefabbricati, poggiati inzialmente su centina, solidarizzati e precompressi in opera. ( Ponte sul Liri del 1952, Ponte S.Nicola a Benevento del 1954 etc.)
L'uso di attrezzature autovarantisi che si riforniscono dei conci attraverso la parte di impalcato già costruita, svincolandosi quindi totalmente dall'ambiente circostante, segui' subito dopo, quando nel 1964-66 fu costruito il viadotto che collega la costa Atlantica, a nord di Bordeaux, con l'isola di Oleron. Il viadotto e' lungo 2862 m e nella parte centrale ha luci di 79 m. (Fig. 10)

Figura 10 - Il ponte Oleron con il primo esempio
di carro varo per conci (1964)

In questo ponte l'attrezzatura di varo era di poco più lunga di una campata e poggiava sull'estremità dello sbalzo finito che precedeva quello in costruzione. I carri della seconda generazione hanno lunghezze pari a circa due volte la luce del ponte e poggiano sempre sulle pile. A volte queste gigantesche travi reticolari sono strallate. Questa tecnica e' stata usata in centinaia di opere e costituisce ancora oggi uno dei modi più eleganti per costruire ponti in c.a.p. con luci da 50 a 100 m interferendo al minimo con l'ambiente esterno.
Vanno peraltro segnalati alcuni inconvenienti riscontrati sia in Francia che in Italia, derivati dalla mancanza di armatura ordinaria passante attraverso i giunti a secco ( che riduce la duttilità di queste travate ) e dalla difficoltà di correggere errori geometrici di costruzione. Questi limiti hanno portato sia le Ferrovie Italiane che quelle Francesi a rifiutare i conci prefabbricati.
Contemporaneamente alla costruzione a conci, il prof. Fritz Leonhard di Stoccarda avanzava la proposta di realizzare i ponti <a spinta>, cioè di costruire segmenti di impalcato a tergo di una spalla e poi <spingere> il manufatto che via via si va formando.( Fig. 11 )
Il primo esempio di questa tecnica di costruzione e' il ponte sul Rio Caironi, in Venezuela, del 1962. Con questo metodo si hanno peraltro limitazioni sia nella geometria dell'impalcato, che deve essere in rettifilo o in curva a raggio costante, sia nelle luci massime (50-60m) per cui la sua diffusione e' stata inferiore a quella della costruzione a conci, pur avendosi il vantaggio di avere la continuità delle armature ordinarie e di poter eseguire i getti in un ‘unica area attrezzata.

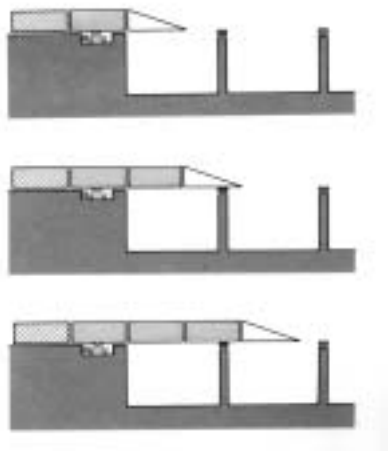

Figura 11 - Schema di costruzione “a spinta”

Un altro metodo di costruzione che ha avuto numerose applicazioni, a partire dal ponte di Krahnenberg in Germania (1961-64), e' quello del getto in opera per campate successive utilizzando casseforme autoportanti e autovaranti: anche in questo caso l'obiettivo e' quello di svincolare la costruzione dell'impalcato dal terreno sottostante. Rispetto ai conci prefabbricati si hanno
tempi di costruzione più lunghi e maggiori incertezze sulla qualità dei getti ma, per contro, l’impalcato è monolitico.
Per completare questa breve panoramica sul cemento armato precompresso va segnalata la precompressione <esterna>, che sta diffondendosi rapidamente nel campo dei ponti. I cavi di precompressione vengono posti all’esterno delle pareti in calcestruzzo, con le quali sono in contatto solo in un numero limitato di punti.(Fig.12) In questo modo si possono ridurre gli spessori dei getti, che risultano facilitati, ed i cavi rimangono visibili ed eventualmente sostituibili. Per contro si ha una minore duttilità della struttura che costringe ad aumentare le armature ordinarie. Infatti la tensione nell’acciaio di precompressione cresce poco al crescere del carico esterno, essendo gli allungamenti dei cavi non più legati alle vicende della sezione ma a quelle della trave nel suo insieme.
La precompressione esterna, oltre che per le nuove costruzioni, si è rivelata molto efficace per il rinforzo di ponti esistenti, grazie anche allo sviluppo di nuovi materiali che consentono di inghisare nel calcestruzzo esistente i connettori, necessari per l’ancoraggio dei nuovi cavi.

Figura 12 - Esempio di precompressione esterna nelle nuove costruzioni

*I ponti metallici*

Nel campo dei ponti metallici il novecento non ha registrato vere e proprie scoperte bensi' progressi, a volte sostanziali, delle idee e degli schemi le cui origini sono tutte riconducibili all'800.

I fattori alla base di questi progressi sono derivati da quelli ottenuti: (i) nei materiali; (ii) nelle giunzioni; (iii) nello sviluppo della teoria delle strutture e (iiii) nell'impiego della piastra ortropa o della soletta di calcestruzzo quali elementi collaboranti.

I MATERIALI Per quanto riguarda il materiale base si e' passati dall'acciaio dolce, utilizzato all'inizio del secolo ed avente una tensione di snervamento $\sigma y$ di 235 N/mm2, all'uso corrente di acciaio ad alta resistenza con $\sigma y$ = 355 N/mm2; nel dopoguerra si sono poi resi disponibili, per usi speciali, gli acciai ad altissima resistenza prodotti per primi negli USA ($\sigma y$ = 700 N/mm2) ed in Giappone ($\sigma y$ = 800 N/mm2).

Sempre negli USA, gia' negli anni sessanta, veniva brevettato una versione di acciaio ad alta resistenza cosiddetto <autoprotettivo> poiche' si ricopre rapidamente di uno strato di ossido compatto che protegge la parte sottostante.

LE GIUNZIONI Al progresso, sostanzialmente quantitativo, delle caratteristiche del materiale base si e' sommato quello piu' qualitativo nel campo delle giunzioni. Fino al 1929 l'unica forma di collegamento nota era quella basata sull'uso di chiodi ribattuti a caldo , che richiedeva un elevato impiego di mano d'opera: si pensi che il famoso ponte Britannia aveva circa due milioni di chiodi scaldati e ribattuti uno per uno. Sembra che il primo a proporre la saldatura nel campo dei ponti sia stato il polacco Stefan Bryla; questa tecnica si diffuse rapidamente in tutto il mondo sostituendo quasi totalmente la chiodatura, anche se nel periodo iniziale, prima cioe' della seconda guerra mondiale, una serie di incidenti in Belgio (ponti sul canale Alberto) ed in Germania (ponte dello Zoo a Berlino) dimostrarono quanto essa fosse delicata e necessitasse di personale altamente specializzato. Proprio per questi rischi, e per la maggiore sensibilita' delle saldature ai fenomeni di fatica, le Ferrovie dello Stato italiane hanno imposto le giunzioni con chiodi o bulloni ordinari fino agli anni '80.

Una nuova tecnica di giunzione, rapida e senza i rischi di fragilita' propria delle saldature, fu sviluppata a partire dal 1949 negli Stati Uniti e si e' diffusa rapidamente in Europa a partire dal 1955 circa. Vengono utilizzati bulloni ad alta resistenza ($\sigma y$ =900 N/mm2) pretesi all'atto del montaggio in modo da impedire lo scorrimento delle lamiere grazie alla forza di attrito che cosi' si esplica.

LE CONOSCENZE TEORICHE Un altro fattore di progresso e' derivato dalla maggiore comprensione di alcuni aspetti teorici, ed in particolare dei fenomeni di instabilita' delle lamiere. Fino al 1930 circa la quasi totalita' dei ponti erano reticolari, cioè composti da aste supposte incernierate alle estremita', il che costituiva anche un'enorme semplificazione di calcolo. Si aveva un grande numero di nodi ove e' piu' facile il deposito della polvere e dell'acqua, cioe' punti di potenziale corrosione, ed un discutibile risultato estetico.

La migliore conoscenza del comportamento delle lamiere irrigidite ed il contemporaneo sviluppo delle saldature hanno fatto si che dal 1930 in poi i ponti in acciaio a parete piena si andassero diffondendo anche per le grandi luci, arrivandosi nel 1957 alla campata di 261 m sulla Sava, a

Belgrado che ha costituito un record fino al 1974, quando fu costruito a Rio de Janeiro il ponte Costa e Silva, che ha una travata con luce centrale di 300 m.
I ponti a trave reticolare non sono piu' stati utilizzati nell'Europa del dopoguerra, salvo alcune applicazioni in campo ferroviario. Il loro impiego e' invece continuato negli USA ed in Giappone dove nel 1974, ad Osaka, ne e' stato costruito uno con acciaio ad altissima resistenza e campata centrale di 510 m; tale limite e' inferiore comunque al record mantenuto fin dal 1918 dal ponte di Quebec, Canada', simile al Firth of Forth (Fig. 13) ma con luce di 549 m.

Figura 13 - Forth Railway Bridge (Scozia - 1890)

Il ponte di Quebec va ricordato anche per il drammatico tributo di vite umane che comporto' la sua costruzione: 82 operai in un primo incidente, nel 1907, causato dal collasso di un'asta compressa (da cui l'inizio degli studi sui fenomeni di instabilità); altri 13 nel 1916 quando, per un errore di manovra, un elemento da 4710 tonnellate di peso cadde durante il sollevamento.

La PIASTRA ORTOTROPA E LA SOLETTA COLLABORANTE Lo sviluppo delle conoscenze teoriche, parallelo a quello dei mezzi di calcolo di cui si dira' piu' avanti, ha modificato anche la concezione stessa che i progettisti avevano dei ponti. Prima della seconda guerra mondiale questi erano pensati come formati da tanti elementi strutturali, ciascuno dei quali svolgeva una funzione propria indipendentemente dagli altri: una serie di profilati o lamiere sopportava il peso della pavimentazione e delle ruote dei veicoli, trasferendone il carico verticale ai trasversi; questi, autonomamente, lo riportavano alle travi principali dotate di propri correnti superiori ed inferiori. Le forze di frenatura venivano assorbite da una struttura indipendente (chiamata appunto <trave di frenatura>) e cosi' via. Si avevano in questo modo una serie di strutture semplici da calcolare ma, nell'insieme, molto pesanti. Nel dopoguerra la scarsa disponibilita' di acciaio per ricostruire i ponti ha portato a fondere le funzioni dei singoli elementi in un organismo molto piu' complesso. In particolare si e' diffuso l'uso della <piastra ortotropa>, cioe' della lamiera piana irrigidita da due ordini di nervature ortogonali tra loro, le costole longitudinali ed i trasversi. Essa assolve alle funzioni di piano di rotolamento, di corrente superiore (o inferiore) delle travi principali, di controventamento e di trave di frenatura. (Fig. 14)

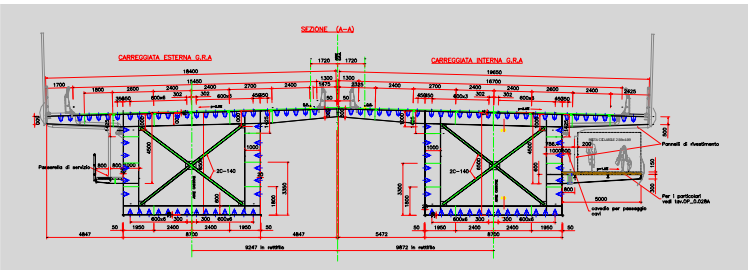


Figura 14 - Esempio di ponte con piastra ortotropa
(Nuovo ponte sul Tevere a Castel Giubileo per il GRA)

Anche se l'idea di piastra ortotropa sia gia' insita nei ponti ottocenteschi di Stephenson, la diffusione su larga scala di questo tipo di impalcato metallico si ebbe solo nel dopoguerra a partire dal ponte di Cologne-Deutz, progettato nel 1948 da Leonhardt. Cospicui esempi di ponti con piastra ortotropa sono il gia' citato ponte sulla Sava a Belgrado, il viadotto Europa nei pressi di Insbruck (Austria) a trave continua con luce centrale di 198 m, del 1963, e praticamente tutti i ponti con luce superiore a 100 m costruiti dopo questa data. In Italia i primi

esempi di piastre ortotrope si hanno nel viadotto Lao (Fig. 15) dell'autostrada SA-RC del 1969-71 (trave continua con luci di 125-175-125 m) ed in quello sulla fiumara dello Sfalassa', della stessa autostrada, a portale con luce complessiva di 376 m, progettato da S. Zorzi.

Figura 15 - Viadotto Lao. Tra i primi in Italia a P.O.

Le piastre ortotrope hanno portato a dimezzare i pesi degli impalcati metallici, ma hanno un costo molto elevato data la forte incidenza della mano d'opera sulla loro costruzione e sul montaggio. Per questo motivo, contemporaneamente ad esse, si sono sviluppati gli impalcati a struttura mista acciaio-calcestruzzo, economicamente piu' vantaggiosi.
Non sembra si possa parlare di Autori di questa innovazione che nasce da una serie di osservazioni sperimentali. Fin dall'inizio del secolo, infatti, si avevano strutture che utilizzavano l'acciaio per le travi principali ed il calcestruzzo per la soletta superiore su cui avveniva il traffico, supposta indipendente dalle travi sottostanti. In realta' le prove di carico dimostravano che questa indipendenza non c'era poiche', tenendo conto anche della presenza delle teste dei chiodi sulle piattabande superiori, gli scorrimenti relativi non potevano avvenire liberamente. Si penso' quindi di rendere questa collaborazione certa e totale disponendo appositi dispositivi di collegamento tra acciaio e calcestruzzo, i <connettori>. Nel 1935-36 si costruisce in Germania il ponte sullo Steinbach, considerato il primo di questo genere, che avra' larghissima diffusione anche grazie alla prima normativa pubblicata dalla AASHO (American Administration for the State Highway Officials) nel 1944.
I PONTI AD ARCO ED I PONTI SOSPESI Per completare questa panoramica sui ponti metallici e' necessario esaminare brevemente anche altre due tipologie che, se pur meno frequenti delle travate, hanno una grande valenza tecnica e formale: i ponti ad arco ed i ponti sospesi.
I ponti ad arco in acciaio, fino alla diffusione dei ponti strallati di cui si dira' piu' avanti, hanno permesso di coprire le grandi luci senza dover ricorrere ai ponti sospesi.
Il più famoso tra i ponti ad arco in acciaio è certamente quello di Garabit, progettato da Gustave Eiffel con arco di 162 m di luce. (Fig. 16)

Figura 16 - Il viadotto Garabit di G.Eiffel ( 1884 )

Attualmente il record e' di 518 m ed appartiene ad un ponte costruito nel 1976, negli USA, su una gola della Virginia ma già intorno al 1930 fu costruito nel New Jersey il Bayonne di 511 m e ciò conferma come questa tipologia abbia raggiunto i suoi limiti.

Da menzionare, per l'indubbia eleganza formale, è il ponte Fehmarnsund costruito in Germania nel 1963 secondo lo schema <Nielsen>, cioe' ad arco a via inferiore con l'impalcato che funge da catena; i due archi giacciono su piani inclinati e si fondono al centro della luce, che e' di 250 m. Questo schema e' stato ripreso in molte altre opere sia in Europa che in Giappone, ottenendo sempre risultati estetici molto positivi. (Fig. 17)

Figura 17 - Un esempio di ponte Nielsen. Ponte sul Fehmarnsund

Per completare la storia dei ponti metallici del nostro secolo e' necessario seguire rapidamente l'evoluzione di quello che probabilmente e' il piu' antico ed il piu' spettacolare di tutti: quello sospeso.
Gia' nel secolo scorso John Roebling e suo figlio avevano realizzato il celebre ponte di Brooklyn, di 486 m di luce. A questo ponte seguirono, nel novecento, altri di luce sempre maggiore ma concettualmente simili al precedente e tutti realizzati negli Stati Uniti: nel 1931 il George Washington a New York, progettato dall'ingegnere Othmar H.Amman (1879-1965) emigrato negli USA dalla Svizzera, superava per primo la soglia dei 1000 m (1067); sei anni dopo il record passava all'altrettanto famoso Golden Gate di S Francisco che ha la luce centrale di 1280 m e, nel 1964, al Verrazzano di New York, la cui luce e' di 1298 m.
Tutti questi ponti hanno la trave irrigidente di impalcato di tipo reticolare, relativamente alta (circa 9 m nel Verrazzano) e pesante. Un tentativo di realizzare un impalcato con travi a parete piena piu' sottili porto', nel 1940, al crollo del ponte di Tacoma (Usa) di 854 m di luce. Questo disastro fu causato, appena dopo quattro mesi dall'inaugurazione, da un vento relativamente modesto ed evidenzio' in modo drammatico un problema fino ad allora praticamente ignorato: l'eccitazione dinamica dovuta all'interazione del vento con la struttura. (Fig. 18)

Figura 18 - Il crollo del ponte di Tacoma (1940)

Una risposta valida a questo problema si ebbe in Europa con il ponte progettato da Sir Gilbert Roberts e costruito nel 1966 sul Severn, in Gran Bretagna; benche' questo ponte abbia una luce di 988 m, costituisce una autentica innovazione nel campo dei ponti sospesi avendo un impalcato a cassone chiuso, profilato aerodinamicamente come un'ala di aereo, dell'altezza di appena 3 m. (Fig. 19)

Figura 19 - Humber Bridge (Inghilterra)

Questa stessa filosofia, tutta europea, fu ripresa nel primo ponte sul Bosforo ad Istanbul del 1973 e nel ponte sul Humber, in Inghilterra, che ha mantenuto il record del mondo della luce (1410 m) fin quasi alla fine del secolo. Il nuovo millennio è iniziato con la supremazia dei giapponesi che hanno completato, nei pressi di Kobe, il ponte stradale Akashi-Kaikyo, ( Fig. 20 ) con campata centrale di 1990. Il ponte sospeso sullo Störebelt in Danimarca, costruito ad opera di ditte italiane, con luce di 1624 m., avrebbe dovuto detenere il record per qualche mese prima di cedere lo scettro all'Akashi, ma ritardi nella costruzione lo hanno fatto terminare dopo il rivale d'oriente. Sempre in Asia, ad Hong-Kong, è operante, dal 2000, il collegamento stradale e ferroviario di Lantau, che comprende il ponte sospeso Tsing-Ma: la sua campata da 1377 m gli assegna il record mondiale per opere a traffico misto.

Figura 20 - Il ponte sospeso più lungo del mondo (Akashi-Giappone)

*I ponti strallati*

Le grandi luci dei ponti in calcestruzzo, come detto, sono state rese possibili dapprima con l'impiego dello schema ad arco e, dopo gli anni '60, dalle travate costruite a sbalzo. Nel campo dei ponti metallici si hanno, oltre a queste due tipologie, le grandi travate reticolari ed i ponti sospesi.

I limiti per tutte le soluzioni derivano dalle fasi costruttive che comportano una distribuzione delle sollecitazioni dovute al peso proprio ( che rappresenta l'azione di gran lunga più importante ) diversa da quella finale. Si è visto come per luci superiori a 200 m l'altezza delle mensole, nei ponti a sbalzo in c.a.p., raggiunga valori invalicabili sia dal punto di vista estetico che tecnologico.

Il superamento di questi limiti si è avuto con i ponti strallati, la cui diffusione è stata tale da farli divenire le strutture simbolo della fine del millennio appena passato.

L'idea di sorreggere una trave con funi inclinate, gli stralli, e' antichissima: i ponti levatoi medioevali e, molto prima, i picchi delle navi egiziane, ne sono un esempio.

Nel campo dei ponti propriamente detti già nel 1600 un geniale architetto veneziano, Faustus Verantius, propose una trave da ponte sospesa ad una fune curvilinea ed in più sorretta da stralli, ( Fig. 21 ) ma per avere la prima realizzazione nota bisogna arrivare al 1817, quando fu costruita la passerella pedonale King's Meadow in Inghilterra.

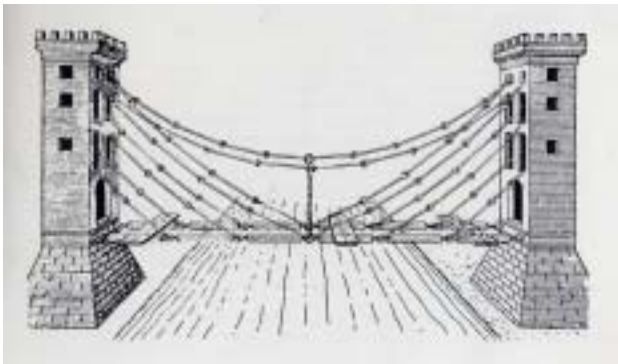

Figura 21 - L'idea di ponte strallato di Faustus Verantius (1617)

Purtroppo due drammatici crolli di opere di questo tipo, in Inghilterra sul fiume Tweed nel 1818 ed in Germania sul Saale nel 1824, arrestarono per più di due secoli lo sviluppo di questo schema. Ciò accadde in Europa, ove peso' negativamente la condanna di un famoso accademico francese, Luigi Navier (1785-1836), diversamente dagli Stati Uniti ove J. Roebling continuo' ad associare gli stralli ai cavi di molti ponti sospesi.
Anche se nel 1925 un altro Grande della storia del cemento armato, Eduardo Torroja (1899-1961) progetto' il ponte canale di Tempul, Spagna, che aveva la trave in c.a. sorretta da stralli, bisogna arrivare al 1955, quando fu completato il ponte in acciaio disegnato dal tedesco Franz Dischinger (1887-1953) sullo Strömsund in Svezia, per vedere affermarsi definitivamente questa tipologia.
Mentre in Germania gli stralli venivano proposti esclusivamente per gli impalcati in acciaio, Riccardo Morandi intuiva per primo le grandi possibilità che questo schema offriva anche al cemento armato. Nel 1957 inizia la progettazione delle campate da 235 m per il ponte sulla laguna di Maracaibo, Venezuela, che verrà completato nel 1961 e che, con le sue stampelle indipendenti collegate da travi tampone, e' il padre di tutti i ponti strallati a più luci in c.a.p. (Fig. 22)

Figura 22 - Il ponte di Maracaibo di R. Morandi ( 1960 )

Hanno questo schema il viadotto Polcevera (Genova1967) e quello sul Wadi Kuf (Libia 1972) dello stesso Morandi; il ponte General M. Belgramo sul Paranà tra Chaco e Corrientes in Argentina, realizzato da Imprese italiane nel 1972 (utilizzando per la prima volta conci prefabbricati) e molti altri ancora.
Le prime opere di questo tipo avevano un numero limitato di stralli e, di conseguenza, travate relativamente alte. Le applicazioni più moderne, al cui sviluppo molto ha contribuito il francese Michel Virlogeux, prevedono un numero molto elevato di funi ed impalcati estremamente sottili.
L'interasse ridotto degli stralli, 8÷12 m, facilita la costruzione a sbalzo e consente la sostituzione di uno di essi senza bisogno di chiudere il ponte al traffico, favorendo quindi la manutenzione dell'opera.
Il record delle luci per il c.a.p. e' attualmente detenuto dallo Skarsundet (Norvegia 1991) che ha una campata di 530 m ed un impalcato di appena 2,15 m di spessore. In precedenza il primato

era detenuto, con 440 m di luce, dall'attraversamento del Barrios de Luna, costruito nel 1983 in Spagna, su progetto di J. Manterola e L.F. Troyano.
I cinesi, in netto recupero nei confronti dell'occidente per quanto riguarda i ponti, detengono il record delle luci per impalcati strallati a struttura mista acciaio calcestruzzo: 602 e 590 m rispettivamente per i ponti Yangpu e Xupu di Shanghai, in servizio dal 1993 e dal 1996.
Molto interessante, perché indicativo di una tendenza che si va consolidando, è il ponte di Normandia alla foce della Senna in Francia, la cui luce centrale e' di 856 m. (Fig. 23)

Figura 23 - Il ponte strallato di Normandia-Francia

Questo impalcato ha solo la parte centrale della grande luce in acciaio (624 m su 856) mentre le restanti parti, prossime alle pile, e le campate di riva, sono in c.a.p.: si ripropone qui una scelta comune a molti ponti moderni, e cioè l'impiego di materiali diversi in una stessa opera che quindi non può più essere classificata semplicemente " in acciaio" o " in calcestruzzo".
Le potenzialità strutturali di questi ponti sono enormi e non sembrano essere state ancora completamente esplorate, come dimostra il superamento continuo dei record raggiunti: il ponte di Normandia è stato superato, poco dopo la sua costruzione, da uno simile ma con luce di 890 m realizzato in Giappone (Tatara bridge).
Anche dal punto di vista espressivo, le possibilità offerte da questa tipologia sono molto vaste. Si hanno esempi con una, due o più antenne, le quali possono essere verticali od inclinate ed avere le forme più' diverse (ad A, a V, ad Y rovescia etc.); gli stralli possono giacere su due piani ai lati della strada o su un unico piano centrale e possono essere disposti tutti paralleli tra loro (ad arpa), convergenti in un unico punto (a ventaglio) o secondo schemi misti. (Fig. 24)
Particolarmente suggestivo, anche se non del tutto convincente dal punto di vista statico, risulta il ponte Alamillo in Siviglia, Spagna, progettato da Santiago Calatrava, la cui singolarità è quella di non avere stralli di riva a sostegno dell'antenna, che quindi si comporta come una semplice mensola.

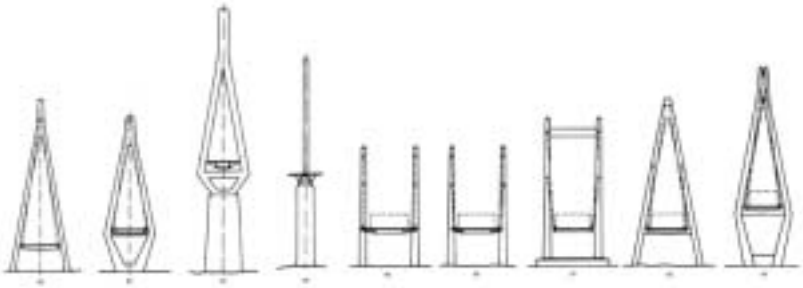

Figura 24 - Le possibili forme delle antenne dei ponti strallati

Di rilievo e' anche il ponte sul Wadi Dib, in Algeria, progettato dall'Autore e costruito da Impresa Italiana. E' uno dei maggiori ponti strallati in c.a.p. costruiti in zona a forte sismicità, avendo la campata centrale di 280 m e la torre più alta di 140 m. L'impalcato è stato realizzato con conci

prefabbricati ma con giunti gettati prevalentemente in opera al fine di poter dare continuità alle armature lente e garantire così una adeguata duttilità alla travata.( Fig. 25 )
Anche in questo caso si ritrova, nella sommità delle antenne ove si ancorano i cavi, un uso misto dell'acciaio e del calcestruzzo, ognuno utilizzato secondo la propria vocazione.

Figura 25 - Il ponte strallato sul DIB (Algeria)

I ponti strallati, proposti inizialmente per le strade, si sono andati diffondendo anche nel campo dei ponti ferroviari. I primi esempi si hanno già negli anni sessanta (Quebec-Canadà; Neckar-Germania) anche se con luci relativamente modeste, ma già negli anni '80 in Giappone venivano realizzati due ponti gemelli in acciaio, a servizio della linea Honshu- Shikoku, con luce principale di 420 m.
Nel 1996 è stato completato un altro ponte a traffico misto, autostradale al livello superiore e ferroviario a quello inferiore, di accesso al nuovo aeroporto di Hong Kong, il Kap Shui Mun con luce centrale di 430 m. Uno schema molto simile e' stato prescelto per la luce maggiore (490 m) dell'attraversamento dell'Öresund che collega la Danimarca con la Svezia, da Copenaghen a Malmö, da poco entrato in esercizio. (Fig. 26)

Figura 26 - Il collegamento tra Danimarca e Svezia sullo stretto di Öre

Tutti questi ponti strallati ferroviari hanno l'impalcato in acciaio o a struttura mista. Il ponte strallato di 192 m di luce sul Po, presso Piacenza, a servizio della linea A V in corso di realizzazione, sarà il primo del genere in c.a.p. per il transito di treni ad alta velocità. (Fig. 27)

Figura 27 - Il ponte ferroviario sul PO per la linea AV ( In costruzione )

*L'isolamento sismico dei ponti*

E' noto come, per motivi squisitamente economici, un ponte in zona sismica venga dimensionato in modo da resistere senza apprezzabili danni ai terremoti " lievi " che hanno una elevata probabilità di accadere durante la vita del ponte, generalmente fissata in 50-100 anni. Viceversa si accetta il danneggiamento dell'opera ( ma non il crollo ) nel caso di sismi violenti, e quindi "rari".

Questo danneggiamento può riguardare le pile, che quindi devono possedere una buona duttilità e devono essere riparate dopo un sisma violento, oppure degli elementi appositi che agiscano come una sorta di fusibile che " isola " il ponte dalle azioni che superino una data soglia: è questo il caso dell'isolamento sismico che, proposto inizialmente in Nuova Zelanda ed in Giappone, si è diffuso enormemente in Italia fino a divenire prassi corrente. (Fig. 28)

Figura 28 - Esempio di smorzatore sismico

La tecnica di isolare sismicamente i ponti, oltre al grande vantaggio di proteggere le sottostrutture da qualsiasi terremoto, ha finito con l'influenzare anche la forma dei ponti.

La riduzione delle azioni orizzontali agenti sulle sottostrutture porta in genere ad avere elementi verticali più snelli e quindi, in definitiva, strutture più eleganti.

Con l'isolamento sismico si è inoltre introdotto un altro concetto molto importante, già insito nella precompressione esterna: quello del ponte visto come un organismo fatto da tante parti che svolgono funzioni specializzate, facilmente ispezionabili e sostituibili.

**La gestione dei ponti esistenti**

Da tutto quanto detto in precedenza risulta chiaramente che una grande quantità dei ponti europei fu realizzata dalla meta' degli anni cinquanta ai primi anni settanta, in tempi molto ristretti e, cosa ancor più importante, senza tenere in debito conto la <durabilità>, cioè la capacità di una struttura di mantenere inalterate nel tempo le proprie prestazioni.

Questa esigenza, nota in parte ai progettisti di strutture in acciaio, era totalmente ignorata da chi si occupava di costruzioni in calcestruzzo armato che, a torto, venivano considerate eterne.

Tali circostanze hanno fatto si che dopo 25-30 anni, cioè nell'ultimo decennio del novecento, si ponesse in modo economicamente rilevante la domanda di interventi per la riparazione ed il ripristino (sia estetico che funzionale) di molti ponti esistenti.

Altre volte, specie in Italia, Giappone e Stati Uniti, gli interventi di rinforzo o di modifica di opere in esercizio si sono resi necessari per migliorarne le prestazioni in caso di sisma. Ciò a seguito delle maggiori conoscenze acquisite sia in merito all'effettivo grado di sismicità delle varie zone sia per quanto riguarda la risposta delle strutture alle azioni indotte da sismi violenti.

Oltre ai casi di adeguamento sismico si sono avuti, infine, molti esempi di adeguamento geometrico dei ponti per soddisfare le crescenti richieste del traffico (nuove corsie, banchine etc.).

La necessita' di tutti questi interventi, i cui costi tendono ad essere dello stesso ordine di grandezza di quelli per le nuove costruzioni (almeno per i paesi occidentali che hanno le reti di trasporto più vecchie), ha comportato importanti innovazioni in almeno tre campi: (i) la diagnostica strumentale, cioè la possibilità di acquisire informazioni approfondite sullo stato di conservazione di un ponte utilizzando prove non distruttive, in modo simile a quanto avviene nel campo medico; (ii) l'identificazione strutturale, cioè le tecniche di calcolo per interpretare i risultati delle prove e conoscere le residue capacità prestazionali di un ponte; (iii) i nuovi materiali specifici per le riparazioni e le relative modalità di impiego.

Tralasciando i temi della diagnostica e della identificazione strutturale, troppo vasti per essere trattati in questa sede, meritano attenzione i nuovi materiali che via via vengono messi a punto per le riparazioni, in quanto è da prevedere un loro futuro impiego anche nelle nuove costruzioni, come meglio illustrato nel paragrafo successivo.

Ma ancora più importante di queste innovazioni è il fatto che i problemi riscontrati sui ponti esistenti hanno profondamente modificato la filosofia progettuale: un ponte viene visto ora come una macchina che va disegnata preoccupandosi di garantirne la manutenzione in modo facile ed economico.
Proprio questo cambio di filosofia, insieme ai nuovi materiali, condizionerà molto probabilmente gli sviluppi futuri dei ponti.

**Ipotesi per il futuro**
I fattori che hanno governato il progresso nel passato, arricchiti dalla coscienza di dover garantire alle opere la necessaria durabilità, saranno molto probabilmente gli stessi che guideranno lo sviluppo futuro dei ponti.

*I materiali*
Nel campo dei calcestruzzi sono ormai una realtà quelli cosiddetti " ad alte prestazioni (AP)", con resistenze cubiche comprese tra 55 e 75 Mpa (nel ponte Vasco de Gama, da poco inaugurato a Lisbona, sono stati utilizzati calcestruzzi di classe 80 Mpa) mentre sono in avanzata fase di studio, ed è da prevederne la diffusione a breve, quelli " ad alta resistenza (AR) " con resistenze fino a 115 Mpa.
Oltre al miglioramento delle caratteristiche meccaniche, grandi progressi si sono ottenuti anche per quello che riguarda la durabilità. Ciò è stato possibile grazie all'impiego di nuovi additivi che riducono drasticamente il rapporto A/C (e quindi la porosità del calcestruzzo) mantenendo una lavorabilità elevatissima.
Oltre a ciò si vanno diffondendo prodotti da applicare sul calcestruzzo che impediscono l'ingresso al suo interno degli agenti inquinanti: sarebbe auspicabile che questi trattamenti, dal costo relativamente modesto, venissero applicati sistematicamente a tutti i nuovi ponti di un certo rilievo.

Per i ponti in acciaio certamente è da attendersi anche in Italia, una volta superati gli attuali problemi dei costi, il diffondersi di acciai ad altissima resistenza ($\sigma y$ = 700 N/mm2), ormai largamente impiegati all'estero anche perché hanno una saldabilità ottima.
Anche per l'acciaio si sono approfonditi gli aspetti della durabilità mettendo a punto cicli di verniciatura che garantiscono contro la corrosione anche per 20-30 anni.
Ma quello che caratterizzerà il futuro sarà l'affermarsi dei nuovi materiali compositi (FRP). In particolare i polimeri rinforzati con fibre di carbonio (CFRP) sembrano quelli con maggiori prospettive di impiego nel campo strutturale, avendo tensioni di rottura dell'ordine di 3000 N/mm2. Si tratta quindi di resistenze superiori a quelle dei migliori acciai armonici oggi disponibili, ma con pesi di appena 1,6÷1,8 g/cm3 .
Le basi per l'impiego di questo materiale sono state poste già ora con gli studi approfonditi condotti dall'EMPA, il laboratorio federale svizzero per le prove sui materiali..
Per i materiali compositi si possono veder fin d'ora due usi affatto diversi.
Un impiego molto interessante, che sembra di prossima attuazione, è quello di utilizzarli in luogo dell'acciaio come armature di rinforzo, pretese o non, dei calcestruzzi.
E' evidente che ciò costituirebbe un progresso notevole per quanto riguarda la durabilità delle opere in c.a. ed in c.a.p., venendo a mancare la causa prima ( la corrosione delle armature ) del degrado di queste opere.
Il già citato EMPA ha curato la progettazione di un ponte strallato costruito nel 1996 a Winterthur, Svizzera, il quale ha due dei 24 stralli realizzati in via sperimentale con CFRP, mentre in Giappone già producono industrialmente cavi in fibra di carbonio (Fig. 29); negli USA, con la collaborazione del Canadà e del Giappone, è in corso un grande programma di ricerca con la costruzione di una serie di ponti a travi prefabbricate aventi sia le armature ordinarie che quelle precompresse sostituite da barre e cavi in fibra di carbonio.
Un'altra possibilità è quella di realizzare l'intero ponte con profilati costituiti da FRP, ottenendo strutture estremamente più leggere di quelle attuali. Per ora si hanno già esempi di passerelle pedonali ( USA, G.B., Germania ) ma certamente queste strutture interamente in FRP hanno bisogno di ulteriori ricerche, specie per quanto riguarda le giunzioni. (Fig. 30)

Figura 29 - Passerella pedonale in Danimarca con cavi in CFRC prodotti in Giappone

Figura 30 - Montaggio di un impalcato in FRC su travi in acciaio esistenti

Attualmente il costo dei compositi è 20÷30 volte superiore a quello dell'acciaio armonico, ma è facile prevedere che in futuro calerà fino a rendere questi materiali competitivi, specie nel caso di cavi molto lunghi. Infatti il sensibile minore peso fa si che la riduzione del modulo di elasticità apparente, dovuta appunto al peso proprio del cavo, sia molto minore che nel caso dell'acciaio.

*Il contributo dei calcolatori*

Il calcolatore, oltre alla modellazione ed all'analisi di strutture sempre più complesse, tenderà ad affiancare il progettista in alcune scelte più tecniche: ciò avverrà attraverso il diffondersi di programmi esperti basati sull'analisi critica di un grandissimo numero di casi reali archiviati e che, anche se non totalmente, tenderanno a sostituire il bagaglio di esperienze personali del singolo.

Inoltre le altissime velocità raggiunte da questi mezzi di calcolo consentono sempre più di svolgere comparazioni tra schemi e scelte diverse, aiutando così il progettista ad ottimizzare le sue scelte.

Un uso affatto diverso del calcolatore sarà quello del un controllo <attivo> delle strutture in caso di sisma, di vento di forte o di altro evento eccezionale.

Potrà cioè intervenire in tempo reale regolando la risposta di organi opportuni ( ad esempio di un dispositivo antisismico ) ottimizzandone le prestazioni.

*La manutenzione*

L'ormai riconosciuta esigenza di progettare la manutenzione di un ponte spingerà sempre più verso opere composte da elementi aventi funzioni specializzate, facilmente ispezionabili e sostituibili.

Già ora gli isolatori sismici, la precompressione esterna o i ponti strallati sono esempi di questa filosofia.

Le scelte economiche dovranno essere fatte considerando non solo il costo di costruzione, ma attualizzando anche i costi di gestioni previsti per tutta la vita economica del ponte.

A questo scopo è da attendersi (e da auspicarsi) la sistematica applicazione di trattamenti protettivi anche sulle strutture in calcestruzzo, e non solo su quelle in acciaio.

**Conclusioni**

Con riferimento al fattore che maggiormente condiziona lo sviluppo nel campo dei ponti, e cioè il materiale, possiamo dire che l'ottocento è stato il secolo dei grandi ponti in acciaio; il novecento quello dei grandi ponti in calcestruzzo: il secolo appena cominciato sarà probabilmente il secolo dei materiali compositi fibrorinforzati.

Si rafforzerà inoltre il concetto di ponte-macchina, cioè di una struttura composta da più parti ciascuna delle quali svolga una funzione ben precisa in base alle proprie attitudini: scomparirà, o quantomeno si attenuerà molto, la distinzione artificiosa tra ponte metallico e ponte in calcestruzzo.

Queste parti dovranno essere ispezionabili e sostituibili, e ciò introduce il terzo aspetto che sempre più caratterizzerà la progettazione futura: l'attenzione da porre per poter garantire opere durevoli e facili da gestire.