

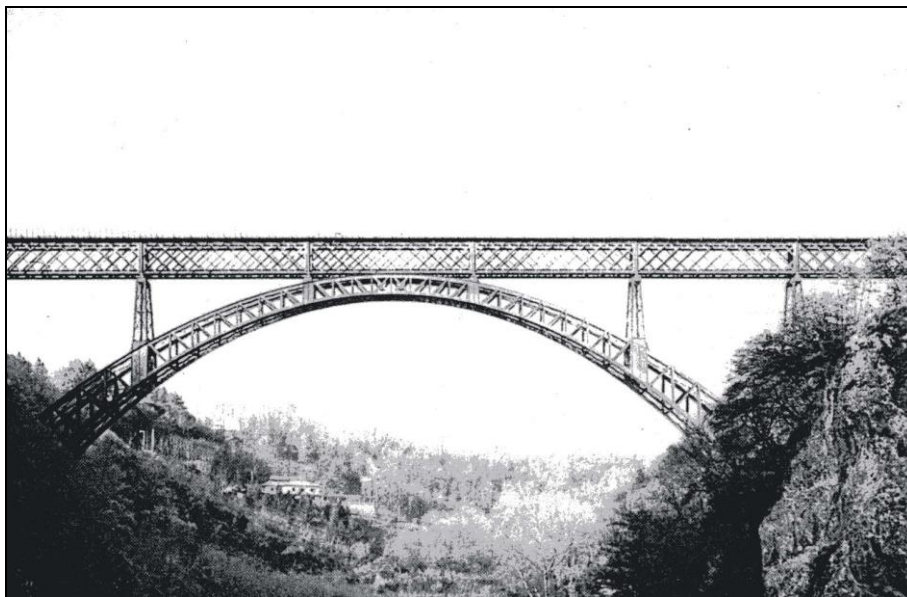
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PAVIA
DIPARTIMENTO DI MECCANICA STRUTTURALE

Rapporto Didattico RD-02/05

Aldo Cauvin, Giuseppe Stagnitto

LE STRUTTURE DI GRANDE LUCE: I PRIMI PONTI MODERNI

Sintesi storica e concetti statici



Pavia, Febbraio 2005

Aldo Cauvin, Giuseppe Stagnitto

LE STRUTTURE DI GRANDE LUCE: I PRIMI PONTI MODERNI

Sintesi storica e concetti statici

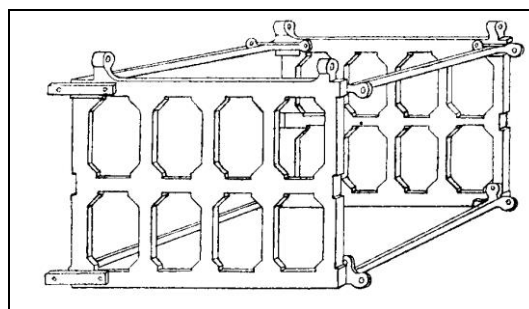
INDICE

1. I primi ponti in ghisa
2. I primi ponti in ferro
3. La tecnologia della lamiera chiodata
4. Un celebre ponte tubolare a travata: il *Britannia Bridge*
5. Ponti a parete reticolare
6. Ponti stradati e sospesi
7. I primi ponti sospesi
8. Il ponte di Brooklyn
9. Il metodo *rigoroso* di Castigliano per il calcolo dei ponti ad arco
10. Il metodo grafico dei cinque poligoni
11. Le prime teorie statiche del cemento armato
12. Uno dei primi ponti di grande luce in cemento armato
13. Bibliografia

1. I primi ponti in ghisa

Gli accorgimenti costruttivi adottati nel 1811 per la cupola *Halle au blé* e che diedero luogo a soddisfacenti risultati, furono usati dall'ing. Lamandé per costruire nel 1806 il *Ponte di Austerlitz*, sulla Senna, a Parigi, con luce pari a circa 30 metri.

Il ponte, al contrario della cupola, diede però pessima prova, e nel 1855 fu demolito per le migliaia di linee di frattura che denunciava.



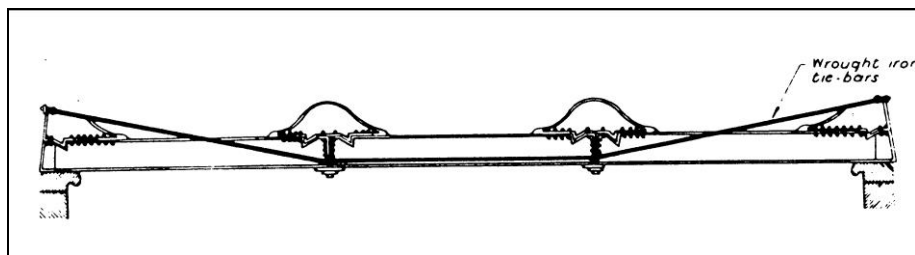
Concio in ghisa del Ponte di Austerlitz [13]

Infatti i carichi dinamici inducevano sollecitazioni flessionali che mettevano a dura prova gli elementi dei conci.

L'essenza del problema - e la conseguente necessità progettuale di ridurre le azioni flessionali negli elementi di ghisa - fu colta da Telford che utilizzò conci con parete reticolare in ghisa e da Rennie che utilizzò conci a parete piena (vedi, a questo proposito, il testo C.T.A., *Contributi alla STORIA DELLA COSTRUZIONE METALLICA*, a cura di V. Nasce, FIRENZE, 1982).

Furono costruiti ponti ferroviari anche utilizzando grandi travi in ghisa.

Nel 1847 il disastro ferroviario del *Dee Bridge* segnò la fine di questo genere di costruzioni: il progettista Robert Stephenson (figlio dell'inventore della locomotiva) fece un errore nel rinforzo delle travi illudendosi, forse, di avere simulato un vincolo esterno. L'effetto fu l'instabilizzazione del corrente superiore come mostra la figura.



Schema del ponte Dee Bridge di Stephenson, crollato nel 1847 [8]

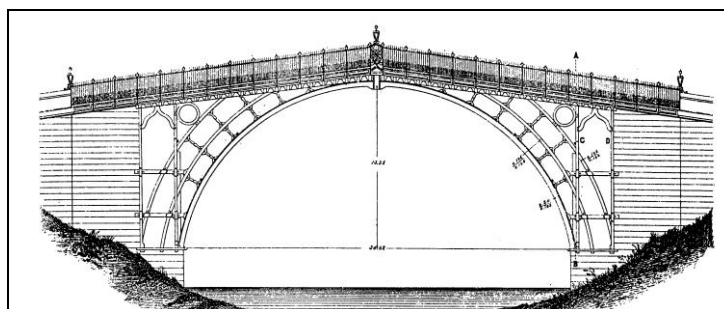
Stephenson si rivolse in seguito, come vedremo, alla nuova tecnologia della lamiera chiodata, giovandosi dell'esperienza del costruttore navale Fairbairn che aveva pubblicato i risultati delle sue numerose esperienze.

2. I primi ponti in ferro

Come noto, la produzione di ferro a partire dal minerale risale all'antichità, mentre risale al 1300 il procedimento di partire dalla ghisa, utilizzando carbone di legna.

Intorno al 1750 la famiglia Darby mise a punto un procedimento per produrre ferro *pudellato* (cioè rimescolato) di una qualità tale da poter essere tirato in barre e laminato utilizzando carbon fossile anziché carbone vegetale.

Il nuovo materiale fu utilizzato negli anni 1773-1779 per costruire il primo ponte in ferro sul fiume Severn, a Coalbrookdale, costituito da un arco semicircolare in due soli pezzi, preparati con incastri a caldo nell'officina dei Darby.

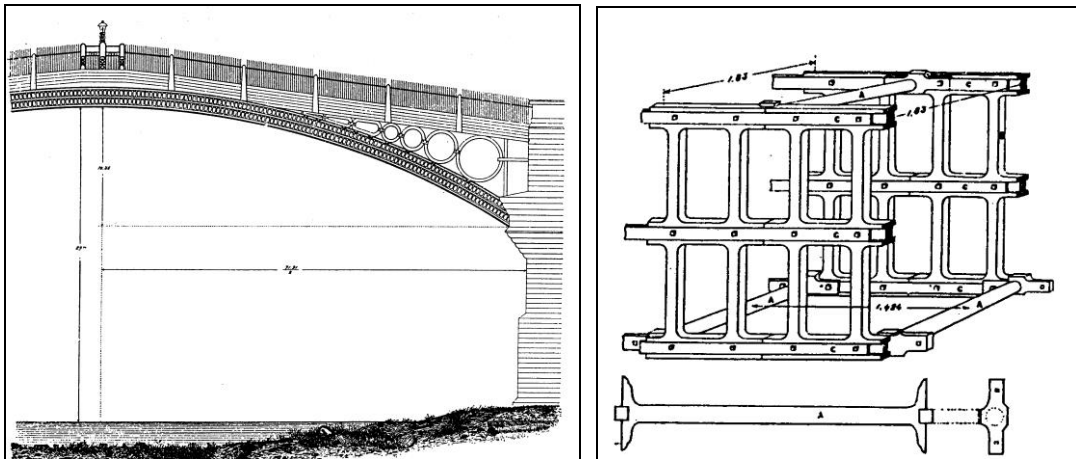


Il ponte sul Severn (1779) [9]

Il ponte fu costruito da Abramo Darby, proprietario delle ferriere Coalbrookdale, e aveva circa 30 metri di luce.

Successivamente fu costruito da Thomas Paine il ponte di Sunderland (1796): un unico arco, di luce pari a circa 70 metri, costituito di sei costole.

Oltre ai pannelli in ghisa, erano presenti barre di ferro fucinato.



Il ponte di Sunderland sul Wear (1796) [9]

Ogni costola era formata da un centinaio di pannelli che avevano la funzione di cunei, adattando alla costruzione in ferro, il sistema delle volte di pietra.

3. La tecnologia della lamiera chiodata

Contemporaneamente erano state introdotte nelle costruzioni civili le sezioni in lamiera composta chiodata, prima utilizzate solo nelle costruzioni navali.

Queste sezioni, per la sottigliezza delle pareti, erano però esposte a fenomeni di instabilità che nelle travi erano osservate per la prima volta (il cosiddetto *imbozzamento*).

Le esperienze connesse alla costruzione del ponte *Britannia* chiariranno l'essenza del fenomeno che non dipendeva da una debolezza intrinseca del materiale usato, ma era invece legato, come detto, a fenomeni di instabilità e quindi alle forme e agli spessori.

La sperimentazione e il ricorso a modelli resero possibile affrontare problemi che il calcolo inquadrerà soltanto nel secolo successivo.

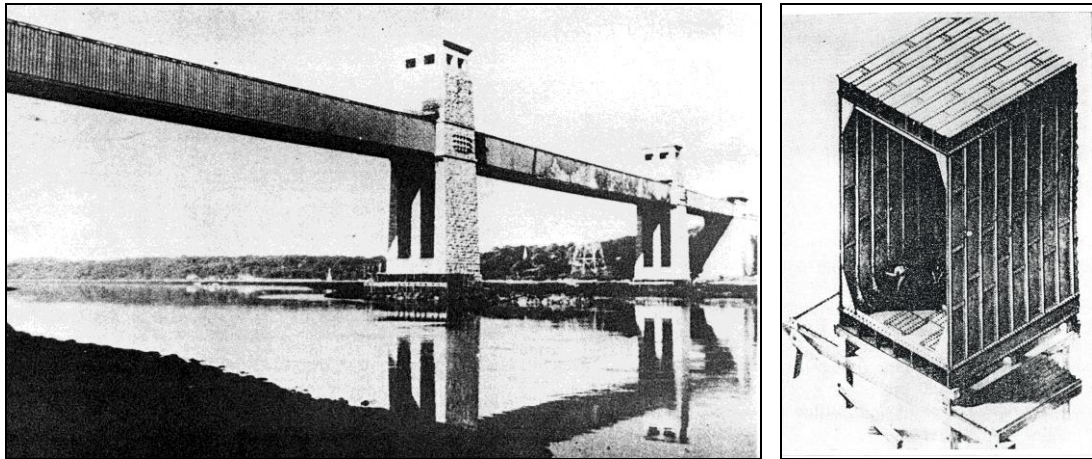
4. Un celebre ponte tubolare a travata: il *Britannia Bridge*

E' un ponte a quattro luci, di cui le estreme di m 70 e le centrali di m 140: il primitivo progetto di un ponte ad archi fu rigettato dal Parlamento perché impediva la libera navigazione.

Nel 1845 Robert Stephenson illustrò a William Fairbairn, costruttore di navi e di edifici industriali (e, come già detto, rinomato sperimentatore nel suo laboratorio di Manchester) il progetto di un grande tubo di lamiera, sospeso da catene, tale da accogliere i binari ferroviari.

L'eliminazione delle catene fu probabilmente dovuta a Fairbairn anche se le torri furono costruite in modo da potervi eventualmente sistemare le catene stesse.

Hodgkinson lavorò alle esperienze che precedettero il progetto.



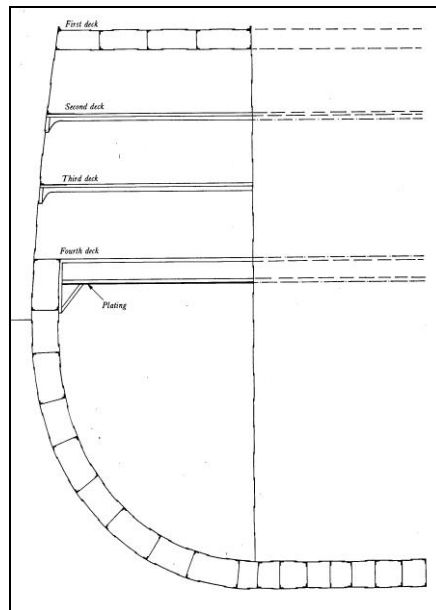
Il Britannia Bridge e la sua sezione [8]

L'esperienza del Britannia fu fondamentale per tutta la tecnica delle costruzioni:

- si riconobbe che la debolezza del ferro a compressione non era una caratteristica del materiale, come prima di allora si credeva, ma dipendeva dall'instabilità delle sottili pareti laminate;
- si risolse il problema operando sulla forma della sezione ed apponendo nervature verticali; fu determinante in proposito l'intervento del Jourawski;
- si affrontò il tema iperstatico della trave su più appoggi: la continuità della struttura tubolare del Britannia Bridge imponeva un calcolo di questo genere che stimolò il Clapeyron a formulare il suo famoso metodo delle equazioni dei tre momenti. Questo metodo di calcolo dava ai progettisti uno strumento per calcolare le incognite iperstatiche in una trave continua, assai più agevole di quello, fondato sull'integrazione della linea elastica, indicato in precedenza dal Navier.

Fu realizzata un'ardita struttura completamente nuova in un'epoca in cui era scontato il riferimento alle costruzioni già realizzate.

Nel 1858 Brunel varò la nave Great Eastern lunga 211 metri (oltre il doppio della maggior nave allora esistente): come scrive il Prof. Nasce (C.T.A., *Contributi alla STORIA DELLA COSTRUZIONE METALLICA*, FIRENZE, 1982) "con la Great Eastern, costruita sull'esempio del Ponte Britannia, il debito che l'ingegneria civile aveva contratto quando assunse da quella navale la tecnologia della lamiera chiodata, era stato abbondantemente saldato".



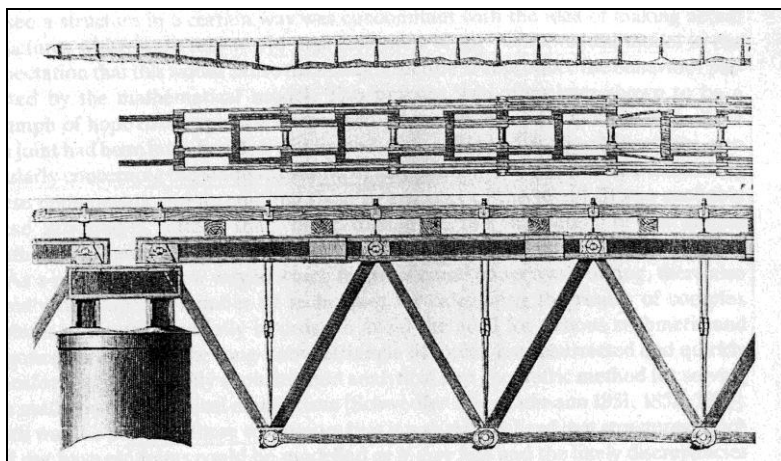
Sezione della Great Eastern [8]

Nella sezione è visibile il doppio fondo che si estende a tutta l'*opera viva* dello scafo. Questa soluzione, che aumentava sensibilmente il grado di sicurezza della nave contro gli ostacoli, non è stata più adottata nelle navi successive.

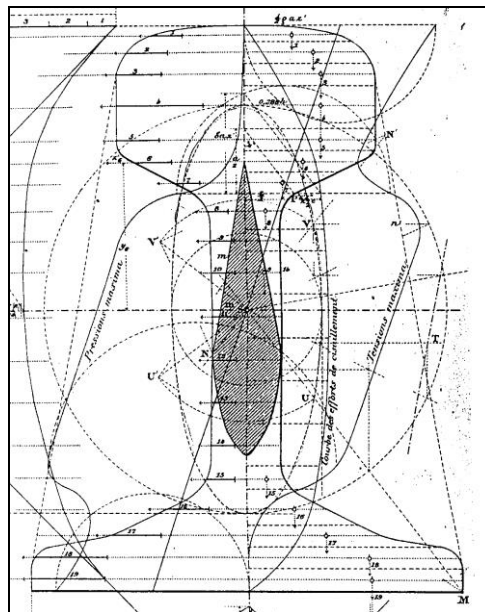
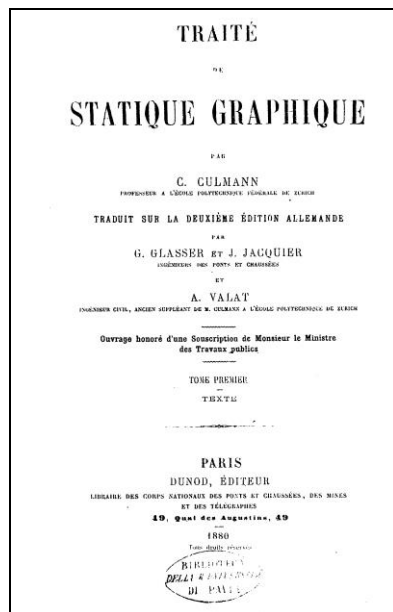
La *Great Eastern* fu anche utilizzata per stendere il primo cavo telegrafico sottomarino tra l'Europa e gli Stati Uniti.

5. Ponti a parete reticolare

Parallelamente ai ponti tubolari in lamiera si sviluppò la tecnica dei ponti a travata reticolare: per queste strutture occorre- vano quei metodi di calcolo semplici e chiari che saranno forniti da Culmann e Ritter.



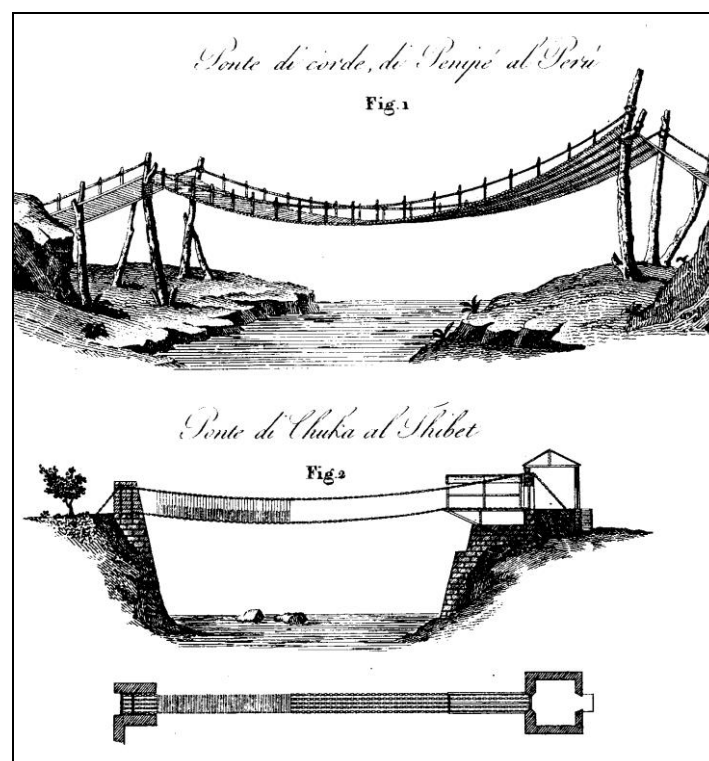
Trave reticolare diffusa da Warren in Inghilterra intorno al 1850 [16]



Frontespizio e tavola dalla traduzione francese (1880) della seconda edizione del trattato di Culmann

6. Ponti strallati e sospesi

I ponti sospesi europei e americani con catene o cavi metallici del principio dell'ottocento sono ispirati a ponti molto più antichi sospesi a corde vegetali, o a striscie di cuoio, o a catene in ferro.

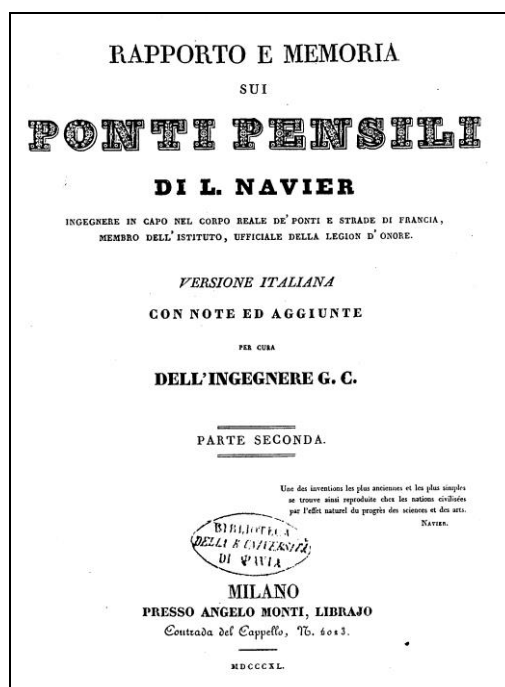


Disegni contenuti nel trattato sui ponti sospesi di Navier (1823) [20]

Anche il Navier, nel sua famosa memoria sui ponti sospesi, sentì la necessità di risalire ai prototipi ovvero ai ponti delle regioni andine, nell'America del Sud ed ai ponti della Cina e del Tibet con sospensioni in ferro a catena *"une des inventions les plus anciennes et les plus simples se trouve ainsi reproduite chez les nations civilisées par l'effet naturel des sciences et des arts"* (Navier, Rapport a Mr. Becquey et mémoire sur les pontes suspendus, Paris, 1823, tradotto in italiano nel 1840 dall'ing. Corti).

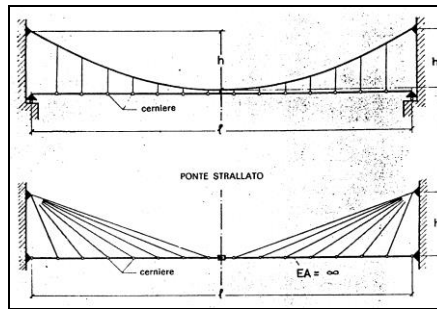
Nella prima metà dell'800 si ebbero insuccessi dei primi ponti strallati: nel 1818 un ponte pedonale sul fiume Tweed presso Dryburg Abbey crollò, provocando la morte di 50 persone.

Il Navier, incaricato di indagare, sconsigliò questi ponti nel già citato rapporto al Consigliere di Stato, e consigliò invece quelli classici sospesi con cavo parabolico, di cui egli aveva dato la teoria per il calcolo.



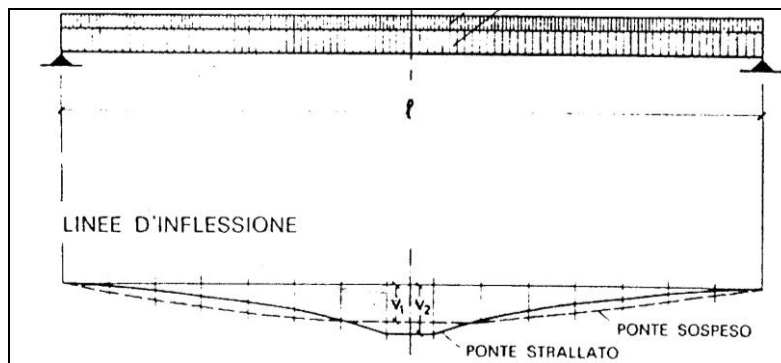
Frontespizio della traduzione italiana (1840) del trattato di Navier [20]

Dopo la relazione del Navier i ponti strallati furono proscritti fino alla loro riscoperta da parte di Dishinger negli anni 30. Recentemente sono emersi i vantaggi tecnici ed economia dei ponti strallati per le grandi luci e sono state realizzate opere di grande impegno, come, ad esempio, il Ponte di Normandia per il quale sono state utilizzate insieme le tecnologie dell'acciaio e del cemento armato precompresso (a cavi esterni).

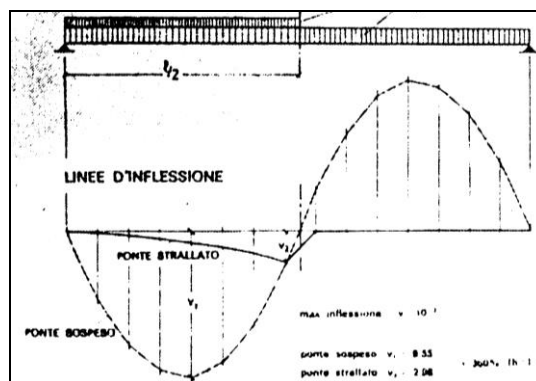


Confronti tra ponte sospeso e strallato con identiche luci e saette [15]

Dagli ormai classici studi del Prof. Leonhardt si traggono esempi che mostrano il differente funzionamento statico di un ponte sospeso e di un ponte strallato: quando il carico sull'impalcato riguarda solo una parte della lunghezza del ponte, il cavo parabolico di un ponte sospeso ritrova l'equilibrio solo grazie ad ampie deformazioni flessionali della travata. In un ponte strallato, invece, i carichi sono portati direttamente sulle travi senza che l'equilibrio richieda deformazioni flessionali rilevanti della travata.



Deformate nell'ipotesi di carico variabile distribuito sull'intera lunghezza del ponte [15]



Deformate nell'ipotesi di carico variabile distribuito su metà della lunghezza del ponte [15]

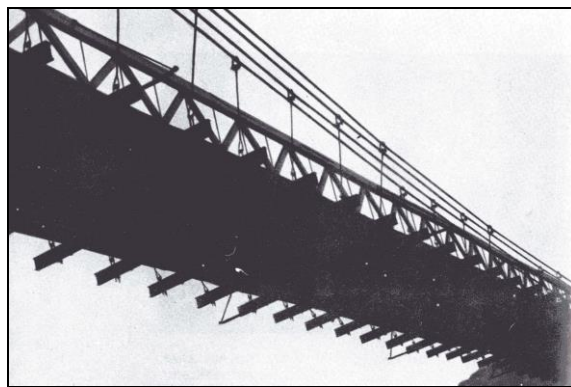
Si noti, per inciso, che l'evoluzione dei metodi di progettazione strutturale dei ponti ha portato alla definizione di un numero ben definito di tipologie strutturali.

Nella fase iniziale della progettazione assume importanza la scelta della tipologia perché tale scelta influenza in modo determinante il costo e le prestazioni dell'opera finita.

Appare pertanto conveniente, nello sviluppo di questo tipo di progettazione, effettuare tali scelte preliminari in modo razionale e può essere fatto anche utilizzando sistemi esperti, dedicati alla progettazione strutturale (A. Cauvin, G. Stagnitto, *A model oriented Expert System for the preliminary design of bridge structures*, First workshop of EG-SEA-AI, EPFL, Lausanne, 1994).

7. I primi ponti sospesi

Questi ponti potevano seguire la tecnologia a sospensione di catene ovvero tramite funi di fili di ferro: tra i primi ponti di quest'ultimo tipo ricordiamo quello sul Rodano (1825) ad opera di Marc Seguin, il maggiore dei fratelli Seguin (ancora usato oggi come passerella pedonale).



Il ponte di Seguin sul Rodano [18]

Furono fatti studi (dal Vicat e dal Navier) sulla convenienza dei due sistemi e risultò più conveniente l'adozione dei cavi, meno pesanti delle catene.

Nel 1836 Brunel costruì il ponte sul fiume Avon, presso Bristol.

Come osserva il Guidi nel suo trattato di Scienza delle Costruzioni, questo tipo di ponti sospesi - come quelli sul Rodano o quello famoso di Friburgo (1834) - non avevano un impalcato abbastanza rigido da *"impedire le oscillazioni prodotte dal passaggio del carico accidentale in conseguenza del continuo cambiamento di forma della funicolare, oscillazioni che divengono pericolosissime quando il loro ritmo concorda con quello delle sollecitazioni"*.

Nel 1851 il ponte d'Angers carico di circa 500 soldati crollò, provocando la morte di oltre la metà di essi, a causa dello strappo di una delle gomene di ritenuta.

I cavi di ancoraggio erano alloggiati in pozzi: per prevenire l'ossidazione di essi si usavano a volte tratti di catene, meno vulnerabili, ed, erroneamente, si riempivano i pozzi di calce idrata.

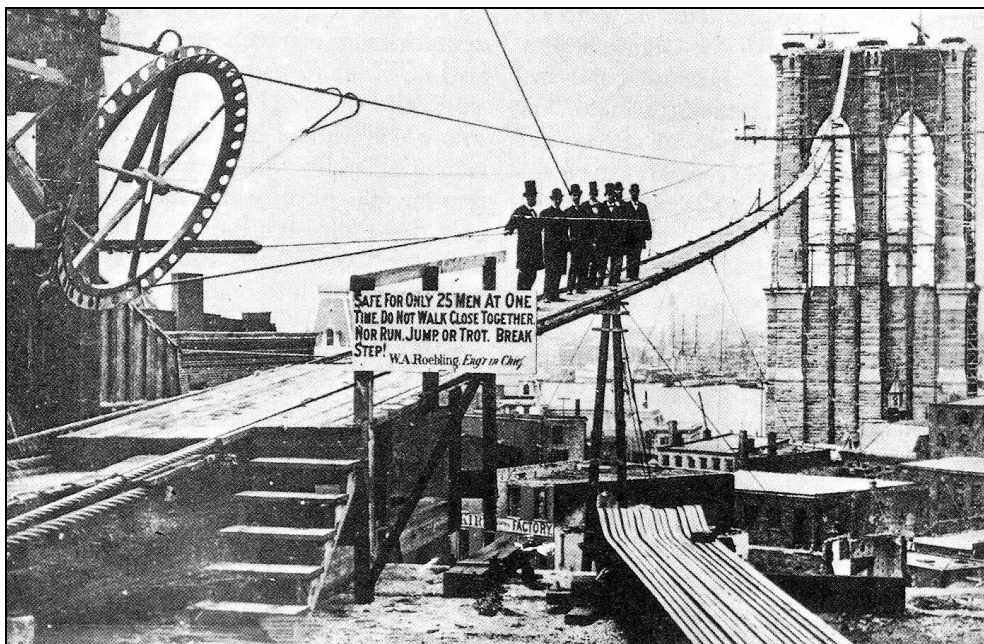
Fu per l'ossidazione di uno di cavi di ancoraggio sottoposto alle sollecitazioni di carico parziale provocate dal movimento dei soldati che crollò il ponte di Angers: il disastro rallentò molto in Europa la realizzazione dei ponti sospesi.

In America Roebling applicò su scala più vasta il principi di Seguin e costruì il ponte di Brooklyn.

8. Il ponte di Brooklyn

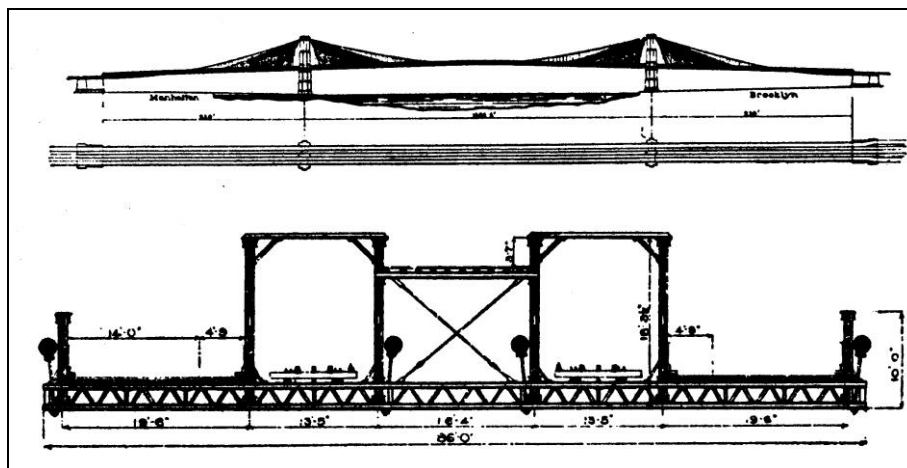
Il progettista John Roebling era nato in Germania ed aveva studiato architettura ed ingegneria a Berlino.

In America costruì una fabbrica per cavi di acciaio; nel 1841 ideò il metodo usato ancora oggi: invece di unire a terra tutti i fili e poi sollevarli egli pensò di costruire il cavo avvolgendo trefolo dopo trefolo attorno ad una guida, utilizzando un dispositivo che si muoveva avanti e indietro.



Inizio dell'avvolgimento dei cavi (1877) [21]

Roebling ebbe l'intuizione ingegneristica di aggiungere ai cavi verticali di sospensione anche dei cavi inclinati (stralli) che impediscano movimenti alternati del piano stradale così da arrestare le oscillazioni aerodinamiche di torsione.



Prospetto, pianta e sezione del Ponte di Brooklyn (1883) [19]

L'anno in cui il progetto del ponte fu approvato (1869) John Roebling si ammalò di tetano e morì.

La costruzione fu guidata dal figlio Washington Roebling e dalla moglie di lui, Emily, che egli aveva inviato un anno in Europa a studiare l'uso dei cassoni pneumatici subacquei per le fondazioni dei ponti.

Erano casse ermetiche senza fondo e dal tetto solido (quelli del ponte di Brooklyn erano di 50 per 30 m e dovevano scendere fino a 22 m sotto il livello dell'acqua). In essi veniva pompata aria compressa per impedire che l'acqua invada la camera di scavo.

Il peso della torre costruita sopra le faceva affondare nel suolo (i bordi inferiori erano rivestiti di acciaio che terminava in lame taglienti).

Gli operai dovevano passare attraverso una camera di compensazione: in queste camere Washington fu colpito da embolia e restò paralizzato.

Proseguì la direzione usando un binocolo dalla sua casa, mentre la moglie trasmetteva gli ordini in cantiere. Nel 1872 i casseri avevano raggiunto il fondo e furono riempiti di calcestruzzo. Nel 1876 furono concluse le due torri. Nel 1883 il ponte era terminato.

Nel 1948 il ponte fu rinforzato con una struttura a telaio nella sezione trasversale.

9. Il metodo rigoroso di Castigliano per il calcolo dei ponti ad arco

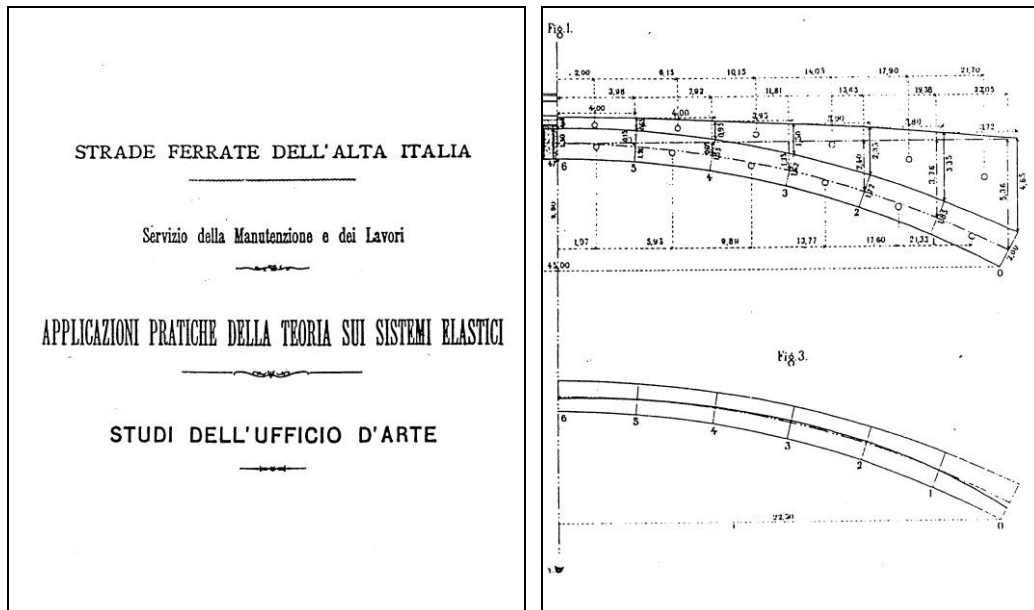
Nel 1878 Castigliano è capo sezione dell'Ufficio dell'Arte delle Ferrovie dell'Alta Italia a Milano.

Nella memoria *"Applicazioni pratiche della teoria sui sistemi elastici"* egli applica il suo metodo analitico al ponte strallato sulla Dora a Torino, progettato dall'ing. Mosca.

Dopo aver suddiviso l'arco in più tronchi, Castigliano esprime il lavoro di deformazione in funzione delle incognite iperstatiche ed eguaglia a zero le derivate rispetto alle incognite stesse (esprimendo con questo la presenza dei vincoli) ottenendo il sistema risolvibile.

Nel calcolo del lavoro di deformazione egli considera la diversa deformabilità della pietra e della malta interposta.

Egli imposta il calcolo in modo da ottenere una seconda approssimazione escludendo le porzioni di sezione che entrano in trazione, e per questo può, certamente, essere considerato il pioniere dell'*analisi non lineare*.

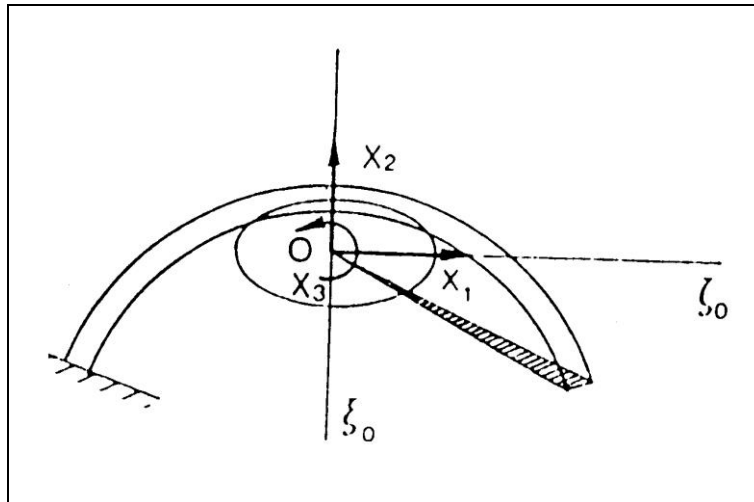


Frontespizio e figura tratti dalla Memoria di Castigliano

Se cioè, nel primo calcolo egli ha supposto l'arco incastrato (cioè *“premente sulle spalle con tutta l'ampiezza delle sue faccie di posa”*), poi *“bisognerà riprendere il calcolo supponendo ridotte le altezze dei giunti a quelle sole parti che dal primo calcolo son risultate premute. Queste altezze si potranno ancora correggere in un terzo calcolo e così di seguito.”*

10. Il metodo grafico del cinque poligoni

Il metodo proposto da Culmann e sviluppato da Ritter (e divulgato in Italia dal Guidi) è fondato sulla costruzione dell'ellisse di elasticità e la conseguente possibilità di ottenere traslazioni senza rotazioni o rotazioni senza traslazioni della sezione terminale dell'arco isostatizzato.



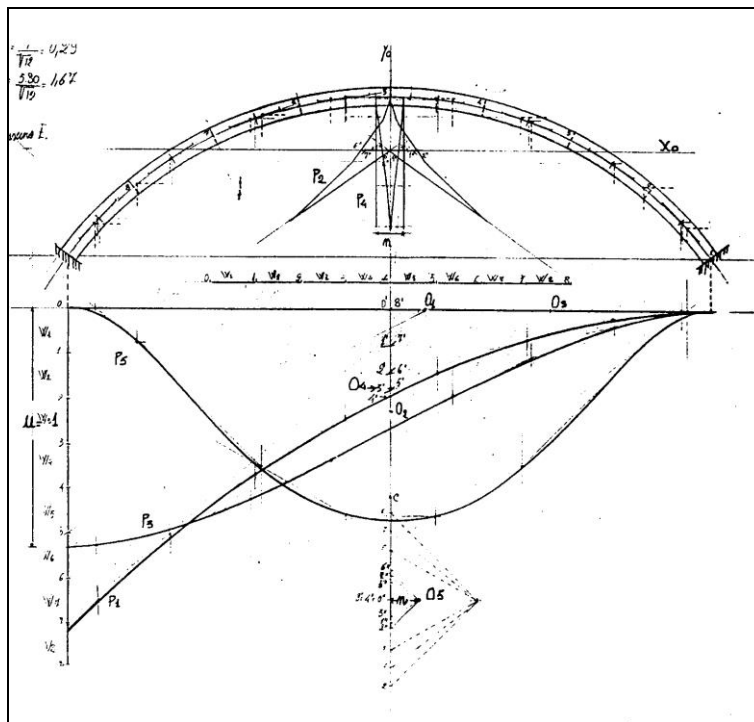
Sistema di coordinate principali dell'arco iperstatico

Con il metodo di Ritter la reazione di incastro R è allora scomposta in due forze X_1 e X_2 passanti per il baricentro elastico e in una coppia X_3 che è il momento di trasporto della reazione stessa rispetto al baricentro elastico.

Le linee di influenza di queste speciali componenti della reazione R danno, per ogni posizione del carico, il valore della reazione stessa e quindi permettono il calcolo della struttura (resa isostatica). La tecnica di calcolo è detta dei cinque poligoni.

Sono riconoscibili nella figura, da noi tracciata a seguito delle lezioni sui ponti tenute a Pavia dal Prof. Macchi:

- il poligono p_1 , relativo a X_3 ;
- il poligono p_3 , relativo a X_2 ;
- il poligono p_5 , relativo a X_1 .



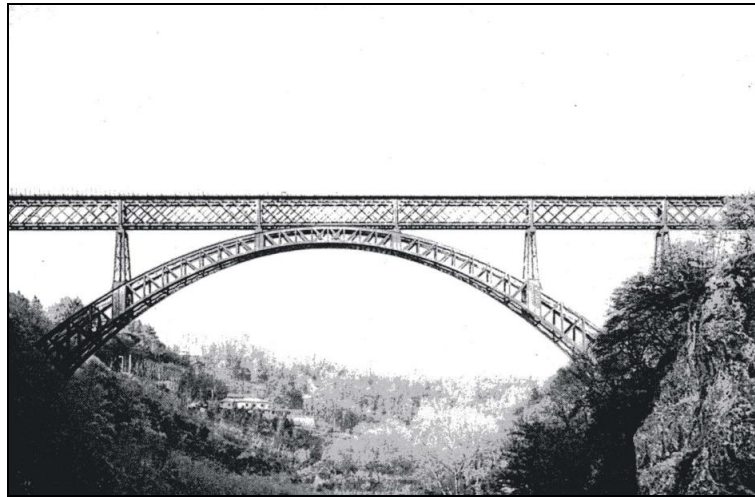
Il metodo dei cinque poligoni

L'incognita reazione d'incastro è scomposta in una componente verticale ed orizzontale passanti per il centro dell'ellisse (baricentro elastico) e in una coppia che rappresenta il momento di trasporto della reazione stessa rispetto al baricentro elastico.

Per ogni posizione della forza si ricavano graficamente le linee di influenza di queste componenti della reazione iperstatica.

In Italia si erano costruiti diversi ponti in ferro, tutti a travata rettilinea: sulle riviste straniere si criticavano le scelte dell'ingegneria italiana che mostrava di non conoscere i metodi del Culmann, dimostranti la maggiore razionalità dell'arco.

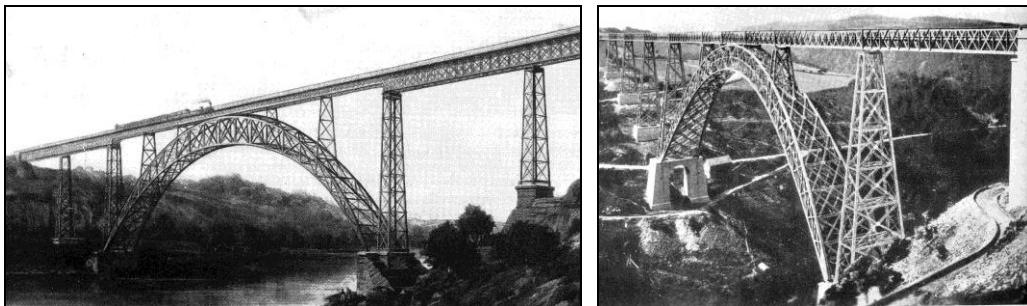
Il ponte di Paderno sull'Adda, di 150 m di luce e superiore travata rettilinea di 266 m, costruito negli anni 1887-89, fra le maggiori opere metalliche tuttora in esercizio in Europa, fu integralmente studiato e progettato secondo la teoria dell'ellisse di elasticità dall'ingegnere capo delle Officine di Savigliano, Ing. Rothlisberger, che era stato allievo di Culmann al Politecnico di Zurigo.



Il ponte di Paderno sull'Adda (1889)

Il ponte conquistò il terzo posto per lunghezza della luce (dopo i due ponti di Eiffel sul Douro in Portogallo di 165 m e sul Garabit in Francia di 160 m).

Gli archi di Eiffel, parabolici a due cerniere, hanno una sezione variabile che aumenta di spessore andando verso la chiave, diminuendo però di profondità.

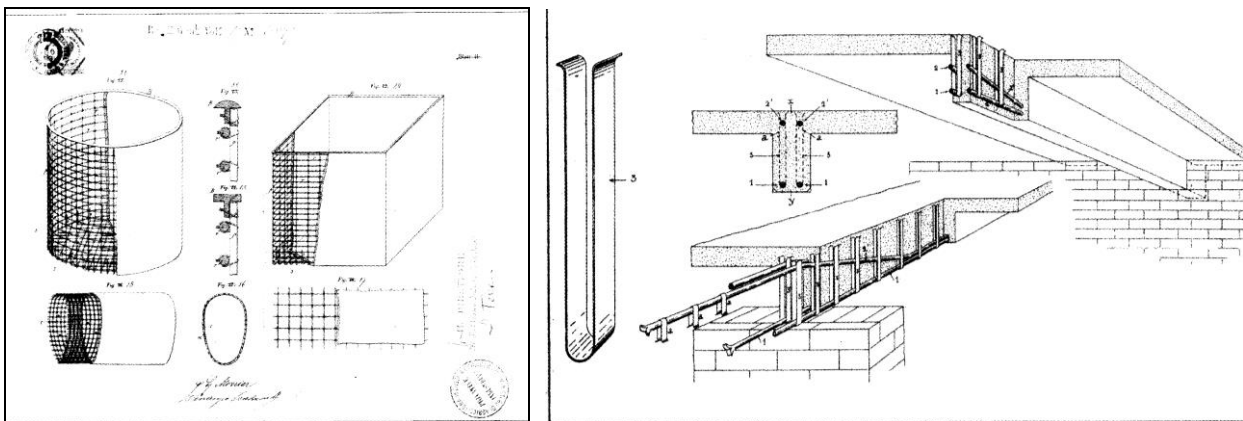


Ponte sul Douro (1877) e Ponte di Garabit (1884) [18]

11. Le prime teorie statiche del cemento armato

Come noto il cemento armato è fondato sull'associazione di acciaio e di calcestruzzo; le origini della tecnica non sono ben definiti: i primi manufatti erano barche e vasi da fiori, oltre che strutture portanti. Inoltre nei primi brevetti più che di cemento armato è illustrata la tecnica costruttiva oggi definita del *ferro-cemento*.

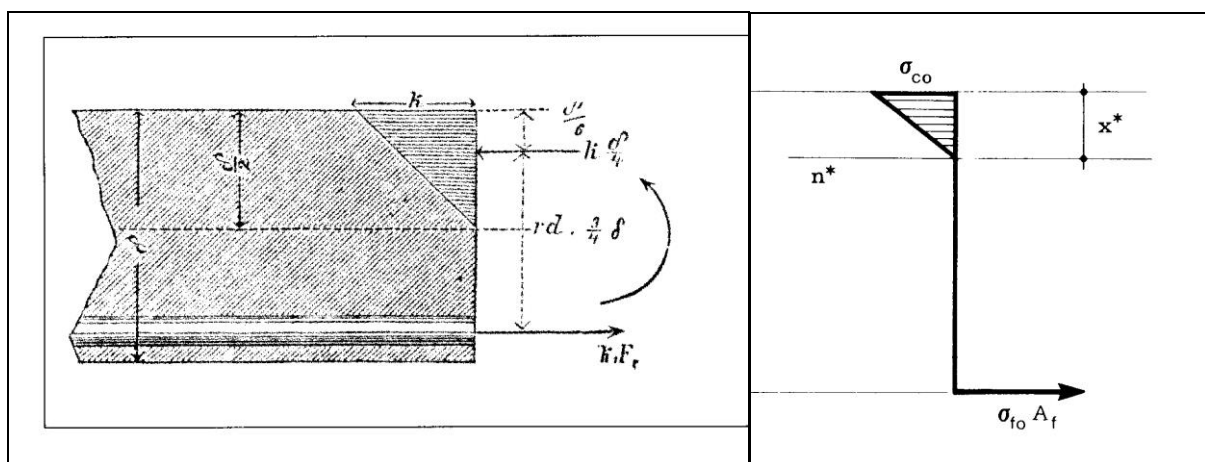
Nel 1879 Hennebique aveva depositato il primo brevetto del suo metodo costruttivo che combinava ferro e calcestruzzo. Il metodo costruttivo era pubblicizzato per la proprietà di resistere al fuoco.



Disegno di un brevetto di Monier del 1883 e di un brevetto di Hennebique del 1897 [3]

Il metodo di Koenen (1886)

A Koenen, funzionario delle Province Renane, è dovuto il primo tentativo di dimensionamento per sezioni inflesse in cemento armato.



Il primo metodo per il calcolo del cemento armato: metodo di Koenen (1886) [1]

Nel suo metodo (1886) la posizione dell'asse neutro x^* è fissata a metà dell'altezza H della sezione in calcestruzzo e non dipende dal quantitativo di armatura. Il braccio interno di leva è assunto pari a $\frac{3}{4} \cdot H$.

E' imposto l'equilibrio alla traslazione uguagliando la trazione del ferro e la compressione del calcestruzzo e quindi è imposto l'equilibrio alla rotazione (seguendo l'ipotesi errata per cui calcestruzzo ed acciaio raggiungessero contemporaneamente il valore della loro tensione ammissibile).

Non è considerata alcuna aderenza tra armatura e calcestruzzo, tuttavia è individuato il principio per cui l'acciaio assorbe la trazione e il calcestruzzo la compressione.

Con simboli moderni, (considerando unitaria la larghezza b della sezione):

$$\sigma_{fo} \cdot A_f = \sigma_{co} \cdot \frac{x^*}{2}$$

$$\sigma_{co} \cdot \frac{x^*}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot H = M$$

Poiché: $x^* = \frac{H}{2}$, si ottiene:

$$\sigma_{fo} \cdot A_f = \sigma_{co} \cdot \frac{H}{4}$$

$$\sigma_{co} \cdot \frac{3}{16} \cdot H^2 = M$$

Si potevano così ricavare l'altezza della sezione e l'area del ferro:

$$H = 2,31 \cdot \sqrt{\frac{M}{\sigma_{co}}}$$

$$A_f = \frac{\sigma_{co}}{\sigma_{fo}} \cdot \frac{H}{4}$$

Le tensioni considerate *ammissibili* per il calcestruzzo e per l'acciaio erano le seguenti:

$$\sigma_{co} = 30 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\sigma_{fo} = 1.000 \frac{kg}{cm^2}$$

Il metodo di Hennebique (1892)

In Italia il sistema Hennebique fu commercializzato da Torino a cura dell'Ing. Porcheddu, nel cui studio lavorò il giovane ing. Arturo Danusso, allievo del Guidi.

Il suo metodo di calcolo per le sezioni inflesse in c.a. (verso il 1892) era racchiuso in un piccolo codice, interno allo studio.

Danusso ricorda lo stupore che ebbe quando fu ammesso a leggere quel codice.

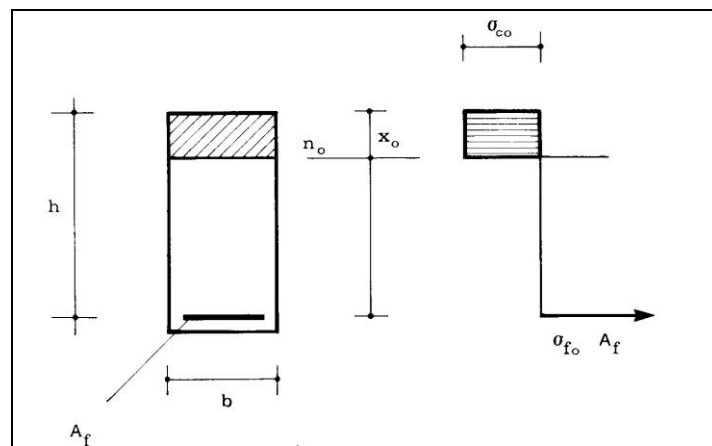
Le formule ottenute derivavano da un procedimento che non rispettava né la congruenza né l'equilibrio traslazionale.

Scriverà Danusso: "Il momento flettente si riteneva equilibrato da due forze contrarie, ma di diversa grandezza, ciascuna delle quali, riferita al presunto asse neutro, provvedeva chissà perché a compensare la metà di quel momento, ricostruendo così su quel mancato equilibrio alla traslazione una parvenza di equilibrio globale alla rotazione".

L'altezza dell'area compressa era ricavata in base all'ipotesi che essa dovesse equilibrare metà del momento agente.

La tensione considerata era quella *media*, ammettendo valori superiori nelle fibre estreme della sezione.

Fissata l'altezza della sezione H (e quindi l'altezza utile h) l'area del ferro si ricavava con l'equilibrio alla rotazione rispetto all'asse neutro (erroneamente) ricavato.



Il metodo di Hennebique (1892)

Con simboli moderni:

$$\sigma_{co} \cdot b \cdot x_o \cdot \frac{x_o}{2} = \frac{M}{2}$$

$$\sigma_{fo} \cdot A_f \cdot (h - x_o) = \frac{M}{2}$$

Si potevano così ricavare l'altezza della zona compressa e l'area del ferro:

$$x_o = \sqrt{\frac{M}{b \cdot \sigma_{co}}}$$

$$A_f = \frac{M}{2 \cdot (h - x_o) \cdot \sigma_{fo}}$$

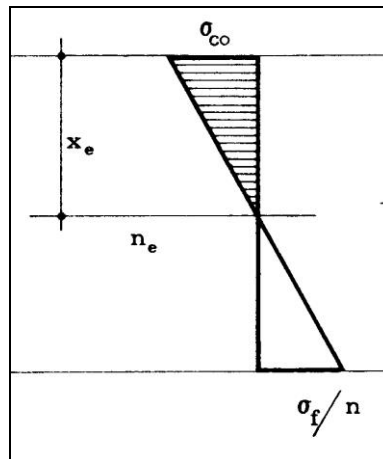
Le tensioni considerate *ammissibili* per il calcestruzzo e per l'acciaio erano le seguenti:

$$\sigma_{co} = 25 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\sigma_{fo} = 1.000 \frac{kg}{cm^2}$$

Il metodo Coignet e De Tedesco (1894)

Nel 1894 gli ingegneri Coignet e De Tedesco pubblicano una teoria per il calcolo del cemento armato nella quale l'area dell'armatura è amplificata mediante un coefficiente di omogeneizzazione (E. Coignet, N. De Tedesco, *Du calcul des ouvrages en ciment avec ossature métalliques*, Mémoires et Comptes Rendus des Travaux de la Société des Ingénieurs Civils, 1894 p. 284-363).



Il metodo Coignet e De Tedesco (1894)

Dall'ipotesi di perfetta aderenza tra i due materiali ($\varepsilon_s \equiv \varepsilon_c$) segue:

$$\frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{\sigma_c}{E_c} \rightarrow \sigma_s = \frac{E_s}{E_c} = n$$

La tensione dell'acciaio è quindi pari alla tensione che si avrebbe nella fibra di calcestruzzo alla stessa altezza, amplificata del coefficiente di omogeneizzazione n , convenzionalmente assunto pari a 10.

L'altezza della zona compressa (indicata con x_e) si ottiene risolvendo la seguente equazione alla traslazione:

$$\sigma_{co} \cdot \frac{b \cdot x_e}{2} - \sigma_f \cdot A_f = 0$$

Dall'andamento lineare delle tensioni segue che la tensione nella fibra di calcestruzzo all'altezza dell'armatura tesa varrebbe (per la similitudine dei triangoli):

$$\sigma_f = n \cdot \frac{h - x_e}{x_e} \cdot \sigma_{co}$$

avendo indicato, al solito, l'altezza utile con il simbolo h .

Sostituendo questa espressione di σ_f nell'equazione di equilibrio alla traslazione, e semplificando, si ottiene un'equazione di secondo grado:

$$b \cdot x_e^2 + 2 \cdot n \cdot A_f \cdot x_e - 2 \cdot n \cdot A_f \cdot h = 0$$

La sua radice positiva è:

$$x_e = n \cdot \frac{A_f}{b} \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b \cdot h}{n \cdot A_f}} \right)$$

Ricavata la x_e , il momento d'inerzia della sezione parzializzata rispetto all'asse neutro (che in flessione semplice è anche asse baricentrico) è dato dalla formula seguente, che somma i contributi della sezione rettangolare compressa in cls e della sezione di acciaio tesa *omogeneizzata*, vale a dire amplificata di n :

$$J = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x_e^3 + n \cdot A_f \cdot (h - x_e)^2$$

La tensione nell'acciaio teso è:

$$\sigma_f = n \cdot \frac{M \cdot (h - x_e)}{J}$$

Le tensioni considerate *ammissibili* per il calcestruzzo e per l'acciaio erano le seguenti:

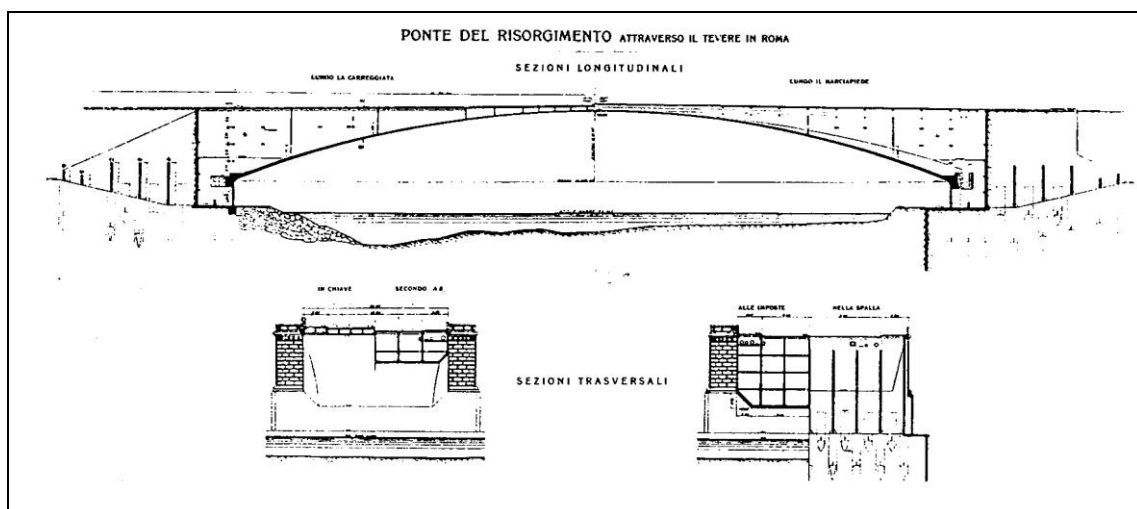
$$\sigma_{co} = 40 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\sigma_{fo} = 1.000 \frac{kg}{cm^2}$$

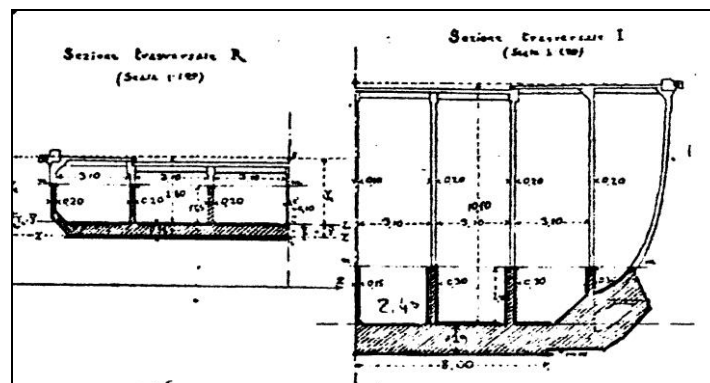
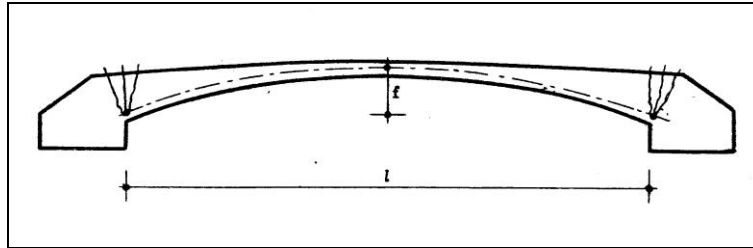
12. Uno dei primi ponti di grande luce in cemento armato

Hennebique fu autore di notevoli opere che dimostravano le potenzialità della nuova tecnica costruttiva.

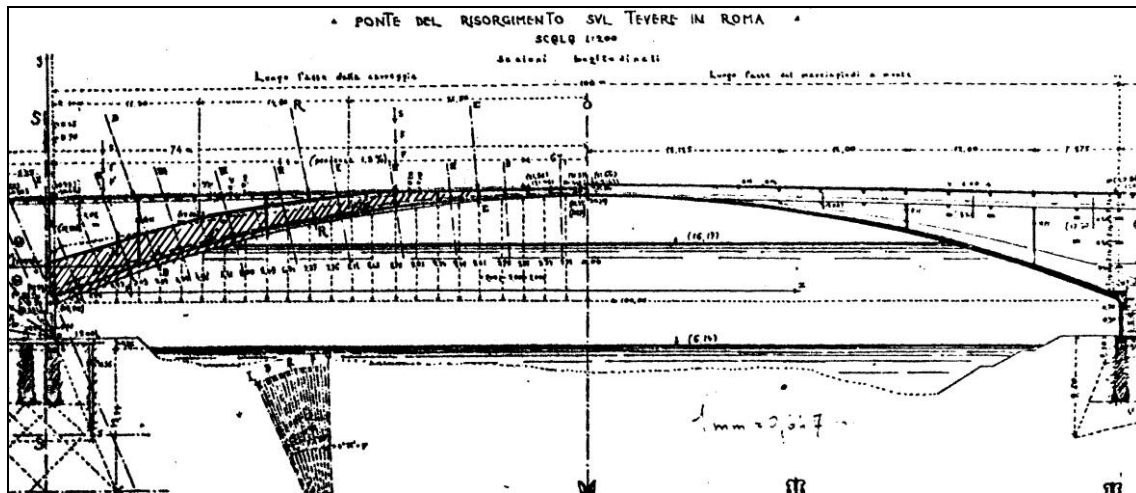
Una delle più belle opere di Hennebique è il *Ponte del Risorgimento* sul Tevere a Roma (1910): un'arcata di 100 metri di luce con 10 metri di freccia.



Il Ponte del Risorgimento di Hennebique a Roma



La spezzata identificante l'estradosso della zona resistente “fu condotta in modo da escludere dalla resistenza il calcestruzzo compreso nella zona interessata dal giunto di dilatazione alle reni, nonché quello della zona ove il getto ha spessore molto ridotto e **le tensioni unitarie di trazione supererebbero secondo il calcolo ordinario** il limite di grandezza che può ammettersi come non accompagnato da soluzioni di continuità”.

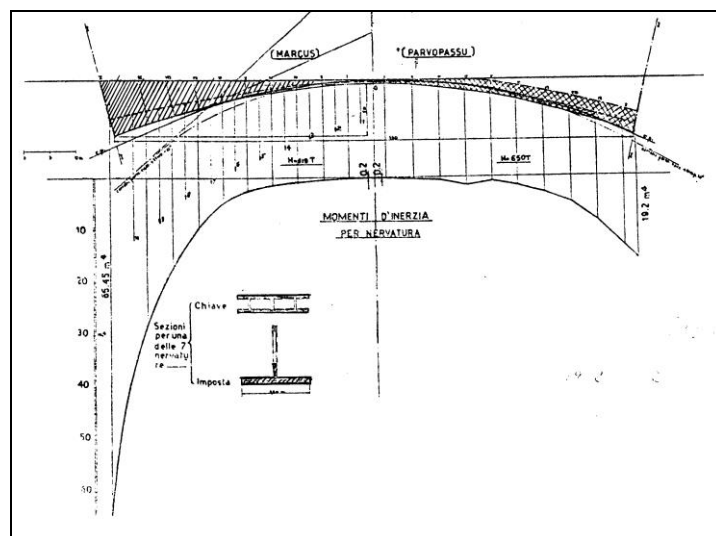


L'arco ideale nel Ponte del Risorgimento [5]

Nel 1937 Oberti applicherà gli stessi principi al Ponte di Calvene escludendo le zone di conglomerato che per effetto del carico permanente risultassero tese (all'estradosso in imposta, all'intradosso in chiave) “Si viene così a isolare nella volta un arco ideale assai meno ribassato per cui si sono ripetuti i calcoli per le varie condizioni di sollecitazione. **L'armatura corrente lungo l'estradosso di imposta, che potrebbe considerarsi come un tirante che sorregga la chiave dell'arco**, venne naturalmente tenuta in conto nei calcoli”. Lo studio di Oberti riprende quello di Parvopassu, chiarendo:

“Poiché l'Hennebique fece eseguire, nel costruire il Ponte del Risorgimento, degli intagli trasversali, nel solo beton, verso le imposte dell'arco a partire dall'estradosso e normalmente a questo, il Parvopassu esclude dal suo calcolo la porzione di conglomerato interessata da tali fenditure”

La figura seguente, tratta dalla memoria di Oberti [6], confronta l'andamento delle inerzie considerate a sezione interamente reagente (Marcus) e a sezione parzializzata (Parvopassu).



Inerzie a sezione interamente reagente e a sezione parzializzata [6]

13. Bibliografia

- [1] R. Gori, B. Simoncelli, *Early theories for calculating reinforced concrete elements*, Dipartimento Di Costruzione e Trasporti, Università di Padova, 1996
- [2] R. Nelva, B. Signorelli, *Avvento ed evoluzione del calcestruzzo armato in Italia: il sistema Hennebique*, Milano, 1990
- [3] T. Iori, *Il cemento armato in Italia dalle origini alla seconda guerra mondiale*, Roma, 2001
- [4] V. Franciosi, *Lezioni di ponti*, Napoli
- [5] C. Parvopassu, *Il Ponte del Risorgimento sul Tevere a Roma. Calcoli di stabilità*, Padova, 1914
- [6] G. Oberti, *Sul comportamento statico di archi incastrati notevolmente ribassati tipo Ponte del Risorgimento*, Milano, 1937
- [7] A. Raithel, *Costruzioni di ponti*, Napoli, 1978
- [8] C.T.A., *Contributi alla STORIA DELLA COSTRUZIONE METALLICA*, a cura di V. Nasce, FIRENZE, 1982
- [9] G. Pizzetti, A. M. Zorgno Trisciuoglio, *Principi statici e forme strutturali*, Torino, 1980
- [10] E. Torroja, *La concezione strutturale*, Torino, 1960
- [11] D. P. Billington, *The tower and the bridge*, New York, 1983
- [12] S. P. Timoshenko, *History of Strength of Materials*, New York, 1953
- [13] G. Albenga, *I ponti. La pratica*, Torino, 1953
- [14] E. Benvenuto, *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico*, Firenze, 1981
- [15] F. De Miranda, *Il ponte strallato*, Costruzioni Metalliche n.1, 1971
- [16] W. Addis, *Structural Engineering. The nature of Theory and Design*, Chichester, 1990
- [17] A. Cauvin, G. Stagnitto, *A model oriented Expert System for the preliminary design of bridge structures*, First workshop of EG-SEA-AI, EPFL, Lausanne, 1994
- [18] S. Giedion, *Spazio, tempo ed architettura*, II ed. it, Milano, 1984
- [19] D. B. Steinman, *A practical treatise on suspension bridges*, New York, 1929
- [20] L. Navier, *Rapport a Mr. Becquey et mémoire sur les ponts suspendus*, Paris, 1823 (traduzione italiana dell'Ing. Corti, 1840)
- [21] K. Frampton, *Storia dell'architettura moderna*, Bologna, 1982