

Al caro amico e collega Cerruti

Uffessore

PONTI PENSILI

ROYAL BARRON

G 65

DISSERTAZIONE E TESI

presentate

ALLA COMMISSIONE ESAMINATRICE

della R. Scuola d'Applicazione per gli Ingegneri in Torino

DA

ANGELO TESSIORE

DA CHIERI

per ottenere il Diploma

DI

INGEGNERE LAUREATO

—
1869
—

TORINO

VINCENZO BONA TIPOGRAFO DI S. M.

ALLE
AMOROSE CURE
DEGLI
OTTIMI MIEI GENITORI
ALLE
CARE SORELLE
E
A CHI MI AMA
QUESTO TENUE PEGNO D'AFFETTO
DEDICO.

PONTI PENSILI

I.

Ponti metallici in generale.

L'introduzione delle costruzioni metalliche, mentre segna un gran passo nella scala del progresso, semplificando e rendendo possibile la soluzione di pratici problemi, dischiuse altresì una nuova via al genio dell'arte, in cui può liberamente spaziare ed operare, trovando quasi sempre accoppiate l'economia, la convenienza e l'eleganza.

I ponti metallici, quantunque opere di recentissima data, si sono in breve spazio di tempo attirata tanto l'ammirazione e la simpatia dei costruttori, da conquistare un posto importantissimo fra le moderne costruzioni. Penetrati con straordinaria rapidità fin nelle più lontane regioni, ove l'industria, anche al solo stato d'embrione, incomincia a svilupparsi, adattandosi quivi allo spirito ed ai bisogni dei diversi popoli, hanno assunto innumerevoli e svariate forme: leggieri, eleganti, poco costosi, in breve tempo costrutti, doti queste in grazia delle quali vennero posti alquanto in disuso gli antichi ponti pesanti, molto più costosi e di lunghissima e difficile esecuzione.

Precisare la data della loro prima comparsa, e il nome di chi ebbe primo la fortunata idea, può formare oggetto di discussione; ma che siano una produzione del genio Anglo-Sassone, è fuori di dubbio. Agli Inglesi ed agli Americani spetta quindi il vanto d'essere stati i primi ad immaginarli, studiarli, perfezionarli, applicandoli felicemente alla risoluzione di certi problemi, da molti creduti impossibili.

Gole profondissime e scoscese, distanze relativamente grandissime senza punti d'appoggio intermedi, scogli a picco con pareti rapidissime scolpite nel vivo macigno, incagli d'ogni genere, tutto fu superato; si modificarono le vecchie forme, se ne crearono delle nuove, si diede il cambio ai materiali, ma si riuscì.

Frammezzo ad un sì gran numero di ponti svariatisimi e differenti in apparenza fra loro, non è difficile il riconoscere come questi essenzialmente possano ridursi a tre tipi distinti, avendosi così i ponti ad archi, i ponti a travate rettilinee ed i ponti pensili, i quali tutti diversificano non solo per la forma, sì ancora per la maniera con cui si cimenta la resistenza del metallo.

Ne' primi l'arco è posto sotto il suolo stradale, volge la concavità al basso, le diverse parti si fanno in ghisa, od anche in ferro e raramente in acciaio, ed in questi il metallo resiste unicamente per compressione.

Nei secondi l'arco è di raggio infinito; s'impiega esclusivamente il ferro, e debbono resistere alla flessione ed allo scorrimento trasversale.

Nei terzi invece trovasi l'arco posto superiormente al suolo stradale, colla convessità in basso, ed in questi viene cimentata la sola resistenza alla tensione: si fa quasi sempre uso del ferro, ed anche dell'acciaio, sebben rare volte.

Ai tre tipi ora accennati potrebbesi aggiungerne un quarto, che altro non è se non un sistema misto, avente un po' di tutti e tre: di questo genere sarebbero i ponti così detti *Bow-*

Strings (arco e corda), i ponti *Clapeyron*, i *Chepstow* ed altri parecchi di forme non meno strane e nuove, modificazioni tutte di quelli, motivo per cui io credo inutile intraprendere un minuto e particolareggiato esame.

L'uso dei *Bow-Strings* va sempre più estendendosi: in questi ultimi anni penetrò anche in Italia, e come esempio citerò il ponte sul Po presso Cherasco. Il migliore esemplare di questo genere di ponti è quello di Windsor, avente una luce di 65 metri.

Varcherei i ristretti confini, che consuetudinalmente si assegnano ad una breve dissertazione, s'io mi accingessi a parlare successivamente dei suaccennati sistemi di ponti in ferro: restringerò invece il vasto argomento, limitandomi a dare, per quanto permetteranno le deboli mie forze, alcuni brevi cenni intorno ai *ponti pensili*.

II.

Ponti Pensili.

—

Cenni storici.

Volendo risalire alle prime origini dei ponti pensili, non ci sarà necessario andar molto in là nelle storie. Dicesi infatti che gli Spagnuoli, sul finire del decimo quinto secolo, condotti da Cortez alla conquista del Messico, trovassero quivi rozzi ponti fatti di piccoli tronchi d'albero, posti su corde tese dall'una all'altra riva dei fiumi. Humboldt ci lasciò la descrizione del ponte di Penipé sul fiume *Chambo*, sospeso a corde fatte colla parte fibrosa della radice dell'*agave americana*: era lungo 40^m e largo 2^m,50.

Abbiamo pure la descrizione delle cosiddette *tarabite*, specie di passaggi gettati sui profondi burroni, così frequenti nelle Cordigliere delle Ande, fatte con due corde di pendenza inversa, a cui si attacca un cesto raccomandato alla fune col mezzo di una puleggia mobile, ed entro al quale si pone il passeggero; sono press'a poco le benne volanti adoperate negli sterri al taglio dell'istmo di Suez.

Venendo al nostro vecchio continente, troveremo di ponti siffatti parecchi esempi alle Indie, alla China, al Tibet, all'Indostan in cui sono già adoperate le catene in ferro, come al ponte di Chonka-cha-zum nel Thibet (1): in questo ponte sono cinque le catene, e sopportano un rozzo tavolato: intorno alla sua lunghezza si hanno le più contraddittorie notizie portateci da alcuni viaggiatori: altri lo dice lungo 46^m, ed altri 146^m; è probabile che la verità risieda frammezzo.

Un ponte di questo stesso sistema troviamo anche in Europa, sulla Tees in Inghilterra: ha 21^m di lunghezza, e la sua costruzione rimonta al 1741.

Checchè ne sia però di tutti questi ponti, che ben poca relazione hanno coi moderni, il fatto si è che il primo vero ponte pensile fu costruito in America da James Finley sul Iacob's-creek nel 1796, avente 21^m,5 di lunghezza. Si moltiplicarono rapidamente dopo d'allora in America, ma coll'unico scopo di dare passaggio ai pedoni. È solo di recentissima data, cioè nel 1820, che Samuel Brown, capitano di marina, gettò sulla Tweed, presso il porto di Berwik, un ponte sospeso capace di sostenere qualsiasi veicolo, e della portata di 110^m. Poco dopo Telford lanciavane un altro sullo stretto di Menai, che separa l'isola d'Anglesea dall'Inghilterra. La sua luce era di 150^m e l'altezza sulle maree massime di 30^m. Il buon successo coronò queste ardite intraprese. Gli Inglesi ne furono

(1) V. NAVIER — *Mémoire sur les ponts suspendus.*

entusiasmata, la fama corse per tutta Europa, e la Francia mandava uno dei più celebri ingegneri del tempo, il Navier, a studiare in Inghilterra questo nuovo genere di costruzioni. Fu allora che il Navier, dopo lungo e maturo esame, pubblicò la sua celebre *Mémoire sur les ponts suspendus*, in cui diede la teoria, e ne inculcò l'uso a tutto potere. D'allora in poi i ponti sospesi divennero comuni in tutte le regioni d'Europa; ed è certamente uno fra i più giganteschi ed arditissimi lavori di questo genere il ponte di Fribourg, che ha 246^m,26 di lunghezza, ed il cui tavolato è a 51^m al disopra del livello delle acque. Dopo d'allora i ponti pensili passarono anche in Italia; se ne costruì uno sul Po presso Casal Monferrato, ed un altro a Torino, detto *Maria Teresa*, pure sullo stesso fiume. Il primo, lungo 199^m,80, ha due luci di metri 97,40 ciascuna: la maggior lunghezza dei tiranti verticali presso la pila è di 12^m,80, mentre quella dei tiranti in prossimità delle sponde non è che di 3^m,40: ha 8 funi in filo di ferro, la cui sezione totale è di 21508 mmq.

Alcuni deplorabili fatti accaduti in questi ultimi tempi a parecchi di questi ponti, hanno alquanto diminuito l'entusiasmo, che per alcuni anni erasi mantenuto così vivo negli animi di tutti, e successe il disfavore alla generale ammirazione. Solo in America si ebbe tanta fermezza di propositi da non lasciarsi sgomentare da quelle sinistre eventualità; e l'ingegnere Roebling, lo Stephenson americano, ebbe nel 1855 l'ardimento di lanciare uno di questi ponti sul Niagara, della sorprendente portata di 250^m,45, su cui passano contemporaneamente e veicoli ordinarii e locomotive. Poco appresso ne costruiva un secondo simile sul Kentucky della portata di 373^m e ad un'altezza di 91^m,43 dal letto del fiume.

Questi ultimi splendidi fatti costituiscono una ragione eloquentissima da contrapporre alle dannose insinuazioni, che tuttodì si sollevano dalla schiera degli oppositori, tendenti a scemarne il prestigio.

III.

Descrizione.

Se si eccettuano pochissimi ponti sospesi costrutti da poco tempo in America, tutti gli altri che si costruirono, e che oggidì ancora si vanno costruendo, sono ancora quelli del capitano Brown e di Telford; lo stesso tipo, gli stessi pregi, ed i medesimi difetti.

Il tavolato del ponte è sostenuto da tiranti di sospensione, i quali alla lor volta sono portati da catene o corde in ferro, attaccate colle loro estremità a punti fissi. Ordinariamente queste catene passano sopra pile in muratura e vanno a fermarsi in modo invariabile al suolo. Per lo più le catene sono in numero pari, e disposte sui due lati del ponte simmetricamente rispetto al piano verticale che passa pel suo asse. Si hanno rarissimi esempi di ponti sorretti da una sola catena posta superiormente ai loro assi: sarebbe in questi cosa molto difficile l'ottenere il necessario equilibrio e stabilità.

Nella più parte dei casi, e quando la lunghezza del ponte non debba essere eccessiva, i sostegni che debbono portare le catene vengono eretti sulle due rive, e s'ha così una sola campata: non sono però rari gli esempi di ponti a due o più campate; in questi, oltre ai sostegni delle sponde, se ne hanno degli intermedii. Il tavolato è collocato sopra travi trasversali, poste cioè normalmente all'asse del ponte, ed aventi sezione quadrata e dimensioni tali da renderle capaci di resistere alla flessione che in esse viene sviluppata dal sovracarico. I parapetti sono pure fissati alle travi trasversali: l'ufficio loro, oltre a togliere ogni pericolo di disgrazia possibile nel passaggio, è di accrescere la rigidezza di tutto il sistema, e

di scemare così l'importanza delle oscillazioni, che, come vedremo a suo tempo, sono le cagioni prime di funestissime conseguenze. Allo scopo sempre di diminuire l'ampiezza delle oscillazioni il tavolato talvolta invece di essere orizzontale od inclinato secondo la pendenza della strada, presenta una curva leggermente parabolica colla convessità in alto.

Le travi del tavolato sono abbracciate nei loro estremi, come da una staffa, dai tiranti verticali, e questi alla lor volta vanno ad attaccarsi, mediante uncini a forma d'ancora, alle catene di sospensione. Essi sono ordinariamente corde metalliche formate da fascii di fili in ferro: spesse volte però questi tiranti hanno la sezione a semplice ed a doppio T od anche ad U, e tale sistema si adotta, come vedremo fra poco, quando vuolsi accrescere la rigidezza del ponte.

I tiranti, posti simmetricamente rispetto al piano verticale che passa per l'asse del ponte, non debbono mai essere più di due su d'uno stesso piano normale a quest'asse.

Le catene sono il più delle volte in numero di 4 od 8, 2 o 4 per parte, e ricevono alternativamente gli uncini dei tiranti verticali.

Possono essere corde in fili di ferro ricotto, del diametro variabile tra 1 e 2,5 millimetri, non mai torti, nè fatti in legnuoli, come usasi per le trasmissioni funicolari. Altre volte sono vere catene: alcune hanno gli anelli appiattiti ed allungati, come al ponte di Seraing sulla Mosa; in altre scompare l'anello, e risultano formate da tante sbarre di piccola lunghezza, articolate tra loro a guisa delle *bielle* usate nelle locomotive, aventi cioè un occhio ad un'estremità, ed all'altra una forcella i cui bracci portano ciascuno un occhio dello stesso diametro del primo: le unioni si fanno mediante *chiarvarde*. Una catena di tal genere impiegò Stephenson nel ponte di servizio usati per la costruzione del ponte Britannia. Altre ancora si impiegarono fatte con nastri d'acciaio, uniti con unioni a metà ferro e con chiodi ribaditi e piallati dalle due parti.

Le corde in fili di ferro debbonsi preferire alle catene in ferro pei seguenti motivi principali: 1° che a peso uguale di ferro oppongono maggiore resistenza; 2° che in esse è meglio accertata la qualità del ferro che le compone; 3° perchè offrono la più grande sicurezza alle persone che fanno uso del ponte, non essendo la loro rottura mai istantanea come quella delle catene in ferro, ma costantemente annunciata dall'allungamento progressivo ed assai pronunciato delle corde, e quindi da un abbassamento considerevole del tavolato.

Ma d'altra parte queste corde in ferro hanno gl'inconvenienti: 1° di offrire più di presa all'ossidazione; 2° di non poter mai esercitare che una piccola parte della resistenza su cui erasi contato, e ciò per l'ineguale tensione dei fili.

A proposito dell'ossidazione dei fili delle funi in ferro, citerò alcuni esperimenti del sig. Vicat. (1)

Quest'ingegnere, per valutare la perdita di forza del filo di ferro esposto all'azione più o meno diretta delle influenze atmosferiche, pesò diligentemente, prima dell'esperienza, i fili di cui intendeva servirsi; dopo d'averli abbandonati, per un determinato tempo, alle influenze atmosferiche, li spogliò nettamente dalla ruggine, e li ripesò. Dalla perdita di peso dedusse la diminuzione del volume, e per conseguenza la riduzione della sezione, e moltiplicando questa riduzione per il coefficiente di rottura, trovò la diminuzione di forza.

Operando in questa maniera fu condotto a conchiudere:

1° Che i fili di ferro in fascio, posti nelle circostanze più sfavorevoli, non hanno perduto in cinque mesi che circa $\frac{1}{300}$ della loro forza assoluta.

2° Che un fascio analogo di fili in ferro, protetto dalle in-

(1) V. REGNAULT — *Manuel des aspirants au grade d'ingénieur des ponts et chaussées.*

fluenze atmosferiche col mezzo d'un invoglio aperto inferiormente, ha perduto meno di $\frac{1}{600}$ della sua resistenza nello stesso spazio di tempo.

Se i progressi dell'ossidazione fossero uniformi, abbisognerebbero pressapoco cento e venti anni, nei fasci coperti, affinchè la resistenza della fune metallica fosse ridotta a metà.

Trovò inoltre il Vicat, prolungando la durata delle sue esperienze, che in un secondo periodo di cinque mesi immediatamente consecutivi, la perdita di forza per ciascun caso non era che $\frac{1}{25}$ di quella corrispondente al primo periodo. L'importanza di questa alterazione varia secondo una progressione sì rapidamente decrescente, che il limite della costruzione, dipendentemente dall'ossidazione, può essere portato ad epoche estremamente lontane.

Le colonne di sostegno possono essere in struttura laterizia, come nel ponte di Casal-Monferrato, in pietra da taglio, come in quello Maria Teresa sul Po presso Torino: in ghisa, come in quello già altra volta citato di Seraing sulla Mosa.

Le colonne in ghisa, se di considerevole altezza, non sono mai in un sol pezzo, ma in più, che con chiavarde vengono uniti l'uno sopra l'altro.

I sostegni, di qualunque genere essi sieno, non ricevono mai direttamente le catene, ma bensì coll'intermediario di uno o più rulli in ghisa collocati ad altezze diverse; tal altra, e questa è la disposizione più comune e la migliore, i rulli sono sostituiti da *settori* in ghisa, in acciaio od anche in bronzo, oscillanti sopra un piano orizzontale, o dentro un incavo cilindrico che si adatta perfettamente alla loro base: hanno altezza compresa fra 0^m,50 e 1,20.

Vi hanno tuttavia ponti in cui quest'organo assume proporzioni maggiori, si cambia in un'asta di ghisa dell'altezza

di parecchi metri, e si ha così una vera colonna oscillante, che, coll'inclinarsi dalla parte della tensione maggiore, serve a ripartire questa uniformemente sui due tratti della catena.

Talvolta questa catena, invece di essere continua, s'interrompe su ciascun settore, ed a questo sono invariabilmente fissati gli estremi così interrotti: la parte di catena posta tra due settori, e che sopporta direttamente il ponte, dicesi *catena di sospensione*; l'altra parte invece, che, partendo dal settore, va a penetrare nel suolo, dicesi *catena di tensione*.

Ciascuna estremità di catena, dopo d'essere passata sopra il sostegno fisso o mobile, abbiamo detto andarsi a fissare nel suolo, e ciò appunto si ottiene facendola penetrare in un blocco di muratura speciale, legato alla pila, ed a cui si dà il nome di *massiccio d'ormeggio*. Al tratto di catena che penetra nel suolo ordinariamente si dà una direzione che poco si scosta dalla verticale, si ha quindi un po' al disotto del suolo stradale un punto d'inflessione, a cui corrisponde un piccolo sostegno oscillante. Si adotta una tale disposizione, per non essere costretti di dare al massiccio d'ormeggio dimensioni troppo considerevoli. L'ultimo tratto di catena discende così entro un condotto inclinato, il quale termina in una stretta apertura chiusa con una piastra in ghisa, a cui la catena è fermata: al disotto di questa piastra si trova il pozzo d'ormeggio. Un'apertura verticale a guisa di camino, chiusa superiormente da una lastra, od anche un condotto laterale, secondo i casi, permette di visitare di tanto in tanto quest'ultima parte della costruzione, la quale importa più di tutte sia ben solida tanto nelle parti in ferro, che in quelle in laterizio od in pietra da taglio, perchè da essa dipende la stabilità del ponte.

IV.

Generalità sul modo di costruirli e di calcolarli.

Gli avi nostri difficilmente restavano imbarazzati sulla scelta del genere di ponte da adottare, perchè troppo limitato erano il numero: e diffatti, legno, mattoni e pietra da taglio costituivano i soli materiali disponibili, su cui potessero far cadere la loro scelta, e da cui dovessero partire per dedurre la forma: la questione principale, e che più richiedeva lungo e maturo esame, era per essi lo stabilire il sito conveniente, ed in ciò quasi sempre riuscivano a bene.

Al giorno d'oggi invece, a quei pochi generi troviamo unita la innumerevole schiera dei ponti in ferro, quella degli stupendi ponti in legno all'americana, e per ultimo un altro genere affatto nuovo, quello dei ponti in calcestruzzo, già stato sperimentato su vasta scala in un grande acquedotto da Fontainebleu a Parigi, ed anche in Italia in un ponte sull'Adda.

Frammezzo ad un sì grande numero di svariati sistemi di ponti, non resta all'ingegnere che procedere per via di esclusioni. Trattandosi di strada ferrata, è esclusa l'idea di un ponte sospeso, sebbene in America siffatto ponte si faccia servire pel transito dei convogli. Per istrada ordinaria invece servirà benissimo questo ponte, quando si voglia l'economia, oppure si debba superare una grandissima luce, in luoghi in cui difficile sarebbe per riuscire la costruzione di numerose pile, e quando sia molto considerevole l'altezza sua sul fondo del fiume o burrone che devesi attraversare.

Laddove una trave in ferro non si potrebbe innalzare che con grandissima difficoltà e pericoli, nel modo il più semplice

e facile si può gettare una corda, appendere a questa un leggero ponte di servizio, mercè il quale comodamente, pezzo per pezzo, si potrà collocare a sito l'intero ponte.

Supposto adunque che, col più giusto criterio, siasi scelto il sito, sarà cosa agevole fissare la lunghezza del ponte, e quindi, se si possa, e se convenga, innalzare un opportuno numero di pile: queste si porranno sempre ad eguale distanza per avere pure eguali le campate, ed evitare così disuglianze nocive nella tensione delle catene.

In generale pei ponti non eccedenti i 100 metri in lunghezza, e per le altezze maggiori di 15 metri sopra le acque, le pile più non convengono: dirò anzi che, in paesi dove gli ingegneri sono molto più arditi, si oltrepassano i 200 ed anche i 300 metri senza bisogno di pile, perchè è provato che la stabilità di un ponte sospeso cresce proporzionalmente alla sua rigidità, e questa, essendo funzione in gran parte della tensione delle catene, cresce appunto col crescere delle campate.

Fissata questa distanza degli appoggi, ed imaginando detta catena già collocata a sito, è manifesto che, se ella non avesse carico, si disporrebbe secondo un arco di catenaria omogenea. Ma siccome il carico esiste, supponendolo, come si può dire lo sia, uniformemente distribuito sulla proiezione orizzontale della catena, dimostreremo che questa deve disporsi secondo un arco di parabola. È bensì vero che, nel nostro caso, solo ai punti d'attacco dei tiranti di sospensione agisce il carico sulla catena: cosicchè, in luogo di una curva, possiam dire di avere un poligono funicolare. Ma, prescindendo anche dalla vicinanza di questi punti d'attacco, si potrebbe facilmente dimostrare che i vertici di questo poligono, quand'anche non fossero equidistanti, sarebbero però sempre sopra un arco di parabola. Ben inteso che, in tutti i casi, bisognerà trascurare il peso del tirante di sospensione.

Cerchiamo intanto l'equazione della curva. Si consideri un

latercolo qualunque; esso dovrà essere in equilibrio sotto l'azione delle forze che lo sollecitano, e che sono :

$$T \quad , \quad T+dT \quad , \quad p dx;$$

chiamando T la tensione nel punto qualunque che si considera, x la sua ascissa, essendo l'origine nel punto più basso della curva, p il peso per metro corrente di ponte.

Uguagliando a zero le somme delle componenti orizzontali e verticali, e dicendo α l'angolo che la tangente in quel punto fa coll'orizzonte, si avrà:

$$\left(T \cos \alpha + dT \cos \alpha \right) - T \cos \alpha = 0$$

da cui

$$dT \cos \alpha = 0$$

e

$$\left(T \sin \alpha + dT \sin \alpha \right) - T \sin \alpha - p dx = 0$$

da cui

$$dT \sin \alpha = p dx$$

Integrando la prima si ha:

$$T \cos \alpha = \text{cost.} = T_0 :$$

cioè la tensione orizzontale è eguale in ciascun punto della curva, ed eguale alla tensione nel punto più basso. Sostituendo questo valore di T nella seconda e ricordando che

$$\text{tang } \alpha = \frac{dy}{dx},$$

ed integrando, avremo per della equazione curva

$$y = \frac{p}{2T_0} x^2$$

che è evidentemente l'equazione di una parabola d'asse verticale.

Di questa parabola conosciamo la corda, che è la lunghezza del ponte già fissata, le condizioni locali, lo scopo che si vuol raggiungere, l'esempio d'altri ponti già costruiti, e si

determinerà la saetta: in generale essa varia da $\frac{1}{10}$ a $\frac{1}{17}$ e fino a $\frac{1}{20}$ della corda.

Chiameremo a la semicorda, s la saetta. Esse saranno le coordinate di uno dei punti estremi della parabola, supposta simmetrica; cosicchè, sostituendo nell'equazione precedente, avremo il valore di T_0 espresso da

$$T_0 = \frac{pa^2}{2s}.$$

Talvolta i punti d'attacco delle catene sono molto discosti dalla riva, come ad esempio nel ponte del capitano Brown, in cui la lunghezza essendo 110 m., la distanza dei punti d'attacco è di 132 m. In questo caso s non sarà la saetta dell'arco, ma l'ordinata della parabola corrispondente all'estremità del ponte. Quanto poi al tratto di catena che resta libero dal carico, esso sarà veramente un arco di catenaria omogenea, ma, per la sua brevità, si considera in pratica come il proseguimento della parabola del ponte.

Può darsi eziandio che i due tratti della catena non sieno simmetrici, come accade appunto nelle due campate del ponte di Casal-Monferrato, in cui, con savio consiglio, onde fare economia di ferro, l'ordinata innalzata all'estremo del tavolato del ponte in vicinanza delle spalle è molto più corta che non quella innalzata in vicinanza della pila. Conosceremo queste due ordinate e saranno s e s' ; chiamando a e a' le distanze incognite dal vertice della parabola al piede loro avremo

$$(1) \quad a + a' = L$$

essendo L l'intera lunghezza del tavolato del ponte, e sostituendo poscia nell'equazione della parabola

$$s = \frac{p}{2T_0} a^2 \qquad s' = \frac{p}{2T_0} a'^2$$

da cui

$$\frac{s}{s'} = \frac{a^2}{a'^2} \qquad \frac{a}{a'} = \frac{\sqrt{s}}{\sqrt{s'}}$$

e combinando quest'ultima colla (1), ricavasi

$$a = L \frac{\sqrt{s}}{\sqrt{s} + \sqrt{s'}}, \quad a' = L \frac{\sqrt{s'}}{\sqrt{s} + \sqrt{s'}}.$$

Avremo così la posizione del punto più basso della curva, e saremo precisamente nelle condizioni di prima.

Per determinare poi le dimensioni della catena converrà conoscere la tensione in ciascuno dei suoi punti, e questa si avrà facilmente osservando che un tratto di catena compreso fra il vertice ed un punto qualunque di ascissa x , dovrà essere in equilibrio sotto l'azione delle forze

$$T_0 \quad T_x \quad px$$

essendo T_0 , T_x le tensioni estreme del tratto che si considera, e p , al solito, il peso di ponte uniformemente distribuito sull'unità di lunghezza.

Avremo anche qui

$$\begin{aligned} T_x \cos \alpha_x - T_0 &= 0 \\ T_x \sin \alpha_x - px &= 0 \end{aligned}$$

d'onde quadrando, sommando, ed estraendo la radice otterremo

$$T_x = \sqrt{T_0^2 + p^2 x^2}$$

che ci darà la tensione in un punto qualunque. Vedesi che essa cresce con x : sarà dunque massima ai punti d'attacco, e avremo allora nel caso ordinario per la tensione massima

$$T_a = \sqrt{\frac{p^2}{4} \frac{a^4}{s^2} + p^2 a^2} = pa \sqrt{1 + \frac{a^2}{4s^2}}.$$

Sostituendo nell'equazione di stabilità relativa all'estensione avremo

$$n' R' \Omega = T_a$$

in cui Ω è l'area della sezione cercata, n' il coefficiente di

stabilità, R' quello di rottura; adottasi ordinariamente in pratica

$$n' R' = 10^{\text{kg}}$$

Si dedurrà, dopo ciò, l'area Ω espressa in millimetri quadrati e si assegnerà per sezione costante dell'intera catena; cosa che d'altronde non importerà grave spreco di metallo, essendo le tensioni massima e minima di poco differenti. Al ponte di Menai in Inghilterra, per es., si ha

$$T_0 = 10000^{\text{kg}} \qquad T_a = 10477^{\text{kg}}.$$

Abbiamo fin qui supposto che la catena fosse una sola; se fossero parecchie, dovransi fare in modo che la somma delle aree delle loro sezioni sia eguale all'area della sezione trovata.

Nelle equazioni precedenti però noi abbiamo ancora un termine ignoto, ed è il p ; non sarà difficile il trovarlo.

Conoscendo il genere di tavolato che vogliamo adottare, conoscendo il sovracarico, che per questi ponti si prende ordinariamente di 200 kg. per m. q., si può dapprima determinare la sezione di una qualunque delle travi trasversali che sostengono il tavolato, considerandola come un solido rettilineo appoggiato orizzontalmente su due punti, e gravato da un carico p' uniformemente distribuito sulla sua lunghezza; questo carico sarà quello che gravita sopra una lista di ponte lunga quanto la distanza tra asse ed asse di due travi consecutive, supponendo che tutte siano equidistanti.

Nella determinazione di questa sezione si farà uso dell'equazione di stabilità relativa alla compressione

$$n'' R'' = \frac{v'' \mu_m}{T''},$$

in cui sarà

$$\mu_m = \frac{1}{2} p' b^2$$

essendo $2b$ la lunghezza delle nostre travi trasversali.

Avuta la dimensione delle travi, se ne farà il peso, che si aggiungerà a quello che ciascuna sopporta. La metà di questo peso sarà portato da ciascun tirante; e l'equazione di stabilità relativa all'estensione ce ne darà la sezione. In questo caso però usano i pratici fare

$$n' R' = 2^{\text{kg}}$$

e ciò con savio consiglio, imperocchè un carro che passa e che si ferma sul ponte, gravitando intieramente su d'una coppia di tiranti, può ben superare il peso che risulterebbe dai 200 kg. uniformemente distribuiti. — Avuta la sezione dei tiranti, non sarà difficile averne il peso per ogni metro di lunghezza, e cercando la lunghezza totale di tutti i tiranti del ponte, il che si ridurrà ad una somma di ordinate, e moltiplicando questa pel peso ottenuto, si avrà quello complessivo dei tiranti. Si cercherà infine anche il peso della catena che si ottiene moltiplicando la sua lunghezza per la sezione e pel peso specifico.

Prendendo per ultimo il peso totale del carico uniformemente distribuito, permanente o non, aggiungendo il peso di tutte le travi trasversali, quello dei tiranti e quello delle catene, e dividendo il tutto per la lunghezza del ponte, si avrà il p cercato, da sostituirsi nella formola principale.

Le catene di tensione, che sono quelle che, partendo dai punti d'attacco delle catene di sospensione, vanno ad infingersi nel suolo, hanno prossimamente la tensione uniforme dell'ultimo latercolo di queste, poichè sono sensibilmente in linea retta; avranno quindi le medesime dimensioni.

Il masso a cui le catene si fissano dovrà calcolarsi in modo che, venendo meno la coesione, venendo meno anche l'attrito, come si è supposto ad esempio nel calcolo del ponte di Seraing sulla Mosa, esso non si muova tuttavia; in modo cioè che la componente del suo peso secondo una normale al piano in cui può aver luogo lo scorrimento, sia maggiore della

tensione della catena. Si dà poi all'ultimo tratto della catena una direzione più che si può vicina alla verticale, perchè così si diminuisce la componente che tende a smuovere il masso.

Il pezzo di ghisa, a cui si raccomanda la catena, deve essere robusto in eccedenza, e si calcolerà in modo che resista allo sforzo di taglio che in esso si produce.

Il settore oscillante, come pure la superficie su cui appoggia, vorranno essere calcolati in modo che non succeda schiacciamento di materiali. Per questo le loro superficie di combaciamento sono quasi sempre in acciaio.

La base d'una pila deve essere presa in modo che, componendo la risultante delle due tensioni della catena, con il peso della pila e del settore o colonna oscillante, si ottenga una risultante totale, che incontri la base della pila nel suo interno, ed alquanto distante dal lato più vicino, affinchè non avvenga schiacciamento.

Nulla diremo della costruzione delle spalle e delle pile, nulla delle fondazioni, perchè non v'ha in questo differenza alcuna dai ponti ordinari. Nè occorre che ci fermiamo alla descrizione del modo onde porre in opera siffatti ponti. Essa è così semplice, che nulla più. Una o due funi, che possono anche essere delle definitive, si tirano da una riva all'altra e vi si fermano; ad esse s'attaccano ponti di servizio che serviranno al collocamento delle funi definitive a cui si appendono poi i tiranti che dovranno sostenere il tavolato.

Le catene, anche quando sono a pezzi disgiungibili, si fabbricano sempre prima di collocarle. Se sono corde in fili di ferro, farà d'uopo avere uno spazio lungo quanto la catena; i fili si avvolgono uno ad uno attorno a groppiere fisse agli estremi, e si uniranno saldamente con legamenti di metro in metro od anche più vicini, bagnandoli sempre con olio essiccativo di lino misto con minio; per ultimo si incatramerà esternamente l'intera catena.

V.

Inconvenienti e vantaggi.

Non è difficile trovare il perchè dell' immenso plauso che accolse il compimento dell'opera di Samuel Brown, dell'affaccendarsi in tutte parti d'Europa a riprodurre la sua costruzione; in essa facilità d'esecuzione in tempo brevissimo; in essa economia di danaro congiunta alla sveltezza, all'eleganza, al pittoresco eziandio; in essa infine il compimento di desiderii che erano apparsi fino a ieri posticci, la soluzione di problemi giudicati fino allora irrisolvibili. Ma quando si seppe che i ponti di Triel e della Roche-Bernard erano stati sconquassati dal vento, che quello della Roche-Guyon era stato interamente portato via, che al ponte di Menai in Inghilterra le catene di sospensione avevano cozzato tra loro e s'erano rotte in gran parte, che in altri il passaggio d'un reggimento aveva strappato addirittura le catene, all'entusiasmo sottentrò la diffidenza, quindi il disfavore, che condusse poi ad una guerra aperta, e diremo anche ingiusta, contro questi ponti, che da parecchi, trincerantisi dietro considerazioni umanitarie, si volevano aboliti senza misericordia.

Il vero è, che, se grandi sono i difetti di queste costruzioni, non però sono irrimediabili, e mal si fece a bandir loro subito la croce addosso, senza prima esaminare se era possibile il rimedio.

Il più grave di tutti è quello di oscillare sotto l'azione di un peso o di una forza perturbatrice qualunque: quando l'azione di questa forza si prolunga, le oscillazioni possono as-

sumere tale ampiezza da compromettere la sicurezza del ponte. Ora a ciò si provvede in mille modi. Si diede, come nel ponte Maria Teresa a Torino, una forma curva al tavolato: oppure si rese rigido il parapetto, e si unì saldamente colle catene di sospensione, come nel ponte di Seraing sulla Mosa; si collocarono, come all'isola Borbone dove gli uragani hanno una potenza spaventosa, altre catene colla curvatura in senso opposto, e queste si munirono di tiranti per trattenere il tavolato in tutte le direzioni; si adottarono ancora molte altre ingegnose disposizioni, ma non si andò mai alla radice del male, alla causa prima che risiede in un difetto comune a tutti i ponti finora costrutti.

Quando passa sul ponte una vettura, un carico qualunque, questo gravita sempre, man mano che s'avanza, sopra una sola trave trasversale, tutt'al più su due: ne viene di conseguenza, che un solo tirante trasmette in un sol punto della catena quel considerevole peso. La catena s'infiatterà tanto più, quanto minore sarà la sua tensione, e di qui l'origine di una serie di oscillazioni, che non potranno smorzarsi che dopo lunghissimo tempo, atteso il pochissimo peso del ponte. Se più sforzi, anche piccoli, vengono a combinarsi con una certa regolarità, come il passo dei soldati, possono aumentare talmente l'ampiezza dell'oscillazione da condurre la ruina.

Sarà qui opportuno il dimostrare, con un semplicissimo calcolo, quanto grandi e funeste possano essere le conseguenze di un piccolo peso, che cade da piccola altezza sopra il tavolato d'un ponte sospeso. Supponiamo che un peso $2Q$ cada da un'altezza h sul tavolato, nel mezzo d'una trave trasversale sospesa a due tiranti di lunghezza l ; sia x l'allungamento che i tiranti avranno preso alla fine d'un tempo piccolissimo, ed α l'allungamento massimo; indichiamo con $2p$ il peso della trave, con ω la sezione d'un tirante, e con E il coefficiente d'elasticità del ferro. Al momento in cui l'allungamento del tirante ha raggiunto il suo massimo α , la

velocità del corpo urtante essendo nulla, dovrà essere zero la somma dei lavori, e si avrà

$$Qh + Qa + p\alpha - \int_0^{\alpha} \frac{Ew}{l} x \, dx = 0$$

da cui

$$Q(h + a) + p\alpha = \frac{Ew \alpha^2}{2l};$$

ed ancora

$$Q \left(\frac{h}{l} + \frac{\alpha}{l} \right) + p \frac{\alpha}{l} = \frac{Ew}{2} \left(\frac{\alpha}{l} \right)^2 \quad (1)$$

Facciamo $\frac{\alpha}{l} = 0,0006$, allungamento proporzionale oltre il quale l'elasticità del ferro può essere alterata dallo snervamento; supponiamo inoltre

$$l = 5^m, \quad h = 0^m,05, \quad w = 0^{mq}.000001, \quad p = 2^{kg}. \quad E = 20, \quad 10$$

la formola (1) darà

$$Q = 0,283.$$

Vedesi da ciò che basterebbe che un peso eguale a circa un ottavo del carico permanente cadesse sul tavolato da una altezza di 5 centimetri perchè l'elasticità del tirante fosse compromessa. Se un simile urto si rinnovasse nel momento in cui, per effetto dell'oscillazione prodotta dal primo urto, il tirante è arrivato al suo massimo allungamento, l'effetto sarebbe molto più pericoloso; e basterebbe un piccolo numero di simili coincidenze per cagionare la rottura del tirante (1).

Convien dunque cercare il mezzo di diminuire questo localizzarsi della forza in un sol punto, fare in modo che esso

(1) V. H. SONNET — *Dictionnaire des Mathématiques appliquées.*

si distribuisca sopra un tratto il più lungo possibile di catena. In luogo degli odierni tavolati converrà adottare quelli formati con lastrette di ferro intrecciate, proposte fin pei pavimenti di case e magazzini dai signori Cadiat e Ondry, che eseguirono su di essi una serie di esperimenti di esito felicissimo. In luogo delle travi trasversali adottarne delle longitudinali, su cui si inchiodi il tavolato. In luogo dei tiranti verticali adottare un traliccio rigido in ferro, od in lamiera, come quello dei ponti a travi rette; oppure, volendo conservare i tiranti, collocarne altri obliqui, facendo legature ben solide in tutti i punti d'incontro fra loro e colle sbarre formanti il parapetto. Anche le catene converrebbe fare diversamente; alcuni anzi proporrebbero di farle in ferro laminato, e dar loro la sezione di un doppio T: in tutti i casi però il traliccio che terrebbe luogo dei tiranti, dev'essere legato invariabilmente ad esse. Si avrà in tal guisa un sistema rigidissimo, in cui un sovraccarico accidentale verrebbe distribuito su quasi tutta la lunghezza del ponte, e la sua azione diverrebbe quasi insensibile: sarebbero evitate le oscillazioni, che oltre al pericolo presente, ne preparano uno più lontano, ma inevitabile, quello della cristallizzazione del ferro; il vento non avrebbe più su esso la benchè menoma azione; si avrebbe insomma un vero ponte ad archi capovolto, in cui in luogo della resistenza alla compressione, entrerebbe in giuoco la resistenza all'estensione; i pregi sarebbero gli stessi, avrebbero anzi su di essi il vantaggio della leggerezza e della maggiore portata.

Si potrà provare eziandio, se, così modificati, possono resistere al passaggio delle locomotive. Già Stephenson s'era accinto alla risoluzione di questo problema, e una locomotiva venne lanciata sul ponte sospeso sulla Tees, fra Stockton e Sarlington, il ponte si deformò, e si manifestarono oscillazioni che sorpassavano i 0^m,60. Si pensò di batter pali nel

fiume a cui inchiodare il tavolato, ma le oscillazioni erano tali da sradicarli. Allora Stephenson rinunziò all'impresa.

Un ardito Americano, l'ingegnere Roebling, volle ancora tentarla, e vi riuscì. Il 6 marzo 1855 si lanciava la prima locomotiva sopra il gran ponte di 250^m,453 di luce, costruito sul Niagara a 3 kilm. a valle della grande cascata, senza che nulla di sinistro accadesse. Esso è composto di 4 sole catene, presentanti tutte insieme la sezione di 1559 c. m. q.: costò 500,000 dollari, ossia 2,600,000 lire, circa 1000 lire per metro, spesa relativamente piccolissima se si considera l'importanza e la difficoltà dell'opera.

L'impiego poi di questi ponti negli acquedotti e nei ponti-canali, è, indubitatamente, della massima convenienza: imperocchè, per la costanza ed uniformità del carico, saranno tolte le cagioni che davano origine alle oscillazioni, e quindi le cause principali che conducevano alla loro rovina.

Citeremo un calcolo fatto dal Love nel suo prezioso libro: *De la fonte, du fer et de la tôle*, esaminando quello che avrebbe costato un ponte acquedotto sospeso, in luogo di quello in muratura stabilito nella valle di Roquefavour. Egli trova che il peso del ferro che sarebbe occorso è circa 359,000 kg., il peso della ghisa per elevare in mezzo una pila circa 200,000 kg. Il tutto, messo a sito, avrebbe potuto costare:

Per il ferro	L.	359,000
Per la ghisa	»	140,000
		<hr/>
Totale	L.	499,000

in numeri rotondi 500,000 lire, che, messe a confronto colle 3,700,000 spese, sono un nulla.

La prima idea degli acquedotti sospesi pare dovuta al conte di Chabrol, che ne stabilì uno nella sua terra di Cronsol (Puy-de-Dôme) nel 1822, di piccola dimensione, descritto dal Navier.

In America Roebling ne costrusse di grandissimi, come quello di Pittsburg, ed un altro della lunghezza totale di 347^m, con 6 appoggi. Il volume d'acqua è di 9 m. c. per metro corrente, cosicchè il carico totale per metro corrente è nientemeno che 10,000 kg. Questo è il più gran carico per cui si sieno finora impiegate catene in ferro.

Terminerò con alcune considerazioni che il Navier scriveva nella sua pregevole *Mémoire sur les ponts suspendus*: « Il est
 « vraisemblable que l'usage des ponts suspendus deviendra
 « bientôt général, on formera par ce moyen des communications
 « dans des lieux où il paraît actuellement impossible d'en ob-
 « tenir. On ne trouvera pas plus difficile de construire avec
 « des chaînes en fer un pont de 500^m d'ouverture, qu'il ne l'a
 « paru de construire des voûtes en pierre de 60^m, des travées
 « en bois de 119^m et des arcs en fer fondu de 73^m (ponte di
 « Sunderland). On suspendra aux chaînes des tuyaux pour
 « conduire les eaux et même des aqueducs praticables aux
 « grands bateaux. Ces constructions offriront des formes élé-
 « gantes invariablement fixées par les lois naturelles de l'équi-
 « libre; elles pourront également, dirigées par un ingénieur
 « habile, contribuer à l'embellissement des capitales, ou, sus-
 « pendus à travers des vallons escarpés, produire, dans les sites
 « pittoresques des pays de montagne, les effets les plus im-
 « posants. L'imagination trouvera dans ces édifices le spec-
 « tacle de la puissance des arts, surmontant par l'utilité pu-
 « blique de grands obstacles opposés par la nature, et long-
 « temps jugés invincibles. »

Devo però confessare che queste parole datano dal 1823, cioè dall'epoca dell'entusiasmo, e che allora non eransi ancora compiuti quei miracoli d'ardimento coi ponti a travate rettilinee.

ANGELO TESSIORE.

TESI LIBERE

Meccanica applicata ed Idraulica pratica

Teoria del pendolo conico di Watt.

Costruzioni civili, idrauliche e stradali

Teoria di Bresse per il calcolo dei ponti in ferro a travate rettilinee.

Macchine a vapore e ferrovie

Resistenza alla trazione sulle vie ferrate rettilinee. Esperienze di Wood.

Geometria pratica

Determinazione analitica di un punto col mezzo di altri tre noti di posizione.

