

La teoria della flessione di Navier: testimonianze delle prime applicazioni nella Francia nel XIX secolo

Chiara TARDINI

RIASSUNTO

L'oggetto di questo lavoro è la presentazione delle prime applicazioni documentate e riferite a casi reali della teoria dell'elemento inflesso formulata da Claude Navier all'inizio del XIX secolo.

Una breve premessa riassume in estrema sintesi i tratti più significativi del percorso che ha condotto alla formalizzazione della teoria dell'elemento inflesso e precede la presentazione di una applicazione della teoria di Navier alla verifica delle travi di un ponte in legno.

La scelta del materiale è dovuta al fatto che il legno è adatto, più di altri impiegati in quel periodo, per resistere a sforzi di flessione.

L'esempio illustrato nel seguito è tratto da una Nota degli *Annales des Ponts et Chaussées* nei quali sono riportati altri esempi analoghi. È interessante notare come tutti questi casi facciano riferimento alla medesima tipologia strutturale ideata e brevettata da Ithiel Town nel 1820. Si tratta di ponti pedonali provvisori, costruiti per ripristinare rapidamente la via di comunicazione. Tale schema bene rispondeva alle nuove esigenze di costruire rapidamente e a basso costo molti chilometri di infrastrutture.

La diffusione di questo schema strutturale in Francia (e successivamente nel resto d'Europa) è stata possibile grazie ai viaggi-studio e resoconti relativi effettuati da alcuni ingegneri francesi dell'*École des Ponts et Chaussées* negli Stati Uniti nei primi decenni del XIX secolo.

Di seguito viene illustrata l'applicazione della teoria di Navier alla trave del ponte di Vaudreuil di 17 metri di luce. Si tratta soltanto della verifica dello sforzo normale valutato in mezzera; non viene fatto nessun riferimento alla deformabilità, che in questo caso costituisce un problema da non sottovalutare.

ABSTRACT

The subject of this work is the documentation of the first applications to real cases of the bending theory formulated by Claude Navier early in the 19th century.

The most significant steps of the path that led to the formalization of the theory are summarized in a brief introduction; this resume precedes the presentation of an elementary application of the theory to the check of a wood bridge beam.

The choice of wood is due to the fact that wood is suitable, more than other building materials used in that period, to withstand bending stresses.

One of these cases is shown in a Note of the Annales des Ponts et Chaussées; other few examples are reported in later Notes. It is worth noting that all the reported cases refer to the same structural typology designed and patented by Ithiel Town in 1820.

Furthermore, all these structures are temporary pedestrian bridges, built to quickly restore the connection. This structural layout fits well to the need for a cheap design of infrastructures extending over several miles. The widespread of this structural scheme in France (and later in Europe as well) was possible thanks to the travels to the United States and to the travel reports by French engineers of the École des Ponts et Chaussées in the first half of the 19th century.

In the following, the application of Navier's theory to the 17 meters span Vaudreuil bridge is shown. In this case only the normal stress at midspan is checked; no reference is made to the deformability, which in this case is a real problem and should not be disregarded.

INTRODUZIONE

La ricerca di una legge universalmente valida per esprimere la portata di un elemento inflesso e, in un tempo successivo, il valore dello sforzo normale ha caratterizzato gli studi teorici e sperimentali in un arco di tempo assai ampio. Solo a partire da Galileo Galilei, tuttavia, questa ricerca ha iniziato ad acquisire una formalizzazione scientifica.

Prima dell'istituzione delle scuole di ingegneria non risulta semplice delineare il percorso del trasferimento e della diffusione delle conoscenze scientifiche. La fondazione dell'*École des Ponts et Chaussées* a Parigi nel 1747 segna una tappa significativa in questo processo, contribuendo a sistematizzare la ricerca e formalizzare il sapere. Questo spiega la preminenza francese e la ricca produzione di trattati francesi nel campo dell'ingegneria civile oltre al fatto che le prime applicazioni della teoria nella pratica costruttiva si trovano documentate negli *Annales des Ponts et Chaussées*.

Il momento in cui la scienza del costruire incomincia a divenire un riferimento per la pratica costruttiva rappresenta un punto di svolta particolarmente significativo istituendo, sia pure in modo ancora sporadico e non vincolante, un nuovo rapporto fra pratica e teoria e dando l'avvio ad una nuova concezione del progetto strutturale.

In questo lavoro viene presentato un interessante documento, presente nei citati *Annales des Ponts et Chaussées*, che illustra uno dei primi esempi di applicazione della teoria di Navier sulla flessione, relativo alla verifica di un ponte provvisorio in legno. Alla presentazione dell'esempio viene fatta precedere una breve sintesi del travagliato percorso che ha condotto alla formulazione della teoria di Navier.

1. Un lungo percorso

La lunga ricerca della soluzione al problema della flessione, espressa in termini corretti e al tempo stesso adatti all'impiego corrente, trova compimento con Claude Louis Navier (1785-1836), il quale, facendo sintesi della lunga riflessione che lo ha preceduto, sa rendere i procedimenti analitici accessibili e facilmente applicabili senza perdere in precisione.

I passi del percorso che conduce a Navier si inseriscono nel cammino avviato da Galileo Galilei (1564-1642) il quale nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, pubblicato per la prima volta nel 1638, aveva espresso la portata di un elemento inflesso (R) come direttamente pro-

porzionale al prodotto della base (b) per il quadrato dell'altezza della sezione trasversale (h) ed inversamente proporzionale alla sua lunghezza (l). In termini analitici, il criterio era stato espresso nella "regola di Galileo", una formula ampiamente nota e diffusa che resterà al centro del dibattito scientifico per lungo tempo:

$$R = k \cdot \frac{b \cdot h^2}{l} \quad (1)$$

Nella formula k è un coefficiente che tiene conto della resistenza del materiale e delle condizioni di vincolo, diversamente interpretato da Galileo e dagli studiosi del Settecento.

Oltre un secolo più tardi, dalla lettura di alcuni documenti conservati presso il *Fonds Ancien* dell'*Ecole des Ponts et Chaussées*, risulta evidente come questo concetto fosse acquisito anche se talvolta con qualche imprecisione. Il manoscritto dal titolo *Calcul de la Résistance des Jambes de force doublées pour chaque Côté de la longueur du Pont*, datato 1793, esprime infatti la portata di un elemento inflesso soltanto in funzione del prodotto della base per il quadrato dell'altezza della sezione trasversale, trascurando di considerare il contributo della lunghezza.

L'autore di un altro manoscritto, conservato presso il medesimo archivio e datato 1798, *Pont de bois - Question et majeure et neuve*, dimostra invece di aver compreso che nel confronto delle resistenze di due elementi è necessario tenere in considerazione anche le differenze di lunghezza, nel senso che resistenza e lunghezza sono inversamente proporzionali.

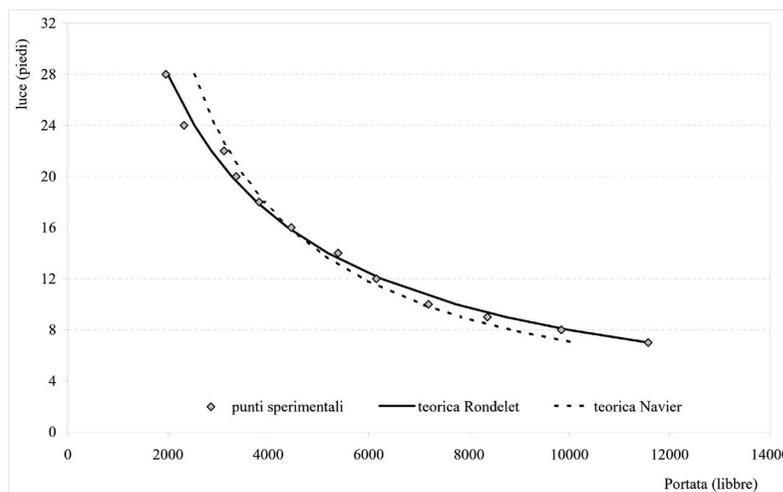


Figura 1. Confronto dati teorici e sperimentali per una trave in legno soggetta a flessione

Il *Traité theorique et pratique de l'Art de Bâtir* pubblicato da Jean Baptiste Rondelet (1743-1829) nel 1802 contiene il tentativo di interpretare analiticamente alcuni dati sperimentali dando origine a formule che, pur non corrette dal punto di vista dimensionale, riproducono piuttosto bene la realtà osservata; il diagramma di figura 1 evidenzia alcuni dati sperimentali e mette a confronto la legge proposta da Rondelet con quella corretta.

Con Jean Henri Hassenfratz (1755-1827) viene compiuto un lavoro di grande utilità pratica: in *De l'art du charpentier*, pubblicato nel 1804, viene presentata una serie di venti tabelle di portata, organizzate in base alla lunghezza dell'elemento. In esse, al variare delle dimensioni della sezione trasversale, sono forniti i valori di portata, calcolati secondo la formula indicata da Galileo, per campioni aventi le medesime condizioni di vincolo. Un aspetto significativo da sottolineare riguarda il valore attribuito da Hassenfratz al coefficiente, k che è sempre lo stesso per tutti i casi riportati in tabella e che, nelle unità di misura impiegate, risulta pari a 500; la resistenza del legno è dunque assunta costante e corrisponde a circa 75 MPa.

RÉSISTANCE du bois de chêne de 1 mètre de longueur.

H A U T E U R.

Largeur	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30
0,02	40	160	360	640	1000	1440	1960	2560	3240	4000	4840	5760	6760	7840	9000	9000
0,04	80	320	720	1280	2000	2880	3920	5120	6480	8000	9680	11520	13520	15680	18000	18000
0,06	120	480	1080	1920	3000	4320	5880	7680	9720	12000	14520	17280	20280	23520	27000	27000
0,08	160	640	1440	2560	4000	5760	7840	10240	12960	16000	19360	23040	27040	31360	36000	36000
0,10	200	800	1800	3200	5000	7200	9800	12800	16200	20000	24200	28800	33800	39200	45000	45000
0,12	240	960	2160	3840	6000	8640	11760	15360	19440	24000	29040	34560	40560	47040	54000	54000
0,14	280	1120	2520	4480	7000	10080	13720	17920	22680	28000	33840	40320	47320	54880	63000	63000
0,16	320	1280	2880	5120	8000	11520	15680	20480	25920	32000	38720	46080	54080	62720	72000	72000
0,18	360	1440	3240	5760	9000	12960	17640	23040	29160	36000	42760	51840	60840	70560	81000	81000
0,20	400	1600	3600	6400	10000	14400	19200	25600	32400	40000	48200	57600	67600	78400	90000	90000
0,22	440	1760	3960	7040	11000	15840	21160	28160	35640	44000	53240	63360	74360	86240	99000	99000
0,24	480	1920	4320	7680	12000	17280	23520	30720	38880	48000	58080	69120	81120	94080	108000	108000
0,26	520	2080	4680	8320	13000	18720	25280	32480	41200	50000	60200	71880	84880	98720	114000	114000
0,28	560	2240	5040	8960	14000	20160	27440	35840	45360	55000	66760	79640	93640	109760	126000	126000
0,30	600	2400	5400	9600	15000	21600	29400	38400	48520	60000	72100	86400	101400	117600	135000	135000

Figura 2. Tabella delle resistenze per travi in legno di rovere di 1 m di lunghezza al variare della base e dell'altezza della sezione trasversale.

2. Il contributo di Navier

La lunga vicenda della regola di Galileo si conclude con Navier, al quale nel 1819 viene affidato l'insegnamento del corso di *Mécanique appliquée* presso l'École des Ponts et Chaussées; al termine del corso vengono litografati gli appunti, il *Résumé des Leçons sur l'application de la mécanique à l'établissement des constructions et des machines*, successivamente pubblicato nel 1826.

L'impostazione innovativa di questo trattato è costituita dall'abbandono dei metodi fondati sul "calcolo a rottura" (ossia sulla ricerca delle condizioni limite di equilibrio), per addentrarsi nello studio delle strutture "elastiche". Navier infatti non intende determinare il carico che provoca la rottura dell'elemento, ma il carico che può essere applicato senza produrre deformazioni permanenti. Le prove sperimentali indicheranno quale è il limite elastico del materiale.

Navier utilizza i risultati delle prove sperimentali condotte da altri ricercatori su campioni in legno di varie specie e dimensioni; questo gli permette di verificare immediatamente se il dato sperimentale è correttamente interpretato dalle formule analitiche. La sottomissione dei dati sperimentali alla verifica di una legge inizialmente data come ipotesi costituisce il passaggio finale del metodo galileiano.

Un interessante esempio di applicazione della teoria della flessione è quello dei ponti in legno affrontato nella quarta sezione, *Article X*, paragrafo 579. La trattazione è suddivisa in tre parti, a partire dal caso più semplice dei ponti di luce non particolarmente ampia, generalmente costituiti da un impalcato sostenuto da travi e puntoni. Sulla base di equazioni di equilibrio, Navier determina il valore degli sforzi massimi agenti all'interno della trave dell'impalcato: per quanto il calcolo non sia particolarmente complesso, le formule cui dà luogo si rivelano di non semplice applicazione nella pratica. Il grande pregio delle lezioni di Navier, che si riscontra nel *Résumé*, consiste proprio nel semplificare queste formule rendendole accessibili e facilmente applicabili.

In riferimento allo schema di figura 3, viene considerato il tratto DD', soggetto ad un carico distribuito di intensità p , assumendo la presenza di cerniere in D e D' e quindi uno schema strutturale staticamente determinato.

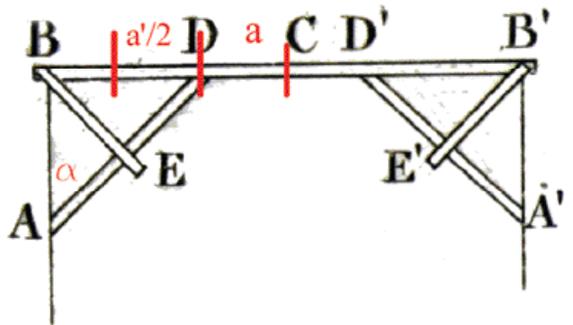


Figura 3. Struttura di ponte in legno con puntoni (AD) e contraffissi (BE).

L'espressione semplificata per il calcolo dello sforzo normale massimo, nel caso in cui la sezione trasversale retta della trave DD' sia rettangolare (base b e altezza c), è pari a:

$$R' = \frac{p}{b \cdot c} \cdot \left[\left(a + \frac{1}{2} a' \right) \cdot \tan \alpha + \frac{3a^2}{c} \right] \quad (2)$$

dove:

R' è lo sforzo normale massimo in C, sezione di mezzzeria dell'impalcato,

p è l'intensità del carico uniformemente distribuito sull'impalcato.

I dati geometrici sono indicati in figura 3.

Indicando con N e M rispettivamente l'azione assiale e il momento flettente in DD' e con A e W rispettivamente l'area e il modulo di resistenza della sezione trasversale, la formula si può facilmente riscrivere come:

$$R' = \frac{N}{A} + \frac{M}{W}$$

3. Calcolo di portata di una trave da ponte secondo la teoria della flessione di Navier.

Riveste particolare interesse individuare i primi esempi in cui la teoria della flessione di Navier sia stata applicata alla pratica costruttiva. La documentazione dei primi impieghi dei nuovi strumenti di calcolo della meccanica delle strutture è presente negli *Annales dell'École des Ponts et Chaussées*. Nelle note allegate al primo volume del 1841 vengono documentati i primi esempi di impiego della teoria della trave inflessa di Navier ad alcuni semplici casi, in particolare quello qui ripreso della campata del ponte di Vaudreuil che, crollata a causa di un'inondazione, viene ricostruita in legno utilizzando lo schema strutturale brevettato da Ithiel Town negli Stati Uniti d'America nel 1820 e perfezionato nel 1835. Le nuove formule vengono applicate come semplice verifica di opere concepite ancora sulla base di criteri intuitivi e dell'esperienza.

3.1. Lo schema strutturale di Ithiel Town

La grande apertura a quanto di nuovo ed interessante accade oltre il confine francese caratterizza da sempre *l'École des Ponts et Chaussées*. Nei primi decenni del XIX secolo grande curiosità ed interesse si rivolgono alle nuove tipologie strutturali di ponti in legno che caratterizzano negli Stati Uniti l'inten-

sa attività di costruzione di strade e ferrovie e si accompagnano ad una numerosa serie di brevetti. La Francia mostra grande interesse per la razionalizzazione del progetto che, imposta dalle esigenze di standardizzazione del mondo americano, porta alla definizione di schemi semplici, ripetibili e versatili. L'esperienza francese, a sua volta, ha da offrire una nuova sapienza razionalizzata e formalizzata, la nuova scienza del costruire. In questo contesto, la semplicità della tipologia strutturale proposta e brevettata da Ithiel Town ha permesso l'applicazione della teoria della trave inflessa di Navier.

Nel contesto di espansione di nuove infrastrutture Town, ritiene fondamentale privilegiare la convenienza economica, la solidità e la lunga durata; per questo è necessario che la struttura sia facilmente riparabile. In figura 4 sono riportati i disegni relativi ai ponti realizzati secondo questo sistema. Per aumentare la durabilità del legno vengono impiegati una struttura di copertura ed un rivestimento scatolare esterno.

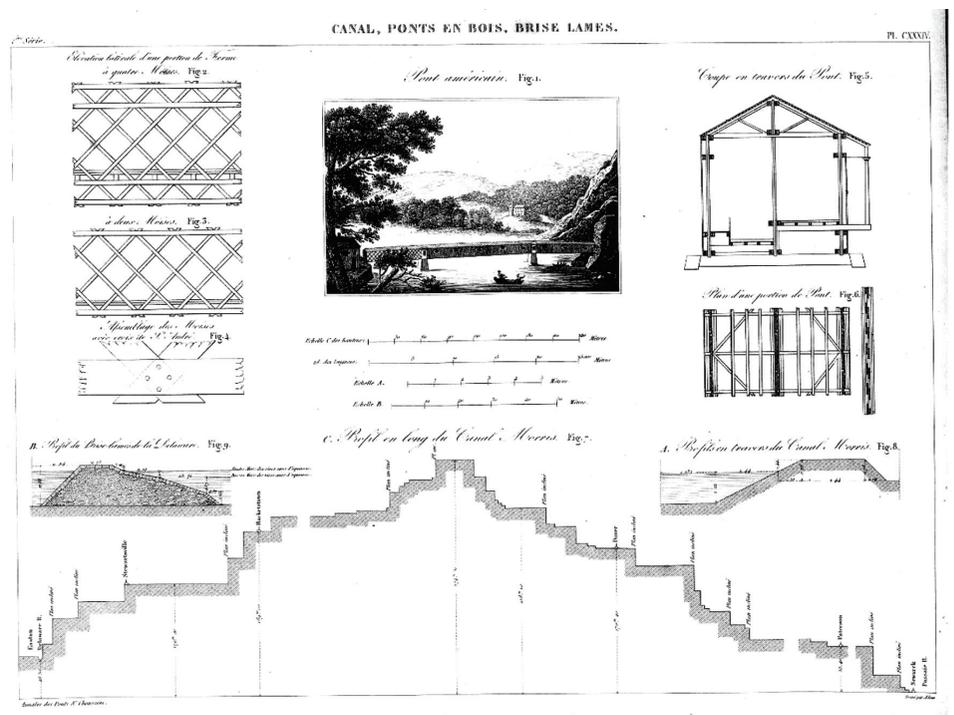


Figura 4. Sistema Town *Annales des Ponts et Chaussées*

La disposizione orizzontale dell'impalcato, dettata dalle nuove esigenze di traffico (in particolare ferroviario), costituisce un enorme vantaggio anche a livello strutturale: la trave orizzontale infatti non esercita nessun tipo di spinta sulle pile e sulle spalle e, al tempo stesso, facilita il passaggio delle imbarcazioni. Un altro indubbio vantaggio offerto da questo sistema è costituito dalla semplicità di realizzazione della struttura, che non richiede l'abilità di carpentieri specializzati; in questo modo è possibile contenere i costi.

Inoltre l'utilizzo di elementi di piccole dimensioni, la facilità di sostituzione di elementi ammalorati, l'eliminazione dei giunti a tenone e mortasa e degli intagli, insieme agli accorgimenti volti ad aumentare la durabilità della struttura contribuiscono alla riduzione di manodopera specializzata e quindi, nuovamente, alla limitazione dei costi.

Tutto questo era stato pensato e brevettato da Town proponendo, per le travi da ponte, una struttura a graticcio formata da due serie di elementi paralleli, fra loro ortogonali, inclinati di 45 gradi. Le connessioni sono garantite dalla presenza di tre o quattro perni in legno per ciascun nodo. La lunghezza degli elementi del graticcio è funzione dell'altezza del sistema che costituisce la trave; Town indica come ideale il rapporto di 1/10 tra l'altezza della trave e la luce. Questo criterio non deriva dal calcolo ma è frutto del procedimento empirico, in cui le proporzioni della struttura derivano dall'esperienza di realizzazioni precedenti.

3.2. Il ponte di Vaudreuil

I primi esempi documentati dell'applicazione della teoria della flessione a casi strutturali reali sono relativi alla verifica a flessione di strutture provvisorie e temporanee, spesso finalizzate alla realizzazione di altre opere o per il rapido ripristino di strutture in muratura danneggiate o demolite.

La *Notice* n° 9 contenuta nel volume del primo semestre del 1841 degli *Annales des Ponts et Chaussées* riporta la relazione dell'ingegner Joseph Alexandre Tonnet De Saint Claire riguardo al progetto e alla realizzazione di un ponte provvisorio nei pressi di Vaudreuil.

L'inondazione straordinaria verificatasi nel gennaio 1841 aveva causato il collasso della pila centrale e il crollo delle due campate adiacenti, per cui la parte da ripristinare aveva una lunghezza di circa 17 metri. La soluzione di un impalcato in legno si era presentata come la più semplice e la più economica. Il

ripristino tempestivo del ponte si rendeva necessario per ristabilire, pur in maniera provvisoria, la via di comunicazione.

La presenza di macerie nel letto del fiume, insieme alla violenza e all'altezza delle acque, avevano suggerito di utilizzare un'unica travata in legno. L'idea iniziale di impiegare una serie di puntoni per ridurre la luce della trave venne abbandonata perché la pila esterna non era in grado di resistere alla spinta che avrebbero esercitato i puntoni e la soluzione con contraffissi avrebbe ristretto eccessivamente la zona di passaggio per le barche. Per ovviare a questi inconvenienti le caratteristiche della soluzione ideale venivano a coincidere con i principi del sistema brevettato da Ithiel Town; per questo motivo il progettista fu indotto ad utilizzare questa soluzione. I particolari sono mostrati in figura 5.

L'anima di ciascuna trave è formata da dodici croci di Sant'Andrea; ogni croce a sua volta è composta da due elementi in abete di 25 centimetri di larghezza, 8 centimetri di spessore e 3,05 metri di lunghezza. Questi elementi sono collegati tra di loro senza intagli e sono giuntati mediante tre perni in legno di rovere di 3,7 centimetri di diametro.

I correnti longitudinali, in legno di rovere, sono alti 25 centimetri, spessi 15 centimetri e lunghi 23,50 metri; la distanza tra il corrente superiore e quello inferiore è di 1,45 metri. La larghezza netta del ponte è di 3,6 metri.

Sul corrente inferiore della trave poggiano ventiquattro travetti realizzati in legno di quercia, posti ad un interasse di 85 centimetri e lunghi 4,5 metri; la sezione trasversale ha base di 10 centimetri ed altezza di 20. Tonnet De Saint-Claire osserva che le dimensioni di questi travetti sono troppo ridotte rispetto alle azioni che devono sostenere e sottolinea che sotto l'effetto di carichi elevati si registrano deformazioni consistenti: sarebbe stato necessario aumentarne l'altezza o armarli in modo da ottenere una maggior resistenza.

La relazione prosegue con un paragrafo riguardante il calcolo della resistenza delle travi, normalmente non presente in questo tipo di relazione. È interessante notare che questo paragrafo è collocato dopo la descrizione della struttura, della realizzazione e della messa in opera. Si configura quindi piuttosto come verifica che come progetto degli elementi. Il momento resistente delle due travi è correttamente espresso considerando il momento di inerzia di una sezione costituita dai correnti superiori ed inferiori, assumendo che siano rigidamente connessi dalle

diagonali. La formula utilizzata fa esplicito riferimento al testo di Navier:

$$\rho = \frac{R \cdot a \cdot (b'^3 - b''^3)}{6 \cdot h'} \quad (3)$$

dove:

a indica la larghezza complessiva dei quattro correnti (4x15 centimetri) = 60 centimetri

b' rappresenta l'altezza totale della trave = 1,95 metri

b'' è la distanza interna tra il corrente superiore e quello inferiore = 1,45 metri

R è la resistenza del legno = 600.000Kg/m²

ρ è il momento resistente sviluppato dalle due travi = 134.346 Kgm

Il momento resistente deve essere minore o uguale al momento generato dalle forze esterne, che è correttamente espresso come:

$$M = \frac{1}{2} \cdot p \cdot c^2 \quad (4)$$

dove:

p rappresenta l'intensità del carico distribuito sulla trave,

c indica metà della lunghezza della campata.

Il peso complessivo della struttura, lunga 17 metri, è di 23.000 kilogrammi, equivalente ad un carico per unità di lunghezza di 1353 Kg/m.

Poiché la larghezza del ponte è di 3,6 metri, e poiché si ipotizza un carico accidentale di 200 Kg/m², corrispondente a 720 Kg/m, si ottiene un valore di carico complessivo pari a:

$$p = 1353 + 720 = 2073 \text{ Kg/m}$$

Pertanto il valore del momento è:

$$M = \frac{1}{2} \cdot p \cdot c^2 = \frac{2073 \cdot 8,5^2}{2} = 74.628 \text{ Kgm}$$

Confrontando i valori ottenuti è evidente che il momento sollecitante è pari al 55% circa del momento resistente.

Per questo motivo, prosegue Tonnet De Saint-Clair, è stato deciso di adottare in tutta sicurezza le dimensioni indicate nel calcolo di verifica.

Quest'ultima è formalmente corretta per quanto riguarda la flessione; mancano però la verifica a taglio, cioè degli elementi diagonali e, soprattutto,

quella di deformabilità. Dal calcolo del rapporto tra l'altezza della trave (1,95 metri) e la luce della campata (17 metri circa) si ottiene un valore compreso fra 1/8 e 1/9, superiore a quelli suggeriti da Town (1/10 - 1/12), che lascerebbe presupporre una buona rigidezza della trave.

Dopo circa tre settimane il ponte fu aperto al traffico ma dopo solo sei giorni di servizio furono misurati in mezz'ora della trave spostamenti di circa 8 centimetri, pari a circa 1/200 della luce.

Malgrado quindi fossero rispettate le proporzioni suggerite, l'impalcato si rivelò molto deformabile: la regola proposta da Town non era di per sé sufficiente. Anche la verifica a flessione, che porta ad un giudizio favorevole sulla portata, è probabilmente stata effettuata sottostimando i carichi; è comunque evidente che in questo caso occorre affiancare la verifica di deformabilità alla verifica di resistenza.

Gli spostamenti dell'impalcato furono tenuti sotto osservazione per un certo periodo; sei settimane più tardi si riscontrò un valore della freccia doppio rispetto a quello inizialmente rilevato, pari a circa 1/100 della luce e fu decisa l'aggiunta di cinque croci di Sant'Andrea nella parte centrale della campata, come mostrato in figura 5, al fine di aumentare la rigidezza ed evitare un ulteriore incremento della freccia.

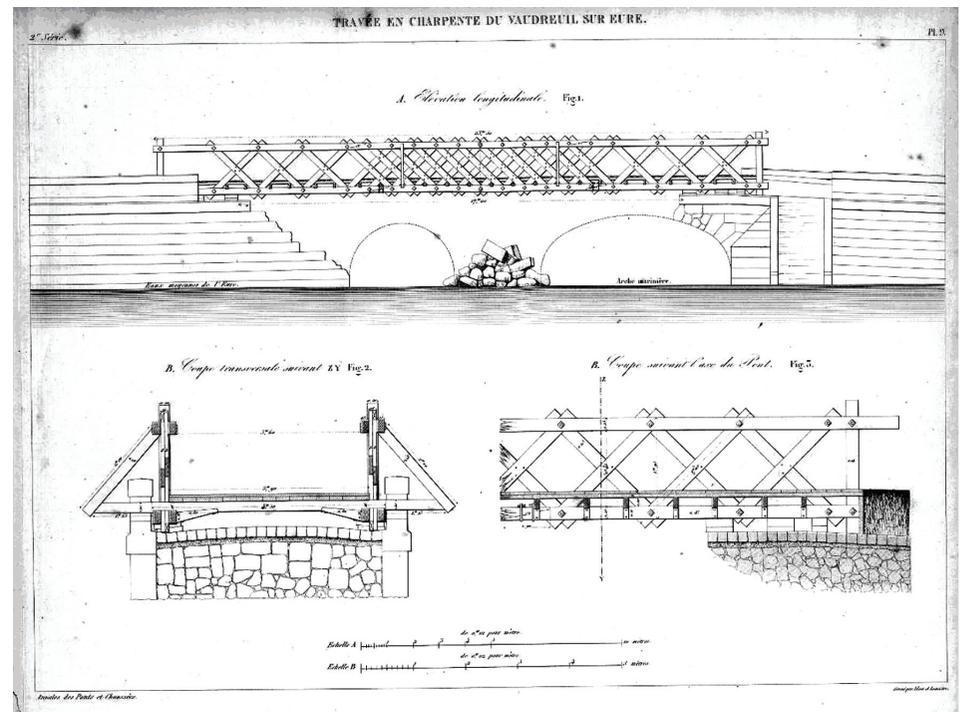


Figura 5. Particolari del ponte di Vaudreuil.

4. CONCLUSIONI

Il periodo di tempo preso in esame è caratterizzato dall'intrecciarsi delle formulazioni teoriche e della ricerca sperimentale; quest'ultima è variamente impiegata come fonte di suggerimenti nella ricerca di regole di interpretazione dei fenomeni reali o come conferma di leggi fisiche.

È interessante notare che le prime applicazioni documentate della teoria di Navier si riferiscono a procedimenti di verifica di strutture esistenti e non al progetto di nuove. Questo non stupisce se si considera che la logica deduttiva, tipica del procedimento scientifico, porta direttamente alla formulazione di criteri di verifica di strutture esistenti e solo in un secondo tempo adatta le procedure alle esigenze del progetto, cioè di ricerca di dimensioni appropriate per gli elementi strutturali. La soluzione progettuale proposta da Town (altezza trave / luce coperta >1/10) segue ancora i criteri suggeriti dalla vecchia pratica del costruire.

Infine è da evidenziare il fatto che nel caso proposto viene effettuata la verifica della resistenza ma manca ancora quella di deformabilità, che in questo caso mostra di costituire un problema da non sottovalutare

BIBLIOGRAFIA

- Annales des Ponts et Chaussées, 1841. *Sur une travée en charpente construite au Vaudreuil route royale de Mantes à Rouen, dans le système des ponts américains de M. Town*, 1ere semestre, pp. 303-309.
- Benvenuto E. 1981. *La Scienza delle Costruzioni ed il suo sviluppo storico*, Firenze, Sansoni.
- École Nationale des Ponts et Chaussées, Fonds Ancien, 1793. *Calcul de la Résistance des Jambes de force doublées pour chaque Côté de la longueur du Pont*, MS 2613, Paris.
- École Nationale des Ponts et Chaussées, Fonds Ancien, 1798. *Pont de bois - Question et majeure et neuve*, MS 233, Paris.
- EN 338:(2003) Structural timber – Strength classes.
- Galilei G. 1638. *Discorso intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica e i movimenti locali*, Leida, Elsevirii.
- Hassenfratz J.H. 1804. *Traité de l'art du charpentier*, Paris, Firmin Didot.
- Navier C.L.M.H. 1826. *Résumé des Leçons Donnés a L'École des Ponts et Chaussées sur l'Application*

de la Mécanique à L'Établissement des Construction et des Machines, Paris, Firmin Didot.

- Parisi M.A., Tardini C. 2011. *Historical knowledge in the preservation of heritage timber structures*, in Atti dell'International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures, Lisbona, 16 – 17 Giugno.

- Rondelet J.B. 1802. *Traité theorique et pratique de l'art de bâtir*, Paris, presso l'autore.

Silliman B. 1821. *The American Journal of Science (and Arts)*, Converse, New Haven, vol. III, pp. 158-166.

- Tardini C. 2012. *Dalla Rule of thumb agli inizi della scienza del costruire in Francia (1716-1841): i ponti in legno*, Tesi di Dottorato, Facoltà di Architettura, Politecnico di Milano.

- Tardini C., Chesi C. 2012. *A new concept in bridge design in the 19th century: Ithiel Town's timber bridges* in Atti del 8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Wroclaw, 15–17 Ottobre.

- Timoshenko S. 1953. *History of strength of materials*, New York, Dover.

- Todhunter I., Pearson K. 1886. *A History of the Theory of Elasticity and of the Strength of Materials*, Cambridge, New York.

- Town I. 1821. *A Description of Ithiel Town's Improvement in the Construction of Wood and Iron Bridges*, New York, presso l'autore.

United States Patent and Trademark Office, Patent n° 3169X, rilasciato il 28 Gennaio 1820.

- United States Patent and Trademark Office, Patent n° 8743X, rilasciato il 3 Aprile 1835.

- Varenne de Fenille P.C.M. 1792. *Mémoires sur l'administration forestière et sur les qualités des bois indigènes*, Bourg, Philpon.

Chiara TARDINI, Architetto e Dottore di Ricerca in Conservazione dei Beni Architettonici nel Marzo 2012.

Assegnista di ricerca presso il Politecnico di Milano da Settembre 2012.

È membro del progetto internazionale di ricerca COST (European Cooperation in Science and Technology), e dei progetti Re.L.U.I.S. D.P.C. 2005-2008 e D.P.C. 2010-2013.