

SPECIALE MOSE

ISSN n° 0010-9873 Poste Italiane SpA - Speculazione in Abbonamento Postale - D.L. 355/2008 (conv. in L. 27.02.09 n. 46) Art. 1, comma 1, COPIE a carico a copiare € 0,00 - In caso di ristampe, il prezzo di copertina è di € 0,00 - Copyright 2021 - CPTA di Milano - Ricambi per la realizzazione di macchine per il trattamento di rifiuti - CPTA di Milano - Ricambi per la realizzazione di macchine per il trattamento di rifiuti

MAR/APR 2021



RIVISTA BIMESTRALE
PER LA DIFFUSIONE
DELLA CULTURA DELL'ACCIAIO

COSTRUZIONI METALLICHE

COSTRUZIONI METALLICHE - FONDATA NEL 1949

REDAZIONE

DIRETTORE RESPONSABILE: BRUNO FINZI

EDITOR IN CAPO: ELIDE NASTRI Università di Salerno, Italia

COMITATO DI REDAZIONE:

NADIA BALDASSINO Università di Trento, Italia
 ANDREA CAMPIOLI "Politecnico" di Milano, Milano, Italia
 PAOLO CASTALDO "Politecnico" di Torino, Torino, Italia
 MARIO DE MIRANDA IUAV Università di Venezia
 MAURO EUGENIO GIULIANI Redesco Progetti srl, Milano, Italia
 RAFFAELE LANDOLFO Università di Napoli "Federico II", Italia
 EMANUELE MAIORANA Isolcomit Srl, Legnaro (PD), Italia
 ELENA MELE Università di Napoli "Federico II", Italia
 GIOVANNI METELLI University of Brescia, Italia
 PAOLO NAPOLI "Politecnico" di Torino, Torino, Italia
 EMIDIO NIGRO Università di Napoli "Federico II", Italia
 VINCENZO PILUSO Università di Salerno, Italia
 SHAHAB RAMHORMOZIAN University of Auckland, New Zealand
 ATSUSHI SATO Nagoya Institute of Technology, Japan
 SERGIO SCANAVINO Istituto Italiano di Saldatura, Italia
 MARCO SIMONCELLI "Politecnico" di Milano, Milano, Italia
 LUCIA TIRCA Concordia University of Montreal, Canada

COMITATO EDITORIALE ESECUTIVO: GIANCARLO CORACINA,
 BENEDETTO CORDOVA, RICCARDO DE COL, ALBERTO VINTANI

COMITATO SCIENTIFICO:

GIULIO BALLIO "Politecnico" di Milano, Milano, Italia
 CLAUDIO BERNUZZI "Politecnico" di Milano, Milano, Italia
 MARIO D'ANIELLO Università di Napoli "Federico II", Italia
 LUIGINO DEZI Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italia
 ERIC DUBOSC Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris, France
 DAN DUBINA Polytechnic University of Timisoara, Timisoara, Romania
 MASSIMO MAJOWIECKI Università di Bologna
 FEDERICO M. MAZZOLANI Università di Napoli "Federico II", Italia
 ROSARIO MONTUORI Università di Salerno, Salerno, Italia
 RENATO MORGANTI Università degli Studi dell'Aquila, Italia
 VITTORIO NASCÉ "Politecnico" di Torino, Italia
 D.A. NETHERCOT Imperial College London, London, UK
 MAURIZIO PIAZZA Università di Trento, Trento, Italia
 COLIN ROGERS McGill University, Montreal, Canada
 LUIS SIMOES DA SILVA University of Coimbra, Portugal
 ENZO SIVIERO Università Telematica E-campus, Italia
 CARLO URBANO "Politecnico" di Milano, Milano, Italia
 RICCARDO ZANDONINI Università di Trento, Trento, Italia

SEGRETERIA: VALERIA PASINA

EDITORE: GIANGIACOMO FRACCHIA EDITORE Srl
 Via C. Goldoni 1, 20129 Milano, tel. 02 49524930
 C.F./P.Iva: 07153040964 - CCIAA Milano REA n° 1939256

UFFICIO ABBONAMENTI: CTA Collegio Tecnico dell'Acciaio,
 20129 Milano, Viale dei Mille, 19
 tel. 02 784711; costruzionimetalliche@ctanet.it
 http://www.collegiotecniciacciaio.it/costruzionimetalliche/

CONCESSIONARIA PUBBLICITÀ:

Agicom srl, Viale Caduti in Guerra, 28,
 00060 Castelnuovo di Porto (RM)
 Tel. +39 069078285
 www.agicom.it
 Dott.ssa Manuela Zuliani, Cell: +39 3467588821
 manuelazuliani@agicom.it

IMPAGINAZIONE E GRAFICA:

Huttert Edgardo | SINAPSI |
 www.sinapsiweb.info

STAMPA:

GIERRE PRINT SERVICE Srl, Via Carlo Goldoni, 1
 20129 MILANO Tel. 02 49524930
 e-mail: commerciale@gierreprint.com

ABBONAMENTI PER L'ANNO 2021 (6 NUMERI):

Italia: € 60,00 - Estero: € 150,00 - Studenti: € 20,00
 Prezzo a copia: € 15,00

Garanzia di riservatezza per gli abbonati: l'Editore garantisce la massima riservatezza dei dati forniti dagli abbonati e la possibilità di richiederne gratuitamente la rettifica o la cancellazione. Le informazioni custodite nell'archivio elettronico dell'Editore verranno utilizzate al solo scopo di inviare agli abbonati eventuali proposte commerciali (legge 675/96 tutela dati personali)

La rivista non assume alcuna responsabilità delle tesi sostenute dagli Autori e delle attribuzioni relative alla partecipazione nella progettazione ed esecuzione delle opere segnalate dagli stessi Autori

La rivista è inviata ai soci del Collegio dei Tecnici dell'acciaio (C.T.A.)

Iscrizione al Tribunale di Milano in data 8 febbraio 1949,
 n. 1125 del registro.

Iscrizione ROC n. 020654 (Art.16 Legge 62 - 7/03/2001)

ISSN n. 0010-9673

Spedizione in A.P. - D.L. 353/2003 (conv. in L.27.02.14
 N. 46) - Art. 1 comma 1 CNS PD

Questo numero della rivista è stato chiuso in redazione e stampato nel mese di giugno 2021

È vietata e perseguibile per legge la riproduzione totale o parziale di testi, articoli, pubblicità ed immagini pubblicate su questa rivista sia in forma scritta, sia su supporti magnetici, digitali, ecc.

COSTRUZIONI METALLICHE

ANNO LXXIII MAR APR 21



www.facebook.com/CMrivista

costruzionimetalliche@ctanet.it

In copertina: MOSE - Paratoie Bocca di Lido in azione



7	EDITORIALE	
	LA REDAZIONE	SPECIALE MOSE
8	SPECIALE MOSE	
	LA REDAZIONE	MOSE, Il sistema di barriere per la difesa di Venezia e della sua laguna dalle acque alte
13	SPECIALE MOSE	
	LA REDAZIONE	COSTRUZIONI METALLICHE INTERVISTA... Enrico Pellegrini
18	SPECIALE MOSE	
	LA REDAZIONE	COSTRUZIONI METALLICHE INTERVISTA... Matteo De Lazzaro
25	SPECIALE MOSE	
	LA REDAZIONE	COSTRUZIONI METALLICHE INTERVISTA... Alberto Fisichella
32	SPECIALE MOSE	
	LA REDAZIONE	COSTRUZIONI METALLICHE INTERVISTA... Gian Paolo Colato
39	ARCHITETTURA	
	ANNA DELLA VALLE	COMUNITÀ GALLEGGIANTI Urban Rigger 2.0, Copenhagen, 2019
58	CULTURA DELLE COSTRUZIONI METALLICHE	
	M. ABITA, A TOSONE, R.MORGANTI, D DI DONATO	SCAVARE CON L'ARIA COMPRESSA Le fondazioni pneumatiche nei ponti delle prime "strade ferrate"
73	PILLOLE DI BIM	
	PAOLO SATTAMINO	L'interoperabilità tra BIM Strutturale e software FEM
77	PILLOLE DI CORROSIONE	
	F. BOLZONI, A. BRENNÀ, M. ORMELLESE	Corrosione e protezione delle strutture offshore

SCAVARE CON L'ARIA COMPRESSA

Le fondazioni pneumatiche nei ponti delle prime “strade ferrate”

DIGGING WITH THE COMPRESSED AIR

First railway bridges and pneumatic foundations in Italy

Matteo Abita*, Alessandra Tosone, Renato Morganti, Danilo Di Donato

Dipartimento di Ingegneria Civile Edile-Architettura e Ambientale, Università degli Studi dell'Aquila

Nella prima metà dell'800 l'ingegnere e geologo francese Jacques Triger mette a punto un procedimento tecnico utile a scavare suoli in alveo per raggiungere strati di giacimenti fossili con l'immissione di aria compressa in una camera di lavoro in modo tale da mantenere asciutta l'area di intervento e garantire l'attività estrattiva. Malgrado la pericolosità insita nel sistema, che esponeva gli operai ai rischi di un ambiente iperbarico, il procedimento Triger, trova un'ampia applicazione nell'ambito dell'ingegneria civile, rivelandosi particolarmente adatto per fondazioni di pile da ponte. Nella seconda metà dell'Ottocento questo procedimento costruttivo arriva anche in Italia ed è adottato per la realizzazione dei ponti delle nuove reti ferroviarie grazie alla collaborazione tra tecnici locali e imprese francesi e inglesi. Tra il 1853 e il 1855 le fondazioni pneumatiche sono impiegate per quattro ponti della linea ferroviaria Torino-Novara le cui pile sono costituite da cilindri di ghisa affondati nel terreno. Negli anni Sessanta l'evoluzione del metodo di affondamento consente di utilizzare cassoni in lamiera di ferro di grandi dimensioni, impiegati per la prima volta per i ponti sul fiume Po a Piacenza, Mezzana Corti e Pontelagoscuro. Solo alla fine degli anni Settanta le fondazioni pneumatiche, nelle loro due declinazioni, sono realizzate da imprese italiane per la costruzione di nuovi ponti non solo ferroviari. Il contributo, attraverso fonti d'archivio e documentazione tecnica dell'epoca, racconta le esperienze italiane più significative e le principali tappe evolutive di un procedimento costruttivo d'importazione.

In the first half of the 19th century the French engineer and geologist Jaques Triger developed a construction process, useful to dig soils into the riverbed in order to reach fossil deposits, pumping into a work space compressed air that kept it dry and allowed the mining activity. Despite the dangerousness of workers exposure with a hyperbaric environment, Triger's process was used into many fields of civil engineering, especially in the construction of bridge piers. In the second half of the 19th century this construction process also arrived in Italy and was used to build many bridges of the new national railway network with the collaboration of local technicians and French and English companies. Between 1853 and 1855 pneumatic foundations were built in four bridges of the railway line between Turin and Novara, for which were used cast-iron cylinders sunk in the soil. The development of the sinking method in the Sixties allowed the use of large iron sheet caissons, built for the first time for the bridges over the river Po in Piacenza, Mezzana Corti and Pontelagoscuro. Only in the end of the Seventies, the construction of pneumatic foundations and their two typologies were finally managed by Italian companies for new bridges. The essay, through archive sources and technical documentation, tells the story of the most significant experiences and the main evolution stages in Italy of an imported construction process.

“Eloquenti testimoni delle felici applicazioni del ferro, nei diversi suoi stati di ferro martellato, di ferraccio e di acciaio, sono di certo quelle opere stupende, sorte, quasi per incanto di magica industria, a rilevare le condizioni dell'uomo, e nelle quali non sapremmo se più ammirare l'arditezza del concetto o la felicità dell'esecuzione [...] le fondazioni pneumatiche, i battelli sottomarini, i congegnamenti gli utensili ed instrumenti, che fecondan la terra e fanno ricca e potente l'industria; gli strumenti d'offesa e di difesa, sono senza alcun dubbio tra le più proficue applicazioni di quell'elettissimo in fra i metalli”.

Giuseppe Novi, Uso del ferro e sua conservazione. Tradizioni ed esperienze. Pregi singolarissimi del ferro, sue applicazioni, sue azioni sulla prosperità e potenza delle nazioni, in Atti del Reale Istituto d'Incoraggiamento alle Scienze Naturali di Napoli, Stabilimento tipografico del Reale Istituto d'Incoraggiamento, Napoli 1864, pp. 36-37 [1].

[*Corresponding author. Email: matteo.abita@univaq.it]



Fig. 1 | Ventilazione forzata di una miniera nel XVI secolo: mantici e tubazioni per l'immissione dell'aria negli spazi ipogei (Agricola, 1556).

1 Sviluppo della rete ferroviaria in Italia: le fondazioni pneumatiche per la costruzione di nuovi ponti

Nella prima metà dell'Ottocento la frammentazione politica del territorio italiano incide profondamente sullo sviluppo della rete ferroviaria. Ad eccezione del tratto Napoli-Portici, completato nel 1839 nel Regno delle Due Sicilie, i primi tronchi della nuova mobilità sono realizzati dagli Stati preunitari nel corso degli anni Quaranta, con mezzi tecnici ed economici diversi e senza un piano di coordinamento che assicuri un efficiente collegamento tra i centri di maggiore interesse [2].

Alla situazione di difficoltà nel reperimento delle risorse e nel confronto tra i governi, si aggiungono anche gli ostacoli posti dalle caratteristiche orografiche del territorio italiano che implicano talvolta la scelta di tracciati il cui sviluppo plano-altimetrico è concepito per evitare la costruzione di impegnative "opere d'arte" - innanzitutto ponti e viadotti - di rilevante impegno tecnico e finanziario.

In particolare, per gli attraversamenti fluviali, l'infrastruttura richiede la costruzione di fondazioni in alveo o, più in generale, sott'acqua, realizzate prima della seconda metà del XIX secolo con tecniche tradizionali. Per il ponte ferroviario della laguna di Venezia, inaugurato nel 1846 sotto il dominio austriaco, si ricorre, per esempio, a fondazioni indirette in pali di larice e rovere, collegati in sommità da tavole in legno, a sostenere oltre duecento arcate in muratura; per altri ponti, di luce più contenuta e in alvei di modesta profondità, si interviene deviando il corso d'acqua o inserendo paratie per praticare scavi a cielo aperto, che consentono la realizzazione di fondazioni profonde non più lunghe di 6-7 m [3]. Negli anni Quaranta dell'Ottocento viene introdotto un nuovo procedimento costruttivo per la realizzazione di fondazioni in alveo che consente di approfondirle a seconda delle necessità. Sperimentato

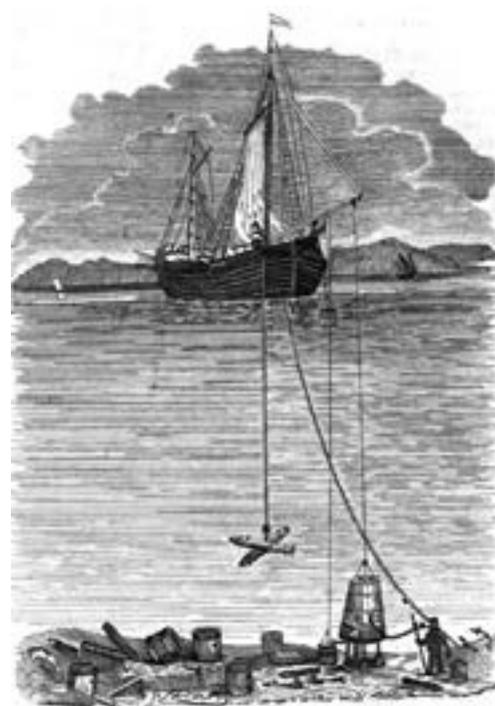


Fig. 2 | "Campana da palombaro": recupero di merci affondate in mare (Torelli, 1840).

tato per la prima volta in Francia e in Inghilterra, rivoluziona il modo di costruire sott'acqua in quanto fa uso di aria compressa che consente di evitare il ricorso alle paratie e di scavare in continuo con un numero ridotto di operai. I dispositivi che accompagnano l'impiego di questa nuova tecnica vedono protagonisti indiscussi il ferro e la ghisa.

In Italia le fondazioni pneumatiche sono previste per la realizzazione di ponti utili alla connessione dei tracciati ferroviari degli stati preunitari o all'ampliamento delle reti intervenuto dopo il 1861 [4]. L'arretratezza delle imprese e degli apparati industriali locali comporta, però, l'affidamento dei lavori a società straniere, esperte di questa nuova tecnologia. In particolare tra gli anni Cinquanta e Settanta dell'Ottocento, nel Regno di Sardegna prima, e in quello d'Italia poi, imprese inglesi e francesi collaborano con tecnici italiani e impiegano per la prima volta, nel contesto nazionale, tipi diversi di fondazioni pneumatiche, trovandovi un ideale campo di applicazione e ricerca.

2 Origini e sviluppo delle fondazioni pneumatiche nello scenario internazionale

L'impiego dell'aria compressa vede come protagonista l'industria mineraria che ne promuove studi specifici a fronte di un possibile utilizzo nella ventilazione di spazi ipogei molto profondi grazie alla sperimentazione di compressori (figura 1), avviata a partire dal XVI secolo, con i quali l'aria viene insufflata negli ambienti di lavoro mediante una rete di tubazioni [5].

L'aria compressa ha un ruolo determinante nell'estrazione del carbone da giacimenti non affioranti e localizzati sott'acqua. Nel 1841 Jacques Triger la impiega per estrarre carbone da un giacimento sottostante la Loira presso Chalonnès in modo che i lavori di scavo possano essere eseguiti all'asciutto. Per farlo ricorre a un tubo di lamiera di ferro, aperto alla base e chiuso in sommità, dal

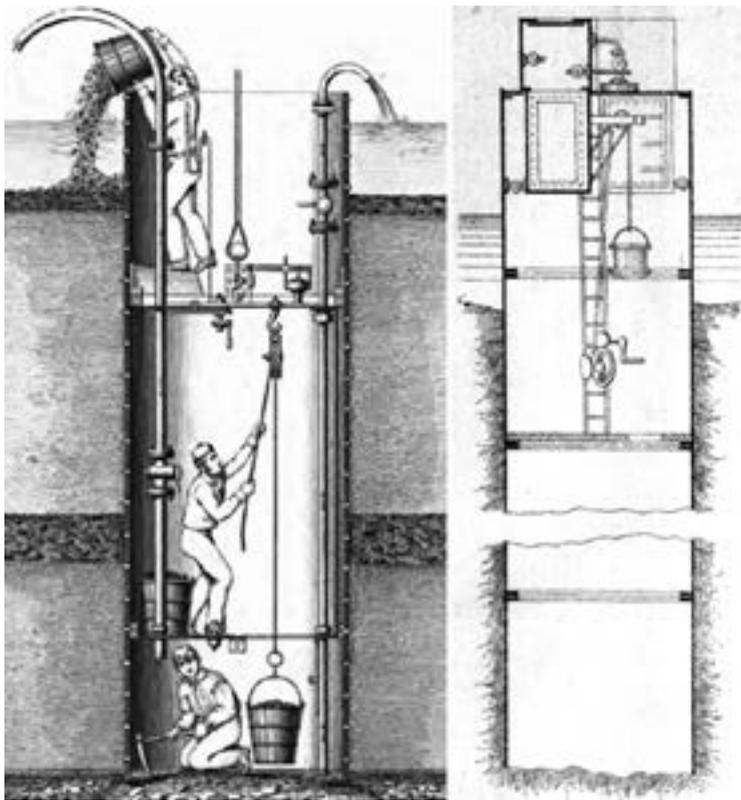


Fig. 3 | Tubo di lamiera di ferro progettato da Jacques Triger per estrarre
 Fig. 4 | Fondazione pneumatica: la camera di equilibrio sulla sommità del tubo
 (Bruno, 1892).

quale l'acqua è espulsa mediante immissione di aria in pressione. Il tubo, realizzato assemblando anelli del diametro di un metro tra loro collegati con chiavarde e impermeabilizzati con strisce di cuoio, presenta nella parte superiore la camera di equilibrio (o compensazione) che consente la regolazione della pressione dell'aria e l'ingresso e l'uscita controllata degli operai.

La camera di equilibrio è un'evoluzione delle campane pneumatiche, note anche come "cloche de plongée" (figura 2), dispositivi sviluppati nel XVIII secolo con cui i palombari riescono a compiere le prime esplorazioni subacquee profonde, inizialmente dirette al recupero delle merci delle navi affondate in mare e di cui i fisici Smeaton e Coulomb avevano previsto l'impiego anche nel settore delle costruzioni [6].

L'affondamento del tubo avviene gradualmente con l'ausilio di carichi posizionati in sommità e l'illuminazione all'interno può essere gestita con candele steariche o, con minore efficacia, per mezzo di lampade a gas. La pressione dell'aria non deve superare il livello di 4 atmosfere per non compromettere la salute degli operai.

Il procedimento di Triger trova larga eco sulla pubblicistica del tempo, mostrandosi più vantaggioso rispetto al sistema brevettato, negli stessi anni, dal britannico Potts che, diversamente dal primo, si basa sulla riduzione della densità dell'aria all'interno del tubo, in modo tale da aspirare acqua e sedimenti e facilitarne il progressivo inserimento nel suolo, con il significativo svantaggio di dover procedere allo svuotamento del tubo colmo di depositi e conseguenti lunghe sospensioni delle attività di scavo ad intervalli più o meno regolari [7].

Il procedimento sviluppato da Triger comincia ad essere applicato anche al di fuori del campo delle estrazioni minerarie e in pochi

anni trova spazio nel settore dell'ingegneria delle infrastrutture, in particolare nella realizzazione di fondazioni sott'acqua che necessitano di pali molto lunghi (figure 3-4). Il trasferimento tecnologico introdotto nella costruzione delle pile da ponte è attuato dapprima in Francia, in Inghilterra e negli Stati Uniti, a partire dagli anni Quaranta dell'Ottocento.

Nel 1851 è l'ingegnere inglese John Hughes a introdurre importanti innovazioni alla camera di compensazione e al procedimento costruttivo delle fondazioni (figura 5). La camera viene ampliata e dotata di un doppio scompartimento così da migliorare la regolazione della pressione dell'aria gradualizzandone la variazione; il procedimento costruttivo viene migliorato integrando il sistema Triger con il sistema Potts [8].

Questa e altre innovazioni vengono introdotte nella costruzione del ponte sul fiume Medway a Rochester, realizzato dall'impresa che pochi anni dopo verrà chiamata a lavorare in Italia a seguito del riordino della rete ferroviaria.

3 Fondazioni pneumatiche tubolari nell'Italia preunitaria

Il periodo segnato dal governo di Camillo Benso Conte di Cavour è decisivo per il progresso industriale e infrastrutturale del Regno di Sardegna. Lo statista piemontese, da sempre un convinto sostenitore della mobilità su ferro che considera un efficace strumento di sviluppo economico e culturale, avvia una serie di progetti per la realizzazione di nuovi tracciati ferroviari che giocheranno un ruolo importante anche dopo l'Unità d'Italia. Tra il 1852 e il 1853 Cavour lavora al completamento della linea Torino-Genova, ma soprattutto provvede alla costruzione di nuove linee dedicate alla comunicazione internazionale, in particolare verso est con la Lombardia, allora in territorio austriaco, e verso nord con la Svizzera e la Francia [9].

Per la linea Torino-Novara, destinata al collegamento con Milano, viene stipulato un accordo con un gruppo di imprenditori inglesi, guidati dal noto costruttore Thomas Brassey, autore di numerose linee ferroviarie in Gran Bretagna e in Europa, che riesce a portare a termine i 100 km di strada ferrata in soli tre anni. Per la linea Torino-Culoz, nota anche come ferrovia del Frejus, viene fondata nel 1853, con la partecipazione di diversi finanziatori francesi, la Società Vittorio Emanuele, che acquisirà dopo pochi anni anche il controllo della linea di collegamento tra Torino e Milano [10]. In un territorio in prevalenza montuoso, com'era in particolare quello della linea in Savoia, la presenza di corsi d'acqua e dislivelli comporta la realizzazione di ponti e viadotti ferroviari, per i quali è necessario ricorrere alle fondazioni pneumatiche.

3.1 I ponti della linea ferroviaria Torino-Novara

Thomas Brassey affida il progetto della linea ferroviaria Torino-Novara all'ingegnere inglese Thomas Jackson Woodhouse, professionista esperto con il quale ha già lavorato in Italia nella costruzione della linea Prato-Pistoia. Assiste alla sua redazione anche l'ingegnere Edward Francis Murray, giovane collaboratore impegnato nel completamento del tratto Torino-Genova e responsabile insieme a Woodhouse e agli ingegneri italiani C. Bermanni e V. Ferrari del progetto di quattro ponti che vengono realizzati sui fiumi Stura, Orco, Mallone e Agogna [11].

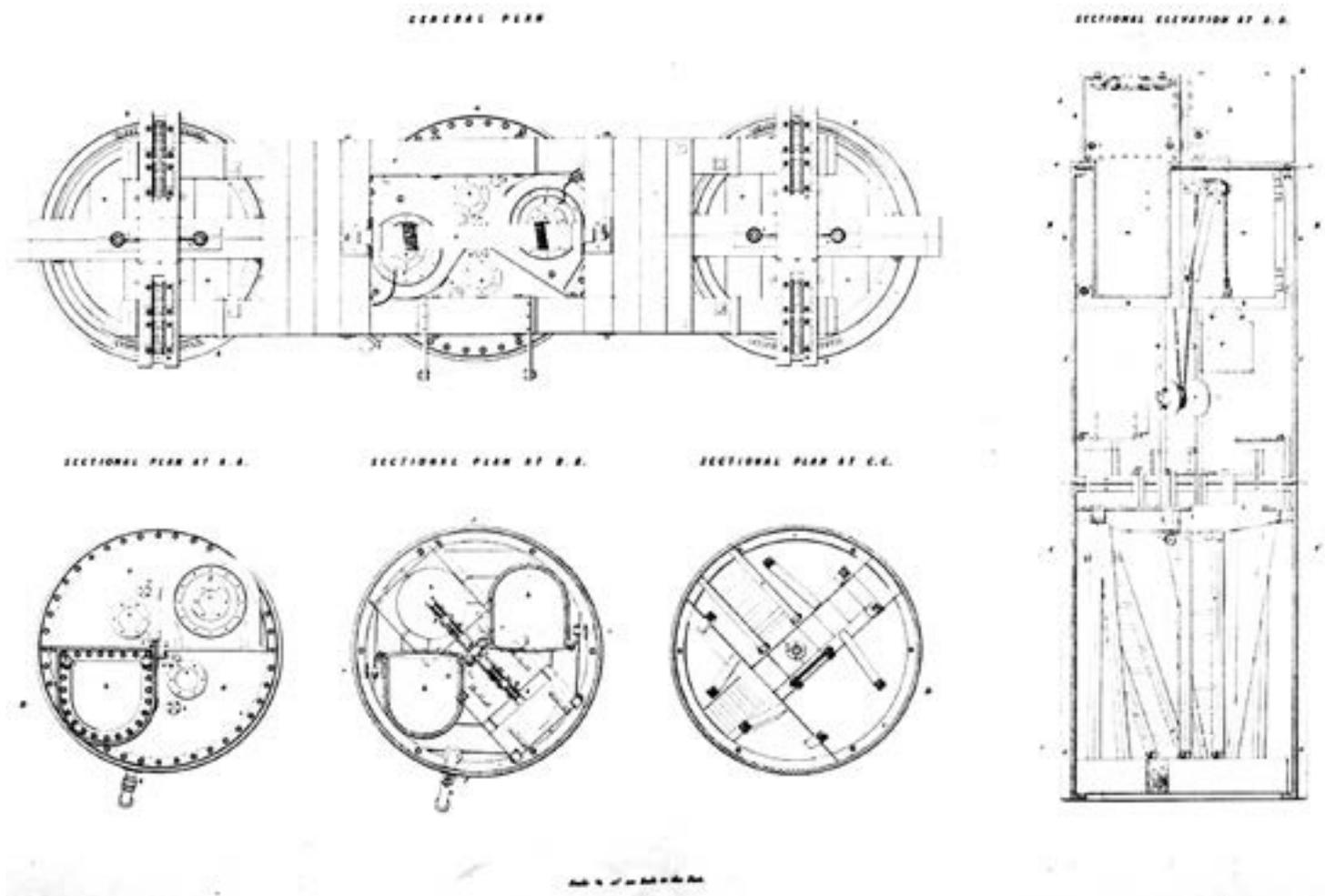


Fig. 5 | Fondazioni tubolari progettate da John Hughes per il ponte sul fiume Medway a Rochester (Hughes, 1859).



Fig. 6 | Ponte ferroviario sul torrente Agogna vicino Novara (Fassò, 1880).



Fig. 7 | Ponte ferroviario sul fiume Isère a Cruet (Momentum, Carte des Monuments Historiques français).

I progettisti prevedono lo stesso schema per i quattro attraversamenti: un ponte a travata continua su quattro appoggi, due dei quali in alveo. Collaborano al sostegno dell'impalcato per un solo binario due travate in ferro, irrigidite da fitte maglie reticolari di barre chiodate tra montanti e correnti. Per le pile è previsto l'impiego di fondazioni tubolari da realizzare con procedimento di Triger affidate all'impresa Fox & Henderson, nota per aver partecipato alla costruzione del Crystal Palace a Londra e responsabile

delle fondazioni per il ponte sul fiume Medway a Rochester [12]. L'impresa utilizza per ogni pila due tubi di ghisa del diametro di 1,5 m e lunghi tra i 7 e i 10 m, ottenuti sovrapponendo e rendendo solidali anelli alti quanto il diametro. L'affondamento è eseguito applicando una camera di equilibrio in sommità che permette l'immissione e la regolazione dell'aria compressa grazie a una pompa a vapore. Una volta espulsa l'acqua presente nel tubo due operai, assistiti all'esterno da un'altra di coppia di manovali, entrano al

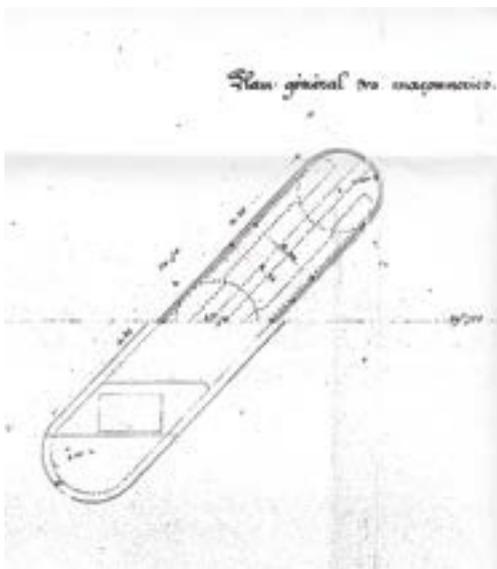


Fig. 8 | Ponte a Cruet: dettaglio costruttivo delle fondazioni tubolari (ACN&P).



Fig. 9 | Ponte a Cruet: vista della parte superiore della pila in muratura (ACN&P).

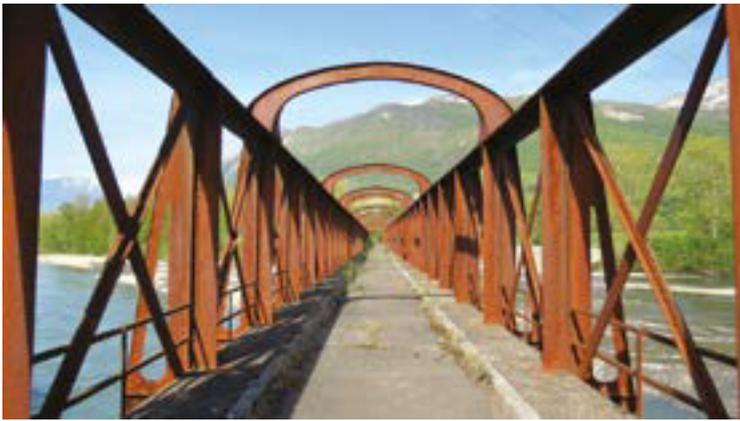


Fig. 10 | Ponte a Cruet: vista della travata reticolare continua (ACN&P).

suo interno e avviano le operazioni di scavo.

Grazie al procedimento di Triger la posa in opera delle pile è rapida: per il ponte sul fiume Agogna ogni tubo è portato alla profondità di 7 m in un tempo stimabile tra i due e i tre giorni di lavoro (figura 6).

Completato l'affondamento, i due tubi di ogni pila sono riempiti con calcestruzzo e vengono collegati in sommità da travi in ferro che consentono il trasferimento dei carichi soprastanti ai pali, compresi quelli delle pile, realizzate con "pareti in laterizio" minimamente modanate, aventi funzione di cassero, e riempite di calcestruzzo, il cui peso è contemplato nel calcolo delle fondazioni in quanto utile a stabilizzarle [13].

La tecnologia applicata nella realizzazione delle pile dei quattro ponti della linea Torino-Novara si ritrova anche in Savoia dove a far la differenza saranno alcune innovazioni provenienti dal contesto francese.

3.2 I ponti della linea Torino-Culoz

Il collegamento tra Torino e la Savoia, parte del Regno di Sardegna fino al 1861, si presenta come una sfida complessa: la presenza delle Alpi impedisce infatti, la progettazione di un tracciato retti-



Fig. 12 | Ponte ferroviario sul fiume Rodano a Culoz, al confine tra Francia e Regno di Sardegna (Ministère des travaux publics, 1873).

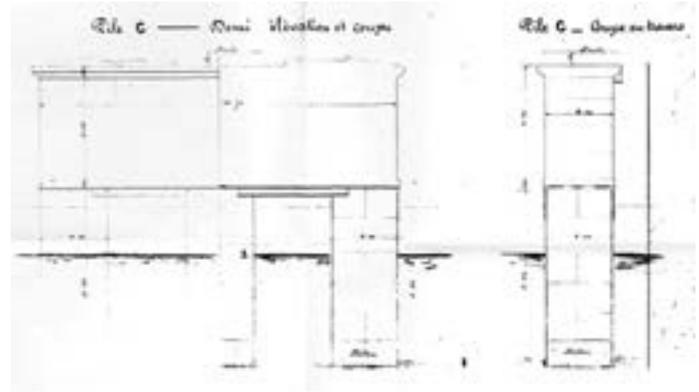


Fig. 11 | Ponte a Cruet: tubi in ghisa impiegati nelle fondazioni pneumatiche progettate da George Neumann (ACN&P).

lineo e impone la realizzazione del traforo del Frejus, completato solo nel 1871.

Per il progetto della linea al di là del valico, tra Modane e Chambéry, la Società Vittorio Emanuele si rivolge ancora una volta a Thomas Brassey, il quale affida il progetto a George Neumann, ingegnere inglese cresciuto professionalmente tra la Svizzera e la Francia [14].

Neumann è responsabile anche della realizzazione di due importanti infrastrutture: il ponte sul fiume Isère nei pressi di Cruet e il ponte al confine con la Francia sul fiume Rodano a Culoz.

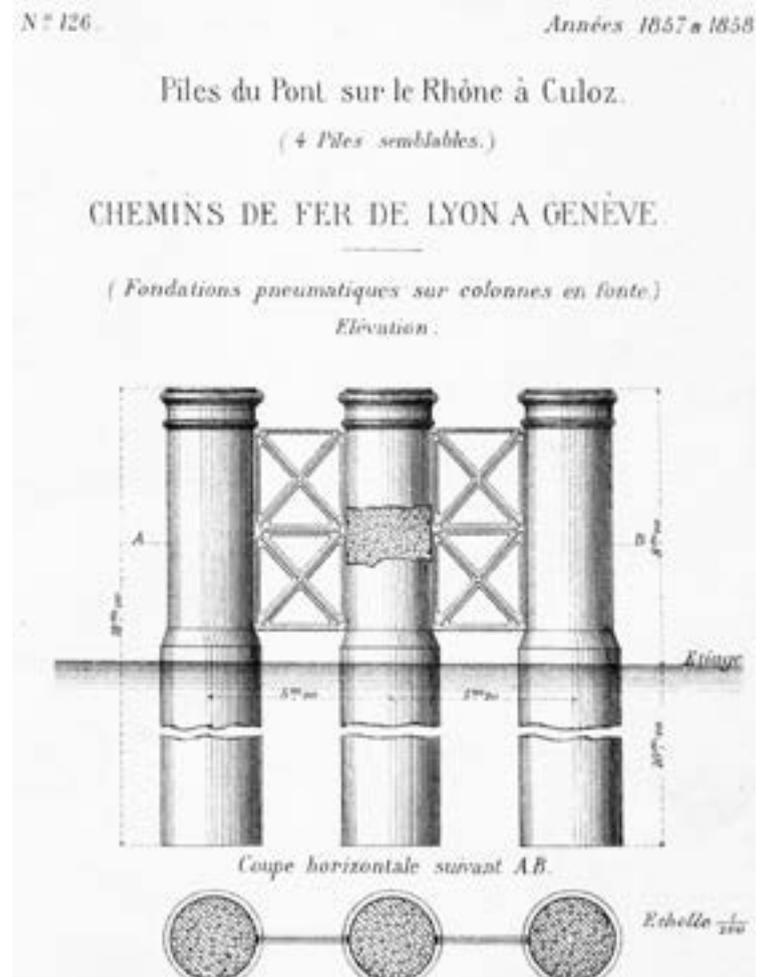


Fig. 13 | Ponte a Culoz: dettaglio costruttivo della pila costituita da tre tubi collegati mediante traversi e diagonali in ferro (Gouin 1878)



Fig. 14 | Ponte a Culoz: vista dei tubi in ghisa a tutt'altezza e delle travature reticolari (Ministère des travaux publics, 1873).

Entrambi comportano il ricorso ad ampie luci, anche superiori ai 150 m, e uno schema statico a travata continua su più appoggi già proposto, per esempio, nei ponti sulla Agogna e sulla Stura (figura 7). Le travate reticolari sono composte da profili in ferro collegati con unioni chiodate e presentano diagonali a croce di Sant'Andrea (figura 10). Un traverso superiore collega le due travate ed è realizzato con un profilo composto da lamiere sagomate ad arco [15]. Le pile dei due ponti sono realizzate con l'applicazione delle fondazioni pneumatiche, per le quali vengono adottate soluzioni costruttive diverse, adeguate alla capacità tecnica delle imprese coinvolte.

Alle pile del ponte di Cruet, noto anche come Pont des Anglais, partecipa la stessa impresa coinvolta da Brassey negli attraversamenti della linea Torino-Novara, che mette in campo le stesse modalità operative precedentemente sperimentate e adattate alle maggiori dimensioni del ponte. Per ogni pila sono infatti impiegati tre tubi di ghisa, ciascuno di 2 m di diametro, affondati al suolo per una profondità superiore ai 4 m (figura 11). Oltre alle travi di raccordo, il collegamento tra le teste dei tubi è ottenuto con una lamiera in ferro dell'altezza di un metro che circonda il margine delle opere in muratura (figure 8 e 9). La parte superiore delle pile è realizzata con una muratura a sacco delimitata da paramenti in pietra e dal riempimento di calcestruzzo, a definire un elemento

massivo e compatto [16].

Per la costruzione del ponte di Culoz, che segna il confine tra il Regno di Sardegna e la Francia, è previsto un accordo di collaborazione tra le società coinvolte dai rispettivi Paesi.

L'impalcato in ferro, del tutto identico a quello di Cruet e sul quale sono fissati stemmi francesi e sabaudi, è affidato alla Società Vittorio Emanuele, mentre le fondazioni e alcuni lavori di sistemazione dell'alveo sono assegnati alla Società della Ferrovia Lione-Ginevra (figure 12-14). Quest'ultima incarica della costruzione delle pile l'impresa Ernest Gouin et Cie che, tra il 1856 e il 1857, applicando il procedimento Triger, interviene nella posa in opera di dodici tubi in ghisa, affondati fino a 10 m di profondità e successivamente riempiti con calcestruzzo (figura 13).

A differenza dei ponti precedenti, l'impresa parigina non realizza lavori di muratura ma estende l'altezza dei tubi che, collegati a gruppi di tre da profili in ferro a croce di Sant'Andrea, provvedono direttamente all'appoggio dell'impalcato. Questa soluzione, combinata con le pile meno massicce, attenua l'impatto visivo dell'infrastruttura [17-18].

Altri ponti ferroviari, realizzati dopo l'Unità d'Italia, si gioveranno degli sviluppi tecnici che di lì a poco investiranno le fondazioni pneumatiche tubolari.



Fig. 15 | Ponte ferroviario sul fiume Reno a Kehl vicino Strasburgo, al confine tra Francia e Prussia (Cartolina d'epoca - Cie alsacienne des arts photomécaniques, 1920).

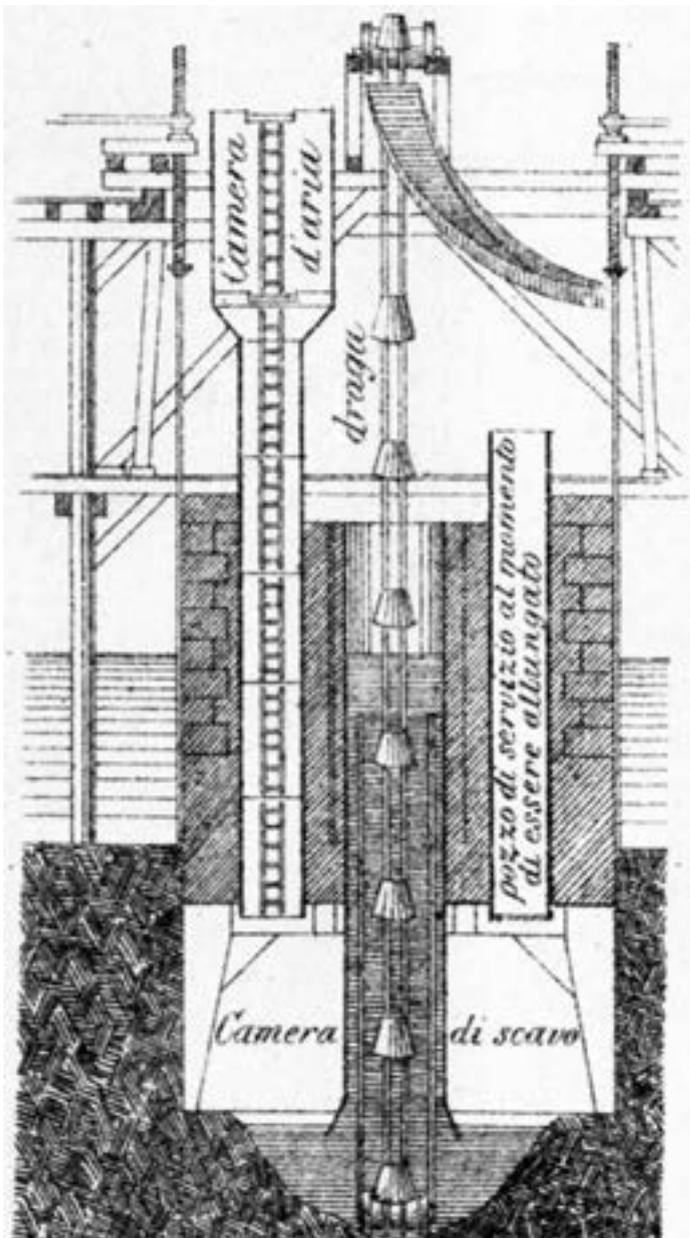


Fig. 16 | Ponte a Kehl: fondazioni pneumatiche a cassone messe a punto dall'ingegnere Fleur St. Denis e specializzazione dei "camini" soprastanti la camera di lavoro (Bruno, 1892).

4. Fondazioni pneumatiche a cassone nel nuovo Regno d'Italia

Lo sviluppo della rete ferroviaria nella penisola resta uno dei principali obiettivi anche dopo l'Unità d'Italia, nella prospettiva di portare a termine le linee parzialmente realizzate negli stati preunitari completandone il tracciato.

L'attenzione del governo si concentra sul collegamento delle linee ferroviarie tra Lombardia, Emilia Romagna e Veneto, separate dal Po il cui attraversamento doveva misurarsi con l'estensione dell'alveo, decisamente più impegnativo in quanto compreso tra i 300 e i 400 m. A valle della ricognizione delle risorse disponibili e delle soluzioni da adottare, sin dal 1861 si procede a programmare la realizzazione di diversi ponti, compresi quelli destinati al collegamento delle linee ferroviarie Milano-Genova, Milano-Piacenza, Ferrara-Rovigo e Mantova-Modena [19].

Per gli attraversamenti da realizzare a Piacenza, a Mezzana Corti, a Pontelagoscuro e a Borgoforte è scelta la stessa tipologia strutturale: una travatura reticolare in ferro in grado di massimizzare la distanza tra gli appoggi, e pile sufficientemente alte per assicurare l'impalcato dall'onda di piena, impostate su fondazioni pneumatiche, da realizzarsi facendo ricorso alle innovazioni introdotte al metodo Triger in Inghilterra e in Francia alla fine degli anni Cinquanta dell'Ottocento, utili a migliorare il procedimento costruttivo. All'ingegnere Brunel si deve l'idea di dividere lo spazio compreso tra le pareti del tubo con diaframmi in grado di differenziare tra i canali di immissione dell'aria compressa e quelli dedicati al passaggio sia dei materiali di scavo che degli operai, messa in atto per la realizzazione del ponte Saltash sul fiume Tamar a Plymouth; l'ingegnere Fleur St. Denis, invece, per il ponte sul fiume Reno a Kehl vicino Strasburgo, sperimenta l'uso del cassone, ossia una struttura in ferro con un tagliante alla base e ampia quanto la parte superiore della pila, utile all'affondamento con aria compressa per garantire la verticalità dei tubi al crescere della profondità di infissione (figure 15-16).

L'innovazione introdotta da Fleur St. Denis comporta il definitivo abbandono delle strutture tubolari a favore dei cassoni, che saranno impiegati anche per i ponti sul Po [20]. In particolare i ponti a Piacenza e a Pontelagoscuro, rispettivamente il primo e il terzo in ordine di completamento, rappresentano i casi più significativi di applicazione di questo particolare tipo di fondazioni.

4.1 Il ponte a Piacenza

Per il collegamento della linea ferroviaria tra Milano e Piacenza, il progetto del ponte, alla cui costruzione sovrintende l'ingegner Giovanni Battista Biadego, prevede l'impiego di una travatura reticolare continua in ferro sostenuta da sette pile in alveo, lunga ben 280 m (figura 17).

I lavori sono affidati all'impresa Parent, Schaken, Caillet et Cie, società di costruzioni in carpenteria metallica con base a Fives-Lille e diretta dall'ingegnere Félix Moreaux, che aveva partecipato anche alla realizzazione del ponte a Culoz.

Per tutte le pile, di altezza complessiva di ben 30 m, sono utilizzate per la prima volta in Italia fondazioni pneumatiche a cassone infisse al suolo per circa 20 m, simili a quelle impiegate due anni prima per il ponte a Kehl. Ogni cassone, ottenuto dal collegamento di lastre in ferro dello spessore di 12 mm, è aperto alla base con un

tagliante e chiuso nella parte superiore, configurando una camera di lavoro alta 2,2 m. Alla lastra superiore sono fissati tre tubi, chiamati anche camini, composti di anelli di ferro: i due laterali sono provvisti in sommità di camere di equilibrio e servono per la regolazione dell'aria compressa e l'esodo degli operai; il terzo, centrale, ospita una draga per le operazioni di scavo e di sollevamento degli sterri (figura 18). La parte superiore del cassone, rinforzata con travi in ferro a doppio T, funge anche da cassero a perdere ed è funzionale alla realizzazione delle parti murarie soprastanti (figura 20). Il ponte a Piacenza è tra i primi in Italia ad essere dotato di cassoni con illuminazione naturale e artificiale ottenuta mediante lenti convesse inserite sulla copertura delle camere di equilibrio e lampade elettriche ad incandescenza che non alterano il contenuto di ossigeno dell'aria interna, come accadeva in precedenza con l'uso di candele o lampade a gas.

La costruzione di ogni pila è affidata a una squadra di dieci operai, alcuni dei quali, all'esterno del cassone, provvedono alla movimentazione di otto verricelli, collegati a un ponte temporaneo in legno e utili a mantenere l'orizzontalità del cassone. Raggiunta la profondità desiderata, la camera di lavoro e i camini sono riempiti in calcestruzzo (figura 19).

I lavori di realizzazione delle pile iniziano nell'agosto del 1862 ma sono sospesi l'anno successivo a causa del cedimento di una parte del ponte di servizio in legno che comporta anche la perdita di alcune travate in ferro, montate sulle pile già completate. Alla fine

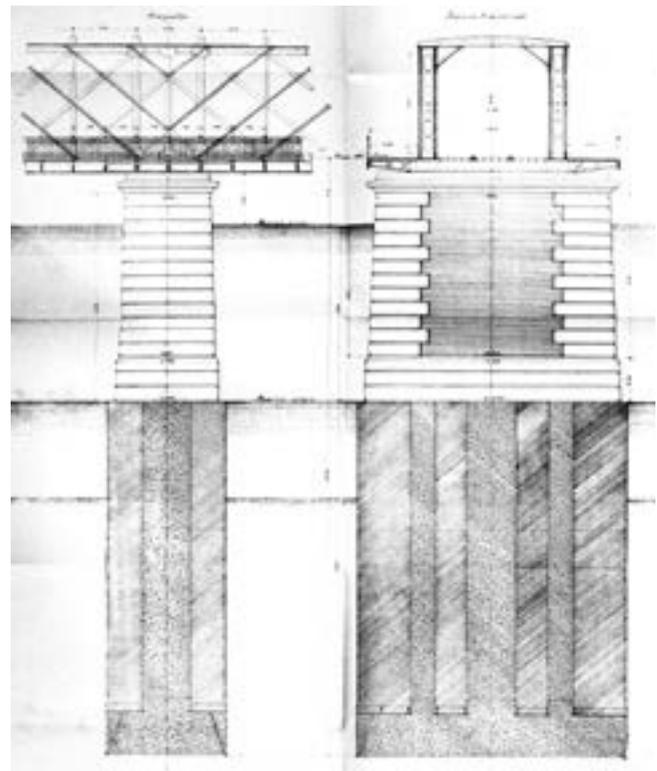


Fig. 19 | Ponte a Piacenza: dettagli costruttivi della struttura in ferro del cassone (Biadego, 1886).

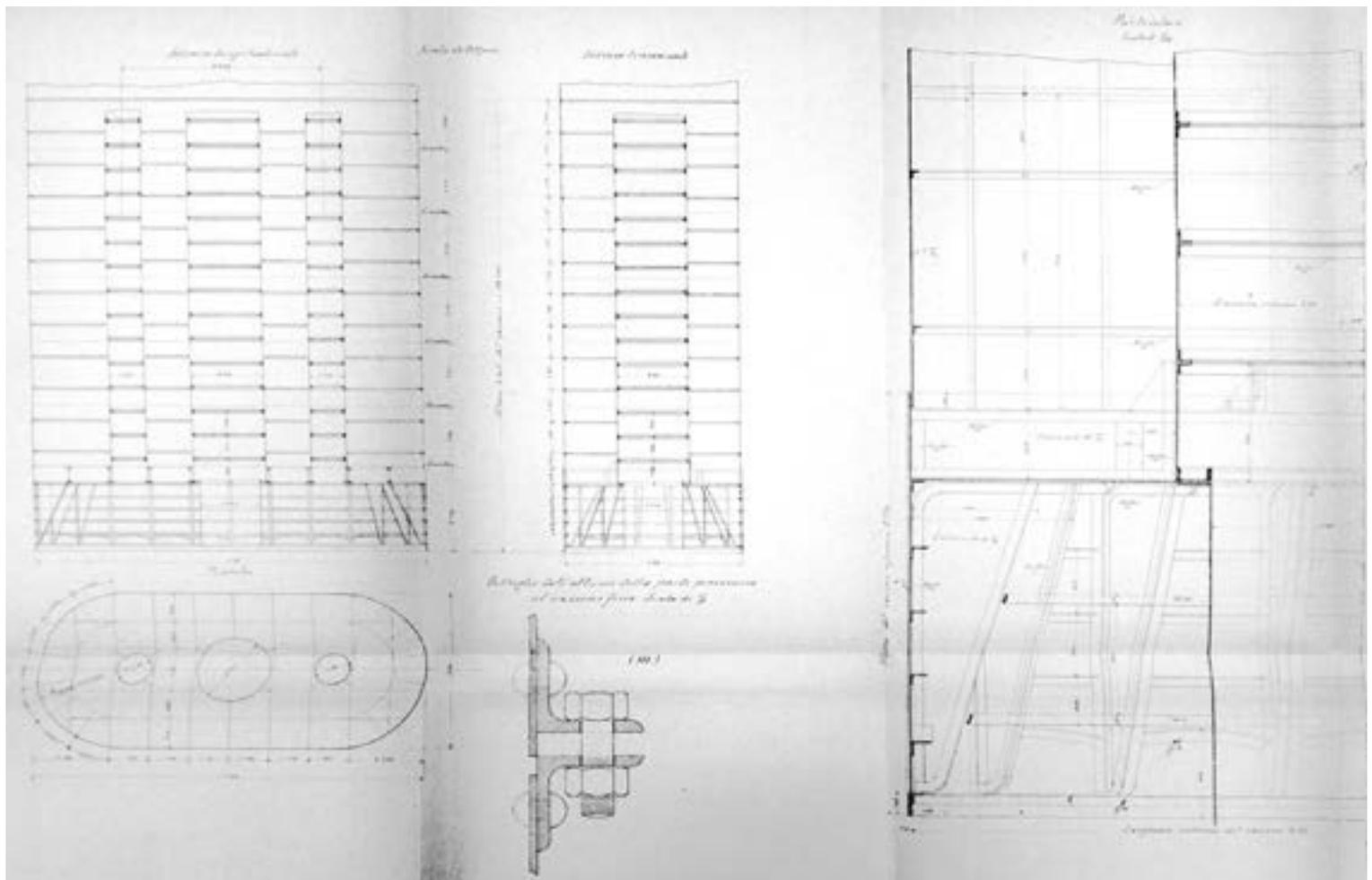


Fig. 20 | Ponte a Piacenza: dettagli costruttivi della struttura in ferro del cassone (Biadego, 1886).

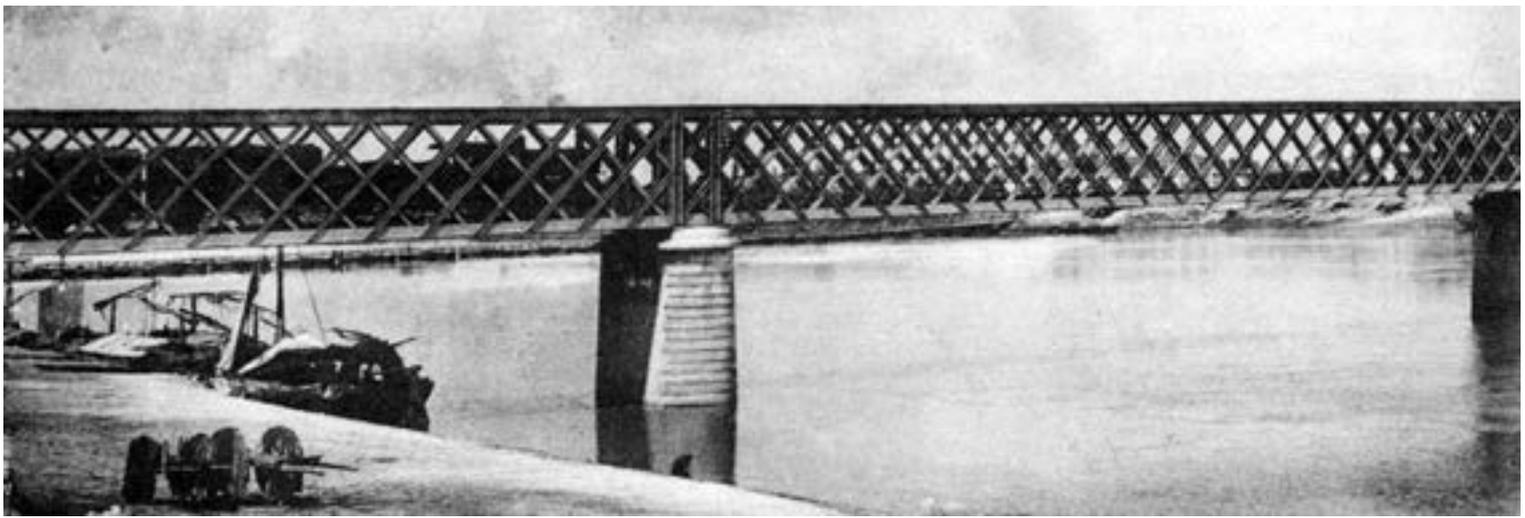


Fig. 21 | Ponte ferroviario sul fiume Po a Pontelagoscuro (Cartolina d'epoca - Prampolini, 1902).

dell'anno successivo, riparata la struttura di servizio e recuperata una parte dei materiali, i lavori vengono ripresi e ultimati nel 1865 [21].

4.2 Il ponte a Pontelagoscuro

La linea ferroviaria tra Bologna e Pontelagoscuro, aperta nel 1862, prevede un attraversamento sul Po con una luce di oltre 350 m utile al collegamento con il tracciato che conduce a Venezia.

Le travate continue del ponte sono suddivise in sei campate e sono sostenute da cinque pile in alveo (figura 21). A differenza del ponte

a Piacenza, le travate reticolari non impiegano montanti e sono ottenute con profili ad U per i correnti che accolgono il collegamento a diagonali a doppio T, orientate a 45 gradi (figura 22).

Il progetto dell'ingegnere Gaetano Ratti è affidato di nuovo all'impresa Parent, Schaken, Caillet et Cie, cui partecipa l'industriale Jean-François Cail, impegnato nella costruzione di diverse ferrovie in Europa.

Le dimensioni delle pile sono simili a quelle del ponte di Piacenza e ciò induce a reiterare il ricorso a fondazioni a cassone, che si accompagna all'innovazione nel sistema di trasporto dei materiali

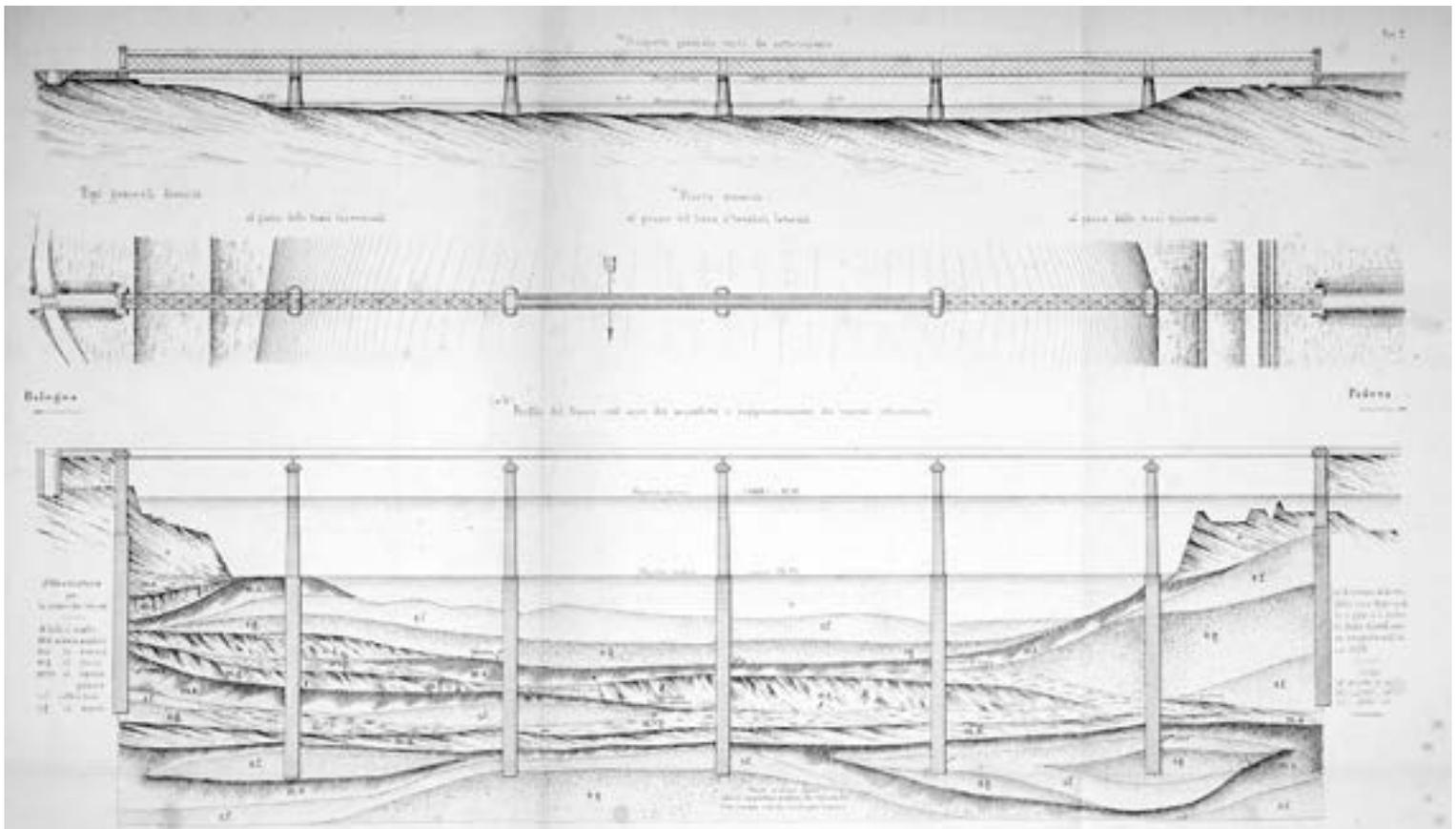


Fig. 22 | Ponte a Pontelagoscuro: tavola di progetto con indicazione della profondità delle fondazioni pneumatiche e stratigrafia del terreno (Ratti, 1876).

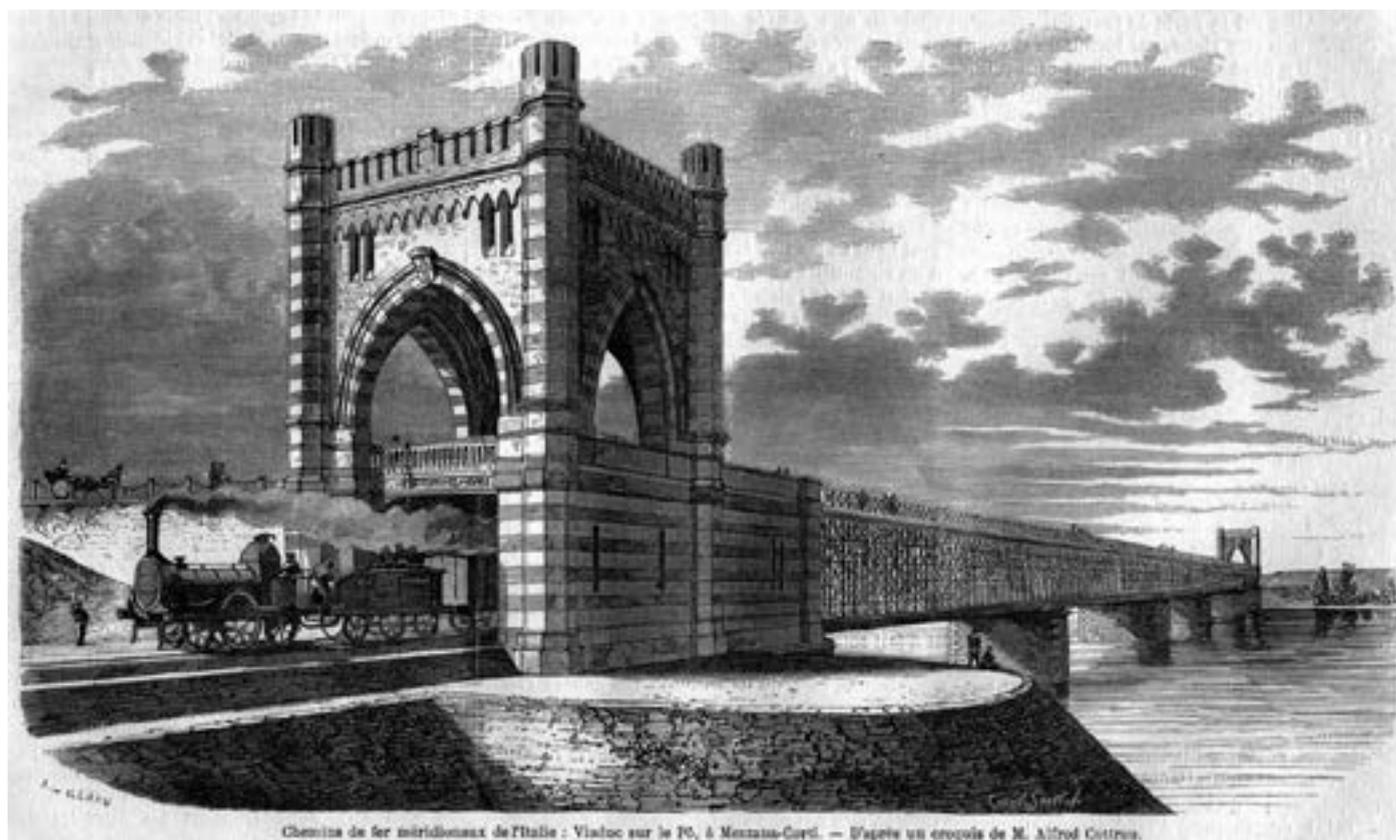


Fig. 23 - Ponte ferroviario sul fiume Po a Mezzana Corti (Illustrazione d'epoca - Cosson, Smeeton et Cie, 1866).

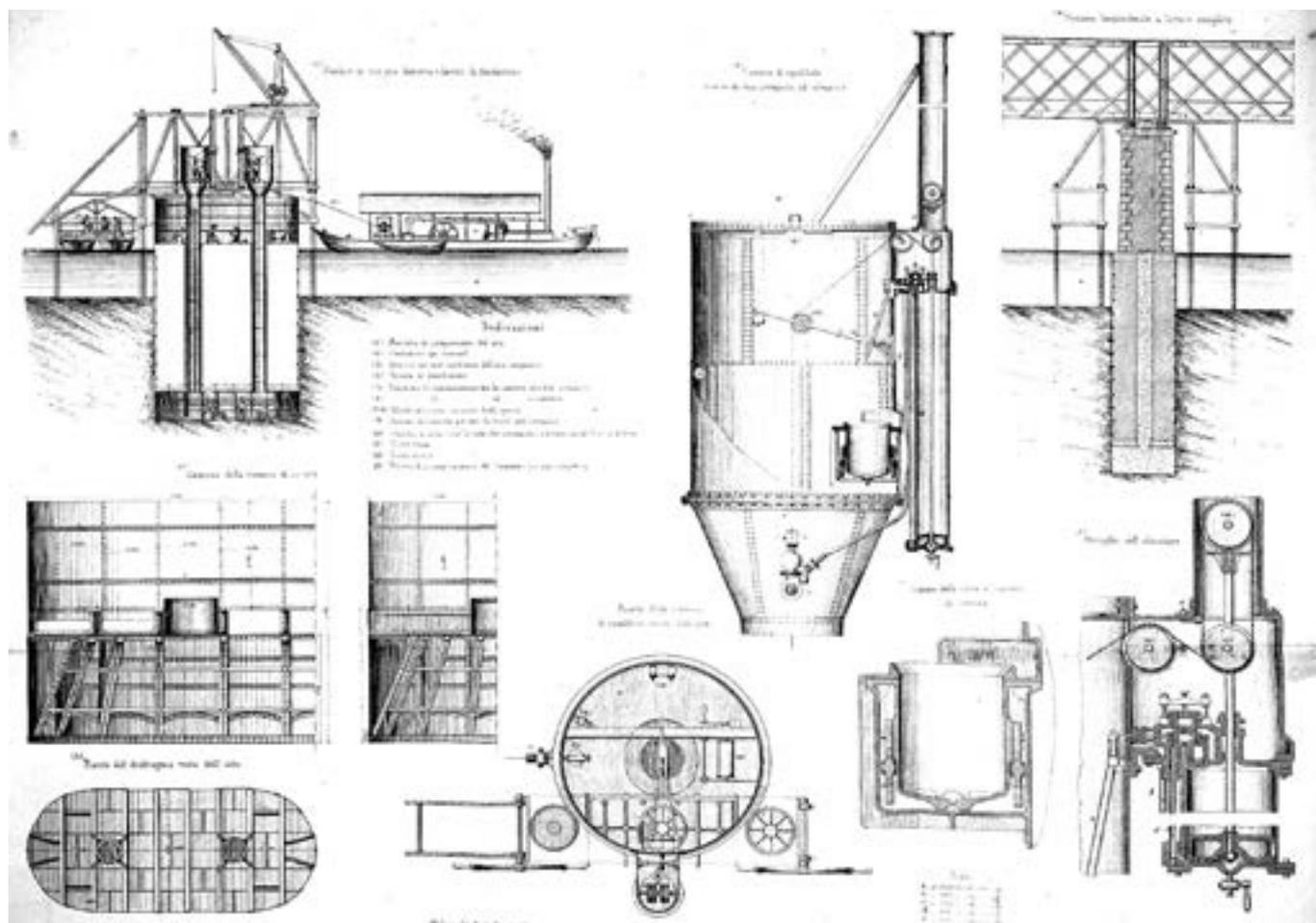


Fig. 24 | Ponte a Pontelagoscuro: tavola illustrativa dell'affondamento del cassone e della camera di equilibrio progettata dall'ingegnere Moreaux (Ratti, 1876).

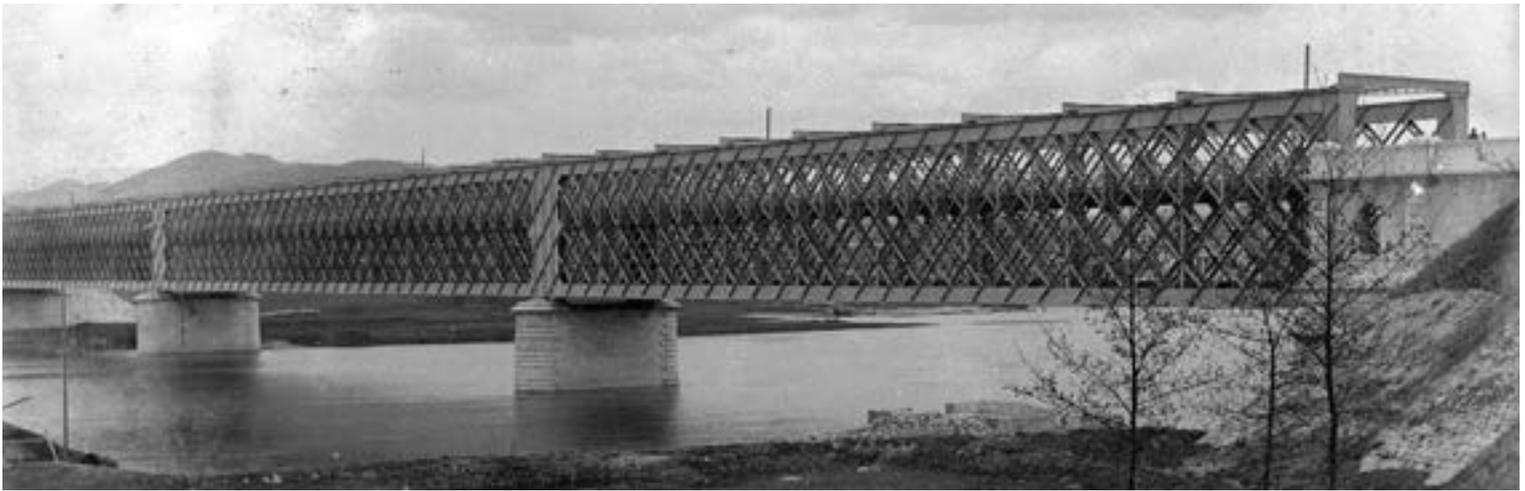


Fig. 25 | Ponte ferroviario sul fiume Ticino a Sesto Calende (Tamborini, 2002).

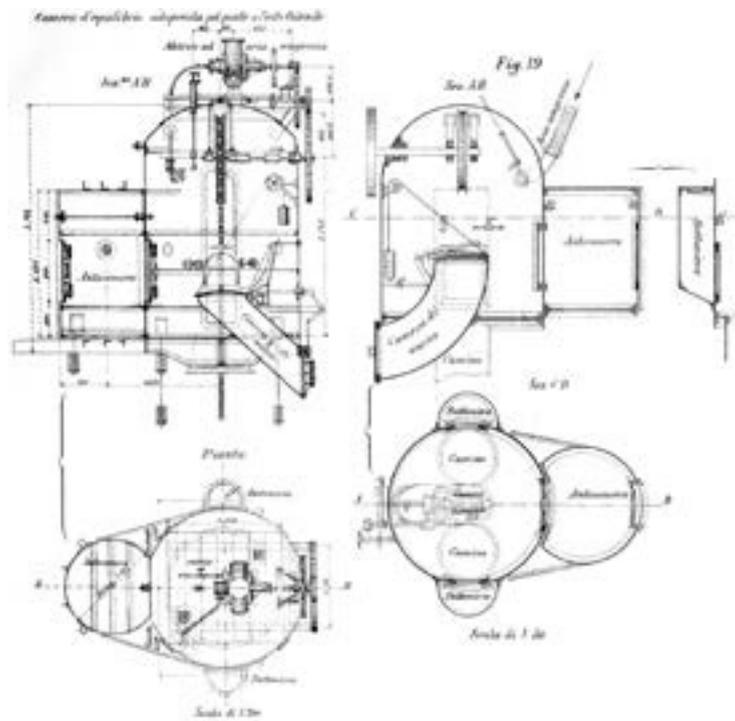


Fig. 26 | Ponte a Sesto Calende: camera di equilibrio progettata dalla IICM (Bruno, 1892).

di scavo – sviluppata da Moreaux e sperimentata in una prima soluzione per il ponte di Mezzana Corti (figura 23) – per porre rimedio al blocco della draga, impiegata nel camino centrale, a seguito dello scompensamento che comportava nella regolazione dell'aria compressa della camera di lavoro e la conseguente interruzione dei lavori per motivi di sicurezza.

Partendo da queste constatazioni, l'ingegnere francese utilizza un cassone di dimensioni 11x5 m con due camini, sui quali applica in sommità una camera di equilibrio che funge anche da argano per il movimento dei materiali di scavo limitando così la perdita di pressione dell'aria. La camera è dotata, infatti, di un cilindro di 25 cm di diametro e alto 3 m, all'interno del quale si muove uno "stantuffo" messo in moto dall'aria compressa.

Quest'ultimo impartisce il movimento a un sistema di funi e carrucole, azionato da un operaio che svuota i secchi di terra provenien-

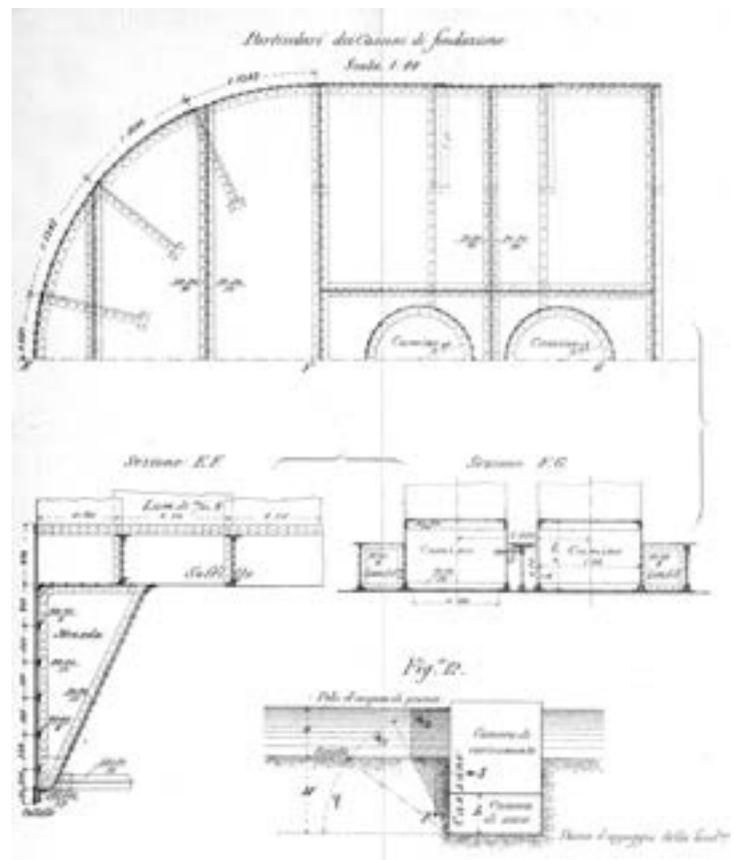


Fig. 27 | Ponte a Sesto Calende: dettagli costruttivi della struttura in ferro del cassone (Bruno, 1892).

ti dalla camera di lavoro all'interno di un recipiente montato su un carrello che, spinto all'esterno, consente l'ingresso nella camera di equilibrio a quello successivo vuoto (figura 24).

In questo sistema l'aria compressa non è persa nella fase di espulsione dello sterro e risulta utile alla movimentazione dei materiali di scavo.

Per le restanti opere murarie, come a Piacenza, si fa uso di "cemento idraulico" di Palazzolo e di un rivestimento in pietra calcarea di Domegliara.

I lavori iniziati nel 1870 sono conclusi l'anno successivo, grazie al sistema pneumatico brevettato dall'impresa [22].

Le successive innovazioni introdotte non modificano in forma sostanziale il procedimento costruttivo riguardando esclusivamente l'implementazione sia di dispositivi meccanici nella camera di equilibrio che di sistemi che ottimizzano la tenuta d'aria compressa nella fase di espulsione dei materiali di scavo.

5 Conclusioni

Negli anni Cinquanta e Settanta dell'Ottocento l'impiego di fondazioni pneumatiche è determinante nella concezione e costruzione delle cosiddette "opere d'arte" tipiche delle infrastrutture concorrenti alla crescita economica e commerciale del Paese.

L'iniziale affidamento dei lavori per la realizzazione di queste opere a società inglesi e francesi mette in evidenza l'arretratezza del settore delle costruzioni, condizione da cui l'Italia si solleverà gradualmente alla fine degli anni Settanta con l'affermazione in cam-

po edilizio dell'Impresa Industriale Italiana di Costruzioni Metalliche, la prima a realizzare fondazioni pneumatiche tubolari, per il ponte pedonale di Ripetta a Roma nel 1878, e a cassone, di grandi dimensioni (figura 25), per il ponte ferroviario a Sesto Calende sul fiume Ticino del 1882 [23, 24]. Per quest'ultimo, di cui è incaricato l'ingegnere Giovanni Battista Biadego, l'impresa di Cottrau progetta una camera di equilibrio secondo il modello di Pontelagoscuro, che integra però con un'anticamera – in grado di ottimizzare la regolazione d'aria compressa – e con canalizzazioni utili al passaggio del calcestruzzo (figure 26-27). Accorgimenti, questi, che dimostrano le competenze acquisite nel settore delle fondazioni pneumatiche dalle imprese nazionali, ormai in grado di gestire e di innovare in piena autonomia le tecnologie d'importazione riducendo così, lo spazio d'azione della concorrenza d'oltralpe.

Bibliografia

- [1] G. Novi, *Usò del ferro e sua conservazione. Tradizioni ed esperienze. Pregi singolarissimi del ferro, sue applicazioni, sue azioni sulla prosperità e potenza delle nazioni*, in *Atti del Reale Istituto d'Incoraggiamento alle Scienze Naturali di Napoli*, Stabilimento tipografico del Reale Istituto d'Incoraggiamento, Napoli 1864, pp. 36-37.
- [2] I. Briano, *Storia delle ferrovie in Italia*, Cavallotti, Milano 1977.
- [3] F. Predari, *Guida topografica, storica, artistica di Venezia ed isole circonvicine*, C. Coen, Venezia 1867.
- [4] A.M. Zorgno Trisciunglio, "I ponti metallici nello sviluppo della rete ferroviaria italiana del XIX Secolo", in V. Nascè, *Contributi alla storia della costruzione metallica*, Alinea Editrice, Firenze 1982, pp. 179-218.
- [5] H. S. Drinker, *A treatise on explosive compounds, machine rock drills and blasting*, John Wiley & Sons, New York 1883.
- [6] G. Curioni, *L'arte di fabbricare ossia corso completo di istituzioni teorico-pratiche*, Augusto Federico Negro Editore, Torino 1868.
- [7] D. G. Dempsey, *The practical railway engineer: a concise description of the engineering and mechanical operations and structures which are combined in the formation of railways for public traffic, with facts, figures, and data*, John Weale, London 1855.
- [8] J. Hughes, *On the pneumatic method adopted in constructing the foundations of the new bridge across the Medway at Rochester*, W. Clowes, London 1859.
- [9] S. Cavicchioli, *Vie e mezzi di trasporto da Carlo Alberto all'Unità*, in P. Sereno (a cura di), *Torino reti e trasporti: strade, veicoli e uomini dall'Antico regime all'Età contemporanea*, Archivio Storico della Città di Torino, Torino 2009, pp. 59-104.
- [10] G. Stefani, *Statistica delle strade ferrate dello Stato*, in Ministero dell'Interno (a cura di), *Annuario storico-statistico*, Tipografia sociale degli artisti A. Pons e C, Torino 1853, pp. 109-110.
- [11] E. F. Murray, *Edward Francis Murray*, in James Forrest (a cura di), *Minutes of proceedings of the institution of civil engineers*, Institution of Civil Engineers, London 1883, pp. 289-290.
- [12] G. Casalis, *Dizionario geografico-storico-statistico-commerciale degli stati di S. M. il Re di Sardegna*, Tipografia Marzorati, Torino 1855.
- [13] L. Pozzi, *Le fondazioni pneumatiche o ad aria compressa*, Unione Tipografica Editrice, Torino 1892.
- [14] G. Neumann, *Passage of the Mount Cenis*, in Devonshire Association (a cura di), *Transaction of the Devonshire Association for the advancement of science, literature and art*, William Brendon & Son, Plymouth 1867, pp. 327-331.
- [15] M. Messiez, *Le pont des Anglais: le plus ancien pont de chemin de fer du monde*. *L'Histoire en Savoie Magazine*, febbraio 1992, n. 26, pp. 34-39.
- [16] R. Decker, *Le pont Victor-Emmanuel (ou pont des Anglais), architecture*, in "Bulletin de l'Association des Amis de Montmélian et de ses Environs", dicembre 2020, n. 104, pp. 2-5.
- [17] R. Park-Barjot, *La Société de construction des Batignolles: des origines à la Première Guerre mondiale*, PUPS-Press de l'Université Paris-Sorbonne, Paris 2005.
- [18] E. Goüin, *Société de Construction des Batignolles, Ponts métalliques et fondations pneumatiques*, Geoffroy, Paris 1878.
- [19] B. Besso, *Le strade ferrate*, E. Treves, Milano 1870.
- [20] G. Bruno, *Le fondazioni pneumatiche: appendice al corso di costruzioni idrauliche*, Reale scuola di applicazione per gli ingegneri in Napoli, Napoli 1892.
- [21] G. B. Biadego, *Fondazioni ad aria compressa: ponti metallici*, Tipografia e Litografia Camilla e Bertolero Editori, Torino 1886.
- [22] G. Ratti, *Ponte sul Po a Pontelagoscuro*, Litografia e tipografia degli ingegneri, Milano 1876.
- [23] U. Carughi, *Alfredo Cottrau (1839-1898): l'architettura del ferro nell'Italia delle grandi trasformazioni*, Electa, Napoli 2003.
- [24] A.M. Zorgno, *La materia e il costruito*, Alinea Editrice, Firenze 1988.

- [25] G. Agricola, De Re Metallica, H. Probenio et N. Episcopio, Basilea 1556.
- [26] V. Torelli (a cura di), L'omnibus pittoresco: enciclopedia letteraria ed artistica con figure incise in rame, Tipografia dell'omnibus, Napoli 1840.
- [27] A. Burat, Geologie appliquee, ou Traite de la recherche et de l'exploitation des mineraux utiles, Langlois et Leclercq, Parigi, 1846.
- [28] G. Fassò, Via ferrata Novara-Varallo: album delle principali opere d'arte, Fratelli Tensi, Borgosesia 1880.
- [29] F. Pépellin, Pont Victor-Emmanuel dit Pont des Anglais à Cruet, Momentum, Carte des Monuments Historiques français, <https://monumentum.fr/pont-victor-emmanuel-dit-pont-des-anglais-pa00132954.html>, [Online; accesso 6 Maggio 2021].
- [30] Ministère des travaux publics, Savoie, Haute Savoie, Isère: photographies, École nationale des ponts et chaussées, Parigi 1873.
- [31] G. Strafforello, La Patria: geografia dell'Italia. Provincie di Parma e Piacenza, Unione tipografico-editrice, Torino 1902.
- [32] C. Tamborini, I ponti sul Ticino a Sesto Calende, Associazione Pro Sesto Calende, Varese, 2002.

Ringraziamenti

Un particolare ringraziamento va al personale dell'Archivio di Stato di Torino per l'assistenza alla ricerca sulle prime ferrovie in Piemonte. La nostra riconoscenza va a Robert Porret della Société Savoisiennne d'Histoire et d'Archéologie (SSHA), Roger Decker dell'Association Cruet Nature & Patrimoines (ACN&P) per la documentazione sui ponti in Savoia. Vogliamo inoltre ringraziare lo staff di cinque biblioteche per le ricerche svolte su ponti ferroviari del XIX secolo: la Biblioteca E-Rara del Politecnico ETH di Zurigo, la British Library di Londra, la Biblioteca Boaga di Roma La Sapienza, la Biblioteca Centrale di Ingegneria dell'Università degli Studi di Padova e la Biblioteca Civica Carlo Negrone di Novara.



Matteo Abita

PhD in Ingegneria Civile, Edile-Architettura e Ambientale, svolge in qualità di assegnista presso il Dipartimento DICEAA (L'Aquila), attività di ricerca sulla cultura della costruzione metallica e sugli strumenti digitali utili alla sua valorizzazione e divulgazione, i cui esiti sono stati pubblicati in riviste e atti di convegno a carattere nazionale e internazionale. Dall'a.a. 2019-2020 è docente a contratto del laboratorio progettuale di Architettura Tecnica I (Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile-Architettura UE).



Alessandra Tosone

Associato di Architettura Tecnica e membro del collegio del Dottorato di Ricerca (ICEAA - L'Aquila), svolge attività didattica nel corso di Laurea magistrale in Ingegneria Edile-Architettura dove insegna Materiali e Tecniche per il Recupero e coordina il laboratorio integrato di tesi di laurea dei corsi inerenti il recupero e la conservazione degli edifici. Il lavoro di ricerca interessa la cultura tecnologica e in particolare quella relativa alla costruzione metallica. È autrice di numerosi contributi sul recupero del costruito e la cultura della costruzione metallica pubblicati in volumi collettanei, riviste e atti di convegno a carattere nazionale e internazionale.



Renato Morganti

Ordinario di Architettura Tecnica e Presidente del Consiglio di Corso di Studi in Ingegneria Edile-Architettura UE, è membro del collegio del Dottorato di Ricerca (ICEAA - L'Aquila) e del Consiglio direttivo di Docomomo Italia, nonché del comitato scientifico di riviste e collane editoriali. Dal 2006 coordina a L'Aquila ricerche sui temi della cultura della costruzione metallica e del recupero del costruito. È autore di monografie, saggi e articoli e le sue opere, più volte premiate, sono state pubblicate su riviste, monografie e rassegne di architettura in Italia e all'estero.



Danilo Di Donato

Associato di Architettura Tecnica e membro del collegio del Dottorato di Ricerca (ICEAA - L'Aquila), svolge attività didattica nell'ambito dei corsi di Laurea magistrale in Ingegneria Edile-Architettura e Ingegneria Civile. Il lavoro di ricerca riguarda diversi ambiti di studio relativi alla cultura della costruzione metallica e in particolare l'architettura per l'industria. È autore di monografie e articoli sulla cultura della costruzione metallica e sul recupero e sulla conservazione del costruito pubblicati in riviste e atti di convegno a carattere nazionale e internazionale.