

SPECIALE MOSE

MAR/APR 2021



RIVISTA BIMESTRALE
PER LA DIFFUSIONE
DELLA CULTURA DELL'ACCIAIO

COSTRUZIONI METALLICHE

ISSN n° 0010-9573 Poste Italiane SpA - Speculazione in Abbonamento Postale - DL 355/2003 (conv. in L. 27/02/04 n. 46) Art. 1, comma 1, L. 30/01/2003 n. 10 - In caso di mancato pagamento, inviare a C.T.A. di Milano, Bazzani per la restituzione al mittente prova pagamento rasoio



Giornate Nazionali di Saldatura

GNS 11

L'EVENTO CULTURALE DI RIFERIMENTO
NEL MONDO DELLA FABBRICAZIONE
DEI PRODOTTI SALDATI



SAVE
THE
DATE

GENOVA, 2 - 3/12/2021
PORTO ANTICO | CENTRO CONGRESSI

WORKSHOP TECNICO SCIENTIFICI | CORSI DI FORMAZIONE | AGGIORNAMENTI | FAQ | ESPOSIZIONE

SPONSOR TECNICI | Aggiornamento al 20/05/2021



SALDOBRAZ
CLOOS

SunTec
Heating Systems

LINCOLN
ELECTRIC
THE WELDING EXPERTS®

OLYMPUS



smarTndt
INNOVATIVE SOLUTION PROVIDER

POLYSOUDE
Polysoude Italia



INE
Your welding power

SIAD

LUCCHINI RS



Air Liquide

PITTARC

KEMPPI

www.gns.iis.it



Tekla
Structures
NUOVA VERSIONE 2021

BIM per l'Ingegneria Strutturale

Tekla Structures 2021: la qualità di sempre
al prezzo più conveniente di sempre

Tekla Structures 2021 si presenta in una nuova modalità: la formula in Subscription, a noleggio.

La nuova versione del software è ancora più facile da utilizzare.

Quali sono i vantaggi della modalità Subscription?

- Investimento iniziale inferiore rispetto al passato
- Sempre aggiornato alla nuova versione
- Supporto tecnico compreso nel canone di noleggio
- Flessibile e adatto alle nuove esigenze del mercato

e molto altro...

Rivenditore esclusivo per l'Italia

since 1990

HARPACEAS
More than BIM

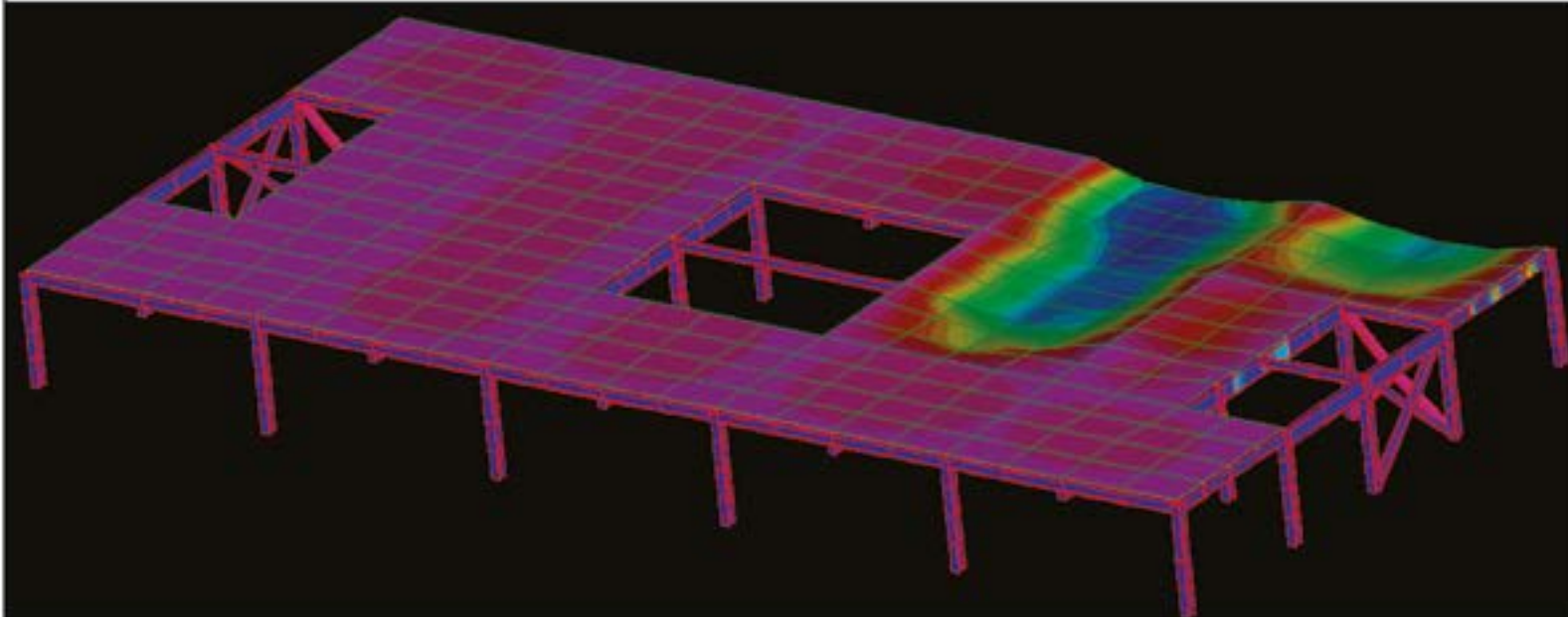


Busan Cinema Center has the Longest Cantilever Roof in the World

 **Straus7**[®] L'eccellenza
FEM
accessibile.
Nativo Non-Lineare www.hsh.info

Nessun limite pratico nel calcolo strutturale agli elementi finiti

PER L'INGEGNERIA E PER L'INDUSTRIA



PROGETTAZIONE ANTINCENDIO



Foto e immagine del modello di calcolo per gentile concessione
Prof F. Bontempi, Ing. A. Aguinagalde e Ing. F. Petrini
Articolo tecnico in www.hsh.info/bnt21.htm

Distributore esclusivo
per l'Italia del codice
di calcolo **Straus7**



HSH srl - Tel. 049 663888
Fax 049 8758747
www.hsh.info - straus7@hsh.info

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, Legnano (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; costruzioniinmetalliche@ctanet.it
 http://www.collegiotecniciacciaio.it/costruzioniinmetalliche/

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

costruzioniinmetalliche@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. BRENNI, M. ORMELESE	Corrosione e protezione delle strutture offshore

IL TEMPO CAMBIA TUTTO, TRANNE UN PONTE ZINCATO A CALDO.

Il mondo cambia in fretta con il passare del tempo, evolve tecnologicamente, si trasformano i modi di vivere e di muoversi, e inevitabilmente si deteriorano tutti quegli elementi, come l'acciaio, sensibili all'attacco degli agenti atmosferici e non solo. Il processo di zincatura a caldo permette di difendere i manufatti in acciaio dalla corrosione, mantenendo inalterate le proprietà delle strutture per un periodo che spesso supera il loro stesso ciclo di vita.

Un ponte, i cui elementi sono protetti dalla zincatura a caldo, garantisce durabilità, sicurezza e solidità per il nostro futuro.



SPECIALE MOSE



Questo numero di Costruzioni Metalliche è un omaggio ad una delle costruzioni più importanti realizzate negli ultimi anni: parliamo del MOSE, acronimo di MODulo Sperimentale Elettromeccanico, che ha occupato tante pagine dei giornali, ma poche pagine delle riviste specializzate di ingegneria come la nostra. Ecco allora che, passate o sopite tante polemiche, possiamo analizzare questa opera nei suoi risvolti tecnici di notevole difficoltà, sia per le grandi dimensioni della stessa, sia per l'interazione suolo struttura, sia per le tecniche di prefabbricazione montaggio e difesa dalla corrosione, fino al controllo e al monitoraggio in opera di ogni componente. È stata una grande sfida per l'ingegneria italiana, oggi spesso messa sotto processo sull'onda di sfiducia che percorre tante testate giornalistiche. La sfida sembra ora vinta ed il pericolo dell'acqua alta a Venezia sembra ridimensionato e sotto controllo.

È stato possibile trattare l'argomento sulla nostra rivista grazie all'aiuto di molte persone che ci sembra corretto ringraziare: il Consorzio Venezia Nuova ed in particolare la dott.ssa Monica Ambrosini, gli ingegneri Enrico Pellegrini, Gian Paolo Colato, Alberto Fisichella e Matteo De Lazzaro. Non possiamo poi dimenticare l'aiuto datoci dal nostro past President Alberto Miazon, che ci ha dato l'ispirazione a costruire il numero, e la società Fagioli che ha già scritto sul MOSE in questa rivista ed in occasione del Congresso CTA del 2019.

Sul tema acciaio-acqua arricchiscono il numero altri interessanti articoli, come quello di Anna Dalla Valle su un progetto residenziale innovativo basato sul concetto di acqua come nuova forma di territorio, quello di F. Bolzoni, A. Brenna e M. Ormellese sul tema della corrosione e protezione delle strutture offshore e la rievocazione storica delle costruzioni delle fondazioni in alveo di molti importanti ponti ferroviari di inizio secolo, dovuta al gruppo di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Civile Edile-Architettura e Ambientale dell'Università degli Studi dell'Aquila.

Cogliamo l'occasione per sottolineare come nel tempo si sia sviluppata una collaborazione continua con molti redattori: dal gruppo dei Proff. Campioli e Morganti, più recentemente si è aggiunto il Laboratorio di corrosione dei materiali "Pietro Pedferri" del Politecnico di Milano. Stanno poi nascendo altre iniziative per rendere sempre più utile la rivista per i Progettisti.

Questo infatti è lo scopo primario che ci siamo prefissi da quando abbiamo iniziato il nostro lavoro di redazione: far conoscere la straordinaria capacità e bellezza delle strutture metalliche e dare indicazioni utili per il Progetto, la Direzione Lavori, il Collaudo nonché la gestione nel tempo delle stesse.

A tal fine continua la serie dei nostri quaderni tecnici del CTA: con il numero 1/2021 abbiamo distribuito ai Soci il Quaderno n.4, dedicato al Capitolato Tecnico, che il 14 maggio è stato presentato nelle sue linee principali in un apposito webinar. Insieme con il Quaderno n. 3, dedicato alla norma EN UNI 1090-2, esso costituisce la base sulla quale nei prossimi mesi si svilupperà una serie di incontri focalizzati su questi argomenti che fanno parte del bagaglio indispensabile dell'ingegnere strutturista dell'acciaio.

La Redazione di Costruzioni Metalliche

MOSE, il sistema di barriere per la difesa di Venezia e della sua laguna dalle acque alte

MOSE, the Venice tide barrier to protect the city of Venice and Venetian lagoon from tidal flooding of the Adriatic Sea.

A cura della Redazione

Il MOSE è un'opera pubblica: i principali attori coinvolti nella sua realizzazione sono la stazione appaltante, ovvero il Provveditorato Interregionale alle Opere Pubbliche del Triveneto, e l'esecutore, il concessionario Consorzio Venezia Nuova. Dalla fine del 2019 l'opera è posta sotto il coordinamento e il controllo del Commissario Straordinario per il MOSE, che sovrintende a questa delicata fase finale di completamento e inizio funzionamento dell'opera.

Il MOSE è un *unicum* nel panorama internazionale delle barriere di protezione dagli allagamenti del mare. Questo perché il lungo iter autorizzativo e ideativo ha cercato di rispondere a delle istanze

che erano quelle di interferire il meno possibile con il paesaggio e negli scambi idrici fra mare e laguna.

È un *unicum* anche sotto il profilo tecnologico: la tipologia delle paratoie non ha uguali negli altri esempi di paratoie nel mondo. Il Provveditorato Interregionale e il Consorzio Venezia Nuova sono membri dell'I-Storm, il *network* internazionale dei principali gestori di barriere di difesa, che riuniscono oltre al MOSE anche le barriere inglesi, olandesi e americane: nel confronto con le altre soluzioni adottate il MOSE conferma la propria specificità.





Fig. 1 | Venezia e la sua laguna

La laguna di Venezia. Un ecosistema da salvaguardare

Con i suoi 550 km² di superficie, la laguna di Venezia è una delle zone umide più grandi e importanti del Mediterraneo (figura 1). Si tratta di un ambiente estremamente fragile, dove ogni elemento viene lentamente modificato e modellato dall'azione dell'acqua e da quella dell'uomo. La laguna è divisa dal mare Adriatico da una sottile striscia di terra, il cordone litoraneo, che si sviluppa per circa 60 km dalla foce del fiume Piave a quella dell'Adige e comunica con il mare attraverso le Bocche di porto di Lido, Malamocco e Chioggia. Due volte al giorno, la marea entra ed esce dalla laguna, raggiungendo due punte massime e due punte minime (maree semidiurne).

Negli ultimi secoli una serie di fattori, dovuti a fenomeni naturali e ad interventi dell'uomo, ha profondamente alterato il territorio e l'ambiente lagunare veneziano. Gli interventi per la deviazione dei fiumi dalla laguna (dal XIV fino al XIX secolo), realizzati per contrastare il problema dell'interramento, hanno quasi completamente eliminato il rifornimento di sabbia e sedimenti dall'entroterra; così come tra '800 e '900 la costruzione dei moli foranei alle Bocche di porto, per assicurare il transito delle navi moderne, ha ridotto anche l'apporto di sabbia dal mare. Nel secolo scorso, inoltre, la creazione del polo petrolchimico di Porto Marghera ha prodotto un gravissimo inquinamento delle acque e dei fondali, mentre lo scavo di profondi canali di navigazione ha determinato

significative modifiche nell'idrodinamica lagunare.

Nel corso del tempo, la crescita del livello del mare (eustatismo) e l'abbassamento del suolo (subsidenza) hanno profondamente modificato il rapporto tra terra e acqua e provocato un abbassamento del suolo di circa 25 cm. solo negli ultimi cento anni. Poco, in apparenza; tantissimo, in realtà, per una città costruita a pelo d'acqua.

Alla fine del '900 il sistema lagunare ha dovuto affrontare una molteplicità di problemi, con origini antiche o con cause recenti: l'aumento delle acque alte per cui sempre più spesso, nei mesi autunnali e invernali, Venezia, Chioggia e altri centri urbani lagunari vengono completamente allagati; l'erosione dei litorali con la graduale scomparsa delle spiagge, essenziali per proteggere gli abitati costieri dalle mareggiate; il degrado dell'ambiente per il peggioramento della qualità di acqua e sedimenti e per la perdita di habitat propri dell'ecosistema, come barene e bassi fondali.

Il problema delle acque alte

La laguna è esposta alle maree dell'Adriatico, che due volte al giorno entrano ed escono dalla laguna attraverso le Bocche di porto. Il livello della marea in laguna è dovuto a fattori astronomici, ma è soggetto a importanti variazioni quando intervengono particolari condizioni di carattere atmosferico. Quando la marea cresce fino a provocare l'allagamento dei centri abitati si verifica il fenomeno dell'acqua alta (figura 2).



Fig. 2 | Acqua alta a Venezia

Nel corso del Novecento gli allagamenti sono drasticamente aumentati per frequenza e intensità. Il rapporto millenario della città con l'acqua, infatti, è cambiato a causa dell'eustatismo e della subsidenza. Nel tempo Venezia e gli altri abitati lagunari si sono trovati sempre più esposti agli allagamenti.

Il 4 novembre 1966 si è verificata l'alluvione più violenta e drammatica mai registrata. L'acqua raggiunse il livello di 194 cm e Venezia fu invasa da più di un metro d'acqua. La città sembrò sul punto di essere spazzata via e così gli altri centri storici in laguna e lungo i litorali.

All'indomani della grande alluvione del 1966, si prese pienamente consapevolezza che la crisi coinvolgeva l'intero "sistema laguna" a causa di un insieme di fattori, tra loro inevitabilmente connessi, quali l'aumento del livello del mare, l'abbassamento del suolo, l'erosione, l'inquinamento e il moto ondoso.

Nel caso di Venezia non si poteva prescindere dal fatto che la città si trova al centro di un ecosistema vasto, complesso e delicato. Proteggerla dalle acque alte ha significato pertanto intervenire per difenderla "all'interno della sua laguna", salvaguardando il territorio nella sua interezza e affrontando in maniera integrata tutti i fenomeni di degrado cui era soggetto.

Lo Stato italiano si è quindi impegnato per la salvaguardia di Venezia e della sua laguna e, attraverso la legislazione speciale per Venezia, ha definito gli ambiti e le modalità d'intervento, oltre ai soggetti attuatori: lo Stato italiano opera per la difesa dei centri urbani dalle acque alte, per la protezione dei territori costieri dalle mareggiate e per il riequilibrio ambientale dell'ecosistema; la Regione del Veneto per il disinquinamento e le Amministrazioni comunali per lo sviluppo socio-economico e per il restauro del patrimonio architettonico ed edilizio.

Il Piano integrato di opere per la salvaguarda della laguna

La complessità dei fenomeni da fronteggiare e l'ampiezza del territorio richiedevano una programmazione e un coordinamento per svolgere un'azione coerente e sistemica che è stata affidata a un concessionario, il Consorzio Venezia Nuova appunto, che ha operato per conto dello Stato (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili e il suo organo tecnico periferico, il Provvedi-



Fig.3 | Isola di San Francesco del deserto



Fig. 4 | Porto Marghera

torato Interregionale per le Opere Pubbliche del Triveneto).

Le attività realizzate fanno riferimento a un "Piano generale degli interventi" che coniuga la protezione del territorio dagli allagamenti con la tutela dell'ecosistema, attraverso linee di azione distinte ma in reciproca relazione: difesa dalle acque alte, difesa ambientale, difesa dalle mareggiate.

Il Piano degli interventi, che è richiamato dalla legislazione speciale per Venezia, è stato definito dal Comitato misto di indirizzo, coordinamento e controllo ex legge 798/84 ("Comitatone"), dove sono rappresentate le Istituzioni nazionali e locali competenti.

La sua attuazione, oggi completata al 90%, è stata preceduta da un programma di lavori che coniuga, secondo un approccio sistemico, la difesa fisica con il riequilibrio morfologico dell'intero ecosistema lagunare che non ha eguali al mondo per l'ampiezza del territorio interessato, per la natura dei problemi affrontati, per l'estensione e le caratteristiche delle opere eseguite (figure 3-4).

Le ricerche di base e l'idea del MOSE

Il progetto delle opere per la regolazione delle maree ha una lunga storia. Le origini risalgono alla prima metà degli anni '70, nell'am-

bito delle iniziative per la difesa di Venezia e della sua laguna, seguite all'alluvione del 4 novembre 1966. La prima legge speciale 171/1973 stabilì il principio che la difesa di Venezia era questione di "preminente interesse nazionale". Il provvedimento teneva conto di studi e ricerche elaborate da uno speciale Comitato istituito nel 1966 che aveva proposto un programma organico di indagini scientifiche e una raccolta dei dati tecnici per definire la soluzione dei problemi di Venezia attraverso interventi che assicurassero la difesa della città da ogni forma di decadimento fisico, sociale ed economico, salvaguardando nel contempo, nella sua integrità naturale, la laguna. Da allora è stato configurato un quadro legislativo e finanziario per Venezia complesso e straordinario. Il sistema MOSE è l'elemento centrale di questa grande opera di difesa e di riequilibrio ambientale. I criteri di cui si è dovuto tenere conto nella scelta della tipologia delle opere mobili sono stati definiti dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici in questi termini:

- non era ammessa alcuna riduzione dei canali di Bocca dove sarebbero state collocate le barriere;
- non erano ammesse strutture intermedie di sostegno delle paratoie, né sovrastrutture aeree;
- l'impatto sul paesaggio doveva essere ridotto al minimo;
- era indispensabile assicurare il transito attraverso le Bocche di porto, anche durante l'esercizio delle paratoie, dei mezzi nautici e non interferire con il traffico navale commerciale e industriale.

Per rispettare questi vincoli progettuali sono state studiate e messe a confronto numerose soluzioni alternative (paratoie a ventola galleggiante, a barca porta, a farfalla, a cassone emergente, etc.). Al termine di queste analisi si è dimostrato che la soluzione scelta, con paratoie incernierate sul fondo dei canali delle Bocche di porto, che si sollevano per raggiungere la posizione di esercizio utilizzando la spinta di galleggiamento, era l'unica che poteva soddisfare i criteri di progetto imposti (figura 5).

La soluzione che è stata individuata consente la difesa di Venezia e degli altri centri abitati da tutte le acque alte, compresi gli eventi eccezionali, nel rispetto dell'equilibrio idro-morfologico dell'ecosistema.

Il progetto della chiusura alle Bocche di porto

Il sistema MOSE è stato realizzato alle Bocche di porto di Lido, Malamocco e Chioggia, ovvero nei tre varchi del cordone litoraneo attraverso i quali la marea si propaga dal mare Adriatico in laguna. Per rispondere all'obiettivo posto dalla 798/84 per Venezia, la difesa completa di tutti gli abitati lagunari dalle acque alte di qualunque livello, è stato elaborato un sistema integrato di opere che prevede delle barriere di paratoie mobili, in grado di isolare la laguna dal mare durante gli eventi di alta marea, opere complementari come le scogliere all'esterno delle Bocche di porto, atte ad attenuare i livelli delle maree più frequenti e il rialzo delle rive e delle pavimentazioni, almeno fino a +110 cm, nelle aree più basse degli abitati lagunari. L'integrazione di questi interventi definisce un sistema di difesa estremamente funzionale che garantisce la qualità delle acque, la tutela della morfologia e del paesaggio, il mantenimento dell'attività portuale. Le barriere del MOSE sono l'elemento centrale di questa grande opera di difesa costiera e di riequilibrio ambientale.

Il cuore del sistema è costituito da 4 barriere di paratoie mobili (figura 6):

- 2 barriere alla Bocca di porto di Lido (quella più vicina a Venezia che è larga il doppio delle altre due ed è formata da 2 canali con profondità diverse), composte rispettivamente di 21 paratoie nel canale nord e di 20 nel canale sud, le due barriere sono tra loro collegate da un'isola intermedia (figura 7);
- 1 barriera formata da 19 paratoie alla Bocca di porto di Malamocco;
- 1 barriera di 18 paratoie alla Bocca di porto di Chioggia (figura 8).

Quando sono inattive, le paratoie sono piene d'acqua e giacciono completamente invisibili in alloggiamenti collocati nel fondale. Le barriere entrano in funzione per interrompere, temporaneamente, l'entrata del mare: nelle paratoie viene immessa aria compressa che le svuota dall'acqua. Via via che l'acqua esce, le paratoie, ruotando attorno all'asse delle cerniere, si sollevano fino a emergere e a bloccare il flusso della marea in ingresso in laguna. Le paratoie restano in funzione per la sola durata dell'evento di acqua alta:



Fig. 5 | Sezione paratoie



Fig. 6 | Localizzazione barriere MOSE

quando la marea cala, e in laguna e mare si raggiunge lo stesso livello, le paratoie vengono di nuovo riempite d'acqua e rientrano nella propria sede.

Le profondità e le sezioni preesistenti dei canali di Bocca non sono state modificate dall'opera. Alle Bocche di porto di Lido e Chioggia, porti rifugio e piccole conche di navigazione consentono il ricovero e il transito delle imbarcazioni da diporto, dei mezzi di soccorso e dei pescherecci anche con le paratoie in funzione. Alla Bocca di Malamocco è stata realizzata una conca di navigazione per il transito delle navi, in modo da garantire l'operatività del porto anche con le paratoie in funzione.

Le barriere mobili, insieme alla protezione dei litorali, sono state dimensionate per proteggere il territorio anche in caso di intensificarsi delle acque alte per il previsto aumento del livello del mare. La laguna di Venezia è pertanto una delle prime realtà che si è attrezzata per fronteggiare gli effetti delle variazioni climatiche.



Fig. 7 | Paratoie Bocca di Lido (3 ottobre 2020)



Fig. 8 | Paratoie Bocca di Chioggia (31 maggio 2020)

Grazie alla flessibilità del sistema, le barriere possono essere utilizzate in modi differenti in base alle caratteristiche dell'evento di marea: chiusura delle tre Bocche di porto in condizione di alte maree eccezionali o chiusure parziali e differenziate delle barriere in presenza di particolari condizioni meteo.

Dopo l'evento eccezionale che si è verificato il 12 novembre 2019, il secondo dopo quello del 1966, quando la marea ha raggiunto il livello eccezionale di 187 cm, l'attenzione del Governo su Venezia si è fatta più elevata: con la nomina del Commissario Straordinario per il MOSE, in sinergia con il Provveditorato Interregionale, si è assicurato che l'opera potesse entrare in funzione nonostante fosse ancora in fase di ultimazione.

A partire dal 3 ottobre 2020, infatti, il MOSE è già stato attivato venti volte e ha permesso di difendere Venezia e gli altri centri abitati dagli eventi di alta marea che si sono verificati nella passata stagione invernale.

COSTRUZIONI METALLICHE

INTERVISTA...



Enrico Pellegrini

Enrico Pellegrini, laureato in Ingegneria Idraulica Marittima nel 1990 presso l'Università degli studi "La Sapienza" di Roma. Ha lavorato in Italia ed all'estero per 27 anni con la società Fincosit e dal 2018 è dipendente della società Astaldi Spa, oggi facente parte del gruppo Webuild. Da più di 30 anni si occupa di opere marittime.

Ingegnere Pellegrini, che ruolo ha avuto nella realizzazione dell'opera?

Ho diretto per 10 anni il cantiere di prefabbricazione e posa dei cassoni di alloggiamento delle paratoie della Bocca di Malamocco e Lido San Nicolò per conto della Grandi Lavori Fincosit SpA (figura 1). Devo dire che è stata un'esperienza veramente completa ed unica poiché quando sono giunto a Santa Maria del Mare, sull'isola di

Pellestrina, non vi era nulla, solo una spiaggia, e da lì siamo partiti con la realizzazione di un terrapieno di 13 ettari, tutti guadagnati al mare, sul quale successivamente abbiamo prefabbricato i megacassoni in calcestruzzo armato di alloggiamento delle paratoie. Considerate che i cassoni di soglia avevano dimensioni in pianta di circa 50 x 60 m ed altezza che superava i 10 m, mentre quelli di spalla erano un po' più stretti, ma raggiungevano i 27 m di altezza. Insomma dimensioni simili a palazzi di 9 piani! Ne abbiamo



Fig. 1 | Il cantiere di prefabbricazione dove sono stati costruiti e varati i 18 cassoni delle Bocche di Lido e Malamocco, con il Syncrolift in primo piano



Fig. 2 | Uno dei cassoni di soglia pronto per il varo e già allestito con tutti gli accessori e parte degli impianti

costruiti 18, dal peso fino a 24.000 t l'uno e poi li abbiamo trasferiti in banchina con dei carrelli speciali, li abbiamo varati, li abbiamo trainati in galleggiamento fino alle bocche di porto e li abbiamo affondati su fondali di 24 m, collegandoli uno all'altro in profondità. È stata un'opera idraulica-marina unica nella storia delle costruzioni marittime italiane perché abbiamo usato per la prima volta la tecnologia dei tunnel immersi (giunto GINA) per accoppiare i 9 cassoni di ogni Bocca.

In particolare, che opere metalliche ha seguito e realizzato sotto la sua direzione?

I cassoni sono stati varati già parzialmente arredati di tutte le attrezzature e gli impianti necessari al loro collegamento (Telai e giunti GINA), stabilizzazione (Pin idraulici e sistemi di zavorramento provvisori e definitivi), e successivo montaggio delle paratoie metalliche (cerniere femmine e tensionatori) (figura 2). Dunque in cantiere abbiamo eseguito l'atto finale del montaggio di precisione millimetrica di tutti i suddetti impianti e strutture metalliche, ma oltre a questi, in particolare nel mio cantiere abbiamo realizzato un'altra opera unica in Italia e nel mondo, al momento della sua costruzione: il Syncrolift®.

Ci spiega meglio il funzionamento del Syncrolift e ci illustra le principali caratteristiche?

Il Syncrolift® è sostanzialmente un grosso montacarichi o ascensore. È una piattaforma metallica di 3.000 m² che abbiamo utilizzato per varare i cassoni, ovvero per trasferirli dalla terraferma al mare. Una volta trasferito il cassone sulla piattaforma, inizialmente posta alla stessa quota del terrapieno, a mezzo di speciali carrelli dalla singola portata di 300 t/cad, questa veniva abbassata fino a quando il cassone, per effetto della spinta di Archimede, entrava in galleggiamento. Dopo aver sfilato il cassone dal bacino del Syncrolift ed averlo agganciato ai rimorchiatori, la piattaforma veniva risolledata fuori acqua per essere predisposta per un nuovo varo.

La cosa interessante di questa struttura è che non è una piattaforma rigida, bensì è composta da 13 travi articolate tra di loro mediante collegamenti incernierati. Il motivo è presto detto. La fase più critica dell'operazione di varo è la fase di trasferimento del carico sulla piattaforma poiché essa viene caricata progressivamente man mano che il carico transita su di essa per portarsi in posizione. Quindi le prime travi, quelle più vicine alla banchina, vengono caricate, mentre le altre sono ancora scariche e se la piattaforma fosse una struttura rigida si innescerebbero delle tensioni elevatissime all'interno della struttura stessa. Rendendole indipendenti, invece, ogni trave è in grado di supportare la porzione del carico per cui

è stata progettata. Occorre ricordare che il sistema Syncrolift® è derivato dall'industria navale ed è utilizzato per alare e varare imbarcazioni di ogni tipo. Ne fanno molto uso le marine militari in particolare per i sommergibili che preferiscono tenere in appositi hangar in terraferma quando non sono operativi. Comunque in genere, poiché le imbarcazioni sono generalmente lunghe e strette, i Syncrolift® sono anch'essi lunghi e stretti, dunque hanno una distribuzione del carico diffusa su molte travi. Il nostro Syncrolift®, invece, a causa della forma semi-quadrata del cassone, aveva poche travi e con una grande luce. Il risultato è stato che le travi avevano una luce di 57 m circa ed una altezza di 5.000 mm! Le lamiere utilizzate variavano da 75 a 100 mm di spessore con l'utilizzo di acciai altamente performanti (figure 3-4).



Fig. 3 | Il cantiere di allestimento delle travi del Syncrolift a Marghera



Fig. 4 | Le pulegge del Syncrolift prima di essere montate

Come avete eseguito la costruzione ed il montaggio?

Il contratto è stato eseguito dalla ditta OMBA SpA di Torri di Quartesolo (VI). La realizzazione delle travi è stata fatta a sezioni di circa 12 m di lunghezza in stabilimento, poi trasportate a mezzo di trasporti eccezionali in un piazzale a Porto Marghera. Qui sono state assemblate nella loro configurazione finale e trasportate a coppie di due in cantiere caricandole su un pontone lungo 100 m



Fig. 5 | Le travi principali del Syncrolift durante il trasferimento dal cantiere di assemblaggio di Marghera al pontone per il trasporto alla Bocca di Malamocco



Fig. 6 | Carico delle travi principali del Syncrolift sulla chiatta di trasporto

a mezzo dei carrellini SPTM della ditta Fagioli SpA (figure 5-6). I controlli costruttivi sono stati affidati al Lloyd's Register che ha certificato tutta la filiera della produzione, a partire dai materiali utilizzati. Le travi sono dunque giunte in cantiere su pontone. Qui sono state sollevate a mezzo di *strand-jacks* e posizionate con tolleranza centimetrica sulla infrastruttura a cassoni cellulari in cemento armato preventivamente predisposta. Una volta in



Fig. 7 | La piattaforma del Syncrolift in fase di completamento

posizione sono state collegate tra di loro con le travi secondarie e le aste di collegamento. In ultimo si sono montate le pulegge, i cavi e gli argani che, a causa della così elevata concentrazione di carico, è stato necessario accoppiarli in numero di due da 600 t cadauno, per parte. Anche questa configurazione degli argani è stata una prima mondiale che ha reso più impegnativa la progettazione dell'apparecchiatura che deve lavorare sempre in perfetta sincronia. Va infatti ricordato che il sistema acquisisce il nome di Syncrolift® proprio perché durante le fasi di carico deve continuamente regolare il tiro dei cavi di sospensione della piattaforma al fine di compensare l'allungamento dei cavi e le deformazioni delle travi caricate, rispetto a quelle ancora scariche. Si pensi che, nonostante le dimensioni della trave principale ($H=5.000\text{ mm}$) e gli spessori delle lamiere delle ali (100 mm), la trave subisce una deformazione con una freccia di più di 150 mm ! Inoltre il sistema deve assicurare la costante distribuzione del carico in maniera equilibrata (e sincronizzata) tra i vari argani onde evitare

l'overload di uno di essi (figure 7-11).

Ci fornisce qualche dettaglio tecnico della struttura metallica?

La piattaforma era costituita da 13 travi principali (MTB) di acciaio (lunghezza $57,4\text{ m}$, altezza circa 5 m), alle cui estremità erano collegate le pulegge di movimentazione, distanziate fra loro di 5 m , che sopportavano le travi longitudinali (LB), a loro volta a sostegno di travi trasversali intermedie (ITB). Le campate, costituite ognuna da due travi principali MTB e dalle travi LB e ITB interposte, erano alternativamente rigide ed articolate.

Le travi principali MTB e quelle longitudinali LB sono state costruite mediante saldatura di piastre di spessori standard. Le travi intermedie ITB erano profili commerciali standard (minimo HEB 600, massimo HEA 1100).

Tutte le travi sono state realizzate con acciaio da costruzione S355



Fig. 8 | La Mega piattaforma Syncrolift per il varo dei cassoni prefabbricati



Fig. 9 | Varo di un cassone in c.a. con il sistema Syncrolift(R)



Fig. 10 | Estrazione di un cassone in galleggiamento dal bacino del Syncrolift



Fig. 11 | Trasporto di un cassone in galleggiamento

K2, in accordo con lo standard EN 10025-2 e con carico minimo di snervamento tra 325 e 355 N/mm².

Le estremità delle MTB sono state realizzate in acciaio speciale S620 QL secondo lo standard EN 10025-6, con carico minimo di snervamento di 580 N/mm².

Sono stati effettuati collaudi e test funzionali?

Sì, certamente. La struttura della piattaforma è stata sottoposta a prova di carico in accordo con quanto previsto dal “Code for Lifting Appliances in a Marine Environment”, January 2003, Chapter 4, section 3.2.3 b. del Lloyd’s Register of Shipping. La prova di carico è stata effettuata in due fasi, rappresentative rispettivamente del 50% e 100% del carico massimo nominale degli argani. La prova inoltre è stata svolta mediante l’utilizzo di un carico appositamente predisposto, supportato da un numero limitato di carrelli,

caricando sequenzialmente due coppie di argani per volta fino al completamento del test di tutti gli apparati e dell’intera struttura.

E’ ancora operativo il Syncrolift?

No. A differenza dei circa 400 sistemi installati nel mondo, che vengono appunto utilizzati nel settore delle costruzioni e manutenzioni navali, il nostro era stato progettato per lo specifico uso di varare i 18 cassoni delle Bocche di porto di Malamocco e Lido San Nicolò. Così, essendo una installazione provvisoria è stato smantellato. La piattaforma è stata tagliata e demolita, ma gli argani, i cavi, le pulegge, i motori elettrici e tutto il sistema di controllo elettronico sono stati revisionati ed imballati, pronti per essere rimontati su un nuovo Syncrolift®. Chi fosse interessato all’acquisto di queste attrezzature può contattare la società Fincosit.

COSTRUZIONI METALLICHE

INTERVISTA...



Matteo De Lazzaro

Matteo De Lazzaro, dopo il percorso di studi in ingegneria meccanica presso l'Università degli Studi di Udine, nel 2006 ha iniziato la carriera professionale presso l'area tecnica della Poolmeccanica Lorenzon Srl, dapprima come progettista, poi quale Project Manager anche dei progetti di maggior rilievo. Nel 2015 è diventato componente nell'area commerciale di Poolmeccanica Lorenzon Srl, e dal 2017 ne è diventato Sales Manager. Dal 2021 è Proposal Manager presso la BM Plus Srl, dove è confluita la Poolmeccanica Lorenzon Srl.

Ingegnere De Lazzaro, che ruolo ha avuto nella realizzazione del MOSE?

La Poolmeccanica Lorenzon Srl, della quale io ero allora il project manager responsabile dedicato alle commesse per il MOSE, è stata incaricata dalle società Ing. E. Mantovani S.p.A. e Grandi Lavori Fincosit S.p.A. di realizzare ed installare i telai dei giunti "GINA" per tutti i 27 cassoni del MOSE delle tre Bocche di porto di Lido Treporti, Lido San Nicolò e Malamocco nel periodo temporale compreso tra luglio 2010 e maggio 2014.

Poolmeccanica Lorenzon è una azienda leader nel settore delle opere elettromeccaniche per impieghi nelle opere idrauliche ed in generale del *water management*. Tant'è che, da anni, Poolmeccanica Lorenzon era già impegnata, con specifici affidamenti relativi al proprio *know-how*, nell'ambiziosa costruzione del MOSE, e dagli inizi del 2012 anche nel prestigioso progetto per l'ampliamento del Canale di Panama, ma anche in molti altri progetti di pregio. La scelta delle aziende del Consorzio Venezia Nuova di avere un unico riferimento per la realizzazione dei telai dei giunti dei cassoni del MOSE si è rivelata del tutto strategica soprattutto in considerazione della complessità dell'opera, della sua unicità, dei rigidi cronoprogrammi e protocolli, e delle stringenti specifiche tecniche richieste dal progetto.

Cosa sono e a che servono i telai porta giunti tipo GINA?

I cassoni di fondazione delle paratoie delle barriere del MOSE sono dei monoliti prefabbricati di enormi dimensioni (i più grandi di circa 60x50x11 m) che sono stati prefabbricati fuori acqua, varati e poi giuntati sott'acqua a formare un unico "cordolo" di fondazione attraverso il fondale delle Bocche di porto (figura 1).



Fig. 1 | Cassone di fondazione con montato telaio porta giunti tipo GINA

Vi sono due gallerie transitabili all'interno dei cassoni, che durante il varo sono state temporaneamente tamponate alle estremità per evitare l'introduzione dell'acqua durante il galleggiamento e l'affondamento. La sezione delle gallerie, parallele tra loro, occupava circa 100 m² di superficie che corrisponde alla zona di giunzione tra due cassoni.

Il sistema di collegamento utilizzato è appunto quello brevettato dalla ditta svedese "Trelleborg" denominato "GINA". In sostanza si tratta di un enorme "O-ring" applicato sull'estremità di uno dei due cassoni da giuntare, che viene schiacciato contro l'estremità dell'altro cassone durante l'accoppiamento creando, all'interno del suo perimetro, una zona stagna. In realtà non è un vero e proprio O-ring poiché la sezione della gomma non è circolare, ma ha una forma particolare, studiata all'uopo e brevettata proprio per eseguire e garantire al meglio l'accoppiamento (figura 2).

La tenuta idraulica a lungo termine è poi affidata ad un altro giunto, denominato "OMEGA" per la sua geometria in sezione che

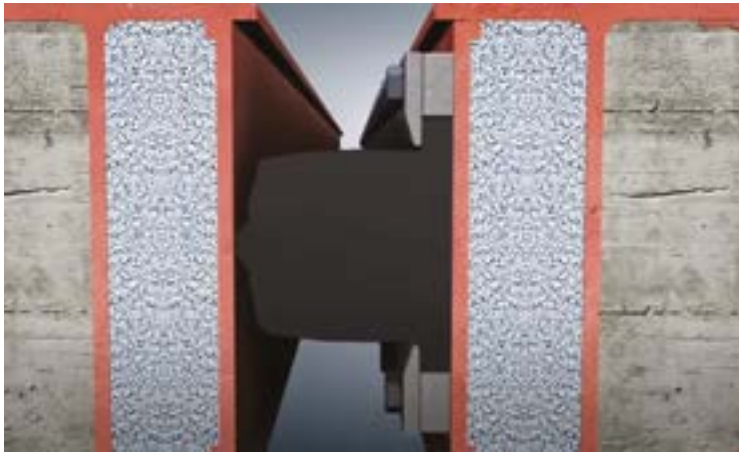


Fig. 2 | Sezione trasversale giunto GINA

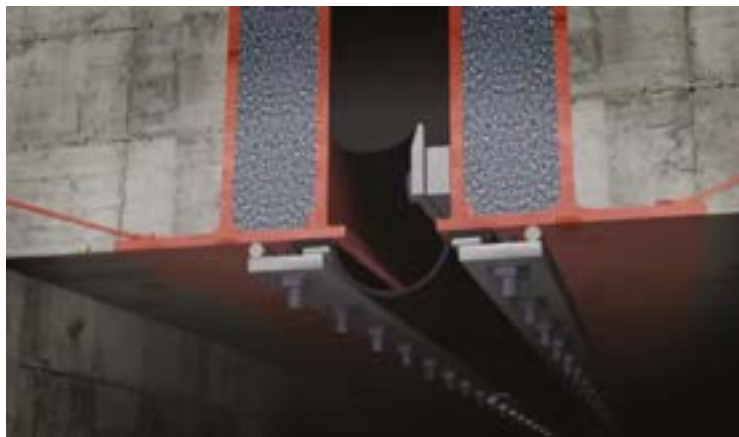


Fig. 3 | Sezione trasversale giunto OMEGA

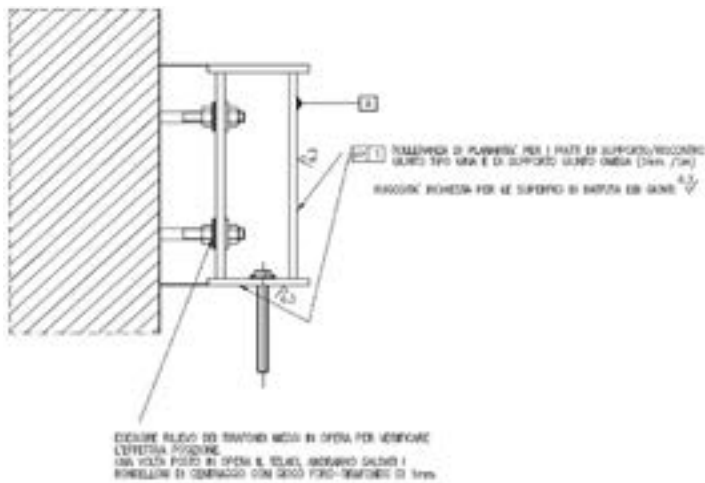


Fig. 4 | Tolleranze superfici di contatto giunti GINA e OMEGA

rammenta la nota lettera dell'alfabeto greco (figura 3). Poiché ad alte profondità le pressioni idrostatiche sono notevoli, la tenuta deve essere perfetta e per poterla garantire occorre che le superfici a contatto siano perfettamente planari, cosa non immediatamente realizzabile su una parte verticale di circa 100 m²

in calcestruzzo armato (la tolleranza di planarità era di 1 mm/m sulla superficie di contatto dei giunti GINA e contestualmente sulla superficie di contatto dei giunti OMEGA (figura 4). Pertanto i progettisti dei cassoni hanno deciso di realizzare dei collari metallici ad hoc, perfettamente complanari su cui, da un lato, montare il giunto GINA, e dall'altro fare da battuta.

La Poolmeccanica Lorenzon srl ha realizzato 24 Telai "Maschi" e 24 Telai "Femmina". Ciascun telaio in acciaio inossidabile bifasico vantava un peso di circa 12.500 kg per le barriere di Malamocco e San Nicolò, e un peso di circa 6.000 kg per la barriera di Treporti. Per questo progetto la Poolmeccanica Lorenzon Srl aveva dedicato lo stabilimento in San Michele al Tagliamento (VE) esclusivamente alla lavorazione degli acciai inossidabili, onde evitare ogni tipo di contaminazione con altri acciai. Era stato studiato un apposito layout di produzione che, a pieno regime, grazie a delle maestranze altamente qualificate, permetteva la realizzazione di un telaio a settimana.

Che materiali sono stati utilizzati per la costruzione dei telai porta giunti tipo GINA?

Per la costruzione dei suddetti telai i materiali utilizzati sono stati i seguenti:

Acciaio inossidabile SAF2507

con PREN>40 (1.4410 UNI EN 10088-4) :

- Carico unitario di rottura: $f_u = 730 \div 930 \text{ N/mm}^2$
- Carico unitario di snervamento: $f_y = 515 \text{ N/mm}^2$
- Limite elastico: 0,2 %
- Allungamento %: 20 %
- Modulo di Young: $E = 200.000 \text{ N/mm}^2$

Acciaio inossidabile SAF2205

con PREN>35 (1.4462 UNI EN 10088-4):

- Carico unitario di rottura: $f_u = 640 \div 840 \text{ N/mm}^2$
- Carico unitario di snervamento: $f_y = 415 \text{ N/mm}^2$
- Limite elastico: 0,2 %
- Allungamento %: 25 %
- Modulo di Young: $E = 200.000 \text{ N/mm}^2$

Questa classe di acciai inossidabili viene denominata Duplex a seguito della caratterizzazione topologica della microstruttura di queste leghe, dipendente sia dal rapporto volumetrico tra le fasi sia dalla loro distribuzione nello spazio.

La composizione chimica di questa categoria di acciai, chiamati anche bifasici, permette di ottenere una struttura mista di austenite e ferrite con caratteristiche uniche di resistenza alla corrosione, soprattutto alla corrosione sotto tensione ed alla corrosione marina. L'elevato tenore di cromo, molibdeno e azoto determina un indice di resistenza alla vaiolatura (PREN), garantendo una resistenza alla corrosione interstiziale e alla vaiolatura nettamente superiore a quella delle leghe degli acciai inossidabili austenitici.

Alla luce delle eccellenti proprietà anticorrosive, sono acciai molto adatti ad ambienti contenenti cloruri (come nello specifico la laguna di Venezia) e solfuro di idrogeno, per usi concernenti l'estrazione di petrolio e gas da pozzi acidi, nelle raffinerie e in

soluzioni di processo contaminate con cloruri. Grazie a queste caratteristiche ed alla elevata resistenza meccanica, ottenibile con incrudimenti e deformazioni a freddo, questi acciai sono di comune utilizzo nelle piattaforme *offshore*, e comunque dove l'azione del sale e degli agenti corrosivi è particolarmente accentuata. Sono acciai magnetici e sono generalmente saldabili, ma non possono essere temprati. Si tratta dunque di prodotti particolarmente performanti, il cui sviluppo è tuttora in atto e le cui applicazioni devono ancora essere completamente esplorate. Sono stati condotti degli specifici esami macrografici al fine di verificare le caratteristiche della materia prima in fase di accettazione, e, sul materiale d'apporto, al fine di verificare il mantenimento delle caratteristiche del materiale in seguito agli apporti termici del processo di saldatura.

Quali criticità si sono presentate nella realizzazione dei telai porta giunti tipo GINA e come le avete superate?

Premetto che gli elaborati e le tavole di progetto complete delle indicazioni necessarie a definire le caratteristiche delle strutture sono state predisposte dal progettista generale Technital. L'ufficio tecnico di Poolmeccanica Lorenzon Srl ha poi sviluppato a propria cura il progetto del montaggio e gli elaborati costruttivi per il rispetto delle quote “a finito” previste.

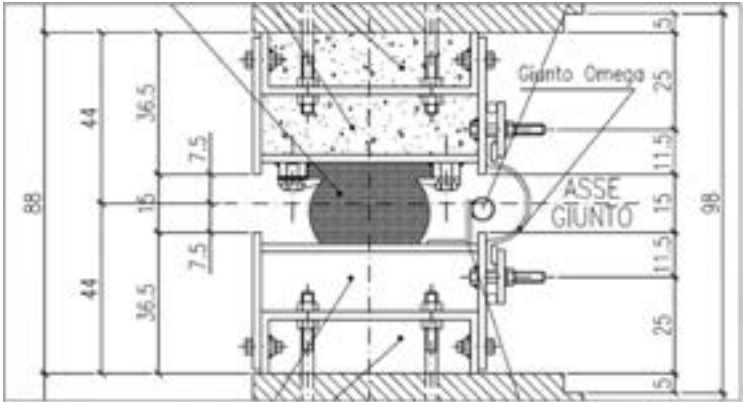


Fig. 5 (a) | Sezione tipica progetto definitivo Technital

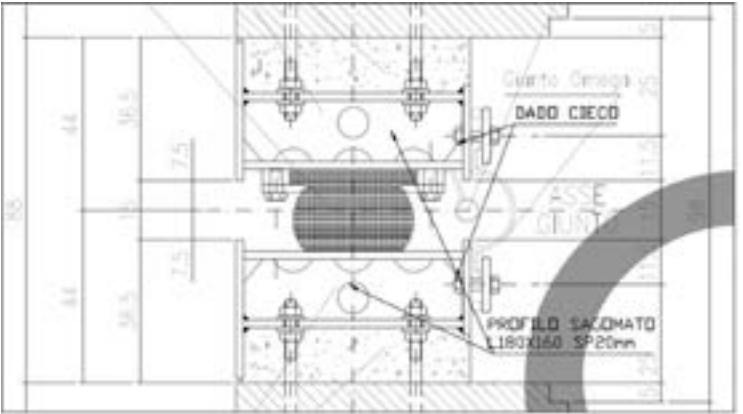


Fig. 5 (b) | Sezione tipica progetto costruttivo Poolmeccanica Lorenzon Srl

Inoltre è stata sviluppata l'ingegnerizzazione del prodotto per la produzione volta alla ottimizzazione del risultato in termini di tempo, ma soprattutto in termini qualitativi (figura 5). Abbiamo quindi eseguito una verifica locale della lamiera di battuta del collare, precisamente le analisi sono state condotte nell'ipotesi estremamente cautelativa che l'intasamento in betoncino di seconda fase che forma la sezione del cordolo potesse scostarsi dalla lamiera frontale su cui agisce la pressione del giunto in gomma. Si è quindi assunto che la pressione sia trasferita alle lamiere laterali per flessione, impegnando la lamiera frontale alla stregua di una trave incastrata alle estremità (figura 6).

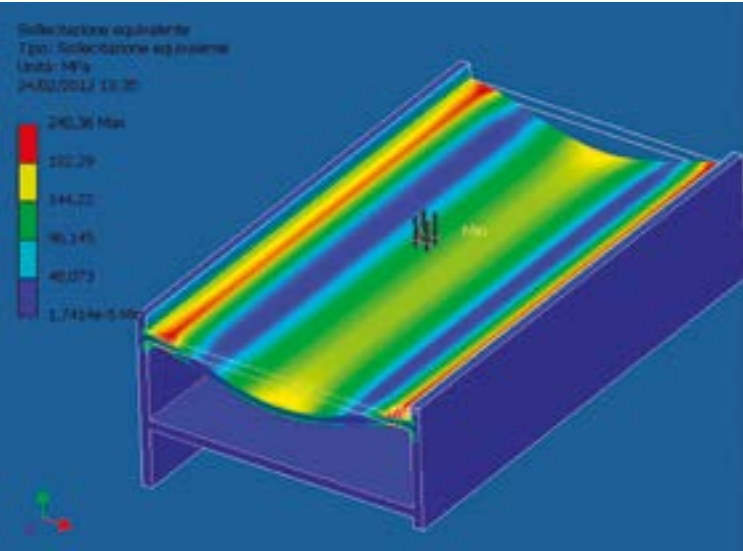


Fig. 6 (a) | Analisi FEM lamiera battuta del collare; sforzi.

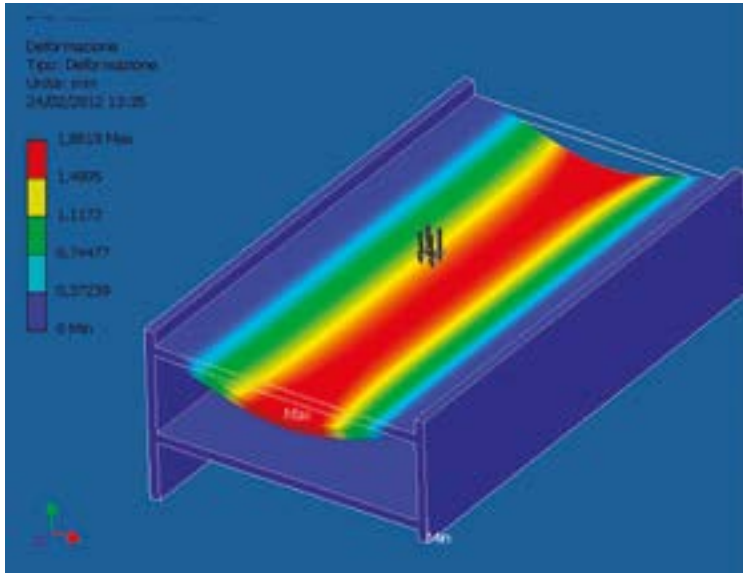


Fig. 6 (b) | Analisi FEM lamiera battuta del collare; deformazioni.

Questi accorgimenti hanno permesso la realizzazione delle singole travi di ciascun telaio con le contro-monte necessarie e calcolate in modo tale che le deformazioni indotte dal successivo processo di saldatura le avesse rese praticamente “dritte”. Ogni singola trave è stata identificata e forata secondo una

specifica tavola costruttiva appositamente predisposta in seguito ai rilievi topografici condotti in opera su ogni tirafondo. Le travi

di ogni telaio (figura 7) sono state assemblate nel banco “dima” predisposto nelle officine. Una volta ultimato ciascun telaio, è

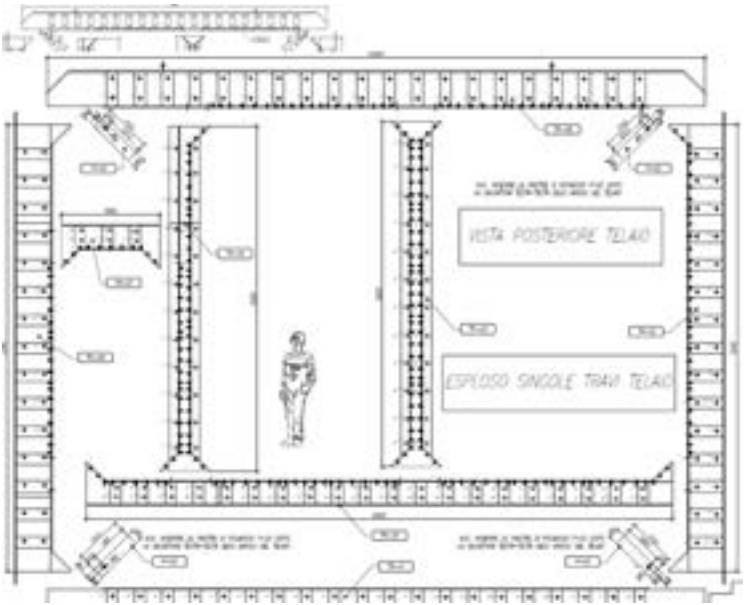


Fig. 7 | Disegno esploso delle travi costituenti un telaio



Fig. 9 | Trasporto dei telai



Fig. 8 | Telaio assemblato

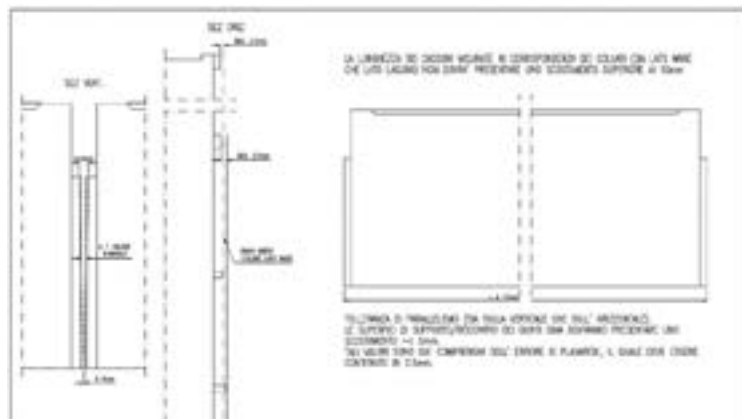


Fig. 10a | Tolleranze di montaggio richieste



Fig. 11 | Montaggio dei telai sui cassoni in c.a.

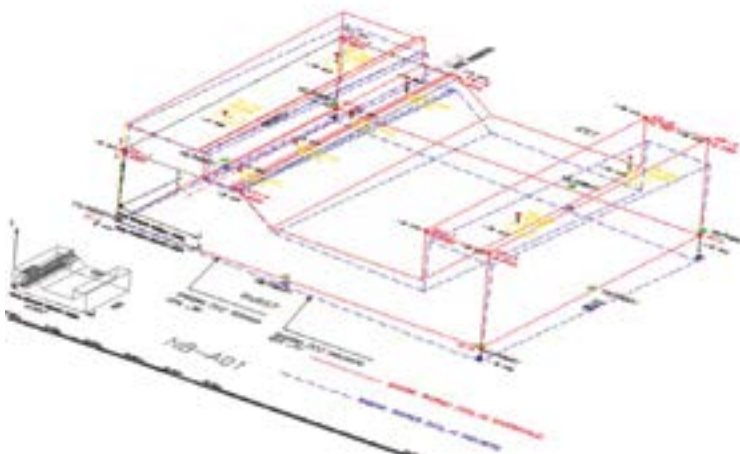


Fig. 12 | Vista assonometrica

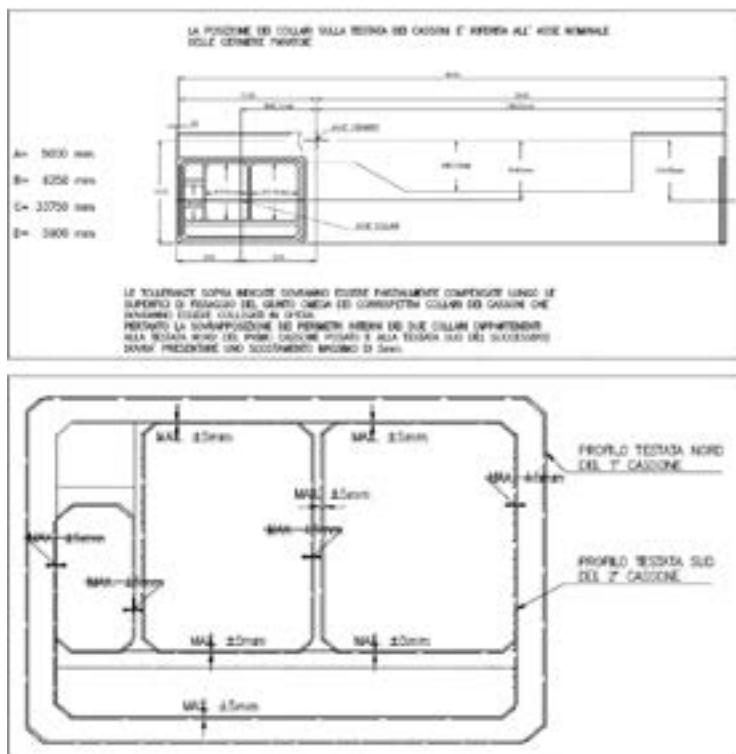


Fig. 10b | Tolleranze di montaggio richieste

stata applicata una vernice protettiva pelabile temporanea, la quale è stata rimossa soltanto poco prima del varo di ciascun cassone prefabbricato con Syncrolift (figura 8).

I telai sono stati trasportati su gomma dallo stabilimento di San Michele al Tagliamento sino alla banchina sita lungo il fiume Tagliamento a pochi chilometri di distanza dallo stabilimento di costruzione (figura 9).

Successivamente sono stati caricati su pontoni per il definitivo trasporto via mare al cantiere di destinazione in Santa Maria del Mare nell'isola di Pellestrina.

Come sono stati installati i telai porta giunti tipo GINA?

I telai metallici sono stati ancorati ai cassoni prefabbricati in c.a. per mezzo di tirafondi, con sistema di regolazione mediante dado/contro-dado, in AISI316 precedentemente inglobati nel calcestruzzo.

La sequenza delle fasi di montaggio è stata di fondamentale importanza in considerazione delle tolleranze richieste e della particolare importanza della funzione dei giunti di accoppiamento tra i cassoni di fondazione del MOSE.

In figura 10 sono indicate le tolleranze in seguito alla posa dei giunti ed al relativo getto di seconda fase. In figura 11 è rappresentata una fase di montaggio dei telai sui cassoni in c.a.

Al termine della costruzione della struttura in calcestruzzo dei cassoni di soglia delle barriere di S. Nicolò e Malamocco, prima della costruzione dei telai porta giunti tipo GINA, sono stati eseguiti dei rilievi finali di As Built. Ciò si è reso necessario per definire la miglior sovrapposizione dell'As-Built sul progetto teorico, privilegiando i vincoli costituiti dagli elementi fondamentali delle carpenterie metalliche che hanno la massima importanza e priorità:

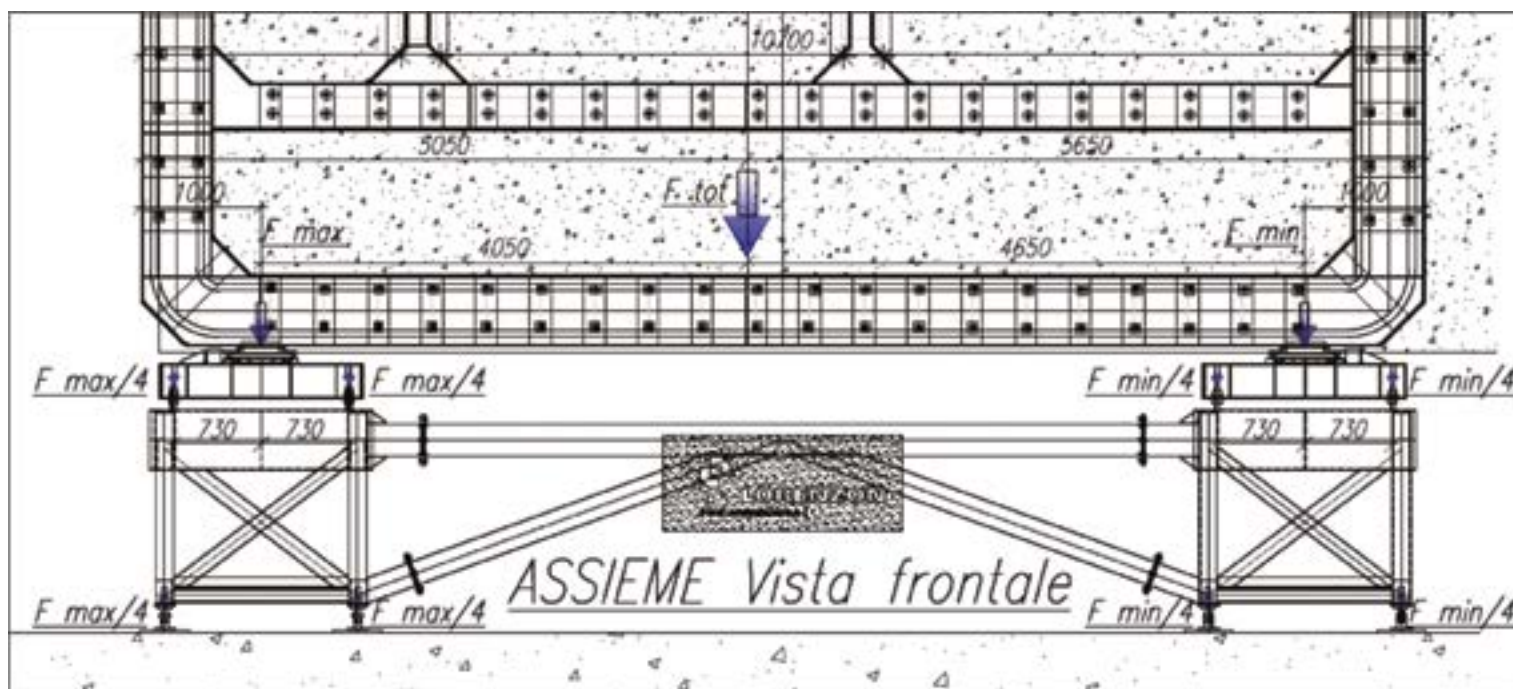


Fig. 13 | Struttura di sostegno per il montaggio dei telai

- connettori femmina delle cerniere;
- assi dei collari giunto GINA;
- guide di accoppiamento cassoni.

I rilievi hanno mostrato la giacitura “inclinata” assunta dai cassoni a seguito dei cedimenti differenziali dell’area di prefabbricazione causati dall’enorme peso applicato durante la costruzione dei cassoni di soglia.

Tali cedimenti, monitorati nel tempo durante l’avanzamento dei lavori, hanno subito continue modifiche fino al momento del varo dei cassoni in c.a.

Per questo motivo si è deciso assieme allo staff topografico di GLF SpA di non operare con la strumentazione topografica in modo “tradizionale” (legata alla verticale definita dal filo a piombo).

Si è quindi scelto di operare con software “on board” (Leica “Unlevelled Setup”) dedicato ai rilievi/tracciamenti 3D in un arbitrario sistema di riferimento in grado di “adattarsi al volo” mediante rototraslazioni alla temperatura di taratura dei capisaldi (20°C).

In figura 12 è presentata la vista assonometrica di un cassone per rendere l’idea della sua giacitura reale nello spazio, volutamente enfattizzata per rendere percepibile la giacitura inclinata.

Al completamento delle strutture in C.A. è stato possibile, dunque, procedere con il rilievo dei tirafondi di ogni telaio porta giunto GINA al fine di procedere alla specifica realizzazione di ogni collare del giunto GINA rispetto all’asse teorico delle cerniere delle paratoie. Ciò ha comportato una precisa e dedicata progettazione costruttiva d’officina che ha reso ogni telaio porta giunto GINA unico e non intercambiabile con altri.

Abbiamo dovuto, inoltre, ricorrere anche alla progettazione ed alla costruzione di una apposita specifica struttura in grado di sostenere il peso di ciascun telaio durante le fasi di posa in opera e, al contempo, in grado di permettere i necessari gradi di libertà durante le operazioni di regolazione in opera. La struttura necessaria per il montaggio era formata da due strutture reticolari

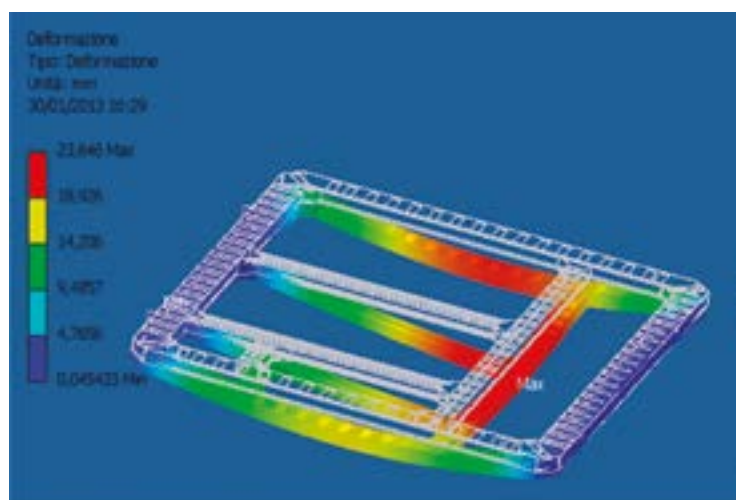


Fig. 14 | Analisi FEM dello stato di deformazione dei telai soggetti a peso proprio

principali posizionate alle estremità della stessa, e da una struttura reticolare secondaria di collegamento posizionata e fissata tra gli elementi principali. Le strutture principali, formate da reticoli composti da tubi (tondi e quadri), era in grado di fornire particolare robustezza e resistenza a torsione (figura 13).

Sulla sommità di ogni struttura principale è stato posizionato un sistema di scorrimento ad impacchettamento in gradi di far scorrere (entro guide vincolate e limitate) il telaio sia in profondità, sia lateralmente. Tale struttura metallica è stata utilizzata durante tutto il periodo transitorio che ha interessato ciascun telaio dall’inserimento dei tirafondi di ancoraggio sino alla completa regolazione (entro le tolleranze di progetto).

Al fine di non incorrere in deformazioni plastiche permanenti della struttura dei telai porta giunti GINA, sono state condotte, mediante l’ausilio di modelli FEM, diverse analisi supponendo i telai sottoposti solamente al peso proprio (figura 14). Nello specifico è stato analizzato il comportamento statico dei collari in acciaio



Fig. 15 – Posa in opera dei giunti GINA

inossidabile durante le fasi principali di movimentazione per il trasporto ed il montaggio; pertanto, dapprima supponendo i telai inizialmente giacenti su un piano orizzontale, e poi sollevati fino a raggiungere la posizione verticale per poter essere posati.

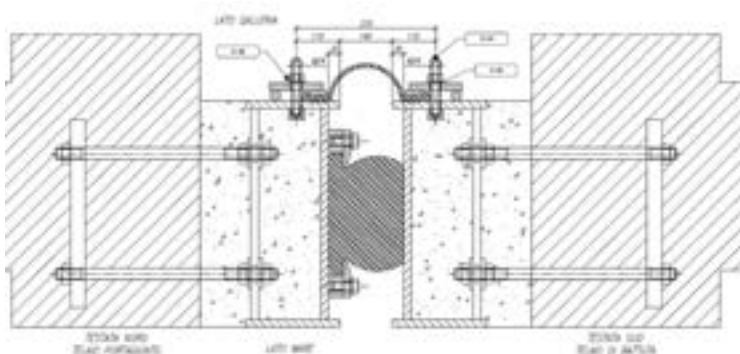


Fig. 16 | Dettaglio accoppiamento giunto OMEGA – telaio

Che tipo di manutenzione hanno bisogno i telai porta giunti tipo GINA?

Preciso che le attività commissionate alla Poolmeccanica Lorenzon Srl prevedevano la fornitura delle sole strutture metalliche denominate “telai porta giunti GINA” le quali sono state progettate per resistere alla vita utile dell’opera. Considerata la difficoltà di accessibilità e la critica funzione alla quale essi assolvono non necessitano di particolari manutenzioni.

Tuttavia è presente, alla base della galleria di drenaggio, un adeguato sistema di anodi sacrificali per il fenomeno delle correnti

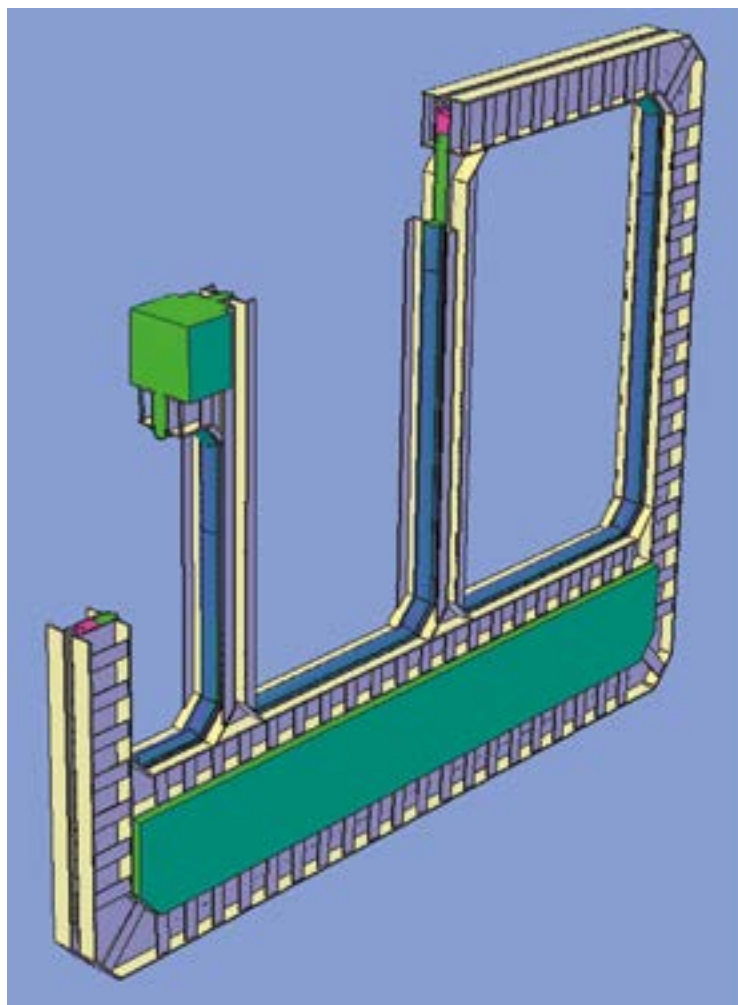


Fig. 17 | Prospetto spaccato volume camera stagna (tra giunti GINA ed OMEGA) – Dettaglio CAD-3D. In verde volume d'aria, in magenta giunto GINA, in blu giunto OMEGA.

galvaniche che si possono verificare. Gli anodi sacrificali hanno massa e composizione opportunamente dimensionata e sono stati posati su ciascun telaio porta giunto solo in seguito alla attivazione dei giunti GINA tra un cassone di fondazione e l’altro successivo. Gli anodi sacrificali sono soggetti ad usura e, dunque, devono essere sostituiti ad intervalli di tempo.

I giunti in gomma GINA erano esclusi dallo scopo di fornitura di Poolmeccanica Lorenzon Srl (sono stati forniti direttamente dalla società Trelleborg), per questi Poolmeccanica Lorenzon Srl ha curato solo il progetto del montaggio e la relativa posa in opera (figura 15).

Con un successivo affidamento è stata commissionata, nel corso dell’anno 2014, anche la posa in opera dei giunti tipo OMEGA, nonché i collaudi in opera in accordo alle procedure di controllo impartite del produttore Trelleborg. I giunti OMEGA si sviluppano con una sagoma ad anello attorno alle tre gallerie longitudinali, e sono ancorati ai telai porta giunto per mezzo di clampe e tirafondi anch’essi in duplex 1.4462 (figure 16-17). Tutti i collaudi condotti hanno soddisfatto ampiamente i requisiti richiesti e descritti nella procedura di collaudo fornita dal produttore del giunto.

COSTRUZIONI METALLICHE

INTERVISTA...



Alberto Fisichella

Alberto Fisichella è ingegnere civile, specializzato in ingegneria idraulica, sanitaria ed ambientale, con 25 anni di esperienza nel Design & Project Management e nella Direzione Lavori, a livello nazionale ed internazionale, di grandi opere ed infrastrutture civili, idrauliche ed ambientali, tra i quali impianti di trattamento acque e RSU, acquedotti e fognature. Ha maturato una significativa ed approfondita esperienza nel settore delle opere meccaniche ed elettromeccaniche, nell'impiantistica di processo industriale e nelle grandi carpenterie saldate, acquisita nell'ambito della supervisione dei lavori di costruzione di impianti civili ed industriali, nonché nelle opere marittime di cui ha curato la gestione di progetto ed il controllo in fase di esecuzione nell'ambito del Progetto MOSE per la difesa e la salvaguardia di Venezia dalle inondazioni causate dalle alte maree. Ha altresì operato nel settore della promozione aziendale occupandosi della redazione di offerte tecnico-economiche per importanti progetti in ambito nazionale ed internazionale. Possiede spiccate doti di team-leadership e comprovata capacità di gestione di progetti complessi, innovativi e multidisciplinari.



Ingegnere Fisichella, che ruolo ha avuto nella realizzazione del MOSE?

Su incarico del Concessionario Consorzio Venezia Nuova ed in favore del Concedente Provveditorato Interregionale alle OO.PP. del Veneto - Trentino Alto Adige - Friuli Venezia Giulia, per conto della Società Lotti Ingegneria S.p.A. prima, e successivamente per conto della Società Thetis S.p.A., ho ricoperto il ruolo di Direttore dei Lavori delle opere di fornitura delle paratoie costituenti le schiere di dighe mobili alle Bocche di Porto di Lido Treporti, Lido San Nicolò, Malamocco e Chioggia, nell'ambito del sistema MOSE per la protezione e salvaguardia di Venezia e della sua laguna dalle acque alte.

I lavori di costruzione e fornitura delle paratoie si sono sviluppati su un arco temporale di 6 anni, tra il 2013 ed il 2018. Essi sono stati appaltati, mediante procedure concorsuali europee ad evidenza pubblica, alla Società Cimolai S.p.A. - relativamente alle 23 paratoie di Lido Treporti - ed alla Società croata Brodosplit d.d. per le 63 paratoie pertinenti alle altre tre Bocche di porto.

L'Ufficio di Direzione lavori è stato costituito da un team di oltre 15 persone, suddivise tra Direttori operativi, Ispettori di Cantiere, topografi, addetti al controllo qualità materiali e tecnici contabili. La Direzione lavori è stata svolta presso gli stabilimenti di Polcenigo, S. Giorgio di Nogaro e Monfalcone per quanto concerne le paratoie costruite dalla Cimolai S.p.A., e presso lo stabilimento di Spalato (HR) per quelle prodotte da Brodosplit d.d.; essa ha previsto la sorveglianza tecnica dei lavori, la gestione amministrativa ed economica del contratto, la contabilizzazione delle opere e l'assistenza in fase di collaudo, in accordo a quanto previsto dal Codice dei Contratti pubblici.

Cosa hanno di particolare e come funzionano le paratoie?

Le barriere mobili del sistema MOSE sono costituite complessivamente da 86 paratoie metalliche (23 alla Bocca di Lido Treporti, 22 alla Bocca di Lido San Nicolò, 21 alla Bocca di Malamocco, 20 alla Bocca di Chioggia e 8 di riserva), posate sui cassoni di soglia delle omologhe Bocche di porto a quote variabili tra - 8,00 e - 14,00 m s.l.m.m.

Le dimensioni delle paratoie variano, in funzione dei fondali, tra 19,00 e 29,00 m di lunghezza, 3,50 e 5,00 m di altezza (quelle di minori dimensioni sono quelle di Lido Treporti, quelle di maggiore lunghezza sono quelle di Malamocco, quelle di maggiore altezza sono quelle di Chioggia), ed hanno una larghezza comune pari a 20,00 m. Esse includono gli allestimenti di pertinenza, ovvero alleggi, prese acqua e sfoghi aria, linee aria compressa, ammortizzatori di gomma sul fasciame inferiore lato laguna ed alette di gomma sugli spigoli lato mare, lato laguna e laterali tra paratoie adiacenti.

Ciascuna paratoia è costituita da una struttura metallica scatolare che, se piena d'acqua, rimane adagiata in un apposito vano ricavato a livello del fondale del canale di Bocca entro la struttura di fondazione. Quando l'acqua viene fatta fuoriuscire, immettendo aria compressa, la paratoia si solleva, ruotando attorno all'asse delle due cerniere che la collegano all'opera di fondazione, ed

assume la posizione di equilibrio prefissata.

Sfruttando la spinta idrostatica, le paratoie delle barriere, pur oscillando liberamente ed indipendentemente per effetto del moto ondoso, sono in grado di mantenere il dislivello di progetto fra mare e laguna. In figura 1 è illustrato il principio di funzionamento delle paratoie.

Ogni paratoia, realizzata in carpenteria metallica saldata con



Fig. 1 | Schema di funzionamento delle paratoie

struttura di tipo navale, è corredata di alcuni componenti speciali che, come sopra accennato, ne assicurano il funzionamento:

- i gruppi cerniera-connettore che vincolano le paratoie alle strutture di alloggiamento e ne consentono tanto la rotazione dalla posizione orizzontale di riposo a quella sub-verticale di chiusura dello sbarramento, quanto le oscillazioni sotto moto;
- gli strumenti di misura, installati all'interno della paratoia, per rilevare e controllare l'inclinazione assunta e la pressione assoluta della bolla d'aria immessa/espulsa per l'emersione/immersione;
- gli ammortizzatori, che entrano in gioco quando la paratoia rientra nel proprio vano di alloggiamento, necessari per smorzare l'impatto della paratoia sul cassone di fondazione;
- i tubi che consentono l'immissione/espulsione di aria compressa all'interno della paratoia e l'espulsione della stessa aria/acqua, attraverso l'apposito cunicolo, nei cassoni di fondazione e di spalla;
- gli elementi in elastomero, alette, che consentono la tenuta parziale fra paratoia e cassone di fondazione e limitano l'ingresso di sedimenti nell'interspazio tra paratoia e cassone e tra paratoie/adiacenti;
- le vernici e gli anodi sacrificali che proteggono la paratoia dalla corrosione.

La struttura delle paratoie è costituita da fasciami in lamiera supportati e irrigiditi da elementi secondari, detti correnti, realizzati con profilati a bulbo, sostenuti a loro volta da telai trasversali, detti ossature rinforzate, costruiti con travi composte e raccordate

con squadre d'angolo.

Le travi rinforzate trasversali sono sostenute da tre linee di puntellatura longitudinali (paratie longitudinali), due in corrispondenza degli elementi strutturali relativi alle cerniere e realizzate con una paratia forata, ed una centrale realizzata con puntelli. Questa tipologia strutturale è valida per i fasciami superiore, inferiore e laterali.

I fasciami frontale e posteriore sono irrigiditi e sostenuti da elementi di rinforzo verticali, realizzati con profili a bulbo, le cui estremità risultano collegate mediante squadre ai corrispondenti correnti superiore e inferiore.

I correnti dei fasciami laterali sono collegati con squadre al primo corrente verticale dei fasciami frontale e posteriore.

I correnti longitudinali e verticali sono disposti, in genere, con un intervallo d'ossatura di 625 mm.

I telai trasversali rinforzati e i relativi elementi di puntellatura sono disposti, in genere, a intervalli di 2.500/3.000 mm.

I correnti non vengono interrotti in corrispondenza di ogni telaio trasversale, ma sono continui attraverso intagli, di geometria opportuna, nell'anima delle travi rinforzate mantenendo il collegamento con l'anima stessa.

La struttura è opportunamente rinforzata sia in corrispondenza delle cerniere, racchiuse entro fasciami che sono la prosecuzione di quelli superiore e laterali, sia in quattro ulteriori zone situate in corrispondenza dei dispositivi di aggancio ove i diaframmi longitudinali forati sono a spessore maggiorato e sono realizzati i ricettacoli cilindrici per accogliere i dispositivi stessi.

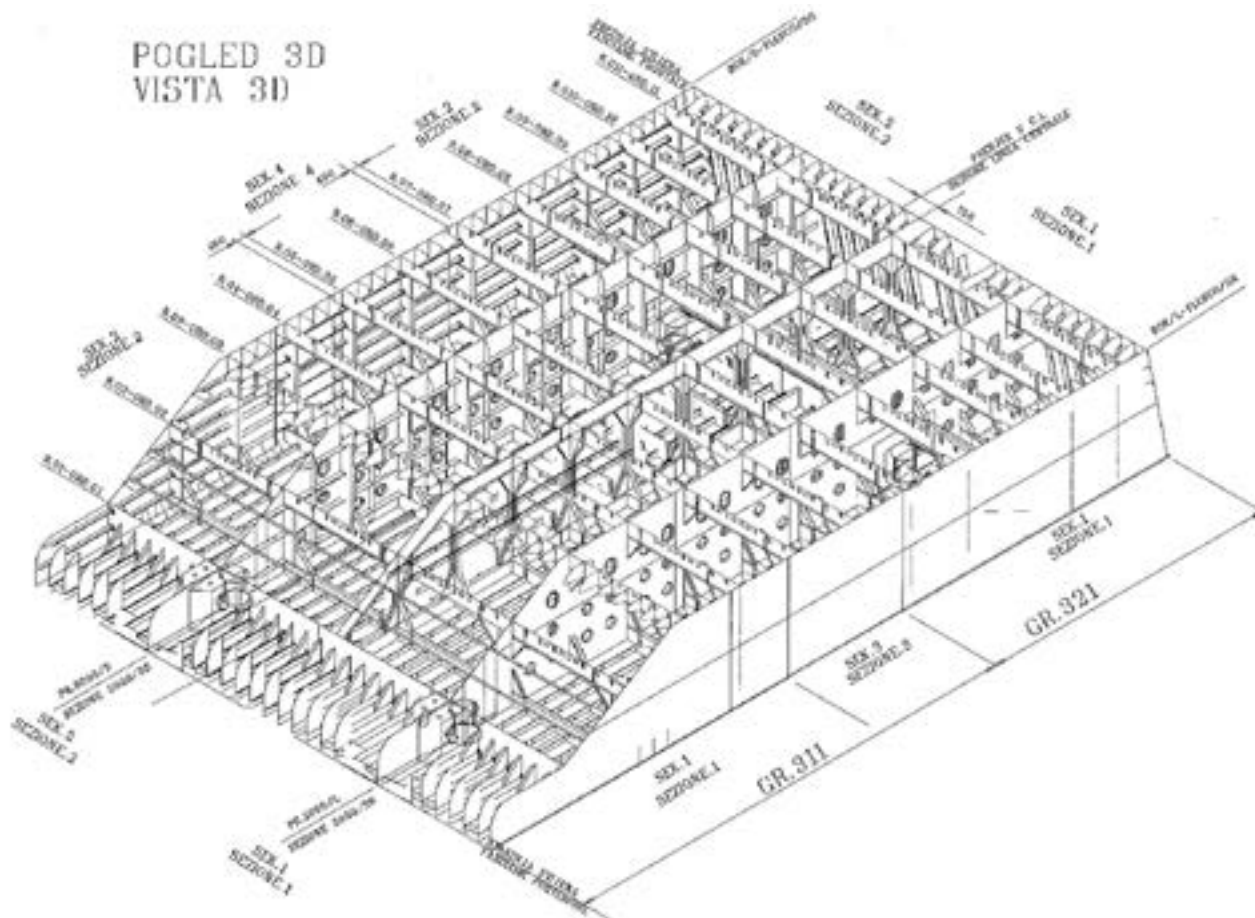


Fig. 2 | Disegno 3D strutture metalliche paratoie

All'estremità della paratoia, in corrispondenza delle due paratie longitudinali laterali sopra menzionate, sono presenti le pinne, costituite da laminati ossitagliati di grosso spessore (180 mm) opportunamente sagomati e forati. Esse sono atte ad alloggiare le corone di trattenimento dello snodo attorno al quale avviene la rotazione della paratoia sul perno degli elementi maschio dei gruppi cerniera-connettore.

In figura 2 è riportato un disegno in 3D rappresentativo delle carpenterie delle paratoie, in figura 3 una foto dell'interno della paratoia realizzata.



Fig. 3 | Interno paratoie

Che materiali sono stati utilizzati per la realizzazione delle paratoie?

I principali materiali impiegati nella costruzione delle paratoie sono così suddivisi:

- lamiere, piatti e profili di spessore fino a 40 mm: acciaio S275J0+N, secondo UNI EN 10025;
- lamiere, piatti e profili di spessore da 40 a 63 mm: acciaio S355J0+N, secondo UNI EN 10025;
- lamiere, piatti e profili di spessore da 63 a 200 mm: acciaio S355J0+N, secondo UNI EN 10025, con proprietà garantite in direzione perpendicolare alla direzione di laminazione (Z35 secondo UNI EN 10164);
- corone di alloggiamento dello snodo: acciaio bonificato 39NiCrMo3 Q+T, secondo UNI EN 10083-3, protetto con nichelatura chimica contro la corrosione;
- viteria e spine di centraggio in acciaio inossidabile A4-70, secondo EN ISO 3506-1;
- riporti in materiale inossidabile (imbuature) tipo AWELD 2928 sulle superfici di contatto delle corone con le pinne;
- tubazioni in acciaio senza saldatura P235 TR2 secondo UNI EN 10216, per le linee dell'aria compressa;
- elementi in gomma per le alette perimetrali e gli ammortizzatori;
- guarnizioni spirometalliche di tenuta tra le flange in AISI 316L;
- anodi di zinco per la protezione catodica passiva.

Le paratoie sono state poi verniciate internamente con un ciclo epossidico di spessore 375 micron, applicato in più mani, che ga-

rantisce la protezione dalla corrosione per un periodo di almeno 10 anni, senza necessità di manutenzione. Al termine del periodo di 10 anni dalla prima applicazione, il ciclo di verniciatura sarà soggetto ad ispezione ed eventuale ripristino se e dove necessario. Il ciclo di verniciatura è stato testato, in fase di qualifica, mediante prove di laboratorio, distruttive e non, che hanno dimostrato l'assoluta efficacia del medesimo in condizione di alta aggressività atmosferica (acqua di mare). E' altresì importante ricordare che le lamiere metalliche che formano la struttura delle paratoie presentano un sovrasspessore di corrosione di 1 mm per aumentarne ulteriormente la protezione. Infine va sottolineato che la verniciatura anticorrosiva costituisce uno dei tre presidi anticorrosivi adottati, insieme al sovrasspessore di corrosione e alla protezione catodica passiva realizzata mediante anodi sacrificali di zinco distribuiti sia all'interno che all'esterno delle paratoie.

Quali tolleranze sono state previste e quali controlli sono stati effettuati nella costruzione?

Il controllo in corso d'opera delle saldature presenti nelle paratoie (quasi la totalità a completa penetrazione) ha previsto un rigidissimo protocollo di controllo da parte dei soggetti deputati, a partire dai Welding Books all'uopo predisposti dai Costruttori, fino ai CND (controlli non distruttivi) operati da ispettori qualificati e da Enti di sorveglianza indipendente. In particolare, nell'ambito delle procedure dei giunti saldati sia Cimolai S.p.A., che Brodosplit d.d. hanno proposto l'adozione della tecnologia combinata Phased Array-TOFD per il controllo volumetrico delle saldature longitudinali testa a testa, di lunghezza significativa (i.e. saldature longitudinali e trasversali dei pannelli costituenti i fasciami), in alternativa ai controlli radiografici. Questa richiesta è risultata appropriata ed efficiente in virtù della rilevante mole e lunghezza dei giunti da controllare e, viceversa, della complessità e difficoltà di identificazione che avrebbe comportato la esecuzione di un enorme numero di radiografie. La metodologia sopra menzionata (per brevità denominata con l'acronimo PA/T) coniuga l'indubbio vantaggio di evitare l'utilizzo di radiazioni gamma e di ottenere al tempo stesso una affidabilità di risultato pari o addirittura superiore all'analisi radiografica.

La proposta metodologica di esecuzione dei CND mediante tecnica PA/T è stata sottoposta per valutazione alla Direzione Lavori la quale ha richiesto il preventivo parere di fattibilità dell'Istituto Italiano della Saldatura e, successivamente, la validazione della procedura operativa mediante test comparativi con i sistemi CND "tradizionali" (UT e RT) su difetti di saldatura artificiali noti, realizzati ad hoc su talloni di prova campione.

Appurato che la tecnica di esecuzione ed i risultati ottenuti assicuravano l'assoluta affidabilità e garanzia del rinvenimento di tutti i difetti di saldatura, ed ottenuta la validazione ufficiale e documentale da parte dell'IIS, è stata autorizzata l'adozione della succitata tecnologia PA/T, richiedendo comunque al Costruttore di eseguire controlli radiografici a campione su alcuni giunti saldati (in affiancamento al PA/T), scelti a discrezione della Direzione Lavori e dei Collaudatori statici.

Durante le attività di saldatura in officina e durante l'esecuzione dei controlli non distruttivi sulle saldature (CND) sono stati redatti

dall'esecutore, e controllati dalla Direzione Lavori, gli elaborati di rintracciabilità dei giunti saldati e dei controlli non distruttivi. Per assicurare la permanente rintracciabilità delle riparazioni dei giunti saldati che presentavano difetti (i.e. tipicamente incollature) sono state redatte apposite mappe dei difetti di saldatura ove sono state riportate graficamente la posizione e l'estensione dei difetti. Tutti i difetti rinvenuti sono stati messi in luce mediante scavo del cordone di saldatura interessato, successiva riparazione e ricontrollo a posteriori mediante la tecnica appropriata, al fine di garantire la completa assenza di difetti sul manufatto finito. Nell'ambito dell'attività di produzione è stato poi richiesto, ad ulteriore garanzia della bontà dei controlli eseguiti il ricontrollo a campione, da parte dell'Istituto Italiano della Saldatura (IIS), di numerosi giunti saldati delle paratoie.

Come si è svolto il collaudo statico delle paratoie?

Le prove di collaudo statico sono state effettuate, su richiesta dei Collaudatori statici, su una paratoia di Lido Treporti.

Le prove hanno avuto luogo presso lo stabilimento Cimolai di Monfalcone nel settembre 2013 in presenza di rappresentanti tecnici del Costruttore Cimolai, della Direzione Lavori e dei Collaudatori statici. Le attività sono consistite nella misura delle reazioni vincolari in corrispondenza dei punti di appoggio della paratoia sulle taccate (a riposo, e in varie condizioni di carico) e nella misura degli spostamenti/deformazioni conseguenti all'applicazione dei carichi. Si è altresì verificato lo spostamento indotto sulla pinna, mediante un carico orizzontale ivi applicato con un martinetto idraulico atto a simulare la forza orizzontale conseguente alla componente trasversale del moto ondoso dovuto alla riflessione sulle pareti dei canali di Bocca.

I risultati conseguiti dalle prove di carico effettuate durante il collaudo statico hanno pienamente confermato i dati dei modelli di calcolo.

Quali tolleranze sono state previste?

Si sono dovute rispettare strettissime tolleranze di costruzione, sia in fase di produzione dei singoli elementi prefabbricati (elementi ossitagliati, laminati, profilati, nervature, etc.) sia in fase di assemblaggio finale delle paratoie, per assicurare il mantenimento dei trasferi tra paratoie adiacenti, una volta che le stesse sono state installate sui cassoni di soglia, e quindi la corretta funzionalità del sistema.

In particolare durante la fase di assiemaggio e saldatura dei singoli "moduli costruttivi" con cui la paratoia è stata realizzata si è curata particolarmente la pre-formatura delle pannellature (tipicamente fasciami nervati) per tener conto degli effetti di ritiro termico conseguenti alle numerosissime ed estese saldature degli elementi di irrigidimento (i.e. bulbi di tipologia navale, profili laminati a caldo). Ogni modulo costruttivo è stato sottoposto in ogni sua fase realizzativa, pre e post saldatura, a misurazioni dirette e controlli topografici di precisione che hanno consentito di rispettare gli strettissimi valori dimensionali fissati dal Progettista.

Nelle figure 4-11 varie fasi di costruzione delle paratoie.



Fig. 4 | Predisposizione dei fasciami con i ferri a bulbo d'irrigidimento longitudinale



Fig. 5 | Fase di riporto metallico di Inconel 625 all'interno del foro delle pinne



Fig. 6 | Vista di un modulo costruttivo della paratoia



Fig. 7 | Assemblaggio finale della paratoia

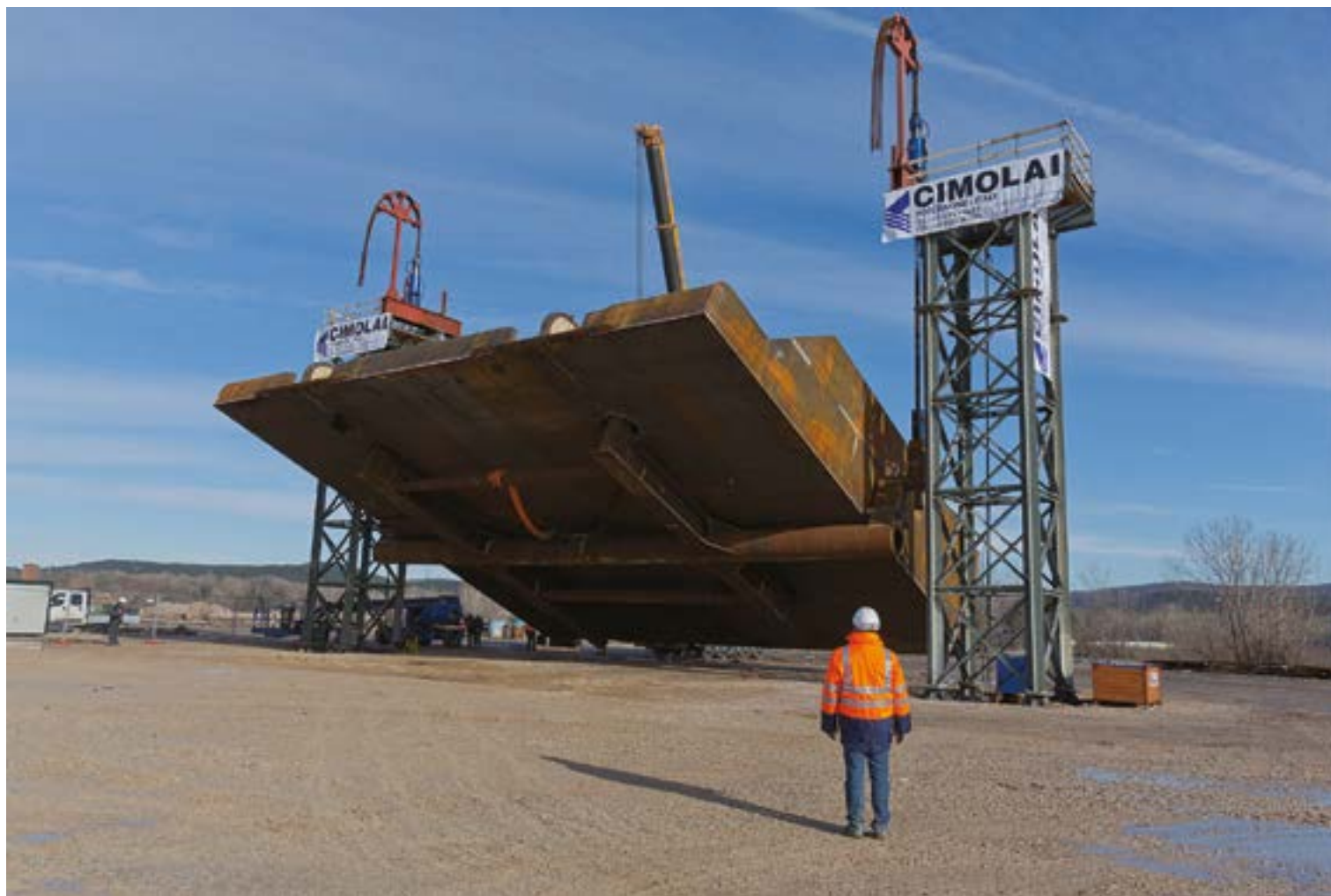


Fig. 8 | Movimentazione della paratoia dopo la costruzione



Fig. 9 | Paratoia verniciata



Fig. 10 | Paratoia con cerniere montate



Fig. 11 | Trasporto in mare paratoie

COSTRUZIONI METALLICHE

INTERVISTA...



Gian Paolo Colato

Gian Paolo Colato è nato a Roverchiara (VR) nel 1963 e si è laureato a Padova con lode in Ingegneria Civile nel 1988. Attualmente è il Direttore Tecnico di FIPMEC, azienda specializzata nella progettazione e costruzione di dispositivi meccanici per uso infrastrutturale e sistemi di isolamento e protezione dal sisma. Ha contribuito a far nascere l'Academy aziendale che attualmente dirige e che promuove l'uso dei prodotti FIPMEC attraverso corsi, seminari, webinar rivolti a Progettisti e Amministrazioni. Partecipa attivamente a vari comitati UNI e CEN nell'ambito della normazione dei prodotti antisismici e di vincolamento strutturale.



Fig. 1 | Montaggio dell'elemento "maschio" sulla paratoia

Ingegnere Colato, che ruolo ha avuto nella realizzazione del MOSE?

Nel 2005, quando venne chiesto a FIP Industriale se accettava la sfida di partecipare alla costruzione di un'opera di ingegneria idraulica unica nel suo genere, ricoprivo il ruolo di Direttore Tecnico dell'Azienda. Nello specifico, il mio ruolo nella realizzazione dei gruppi cerniera - connettore, cioè degli elementi di collegamento delle paratoie mobili con i cassoni di fondazione, è stato duplice, ossia dapprima come Progettista Costruttivo e successivamente come Project Manager. In questa seconda funzione, al fine di gestire la costruzione delle 156 cerniere e programmarne la consegna secondo le esigenze dei cantieri alle 4 Bocche, avevamo creato un team ad hoc che approfittò per ringraziare da queste pagine - essendosi poi disperso alla conclusione della fornitura - e che comprendeva gli ingg. Renato Chiarotto, Alessandro Sardena, Paolo Giorgi e Massimo Mazzaro.

Ci descrive come funzionano le cerniere delle paratoie?

Le cerniere del MOSE sono un organo meccanico che diventa servoassistito elettroidraulicamente durante le operazioni di aggancio e sgancio delle paratoie ovvero durante le manutenzioni programmate.

Le funzioni a cui devono asservire sono molteplici, essendo il cuore e l'anima del Progetto.

Come connettori, infatti, vincolano le paratoie alle strutture di fondazione, fungendo da organi di trasmissione meccanica delle forze derivanti sia dal moto ondoso che dalla spinta idraulica di galleggiamento delle paratoie.

Come cerniere vere e proprie ne consentono il movimento quando devono essere sollevate in previsione di un'acqua alta e successivamente riabbassate, piuttosto che permettere le libere oscillazioni dovute al moto ondoso quando sono in configurazione sollevata di protezione della laguna.

Le cerniere sono anche l'unico passaggio a scafo che mette in comunicazione l'interno (le gallerie di servizio e i vani presenti nei cassoni di fondazione) con l'esterno (l'ambiente marino) e pertanto attraverso di loro passano tutti gli impianti elettromeccanici di

azionamento e controllo delle paratoie.

Infine, il gruppo cerniera-connettore deve avere la possibilità di essere separato in una componente lato cassone (elemento fisso, strutturalmente ancorato al cassone stesso e denominato "femmina") ed un componente lato paratoia (elemento amovibile incernierato alla paratoia e denominato "maschio") per permettere un'agevole rimozione / installazione delle paratoie senza l'ausilio di sommozzatori. L'elemento che consente in modo semplice e controllato questa operazione è denominato "gruppo d'aggancio". Pertanto, il gruppo cerniera - connettore è costituito da una struttura di acciaio formata da tre elementi principali uniti tra loro: un elemento maschio, un elemento femmina e il gruppo di aggancio.

Come avete affrontato il progetto di un elemento così delicato come le cerniere?

La progettazione è iniziata nel giugno del 2005 tramite una collaborazione con Technital, società autrice del Progetto Definitivo degli elementi connettore-cerniera come di tutti i progetti legati al MOSE.

Il nostro contributo è passato attraverso un'anamnesi degli studi precedenti che andavano dalla raccolta dati messi a disposizione della sperimentazione del Modulo Sperimentale Elettromeccanico avvenuta tra il 1988 e il 1992 - banco di prova per certi componenti peculiari della paratoia e della sua connessione - fino alla consulenza dell'ing. Ludovico Solinas, vero "padre" dell'idea progettuale che sta alla base del Progetto, all'epoca oramai in pensione ma coinvolto fin dal 1970, in qualità di Direttore Tecnico della Calzoni di Bologna, nel trovare una soluzione su "come sbarrare il passo all'acqua in laguna". Attraverso l'ing. Solinas siamo arrivati a capire dove ancora ci fossero delle aree di incertezza da indagare e quindi è stata avviata una sperimentazione che permettesse di colmare tali lacune. In questa fase pertanto si sono realizzati una prima serie di prototipi su cui, negli anni 2010-2011, sono stati sviluppati test di varia natura tra cui le prove cicliche di fatica per simulare la vita utile di 100 anni dei manufatti, prove di resistenza statica ai carichi ultimi, prove di tenuta idraulica, prove di resistenza alla corrosione, studi specifici su particolari processi quali la saldatura, la verniciatura, la nichelatura. Docenti di metallurgia del Politecnico di Milano hanno provveduto, inoltre, a validare le soluzioni progettuali e le caratteristiche dei materiali utilizzati.

Questi test hanno svolto un ruolo fondamentale per la definizione sia del Progetto Esecutivo che delle manutenzioni.

Come avete realizzato le cerniere? Che materiali avete utilizzato e quali tecnologie costruttive? Che test di validazione avete eseguito?

La validazione dei singoli componenti del gruppo cerniera - connettore è avvenuta mediante la costruzione di un prototipo in scala reale sia della cerniera - connettore che della porzione di cassone in calcestruzzo su cui essa doveva essere fissata, il tutto denominato Campo Prove.



Fig. 2 | Predisposizione elementi "maschio" per montaggio su paratoia

Pertanto, il **campo prove** era costituito da un imponente apparecchiatura fluidodinamica di prova e da una grande vasca rettangolare di calcestruzzo che fungeva da contrasto all'apparecchiatura, sul cui pavimento interno, dello spessore reale dell'estradosso dei cassoni di alloggiamento delle paratoie, era stato fissato il gruppo cerniera - connettore in modo tale da simulare l'ancoraggio alla struttura di fondazione. Alle pareti della vasca erano poi fissati i pistoni idraulici (martinetti) per l'applicazione delle forze orizzontali e verticali in modo tale da simulare le sollecitazioni a cui sarebbe stato effettivamente soggetto il gruppo cerniera - connettore, comandati da pompe idrauliche corredate delle relative valvole ed accessori idraulici a completamento dell'apparecchiatura fluidodinamica di prova.

Al pavimento, invece, era fissata una campana di pressurizzazione, di dimensioni tali da racchiudere l'intero gruppo cerniera - connettore, necessaria per riprodurre le condizioni ambientali di esercizio del gruppo che è collocato a oltre 20 m di profondità. La campana, riempita con acqua in pressione, era stata realizzata in carpenteria metallica adeguatamente irrobustita.

Al di sotto della pavimentazione interna vi era un vano accessibile che corrispondeva al locale previsto sotto il connettore, da cui oggi si eseguono le operazioni di collegamento tra gli elementi maschio e femmina.

Tutti i materiali in acciaio laminato per cui era prevista la successiva saldatura sono stati acquistati aggiungendo alle prescrizioni delle Normative e dei Capitolati anche quelle metallurgiche dettata dal Prof. Gian Mario Paolucci, già docente dell'Università di Padova.

L'elemento femmina, vincolato al cassone di alloggiamento della paratoia, è costituito da una struttura scatolare, chiusa lateralmente, al centro della quale è realizzata un'apertura di forma tronco conica entro cui si inserisce l'elemento maschio. La connessione è a tenuta idraulica e in grado di trasmettere le sollecitazioni della paratoia al cassone. I materiali utilizzati sono tutti laminati in acciaio al carbonio tipo S355 J2+N con richiesta di resilienza minima di 27 Joule a -20°C per spessori fino a 75 mm mentre per spessori maggiori in S355 K2+N ovvero con una resilienza di almeno 40 Joule a -20°C, prodotti dall'acciaieria Dillinger e controllati alla fonte da ispettori di parte terza. Le superfici all'interno del tronco di cono che poi vanno in battuta con le guarnizioni del maschio sono imburrate con materiali inossidabili tipo Inconel 625. Successivamente alla saldatura, tutte le femmine sono state oggetto di un trattamento termico di distensione. La bulloneria è in acciaio inossidabile resistente alla tensocorrosione tipo SAF 2205. La femmina ha un'altezza di quasi 1,15 m e un peso di circa 23 t. Il suo fissaggio al cassone avviene mediante 10 barre di ancoraggio, in acciaio bonificato tipo 39 NiCrMo3, ciascuna con diametro di 110 mm in cui la filettatura è ottenuta mediante rullatura in modo da aumentarne la resistenza a fatica (figure 3-7).

L'elemento maschio, vincolato alla paratoia, ha forma tronco conica con la parte più larga al centro e la parte più stretta in basso (figure 1, 2, 9, 10). Anch'esso è realizzato mediante saldatura di acciai al carbonio laminati tipo S355 J2+N o S355 K2+N a seconda degli spessori richiesti, prodotti e controllati similmente a quelli dell'elemento femmina. Come richiesta aggiuntiva in fase di acquisizione della materia prima, essendoci alcuni giunti a croce che sollecitano perpendicolarmente al piano di laminazione i materiali,

era stata inserita quella di avere caratteristiche di resistenza migliorate sullo spessore, ovvero acciai Z35 secondo UNI EN 10164. Successivamente alla saldatura strutturale tutti gli elementi maschio sono stati oggetto di un trattamento termico di distensione; le imburature in acciaio inossidabile, invece, sono state eseguite successivamente con lo scopo di non alterarne le caratteristiche meccaniche e di resistenza alla corrosione. Le imburature delle aree in cui dovevano essere alloggiate le guarnizioni (vi sono due presidi di tenuta: uno superiore ed uno inferiore) sono state realizzate con materiale d'apporto tipo 309LMO (prime passate) e successivamente con 317L (materiali più "morbidi" rispetto all'Inconel 625 per concentrare nell'elemento maschio - sempre rimovibile e quindi facilmente riparabile - eventuali possibili danneggiamenti), mentre per le altre si è utilizzato ancora una volta l'Inconel 625. La culla d'appoggio della testa a martello del tensionatore, posta internamente al maschio, è realizzata in acciaio inossidabile tipo SAF 2205. La parte superiore del maschio è la vera e propria cerniera realizzata mediante una forcilla dotata di una boccola sferica entro cui viene inserito il perno in acciaio inossidabile tipo SAF 2205 che vincola il maschio alla paratoia. Il perno permette alla paratoia di ruotare, oscillando liberamente sotto l'azione del moto ondoso. Il maschio ha un'altezza di quasi 3 m e un peso pari a 10 t.

Tale elemento è sempre stato sotto la lente d'ingrandimento in quanto in prima battuta se ne era prevista la soluzione fusa con un design di progettazione molto simile a quello dei connettori utilizzati in ambito *off-shore*. Via via che ci si è addentrati nella progettazione, però, ci si è accorti che una soluzione in carpenteria saldata poteva essere più funzionale e più rispondente alle esigenze specifiche: innanzitutto non servivano forme assialsimmetriche ma piuttosto caratterizzate da resistenze elevate lungo un asse e piuttosto modeste ortogonalmente ad esso. In secondo luogo, le forze in gioco da trasmettere portavano alla richiesta di spessori delle costole in acciaio che mal garantivano l'omogeneità e la mancanza di difetti al cuore, sempre possibili con getti di oltre cento quintali. Comunque, per fugare anche gli ultimi dubbi, alla fine delle prove della preserie, l'elemento maschio è stato sottoposto a taglio per verificare alcune possibili criticità:

- presenza / assenza delle tensioni residue ovvero di quelle tensioni che si vengono a formare durante la fase di saldatura e che, malgrado i trattamenti termici previsti e realizzati, potevano ingenerare nel tempo deformazioni della geometria del maschio tali da creare problemi al suo accoppiamento di forza e di tenuta con l'elemento femmina;
- presenza di alterazioni microstrutturali;
- affaticamento causato dalle precedenti prove di collaudo, valutato attraverso il prelievo di alcuni spezzoni ricavati dai giunti a croce posti nelle posizioni più critiche dei giunti saldati e con la ripetizione delle prove cicliche di fatica presso l'Università di Padova al fine di valutare la vita residua dei componenti.

Tutte le prove aggiuntive sono state analizzate nel 2014 dal Prof. Gian Mario Paolucci in qualità di esperto metallurgico dell'allora Magistrato alle Acque di Venezia ed hanno dato esiti più che soddisfacenti (tensioni residue limitate, assenza di alterazioni microstrutturali, vita residua dei giunti pari all'equivalente di altri

100 anni di servizio), permettendo di validare appieno la soluzione in carpenteria saldata. Il terzo componente, il gruppo di aggancio, unisce saldamente la parte “femmina” e quella “maschio” tramite un’asta pretensionata. Il valore della forza di precarico è pari a 3000 kN. La scelta di tale valore deriva dall’analisi dei valori massimi di tiro scaricati dalla paratoia per le condizioni meteomarine più gravose, dall’influenza che tale parametro ha sugli spostamenti e le rotazioni dell’elemento maschio (e quindi gli sforzi di contatto maschio-femmina) e dall’impegno del sistema di tensionamento e blocco meccanico. Il gruppo è stato progettato per consentire le operazioni di aggancio e di sgancio, e quindi la rimozione di ciascuna paratoia, senza l’intervento di sommozzatori (figura 8). Il gruppo di aggancio è l’elemento più variegato sia come componentistica che come utilizzo di materiali i quali, fondamentalmente, sono:

- stelo di aggancio del diametro di 190 mm in acciaio fucinato bonificato tipo 39 NiCrMo3 con una corsa di 730 mm, di cui 20 mm sono di extra-corsa;
- valvola di segregazione in acciaio inossidabile tipo AISI 316L disposta al di sotto della piastra di contrasto e ad essa fissata, necessaria per chiudere il passaggio all’acqua quando il maschio non è presente, o perché si è nella fase di prima installazione delle paratoie oppure perché la paratoia è stata rimossa per consentire gli interventi di manutenzione;
- struttura di guida e contrasto in acciaio al carbonio tipo S355 J2+N con funzione di contrastare il precarico trasmesso dallo stelo tensionatore all’elemento maschio ed accogliere la testa dello stelo in posizione segregata, fissata alla piastra di contrasto in acciaio inossidabile tipo AISI 316L;
- meccanismo oleodinamico per la movimentazione verticale dello stelo ovvero con funzione di alzare ed abbassare lo stelo il quale risulta semplicemente appoggiato sulla piastra inferiore del gruppo – traversa di riscontro in acciaio al carbonio tipo S355 J2+N;
- meccanismo oleodinamico per l’applicazione della forza di pretensione con cilindro forato a doppio effetto in acciaio bonificato tipo 39NiCrMo3 e blocco meccanico - in modo da trasmettere meccanicamente il precarico allo stelo tensionatore - ancora in acciaio bonificato tipo 39NiCrMo3; il tutto è completato da ruote dentate in acciaio tipo C45 cementato;
- dispositivo di rotazione dello stelo per permettere la rotazione di 90° dello stelo tensionatore attorno al suo asse in modo da consentire alla testa a martello dello stelo di portarsi dalla posizione di aggancio a quella di sgancio e viceversa; i materiali utilizzati sono acciaio inossidabile AISI 316L e acciaio bonificato tipo 39NiCrMo3.

Il gruppo cerniera - connettore comprende infine tutte le parti impiantistiche necessarie per il funzionamento delle paratoie. Tra queste i tubi per il flusso dell’aria necessaria al loro movimento e le connessioni elettriche e meccaniche degli strumenti che rilevano l’esatta inclinazione di ciascuna paratoia in funzione.

Per consentire l’azionamento del gruppo anche nel caso di allagamento accidentale del locale connettore, tutti i comandi elettrici ed oleodinamici sono derivati verso la galleria principale tramite un pannello di interfaccia dotata di attacchi rapidi, predisposto a lato della porta stagna di ingresso. I gruppi afferenti

ad una paratoia possono essere azionati contemporaneamente tramite l’impiego di due centraline idrauliche carrellate che completavano la fornitura.

In Fig. 3 [a, b, c] sono presenti le fasi di realizzazione dell’elemento “femmina”



Fig. 3a | Fasi di realizzazione dell’elemento “femmina”

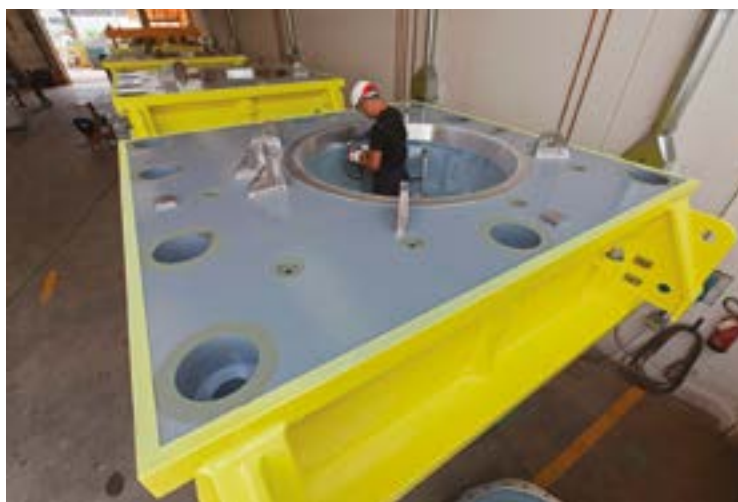


Fig. 3b | Fasi di realizzazione dell’elemento “femmina”



Fig. 3c | Fasi di realizzazione dell’elemento “femmina”

Come sono state montate le cerniere?

Il montaggio delle cerniere è avvenuto in due momenti diversi e in due aree ben distinte.

Dapprima si è provveduto all'inghisaggio dell'elemento femmina e la tesatura delle barre di collegamento in quanto queste operazioni dovevano avvenire prima dell'affondamento del cassone e pertanto sono state realizzate direttamente nei siti di costruzione dei cassoni stessi.

Dopo una preparazione mediante bocciardatura e rasatura delle superfici all'estradosso del cassone in calcestruzzo, si procedeva con la foratura per poter inserire l'armatura perimetrale del successivo getto di allettamento.

Nel frattempo si preparava a terra un preassemblato formato dall'elemento femmina, dal gruppo d'aggancio e dalla guarnizione perimetrale di tenuta all'intradosso tra cassone in calcestruzzo ed elemento femmina che poi veniva sollevato e posizionamento nella zona di inghisaggio mediante supporti regolabili ovvero martinetti oleodinamici.

Dopo un'attenta verifica topografica delle posizioni plano-altimetriche della femmina, si procedeva con la disposizione della casseratura, dell'armatura e infine del getto del grout di allettamento.

A maturazione avvenuta, si inserivano nel perimetro della femmina, nelle nicchie ricavate sulla sua piattabanda di estradosso, le 10 barre d'ancoraggio, i dadi e le rondelle e successivamente si



Fig. 4 | Trasporto e montaggio elemento “femmina” su cassone



Fig. 5 | Montaggio in opera dell'elemento “femmina” sui cassoni



Fig. 6 | Tipico cassone con elementi “femmina” montati

completava l'operazione con la loro tesatura dall'interno del locale connettore con una forza per barra di 3800 kN. Tali barre trovano alloggio in appositi tubi disposti sia nella carpenteria metallica che nella sottostante struttura in c.a., all'interno dei quali è stato iniettato del grasso protettivo. Tutte le testate delle barre sono incassate nel corpo dell'elemento scatolare; in tal modo si evitano sporgenze dalla piattabanda superiore, in particolare nella zona posta a ridosso della parete verticale del cassone dove altrimenti ostacolerebbero il movimento rotatorio della paratoia. Infine, dopo l'iniezione con resina di tubi microfessurati disposti preventivamente all'interno del getto in modo da assicurare il completo intasamento dell'allettamento, si eseguiva una prova di tenuta in modo da validare l'impermeabilità della giunzione. È da far notare come tutte le operazioni di ritesatura e il loro controllo periodico potranno essere svolte agendo dall'interno del locale posto al di sotto del connettore. Pertanto, la testata inferiore rimane sempre accessibile, mentre quella superiore è stata resa stagna e protetta dall'azione dell'acqua di mare tramite un cappello protettivo saldato.

Il montaggio dell'elemento maschio, invece, è avvenuto nell'area di stoccaggio delle paratoie situata nella zona industriale di Marghera, mediante l'inserimento del perno di collegamento tra il piatto forato presente sulla paratoia alloggiante lo snodo sferico e la forcella del maschio; contemporaneamente si è provveduto anche a completare tutti i collegamenti elettrici ed impiantistici.

Di che tipo di manutenzione hanno bisogno?

È bene sottolineare come tutti i singoli componenti del gruppo cerniera - connettore possono essere più o meno agevolmente ispezionati in modo da verificarne la piena efficienza ed eventualmente programmare la manutenzione.

L'elemento maschio verrà sottoposto a manutenzione in concomitanza con gli interventi manutentori programmati per la relativa paratoia che, ogni cinque anni, sarà rimossa dalla propria sede e sostituita con altra già sottoposta a controlli (le attività di manutenzione saranno eseguite in appositi spazi e capannoni completamente attrezzati nella zona industriale di Marghera).

L'elemento femmina, invece, rimane vincolato ai cassoni di alloggiamento e, pur essendo dimensionato per resistere senza manutenzione per tutta la vita dell'opera, verrà sottoposto a periodiche ispezioni eseguibili, all'asciutto, dall'interno dei locali sottostanti. Analogamente si procederà per il gruppo di aggancio, sempre ispezionabile dall'interno del locale connettore e manutenibile con l'ausilio di attrezzature carrellate ed idraulicamente assistite progettate e costruite all'uopo.

Nel corso della vita delle opere mobili, qualora per motivi eccezionali si ravvisi la necessità di sostituire l'intera femmina, tale operazione potrà essere eseguita liberando gli ancoraggi inferiori delle barre demolendo, almeno parzialmente, lo strato di intasamento con grout e quindi sollevando la femmina. Per facilitare le operazioni di sollevamento sono state previste 4 staffe, sporgenti lateralmente dal cassone, sul cui foro centrale è possibile impennare la mensola di contrasto per una portata massima di 750 kN.

Comunque, quella richiesta è soprattutto una manutenzione conservativa ovvero delle procedure che, a partire da un'ispezione



Fig. 7 | Campo Prove - Predisposizione elemento "femmina"



Fig. 8 | Campo Prove - assemblaggio del tensionatore



Fig. 9 | Dettaglio delle manichette di alimentazione della paratoia

visiva, tendono a mantenere il livello di efficienza e qualità di inizio fornitura, come ad esempio per la protezione anticorrosiva, per i sistemi oleodinamici, per le guarnizioni e le viterie. Gli unici elementi soggetti a sostituzioni preventive sono posizionati sugli

elementi maschio e sulle paratoie di cui ne è prevista la rimozione ogni 5 anni: a fronte di controlli geometrici e dimensionali potrebbe essere necessario sostituire gli snodi sferici piuttosto che gli anodi sacrificali che, attraverso la strategia della protezione catodica, evitano la possibile corrosione degli acciai qualora si trovassero ad essere esposti all'attacco della corrosione, oppure i *manifolds* e i tubi flessibili entro cui passa l'aria compressa necessaria al sollevamento delle paratoie.

A questo punto mi aspetterei una domanda: ma se, da come ci sta descrivendo, tutto sembra che sia stato progettato e costruito in maniera coscienziosa, aderente ai capitolati e a regola d'arte, perché sono avvenuti e si continua a parlare di problemi di corrosione delle cerniere?

E perciò la prevengo, non sottraendomi dal darle una risposta che, ovviamente, esprime il mio punto di vista e non ha la pretesa di essere la Verità ma comunque spero possa ingenerare un sano dibattito fuori dalle logiche delle responsabilità Costruttore / Direzione Lavori / Committente ma secondo il criterio di una valutazione tecnico-ingegneristica.

I problemi di corrosione si sono riscontrati solamente sulle cerniere di una Bocca, quella di Treporti e solamente su un elemento del gruppo d'aggancio ovvero lo stelo tensionatore.

Rassicuriamo innanzitutto dicendo che tale corrosione ha asportato meno dell'un per mille dell'area resistente dello stelo e pertanto non compromette minimamente la sicurezza statica dell'opera anche se ne mette a rischio la durabilità ovvero a priori e limitatamente ai gruppi di aggancio installati a Treporti, non è possibile assicurare una vita utile di 100 anni. Inoltre, evidenzia una non conformità all'atto del collaudo generale dell'Opera.

È necessario contestualizzare il processo di costruzione del MOSE, indicando come la prima Bocca che è stata completata

con l'assiemaggio delle cerniere, l'affondamento dei cassoni e la successiva installazione delle paratoie, è stata quella di Treporti. Come abbiamo accennato prima, il Modulo Sperimentale Elettromeccanico messo in acqua nel canale di Treporti non era stato pensato e pertanto non ha avuto modo di dare risultati rispetto alla resistenza alla corrosione dei materiali e delle soluzioni tecnologiche adottate nella fase di affondamento e di pre-esercizio. In pratica, perciò, la bocca di Treporti è stata la vera "preserie" che ha agito da banco di prova di tutti i componenti.

Si aggiunga che la logica del finanziamento a stralci e "spalmato" su tutte le bocche per consentire un avanzamento quanto più omogeneo possibile dei lavori, ha lasciato indietro – ovvero non finanziate – alcune operazioni tra cui la manutenzione degli impianti nel transitorio (dalla posa delle paratoie all'entrata in funzione dell'Opera che, per Treporti, vuol dire oltre otto anni, dal 2013 ai giorni nostri).

In pratica, pertanto, le cerniere di Treporti, una volta che le paratoie sono state installate, non hanno subito quelle attenzioni manutentive / conservative che avrebbero dovuto essere messe in atto, con un finanziamento ad hoc.

Forti dell'esperienza parzialmente negativa di Treporti, per le rimanenti Bocche si sono inserite nei progetti queste lavorazioni, ispezioni e manutenzioni che poi sono state adeguatamente finanziate, ed ecco che ad oggi in tutte le altre cerniere non si riscontra alcun tipo di fenomeno corrosivo e si può a ragione affermare come quella che inizialmente si presentava come una sfida carica di timori e preoccupazioni oggi è diventata un motivo di orgoglio e di grande soddisfazione per aver contribuito alla scrittura di un nuovo capitolo dell'ingegneria strutturale in un'Opera e in un contesto unici al mondo.



Fig. 10 - Montaggio dell'elemento "maschio" sulla paratoia

COMUNITÀ GALLEGGianti

Urban Rigger 2.0, Copenhagen, 2019

FLOATING COMMUNITIES

Urban Rigger 2.0, Copenhagen, 2019

Architect, PhD Anna Dalla Valle*

Politecnico di Milano, Department of Architecture, Built environment and Construction engineering - Milano, Italy

Esiste ad oggi un alloggio mobile, flessibile e sostenibile che possa essere adattato a molte esigenze diverse e posizionato in luoghi differenti? La soluzione è Urban Rigger 2.0, un progetto residenziale innovativo basato sul concetto di acqua come nuova forma di territorio. Si tratta di un sistema di comunità galleggianti che amplia il tessuto urbano e offre infinite possibilità di sviluppo.

Is there today a mobile, flexible and sustainable living unit that can be adapted to various needs and located in different places? The solution is Urban Rigger 2.0, an innovative housing project based on the concept of water as a new form of territory. It is a system of floating communities that expands the building environment and offers infinite possibilities for development.



Fig. 1 | Vista dall'acqua di Urban Rigger.

*Corresponding author. E-mail address: anna.dalla@polimi.it

Esigenza abitativa e concept design

In natura, l'acqua può essere vista sotto un duplice profilo per l'ambiente costruito. Da una parte, come fonte di pericolo, portando alla realizzazione di grandi opere ingegneristiche, ad esempio per assicurare la difesa del territorio dagli allagamenti. Dall'altra come opportunità di sviluppo, offrendo nuovi spazi da trasformare in aree edificabili, ad esempio in zone dove la terraferma dispone di campi d'azione estremamente limitati o addirittura assenti. In quest'ottica, il progetto Urban Rigger 2.0, ideato dall'architetto di fama mondiale Bjarke Ingels (BIG), costituisce una soluzione per insediamenti urbani innovativi (figura 1).



Fig. 2 | Vista panoramica di Urban Rigger.



Fig. 3 | Modulo del nucleo abitativo.

Si tratta di un villaggio galleggiante di 72 appartamenti realizzato a Refshaleøen, isola nel porto di Copenhagen, per far fronte alla carenza di alloggi per studenti. Nella capitale danese, come avviene nella maggior parte delle città metropolitane, la domanda abitativa supera di gran lunga l'offerta; un numero crescente di giovani, attratto dall'offerta formativa e culturale del territorio, è in costante ricerca di alloggi in aree centrali a prezzi accessibili. In questo contesto, l'industria pesante si sposta dai porti suburbani e le ex aree portuali vengono destinate ad interventi di riqualificazione urbana



Fig. 4 | Scalabilità del progetto in una direzione.

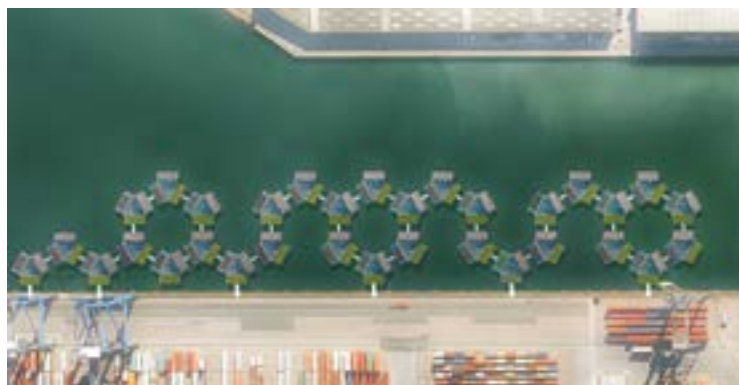


Fig. 5 | Scalabilità del progetto in due direzioni.

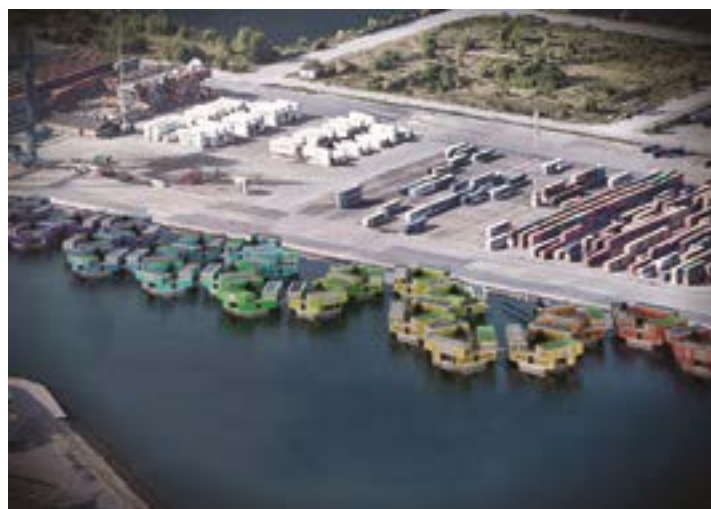


Fig. 6 | Replicabilità del progetto in contesti differenti.

e trasformate in quartieri residenziali, soddisfacendo però solo in minima parte la domanda di alloggi. È così che Urban Rigger viene costruito direttamente sull'acqua, non occupando nuovo suolo urbano e realizzando alloggi a basso costo in aree centrali: infatti in soli 15 minuti in bicicletta si raggiunge il centro della capitale (figura 2).

Pur essendo nato per rispondere a un'esigenza locale, Urban Rigger risulta facilmente adattabile a qualsiasi realtà sull'acqua, per risolvere in maniera economica le urgenti necessità abitative, andando simultaneamente a caratterizzare i moli in disuso. Il progetto è

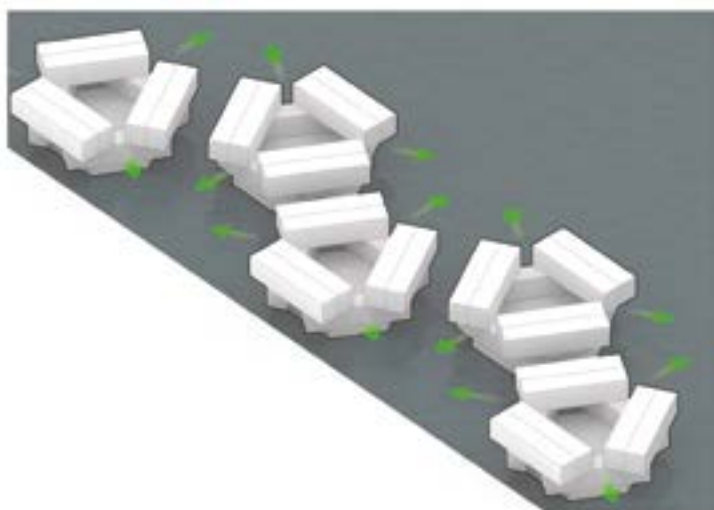


Fig. 7 | Concept viste esterne.

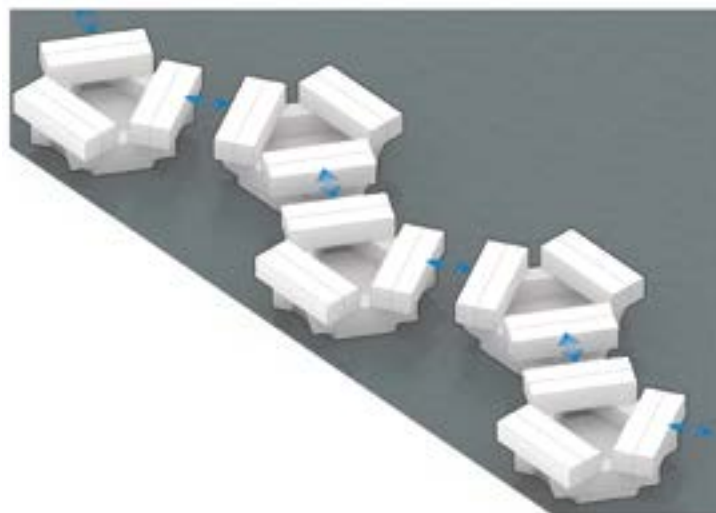


Fig. 9 | Concept connessioni multilivello.

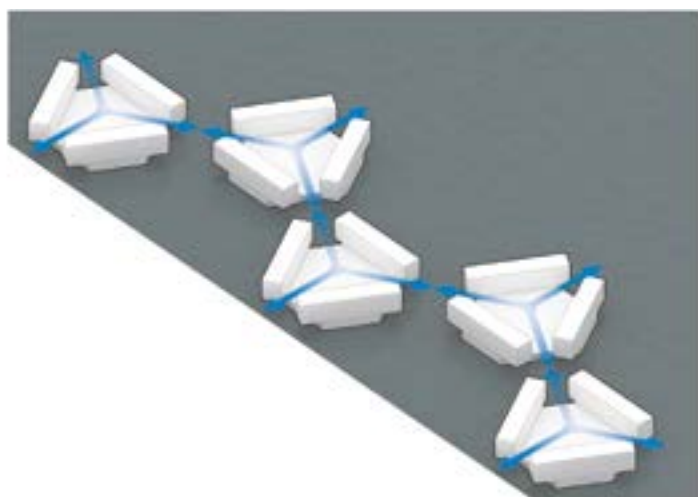


Fig. 8 | Concept connessioni interne.

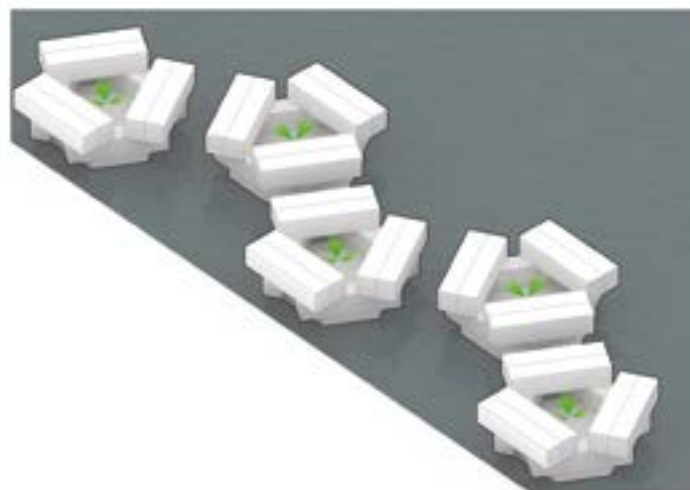


Fig. 9 | Concept connessioni multilivello.

stato sviluppato sulla base di tre principi chiave che lo rendono estremamente flessibile. Primo principio è la modularità, in quanto sfrutta le potenzialità della prefabbricazione di container per ridurre notevolmente i tempi di esecuzione, contenere i costi, limitare i rischi, aumentare le prestazioni e mitigare gli impatti ambientali (figura 3).

Secondo principio è la scalabilità, in quanto è concepito come sistema aperto, in cui il singolo nucleo abitativo può essere reiterato in sequenza lungo la banchina (figura 4) ma anche incrementato trasversalmente verso il mare o trasportato via acqua in un diverso luogo a seconda delle necessità (figura 5).

Terzo principio è la replicabilità, in quanto può essere insediato ovunque sia acconsentito un accesso all'acqua, quindi in tutti i porti e città fluviali del mondo, per ospitare studenti ma anche single o coppie o risolvere situazioni d'emergenza (figura 6). Urban Rigger di Copenaghen costituisce il progetto pilota e sono già in atto diverse sperimentazioni per ricrearlo in altri contesti europei (Olanda, Germania, Svezia) e oltreoceano (Stati Uniti).

In questa prospettiva, la connessione diventa l'imperativo del progetto. Connessione innanzitutto con l'acqua, offrendo agli utenti la possibilità di interagire costantemente con essa, sia dal punto di vista visivo sia fisico (figura 7). Connessione spaziale, in quanto i nuclei abitativi galleggianti sono collegati tra loro e alla terraferma tramite passerelle, permettendo di estendere le aree abitabili urbane (figure 8-9). Connessione sociale, promuovendo l'inclusione e dando l'opportunità agli utenti di creare forti comunità locali (figura 10).

Connessione materiale, poiché tutto questo è possibile solo grazie all'uso sapiente di tecniche e risorse, sviluppate fin dal principio tramite forme di progettazione integrata, per arrivare a soluzioni tecnologico-costruttive ottimali. Proprio per tale motivo, Urban Rigger è un sistema protetto da brevetti internazionali.

Architetture tra terra e acqua

Urban Rigger 2.0 è un nucleo abitativo galleggiante e a basso costo per studenti, costituito da 12 appartamenti realizzati all'interno di



Fig. 11 | Comunità galleggiante Urban Rigger.



Fig. 12 | Assonometria del nucleo abitativo (Design rights of Urban Rigger®).



Fig. 13 | Vista passerella d'ingresso.

container che, opportunamente aggregati e collegati fra loro, formano un insieme di residenze integrate da servizi comuni ed elementi di connessione (figura 11). Il sistema si sviluppa su tre piani,



Fig. 14 | Vista aerea del cortile centrale.

di cui due sopra il livello del mare e uno posto al di sotto, che funge da scafo di sostegno, oltre ad ospitare diversi spazi di servizio (figura 12). I due livelli superiori sono definiti da tre container per piano, articolati in una composizione triangolare per formare e inquadrare un cortile centrale. A tal fine, due scelte compositive si sono rivelate vincenti per trasformare il sistema da chiuso (triangolo) ad aperto (esagono). Primo, la decisione di distaccare leggermente gli angoli dei container posti allo stesso piano, poiché ha permesso non solo di aprire lo spazio comune centrale alla vista sull'acqua e sull'introno, ma anche di consentire una futura espansione nel tempo della comunità. Secondo, la sovrapposizione in posizione sfalsata dei container posti a piani differenti, poiché ha permesso di delimitare i cortili al centro, come cuore pulsante della comunità, garantendo allo stesso tempo costanti connessioni tra nuclei adiacenti e viste dirette verso il mare.

Il sistema galleggiante è collegato alla terraferma tramite una passerella leggera che, innestandosi nello spazio compreso tra container, termina con un portale d'ingresso definito dalle due testate dei container del piano terra e completato dal container sovrapposto al piano superiore (figura 13). Questa quinta scenica, determinata dall'articolazione stessa dei volumi, rappresenta uno spazio di compressione che introduce alla dilatazione dello spazio aperto comune, caratterizzato da un albero piantato al centro in una fioriera di legno, che funge anche da seduta per favorire la socializzazione degli abitanti (figura 14). Da qui, è possibile accedere direttamente ai 3 appartamenti di 30 m² posti al piano terra, ognuno predisposto all'interno di un container ad esso dedicato (figura 15). Per garantire un accesso senza dislivelli, il piano di calpestio è stato ribassato in corrispondenza dei container, inserendo sul lato lungo del container una griglia per consentire il passaggio senza soluzione di continuità tra l'esterno e l'interno e per lo sfogo dell'aria di scarico proveniente dal sistema di ventilazione. Lo spazio aperto interposto tra due container permette agli utenti non solo di proiettarsi visivamente verso il mare (figura 16) ma anche di raggiungerlo fisicamente, offrendo un ingresso preferenziale per fare il bagno. Inoltre, siccome il clima in Danimarca cambia drasticamente di stagione in stagione, sono state previste delle pareti mobili di vetro che all'occorrenza possono chiudere le aperture tra container creando nei mesi freddi una sorta di giardino d'inverno nello spazio

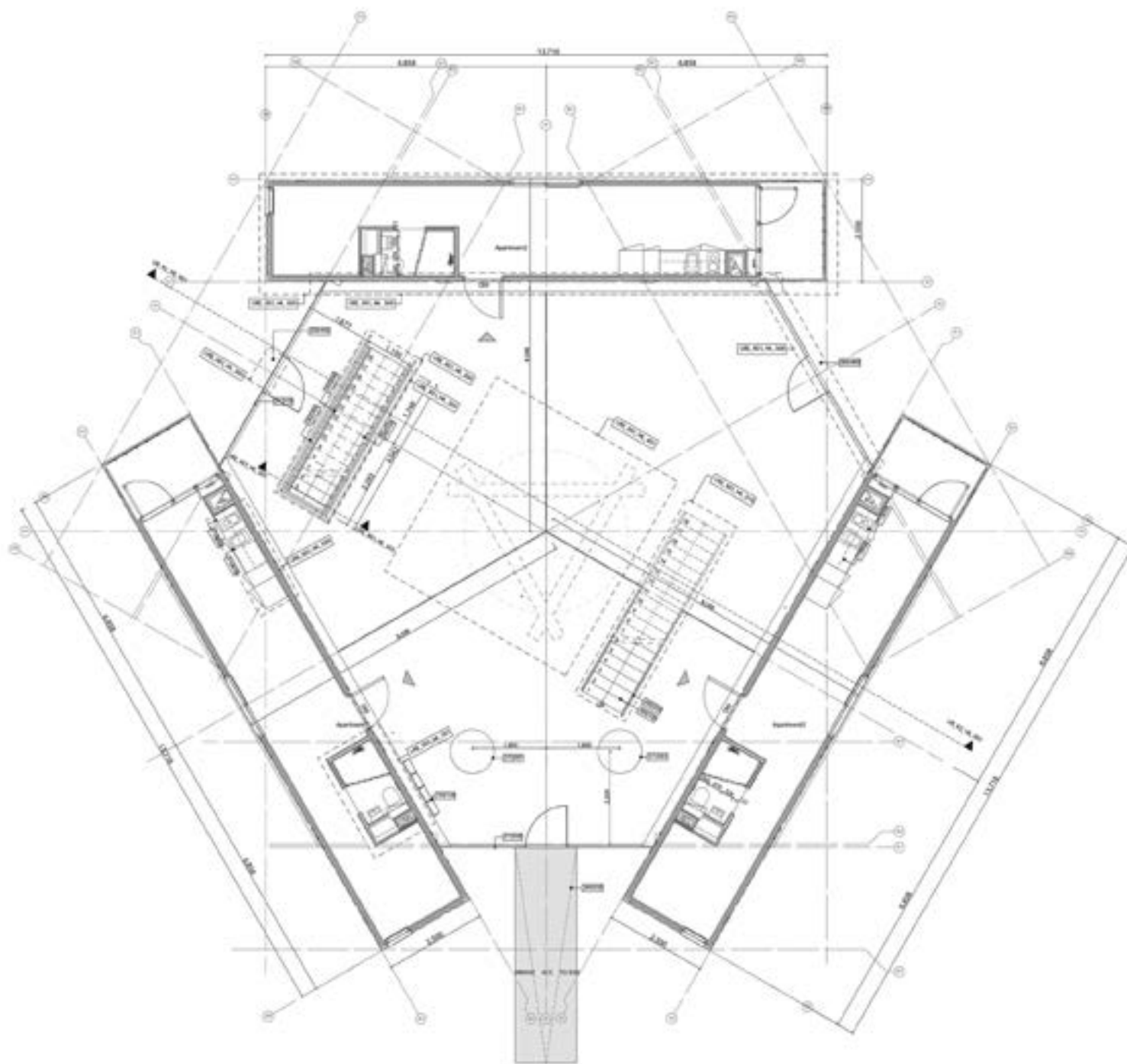


Fig. 15 | Pianta piano terra (Design rights of Urban Rigger®).

centrale comune (figura 17). In prospettiva futura, su questi varchi verranno posizionate le passerelle per accedere ad altri nuclei Urban Rigger, creando un sistema insediativo replicabile e ampliabile potenzialmente all'infinito. Dal cortile centrale, attrezzato con rastrelliere per biciclette, molo per kayak, piattaforma da bagno e area barbecue, è possibile accedere a due scale, una che conduce allo scafo posto al di sotto del livello dell'acqua e l'altra che conduce al piano residenziale superiore. Il piano inferiore contiene un locale tecnico, magazzini individuali per ogni appartamento e spazi condivisi (figura 18), tra cui una lavanderia completamente automatizzata e una grande sala comune con tv e cucina, dove i residenti possono preparare i pasti per sé stessi, per la comunità e per gli ospiti (figura 19). Invece, la scala rivolta verso il secondo

piano conduce ad un ballatoio che si sviluppa intorno alla corte centrale e che permette la distribuzione ai 9 appartamenti di 23 m² ciascuno, aggregati a gruppi di tre all'interno dei container (figura 20). Dal ballatoio parte poi un'altra scala che conduce alla terrazza comune situata sulla copertura di uno dei container, da cui si può godere di una splendida vista verso il mare e da cui si scorgono le coperture degli altri due container: una adibita a tetto verde e l'altra coperta da un impianto fotovoltaico (figura 21).

In generale, un singolo nucleo abitativo di Urban Rigger prevede un totale di 745 m² articolati in 300 m² di alloggi (12 appartamenti), 160 m² di spazio comune al piano terra, 65 m² di terrazza comune in copertura e 220 m² di spazi comuni e di servizio collocati al di sotto del livello del mare (figura 22).



Fig. 16 | Vista del mare dalla corte interna.

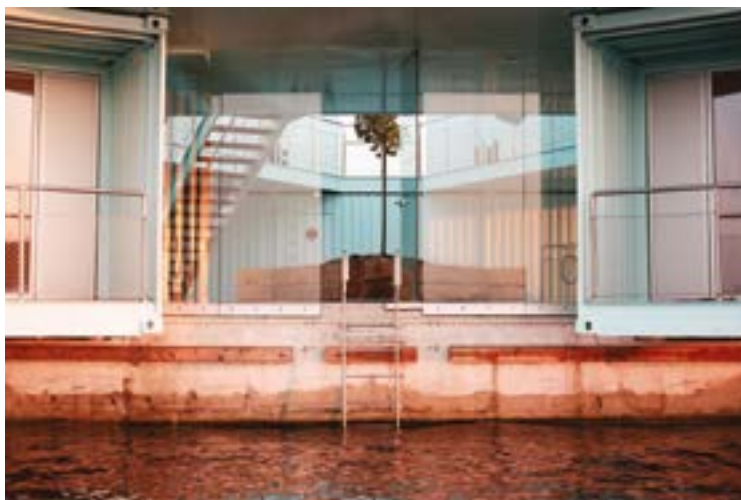


Fig. 17 | Vista della corte interna dal mare.



Fig. 18 | Spazi comuni all'interno dello scafo.

Approvvigionamento e produzione off-site

Elementi cardine del progetto sono i container che, se da un lato, rappresentano le cellule volte ad ospitare gli alloggi per studenti, dall'altro, costituiscono il sistema strutturale portante dell'intero complesso. Per rispondere alla stringente gramma di requisiti dettati dalla duplice funzione, il team di progetto ha valutato preventivamente la convenienza sia economica sia ambientale derivata dalla rigenerazione di container usati rispetto alla costruzione di nuovi container. Dall'analisi costi-benefici è emerso che la conversione di container usati in unità abitative Urban Rigger risulti assolutamente svantaggiosa, dimostrando ad esempio come la costruzione di container appositamente progettati per lo scopo consenta di dimezzare l'impronta di CO₂. Inoltre, l'utilizzo di container nuovi permette di evitare le possibili contaminazioni dell'interno, riducendo i rischi e aumentando la qualità ambientale interna. Sono state poi considerate anche barriere di carattere normativo, evidenziando come in alcuni paesi (es. Australia) ci siano regole molto rigide in materia di importazione di container di seconda mano, denotando un ostacolo alla replicabilità del progetto in contesti internazionali. Per tali motivi è stato deciso di ricorrere a container di nuova costruzione, appositamente progettati per Urban Rigger.

Le strutture in acciaio dei container sono state realizzate in Cina (leader mondiale nella produzione di container), unitamente al loro allestimento interno, eseguito sotto la supervisione di operatori di Urban Rigger (figura 23). A tal fine è importante specificare che per il progetto pilota di Copenaghen il 30% dei materiali di completamento è stato esportato direttamente dalla Danimarca alla Cina per garantire l'impiego di prodotti certificati all'interno dei container. Tale strategia, attuata in fase di sperimentazione, verrà rettificata per progetti futuri, in cui si prevede di eseguire l'allestimento nel sito di destinazione finale al fine di assicurare adeguate garanzie e soprattutto l'autorizzazione di messa in servizio.

In particolare, i container sono stati prodotti in due moduli di diverso taglio: i container singoli, che in Urban Rigger si trovano al piano terra, e i container doppi, collocati invece al secondo piano. I container singoli hanno dimensioni leggermente più grandi rispetto ai tradizionali container da 40' box (misure standard esterne: lunghezza 12,2 m, larghezza 2,4 m e altezza 2,6 m). Essi sono lunghi 13,7 m, larghi 2,5 m e alti internamente 2,3 m e contengono ciascuno un appartamento di 30 m² (figura 24). Lo spazio interno è articolato in una zona giorno e una zona notte, separati tra loro da un bagno cieco. La zona giorno include un ampio soggiorno-cucina, illuminato sul lato lungo del container da una finestra a tutta altezza a doppia anta rivolta verso il mare e sul lato corto da una vetrata con porta-finestra che permette l'accesso ad una terrazza privata di 3,5 m² sull'acqua (figura 25). La zona notte è composta da una camera da letto, adatta anche alle esigenze di una coppia e illuminata anch'essa da una finestra a tutta altezza ma ad anta singola.

I container doppi, concepiti come insieme di due moduli singoli affiancati sul lato lungo, sono sempre lunghi 13,7 m ma larghi 5 m e comprendono ciascuno tre appartamenti di 23 m² (figura 26). La scelta di costruire moduli ex-novo è stata particolarmente vantaggiosa per i container doppi, in quanto ha consentito di evitare di avere una parete resistente in senso longitudinale e di predisporre

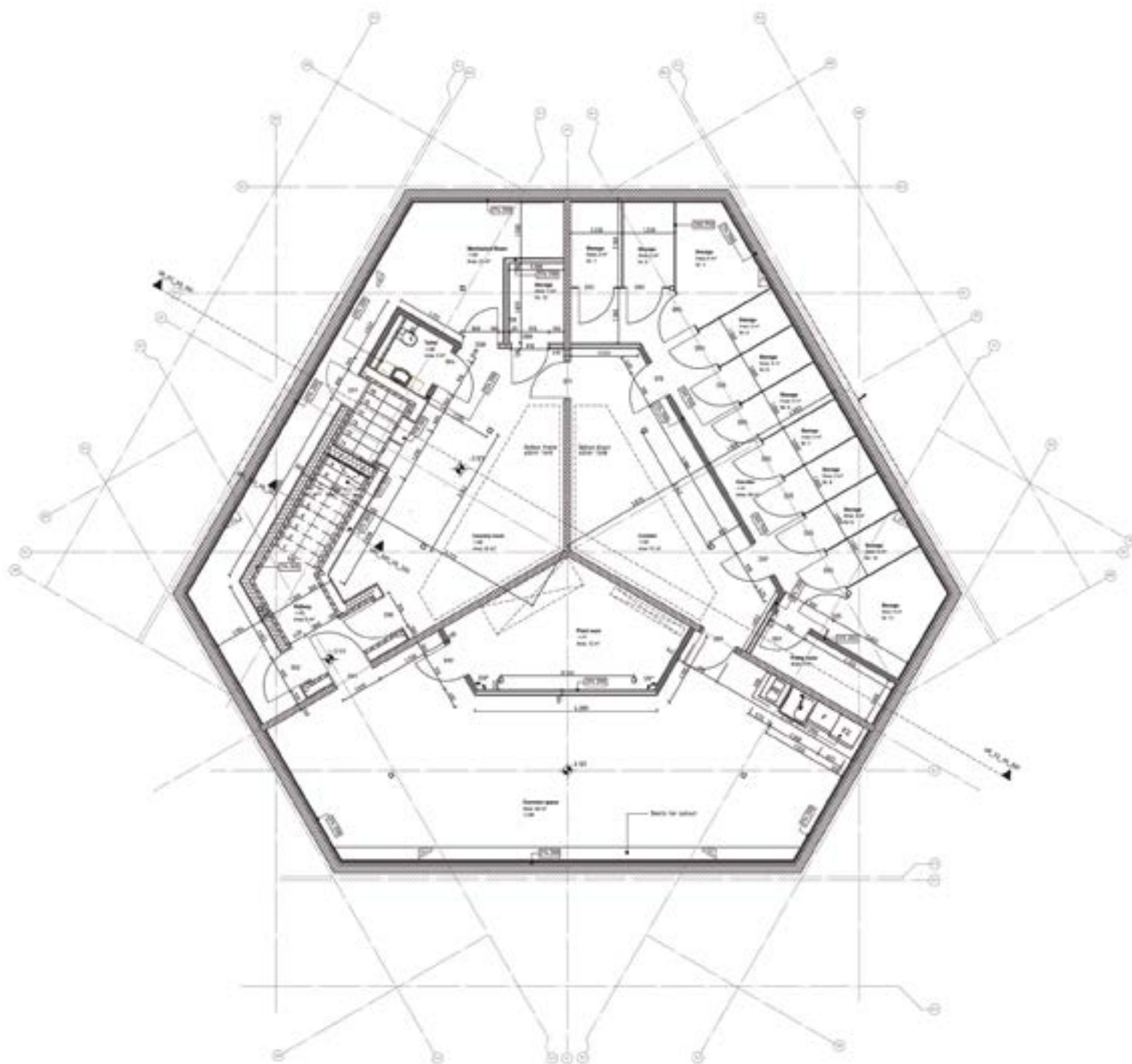


Fig. 19 | Pianta piano scafo (Design rights of Urban Rigger®).

un sistema a telaio lungo l'asse centrale (figura 27). Ciò ha permesso di realizzare i tre alloggi in sequenza, disponendo gli ingressi sul lato lungo dei container e affacciando l'appartamento in posizione centrale sul lato lungo opposto e quelli posti all'estremità sui lati corti. Ogni alloggio è organizzato come open space con angolo cottura, servito da un bagno di pertinenza di dimensioni minime e grandi vetrate rivolte verso il mare (figura 28).

Dal punto di vista tecnologico-costruttivo, i container sono stati rivestiti internamente con sistemi a secco e una serie di materiali isolanti di vario tipo, opportunamente selezionati per garantire alte prestazioni in spessori contenuti, in modo da non rinunciare a preziosi spazi abitativi (figure 29-30). La lamiera grecata (2 mm di

spessore) delle pareti e della copertura, esternamente verniciata, è stata rivestita da uno strato di isolamento PIR (5-7 cm), pannelli in poliuretano espanso rigido ad elevate capacità di reazione al fuoco. L'eccellente prestazione termica del poliuretano permette di assicurare elevati livelli di isolamento termico con spessori significativamente ridotti rispetto a quelli necessari utilizzando altri materiali isolanti, contenendo conseguentemente volumi e pesi e conferendo leggerezza al sistema. Le soluzioni di solaio e copertura prevedono inoltre uno strato isolante di lana di roccia (7-12 cm) con dei nastri di materiale espanso poliuretanico a celle miste (Sylomer) ad elevate prestazioni antivibranti e di isolamento acustico. Infine, le chiusure orizzontali e verticali dei container sono state interamen-

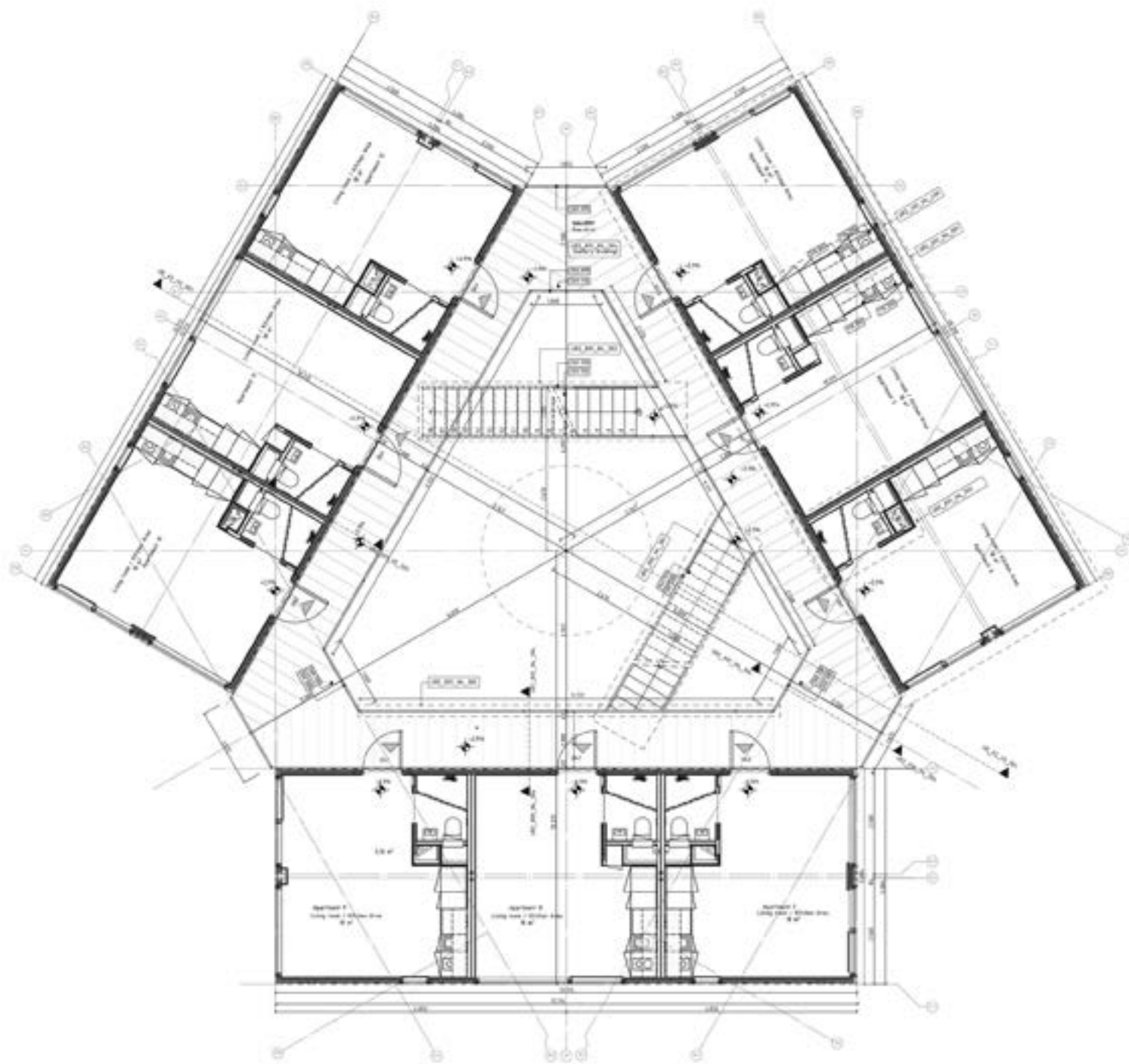


Fig. 20 | Pianta piano primo (Design rights of Urban Rigger®).

te rivestite con un sottile isolante riflettente (Aluthermo 1 cm), che costituisce una sorta di guscio a tenuta stagna contro la condensa interstiziale e le dispersioni di energia dovute alle correnti d'aria (figura 31). Si tratta di un isolante molto sottile e flessibile che, grazie all'impiego di alluminio puro, permette di riflettere il 95% del calore irradiato ed è trattato contro l'ossidazione. Tutti gli strati isolanti sono adeguatamente intervallati da intercapedini d'aria e sostenuti da profili in acciaio (dimensioni varie) e, in corrispondenza del solaio, da listelli di legno, oltre ad essere opportunamente irrigiditi con pannelli di compensato (MDF 1,5-1,8 cm). Per quanto riguarda le finiture, pareti e soffitti sono completati da una doppia lastra in gessofibra (Fermacell 1,5+1,5 cm), rivestita

solo nelle chiusure verticali da pannelli in compensato di bambù (1,2 cm) e nelle superfici interne del bagno da una lamiera in acciaio inossidabile. Invece, il solaio dei container comprende alla base una doppia lastra ignifuga in gessofibra (Fermacell Firepanel A1 1,5+1,25 cm) su un piatto di acciaio inossidabile (1 mm) pitturato, mentre sul piano di calpestio un sistema di pannelli radianti a pavimento (Danfoss speed up 3 cm) e una pavimentazione in bambù (1,5 cm).

Se da una parte le soluzioni tecnologiche sono state sviluppate da un'intensa attività di co-progettazione tra i diversi soggetti coinvolti (architetti, ingegneri e contractor) al fine di soddisfare i requisiti termici, acustici e ignifughi dettati dalle normative danesi,

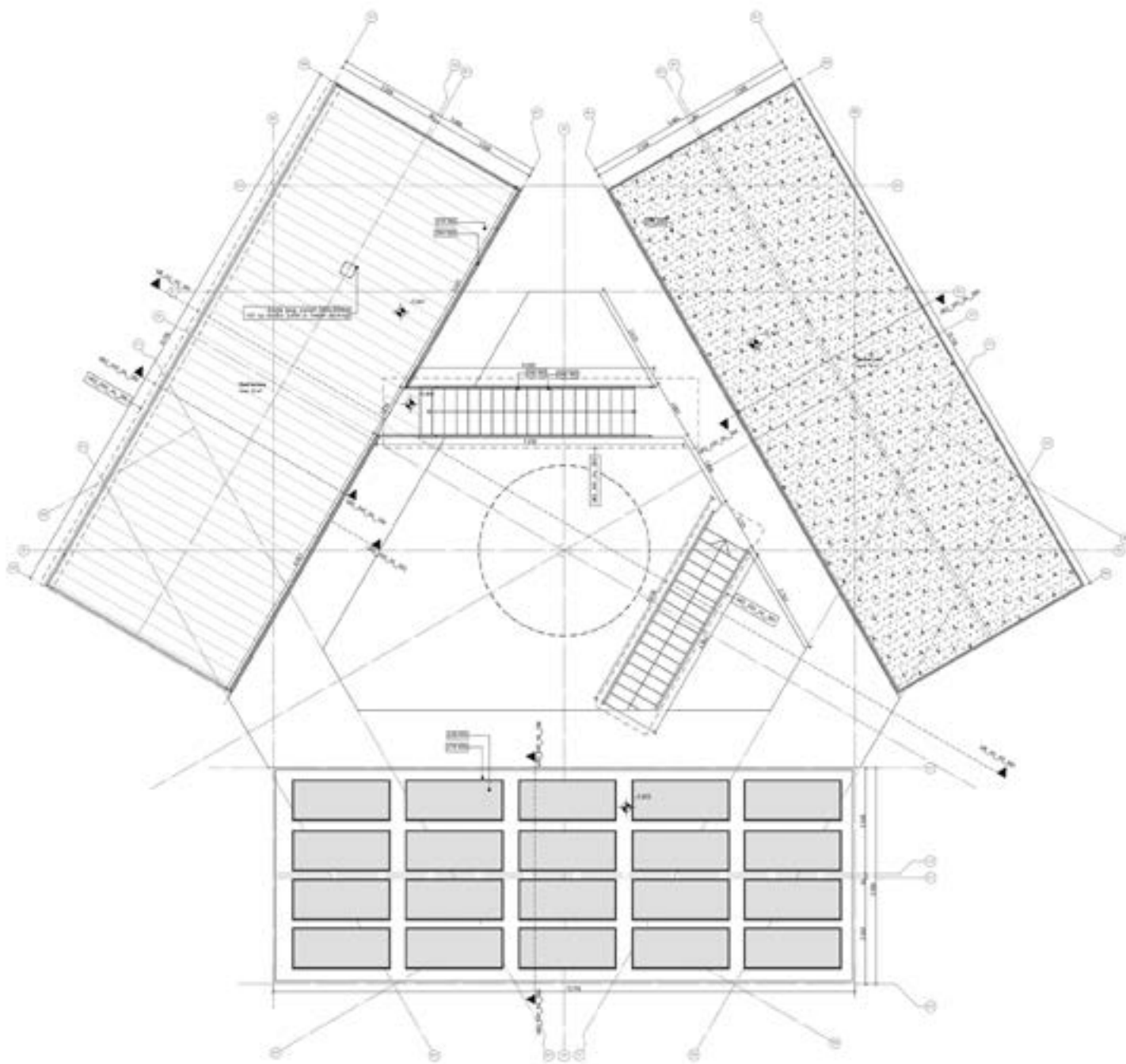


Fig. 21 | Pianta piano secondo (Design rights of Urban Rigger®).

dall'altra si sono dovute confrontare con gli standard qualitativi dei metodi di lavorazione e delle tecniche adottate in Cina. Per rispondere all'elevato livello prestazionale e garantire la qualità del progetto, è stato infatti necessario formare gli operatori locali alle specificità degli standard europei, richiedendo in alcuni casi la traduzione di alcune parti in cinese. Inoltre, il processo di produzione e assemblaggio ha imposto un'estrema attenzione ai dettagli ed è stato costantemente monitorato anche da remoto tramite sistemi di sorveglianza e di allarme atti a controllare il buon operato degli addetti nonché il loro coordinamento. Ulteriore vincolo da non sottovalutare, era il fatto che i container dovevano essere realizzati per diventare unità abitative, ma al tempo stesso essere costruiti in

conformità con gli standard di navigazione. Per questo motivo, ad esempio, le aperture delle finestre e delle porte sono state irrigidite con delle reti di rinforzo, in quanto tutto l'interno doveva essere installato prima della spedizione ad eccezione delle finestre, che sono state installate in Danimarca.

A costruzione ultimata, i container singoli e doppi sono stati sottoposti a test di varia natura, tra cui la verifica di tenuta all'aria della barriera a vapore, la verifica dei punti di connessione e la verifica della struttura per essere congrua al tradizionale trasporto dei container navali. Questa fase si è rivelata cruciale per assicurare massima qualità al fit-out dei container.



Fig. 22 | Vista aerea del nucleo abitativo.



Fig. 25 | Vista interna container singolo.



Fig. 23 | Produzione container in Cina.

Assemblaggio e costruzione on-site

Seppur basato sull'impiego di moduli prefabbricati (container), la costruzione di Urban Rigger richiede un processo estremamente articolato e complesso, che può essere completato solo grazie ad un'intensa attività di gestione, coordinamento, formazione, comunicazione e supporto tecnico. La complessità dell'intervento è spaziale, poiché si svolge in parte su terra, in parte in acqua e in luoghi diversi, prima nel bacino di carenaggio e poi in sito finale di progetto. È anche temporale, in quanto le varie logistiche richiedono grande sincronizzazione dei flussi materiali e sinergia degli operatori coinvolti, per riuscire ad ottimizzare costruzione e assemblaggio dei vari componenti in tempi controllati. Il processo può essere schematizzato in cinque fasi principali.

Trattandosi di nuclei abitativi flottanti, la prima fase di costruzione riguarda l'edificazione della piattaforma di supporto, definita come scafo (hull), in quanto assolve la funzione di galleggiamento (figura 32). Così come avviene nelle tradizionali imbarcazioni, al fine di sfruttare al massimo la spinta idrostatica sancita dal principio di Archimede, si tratta di una struttura cava al cui interno sono stati ricavati spazi praticabili per residenti (zone comuni e di servizio). Lo scafo, a pianta esagonale, è stato realizzato in calcestruzzo armato, seguendo scrupolosamente la composizione della miscela (specifiche di classe di resistenza 40, impermeabile e resistente alla salinità 40 MPa, etc.) e le linee guida definite sia per i lavori di casseratura sia per il getto, in accordo con gli standard DNV GL.

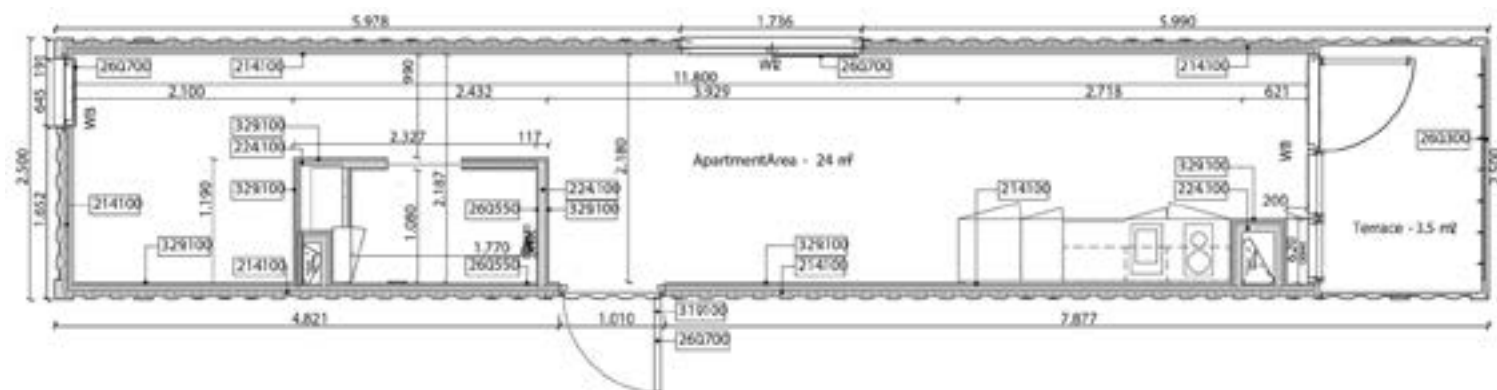


Fig. 24 | Pianta container singolo (Design rights of Urban Rigger®).

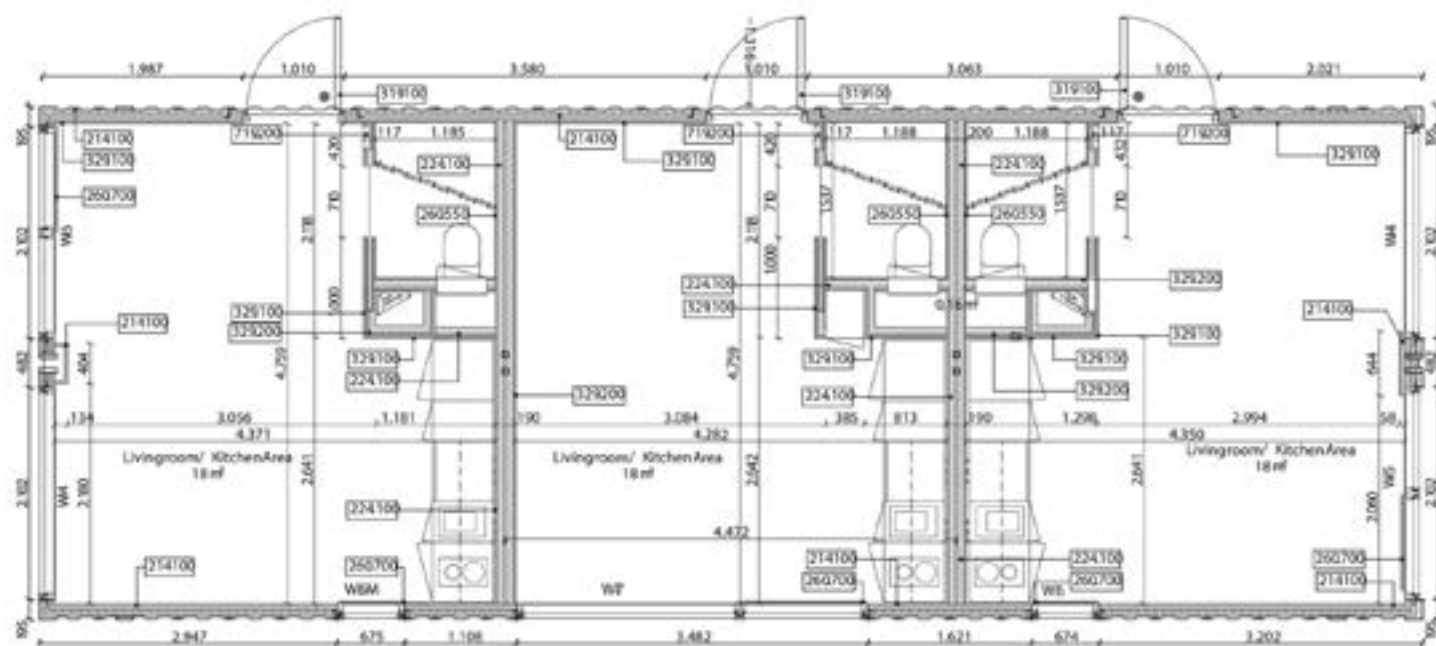


Fig. 26 | Pianta container doppio (Design rights of Urban Rigger®).



Fig. 27 | Vista struttura metallica container doppio.

Fattore determinante è che la struttura di base, ottenuta tramite un unico getto di calcestruzzo per garantire l'impermeabilità delle superfici, risulta monolitica (ponte inferiore 25 cm e pareti peri-

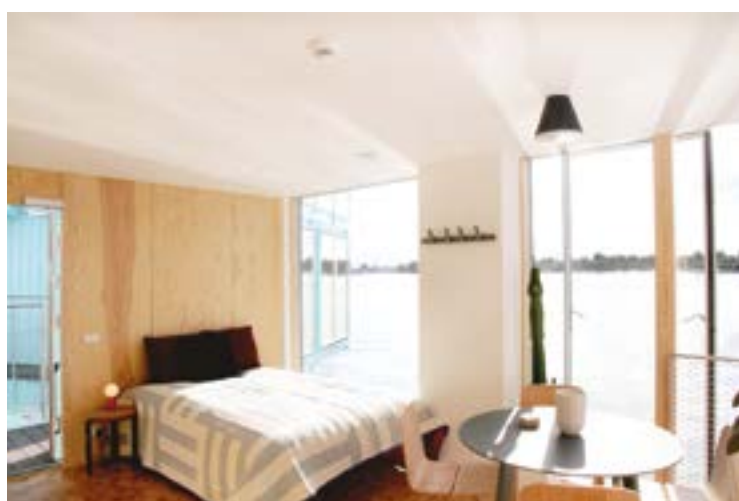


Fig. 28 | Vista interna container doppio.

metrali 20 cm di spessore). Le tre pareti interne principali, poste a raggiera per irrigidire la struttura, sono state progettate con delle aperture, in modo tale da consentire il fissaggio delle cinghie e quindi il sollevamento dello scafo tramite gru per imbarcazioni (figura 33). Per questo motivo il peso totale dello scafo (250 t senza ponte superiore) è stato dimensionato per rientrare nel carico massimo ammissibile dalle attrezzature navali, comunemente presenti nei porti. Inoltre, le casseforme predisposte per il getto del ponte superiore dispongono di fori, per permettere il passaggio delle cinghie di sollevamento fissate ai muri interni in calcestruzzo armato. Durante la seconda fase del processo di costruzione, lo scafo in c.a., inizialmente eretto sulla terraferma, viene terminato in acqua. Infatti, esso viene sollevato da gru per imbarcazioni e posto in mare (figura 34), dove vengono applicate le lastre di isolamento (facendo attenzione a ridurre i ponti termici) e gli elementi di rinforzo in acciaio prima di procedere alla colata del calcestruzzo del ponte superiore (figura 35). Come anticipato, il piano è stato rea-

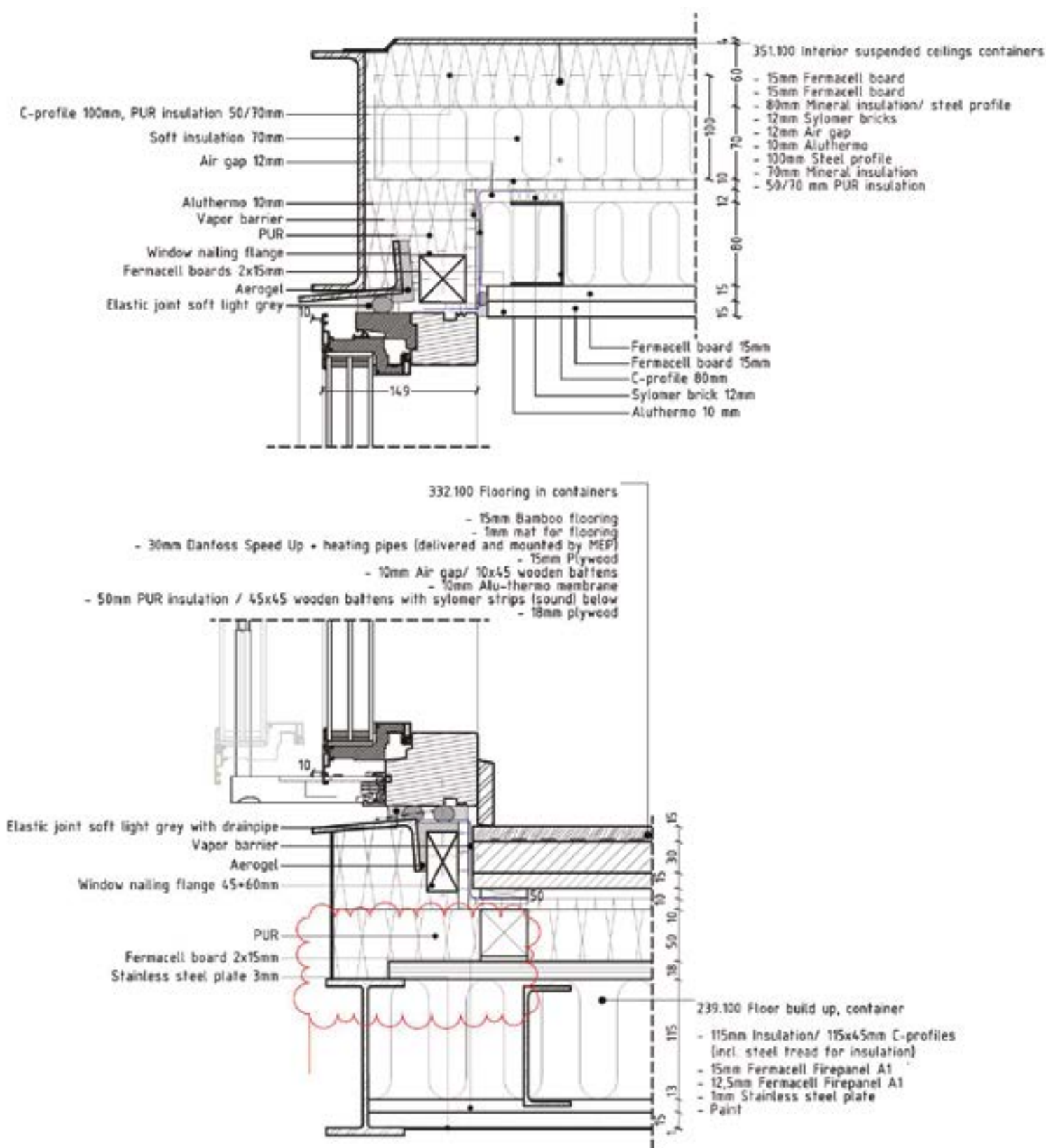


Fig. 29 | Dettaglio chiusura trasparente container (Design rights of Urban Rigger®).

lizzato su due differenti livelli: rialzato in corrispondenza del cortile centrale e ribassato in corrispondenza dei container del piano terra, per consentire un accesso senza dislivelli tra interno-esterno. L'intero processo di costruzione dello scafo è stato monitorato, controllato e verificato in modo sistematico tramite la piattaforma

digitale DOCIA, utilizzata come sistema di comunicazione tra il Contractor e Urban Rigger e come forma di collaborazione integrata per l'intera catena del valore del progetto. Essa è stata infatti impiegata dalla fase di progettazione alla fase di costruzione ma anche durante la messa in servizio e le attività di manutenzione.



Fig. 31 | Vista guscio interno container in isolante riflettente.



Fig. 32 | Costruzione scafo in calcestruzzo armato.

La terza fase di costruzione prevede il completamento a terra dei container. I container, preliminarmente prodotti e allestiti in stabilimento e trasportati via nave dalla Cina alla Danimarca (figura 36), sono soggetti a un passaggio intermedio dettato dalla configurazione del bacino di carenaggio dove sono stati eseguiti i lavori di cantiere. Infatti, la larghezza del varco d'ingresso del cantiere navale era troppo ridotta rispetto alle dimensioni della nave mercantile, così come si presentava troppo poco profonda. Per tale

motivo, i container singoli sono stati trasportati su camion dalla zona di attracco della nave al sito di assemblaggio (figura 37), mentre in container doppi sono stati caricati su una chiatta per essere trasferiti navigando direttamente nel bacino (figura 38). Una volta scaricati tutti i container sulla banchina (figura 39), vengono eseguiti i lavori di posa delle finestre (telaio in legno/alluminio), contestualmente all'installazione dei lucernari nello scafo (figura 40). Inoltre, vengono effettuate tutte le operazioni di montaggio praticabili a terra, inclusa ad esempio la cucina in modo tale da evitare la movimentazione di attrezzature pesanti su per le scale. Nella quarta fase di costruzione, i container posti sulla terraferma vengono sollevati e posizionati sullo scafo nell'acqua e successivamente completati con gli elementi distributivi e accessori (figura 41). Il principio di connessione tra container e impalcato in cemento nonché tra container sovrapposti è il tradizionale sistema *twist lock*, il collegamento meccanico comunemente utilizzato per l'ancoraggio e il trasporto di container via mare e via terra. Da notare, però, che se tale metodo risulta estremamente veloce e semplice in fase di fissaggio, richiede una precisione assoluta in fase di saldatura al container stesso (operazione avvenuta in stabilimento durante la produzione in Cina), soprattutto nel caso di Urban Rigger dove i container sovrapposti vengono montati sfalsati tra loro. Il processo d'installazione è stato estremamente rapido, considerando che dall'arrivo dei container e dello scafo all'assemblaggio dei container sullo scafo sono intercorse meno di 4 settimane. Le operazioni rimanenti comprendono innanzitutto l'assemblaggio degli elementi di distribuzione del ballatoio al primo piano e delle scale di connessione. Entrambi sono realizzati con profili in acciaio verniciati, rivestiti con una pavimentazione in assi di legno e dotati di ringhiere in acciaio inox montate con rete. Inoltre, al piano terra vengono installate le pareti di vetro della serra e piantato l'albero centrale con la panchina intorno e in copertura viene realizzato, da una parte, il tetto giardino e, dall'altra, l'impianto fotovoltaico. Infine, è stato effettuato il collegamento di tutti i sistemi impiantistici dallo scafo ai diversi appartamenti presenti nei container. Tutte queste operazioni ausiliare sono state svolte in 12 settimane (figura 42).

A questo punto comincia la quinta e ultima fase del processo. Il nucleo abitativo, nella sua versione completa, viene trasferito via acqua dal bacino di carenaggio al sito finale di progetto (figura 43). Qui viene attraccato al molo del porto e sottoposto alle procedure di *commissioning*. Il processo di ancoraggio, in particolare, ha richiesto un intenso lavoro di pianificazione e di coordinamento sinergico tra il capitano della chiatta, responsabile della movimentazione del complesso galleggiante, e quello della gru, incaricato della disposizione del sistema di ormeggio alla terra ferma (figura 44). Per questo motivo, i principali soggetti responsabili, insieme a tutto il personale annesso, sono stati adeguatamente formati in modo tale da essere preparati a ogni evenienza e a tutte le condizioni meteorologiche. Nella sua configurazione finale, il nucleo abitativo dista 6 m dalla banchina ed è posto a 5 m di distanza dai nuclei vicini (interasse di 29,5 m) (figura 45). Una volta ancorato, il nucleo Urban Rigger è stato corredato da un certificato di stazza, rilasciato dall'autorità marittima danese per attestarne la stabilità e il galleggiamento. Dato l'ingente peso di un'unità (circa 550 t) e le luci di ingombro dello scafo, il complesso è sottoposto a movi-



Fig. 33 | Costruzione pareti interne in c.a. dello scafo.



Fig. 36 | Trasporto container via mare Cina-Danimarca.



Fig. 34 | Sollevamento scafo tramite gru per imbarcazioni.



Fig. 37 | Trasporto container singoli via terra al sito di assemblaggio.



Fig. 35 | Costruzione ponte superiore dello scafo.



Fig. 38 | Trasporto container doppi via mare al sito di assemblaggio.

menti molto lenti e caratterizzato da un'elevata stabilità in acqua, che permette di garantire il massimo comfort per gli inquilini (non sono stati registrati problemi di mal di mare). È importante però

sottolineare che il sistema Urban Rigger è da dislocare in ambienti protetti dall'azione diretta delle onde del mare aperto, in quanto le strutture sono progettate per porti riparati, fiumi, laghi e baie.



Fig. 39 | Scarico container sulla banchina del bacino di carenaggio.



Fig. 42 | Operazioni di completamento dei nuclei abitativi.



Fig. 40 | Operazioni di allestimento a terra dei container.



Fig. 43 | Trasporto nuclei abitativi via mare al sito finale di progetto.



Fig. 41 | Assemblaggio container sovrapposti.



Fig. 44 | Installazione sistemi di ancoraggio alla terraferma.



Fig. 45 | Assetto finale delle comunità galleggianti Urban Rigger.

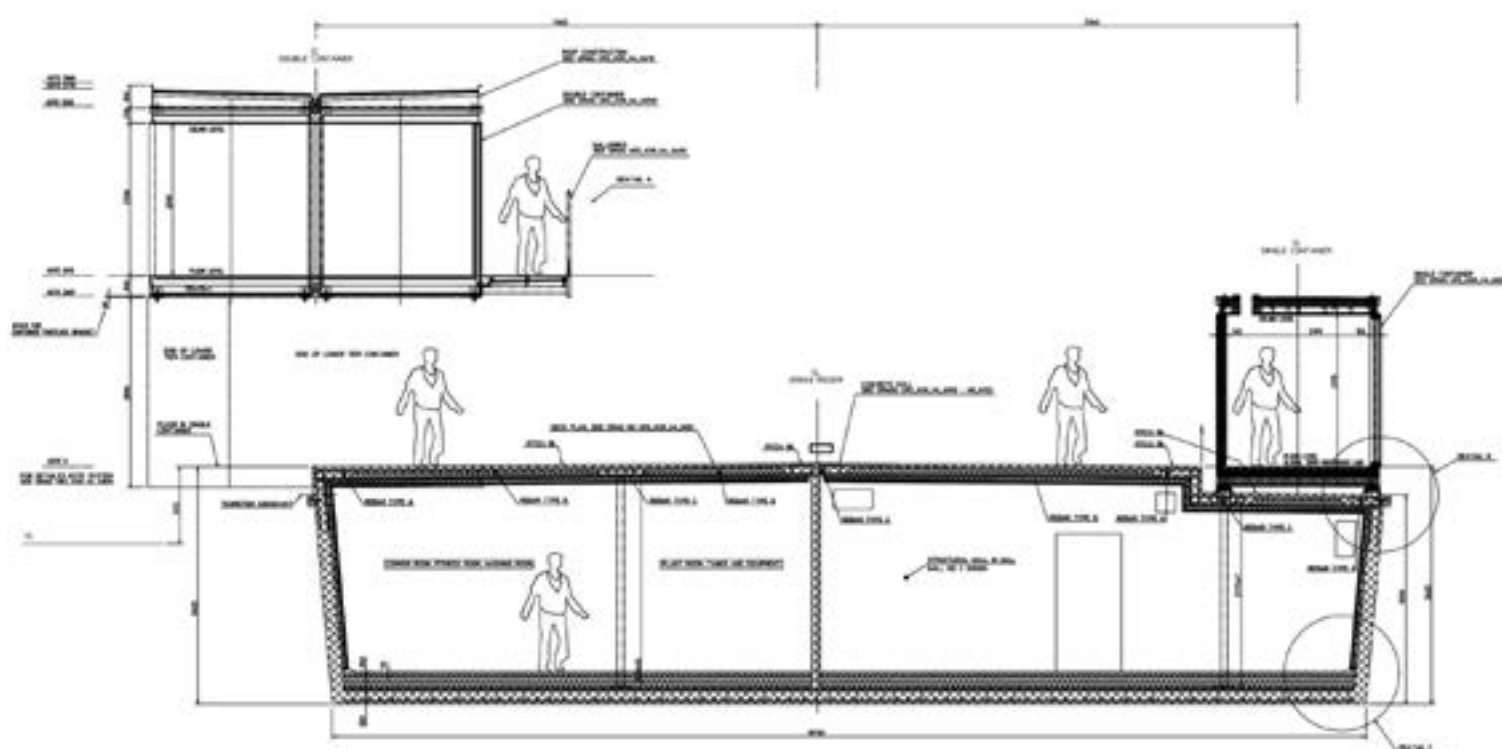


Fig. 46 | Sezione nucleo abitativo (Design rights of Urban Rigger®).

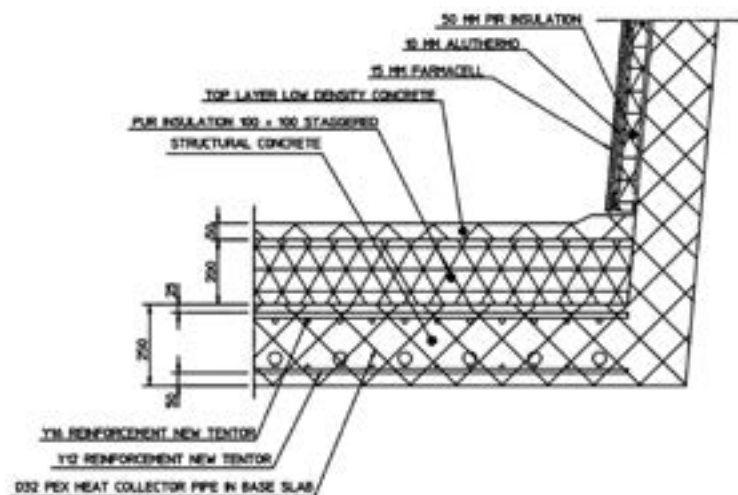


Fig. 47 | Dettaglio scafo galleggiante (Design rights of Urban Rigger®).

Sostenibilità e circolarità delle risorse

In una città, come Copenaghen, che entro il 2025 vuole essere la prima capitale europea carbon neutral e che, in quest'ottica, sta elaborando i suoi piani urbani e dando forti sostegni allo sviluppo di sistemi innovativi di produzione e approvvigionamento energetico, il tema della sostenibilità, intesa nella sua triplice declinazione, non poteva non diventare un punto cardine del progetto Urban Rigger (figura 46). La natura flottante dei nuclei abitativi offre la possibilità di utilizzare l'acqua del mare come fonte naturale di calore, sfruttandone la maggiore velocità di trasferimento rispetto all'utilizzo del terreno e la migliore efficienza, visto che l'acqua è sempre a stretto contatto con l'intero tubo. Il complesso viene pertanto dotato di un sistema di riscaldamento a fonte idrica, costituito da una serie di tubi posti nella soletta di base dello scafo e riempiti da una miscela antigelo di acqua fredda (figura 47). Poiché il calore fluisce naturalmente dai luoghi più caldi a quelli più freddi, la miscela antigelo che circola nella rete di distribuzione viene costantemente riscaldata dal calore del mare. Inoltre, per portare il fluido termovettore alle temperature desiderate, il sistema prevede una pompa di calore da 17 kW collegata alla rete elettrica, che alimenta sia il riscaldamento a pavimento presente all'interno degli appartamenti sia provvede alla fornitura di acqua calda sanitaria. Si tratta di tecnologie a basso consumo energetico (Grundfos) per riscaldamento, acqua potabile e acque reflue, in grado di immagazzinare energia ove abbondante e rilasciandola quando necessario. In questo modo esse consentono di garantire il comfort interno, limitando al contempo il consumo di energia e contribuendo all'obiettivo di Urban Rigger di ridurre al minimo la sua impronta di CO₂. Il complesso abitativo è poi integrato in copertura da un impianto fotovoltaico da 7,5 kW (Hanwha Q-cells), costituito da soluzioni tecnologiche all'avanguardia in grado di massimizzare la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile. La combinazione di pannelli fotovoltaici e pompa di calore, consente di soddisfare la domanda di riscaldamento tramite l'impiego di soli 4

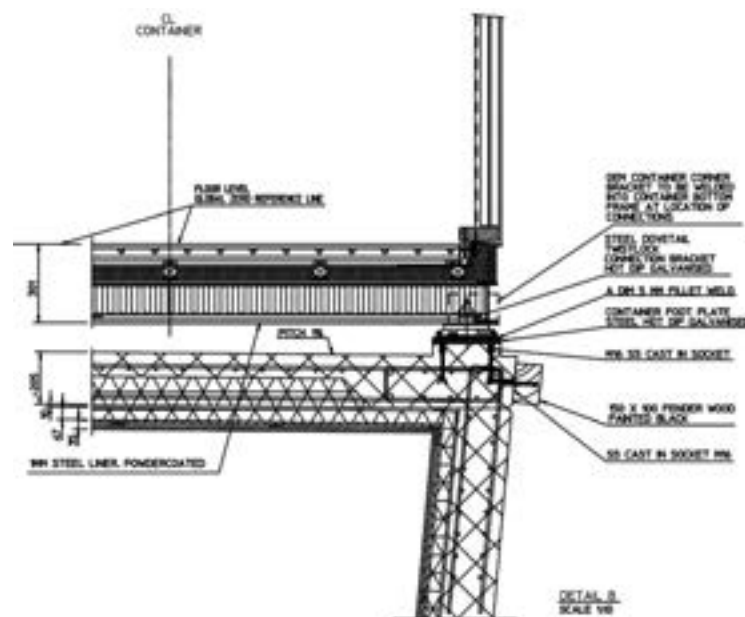


Fig. 48 | Dettaglio sistemi a umido scafo e sistemi a secco container (Design rights of Urban Rigger®).

kW di elettricità, riducendo le emissioni dell'81% rispetto al riscaldamento convenzionale ottenuto da gas naturale, elettricità da rete nazionale o petrolio come fonti di riscaldamento. In questo modo, Urban Rigger risulta conforme ai requisiti energetici previsti dal regolamento edilizio danese (BR15), raggiungendo gli standard di casa passiva. Tutte i nuclei galleggianti sono comunque collegati a terra per l'allaccio alla rete di approvvigionamento idrico, per la gestione delle acque reflue e per l'alimentazione elettrica. Per quanto riguarda le tecniche e i materiali, il progetto è caratterizzato da una duplice natura, che condiziona l'intero ciclo di vita in modo significativo (figura 48). Sotto il livello del mare, è costituito da sistemi costruttivi tradizionali a umido, effettuati in sito per la realizzazione dello scafo in calcestruzzo armato (durata prevista almeno 100 anni). Sebbene sia stato dimostrato che, in fase d'uso, lo scafo favorisce la biodiversità marina (cozze e cirripedi crescono sulle superfici), questa tecnica impedisce il recupero a fine vita dei materiali, che diventano inevitabilmente rifiuto. Al contrario, sopra il livello del mare, il complesso abitativo è realizzato con sistemi a secco, declinati in container prefabbricati (durata prevista 60 anni) e strutture leggere, assemblati tra loro in cantiere. Qui, l'uso dell'acciaio e di soluzioni tecnologiche leggere consente di ottenere una costruzione reversibile, in cui ciò che è stato assemblato può essere all'occorrenza disassemblato, offrendo enormi potenzialità. In fase di servizio, le parti danneggiate possono essere facilmente smontate per essere sostituite e/o rigenerate, in funzione del valore e delle prestazioni residue. In questo modo, se da una parte è possibile estendere la vita utile delle risorse impiegate, dall'altro è possibile mantenere nel tempo elevati standard qualitativi alle residenze per studenti. Nello specifico, in fase di servizio, i container possono essere rinnovati o essere trasferiti in altro luogo per creare configurazioni diverse, sia su acqua sia su terra, sfruttando le caratteristiche di modularità. A fine vita, è possibile recuperare i singoli componenti costruttivi, per destinarli a un completo riuso o a successivi processi di riciclo.

In questa prospettiva, Urban Rigger può essere considerato come una riserva di materiali (*Buildings As Material Banks*), che diventano risorse per una seconda vita, per un nuovo ciclo d'uso e/o processo produttivo in ottica di economia circolare.

Urban Rigger 2.0 rappresenta un'architettura galleggiante simbolo di sostenibilità, di benessere e di armonia, conseguita tramite una connessione diretta e costante con l'acqua. Acqua che diviene sempre più parte integrante del costruito e, al contempo, sfondo scenico e nuovo spazio di sviluppo urbano. La linea di confine, che tipicamente separa in modo netto l'acqua dall'ambiente costruito, grazie al progetto, viene destrutturata e dissolta, creando una commistione tra natura e attività antropiche. Modularità, scalabilità e replicabilità dei nuclei abitativi offrono infinite possibilità di espansione edilizia, amplificata ulteriormente dall'uso di sistemi

a secco prefabbricati. La valenza del progetto è tale che si sta già lavorando a Urban Rigger 3.0, versione potenziata a 18 appartamenti. Innovazione, tecnologia e sostenibilità rendono questa soluzione abitativa galleggiante estremamente affascinante e proiettata verso il futuro.

Ringraziamenti

Si ringrazia per le informazioni di progetto e la documentazione tecnica Peter Mayntzhusen, responsabile del progetto e delle operazioni di Urban Rigger ApS, e lo studio di architettura Bjarke Ingels Group.

Riferimenti bibliografici

- [1] BR15, 2015. Danish Building Regulations 2015.
- [2] Endangsih, T., 2020. Floating Houses Technology as Alternative Living on The Water. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 797(1).
- [3] Habibi, S., 2015. Floating building opportunities for future sustainable development and energy efficiency gains. Journal of Architectural Engineering Technology, 4(2).
- [4] Urban Rigger, 2017. Visionary architecture uses water as energy source, with Danfoss solutions. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=rCTtRk_CiqE
- [5] Urban Rigger, 2019. The future is floating. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=eGJlWmGmrY8>
- [6] Urban Rigger, 2020. Urban Rigger 2.0. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=rdwcknI1Xlc>

Credits

Anno: 2019

Luogo: Copenhagen, Danimarca

Committente: Urban Rigger ApS

Progetto architettonico: Bjarke Ingels Group – BIG

Progetto strutturale: Jesper Dirk Andersen

Soluzioni pompe e sistemi idrici: Grundfos

Soluzioni meccaniche ed elettroniche: Danfoss

Soluzioni fotovoltaiche: Q-Cells

Soluzioni isolanti: Aluthermo



Anna Dalla Valle. Architetto, PhD e assegnista di ricerca presso il Dipartimento ABC del Politecnico di Milano. Si occupa di sostenibilità ambientale e di ottimizzazione delle risorse in ottica di economia circolare nel settore delle costruzioni.

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 congelamenti 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

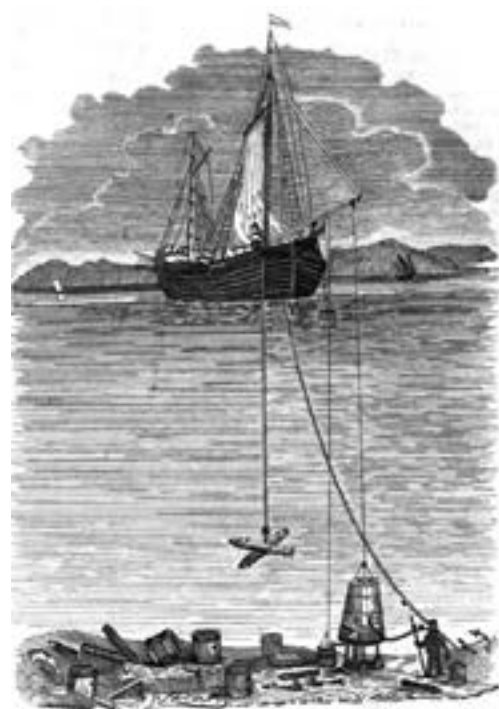


Fig. 2 | "Campana da palombaro": recupero di merci affondate in mare (Torelli, 1840).

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 suo 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 Chalonnes 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

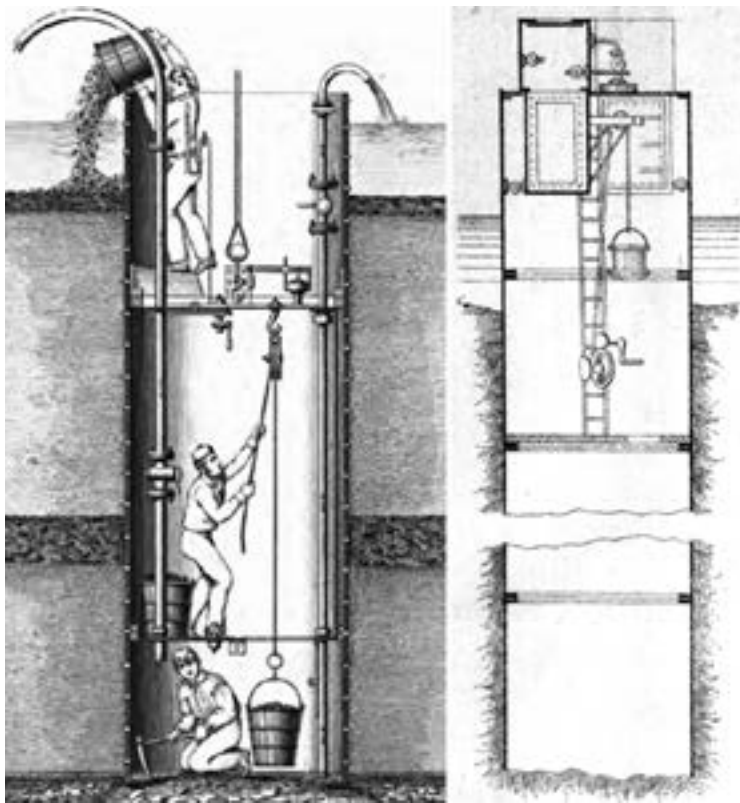


Fig. 3 | Tubo di lamiera di ferro progettato da Jacques Triger per estrarre
Fig. 4 | Fondazione pneumatica: la camera di equilibrio sulla sommità del tubo
(Bruno, 1892).

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].

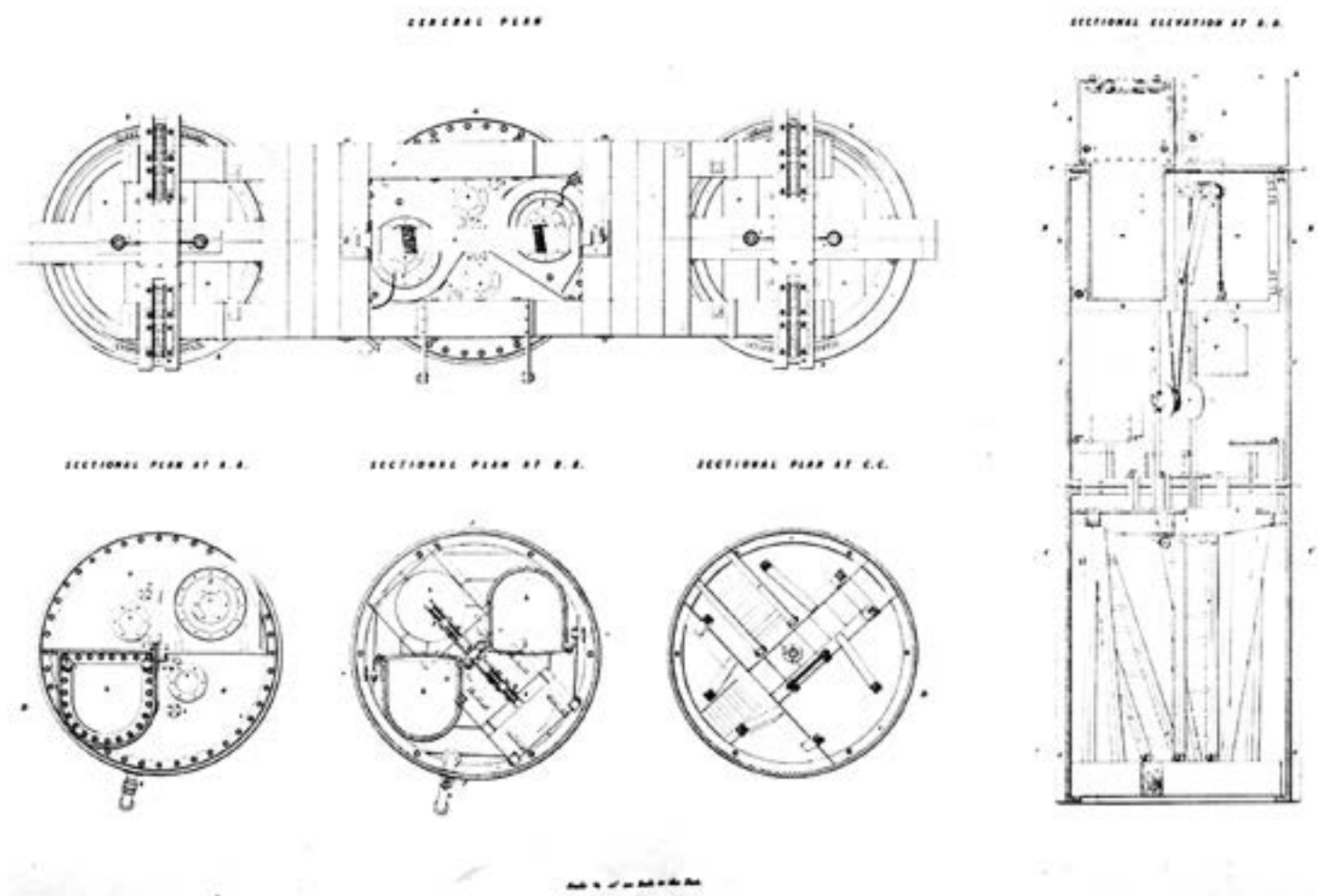


Fig. 5 | Fondazioni tubolari progettate da John Hughes per il ponte sul fiume Medway a Rochester (Hughes, 1859).



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

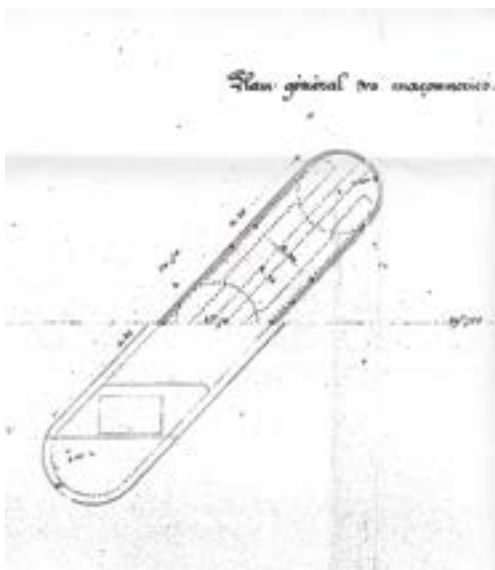


Fig. 8 | Ponte a Cruet: dettaglio costruttivo delle fondazioni tubolari (ACN&P).



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).

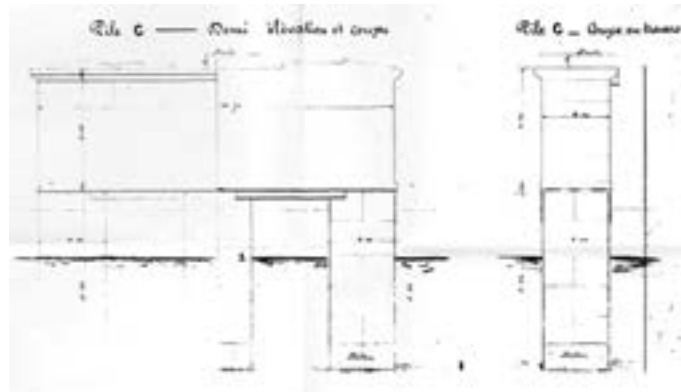


Fig. 11 | Ponte a Cruet: tubi in ghisa impiegati nelle fondazioni pneumatiche progettate da George Neumann (ACN&P).

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 circoscrive 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).

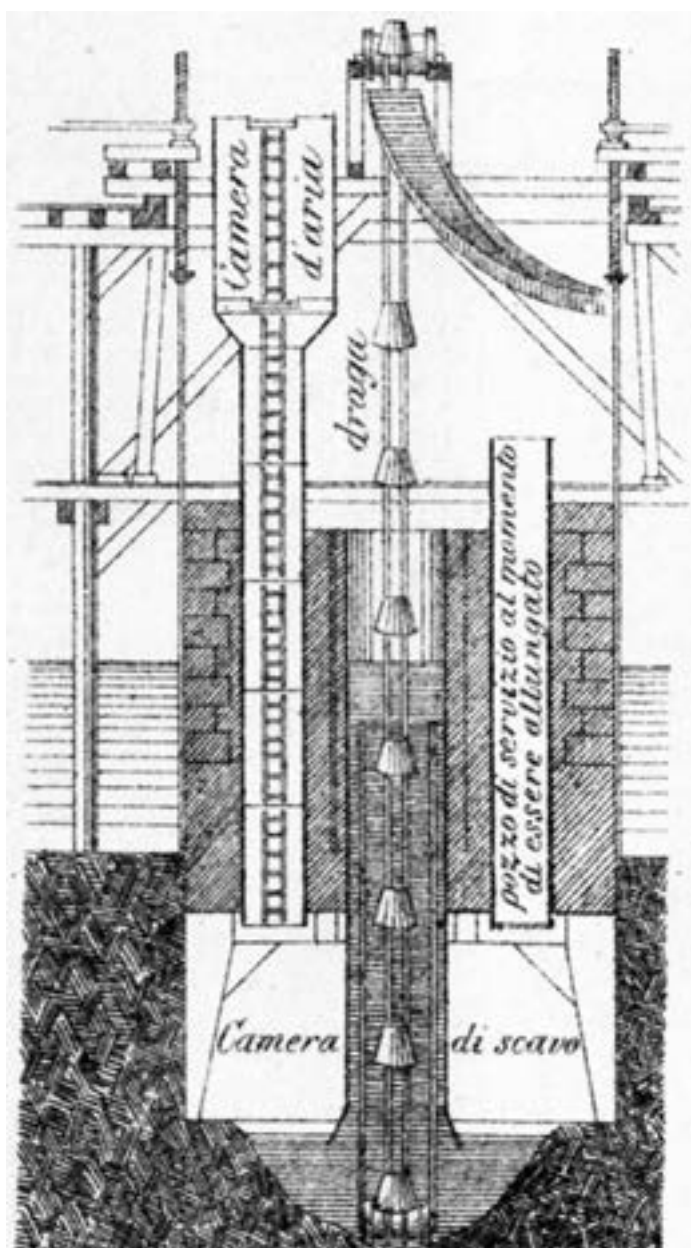


Fig. 16 | Ponte a Kehl: fondazioni pneumatiche a cassone messe a punto dall'ingegnere Fleur St. Denis e specializzazione dei "camini" soprastanti la camera di lavoro (Bruno, 1892).

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

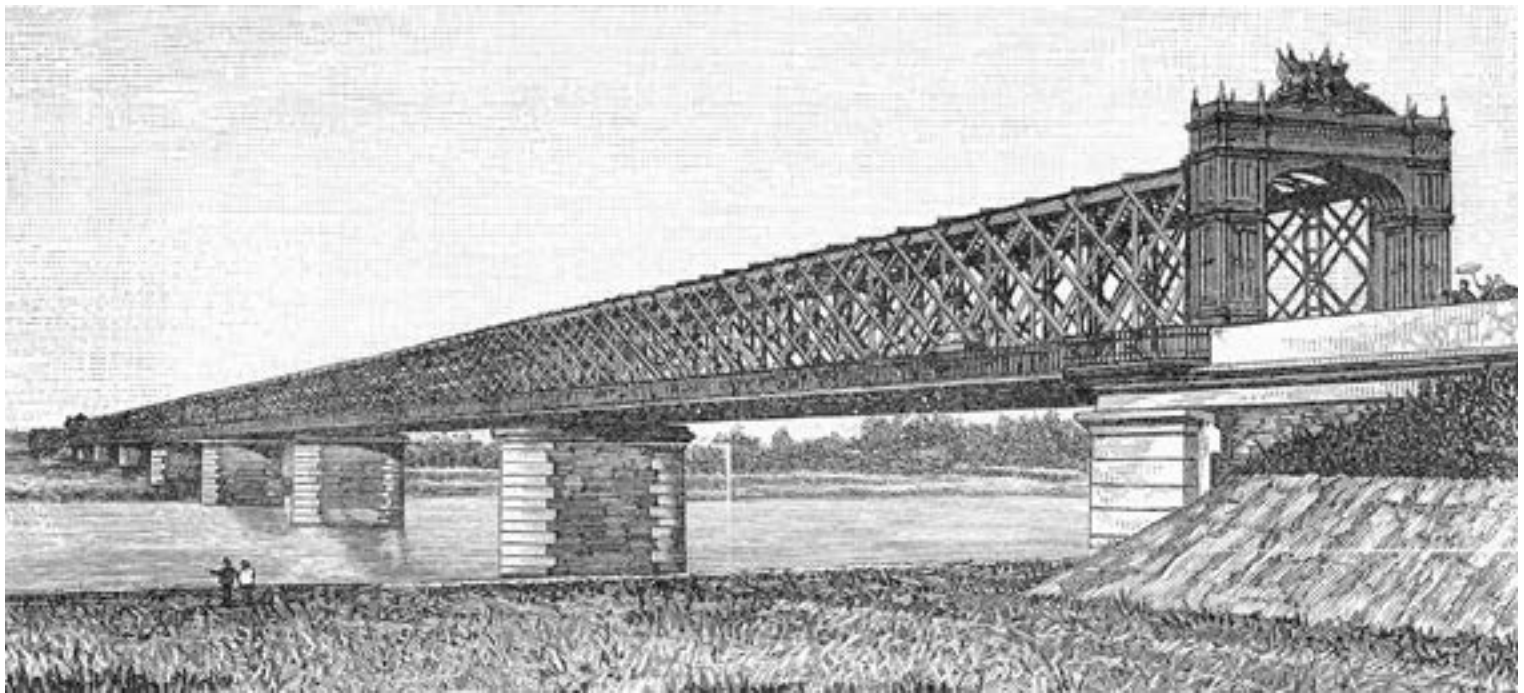


Fig. 17 | Ponte ferroviario sul fiume Po a Piacenza (Strafforello, 1902).

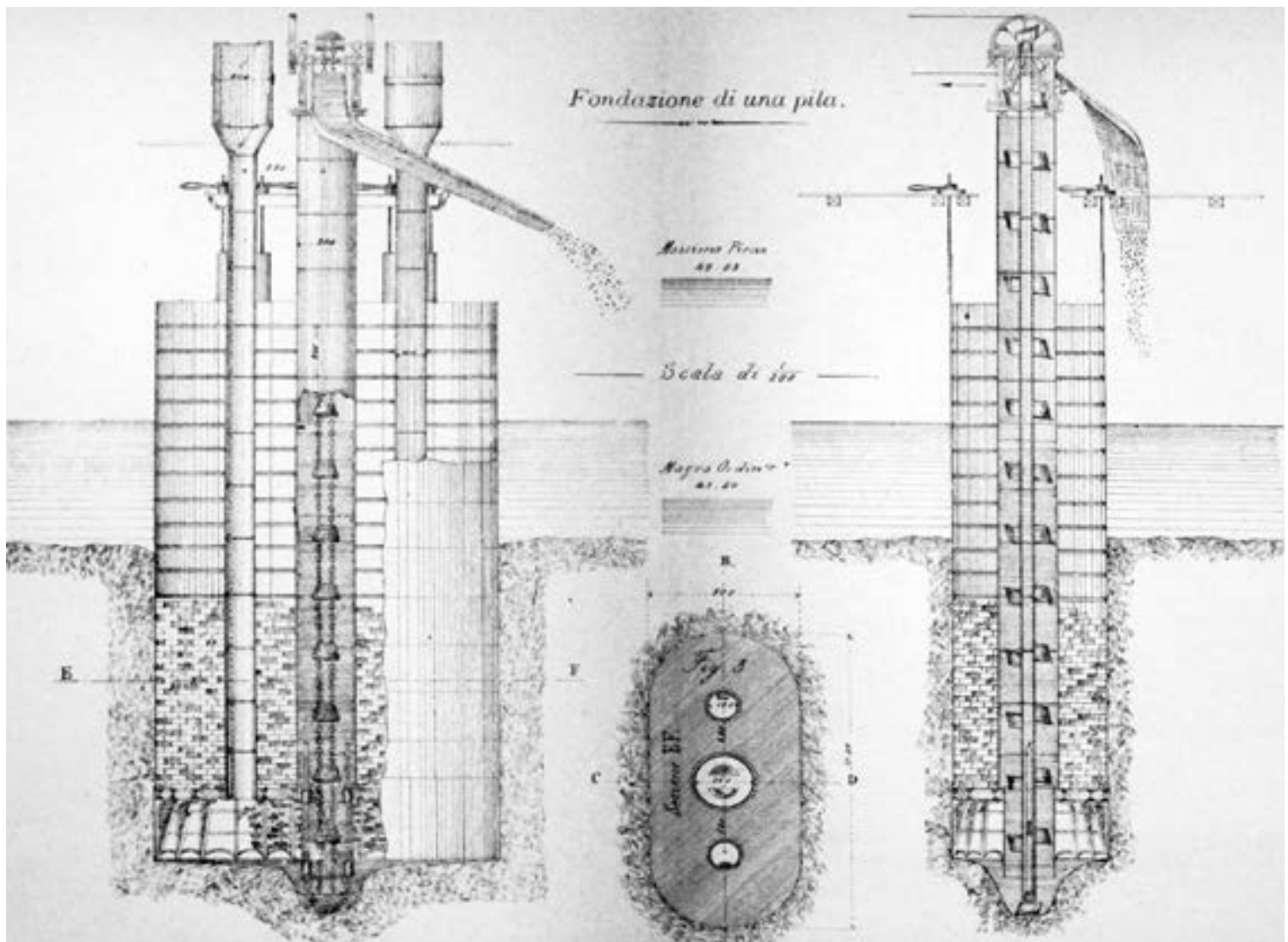


Fig. 18 | Ponte a Piacenza: tavola illustrativa dell'affondamento del cassone e della costruzione della pila (Biadego, 1886).

tagliente 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

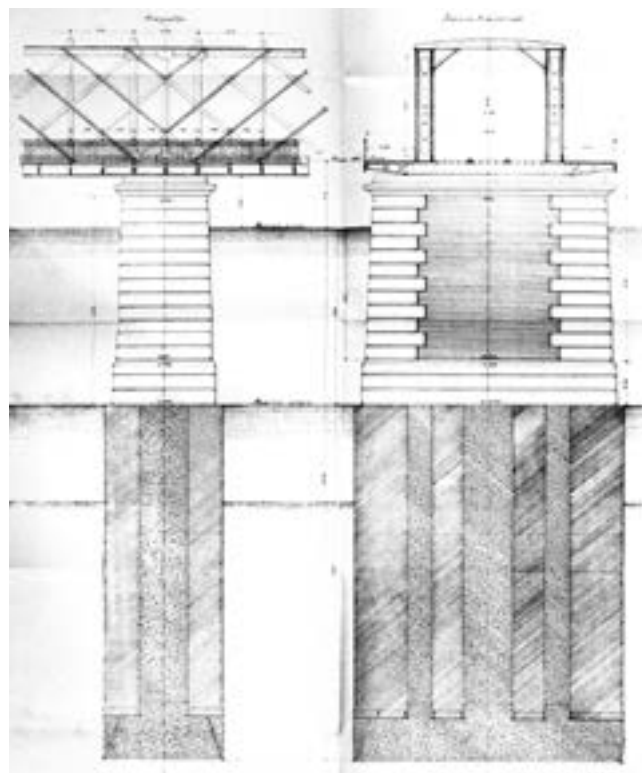


Fig. 19 | Ponte a Piacenza: dettagli costruttivi della struttura in ferro del cassone (Biadego, 1886).

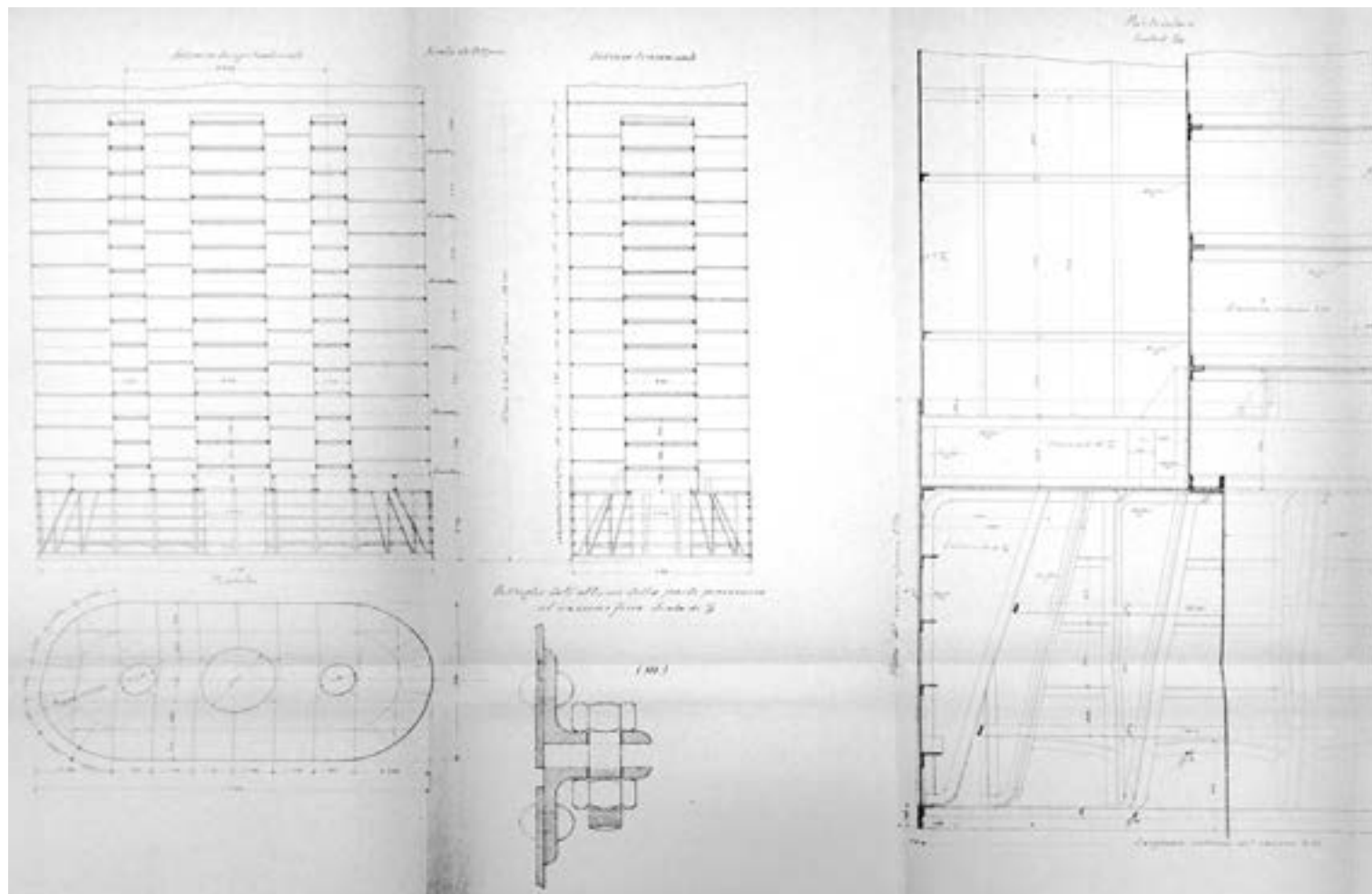


Fig. 20 | Ponte a Piacenza: dettagli costruttivi della struttura in ferro del cassone (Biadego, 1886).

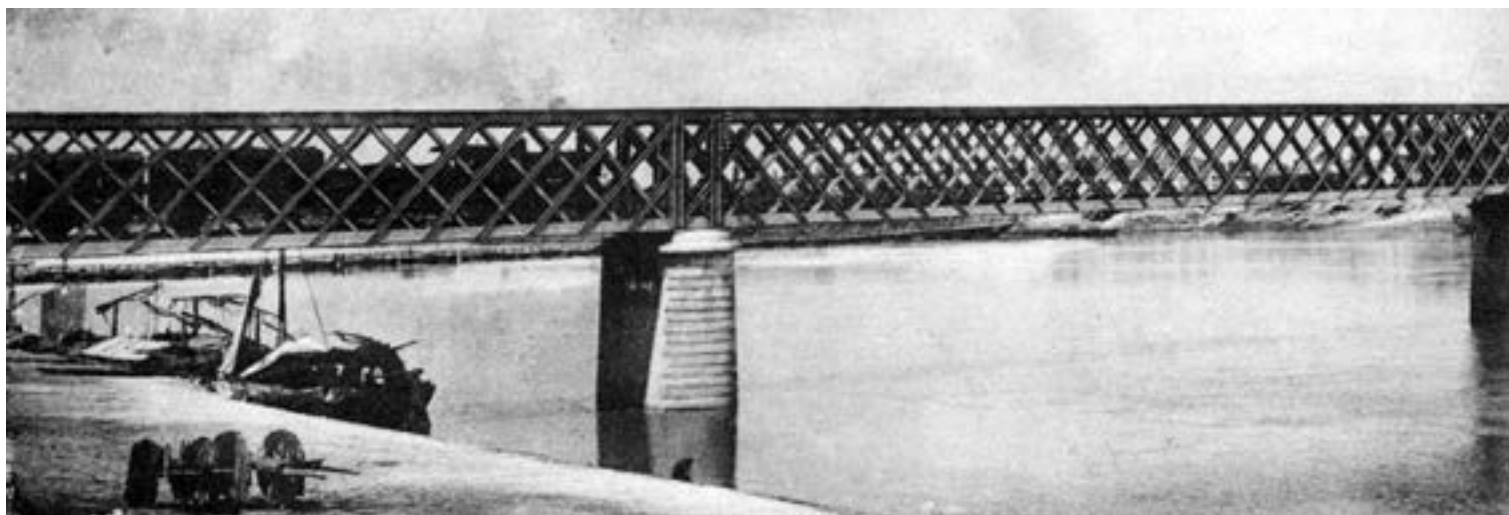


Fig. 21 | Ponte ferroviario sul fiume Po a Pontelagoscuro (Cartolina d'epoca - Prampolini, 1902).

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

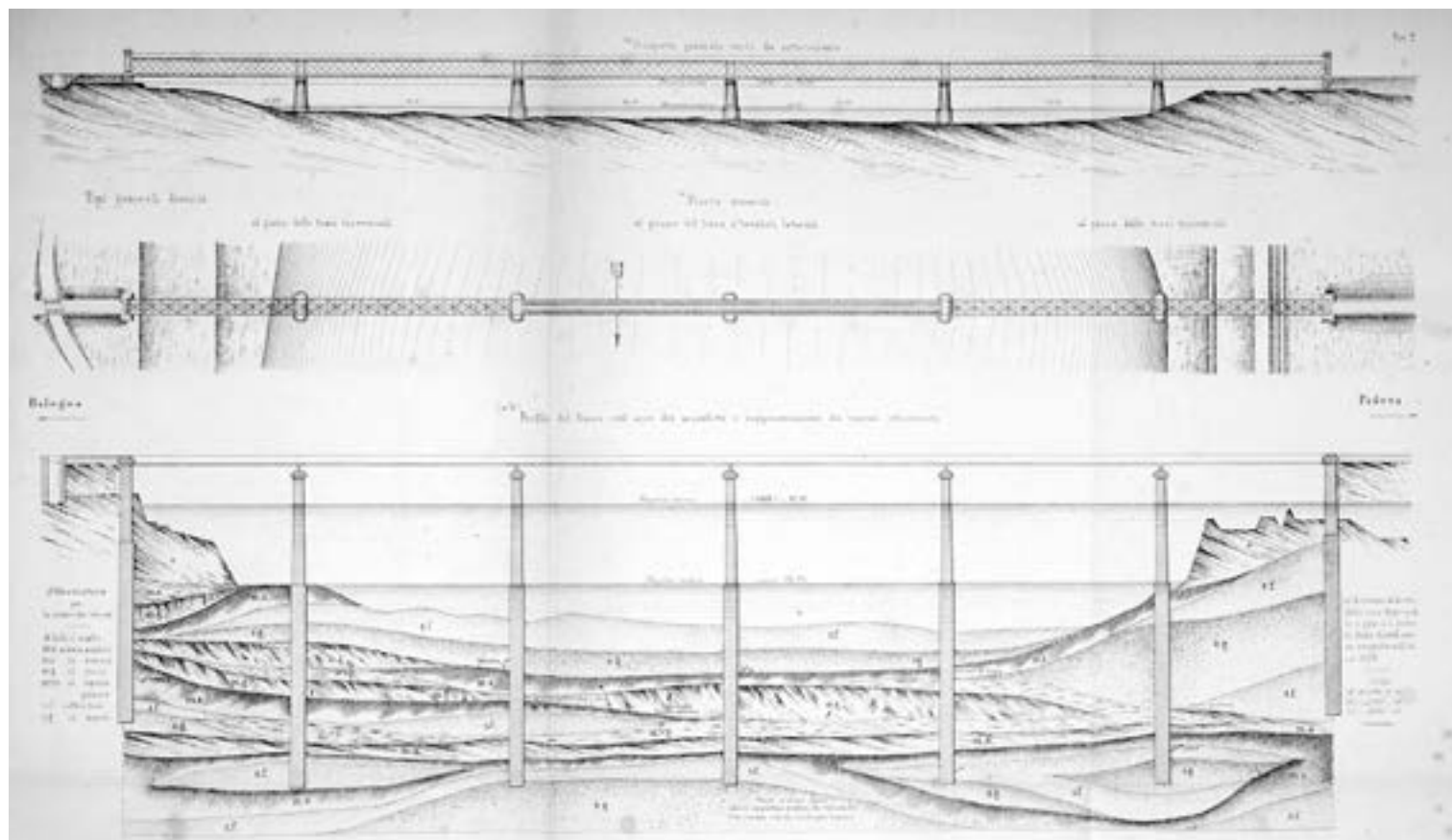


Fig. 22 | Ponte a Pontelagoscuro: tavola di progetto con indicazione della profondità delle fondazioni pneumatiche e stratigrafia del terreno (Ratti, 1876).

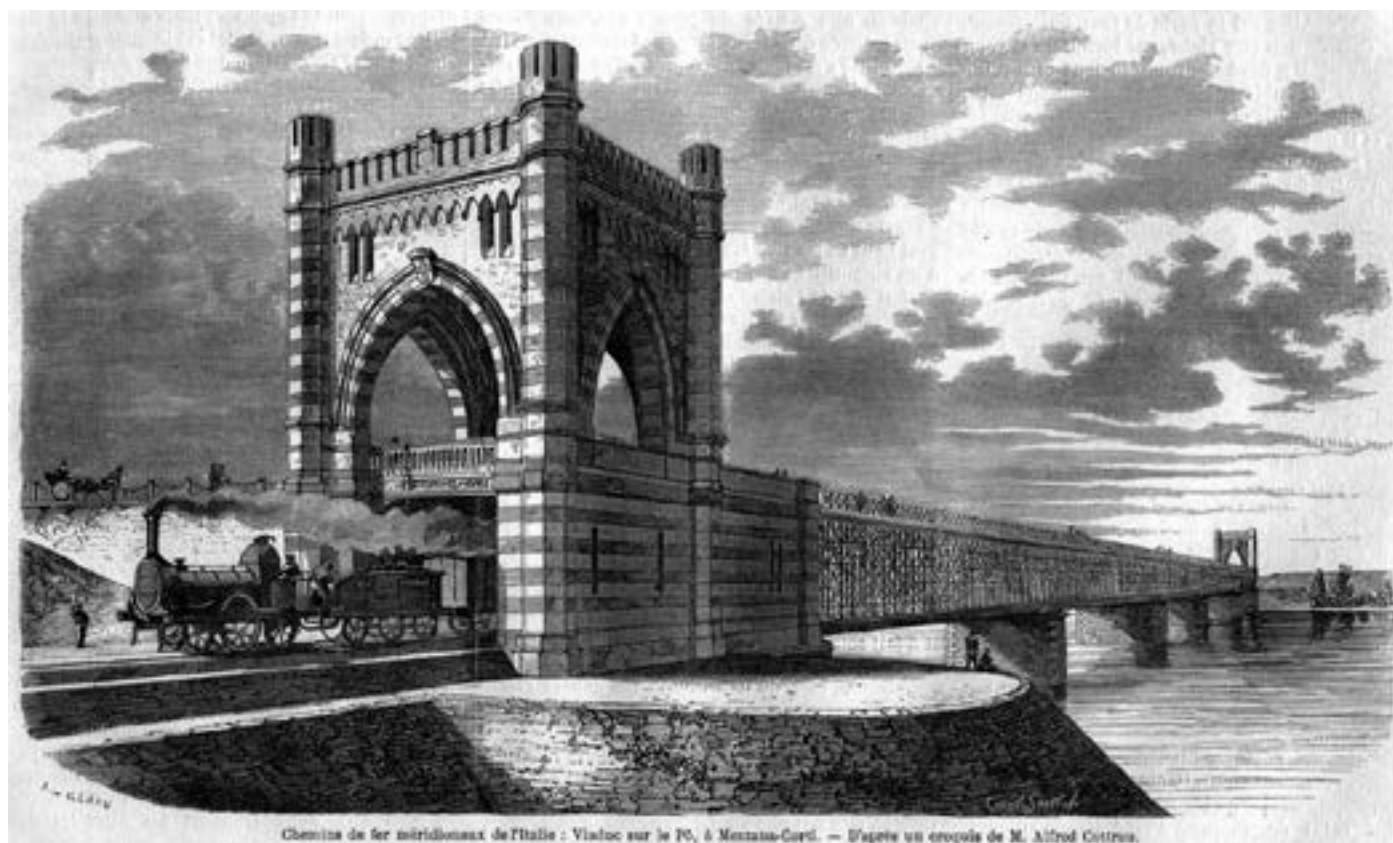


Fig. 23 - Ponte ferroviario sul fiume Po a Mezzana Corti (Illustrazione d'epoca - Cosson, Smeeton et Cie, 1866).

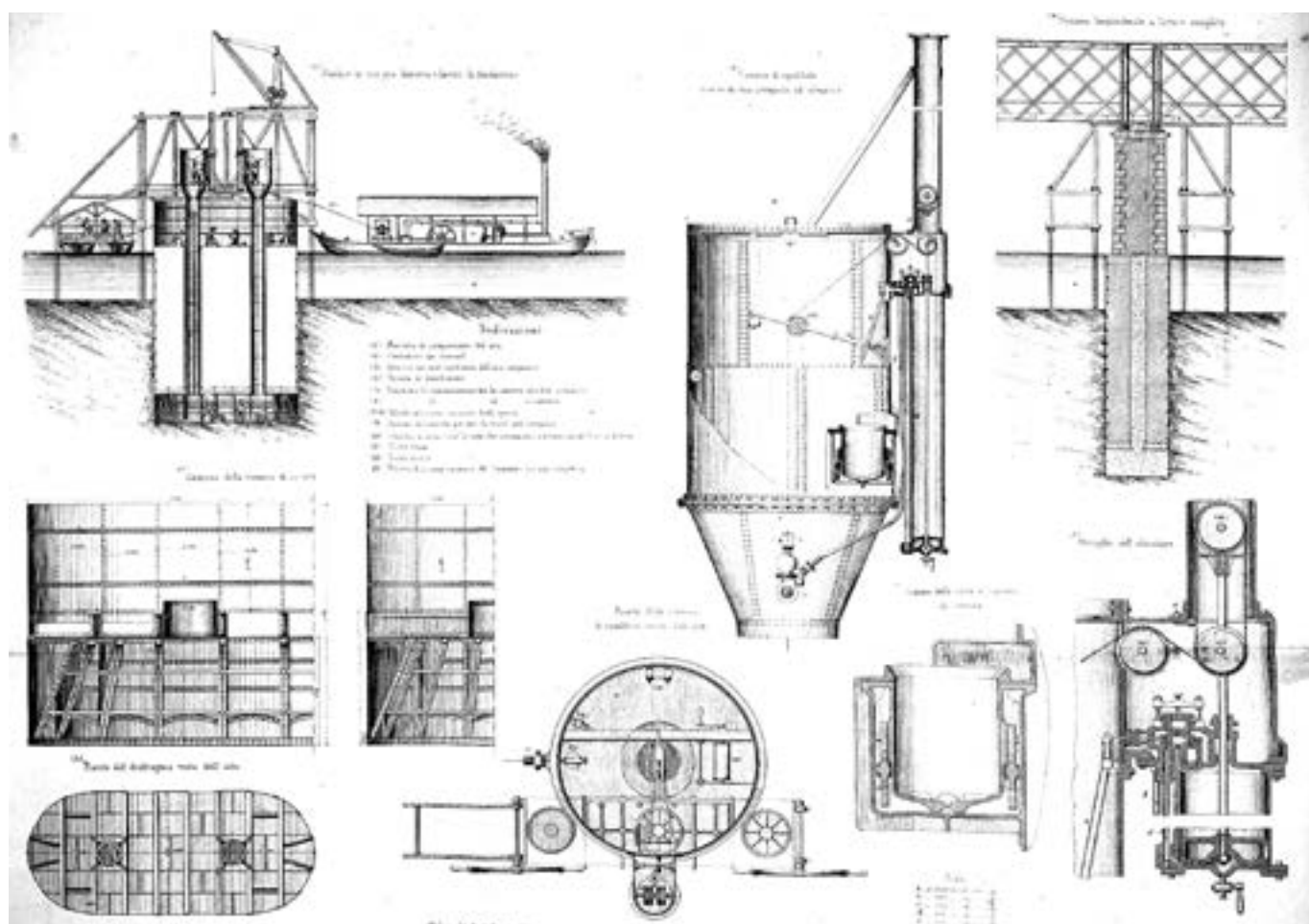


Fig. 24 | Ponte a Pontelagoscuro: tavola illustrativa dell'affondamento del cassone e della camera di equilibrio progettata dall'ingegnere Moreaux (Ratti, 1876).



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

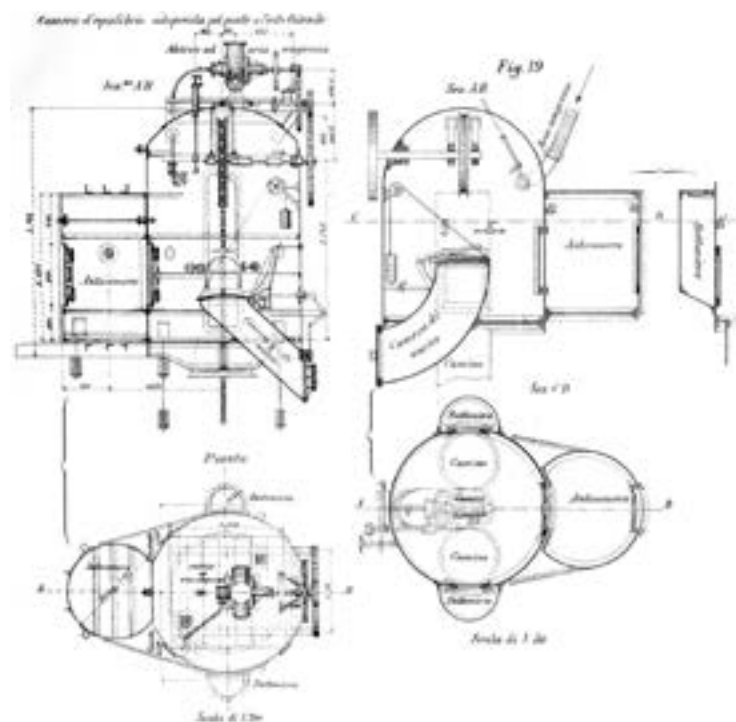


Fig. 26 | Ponte a Sesto Calende: camera di equilibrio progettata dalla IIICM (Bruno, 1892).

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 scompenso 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-

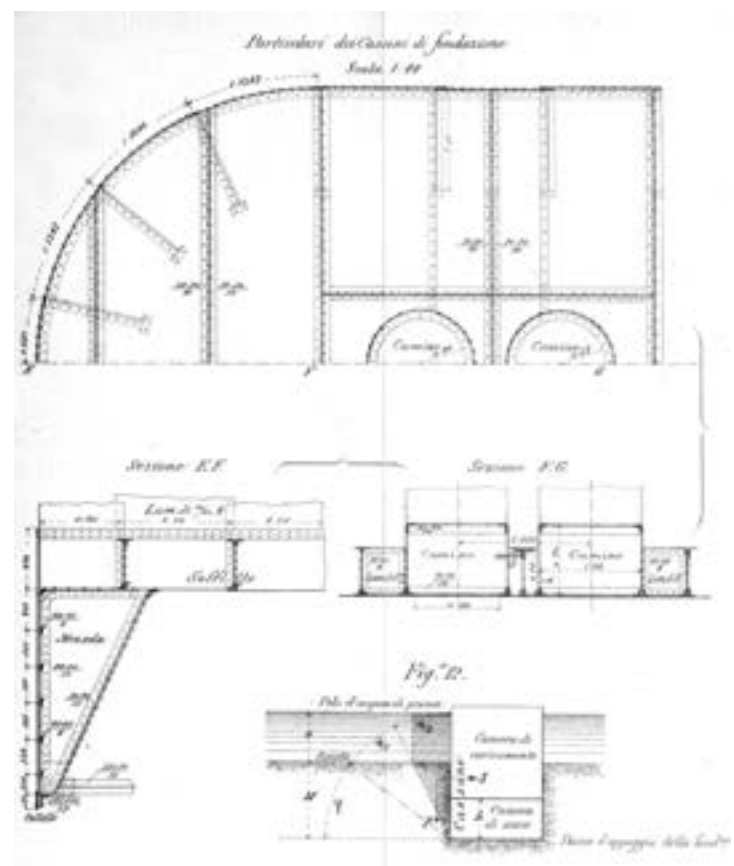


Fig. 27 | Ponte a Sesto Calende: dettagli costruttivi della struttura in ferro del cassone (Bruno, 1892).

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, *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.
- [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. Gouin, *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. Province 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 Savoisienne 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 Negroni 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.

L'interoperabilità tra BIM Strutturale e software FEM

Ing. Paolo Sattamino*

Direttore Commerciale della Divisione Calcolo Strutturale e Geotecnico – Harpaceas, Milano.

Esiste una decisa tendenza ad utilizzare i modellatori BIM come ambienti di pre-processing dove impostare una base di modello utilizzabile dai software di calcolo strutturale. È indubbio che tale modalità di lavoro si configuri come di grande interesse ed in grado di rendere più efficiente il trasferimento dati dall'ambiente BIM al programma di calcolo (ambiente FEM). Il processo dovrebbe anche essere biunivoco, nel senso che il modello BIM dovrebbe essere in grado di recepire eventuali modifiche derivate dalla fase di analisi strutturale e verifica. La ormai notevole diffusione degli ambienti di modellazione BIM, soprattutto nel caso di edifici, pone in forte evidenza l'interesse nei confronti dello scambio dati con un programma di calcolo. Il tema è all'attenzione dei progettisti ormai da diversi anni ma ancora molti sono i dubbi e le criticità insiste nell'utilizzo di questa modalità di scambio dati. In questo breve articolo saranno descritti alcuni esempi volti ad evidenziare le principali caratteristiche di questo tipo di collegamento. Verranno anche esaminate le fisiologiche ed attese limitazioni dovute al differente approccio alla modellazione operato da un software BIM strutturale ed un programma di calcolo strutturale basato sugli elementi finiti che ancora oggi spesso non vengono tenute in debita considerazione.

Nel mercato delle Costruzioni, soprattutto nell'ambito della progettazione di nuovi edifici o strutture a sviluppo verticale, è abbastanza diffuso l'utilizzo dei modellatori BIM.

I modellatori BIM possono essere suddivisi in quattro grandi categorie: modellatori architettonici, strutturali, Impiantistici e infrastrutturali. I primi gestiscono fino a livelli di dettaglio molto spinto la rappresentazione architettonica di un'opera e implementano strumenti che spaziano dal rendering fotografico alla elaborazione di dati topografici, alla gestione di tutta la computistica. I modellatori BIM strutturali consentono di creare strutture anche molto complesse. Sono piattaforme dedicate alla modellazione multimateriale, con opzioni dedicate alla rappresentazione di tutte le parti strutturali di un'opera (che sia un edificio o un'opera d'arte generica). Consentono anche di gestire le informazioni utili a simulare le varie fasi di costruzione dell'opera; ad esempio, nel caso delle strutture in acciaio, forniscono i dati necessari alle macchine a controllo numerico per automatizzare le operazioni di taglio (lavorazioni) delle singole parti. Gli altri due tipi di piattaforme consentono la modellazione di dettaglio degli impianti presenti negli edifici; i modellatori BIM infrastrutturali sono dedicati alla modellazione e gestione dei modelli relativi ad opere "lineari", in particolare strade e ferrovie.

In tutti queste piattaforme la rappresentazione è ovviamente tridimensionale ed avviene per mezzo di oggetti parametrici; questi strumenti raccolgono moltissime informazioni non solo di ordine geometrico, ma anche i cosiddetti "metadati" che consentono di associare ad oggetti geometrici informazioni di altra natura relativa agli oggetti stessi (che potranno essere poi utili in fase di manutenzione). Ogni modellatore deve anche consentire di poter importare la base dati relativa alle altre discipline che collaborano ai fini della rappresentazione completa dell'opera, arrivando in ultima analisi ad una dettagliatissima rappresentazione della realtà in progettazione.

Da alcuni anni è emerso l'interesse ad utilizzare i modellatori BIM come ambiente nei quali impostare una base dati utile alla definizione di un modello di calcolo strutturale. Questa modalità di lavoro si configura come un metodo che dovrebbe rendere più efficiente lo scambio dati tra gli ambienti BIM e le piattaforme

di calcolo. Allo stesso tempo pone interessanti problematiche in termini di controllo e validazione dei modelli di calcolo. Il passaggio da un modello strutturale ad un insieme di elementi finiti è un'operazione complessa. I modellatori BIM più utilizzabili per realizzare questo scambio dati sono quelli appartenenti all'ambito strutturale.

Pensando alla logica del dialogo con un software di Calcolo è essenziale valutare con estrema attenzione alcuni passaggi di dati da svolgersi all'interno di questi ambienti. Il modello BIM strutturale consente di raggiungere una notevole completezza di dati. Il livello di precisione si può modulare. Stesso discorso vale per il software di calcolo, ma con obiettivi differenti. In un modello reale e complesso la base dati in un modello BIM strutturale e di calcolo strutturale può essere molto differente.

Il collegamento tra i due ambiti è sempre diviso quindi in due parti, una prima dove all'interno del modellatore BIM si costruisce il "cosiddetto" modello analitico, la seconda dove viene realizzato un file, in un determinato formato, che dovrà essere letto dal programma di calcolo strutturale. Il "modello analitico" è un termine che definisce la base dati che all'interno del modellatore BIM dovrebbe essere sufficientemente agevole costruire allo scopo di realizzare un primo schema ragionevole, controllato, validato del modello di calcolo. All'interno della piattaforma BIM viene quindi generato un set parallelo di dati avente finalità differente rispetto ai dati generalmente presenti. Il modello analitico va costruito sfruttando le stesse tipiche assunzioni che lo strutturista sempre svolge nel momento in cui deve concepire il suo modello di calcolo. La sostanziale differenza è che questo modello viene "derivato" da un modello 3D parametrico che può già contenere molte informazioni votate all'aspetto "costruttivo" dell'opera. Generare un modello analitico, prima ancora di trasferirlo ad un qualunque software di calcolo, è un'operazione molto particolare che prevede differenti fasi. Di seguito se ne descrivono alcune facendo riferimento a quanto oggi disponibile nel software di modellazione BIM strutturale Tekla Structures e al collegamento che questa piattaforma ha con il software di calcolo strutturale Midas GEN.

La prima fase da considerare è la corretta selezione (filtro) dei dati generati nel modellatore BIM con l'obiettivo di identificare solo gli

elementi effettivamente dedicati al calcolo. Facendo riferimento ad una struttura tipica composta da elementi in acciaio, in corrispondenza di un nodo di una struttura in acciaio, lo specialista esperto nell'uso del modellatore BIM ha a disposizione la rappresentazione degli elementi e dei nodi. I nodi potrebbero già essere ipotizzati nel loro dettaglio finale (ovviamente da verificare e validare, ad esempio un nodo potrà già essere stato modellato con tutte le squadrette ed i bulloni); ai fini della restituzione grafica i dati sono già tutti disponibili. Nel caso di una struttura in acciaio da carpenteria nell'ambiente di lavoro BIM ad esempio sono modellati ad esempio anche bulloni e tirafondi; questi oggetti nella realtà servono a garantire un certo grado di vincolo. Nel software di calcolo non vengono simulati con un elemento ma semplicemente con un attributo al terminale di un'asta: avremo vincolo a terra o uno svincolo interno. Il link Tekla Structures – Midas Gen consente di filtrare oggetti come questi. In figura 1 se ne riporta un esempio.

AI fini dell'analisi strutturale è sufficiente trasferire al programma di calcolo solo le aste che convergono nei diversi nodi. Queste saranno quindi le prime ad essere selezionate come facenti parte del modello analitico di base. Il modello analitico dovrà ben evidenziare la posizione dei nodi di calcolo rispetto a quelli di modellazione BIM.

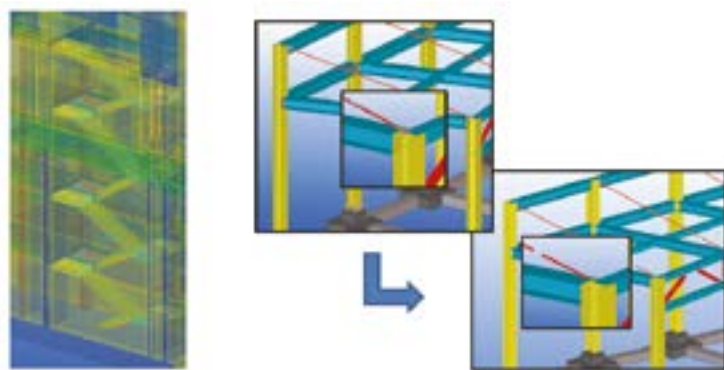


Fig. 1 | Tekla consente di ignorare i bulloni in fase di creazione del modello di analisi

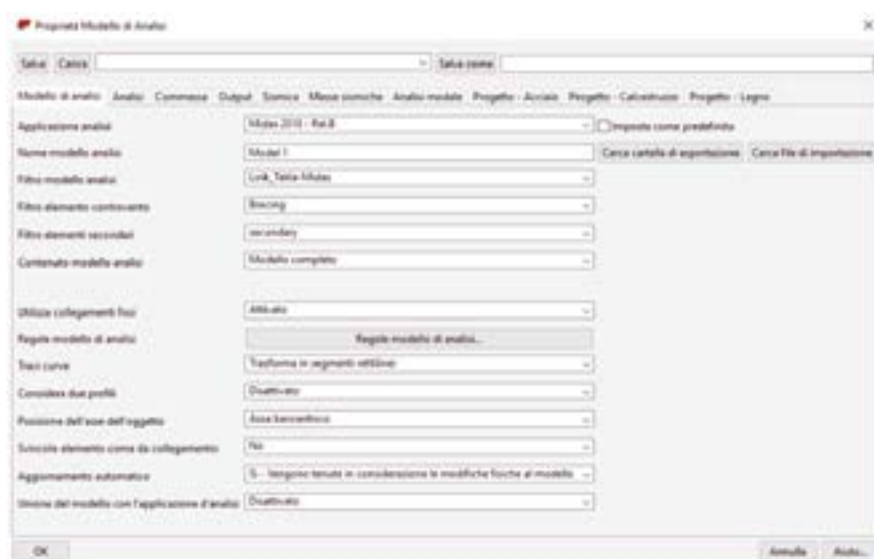


Fig. 2 | Finestra "Proprietà del Modello di Analisi" in Tekla Structures

A livello pratico gli elementi strutturali (travi, pilastri, tutti gli oggetti che fino a questo momento erano solidi 3D) passano in secondo piano; lasciando spazio all'unificare che si genera al loro interno e che diviene la rappresentazione di un elemento finito. Questo passaggio comporta inevitabilmente la perdita di congruenza nelle intersezioni in quanto il volume occupato dall'oggetto 3D non può essere riempito da un unificare.

Definiti gli oggetti con valenza strutturale ai fini del calcolo si può richiedere la generazione di un primo modello analitico. Si veda ad esempio la scheda contenente le opzioni di generazione del modello di analisi di Tekla Structures in figura 2. Di fondamentale importanza è che questi strumenti di dialogo interdisciplinari siano corredati da una dettagliata manualistica che chiarisce quali sono le reali possibilità di interscambio.

Potendo accedere alla rappresentazione grafica del modello analitico si potranno/dovranno svolgere altri controlli.

La seconda indagine è verificare che in corrispondenza di ogni nodo le aste che vi convergono, presentino nodi di calcolo tra loro congruenti. Questa operazione è gestita in prima fase modo automatico dal modellatore BIM ma in casi complessi l'ambiente di modellazione BIM deve consentire all'Utente di poter modificare la posizione dei nodi di calcolo (non quelli di modellazione BIM) nel caso in cui divenga necessario spostarli nella posizione attesa di chi deve effettivamente completare il modello di calcolo.

AI fini di una corretta gestione della congruenza, è poi possibile operare alcune scelte per l'inserimento di quegli elementi (o vincoli a seconda della terminologia adottata nei software di calcolo) di solito indicati come "link rigidi" che consentono di collegare nodi strutturali di elementi deformabili. In figura 3 si riporta un tipico nodo strutturale dove si evidenziano gli oggetti 3D e gli elementi del modello analitico.

L'immagine in figura 4 mostra un primo tentativo (errato) automatico di inserimento di link rigidi per il ripristino della congruenza nel modello di analisi. Per ovviare a tale problema è possibile specificare un valore di tolleranza sulla distanza tra nodi, al di sopra della quale il software di Bim Authoring strutturale non deve inserire dei link rigidi. In alternativa, l'utente può sempre gestire manualmente il modello di analisi, ed in questo caso dovrebbe procedere all'eliminazione dei link in eccesso.

La terza indagine riguarda la gestione delle principali caratteristiche delle aste coinvolte e che convergono nel nodo. I dati di materiale, sezione e rotazione saranno trasferiti in automatico, bisognerà sempre verificare i confini di trasferibilità soprattutto in presenza di materiali o sezioni trasversali complesse non derivate dai profilati standard.

Una ulteriore indagine è valutare se la tipologia di svincolo (cerniera, incastro) modellata lato BIM abbia effetti automatici sulle opzioni di svincolo nelle aste presenti nel modello analitico. Questa informazione può essere già impostata nell'ambito del modellatore BIM. Trattandosi però di un'informazione molto specifica e tipica della parte di calcolo, è opportuno che venga affrontata e risolta nell'ambiente di calcolo.

Ogni modello deve rappresentare il proprio corretto set di informazioni. L'Utente deve sempre ben conoscere

quali di queste non solo sia possibile trasferire da un ambiente all'altro ma quali di queste siano significative e semplici da trasferire.

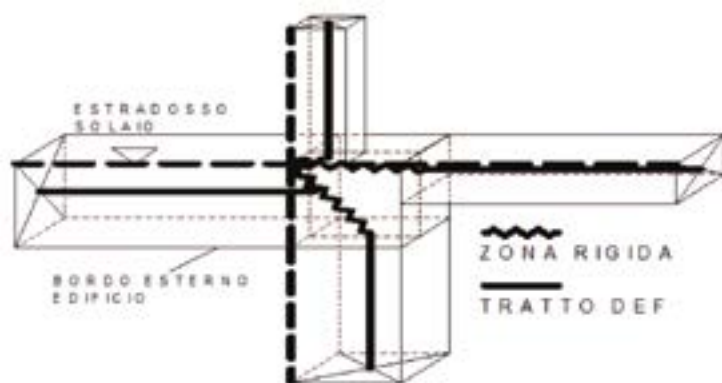


Fig. 3 | Modello di analisi e ripristino della congruenza in presenza di disallineamenti degli assi di riferimento

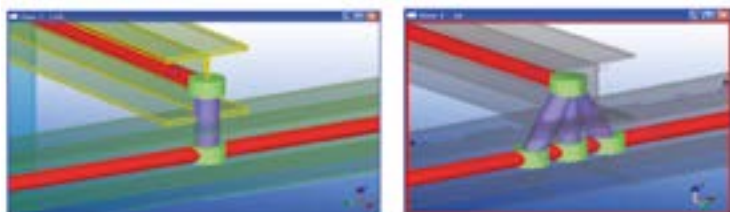


Fig. 4 | Dettaglio di un link rigido nel modello di analisi di Tekla S. (sinistra). Errore nella generazione automatica dei link (destra)

Se poi l'Utente del modellatore BIM strutturale non ha specifiche competenze strutturali, a meno che non venga opportunamente indirizzato da una figura esperta lato calcolo, è opportuno che si limiti a gestire le informazioni principali.

Queste prime fasi di lavoro, se ben svolte e se lo strumento BIM consente di ben controllarle, consentono già di realizzare dei ragionevoli modelli analitici. Volendo fornire ulteriori spunti nella fase di generazione di un buon modello analitico è opportuno poter gestire la gerarchia esistente tra gli oggetti. In particolare, è utile definire quali sono gli elementi principali e secondari. Considerando ad esempio una struttura intelaiata in acciaio, nel passaggio dal modello 3D a quello di analisi la tridimensionalità degli elementi si annichilisce per lasciar posto agli unidimensionali.

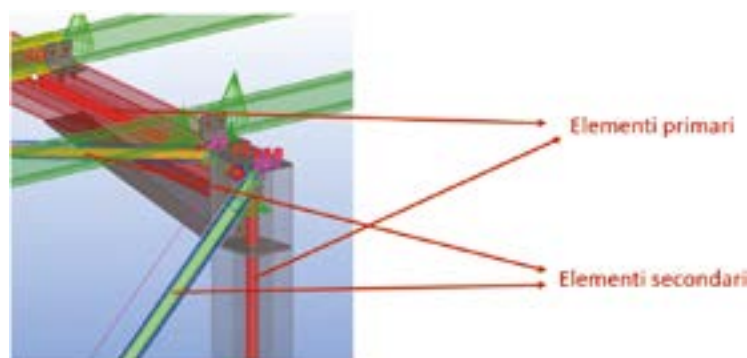


Fig. 5 | Esempio di definizione di una gerarchia degli elementi nel software di BIM Authoring strutturale

Nasce l'esigenza di compiere delle scelte a causa del fatto che ora i singoli elementi occupano meno spazio.

Come viene possibile individuare il limite della struttura? Dal piano in cui giacciono gli elementi che costituiscono il telaio o in cui giacciono i controventi? La scelta "concettuale" è affidata allo Strutturista, che sia o no l'Utente incaricato dell'ambiente di modellazione BIM. In termini "operativi" dovranno essere definiti opportunamente gli elementi appartenenti ai due diversi piani come principali o secondari. Si riporta in figura 5 un esempio esplicativo di individuazione degli elementi principali, ovvero quelli del telaio, ed elementi secondari, ovvero i controventi (verticali o di falda).

Esistono ulteriori passi per arricchire i dati del modello analitico. La struttura potrebbe presentare elementi bidimensionali (piastre in CA o in acciaio, setti in CA, ecc...); ovviamente sussiste il tema della gestione dei carichi statici e relativi ad azioni laterali. Gli elementi bidimensionali in un modello analitico possono essere rappresentati o come dei macro-elementi (delle aree ad esempio) o come già una mesh di elementi finiti. Questa differente rappresentazione dipende dalle caratteristiche dei software di calcolo.

In generale è abbastanza problematico pensare di affidare la fase di generazione di una mesh di elementi 2D (elementi Shell) ad un modellatore BIM per quanto esso sia dedicato alle strutture. È evidente che il rischio certo è che la mesh possa essere generata senza alcun controllo sulla qualità degli elementi finiti.

Un'altra criticità da risolvere riguarda elementi bidimensionali dotati di curvatura. Nel modellatore BIM i profili e le aree curve sono una rappresentazione della realtà da costruire, non esistono difficoltà a rappresentarli. La difficoltà sorge quindi nella rappresentazione ai fini del calcolo strutturale. Una possibile è trasferire elementi curvi unidimensionali mediante una successione di elementi trave rettilinei e, analogamente, aree curve mediante una successione di zone piane (figura 6).

Il modellatore BIM deve quindi avere al suo interno la possibilità di individuare un buon modello di analisi e restituirne una chiara anteprima. È essenziale che l'Operatore possa poi effettuare delle modifiche allo scopo di perfezionare il modello analitico. Buona parte delle regole che costituiscono le fondamenta di un buon modello ad elementi finiti dovrebbero quindi esistere all'interno del modellatore BIM.

Dopo avere completato tutte le operazioni sopra descritte e dopo avere ottenuto un buon modello di analisi, come quello di figura 7, si può passare alla fase di esportazione. È in questo momento che entra in gioco il link: fino ad ora si è lavorato solo nel software di BIM Authoring strutturale.

Per introdurre il concetto di link tra modellatore BIM e software FEM, è bene prima descrivere brevemente i formati di scambio ad oggi disponibili. Si parla di approccio Open BIM quando è garantita, per mezzo di formati standard universali, la possibilità di dialogo tra software diversi, anche prodotti da software house diverse. Ad esso si oppone l'approccio Closed BIM, in cui l'interoperabilità tra i diversi mondi che collaborano nella filiera delle costruzioni è gestita tramite formati proprietari di scambio dati; questi consentono il dialogo tra applicativi prodotti unicamente da una stessa software house, tramite un linguaggio sviluppato specificatamente dalla software house. Quali sono i vantaggi e gli svantaggi

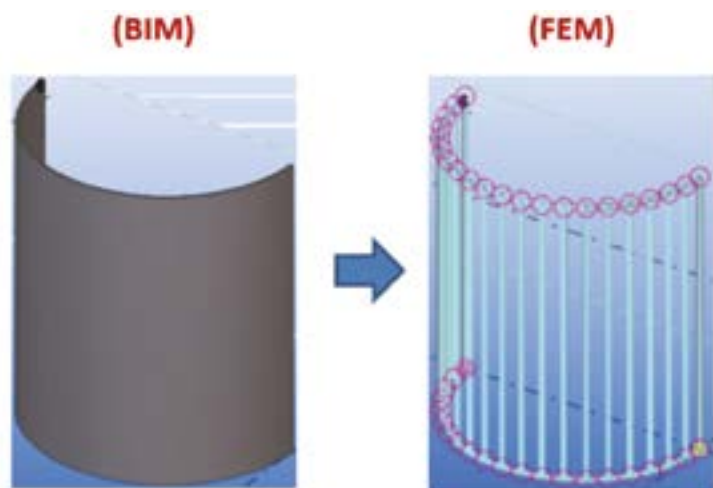


Fig. 6 | Trasferimento di una superficie curva mediante successione di elementi finiti rettilinei

dell'uno e dell'altro approccio? Sicuramente è da evidenziare che l'Open BIM permette al Professionista di scegliere liberamente tra i software disponibili in commercio quelli che considera i migliori nel loro ambito di lavoro. Il Professionista può quindi così dotarsi della strumentazione software migliore per affrontare i diversi step della filiera BIM. Nel mondo dell'Open BIM la lingua comune è universalmente riconosciuta come il formato di scambio IFC, che chiunque a livello internazionale può condividere ed arricchire. Ai fini dello scambio dati tra un modellatore BIM strutturale ed un software di calcolo è possibile considerare un'ulteriore differente strategia, ormai piuttosto praticata e valida: l'interoperabilità attraverso un "Link diretto".

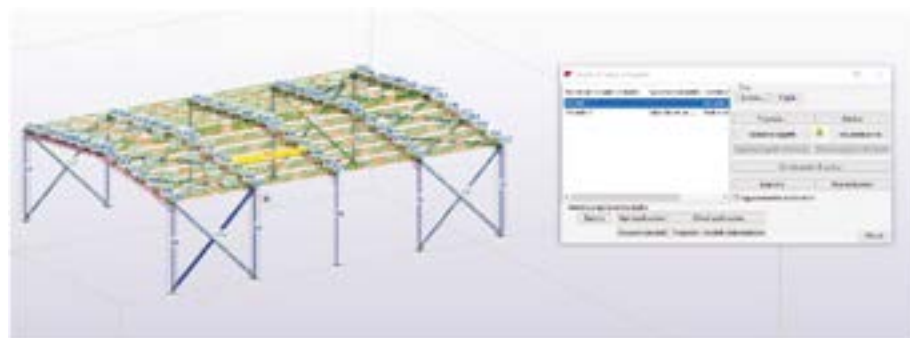


Fig. 7 | Modello di analisi in Tekla Structures e relative opzioni (sinistra). Modello importato in Midas Gen (destra)

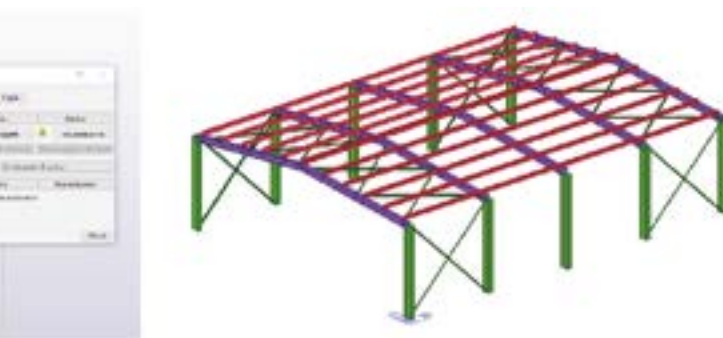
In questo caso lo scambio dati avviene traducendo la base dati contenuta nel "modello analitico" in un formato avente la sintassi del software di calcolo strutturale con il quale si vuole dialogare. A partire quindi da un modello analitico di base, a seconda del software di calcolo di destinazione, si dovranno generare differenti file di interscambio. Questo metodo si dimostra spesso essere il più semplice da perseguire. Spesso è anche l'unico metodo che garantisca una buona bi-direzionalità, obiettivo sempre molto ambito. L'interoperabilità vera e propria si concretizza in modo completo con la bi-direzionalità. Questa è solitamente presente tra i software di BIM Authoring; con i software di calcolo è più difficile in quanto le regole del gioco sono diverse. Nel caso del trasferimento dei dati "diretto" la bi-direzionalità è più semplice da gestire. I link

diretti costituiscono un metodo molto efficace di interoperabilità fra modellatori BIM e software FEM.

La fase finale da svolgere all'interno del modellatore BIM è quella di trasformare la base dati del modello analitico in uno specifico formato di dati di scambio relativo ad un determinato software di calcolo strutturale. Attivando il link, il modello di analisi viene tradotto e traslato al software di calcolo. Durante queste operazioni è fondamentale la produzione di un report di warning/errori che aiutino l'Operatore ad intercettare eventuali anomalie intercorse e ad individuarne le cause.

All'interno del software di calcolo l'Utente è chiamato a completare il modello con tutto ciò che pertiene l'analisi, inserendo carichi, vincoli esterni, svincoli interni e definendo le opzioni di calcolo. Come già affermato in precedenza si ribadisce che, anche se il modellatore BIM ha gli strumenti per l'applicazione di vincoli, svincoli e carichi statici, è bene riservare allo strumento BIM ciò che è proprio ai fini della realizzazione di un modello analitico di base ed allo strumento FEM ciò che è proprio della definizione completa del modello di calcolo. Quest'ultimo offre certamente strumenti più agevoli finalizzati alla definizione di tutti i dettagli che riguardano il comportamento meccanico di una struttura.

Una volta accertata la bontà del modello di calcolo si effettua l'analisi a cui può seguire una fase di progettazione/verifica; a seconda dei risultati ottenuti potrebbe essere necessario apportare delle modifiche che il link deve essere in grado di ritrasferire indietro. Un link diretto ben consente di trasferire al modellatore BIM (potremmo dire all'indietro) le modifiche riguardanti ad esempio la variazione di sezione o materiali ed anche lo spostamento, l'eliminazione o l'aggiunta di oggetti.



Paolo Sattamino.

Ingegnere Civile strutturista, si occupa da oltre 20 anni di software di calcolo strutturale e geotecnico; dal 2015 è anche Direttore Commerciale della Divisione BIM infrastrutture. Esperto di modellazione e simulazione nell'ambito strutturale da diversi anni si occupa del tema relativo all'interoperabilità tra gli ambienti di modellazione BIM ed i software di calcolo

Corrosione e protezione delle strutture offshore

Offshore structures: corrosion and protection

F. Bolzoni*, A. Brenna, M. Ormellese

Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "Giulio Natta" Politecnico di Milano

L'acqua di mare è l'ambiente naturale più aggressivo per l'acciaio al carbonio, il materiale metallico più utilizzato per le strutture marine (piattaforme, tubazioni, pontili, porti, etc.) Le ragioni che rendono l'acqua di mare particolarmente aggressiva sono la disponibilità di ossigeno, il moto ondoso, l'elevata conducibilità elettrica, e la formazione di prodotti di corrosione porosi e non protettivi. Le strutture marine sono protette dalla corrosione mediante protezione catodica nelle zone immerse, e rivestimenti ad alte prestazioni nella zona delle maree o atmosferica.

Nell'articolo si introducono brevemente i fenomeni di corrosione marina, con una maggiore attenzione al comportamento dell'acciaio al carbonio e un breve cenno per gli acciai inossidabili, il rame e le sue leghe. In seguito si analizza in maggiore dettaglio la tecnica della protezione catodica, e nell'ambito di questo argomento sarà ricordato il contributo che il prof. Pietro Pedferri ha dato negli anni '80. I rivestimenti e le pitture saranno trattati in un articolo che apparirà in un numero successivo.

Seawater is the most aggressive natural environment to carbon steel, the most used metallic material for marine structures (platforms, sealines, bridges, etc.). The reason why seawater is very aggressive are related to oxygen availability, wave motion, high electrical conductivity, and corrosion products porous and not protective. The offshore structures are protected by means of cathodic protection in the immersed zones, and high-performance coatings in tidal, splash or atmospheric zones.

In the paper corrosion phenomena in marine environment are briefly introduced, with special attention to carbon steel behavior and a brief outline for stainless steel, copper and its alloys. After the cathodic protection technique is analysed in detail, and in this part the contribution given by prof. Pietro Pedferri during years '80 will be recalled. Paintings and coatings will be treated in a paper that will appear in a following number of the journal.

Corrosione in acqua di mare

Caratteristiche dell'acqua di mare

L'acqua di mare è caratterizzata da una salinità in genere compresa tra 34 e 36 g/L, con alcune eccezioni significative come il mare Baltico o il Mar Caspio (minore salinità) e il Mar Morto (salinità molto maggiore). L'ossigeno, il principale responsabile della corrosione negli ambienti naturali, si dissolve nell'acqua di mare in equilibrio con l'atmosfera. La sua solubilità dipende principalmente dalla salinità e dalla temperatura: considerando una salinità media di 35 g/L, il contenuto di ossigeno è dell'ordine di 9 mg/L a 0 °C, 6 mg/L a 30 °C per annullarsi a 90-100°C.

All'aumentare della salinità il contenuto di ossigeno diminuisce e si annulla per una salinità superiore a 150 g/L. Condizioni di sovra- o sotto-saturazione sono influenzate da processi di fotosintesi e presenza di "fouling". Possono verificarsi anche condizioni anaerobiche, ad esempio nel fondale marino. La concentrazione locale di ossigeno aumenta all'aumentare del moto ondoso e delle correnti marine, ancora di più se il moto è turbolento.

La resistività elettrica dell'acqua di mare, che influenza la velocità di corrosione soprattutto nel caso di attacchi di corrosione localizzata (per esempio aerazione differenziale o corrosione per contatto galvanico), è molto bassa (0,2 Ω·m) a causa dell'elevata salinità. È influenzata anche dalla temperatura.

L'acqua di mare non ha tendenza incrostante, nonostante l'elevata concentrazione di ioni calcio, magnesio e bicarbonati.

La formazione di un deposito calcareo può essere favorita solo

dall'aumento locale di pH indotto da una corrente catodica, come nell'applicazione della protezione catodica, della quale parleremo in seguito.

Infine i batteri, sempre presenti in acqua di mare, possono essere responsabili di alcuni attacchi di corrosione piuttosto severi. I batteri solfato riduttori (noti come SRB, Sulphate Reducing Bacteria), che si sviluppano in ambiente anaerobico, sono responsabili di fenomeni di corrosione localizzata sugli acciai al carbonio. I batteri aerobici ossidanti del ferro o del manganese (tipo Gallionella) influenzano invece la corrosione localizzata degli acciai inossidabili.

Corrosione dell'acciaio al carbonio

La corrosione avviene con un meccanismo di natura elettrochimica: la reazione anodica di dissoluzione del ferro (1) e catodica, sono riportate di seguito [1]. Per quanto riguarda la reazione catodica la riduzione di ossigeno (2) è la più importante. In assenza di ossigeno, è invece possibile lo sviluppo di idrogeno (3):



Il comportamento a corrosione dell'acciaio al carbonio dipende dalla zona corrosiva. Si possono distinguere quattro zone di corrosione:

- **Atmosfera marina**, mai raggiunta dallo "spray" marino. Il meccanismo è quello della corrosione atmosferica, e i fattori influenti sono quelli tipici: tempo di bagnato (umidità relativa

*Corresponding author. Email: fabio.bolzoni@polimi.it

e temperatura), presenza e quantità di inquinanti, direzione e velocità del vento. La velocità di corrosione varia da 0,1 a 0,3 mm/anno;

- **Spruzzi e maree.** Zona soggetta ad alternanza di bagnamento e asciugamento, dove si raggiungono i massimi valori di velocità di corrosione, a causa dell'elevata disponibilità di ossigeno. La velocità di corrosione può essere anche superiore a 0,5 mm/anno;
- **Completa immersione.** Il comportamento a corrosione dipende dalla disponibilità di ossigeno, dalla temperatura e dalla velocità dell'acqua. La velocità di corrosione può raggiungere anche 0,5-0,6 mm/anno, soprattutto nel caso di attacchi localizzati;
- **Fango marino.** Qui il contenuto di ossigeno è molto basso, al limite nullo, quindi la velocità di corrosione dovuta all'ossigeno si riduce a valori trascurabili, inferiori a 20 µm/anno. Tuttavia, le condizioni anaerobiche promuovono il meccanismo di corrosione da batteri solfato riduttori (SRB), con velocità più elevate (1 mm/anno).

Per le strutture permanentemente immerse in acqua di mare o nel fango marino, la velocità di corrosione (V_{corr} , in µm/anno) in assenza di scaglie protettive può essere stimata con formule semplificate, derivate dall'elaborazione della legge di Fick della diffusione di gas in ambiente stagnante, con coefficienti correttivi legati alla velocità dell'acqua [2, 3]. Ad esempio, in regime di moto laminare vale la seguente relazione:

$$V_{corr} = 12 \cdot [O_2] \cdot (1 + v^{0,5}) \cdot 2^{\frac{T-25}{25}} \quad (4)$$

dove $[O_2]$ è la concentrazione di ossigeno (in mg/L), v è la velocità dell'acqua (in m/s), T è la temperatura (in °C). A titolo di esempio, in acqua stagnante ($v = 0$ m/s) con una concentrazione di ossigeno di 8 mg/L, a temperatura di 25°C si ottiene un valore di velocità di corrosione intorno a 100 µm/anno.

Nel caso di mari agitati questi valori possono aumentare fino a

diventare 5 volte più elevati.

In condizioni stagnanti, la velocità di corrosione diminuisce nel tempo a causa della formazione di prodotti di corrosione e di deposito calcareo, che sebbene non siano protettivi diminuiscono la disponibilità di ossigeno alla superficie metallica.

Corrosione localizzata

Nel caso di accoppiamento dell'acciaio al carbonio con un metallo più nobile (con potenziale di corrosione più elevato), come rame e sue leghe, acciai inossidabili, titanio e sue leghe o grafite, possono svilupparsi fenomeni di corrosione per contatto galvanico che portano ad un aumento della corrosione sull'acciaio al carbonio. Invece, se l'acciaio al carbonio è accoppiato a un metallo meno nobile (leghe di alluminio o zinco) la velocità di corrosione diminuisce e l'acciaio al carbonio è protetto (vedi oltre).

Nel caso di corrosione per contatto galvanico le velocità di corrosione riportate in precedenza devono essere moltiplicate per un fattore correttivo superiore a 1, che dipende dal rapporto tra la superficie catodica (superficie dove avviene la reazione catodica di riduzione di ossigeno) e la superficie anodica (quella del metallo meno nobile). Il valore di questo rapporto non è semplicemente quello geometrico, ma è quello delle aree effettivamente funzionanti da catodo e da anodo, che dipende anche dalla conducibilità della soluzione. Le condizioni più severe per quanto riguarda la corrosione per contatto galvanico sono quelle di elevata area catodica in rapporto a quella anodica e di elevata conducibilità della soluzione, come nel caso appunto dell'acqua di mare.

Condizioni di aerazione differenziale, simili a quelle che avvengono nei terreni, si verificano in presenza di depositi (*fouling*): le zone a maggiore apporto di ossigeno si comportano come zone catodiche, mentre quelle a minore apporto di ossigeno si comportano come zone anodiche. Anche in questo caso le velocità di corrosione nelle zone anodiche aumentano notevolmente.

Forme di corrosione batterica, in particolare da batteri solfato riduttori (SRB), si possono verificare nel fango marino oppure al di



Fig. 1 | Esempio di corrosione di un relitto di nave (sinistra) corrosione di una piattaforma nella zona degli spruzzi e delle maree (destra)

sotto di depositi (*fouling*); le velocità di corrosione possono raggiungere valori elevati, dell'ordine di 1 mm/anno.

Altre forme di corrosione localizzata, come la corrosione per sfregamento (*fretting*) e la corrosione erosione o per turbolenza non sono qui trattate, si rimanda al testo [1].

Corrosione fatica

In presenza di sforzi variabili nel tempo possono insorgere fenomeni di corrosione fatica che portano alla propagazione di cricche e possono provocare nei casi peggiori anche rotture catastrofiche, come nel caso delle piattaforme offshore Sea Gem e Alexander Kielland [1]. Nel caso delle piattaforme le zone maggiormente sollecitate e quindi potenzialmente a rischio sono i nodi delle stesse.

Corrosione sotto sforzo

In presenza di acciai a elevata resistenza sono possibili anche forme di corrosione sotto sforzo (infragilimento da idrogeno).

Corrosione di altri materiali metallici

Acciai inossidabili

È noto che gli acciai inossidabili possono subire corrosione localizzata (vaiolatura - pitting, o in fessura - crevice) in presenza di cloruri e ossigeno (o di un reagente catodico ossidante, come acqua ossigenata, ozono, o ipoclorito). L'acqua di mare naturale contiene anche batteri (in particolare di tipo ossidanti del ferro o del manganese) che possono favorire l'innescio della corrosione.

La prevenzione della corrosione localizzata si effettua con un'adeguata scelta del materiale, basata in prima approssimazione sulla valutazione dell'indice di resistenza alla corrosione per pitting, $PREN = \%Cr + 3,3\%Mo + 16-30\%N$. Solo acciai inossidabili alto legati con un tenore elevato di cromo e molibdeno caratterizzati da un valore di PREN superiore a 40, sono in grado di resistere alla corrosione localizzata in acqua di mare naturale.

Acciai inossidabili meno legati come i classici AISI 304 (18% Cr) e AISI 316 (18% Cr e 2-3% Mo), caratterizzati da valori di PREN dell'ordine di 18 e 25-28 rispettivamente, devono essere protetti catodicamente (protezione o prevenzione catodica detta "per passività" [4]).

In apparecchiature dove gli acciai inossidabili sono a contatto con acqua di mare a temperatura elevata (superiore a 50°C) deve essere tenuta in considerazione anche la possibilità di corrosione sotto sforzo da cloruri. Anche per gli acciai inossidabili si possono verificare condizioni di corrosione fatica e per acciai a elevata resistenza fenomeni di infragilimento da idrogeno [3].

Rame e sue leghe

L'esperienza ha mostrato che, sebbene dal punto di vista termodinamico possa corrodersi in presenza di ossigeno, il rame si passiva con la formazione di un ossicloruro di rame e il suo comportamento alla corrosione in acqua di mare è molto buono: sia il rame sia le sue leghe possano considerarsi materiali resistenti alla corrosione in questo ambiente. Il punto debole di questa classe di materiale è la scarsa resistenza alla corrosione-erosione: in presenza di acqua di mare con velocità superiore a 1.5-2 m/s, la patina protettiva è rimossa e non riesce a riformarsi, quindi la velocità di corrosione diventa elevata. Le leghe rame-nichel (cupronichel) e i bronzi al

Ni-Al sono più resistenti a queste forme di corrosione e sopportano una velocità massima di 4 m/s [3].

Protezione catodica dell'acciaio al carbonio

La protezione dalla corrosione dell'acciaio al carbonio si effettua mediante pitture o rivestimenti a elevato spessore, sia di natura metallica che organica, per la zona atmosferica, degli spruzzi e delle maree.

Per la zona immersa e nel fango marino, la protezione si effettua mediante una tecnica elettrochimica nota come protezione catodica. Nel seguito focalizzeremo l'attenzione su questa tecnica, rimandando la trattazione delle pitture e dei rivestimenti a un successivo articolo.

La protezione catodica è basata sull'applicazione di una corrente continua in senso catodico, cioè diretta dall'ambiente verso il materiale metallico da proteggere. Per erogare la corrente di protezione è necessaria la presenza di un anodo. La corrente catodica ha

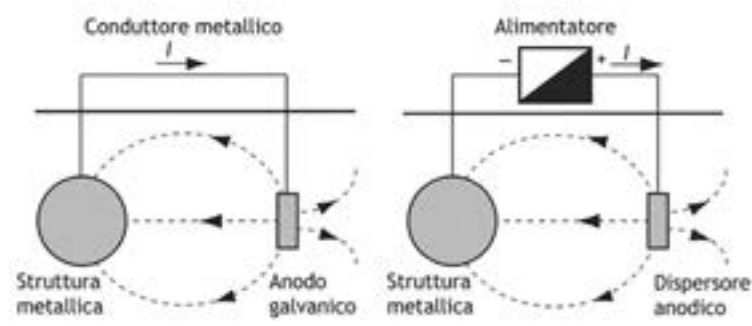


Fig. 2 | schema di funzionamento della protezione catodica con anodi galvanici (sinistra) e corrente impressa (destra) [4]

in primo luogo l'effetto di diminuire il potenziale del metallo, e in questo modo si riduce anche la velocità di corrosione.

La reazione anodica e quelle catodiche, riduzione di ossigeno (equazione 2) e, a potenziali più bassi, lo sviluppo di idrogeno (equazione 3), possono provocare effetti secondari, con conseguenze positive o negative. Alcune di queste saranno richiamate in seguito.

La protezione catodica può essere applicata con due tecniche: anodi galvanici o corrente impressa (figura 2). Nel primo caso la protezione si attua collegando il metallo da proteggere con un metallo (o lega) meno nobile: in pratica nel caso di acciaio al carbonio in acqua di mare si fa riferimento a leghe di alluminio e leghe di zinco.

Nel secondo caso è necessario avere a disposizione un generatore di corrente continua: la struttura da proteggere (il catodo) è collegata al polo negativo mentre l'anodo, che in questo caso è generalmente insolubile, ad esempio titanio attivato, è collegato al polo positivo. Nella protezione catodica delle strutture marine (piattaforme offshore, porti e pontili) è di gran lunga prevalente la tecnica di protezione catodica ad anodi galvanici con anodi in lega di alluminio o zinco (figura 3).

Nel seguito si introdurranno i concetti di potenziale e densità di corrente di protezione e sarà anche approfondita la determinazione delle condizioni di protezione in presenza di corrosione fatica.



Fig. 3 | Esempio di montaggio di anodi a bracciale in lega di zinco su una tubazione in acciaio sottomarina (sinistra) aspetto delle tubazioni in acciaio con anodi e rivestimento (appesantimento) in calcestruzzo (destra)

Non sarà trattata la progettazione della protezione catodica, per la quale si rimanda a [4].

Potenziale di protezione

Nel caso di un materiale a comportamento attivo come l'acciaio al carbonio in acqua di mare, la protezione è ottenuta con un criterio di tipo termodinamico. In pratica, con riferimento alla reazione anodica di dissoluzione del ferro (equazione 1) si definisce un potenziale di equilibrio, al di sotto del quale la reazione non procede nel senso individuato dalla freccia ma in senso opposto (condizioni di immunità).

Il valore del potenziale di equilibrio per l'acciaio al carbonio in acqua di mare è pari a $-0,87 \text{ V vs AAC}$ (elettrodo di riferimento argento/argento cloruro, utilizzato in acqua di mare).¹

In pratica non è necessario abbassare il potenziale fino a raggiungere le condizioni di immunità, ma è sufficiente portare l'acciaio a un valore di "quasi" immunità, $-0,8 \text{ V vs AAC}$, cui corrisponde una velocità di corrosione ingegneristicamente trascurabile, inferiore a $10 \text{ }\mu\text{m/anno}$.

Come detto, in ambiente anaerobico è possibile che insorga la corrosione da batteri solfato riduttori (SRB) con formazione superficiale di solfuro di ferro: in queste condizioni la protezione catodica può ancora essere applicata ma il potenziale di equilibrio si abbassa di circa 100 mV , quindi il potenziale di protezione diventa $-0,9 \text{ V vs AAC}$.

Devono essere evitate le condizioni dette di sovraprotezione catodica, che causano notevole sviluppo di idrogeno alla superficie del metallo secondo la reazione (3). Si raccomanda di non portare mai il potenziale a valori inferiori a $-1,1 \text{ V vs AAC}$. Oltre alle problematiche di corrosione fatica che saranno analizzate nel seguito, in queste condizioni gli acciai a elevata resistenza possono subire infragilimento da idrogeno.

Corrente di protezione

La densità di corrente di protezione utilizzata per proteggere una

struttura equivale alla velocità dei processi catodici al potenziale di protezione. Se si considera che la reazione catodica principale è quella di riduzione di ossigeno, il valore della corrente di protezione può essere calcolato in accordo all'equazione (4). La corrente di protezione è pertanto influenzata dalla concentrazione di ossigeno in soluzione, dalla velocità dell'acqua e dalla temperatura. Il valore calcolato corrisponde al valore iniziale della densità di corrente di protezione. Alcuni valori tipici di densità di corrente di protezione iniziale derivati dall'esperienza sono riportati in tabella 1. Oltre a ridurre la corrosione della struttura, la corrente di protezione offre un altro beneficio. Infatti, l'alcalinità prodotta alla superficie del metallo dalla corrente catodica consente la precipitazione di un deposito calcareo che riduce nel tempo la corrente di protezione.

Tab. 1. Densità di corrente di protezione per alcune strutture a mare

Struttura	Densità di corrente di protezione (mA/m ²)
Fango marino	20
Acque stagnanti	40
Condizioni più usuali	80
Acque agitate	130
Golfo del Messico	65
Golfo Persico	85
Coste occidentali USA	85
Coste africane	90
Coste australiane	85
Mare del Nord	130

1 | L'elettrodo di riferimento utilizzato in acqua di mare (AAC) ha un valore di $+ 0,25 \text{ V vs SHE}$ (elettrodo standard a idrogeno)

Potenziale di protezione delle strutture offshore in presenza di corrosione-fatica

(testo ripreso e riassunto dall'articolo scritto per il numero speciale di APCE Notizie (n. 42 del 2010) dedicato al prof. Pietro Pedferri [5, 6])

Pietro Pedferri ha fortemente contribuito negli anni '80 alla razionalizzazione delle condizioni di protezione catodica delle strutture metalliche operanti in ambiente marino. Da ricordare la relazione generale tenuta alla giornata di studio sulla "Corrosione marina" organizzata dal Centro Corrosione AIM e dal Laboratorio del CNR per la corrosione marina dei metalli, a Genova, il 20 marzo 1980 che è stata poi pubblicata su "La Metallurgia Italiana" del 1981 [7]. La memoria è stata tradotta e pubblicata a cura del Ministero della Difesa inglese [8]. In quegli anni, la protezione catodica delle strutture offshore era al centro dell'interesse nella comunità scientifica per i notevoli risvolti economici e tecnici. Infatti lo sfruttamento dei pozzi petroliferi al largo delle coste rendeva necessario il ricorso a speciali strutture metalliche, dette strutture "off-shore", le cui parti immerse dovevano essere protette dalla corrosione e la protezione catodica si presentava come il rimedio più efficace e nello stesso tempo più economico. Tuttavia si erano registrati dei tragici insuccessi che ne avevano messo in discussione l'affidabilità. Il punto critico era la definizione del potenziale di protezione per quelle strutture che operano in mari caratterizzati da forte agitazione (il Mare del Nord, per esempio) e pertanto soggette anche a corrosione-fatica, argomento che aveva già interessato Pietro Pedferri e il suo gruppo di ricerca [9]. Pietro da ottimo divulgatore quale era si era posto l'obiettivo di razionalizzare la materia e di renderla fruibile al più vasto pubblico di addetti rispetto alla ristretta cerchia dei ricercatori. Ed è così che ha trasferito nel suo testo di protezione catodica [10] un capitolo piuttosto copioso di informazioni sul tema, poi ripreso negli interventi sopra citati.

La progettazione delle prime piattaforme nel mare del Nord seguiva la filosofia consolidata nel Golfo del Messico, dove erano presenti già negli anni '50 più di mille piattaforme. Era basata su:

- calcolo meccanico per resistere ai carichi massimi cui possono essere soggette durante gli uragani, o la cosiddetta tempesta dei 100 anni,
- applicazione di una adeguata protezione nei confronti della corrosione generalizzata. Questa poteva essere ottenuta mantenendo il potenziale delle strutture sufficientemente negativo (-0,8 V vs AAC). Questo valore consente, oltre alla protezione, anche la formazione di un pH alcalino che permette la separazione e la conservazione nel tempo del deposito calcareo che riduce la corrente di protezione. Per le parti appoggiate sul fondo marino, la protezione catodica deve servire anche per combattere l'azione di batteri solfato riduttori, per cui si rende necessario portare il potenziale a -0,9 V AAC.

Purtroppo, gli effetti di una situazione ambientale e di carico molto severa, come quella del Mare del Nord, provocarono l'insorgenza in tempi molto brevi di gravi fenomeni di corrosione-fatica, che provocò il disastro della SeaGem e l'affondamento di altre piattaforme mobili. I progettisti non avevano compreso che la corrosione nel Mare del Nord, seppur più freddo del Golfo del Messico, era invece maggiore a causa del forte moto ondoso che lo caratterizza. Si cambiò pertanto il modo di progettare le strutture per tener

conto del fatto che il meccanismo di cedimento più probabile era appunto quello per corrosione-fatica. Siccome la frequenza delle variazioni di carico, legata a quella del moto ondoso, è relativamente bassa e inferiore ai 0,2 Hz, ci si trova nelle condizioni in cui il fenomeno di fatica può essere notevolmente influenzato dalla presenza di un ambiente aggressivo. Si sono quindi moltiplicati negli anni '80 gli studi sul comportamento a fatica in acqua di mare degli acciai al carbonio-manganese usati per queste applicazioni ed in particolare dei giunti saldati, in condizioni di corrosione libera o protetti catodicamente a diversi livelli di potenziale. Se si utilizza per lo studio della corrosione-fatica l'approccio della meccanica della frattura, si può definire la variazione del fattore di intensità degli sforzi

$$\Delta K = \beta \cdot (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \sqrt{a} \quad (5)$$

dove β è un fattore di forma che dipende dalla geometria dell'elemento e dal tipo di difetto, σ_{\max} e σ_{\min} sono lo sforzo massimo e minimo, rispettivamente, e a è la dimensione del difetto.

Come ben riassunto da Pedferri, l'esperienza di laboratorio accumulata negli anni '80 consente di affermare che valgono le seguenti considerazioni:

- bassi valori di ΔK
 - se il potenziale di protezione è pari a -0,8 V AAC, la velocità di avanzamento delle cricche è minima;
 - se il potenziale di protezione è inferiore a -1,3 V AAC, si osserva un forte aumento della velocità di crescita della cricca;
- alti valori di ΔK
 - se il potenziale di protezione è prossimo a -0,7 V AAC, la velocità di avanzamento della cricca è minima (uguale a quella che si misura in aria);
 - se il potenziale di protezione è pari a -0,8 V AAC, la velocità di avanzamento della cricca aumenta di circa 3 volte (più o meno uguale a quella misurata in corrosione libera);
 - se il potenziale di protezione è pari a -1,0 / -1,1 V AAC, la velocità di avanzamento della cricca aumenta anche di 4-5 volte.

Nelle reali condizioni di esercizio di una struttura offshore, la presenza di elevati ΔK , che si osservano per le cricche molto profonde al termine della vita della struttura, o in seguito ad elevate variazioni di carico che solo raramente si producono, è limitata a periodi di breve durata. La maggior parte del tempo invece la struttura opera in condizioni di fatica con bassa variazione del fattore di intensità degli sforzi. Pertanto nella valutazione del danno complessivo pesa molto di più l'avanzamento della cricca prodotto dalla fatica a bassi ΔK .

Quindi, nel caso delle strutture offshore, rifacendosi alle esperienze di laboratorio, il potenziale di protezione più adatto per limitare i danni provocati dai fenomeni di corrosione fatica sembra essere lo stesso che si consiglia per prevenire la corrosione generalizzata, ossia -0,8 V AAC. Devono essere evitate le condizioni di sovra protezione: queste infatti, non solo comportano un inutile sperpero economico, ma causano un notevole aumento della velocità di avanzamento delle cricche di corrosione fatica.

- [1] P. Pedferri, Corrosione e protezione dei materiali metallici, PoliPress, Milano, 2007.
 - [2] L. Lazzari, Engineering tools for corrosion: Design and Diagnosis, Woodhead Publishing, 2017.
 - [3] P. Pedferri, Corrosion science and engineering, eds L. Lazzari and MP. Pedferri, Springer Nature, 2018.
 - [4] L. Lazzari, P. Pedferri, M. Ormellese, Protezione catodica, III edizione Polipress, 2006.
 - [5] APCE Notizie, n° 42, dicembre 2010, numero dedicato a Pietro Pedferri.
 - [6] F. Bolzoni, M. Ormellese, "Pietro Pedferri. La protezione catodica delle strutture offshore", APCE Notizie, n° 42, dicembre 2010, pag. 15-18.
 - [7] P. Pedferri, Aspetti e problemi della protezione catodica delle strutture offshore, La Metallurgia Italiana, 73, 2 (1981), pp. 75-81.
 - [8] P. Pedferri, Aspects and problems of cathodic protection for offshore structures, Procurement Executive Ministry of Defence, DRIC Translation, Controller HMSO, London, 1986.
 - [9] D. Sinigaglia, G. Re, P. Pedferri, Cedimento a fatica e ambientale dei materiali metallici, Ed. Clup Milano, 1979.
 - [10] L. Lazzari, P. Pedferri, Protezione catodica, CLUP, Milano, 1981.
-



Andrea Brenna

Ricercatore nel settore scienza e tecnologia dei materiali, collabora all'interno del gruppo PoliLaPP (Laboratorio di Corrosione dei Materiali "Pietro Pedferri") del Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "G. Natta" del Politecnico di Milano. L'attività scientifica si colloca nell'ambito della corrosione dei materiali metallici e sua prevenzione. I principali interessi sono: la corrosione dei metalli in ambienti naturali e industriali, con particolare riferimento al terreno e all'atmosfera, la protezione catodica, le tecniche di monitoraggio della corrosione, la corrosione delle opere in calcestruzzo armato.



Marco Ormellese

Professore ordinario al Politecnico di Milano, presso il Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "G. Natta". Svolge attività di ricerca e consulenza presso PoliLaPP, Laboratorio di Corrosione dei Materiali "Pietro Pedferri". Si occupa di corrosione e protezione dei materiali metallici con particolare interesse alla protezione catodica, alla corrosione localizzata degli acciai inossidabili e del titanio, alla corrosione delle opere in calcestruzzo armato e ai sistemi di protezione aggiuntiva (inibitori e rivestimenti).



Fabio Bolzoni

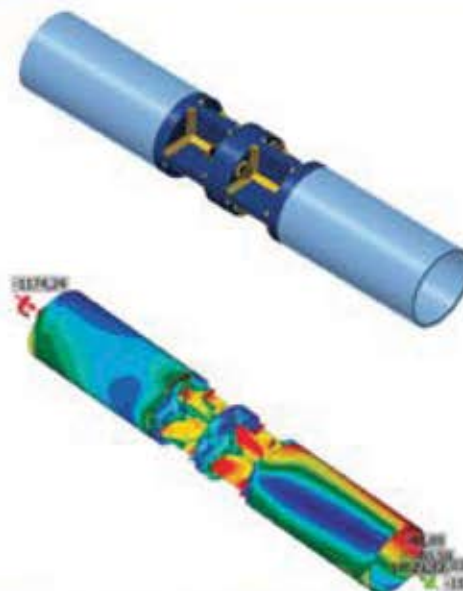
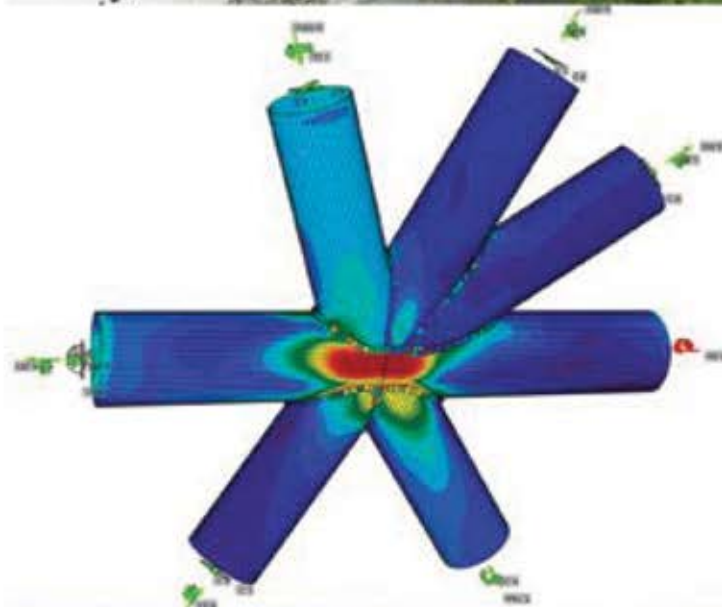
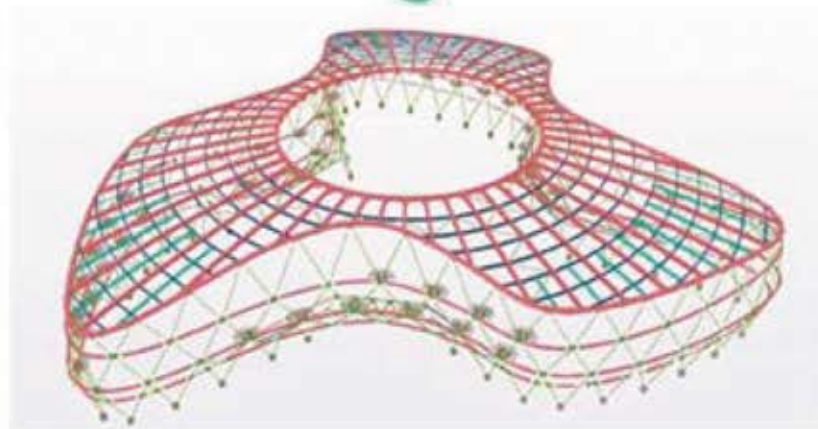
Professore associato al Politecnico di Milano, presso il Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "G. Natta". Svolge attività di ricerca all'interno del gruppo PoliLaPP (Laboratorio di Corrosione dei Materiali "Pietro Pedferri"). I principali ambiti di ricerca sono legati alla corrosione dei materiali metallici e sua prevenzione, con particolare interesse alla durabilità delle opere in calcestruzzo armato, alla corrosione in ambito industriale, in particolare in fragilimento da idrogeno nel settore oil and gas, alla protezione catodica di strutture metalliche e in c.a.

IDEA StatiCa® CONNECTION

LEADER MONDIALE PER LA VERIFICA DI CONNESSIONI IN ACCIAIO GENERICHE
BIM - ANALISI NON LINEARI - MULTILINGUA - NORME: 

Hungexpo Arrival Hall, Budapest
Progetto: BIM Design Kft
Realizzazione: KÉSZ Group

 Tekla Structures  IDEA StatiCa®



EISEKO
COMPUTERS

PROVA LA VERSIONE COMPLETA PER 14 GIORNI

EISEKO COMPUTER S.R.L. - Viale del Lavoro 17, 37036 San Martino B. A. (VR)

idea@eiseko.com

+39 045 80 31 894

www.eiseko.it

NUOVO, POTENTE, AFFIDABILE, COMPLETO...
RIVOLUZIONARIO!

CDJ *Win*

Computer Design of Joints
2021 Edition **FEA Connection**

**Niente più problemi
con le giunzioni metalliche...**

**Software per l'analisi agli elementi finiti 3D delle unioni
in acciaio di geometria qualsiasi, con input da CAD 3D integrato in modellazione solida:**

- Elementi finiti 3D di tipo «tetraedo» - Meshatura tridimensionale del nodo
- Soluzioni di elevatissima precisione - Granularità meshatura personalizzabile

**Navigatore Fotorealistico
dell'intera struttura***



**Calcolo del nodo con mappatura
tensioni di Von Mises**

**Progettazione di passerella in acciaio
per gentile concessione Ing. Luigi De Poi*

Visita il nostro sito www.stsweb.it per visionare i nostri video tutorials.

Richiedi una dimostrazione in connessione remota al seguente indirizzo email: cdja@stsweb.it

Software Tecnico Scientifico®



Via Tre Torri, 11 - 95030 Sant'Agata li Battolati (CT)
e-mail: sts@stsweb.it
tel. 095/7252559-7254855 fax 095/213813

Corso Gelone, 39 - 96100 Siracusa
e-mail: sts.siracusa@stsweb.it
tel. 0931/66220

DAVIDBRAND
Distributore esclusivo