



76

1

Terminal Container

Il nuovo volto del porto di Rijeka

David Zannoner
Project Manager
F&M Ingegneria

Elisa Bianchi Janetti
Technical Specialist
Stantec

Paolo Riva
Professore Ordinario
Università di Bergamo

Andrea Belleri
Ricercatore
Università di Bergamo

FOCUS SUL NUOVO TERMINAL PER LE MERCI IN ESECUZIONE NELL'AMBITO DEL "RIJEKA GATEWAY PROJECT", UN COMPLESSO PIANO DI SVILUPPO FINALIZZATO A POTENZIARE I COLLEGAMENTI DELLA CITTÀ PORTUALE CROATA. TRA GLI ASPETTI QUALIFICANTI NELLA PROGETTAZIONE DELLA BANCHINA, CHE SFRUTTA LA TECNOLOGIA DEI CASSONI CELLULARI, ANCHE L'IMPIEGO DEL BIM, OLTRE AD APPROFONDITE ANALISI SUL COMPORTAMENTO DELLE STRUTTURE IN CONTESTO SISMICO.

1. Vista di una fase realizzativa

2. Planimetria di progetto:
Fase 1 + Fase 2

Il porto di Rijeka (città nota in italiano come Fiume) ha una storia antica, viene citato dalle fonti a partire dal XIII Secolo, ma acquista un ruolo chiave solo nel XIX Secolo quando, entrando a far parte del Regno d'Ungheria, ne diventa l'unico porto marittimo. In questo pe-

riodo viene collegato alle più importanti direttrici stradali dell'epoca e alla ferrovia. Dopo l'indipendenza e l'annessione al Regno d'Italia, Rijeka diventa un porto periferico e perde gran parte dei suoi traffici. Nel corso del '900 vive un'alternanza di periodi di depressione (in particolare durante la guerra di indipendenza croata) e di sviluppo, senza però mai raggiungere i livelli del secolo precedente. Dal 2000 a oggi, i traffici marittimi della rotta *round the world* che dall'Asia, attraverso il canale di Suez e il Mediterraneo, raggiungono l'Europa e il Nord America sono praticamente triplicati (con una leggera flessione dal 2012 dovuta alla crisi economica globale). È quindi facile immaginare che l'accesso a questo mercato (che al momento è gestito per il 70% dai porti del Nord Europa) abbia un'importanza strategica per la crescita di una città portuale e lo sviluppo di un'intera area.

In questo scenario si inserisce il Rijeka Gateway Project: un complesso piano di sviluppo, promosso dal Governo croato e in parte finanziato dalla Banca Mondiale, che aspira a incrementare la competitività di Rijeka come città portuale, attraverso, da una parte, l'estensione e il rafforzamento delle infrastrutture portuali e, dall'altra, una migliore integrazione con le vie di comunicazione verso l'interno della Croazia e l'Europa Orientale.

All'interno di questo piano è prevista la realizzazione del nuovo "Zagreb Pier": questo progetto, sfruttando la rilevante profondità dell'acqua (fino a circa -40 m) e la posizione ben protetta che caratterizzano la zona del porto, prevede la costruzione di una nuova grande banchina, della lunghezza complessiva di 680 m, che consenta di

L'opera: protagonisti e numeri

Committente	Autorità Portuale di Rijeka
Procedura	Design and Build
Raggruppamento delle Imprese	GLF SpA (mandataria); Nuova Co.Ed.Mar. Srl; Maltauro SpA ¹ (mandanti);
Raggruppamento dei Progettisti	F&M Ingegneria SpA (mandataria); Stantec SpA, già MWH SpA; Raadgevend Ingenieursbureau Lievense BV (mandanti); Rijekaproject d.o.o.
Main Designer Locale	Royal Haskoning DHV & GI Investinzenjering d.o.o.
Direzione Lavori	Progettazione preliminare, definitiva ed esecutiva
Prestazioni svolte	Euro 70.585.015,45;
Importo delle opere (Fase 1)	2013-2016;
Periodo progettazione	Progetto preliminare approvato (ottenimento del "permesso di locazione"); Progetto definitivo approvato (ottenimento del "permesso di costruzione" per la Fase 1); Progetto esecutivo approvato
Avanzamento	2014
Inizio lavori	2014
Previsione completamento opere	Fine 2018

¹ Durante la fase esecutiva l'impresa Maltauro SpA ha ridotto la sua partecipazione rinunciando a eseguire i lavori.



estendere significativamente la capacità di movimentazione di navi porta container, anche di ultima generazione. A questo scopo, l'Autorità Portuale di Rijeka ha indetto una gara internazionale, secondo le procedure FIDIC (*International Federation of Consulting Engineer*), per la progettazione e realizzazione della nuova infrastruttura, lasciando ai concorrenti l'onere di individuare la migliore soluzione tecnica.

Soluzione tecnica vincente

A fronte dei vincoli ambientali presenti (legati principalmente all'elevata profondità del fondale e alle scadenti caratteristiche del terreno di fondazione) la soluzione che è risultata vincente (proposta dal raggruppamento delle Imprese ed elaborata insieme ai progettisti F&M, Stantec, già MWH, e Lievense) prevede un innovativo utilizzo della ormai assodata tecnologia dei cassoni cellulari. Dal punto di vista progettuale, lo Zagreb Pier Terminal è concepito come una banchina del tipo semi-aperto con impalcato a giorno in travi prefabbricate precomprese con sezione ad U poggianti su cassoni cellulari in c.a. prefabbricati, disposti tipicamente a circa 23,3 m d'interasse. I cassoni saranno fondati su uno scanno d'imbasamento (rilevato sommerso) di altezza massima fino a 20 m, poggianti sul terreno di fondazione preventivamente migliorato con l'utilizzo di colonne in ghiaia (con funzione di accelerazione dei cedimenti e incremento delle caratteristiche meccaniche) e in jet-grouting (per il trasferimento del carico agli strati rocciosi profondi). La soluzione è risultata vincente sia dal punto di vista tecnico che economico, rispetto alle proposte degli altri partecipanti, che prevedevano soluzioni classiche con impalcato a giorno su pali o con riempimento sostenuto da palancolato tirantato.



Lo sviluppo del progetto prevede tre distinte fasi operative:

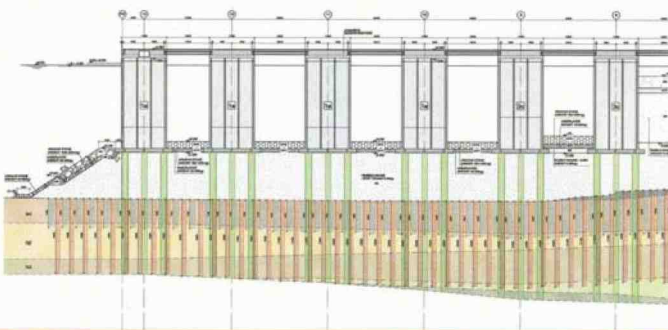
- La Fase 1 riguarda la realizzazione di 400 m di nuova banchina a mare, con la relativa area di manovra per il carico e lo scarico dei container, e per la loro movimentazione con gru. I lavori relativi alla Fase 1 hanno avuto inizio nell'agosto del 2014 e saranno completati nel dicembre 2018.
- La Fase 1A riguarda la progettazione della zona di riem-

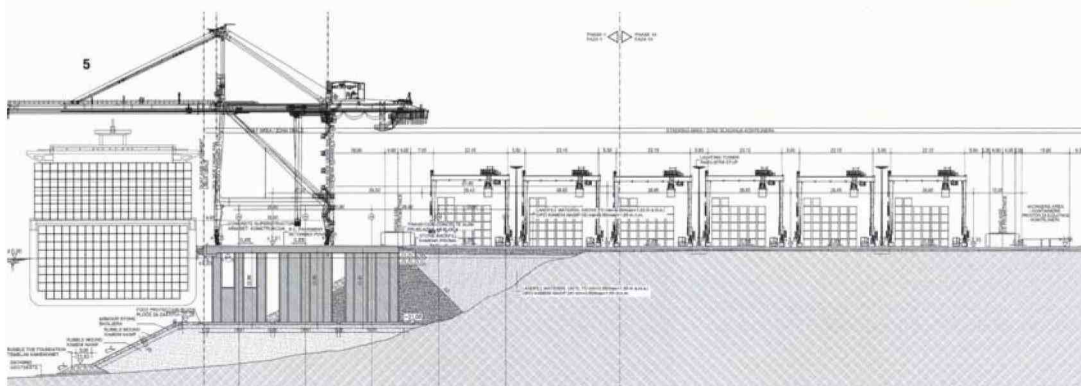
pimento a completamento dell'infrastruttura, fino all'esistente linea di costa. Nell'ambito del contratto è stata completata la progettazione preliminare della Fase 1A, mentre, in accordo con i programmi dell'Autorità Portuale, i lavori di realizzazione saranno affidati ad un Concessionario, da selezionare a seguito di una gara pubblica internazionale.

- La Fase 2 riguarda infine la progettazione di ulteriori 280 m di banchina, con la relativa area di riempimento verso la costa esistente. Nell'ambito del contratto è stata completata la progettazione definitiva della Fase 2, mentre, anche in questo caso, i lavori di costruzione saranno affidati successivamente all'individuazione di un Concessionario. Il sito d'intervento si colloca all'interno dell'esistente Porto di Rijeka e ne rappresenta l'estensione in corrispondenza del lato occidentale. La profondità minima di pescaggio sul fronte della nuova banchina corrisponderà a -20 m, sotto il livello minimo dell'acqua (*Low Water Level*). Le caratteristiche tecnologiche dell'infrastruttura consentiranno di ospitare navi di dimensione massima pari a LOA (*Length Overall*) 366 m (con dislocamento: 225.000 t). La dimensione minima prevista per la nave in attracco corrisponde invece a LOA 100 m (con dislocamento pari a 10.000 t).

3. Allineamenti dei cassoni dopo la loro collocazione in opera

4. Immagine di rendering della banchina





5. Sezione trasversale

L'impiego del BIM per le fondazioni

Come precedentemente accennato, le condizioni ambientali in cui si inserisce lo *Zagreb Pier* si sono rivelate decisamente sfidanti e hanno costretto i progettisti a elaborare soluzioni adeguate a mitigarne gli effetti. Particolarmente delicata appare la condizione del terreno di fondazione nello stato di fatto, con la presenza di uno spessore di circa 25 m di terreni coesivi molli, impostati su substrato roccioso. Il progetto prevede la realizzazione di un grande scanno d'imbasamento (dell'altezza massima di 20 m) con protezioni superficiali a scogliera, che costituisce elemento di appoggio delle strutture in elevazione della banchina, realizzate utilizzando grandi cassoni in c.a., prefabbricati. Il terreno di fondazione verrà quindi rinforzato per mezzo di:

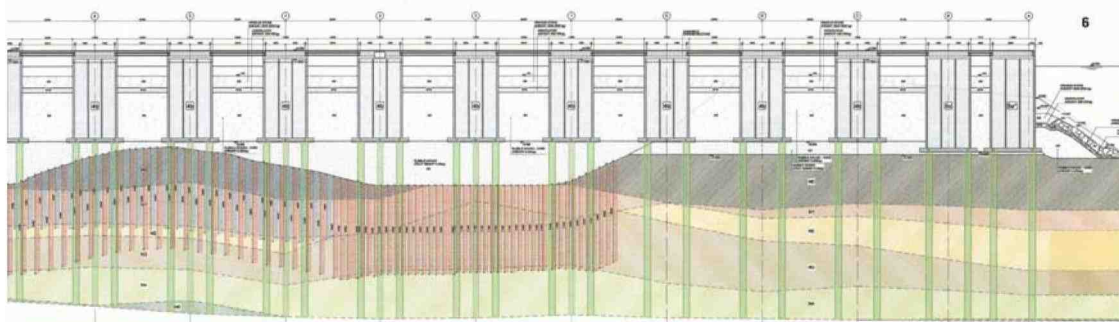
- Trattamenti colonnari in jet-grouting (del diametro di 1.400 mm e 1.700 mm), disposti a scacchiera, a interassi di circa 7 x 4 m;
- Colonne in ghiaia (del diametro di 80 cm) disposte secondo uno schema a quinconce, a interasse di circa 3,5 m.

Lo sviluppo di questi lavori di rinforzo, in relazione alla complessa batimetria del sito d'intervento, e per l'articolata suddivisione in strati del terreno di fondazione, ha

comportato una modellazione tridimensionale del suolo e degli elementi strutturali del progetto. Tale attività, sviluppata per mezzo di una procedura BIM (*Building Information Modeling*), con un software tridimensionale in grado di gestire con accuratezza superfici NURBS (*Non Uniform Rational Basis-Splines*), ha consentito di individuare con precisione il posizionamento delle singole colonne di ghiaia e jet-grouting, sull'intera estensione planimetrica del progetto. I dati di posizionamento sono stati integrati con indicazioni della profondità di ogni elemento, in relazione alla particolare stratigrafia locale. Opportuni criteri di rifiuto, comprendenti la valutazione della rotazione di perforazione prevista, sono stati forniti al fine di assicurare un'adeguata penetrazione delle colonne di rinforzo negli strati rigidi in profondità.

La progettazione geotecnica ha comportato un'approfondita analisi del comportamento del terreno, con riferimento alla suddivisione in fasi dell'attività costruttiva e alla necessità di un'adeguata organizzazione dei rilevati sommersi di precarico, al fine di contenere lo sviluppo di cedimenti nel tempo (nelle zone di banchina i limiti contrattuali impongono uno spostamento verticale massimo pari a soli 50 mm).

6. Sezione geologica longitudinale



Stabilità dell'impalcato tra onde e rischio sismico

Un ulteriore fattore ambientale significativo è quello relativo ai carichi d'onda. A seguito dello studio idraulico meteorologico condotto, è stata identificata un'altezza massima di onda di progetto superiore a 7 m (per un periodo di ritorno di 100 anni). La correlazione diretta tra altezza d'onda e pressione esercitata, però, è stata studiata e teorizzata nel corso degli anni per i due casi limite maggiormente diffusi:

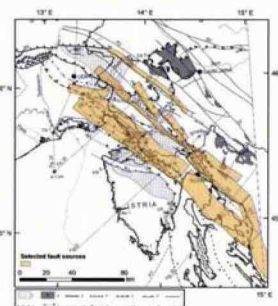
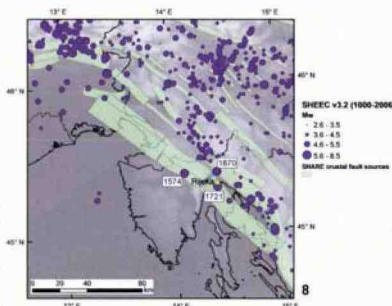
- Banchina a giorno su pali: pressione su cilindro isolato (teoria di Morison);
- Banchina continua: pressione su fronte continuo (teoria di Sainflou, teoria di Goda).

Il caso in oggetto non rispecchia nessuna di queste strutture, è piuttosto un ibrido tra le due. L'impalcato infatti trova alloggio sul supporto di grandi cassoni in calcestruzzo armato auto affondanti, aventi dimensione planimetrica di circa 20 x14 m, per un'altezza complessiva di circa 23 m, progettati secondo 5 distinte tipologie geometriche, a seconda delle caratteristiche locali del sito d'intervento. Alcuni di questi elementi presentano pareti perimetrali cieche, sulle quali trovano appoggio i rilevanti di imbascamento. In altri casi i cassoni sono dotati di alte torri isolate, al fine di massimizzare la permeabilità della struttura rispetto alla propagazione ondosa.

Per avere quindi una stima realistica degli effetti del moto ondoso e ottimizzare al meglio le strutture è stato realizzato presso il dipartimento di studi navali, Brodarski Institut, dell'Università di Zagabria un modello fisico della banchina in scala 1:35, testato per due diverse condizioni incidenti delle onde definite sulla base dello studio idraulico meteorologico. Con i risultati ottenuti dal modello fisico è stato possibile valutare le pressioni agenti sulle pareti dei cassoni e i carichi di uplift agenti sull'impalcato.



Rijeka, inoltre, si trova in un'area a elevato rischio sismico. Per determinare con grande precisione i parametri della sismicità locale del sito d'intervento, si è eseguita una sofisticata analisi di micro-zonazione sismica, utilizzando dati registrati, nell'ambito di studi internazionali, sulla sismicità del sito, con analisi statistiche sui sistemi di faglie, sui complessi delle placche tettoniche e sulla sismicità locale.

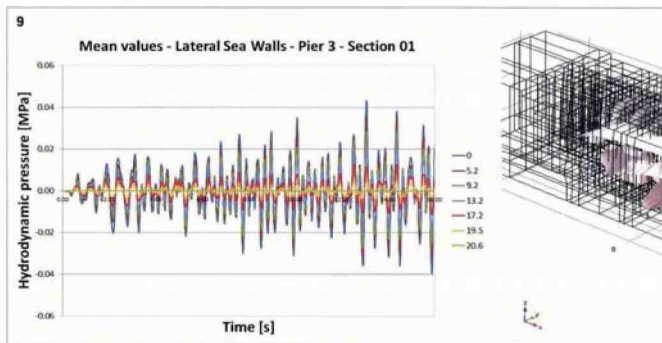


Si sono inoltre svolte approfondite analisi numeriche, comprendenti la modellazione tridimensionale, agli elementi finiti, degli effetti idrodinamici sulle masse fluide nell'intorno dei cassoni e analisi dinamiche non lineari, nel dominio del tempo, sia delle strutture in elevazione che delle opere di fondazione, al fine di determinare con precisione il comportamento dell'infrastruttura in condizioni sismiche. In particolare, gli aspetti principali da controllare sono stati la stabilità del cassone sotto il cosiddetto comportamento a "rocking" (ossia dondolio del cassone dovuto al suo semplice appoggio sul terreno di fondazione), il danno associato ai vari elementi in calcestruzzo armato incluse le fondazioni e l'influenza degli effetti torsionali dovuti alla geometria in pianta della banchina. A tal fine sono state dapprima eseguite delle analisi a spettro di risposta per avere una prima stima del comportamento sismico della struttura. In seguito sono state eseguite analisi non-lineari per mettere in risalto la complessa interazione

7a, 7b. Particolari del modello fisico (sviluppato dal Brodarski Institut di Zagabria)

8. Immagini tratte dallo studio di micro-zonazione sismica (elaborato da: Studio Geotecnico Italiano Sri)

9. Immagini tratte dallo studio fluidodinamico (elaborato da: Ricerca Sul Sistema Energetico - RSE SpA)





10. Vista del sito durante i lavori

sismica tra i vari elementi strutturali. In particolare sono state prima eseguite delle analisi statiche non-lineari per definire il legame dell'interfaccia cassone-fondazione per ogni tipologia di cassone. A seguito di tali analisi sono state condotte analisi dinamiche non-lineari, le quali hanno permesso di valutare lo stato di danno atteso per il terremoto di progetto, le deformazioni residue e la stima delle sollecitazioni interne dei cassoni e della sovrastruttura al fine della progettazione dell'armatura.

L'evoluzione del progetto

Il Terminal sarà composto principalmente di due zone con finalità operative differenti:

- La zona di banchina per il carico e scarico delle navi - quest'area occupa il lato mare del Terminal per una fascia di larghezza pari a circa 40 m. In questa zona è prevista l'installazione di gru mobili (N. 3 in Fase 1 e N. 4 in Fase 2) del tipo STS (*Sheep to Shore Gantry Crane*). Esse avranno un peso di 1.500 t, con scartamento di 35 m, altezza del centro di gravità pari a 40 m e sbraccio pari a 19 m. In corrispondenza delle rotaie, dove saranno presenti azioni verticali significative e localizzate, sono state predisposte travi prefabbricate con altezza maggiorata (1.80 m invece di 1.25m);
- Le aree del sito non comprendenti la superficie di banchina precedentemente definita sono destinate allo stoccaggio e alla movimentazione dei container. Queste zone comprendono le parti destinate alla bonifica e al riempimento tra la nuova banchina e la riva esistente. In queste zone sono stati sviluppati la viabilità interna del porto e i suoi collegamenti al sistema stradale circostante, nelle diverse fasi progettuali previste. Per la progettazione di quest'area è stata considerata la presenza costante di una pila di 6 container come massimo accatastamento, mentre per l'area di banchina si è considerata una pila di 4 container con la presenza eventuale di altri 2).

Molto approfondito, e commisurato all'importanza strategica della commessa, è stato il lavoro di validazione sul progetto condotto ufficialmente da parte di un team di esperti dell'Università di Zagabria e coadiuvato da un ufficio di Direzione Lavori internazionale (composto da Royal Haskoning DHV, con sede a Rotterdam e Londra e GI d.o.o. con sede a Zagabria). Questa esperienza progettuale ha rappresentato un'importante sfida da vari punti di vista: in questo articolo si è tentato di raccontarne alcuni, i più salienti.

La finalizzazione e il successo della progettazione ha richiesto, oltre alla collaborazione di diversi soggetti con professionalità differenti (società di ingegneria, centri di ricerca, università...) il fondamentale apporto tecnico e di know-how delle imprese GLF e Nuova Co.Ed.Mar. per le specifiche competenze. Si è trattato dunque di un complesso di figure che, con il loro contributo tecnico peculiare, hanno permesso la definizione ottimale della struttura e la risoluzione di tutte le criticità emerse durante il percorso di approvazione.

I lavori sono stati avviati nell'agosto del 2014 presso il porto di Brindisi, dove sull'impianto di prefabbricazione galleggiante "Benedetta", la GLF ha dato inizio alla prefabbricazione dei primi 4 cassoni, successivamente trasferiti a rimorchio presso il porto di Rijeka. Qui tali cassoni sono stati affondati su uno scanno d'imbasamento temporaneo, a formare una banchina provvisoria. Collegata alla costa tramite un ponte provvisorio in struttura prefabbricata di acciaio, essa ha realizzato il sistema di protezione dalle onde di un nuovo impianto di prefabbricazione galleggiante realizzato in sito e utilizzato per la costruzione di tutti gli altri cassoni. Contemporaneamente sono state avviate le operazioni di dragaggio e preparazione del fondale. Ad oggi sono stati ultimati e posizionati tutti i cassoni e l'impalcato è in fase di realizzazione: la fine lavori è prevista entro il 2018. ■■

