

PROGETTARE LA PROVA DI CARICO DI UNA BANCHINA PORTUALE

Pierluigi Alesiani (p.alesiani@pm.univpm.it)
Paolo Ruggeri, Viviene M. E. Fruzzetti, Giuseppe Scarpelli
Università Politecnica delle Marche, Dipartimento SIMAU

ABSTRACT

L'intervento di adeguamento strutturale di una banchina portuale a nuove esigenze operative, che prevedono fondali profondi e sovraccarichi elevati, ha fornito lo spunto per una riflessione sui criteri da adottare per la progettazione di una prova di carico da eseguirsi ai fini del collaudo statico dell'opera. A differenza delle usuali prove sui singoli elementi strutturali (pali, ancoraggi, ecc.), l'esecuzione di una prova di carico sul "sistema-banchina" è guidata da questioni di fattibilità tecnica ed economica legate al suo notevole sviluppo lineare e necessita quindi di attente valutazioni preliminari. Nella nota, sulla base dei risultati di un modello numerico FEM 3D, si individuano alcuni requisiti essenziali da rispettare per la definizione di una prova che sia rappresentativa del buon comportamento dell'opera e al contempo sostenibile in un contesto di risorse pubbliche limitate.

1. INTRODUZIONE

La realizzazione di infrastrutture sempre più complesse e sfidanti in contesti ambientali difficili sta aumentando la rilevanza delle prove di carico eseguite in sito come mezzo per verificare il comportamento delle opere in presenza delle azioni di progetto, in analogia a quanto viene correntemente fatto per ponti e viadotti. Un esempio è quello delle banchine portuali che a causa del "gigantismo navale" devono essere adeguate a fondali profondi e sovraccarichi elevati sui piazzali operativi (Ruggeri et al., 2019). Per queste opere dal notevole sviluppo lineare, l'esecuzione di prove di carico in vera grandezza presenta delle oggettive difficoltà esecutive rispetto alle quali si auspica un utile confronto tra ricercatori e figure professionali che operano nel settore. In quest'ottica, vengono qui presentate alcune analisi numeriche relative ad una banchina di recente adeguamento. Un modello numerico 3D agli elementi finiti ha consentito di valutare gli effetti indotti da prove con configurazioni di carico di diversa estensione planimetrica. I risultati dello studio offrono alcuni spunti di riflessione per la progettazione di una prova di carico sostenibile su di una banchina portuale così da bilanciare la necessaria richiesta di rappresentatività dei risultati delle prove con l'onerosità della loro realizzazione.

2. LA PROVA DI CARICO PER LE COSTRUZIONI: QUADRO NORMATIVO

Le prove di carico in generale vengono eseguite con l'obiettivo di valutare se la struttura, o l'elemento strutturale, sia in grado di resistere alle azioni di progetto con un adeguato margine di sicurezza e che i carichi di esercizio non producano deformazioni o danneggiamenti che rendano l'opera inutilizzabile o rapidamente degradabile.

Nel quadro normativo vigente per le costruzioni, definito dalle NTC 2018, le prove di carico sono esplicitamente richieste per alcuni elementi strutturali (pali e tiranti di ancoraggio) e per alcune strutture nel loro complesso (ponti stradali e ferroviari), tipicamente nell'ambito del Collaudo Statico. In tale contesto, la prova di carico è indicata come uno strumento per "identificare la corrispondenza del comportamento teorico con quello sperimentale" utile alla formazione del convincimento del Collaudatore sulla sicurezza dell'opera. Tenendo presente le grandezze significative per descrivere il comportamento dell'opera e le prestazioni attese, nel programma delle prove di carico vengono indicate entità e procedure relative alle azioni da applicare, nonché le modalità di misura degli effetti di tali azioni. Il capitolo 9 delle NTC 2018, dedicato al collaudo statico, richiede che la prova di carico verifichi il comportamento delle opere sotto le massime azioni di esercizio indicando pertanto come combinazione delle azioni da applicare quella caratteristica rara (*SLE-rara*). Questo requisito, che si colloca nel quadro della valutazione della sicurezza con il metodo semi-probabilistico agli stati limite, può in alcuni casi scontrarsi con questioni di fattibilità tecnica, esecutiva ed economica. Mezzi, uomini e tempi a disposizione per ricreare in scala reale le combinazioni di carico allo *SLE*, così come previste dal progetto, risultano talora inadeguati e insufficienti, soprattutto quando, come nel caso delle banchine portuali, si vogliono eseguire prove di carico sull'opera nel suo complesso. D'altra parte, nel §C9 della Circolare esplicativa si parla di applicazione della

combinazione rara “quando possibile”, tanto che viene richiesto uno “specifico calcolo” della struttura (o dell’elemento esaminato) i cui risultati, in termini di stato tensionale e deformativo, siano confrontati con i risultati della prova sperimentale.

Ma a questo punto, qualora non possa essere ragionevolmente raggiunta la severità della combinazione *SLE-rara*, quali possono essere i criteri per progettare una prova significativa in vera grandezza? Se da un lato sembra infatti ovvio che eseguire una prova di carico sul sistema sia comunque meglio che affidare il convincimento sulla sicurezza dell’opera unicamente ad altre considerazioni (verifica delle ipotesi di progetto, prove sui materiali e prove di carico su alcuni elementi...) dall’altro è lecito chiedersi quale sia l’entità del carico di prova in grado di fornire sufficienti informazioni per comprendere compiutamente come l’opera risponderà alle azioni e deformazioni a cui sarà soggetta.

Si anticipa sin da ora che, secondo il parere degli autori, le azioni applicate durante la prova debbano quantomeno determinare una variazione misurabile con ragionevole certezza statistica di alcune grandezze significative monitorabili in situ (forze, spostamenti, deformazioni). Inoltre, se la prova di carico non raggiunge la condizione *SLE-rara*, è essenziale che il giudizio sull’esito della prova possa avvalersi di un modello numerico interpretativo sufficientemente sofisticato che permetta di verificare la congruità della risposta osservata alle azioni applicate. La prova di carico risulterà in ogni caso tanto più significativa quanto più si avvicinerà alla condizione *SLE-rara*.

3. IL CASO STUDIO

Una vecchia banchina operativa nel porto commerciale di Ravenna è stata recentemente oggetto di un intervento strutturale di adeguamento alle attuali esigenze operative che prevedono un sovraccarico sui piazzali di 60 kPa ed un fondale a -13,0 m sul livello del mare. I lavori hanno previsto la costruzione di una struttura totalmente nuova, realizzata a tergo dell’esistente e resa a questa solidale. L’intervento, progettato per affidare l’intera sicurezza dell’opera alle sole nuove strutture, si compone di una paratia di pali trivellati collegati in testa da una robusta trave di coronamento in c.a., la quale va a incorporare la trave preesistente e alloggia le testate di ancoraggio di un allineamento di nuovi tiranti a bulbo iniettato. Infine, una maglia di pali a spostamento laterale (FDP) è stata realizzata per ridurre il rischio di liquefazione delle sabbie e migliorare le prestazioni della pavimentazione. I terreni presenti nel volume significativo dell’opera sono di origine geologicamente recente e generalmente caratterizzati da proprietà meccaniche modeste: lo strato più superficiale è un deposito di sabbia limosa mediamente addensata, seguito da uno di argilla limosa poco consistente, normalmente consolidata. Più in profondità, un sottile strato di sabbia delinea il passaggio ai depositi alluvionali pleistocenici di caratteristiche meccaniche migliori.

La Figura 1 mostra il modello geotecnico di una sezione trasversale tipo del banchinamento: gli elementi strutturali preesistenti sono disegnati in nero, mentre quelli nuovi in rosso.

Al termine dei lavori, le prestazioni della banchina nei confronti dei sovraccarichi operativi di progetto verranno valutate attraverso l’esecuzione di una prova di carico.

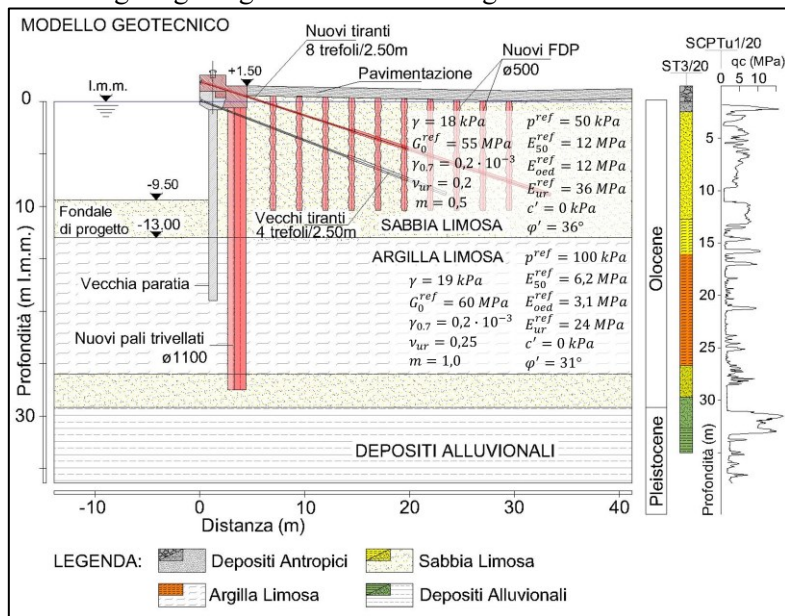


Figura 1. Modello geotecnico con vista in sezione dell’opera.

3.1 Modello FEM 3D

Il modello tridimensionale agli elementi finiti utilizzato per le analisi numeriche del presente studio include tutti i principali componenti del sistema opera-terreno: unità geotecniche, pavimentazione, paratia nuova ed esistente, trave di coronamento, tiranti e pali a spostamento. La larghezza del modello, pari a 50 m, comprende il concio di banchina compreso tra due giunti della trave, mentre altezza e lunghezza sono state scelte in ragione del volume significativo dell’opera e per limitare gli effetti di bordo. La mesh 3D di elementi finiti tetraedrici a 10 nodi

è illustrata in Figura 2. Le componenti strutturali, paratie e trave, sono state modellate come elementi di volume elastici, mentre la fondazione degli ancoraggi e i pali come elementi di tipo “*embedded beam*”. Per entrambe le principali unità geotecniche è stato adottato il modello costitutivo elasto-plastico “*Hardening Soil with Small Strain Stiffness*”. I parametri di input adottati, indicati in Figura 1, sono stati calibrati sulla base dei risultati di prove in sito e di laboratorio. Le analisi, svolte in condizioni drenate, sono state eseguite con il software *Plaxis 3D* e le fasi costruttive più rilevanti, dalla costruzione della banchina all’intervento di adeguamento strutturale, sono riprodotte per simulare correttamente l’intera storia tensionale. Per modellare la prova di carico sono stati inseriti dei carichi di superficie applicati alla pavimentazione, uniformemente distribuiti. Per ulteriori dettagli sulla modellazione, non riportati in questa nota per brevità, ci si potrà riferire ad Alesiani et al. (2023).

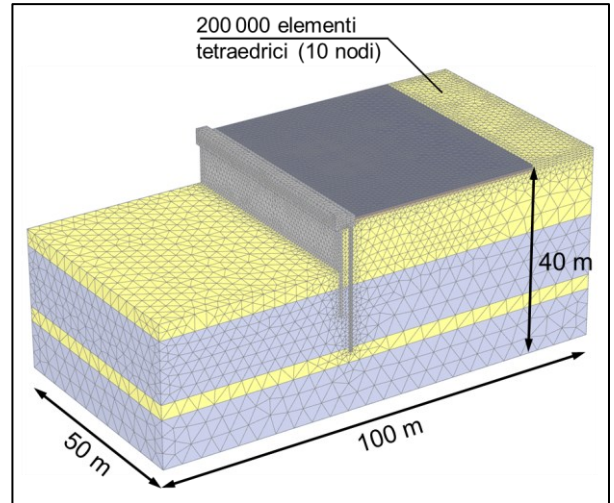


Figura 2. Mesh 3D agli elementi finiti.

3.2 Configurazioni di carico per le prove

Le Raccomandazioni AGI (1977) indicano, per un’opera a sostegno di uno scavo di altezza H , un volume di influenza che si estende a monte per $2H$ ed in profondità per $1,5H$. In linea con tali suggerimenti, le analisi 2D per il progetto dell’opera nella condizione di esercizio (SLE) erano state eseguite applicando un sovraccarico pari a 60 kPa, uniformemente distribuito sui piazzali di un concio di banchina lungo 50 m, esteso a monte del paramento per una larghezza pari a $2H$, cioè 30 m. Tale condizione di carico, che costituisce il riferimento base per la simulazione della prova di collaudo della banchina, viene denominata configurazione n.1 (Figura 3). Realizzare in pratica tale configurazione di prova risulta particolarmente oneroso e, attraverso la modellazione, è stata quindi valutata l’efficacia di prove con disposizioni di carico di limitata estensione.

Per dare alle valutazioni eseguite un carattere quanto più possibile generale, la scelta delle configurazioni di carico da considerare è stata fatta rispettando dei criteri geometrici tra area di carico e dimensioni fondamentali del sistema terreno-opera di sostegno. Come rappresentato negli schemi di Figura 3, le configurazioni di carico n.2 e n.3 sollecitano il cuneo di spinta attivo passante rispettivamente per il piede dello scavo e per il piede della paratia; tali aree di carico, di estensione $0,5H \times H$ (n.2) e $H \times 2H$ (n.3) hanno una forma rettangolare con il lato più lungo disposto in direzione longitudinale alla banchina e con un lato pari al doppio dell’altro. La configurazione di carico n.4 interessa una sezione dell’intero volume significativo a tergo dell’opera ed ha estensione $2H \times H$ con il lato lungo in direzione trasversale alla banchina. Si fa notare che, proprio in un’ottica di individuazione di una soluzione efficace ma in grado di ottimizzare le risorse disponibili, le configurazioni di carico n.3 e n.4 hanno la stessa dimensione in pianta e differiscono solo per la loro disposizione rispetto alla banchina.

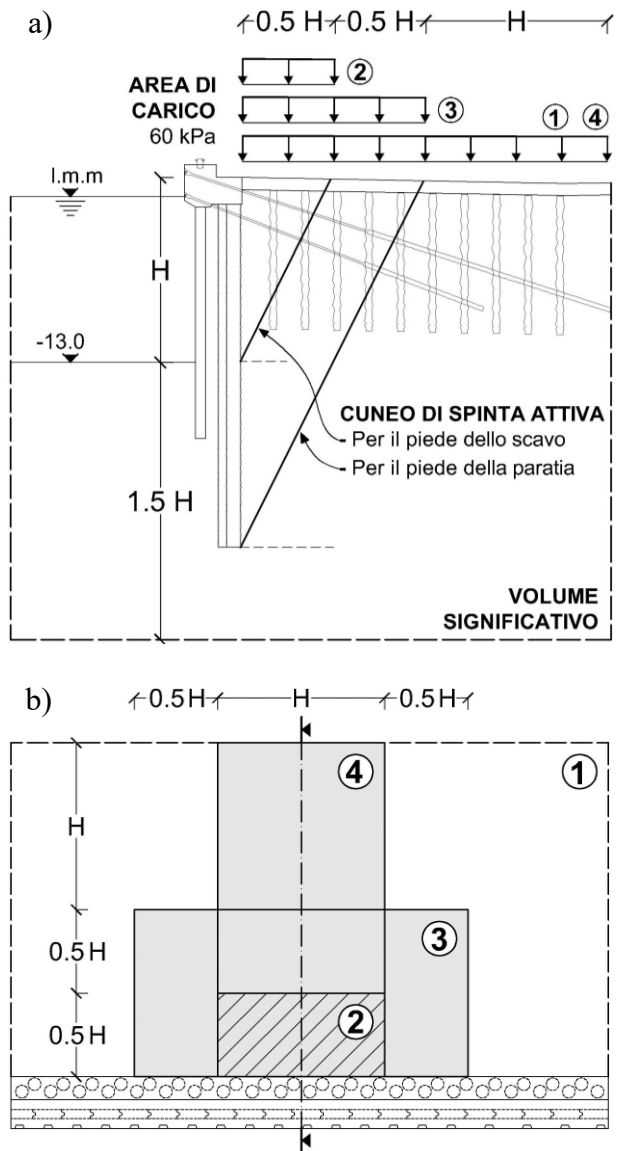


Figura 3. Configurazioni di carico analizzate:
 a) sezione verticale; b) vista in pianta.

4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La Figura 4 mostra i risultati delle analisi numeriche in termini di spostamento orizzontale della sezione di mezzeria della paratia per effetto delle quattro configurazioni di carico considerate. È possibile affermare che:

- i) la configurazione di carico n.1, rappresentativa di una striscia di carico di lunghezza indefinita estesa per una larghezza che ricopre l'intero schema geometrico e quindi idonea a simulare la combinazione di carico *SLE-rara* di un tipico modello di analisi 2D, determina spostamenti massimi di 25 mm;
- ii) le configurazioni di carico n.2, 3 e 4 di estensione planimetrica limitata, determinano spostamenti massimi tra 1 e 7 mm, significativamente inferiori a quelli indotti dalla configurazione di carico n.1; appare quindi difficilmente perseguibile l'obiettivo di riprodurre gli effetti di un carico indefinitamente esteso utilizzando un'area di carico limitata;
- iii) la configurazione di carico n.2 ha una dimensione in pianta insufficiente a generare effetti misurabili sull'opera di sostegno e non appare pertanto adeguata allo scopo di una prova di carico, cioè quello di verificare la corrispondenza del comportamento teorico con quello sperimentale;
- iv) le configurazioni di carico n.3 e 4, pur determinando spostamenti modesti (5-7 mm) sull'opera di sostegno, possono risultare adeguate agli obiettivi di una prova di carico se si adottano modelli numerici avanzati e un sistema di monitoraggio che include misure topografiche ed inclinometriche di precisione;
- v) dal confronto tra i risultati delle configurazioni di carico n.3 e 4, che hanno la stessa dimensione in pianta e quindi richiedono il medesimo impegno in termini di mezzi e tempi, risulta una maggiore efficacia della configurazione di carico n.4, disposta con il lato lungo parallelamente alla banchina, in quanto determina maggiori spostamenti orizzontali sull'opera di sostegno.

In conclusione, la scelta delle configurazioni di carico per l'esecuzione di prove di carico utili al collaudo statico di una banchina portuale risulta complessa. Riprodurre le condizioni di carico *SLE-rara* di progetto è sempre particolarmente oneroso e spesso difficilmente perseguibile in pratica, specialmente in un'ottica di buon uso di risorse pubbliche limitate. I risultati delle analisi indicano che la possibilità di eseguire prove di carico adottando aree di dimensioni limitate è perseguibile, a patto che si producano effetti misurabili sull'opera e sia eseguita un'interpretazione delle misure tramite l'uso di modelli di calcolo adeguati a cogliere la risposta del sistema geotecnico alle piccole deformazioni.

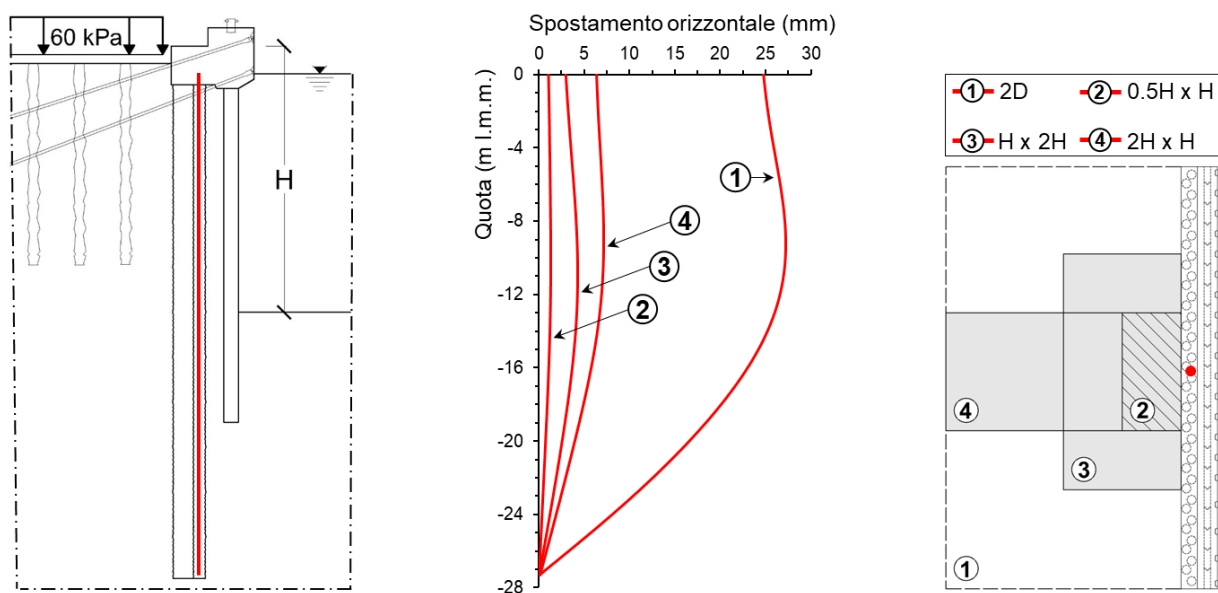


Figura 4. Risultati analisi FEM: spostamento orizzontale per effetto delle diverse configurazioni di carico.

5. BIBLIOGRAFIA

- AGI (1977). Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche.
- Alesiani P., Ruggeri, P., Fruzzetti, V. M. E., & Scarpelli, G. (2023). The potential of 3D numerical modelling for the interpretation of load tests on a sheet pile quay wall. *Manuscript submitted for publication*.
- Ruggeri, P., Fruzzetti, V. M. E., & Scarpelli, G. (2019). Renovation of quay walls to meet more demanding requirements: Italian experiences. *Coastal Engineering*, 147, 25-33.