

ANALISI DI LIQUEFAZIONE: UN CASO DI UN PONTE AUTOSTRADALE

Rossana Moraca, Piero Bongio, Maria Elena D'Effremo
(rossana.moraca@tecneautostrade.it, piero.bongio@autostrade.it, mariaelena.d'effremo@tecneautostrade.it)

Tecne Gruppo Autostrade per l'Italia S.p.A.

Riccardo Castellanza, Gabriele Frigerio, Francesca Romice
(riccardo.castellanza@unimib.it, frigerio@eg4risk.com, f.romice@campus.unimib.it)

Università Bicocca Milano

ABSTRACT. L'articolo presenta un caso di liquefazione dei terreni in corrispondenza di un ponte autostradale. Al fine di verificare la suscettibilità del sito a liquefazione sono state eseguite delle analisi dinamiche 2D del complesso opera-terreno. La modellazione del comportamento dello strato di terreno liquefacibile è stata simulata mediante l'utilizzo di modelli costitutivi avanzati, calibrando i parametri in input sulla base di prove dinamiche di laboratorio. L'articolo mette in evidenza gli effetti della liquefazione sull'opera ed evidenzia l'importanza di eseguire, al fine di migliorare la previsione della risposta del sito, una accurata calibrazione dei parametri geotecnici da utilizzare per la modellazione numerica. Ad oggi sono ancora in corso degli approfondimenti che consentiranno di valutare l'eventuale necessità di interventi di rinforzo.

1. INTRODUZIONE

Le NTC2018 e le Linee Guida per la Valutazione di Sicurezza dei Ponti Esistenti rendono necessarie le verifiche in fondazione in presenza di suscettibilità alla liquefazione. L'opera oggetto di tale articolo è collocata in un'area suscettibile a liquefazione, per cui risulta importante valutare gli effetti indotti al fine di verificare la stabilità della fondazione e la sua capacità resistente sotto carichi sismici.

2. CASO DI STUDIO: INQUADRAMENTO GENERALE

L'opera in esame, il cui primo impianto risale alla fine degli anni '50, è costituita da un impalcato in c.a. in semplice appoggio sulle spalle fondate su pali di diametro $\phi 400$ e lunghezza $L=7.5$ m. Negli anni '90, a seguito degli ampliamenti per la terza corsia, è stato realizzato un allargamento in acciaio dell'impalcato e delle corrispondenti spalle, quest'ultime fondate su micropali $\phi 220$ di lunghezza $L=17$ m.

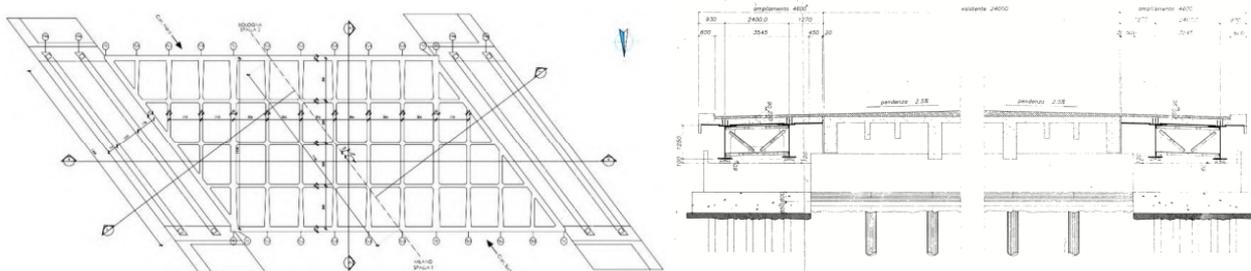


Figura 1. Pianta dell'opera sulla dx e sezione trasversale dell'attuale configurazione dell'opera a sx (opera storica al centro ed allargamenti simmetrici sulle due carreggiate).

Il sito è stato oggetto di due campagne di indagine volte alla definizione delle caratteristiche del sottosuolo. Dalle carte geologiche a disposizione e confermato dalle indagini eseguite, il sito è costituito in prevalenza da sabbie medio fini/ grossolane con un passaggio di strato netto tra le profondità di 9.5 – 12.5 m da pc. Tale spessore, in riferimento alla granulometria presente e alle condizioni al contorno, rappresenta lo spessore potenzialmente liquefacibile. La falda risulta a pochi metri dal pc.

In aderenza alle prescrizioni riportate al §.7.11.3.4.2 delle NTC18, sono state effettuate le verifiche a liquefazione del deposito; è stato, quindi, valutato il coefficiente di sicurezza (FL) e il potenziale di liquefazione (LPI) del deposito mediante metodi empirici (Seed& Idriss,1971-1982; Robertson&Wride,1998; Youd et al,

2001) sulla base delle risultanze delle indagini eseguite (SPT, CPT ed SCPT). Il valore di FL lungo tutto lo spessore di sabbia medio/fine risulta inferiore all'unità (Figura 2); ad esso corrisponde un LPI moderato (Iwasaki,1982; Sonmez, 2003). È stato ritenuto necessario, quindi, eseguire analisi sismiche del complesso opera-terreno al fine di indagare gli effetti attesi sull'opera a seguito di eventi sismici, soprattutto per l'opera storica.

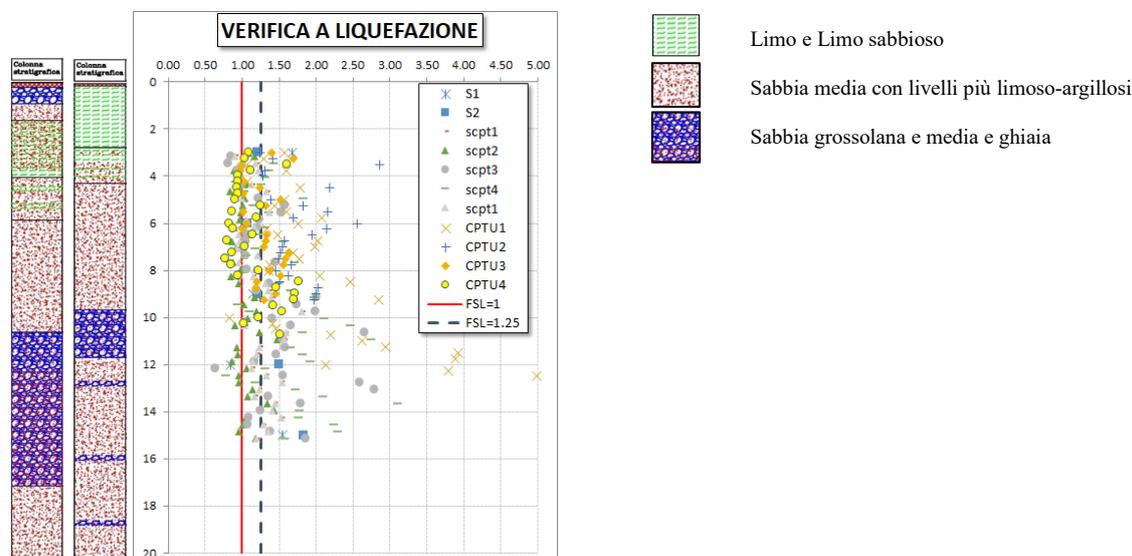


Figura 2. Fattore di sicurezza alla liquefazione con la profondità, relazionato alla stratigrafia del sito.

3. ANALISI NUMERICHE

3.1 Descrizione del modello numerico

Il comportamento del complesso opera-terreno è stato studiato mediante modelli 2D dinamici, utilizzando il software di calcolo agli elementi finiti MIDAS FEA NX, distribuito da CSPFEA Engineering Solutions.

Le spalle del ponte di primo e secondo impianto, analizzati con due modelli di calcolo differenti a parità di stratigrafia e parametri in input, sono state modellate come elementi di volume considerando la loro geometria reale, mentre i pali di fondazione sono stati modellati come elementi beam, la cui rigidezza tiene conto della loro disposizione geometrica in pianta.

I parametri geotecnici degli strati di terreno sono stati definiti dall'interpretazione delle prove eseguite. Per l'opera di primo impianto, a causa della variabilità stratigrafia in sito, sono stati analizzati distintamente due modelli in cui nel primo (modello **a**) i pali di fondazione risultano completamente all'interno dello strato liquefacibile mentre nel secondo (modello **b**), i pali sono infissi nello strato di sabbia grossolana. Il comportamento del terreno potenzialmente liquefacibile è stato assunto non lineare con incrudimento, la cui calibrazione è stata eseguita mediante prove di laboratorio. In dettaglio, tale strato è stato modellato con il legame costitutivo UBCSAND (Puebla, Byrne & Philips,1997; Beaty & Byrne,1998), un modello elasto-plastico con incrudimento sviluppato per simulare il fenomeno della liquefazione nelle sabbie e nei limi, in termini di tensioni efficaci. Gli ulteriori strati di terreno sono stati simulati con un legame costitutivo alla Mohr-Coulomb.

L'input sismico è rappresentato da un set di accelerogrammi spettro-compatibili per il sito in esame.

3.2 Calibrazione dei parametri geotecnici

Con lo scopo di modellare in maniera realistica il comportamento dinamico del terreno sono state eseguite prove di laboratorio cicliche su campioni rimaneggiati. La calibrazione dei parametri del legame costitutivo UBCSAND è avvenuta ricercando il best-fitting tra i risultati della simulazione numerica delle prove triassiali cicliche e i risultati ottenuti in laboratorio. I parametri che influenzano la simulazione, ovvero la densità relativa e la rigidezza del terreno, elastica e plastica, sono stati variati affinché la curva sperimentale si sovrapponesse a quella numerica (Figura 3). In particolare, la simulazione numerica delle prove di laboratorio è stata fatta in controllo degli spostamenti, considerando la dilatanza del terreno nulla. Tale calibrazione, che induce in maniera

più rapida ad una riduzione delle tensioni efficaci, è cautelativa ai fini dei calcoli. I parametri risultanti dalla calibrazione, per il modello costitutivo adottato, sono riportati in Figura 4.

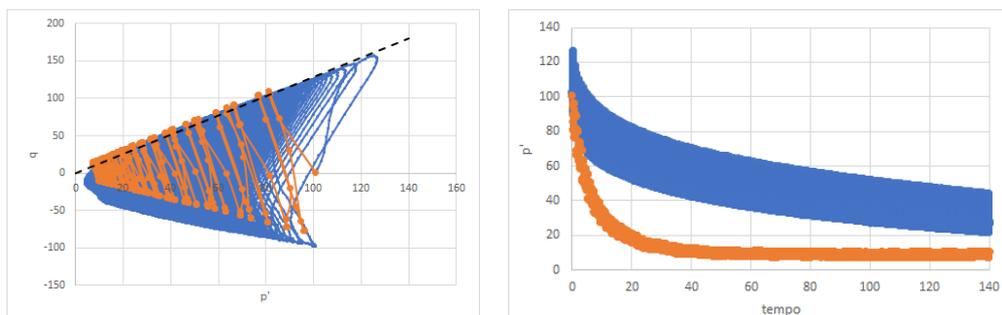


Figura 3. Calibrazione dei parametri in input: controllo di spostamento con dilatanza nulla - (in blu numeriche, in arancione sperimentale).

Parametri	Descrizione	Valore	
P_{ref}	Reference Pressure	100	kPA
Elastico			
K_G^e	modulo di taglio elastico	450	
n_e	esponente del modulo di taglio elastico	0.35	
Plastico			
ϕ_p	Angolo d'attrito di picco	28	°
ϕ_{cv}	angolo di attrito a volume costante	28	°
c	coesione	1	kPA
K_G^p	modulo di taglio plastico	920	
n_p	esponente del modulo di taglio plastico	0.35	
R_r	Rapporto di rottura	0.74	
F_{post}	fattore di calibrazione post liquefazione	0.9	
F_{dens}	fattore di calibrazione densificazione terreno	0.5	

Figura 4. Parametri di input strato di terreno liquefacibile.

3.3 Risultati delle analisi e confronti

Lo studio ha consentito di analizzare il complesso opera-terreno per diversi stati limite (SLD, SLV, SLC) ai sensi delle NTC'18 e di valutare, quindi, la necessità di prevedere o meno interventi per ridurre la suscettibilità alla liquefazione e/o di rinforzo delle fondazioni. All'atto del sisma, lo strato potenzialmente liquefacibile, che risponde in condizioni non drenate, mostra una suscettibilità alla liquefazione marcata in corrispondenza del canale (Figura 5, sx) e un accumulo di deformazioni plastiche in corrispondenza dei pali di fondazione (Figura 5, dx). Il modello 2D, tuttavia, presenta dei limiti di modellazione dovuti al fatto che i pali non vengono visti discontinui, ciò, presumibilmente, favorisce l'accumulo di deformazioni plastiche e la formazione di superfici di rotture in spinta passiva in corrispondenza dei pali.

Si mostrano di seguito le schermate di output del software di calcolo per l'opera di primo impianto.

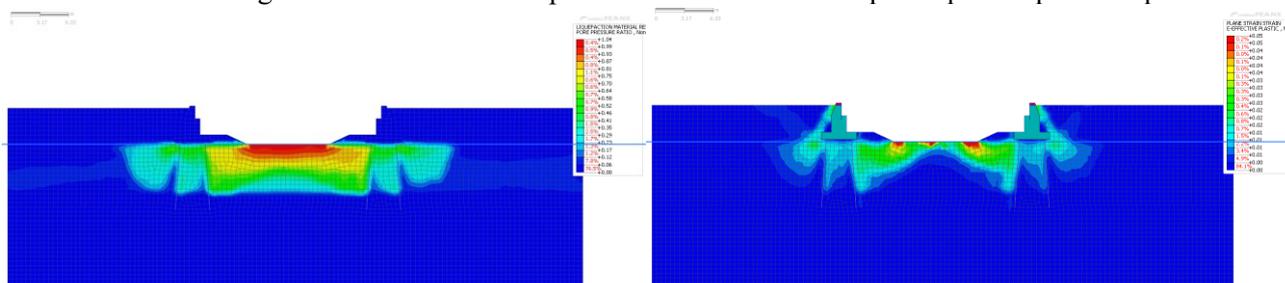


Figura 5. Opera 1° impianto. Output calcolo: resistenza alla liquefazione sulla sx e deformazioni plastiche sulla dx.

Nella fase corrispondente all'atto del sisma, sono state estrapolate dal modello le sollecitazioni flettenti e taglianti lungo i pali allo SLV e si è osservato un importante incremento delle stesse rispetto alla condizione statica.

In termini di spostamenti, valutati in corrispondenza dei piani di appoggio dell'impalcato, sono stimati valori dell'ordine di 10 mm per l'opera storica. Il modello **a** mostra valori di spostamenti più alti del modello **b**, ma con ordine di grandezza comparabili, di contro le sollecitazioni sui pali sono più basse.

Allo stato attuale, considerando un intervento con iniezioni in corrispondenza del canale (curva in rosso, Figura 6), anche di spessore contenuto, i cedimenti attesi si dimezzano e i pali risultano meno sollecitati. Come si osserva in Figura 6, nel caso senza iniezioni (curva in blu), l'analisi non converge, pertanto, il dato sullo spostamento finale non risulta del tutto affidabile. Sono tutt'ora in corso delle analisi per l'affinamento dei risultati. Per i pali dell'ampliamento, gli spostamenti massimi si assestano su valori più bassi.

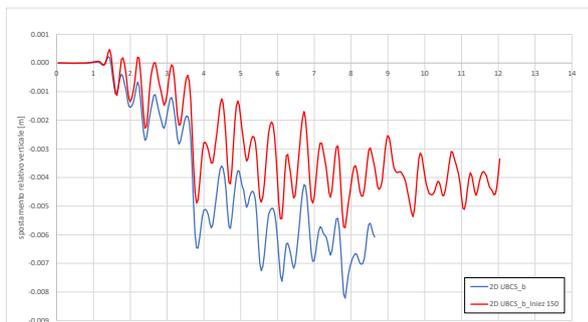


Figura 6. Modello b - cedimenti opera di primo impianto con e senza interventi (iniezioni 150 cm)

3.4 Sviluppi futuri

Lo studio dell'opera in atto verrà approfondito considerando le fasi post sisma, valutando, quindi, gli effetti della dissipazione delle sovrappressioni interstiziali fino ad una condizione drenata del sito.

I successivi approfondimenti consentiranno di definire gli eventuali ulteriori interventi sull'opera.

5. CONCLUSIONI

Al fine di verificare la suscettibilità alla liquefazione di un sito potenzialmente liquefacibile e i possibili effetti sull'opera, è stata eseguita un'analisi di interazione dinamica 2D. I parametri del modello costitutivo utilizzato per la modellazione dello strato di terreno liquefacibile sono stati calibrati mediante l'elaborazione dei risultati di prove di laboratorio cicliche. Il modello di interazione ha consentito di definire gli effetti sull'opera durante un evento sismico per i diversi stati limite analizzati. I risultati della simulazione numerica, al momento solamente all'atto del sisma, mostrano una suscettibilità alla liquefazione marcata all'interno del canale, spostamenti dell'opera di primo impianto dell'ordine di 10 mm e incrementi delle sollecitazioni sui pali.

5. BIBLIOGRAFIA

- D.M. 17.01.2018. Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni (Gazzetta ufficiale 20/02/2018 n. 42).
MIT, 2022. Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti.
H.Seed, I.M.Idriss (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 97(9).
H.Seed, I.M.Idriss (1982). Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. *Earthquake Engineering Research Institute Monograph, Oakland, Calif.*
Youd et al. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshop on evaluation of liquefaction resistance of soil. *J. Geotech and Geoenviron Eng.*, 817-833.
.P.Robertson, C.Wride (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Can. Geotech. J., Ottawa* 35(3).
Iwasaki et al. (1982). Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes. *Proceedings of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Southampton, UK*, 925-939.
Sonmez (2003). Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol, Turkey). *Environmental Geology* 44 (7), 862-871.
MIDAS FEA NX Manual. Analysis Reference_Chapter 4- Materials, 71-75.
Beatty, M. and Byrne, P.M. (1998). An effective stress model for predicting liquefaction behaviour of sand. *Geotechnical Earthquake Engineering and soil dynamics III, ASCE, Geotechnical Special Publication 75(1)*, 766-777.
Puebla, H., Byrne, P.M., Phillips, R. (1997). Analysis of CANLEX liquefaction embankments: prototype and centrifuge models. *Can. Geotech. J.* 34, 641-657.