

Valutazione in ambiente GIS del danno sismico di strutture portuali marittime: il caso del porto di Gioia Tauro

Seismic damage assessment of maritime port structures under GIS environment: the Gioia Tauro port case study

Antonino Famà¹, Francesca Bozzoni², Carlo G. Lai³ ■

Sommario

Terremoti recenti (Port-au-Prince, Haiti, 2010; Maule, Cile, 2010; Tohoku, Giappone, 2011; Samara, Costa Rica, 2012) hanno mostrato in modo drammatico la vulnerabilità sismica delle strutture portuali marittime ed i gravi danni che possono essere causati dallo scuotimento sismico e dagli effetti co-sismici. Il danneggiamento delle strutture portuali ha sia conseguenze immediate, nelle fasi successive all'evento sismico, per il ruolo strategico rivestito dai porti per le finalità di Protezione Civile, sia effetti sul lungo periodo a causa dei tempi di riparazione delle strutture danneggiate. In questo contesto, emerge l'importanza di valutare e mitigare il rischio sismico associato a questa tipologia di strutture. L'articolo illustra l'applicazione al porto di Gioia Tauro di una metodologia, messa a punto in ambiente GIS per la stima del danno sismico potenzialmente indotto sulle strutture portuali marittime, tenendo conto sia degli effetti locali di amplificazione sismica, che della suscettibilità a liquefazione dei depositi di terreno all'interno dell'area portuale.

Parole chiave: GIS, danno sismico, porto di Gioia Tauro.

Abstract

Recent earthquakes (Port-au-Prince, Haiti, 2010; Maule, Chile, 2010; Tohoku, Japan, 2011; Samara, Costa Rica, 2012) have dramatically demonstrated the seismic vulnerability of seaport structures and the severe damages that can be caused by ground shaking and co-seismic effects. The damage to port facilities has both immediate consequences, in the aftermath of the seismic event, for the strategic role played by ports for the Civil Protection purposes and long term effects because of the restoration time of the damaged structures. In this framework, the importance to evaluate and mitigate the seismic risk associated to this type of structures turns out. The paper illustrates the application to the Gioia Tauro port case study of a methodology, set up under GIS environment for the estimation of the seismic damage potentially induced on maritime port facilities, taking into account both the local effects of seismic amplification and the susceptibility to liquefaction of soil deposits within the port area.

Keywords: GIS, seismic damage, Gioia Tauro port.

1. Introduzione

L'80% del commercio globale in termini di volume è gestito attraverso la rete dei porti marittimi ed il 74% delle merci, a livello europeo, sono trasportate via mare. La movimentazione dei *container* è cresciuta su scala globale dai 90 milioni di TEUs nel 1990 ai 590 milioni di TEUs nel 2012, con un aumento di oltre il 550%; questa crescita è stata interrotta soltanto dalla crisi globale del 2009, con una diminuzione del 14% (Rapporto Jones Lang LaSalle, 2013). Secondo le ultime previsioni il volume

dei *container* trasportati potrebbe raddoppiare al 2030; questa crescita coinvolgerà soprattutto i porti asiatici, ma anche l'Europa è protagonista di una previsione di crescita pari al 50% nel 2030, passando dai 95 milioni di TEUs movimentati nel 2012 a 150 milioni di TEUs nel 2030 (Rapporto Jones Lang LaSalle, 2013).

A seguito di forti terremoti, avvenuti sia in passato (Loma Prieta negli Stati Uniti, 1989; Kobe in Giappone, 1995; Tokachi-Oki in Giappone, 2003), che recentemente (Port-au-Prince nello stato di Haiti, 2010; Maule in Cile, 2010;

¹ Università degli Studi di Pavia - ✉ antonino.fama@eucentre.it

² Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Fondazione Eucentre, Pavia - ✉ francesca.bozzoni@eucentre.it

³ Università degli Studi di Pavia, Fondazione Eucentre, Pavia - ✉ carlo.lai@unipv.it

Tohoku in Giappone, 2011; Samara in Costa Rica, 2012), numerose strutture portuali, in particolare le opere di accosto, sono state danneggiate non solo in vicinanza dell'epicentro, ma anche a distanze considerevoli, a causa dei fenomeni di amplificazione sismica e di instabilità del terreno, quali liquefazione e cedimenti indotti dallo scuotimento sismico (Figura 1).

L'ubicazione in zone a sismicità medio-elevata di numerosi ed importanti porti marittimi italiani costituisce una condizione di potenziale rischio al verificarsi di un evento sismico. La stima della vulnerabilità sismica di strutture portuali marittime italiane è oggetto di un progetto finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile al Centro Europeo di Ricerca e Formazione in Ingegneria Sismica (Eucentre, Pavia). Il progetto dal titolo "Vulnerabilità e rischio sismico di strutture portuali marittime italiane" riguarda numerosi ed importanti porti italiani, quali Gioia Tauro, Salerno, Ancona, Messina, solo per citarne alcuni, ubicati in zone a sismicità medio-elevata. Nell'ambito del progetto, è stata sviluppata una procedura di calcolo (Bozzoni et al., 2011; Bozzoni e Lai, 2012) avente lo scopo di valutare il danno sismico potenzialmente indotto sulle opere portuali, a partire dalla definizione della pericolosità sismica, tenendo conto sia degli effetti di sito, che del potenziale rischio di liquefazione; la metodologia sviluppata impiega la tecnologia GIS (*Geographical Information System*), sfruttandone le potenzialità ed i vantaggi. L'attenzione di questo articolo è posta sull'applicazione di tale procedura al caso di studio del porto di Gioia Tauro, il più importante scalo marittimo per movimentazione di *containers* in Italia e primo *terminal* per *transshipment* del mar Mediterraneo (<http://www.portodi-gioiatauro.it>). Il porto è ubicato in *zona 1* secondo la classificazione sismica del territorio nazionale aggiornata al 2014 (<http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/classificazione.wp>).

L'obiettivo principale dello studio condotto al porto di Gioia Tauro è la valutazione della vulnerabilità sismica delle principali strutture ed infrastrutture portuali. I dati di partenza (e.g., informazioni tecniche relative alle opere portuali, dati geotecnici, rilievi batimetrici) resi disponibili dall'Autorità Portuale di Gioia Tauro, grazie al supporto della Terza Sezione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, sono stati elaborati ed organizzati in una banca dati informatica con interfaccia cartografica georeferenziata GIS, fruibile tramite *web* come piattaforma *webGIS*. La piattaforma non solo raccoglie i dati tecnici relativi ai porti, ma costituisce anche un potente strumento di elaborazione dei dati primitivi mediante l'applicazione degli strumenti di calcolo messi a punto per la valutazione del potenziale di liquefazione, dei cedimenti indotti nel terreno e del danno sismico.

La pericolosità sismica di base al sito del porto di Gioia Tauro è stata definita in accordo alle prescrizioni contenute nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC, 2008). L'azione sismica è rappresentata in termini di spettri di risposta elastici in accelerazione e di accelerogrammi naturali sismo-compatibili e spettro-compatibili per ciascun periodo di ritorno oggetto di studio (i.e., 100, 475 e 950 anni).

La valutazione della risposta sismica locale è stata condotta a partire da un'opportuna modellazione geotecnico-sismica dell'area portuale di Gioia Tauro, basata sui dati ottenuti dalle campagne di indagini geognostiche eseguite al porto. La notevole estensione del porto, la disomogenea caratterizzazione dell'area portuale e l'interpretazione dei dati da prove in sito hanno portato alla definizione di due modelli geotecnico-sismici da utilizzare nelle analisi di risposta sismica locale: uno riferito alla zona settentrionale dell'area portuale di Gioia Tauro ed uno per la zona meridionale. La configurazione geometrica del tetto del substrato, degli

Figura 1
 a) Fenomeni di espansione laterale indotti da liquefazione a rissosso del molo Nord del porto di Port-au-Prince (Haiti) a seguito dell'evento di magnitudo 7 del 12/01/2010 (GEER-021, 2010).
 b) Danni estesi alle strutture portuali di Coronel (Cile) in seguito al terremoto del 27/02/2010 di magnitudo 8.8 (GEER-022, 2010).



andamenti plano-altimetrici delle interfacce di separazione e dei contatti tra le diverse unità lito-stratigrafiche hanno indicato come soddisfacente un modello monodimensionale (1D) a strati piani e paralleli delle principali formazioni per entrambe le aree del porto. Per tenere in considerazione le incertezze relative alla caratterizzazione geologica, geotecnica e lito-stratigrafica delle aree portuali e della variabilità dell'input sismico sono state effettuate analisi affidabilistiche della risposta sismica locale.

La valutazione della suscettibilità alla liquefazione e dei relativi spostamenti indotti nel terreno nell'area portuale oggetto di studio è stata effettuata mediante l'utilizzo di approcci empirici sia di natura deterministica, che probabilistica. La procedura di calcolo adottata prevede l'impiego di tre approcci metodologici indipendenti, utilizzati congiuntamente in modo da poter pervenire ad una valutazione della suscettibilità alla liquefazione che tenga conto dell'incertezza dei metodi adottati.

La stima del danno atteso in caso di evento sismico è stata effettuata per le principali strutture portuali di Gioia Tauro, il cui potenziale danneggiamento influirebbe in modo significativo sulla funzionalità del porto, mediante l'applicazione di curve di fragilità. I dati ed i risultati delle elaborazioni effettuate per il porto di Gioia Tauro sono integrati nell'infrastruttura di dati geografici in uso da parte del Dipartimento della Protezione Civile e sono pienamente fruibili tramite la piattaforma webGIS, sviluppata nell'ambito del progetto.

2. Procedura di calcolo per la stima del danno sismico alle strutture portuali marittime

La stima del danno potenzialmente indotto alle strutture portuali da un evento sismico è di fondamentale importanza, dato il ruolo strategico rivestito dai porti marittimi. I porti hanno, infatti, una funzione chiave nell'ambito della gestione dell'emergenza, in quanto rappresentano *entry points* privilegiati in caso di evento sismico. Inoltre, la riduzione o la perdita di funzionalità delle strutture portuali possono avere drastiche conseguenze economiche sia a livello locale, che nazionale ed internazionale. Al fine di valutare il danno sismico atteso alle strutture del porto di Gioia Tauro è stata adottata la procedura generale di calcolo, basata sulla tecnologia GIS, illustrata in Bozzoni et al. (2011) e Bozzoni e Lai (2012). Le fasi principali della procedura di calcolo adottata sono schematizzate in Figura 2; è importante sottolineare che tutte le fasi possono essere condotte a vari livelli di complessità, applicando algoritmi ed approcci più sofisticati

sulla base della quantità e qualità dei dati disponibili. La tecnologia GIS svolge un ruolo chiave sia per l'organizzazione dei dati tecnici raccolti, relativi alle strutture, sia per l'elaborazione delle informazioni attraverso l'utilizzo di codici di calcolo appositamente sviluppati.

2.1 Valutazione della pericolosità sismica

I danni causati da terremoti alle strutture portuali possono essere dovuti a diversi fenomeni, quali scuotimento sismico, liquefazione, cedimenti del terreno e, per terremoti di forte intensità, rottura di faglia. La procedura di calcolo implementata prevede per la stima della pericolosità sismica le seguenti fasi:

- definizione dell'azione sismica su suolo rigido (pericolosità sismica di base);
- analisi di risposta sismica locale per tener conto dei possibili effetti di amplificazione sismica;
- valutazione della suscettibilità alla liquefazione e dei cedimenti del terreno.

2.1.1 Pericolosità sismica di base

Per pericolosità sismica di base si intende quella componente di pericolosità dovuta alle caratteristiche sismologiche dell'area (tipo, dimensioni e profondità delle sorgenti sismiche, energia e frequenza dei terremoti); essa si riferisce a condizioni ideali di suolo roccioso affiorante e privo di irregolarità morfologiche (superficie topografica orizzontale) e fornisce le caratteristiche del terremoto di riferimento (Lai et al., 2009b). La procedura generale (Figura 2) prevede che la pericolosità sismica di base possa essere definita sia utilizzando una valutazione probabilistica, che mediante approcci deterministici.

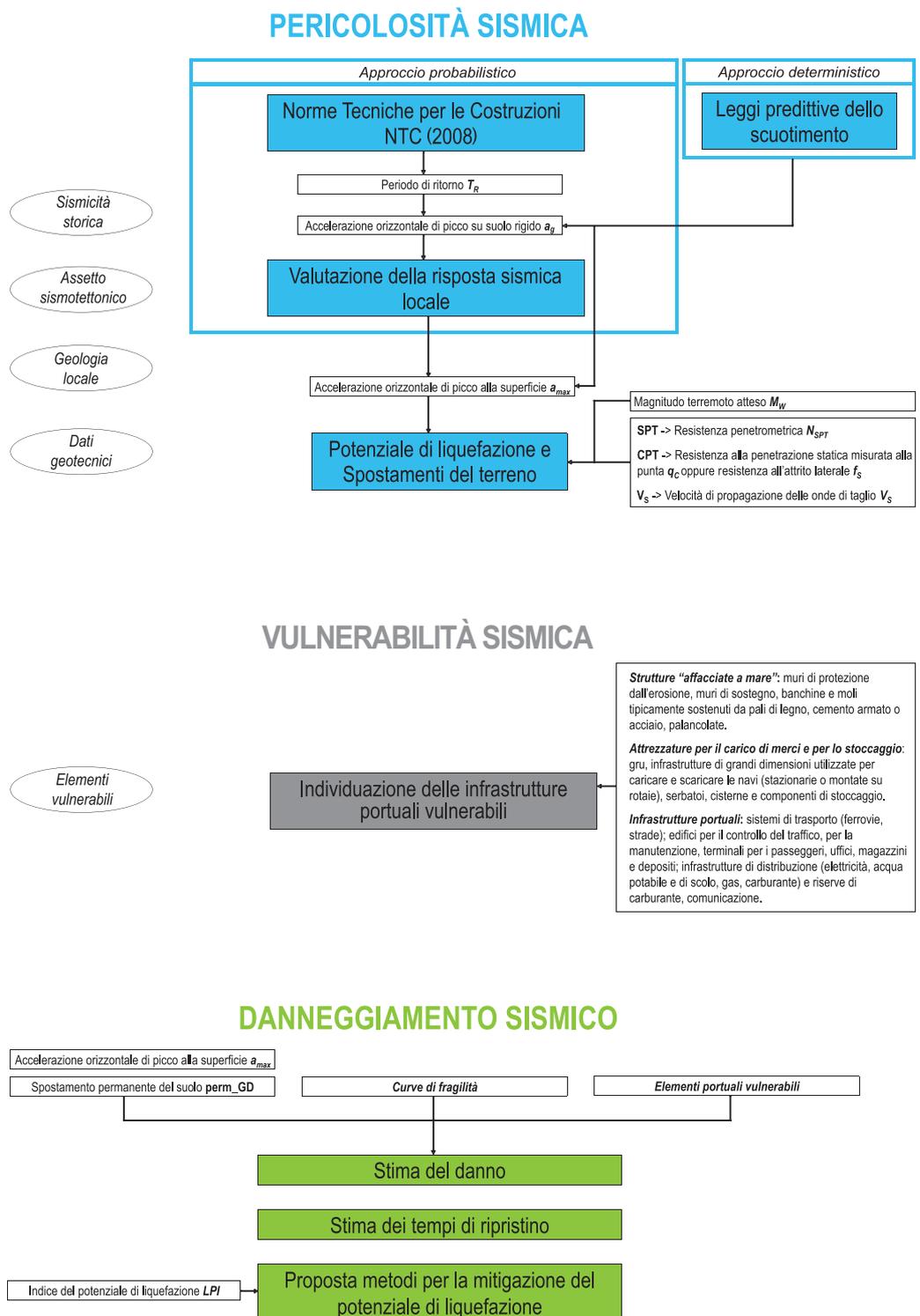
In Italia, la pericolosità sismica su suolo rigido è definita sulla base dei risultati di uno studio probabilistico condotto dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, INGV (<http://esse1.mi.ingv.it/>) in termini di spettri a pericolosità uniforme. Lo studio di pericolosità dell'INGV è stato recepito nelle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni, NTC (2008). Uno studio specifico, riportato in Bozzoni et al. (2011), è stato condotto per la definizione della severità dell'azione sismica; alla luce di questo studio, la verifica delle prestazioni delle strutture portuali viene effettuata con riferimento a tre periodi di ritorno: 100, 475 e 950 anni. In questo modo, la definizione dell'azione sismica è coerente sia con le prescrizioni contenute nelle NTC (2008), sia con importanti riferimenti internazionali in materia di porti, tra cui il PIANC (2001).

La procedura di calcolo messa a punto prevede, inoltre, per la stima del livello di scuotimento sismico atteso ai siti oggetto di studio l'impiego di leggi predittive dello scuotimento (*Ground*

Motion Prediction Equations, GMPEs). Nell'ambito del progetto, è stata messa a punto una metodologia che, mediante l'impiego delle GMPEs, consenta di sviluppare, in tempo reale, scenari di danno per le opere portuali più importanti, ovvero le strutture di accosto delle navi. Lo strumento di calcolo, completamente integrato nella piattaforma *webGIS*, richiede, come dati in ingresso, le principali caratteristi-

che sismologiche del terremoto e permette di stimare, in prima approssimazione, il livello di danneggiamento delle banchine portuali, durante le fasi immediatamente successive all'evento sismico. Ulteriori dettagli relativi all'algoritmo messo a punto per il calcolo degli scenari di danno in tempo reale ed alla sua applicazione pilota ai porti principali della Regione Calabria sono illustrati in Bozzoni et al. (2012).

Figura 2
Procedura generale per la stima del danno sismico di strutture portuali (Bozzoni et al., 2011).



2.1.2 Analisi della risposta sismica locale

È noto che le caratteristiche dello scuotimento del terreno sono fortemente influenzate dalle condizioni geologiche, geomorfologiche e geotecniche locali che modificano, a volte in modo significativo, il moto sismico di riferimento corrispondente alla pericolosità sismica di base. Gli effetti locali concorrono a modificare ampiezza, contenuto in frequenza e durata dell'azione sismica che risulta da uno studio di pericolosità di base, condotto con riferimento a condizioni *standard* di suolo, ovvero substrato roccioso affiorante e superficie topografica orizzontale (Lai et al., 2009b).

Per la valutazione degli effetti di sito, le norme tecniche NTC (2008) consentono l'utilizzo di un approccio semplificato, che attraverso l'utilizzo di opportuni coefficienti di suolo (S_S e C_C per gli effetti lito-stratigrafici) modifica la forma e le ampiezze delle ordinate dello spettro elastico.

In alternativa, è possibile valutare le modifiche che lo scuotimento subisce a causa degli effetti di sito mediante specifiche analisi di risposta sismica locale. La valutazione analitica degli effetti di sito richiede l'utilizzo di codici di calcolo specialistici, che consentono di simulare il fenomeno attraverso una modellazione numerica. Tali programmi differiscono per l'algoritmo di calcolo utilizzato e per le ipotesi considerate; possono simulare il comportamento meccanico dei terreni in termini di tensioni totali o efficaci, utilizzando modelli costitutivi lineari equivalenti o non lineari e si distinguono in monodimensionali, bidimensionali e tridimensionali, a seconda delle capacità di rappresentare la geometria e la cinematica di uno specifico problema. La scelta del modello di calcolo avviene sulla base della tipologia del sito da analizzare e delle conoscenze e dati a disposizione (geometria, proprietà dei materiali e *input* sismico).

Un modello di sottosuolo largamente utilizzato per la valutazione dell'amplificazione lito-stratigrafica per siti con ridotta variabilità laterale delle proprietà geotecniche è il modello a strati piani e paralleli. In questo caso, l'amplificazione sismica può essere studiata mediante l'impiego di codici di calcolo mono-dimensionali (1D) lineari equivalenti e diversi sono i programmi disponibili (e.g. SHAKE, EERA, STRATA, ProShake, DEEPSOIL, ecc.). Il modello viscoelastico, lineare-equivalente è idoneo a riprodurre la risposta sismica di terreni stabili intendendo con tale locuzione suoli a comportamento moderatamente non-lineare e cioè non suscettibili di forte degradazione della resistenza meccanica e della rigidità.

2.1.3 Suscettibilità alla liquefazione

Uno dei rischi più rilevanti, di tipo geotecnico-sismico, che si possono verificare all'interno di

un'area portuale è il fenomeno della liquefazione (GEER-021, 2010; GEER-022, 2010). Pertanto, particolare attenzione è stata posta sulla valutazione della suscettibilità alla liquefazione dei depositi di terreno nelle aree portuali. Il fenomeno della liquefazione implica una perdita totale o parziale della resistenza al taglio e della rigidità del suolo, a causa dell'incremento di pressione interstiziale durante lo scuotimento sismico in un terreno a grana grossa, poco addensato e saturo. L'incremento delle pressioni interstiziali indotte dagli sforzi di taglio ciclici, anche in terreni a conducibilità idraulica relativamente elevata, può, infatti, indurre una forte riduzione o persino l'annullamento degli sforzi efficaci nel terreno.

La stima della suscettibilità alla liquefazione può essere condotta mediante un approccio semplificato basato sull'utilizzo di correlazioni empiriche, messe a punto sulla base dei risultati di prove in sito di tipo penetrometrico o basate sulla misura della velocità di propagazione delle onde di taglio S (V_S). Tale approccio consta delle seguenti fasi: inquadramento geologico e geotecnico del sito, stima quantitativa della domanda sismica e valutazione della capacità o resistenza alla liquefazione del terreno a partire dai dati ottenuti dalle prove in sito. Le prove penetrometriche dinamiche (*Standard Penetration Tests*, SPT) e statiche (*Cone Penetration Tests*, CPT) sono preferibili, perché le relative correlazioni empiriche sono basate su un'ampia mole di dati e su una ricca casistica storica. Inoltre, rispetto ai metodi basati sulla misura di V_S , quelli sviluppati per SPT e CPT hanno il vantaggio di essere più direttamente correlati alla densità relativa, che ha una forte influenza sul comportamento ciclico dei terreni saturi (Idriss e Boulanger, 2008).

In generale, i metodi basati su correlazioni empiriche vengono impiegati con la consapevolezza che le previsioni ottenute devono essere ritenute valide solo in prima approssimazione. Pertanto, sulla base di un'approfondita ricerca bibliografica, sono stati selezionati diversi metodi da utilizzare congiuntamente in modo da poter pervenire ad una valutazione della suscettibilità a liquefazione e dei cedimenti del terreno che tenga conto dell'incertezza degli approcci adottati. Nell'ambito del progetto, è stata messa a punto una procedura di calcolo *ad hoc*, basata sui metodi più recenti ed accreditati a livello internazionale, sviluppati a partire dai dati ottenuti da prove penetrometriche SPT e CPT (e.g., Cetin et al. 2009; Idriss e Boulanger, 2012; Robertson, 2009; Ku et al., 2012).

I metodi delle "correlazioni di campagna" sono applicati seguendo due diversi approcci: l'approccio deterministico, in cui il verificarsi o

meno della liquefazione viene predetto, senza alcun trattamento probabilistico dei dati di ingresso, calcolando il fattore di sicurezza F_S , e l'approccio probabilistico, per il quale il potenziale di liquefazione di un terreno, in relazione ad un evento sismico prefissato, è descritto in termini di probabilità di liquefazione P_L . Gli approcci implementati consentono sia una valutazione puntuale della suscettibilità alla liquefazione alle diverse profondità, tramite il calcolo del fattore di sicurezza F_S e della probabilità di liquefazione P_L , sia una stima globale dell'incidenza del fenomeno e delle sue conseguenze, mediante l'indice del potenziale di liquefazione LPI (*Liquefaction Potential Index*), proposto da Iwasaki et al. (1978), e l'indice di severità di liquefazione LSI (*Liquefaction Severity Index*), introdotto da Yilmaz (2004). Il calcolo dell'indice LPI consente, inoltre, di fornire utili indicazioni relative agli interventi da adottare per la mitigazione del rischio di liquefazione (Lai et al., 2009b). Approcci semplificati sono stati adottati per la valutazione dei cedimenti del terreno e degli spostamenti laterali indotti da liquefazione. L'impiego in ambiente GIS degli indici LPI, LSI e dei valori dei cedimenti verticali e spostamenti laterali, utilizzati per la creazione di mappe di rischio liquefazione, non solo fornisce una rappresentazione della variabilità spaziale del potenziale di liquefazione, ma consente anche di estrapolare i dati in ingresso necessari alla stima del danno sismico per le strutture ed infrastrutture portuali.

2.2 Vulnerabilità sismica di strutture ed infrastrutture portuali marittime

I porti rappresentano sistemi complessi, i cui singoli elementi hanno caratteristiche e livelli di vulnerabilità disomogenei. Durante un terremoto diverse componenti possono essere danneggiate, dagli elementi di sostegno delle banchine alle sovrastrutture ed ai servizi. Gli elementi portuali sono tipicamente classificati in tre categorie principali (Figura 2):

- i) strutture "affacciate a mare";
- ii) attrezzature per il carico/scarico di merci e componenti di stoccaggio;
- iii) infrastrutture portuali.

La stima del danno indotto da un terremoto ad una struttura portuale può essere valutata mediante curve di fragilità, definite come distribuzioni cumulative log-normali, che stimano la probabilità di raggiungere o superare un certo livello di danno per un assegnato grado di scuotimento del terreno.

Per la valutazione del danno sismico atteso alle strutture ed infrastrutture portuali, è possibile adottare la procedura *standard* proposta in

HAZUS (NIBS, 2004), che propone curve di fragilità empiriche per diverse tipologie di opere portuali. Tipicamente, i parametri di scuotimento adottati sono il picco di accelerazione orizzontale al suolo (a_{max}) e lo spostamento permanente (*Permanent Ground Displacement*, PGD). La procedura proposta in HAZUS fornisce, inoltre, curve per valutare indicativamente i tempi necessari per il ripristino delle strutture danneggiate. Nonostante le curve di fragilità proposte in HAZUS siano state messe a punto per il contesto nordamericano, esse possono essere ragionevolmente applicate anche in ambito europeo, come riportato nel *Derivable* 8.10 del progetto di ricerca europeo 2009-2012 SYNER-G ("*Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain*"; <http://www.vce.at/SYNER-G/>).

Sono attualmente in corso studi finalizzati alla messa a punto di curve di fragilità *ad hoc* per le opere portuali di accosto. In ambito europeo, il progetto di ricerca 2011-2014 REAKT ("*Strategies and tools for Real Time Earthquake Risk Reduction*"; <http://www.reakproject.eu/>), *Working Package 5, Task 5.2.3* ("*Development of time-dependent fragility curves for critical transportation system components*") ha, tra gli altri, l'obiettivo di sviluppare curve di fragilità dipendenti dal tempo per banchine portuali marittime. Ad Eucentre, vengono condotti studi finalizzati allo sviluppo di curve di fragilità per due tipologie di banchine, a blocchi (Calabrese e Lai, 2013) e su pali (Mirfattah, 2013), che rappresentano le più diffuse in Italia.

3. Caso di studio: il porto di Gioia Tauro

La costruzione del porto di Gioia Tauro ha avuto inizio nella prima metà degli anni 70 nell'ambito del progetto speciale per la realizzazione in Calabria del V Centro Siderurgico Italiano. Alla fine degli anni 70, erano già state realizzate le opere portuali principali: banchine, moli e bacini. All'inizio degli anni 80, si è arrestato il programma dei lavori per la nota crisi del comparto siderurgico e lo scalo è stato, quindi, riconvertito da porto industriale a polifunzionale. La disponibilità di grandi spazi a ridosso delle banchine portuali, l'ampiezza degli accosti e la profondità dei fondali, rispetto alle dimensioni degli altri porti nazionali, hanno aperto la strada al nuovo assetto funzionale del porto di Gioia Tauro; la prevalenza della tipologia del traffico *container* che si è affermata alla fine degli anni 80 ed il particolare favore conferitogli dalla sua posizione geografica mediana lungo la direttrice Suez-Gibilterra e baricentrica nel mar Mediterraneo, ne hanno

orientato la caratterizzazione quale scalo di transbordo (*transshipment*) di contenitori e merci unitizzate in genere, trasportati sia da grandi navi transoceaniche, che da piccole navi per la distribuzione di dettaglio.

L'attività operativa del porto di Gioia Tauro ha avuto inizio nel 1995 e si è sviluppata a ritmo elevato fino a far assumere allo scalo in breve il ruolo di *leader* nel settore del *transshipment*, raggiungendo, nel corso degli anni, picchi di oltre 3 milioni di *container*/anno movimentati (<http://www.portodigioiatauro.it>). Il porto è stato classificato "di rilevanza economica internazionale" (con la Legge 27.02.1998 n. 30 e successive modificazioni ed integrazioni), appartenente alla categoria II classe I (ai fini di quanto previsto dall'art. 4 della Legge 28.01.1994 n. 84).

La circoscrizione portuale ha una superficie complessiva di 440 ha (esclusi gli spazi acquei); il porto è situato in posizione mediana lungo il litorale dell'omonimo golfo con esposizione dell'imboccatura ad ovest identificata dalle coordinate: lat. 38°26'36"N e long. 15°53'30"E. Presenta una configurazione a canale con una superficie dello specchio acqueo interno di 180 ha ubicata parallelamente alla costa (Figura 3a). L'imboccatura ha una larghezza di circa 300 m ed è ad essa contiguo un bacino di evoluzione del diametro di 750 m. In direzione nord si sviluppa il canale portuale della lunghezza di circa 3 km e larghezza minima di 200 m. All'estremo nord del canale si trova un ulteriore bacino di evoluzione del diametro di 500 m. Il porto di Gioia Tauro dispone di 5.125 m di banchine di cui:

- 3.391 m per *transshipment* di *container*;
- 384 m per *transshipment* automobili;
- 920 m per traffico commerciale e passeggeri;
- 257 m per darsena di servizio;
- 200 m per pontoni.

L'attività portuale si concentra sulle banchine di levante, dotate di aree di stoccaggio per *container* di circa 155 ha (Figura 3b). La profondità dei fondali all'interno dell'area portuale varia da 12.50 m a 18.00 m.

La procedura di calcolo generale per la stima del danneggiamento sismico potenzialmente indotto su strutture portuali (Capitolo 2) è stata applicata al porto di Gioia Tauro, come illustrato nel seguito. I dati di partenza dello studio comprendono la documentazione tecnica fornita dall'Autorità Portuale di Gioia Tauro, integrata con il materiale recuperato da un'accurata ricerca bibliografica. Sulla base dei dati acquisiti è stata implementata per il porto di Gioia Tauro una banca dati GIS, contenente dati geologici, geotecnici e batimetrici ed informazioni tecniche sugli elementi strutturali e infrastrutturali del sistema portuale. La tecnologia GIS costituisce, anche, lo strumento di elaborazione dei dati di base per la generazione di mappe del potenziale di liquefazione e dei relativi cedimenti indotti nel terreno, nonché delle mappe di danno sismico atteso alle opere portuali.

I dati ed i risultati delle elaborazioni relativi al porto di Gioia Tauro vengono resi fruibili all'interno dell'infrastruttura di dati geografici in uso da parte del Dipartimento della Protezione Civile mediante una piattaforma *webGIS* appositamente sviluppata (Figura 4); le informazioni tecniche sono rese consultabili ed interrogabili in rete tramite la predisposizione di specifiche funzionalità GIS e la realizzazione di mappe interattive con appositi applicativi di *webGIS* (Yang et al., 2005).

3.1 Definizione della pericolosità sismica di base al porto di Gioia Tauro

La pericolosità sismica di base al sito in esame è stata determinata per i tre periodi di ritorno con-

Figura 3
a) area portuale di Gioia Tauro (CSIL, 2012);
b) vista aerea delle banchine portuali di levante.



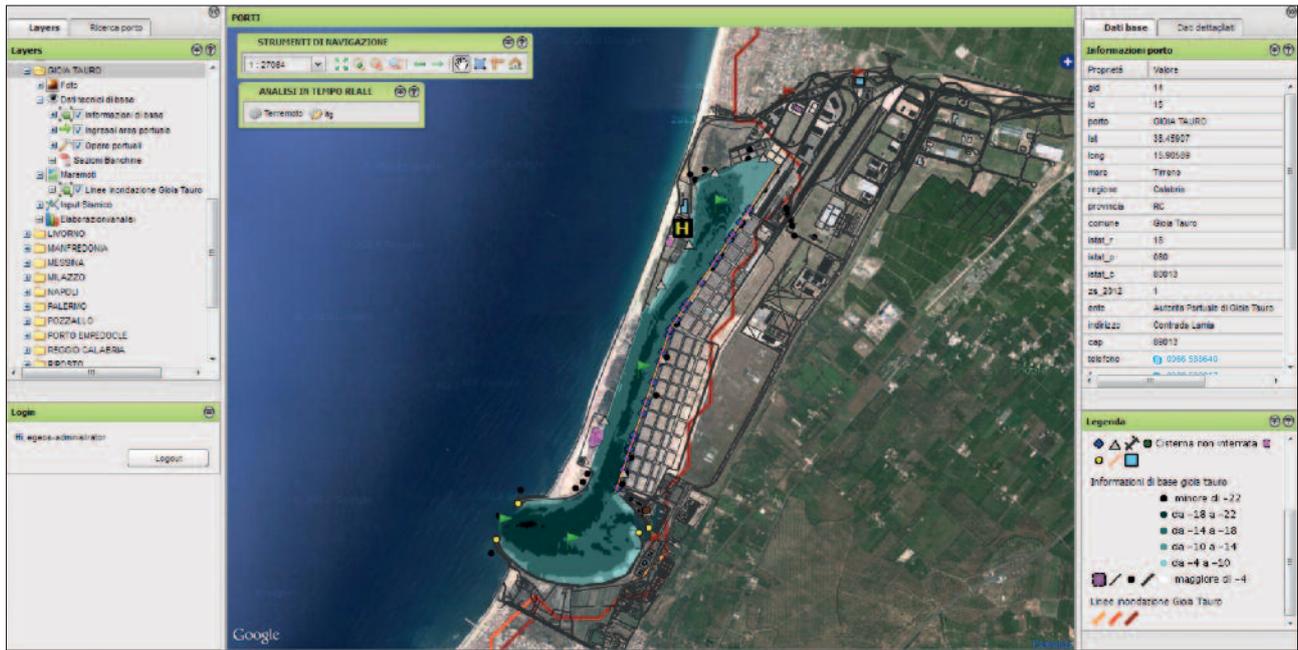


Figura 4
Estratto della piattaforma
webGIS predisposta per
l'area portuale di Gioia
Tauro.

siderati (100, 475 e 950 anni) in termini di spettri di risposta elastici in accelerazione per suolo rigido, magnitudo attesa al sito ed accelerogrammi naturali sismo- e spettro-compatibili.

3.1.1 Spettri di risposta elastici in accelerazione per suolo rigido

L'azione sismica di base è stata definita in termini di spettri di risposta elastici, calcolati in accordo alle prescrizioni contenute nelle NTC (2008). La Tabella 1 riassume, per ciascuno dei tre periodi di ritorno considerati, i valori dei parametri necessari a definire gli spettri di risposta elastici per suolo A al sito di ubicazione del porto di Gioia Tauro: α_g è l'accelerazione di picco orizzontale su sito di riferimento rigido orizzontale, F_0 rappresenta il valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale e T_c^* è il periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro isoprobabile in accelerazione.

3.1.2 Magnitudo attesa al sito

La definizione della magnitudo attesa al sito costituisce un aspetto particolarmente sensibile per lo studio di pericolosità al sito. Dalla magni-

tudo attesa, infatti, dipende la severità delle registrazioni accelerometriche da utilizzare nelle analisi di risposta sismica locale; essa, inoltre, influenza l'intensità della domanda sismica attesa nella valutazione di suscettibilità alla liquefazione al sito di interesse.

Seguendo le indicazioni contenute nel documento ICMS (2008), la stima della magnitudo attesa ad un sito può essere effettuata seguendo una delle seguenti procedure alternative:

- il primo metodo è basato sui dati contenuti nella Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti et al., 2008) utilizzata dall'INGV per lo studio di pericolosità a scala nazionale (<http://esse1.mi.ingv.it/>). Nel caso in esame, il sito di interesse cade nella zona sismogenetica 929 - Calabria Tirrenica, Iblei, caratterizzata da magnitudo momento massima $M_{W,max}$ pari a 7.3 (Meletti et al., 2008);
- il secondo metodo è basato sull'impiego dei risultati dello studio di disaggregazione della pericolosità sismica condotto per il territorio nazionale da Spallarossa e Barani (2007). Tali risultati sono espressi in termini di coppie magnitudo-distanza e corrispondente valore dell'incertezza. La Tabella 2

Tabella 1 - Dati per la definizione della pericolosità sismica di base al porto di Gioia Tauro secondo le NTC (2008)

Periodo di ritorno (anni)	α_g (g)	F_0 (-)	T_c^* (s)
100	0.127	2.306	0.320
475	0.261	2.424	0.365
950	0.348	2.462	0.389

riporta per il sito in esame, i valori ottenuti per i tre periodi di ritorno oggetto di studio.

Entrambi i metodi suggeriti da ICMS (2008) presentano evidenti limiti. Il metodo 1, in particolare, svincola la definizione della magnitudo attesa dal periodo di ritorno, assumendo che la magnitudo al sito, indipendentemente dal periodo di ritorno in esame, sia pari alla massima magnitudo della zona sismogenetica di appartenenza. Il metodo 2, come messo in evidenza dagli autori stessi dello studio di disaggregazione (comunicazione personale), si basa su dati di pericolosità sismica piuttosto datati, che non tengono conto dei recenti eventi sismici ed, inoltre, esiste un problema di saturazione della magnitudo al crescere del periodo di ritorno (per 2475 anni, la magnitudo attesa risulta pari a $M_W = 6.38$).

Sulla base di queste considerazioni, pur adottando il metodo 2 basato sullo studio di disaggregazione condotto da Spallarossa e Barani (2007), è stata effettuata anche un'analisi *ad hoc* per la definizione dei valori di magnitudo attesa al sito, basata sul calcolo dei tassi di sismicità. La magnitudo attesa al sito, calcolata mediante l'analisi *ad hoc* descritta in dettaglio in Famà (2013), è stata determinata applicando agli eventi della zona sismogenetica 929 (Meletti et al., 2008) la legge di regressione di Gutenberg-Richter troncata superiormente e inferiormente (McGuire e Arabasz, 1990). La Tabella 2 riporta i valori di magnitudo così ottenuti e li confronta con i valori ricavati dallo studio di disaggregazione (Spallarossa e Barani, 2007). Lo studio *ad hoc* ha fornito valori della magnitudo attesa al sito significativamente maggiori rispetto a quelli ottenuti dallo studio di disaggregazione di Spallarossa e Barani (2007).

3.1.3 Accelerogrammi naturali sismo- e spettro-compatibili

Per ciascun periodo di ritorno considerato, è stato selezionato un gruppo di 7 accelerogrammi naturali, coerenti con il contesto sismotettonico regionale (sismo-compatibilità) e compatibili allo spettro di riferimento al sito di interesse (spettro-compatibilità).

Per il periodo di ritorno di 475 anni, gli accelerogrammi sono stati ottenuti utilizzando SEISM-HOME (*SElection of Input Strong-Motion for HOmogeneous MEsozones*), un portale disponibile *online* alla pagina web: <http://www.eucentre.it/seismhome.html>. SEISM-HOME consente, infatti, di scaricare, per ciascun sito del territorio italiano, un gruppo di 7 accelerogrammi opportunamente preselezionati affinché risultino compatibili al corrispondente spettro di risposta elastico definito dalle NTC (2008) per sito rigido e superficie topografica orizzontale per il periodo di ritorno di 475 anni (Rota et al., 2012).

Per i periodi di ritorno di 100 e 950 anni, gli accelerogrammi sono stati selezionati utilizzando il codice ASCONA (*Automated Selection of COmpatible Natural Accelerograms*; Corigliano et al., 2012), che implementa una procedura semi-automatica per la selezione degli accelerogrammi reali spettro-compatibili. La procedura consente di scegliere, da una banca dati predefinita, un gruppo di accelerogrammi naturali che soddisfino diversi criteri, con l'ulteriore condizione della spettro-compatibilità rispetto ad uno spettro di riferimento in uno specificato campo di periodi. La banca-dati utilizzata da ASCONA è formata da accelerogrammi naturali provenienti da banche accelerometriche accreditate, quali:

- ESD (<http://www.isesd.hi.is/>);
- PEER-NGA (<http://peer.berkeley.edu/nga/>);
- ITACA (<http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet/>);
- K-Net (<http://www.k-net.bosai.go.jp/>).

Gli accelerogrammi selezionati per ciascun periodo di ritorno sono compatibili, in media, allo spettro di riferimento delle NTC (2008) nell'intervallo di periodi compresi tra 0.1 e 1.5 s, in accordo alle raccomandazioni della Circ. NTC (2009). La Figura 5a mostra, per il periodo di ritorno di 100 anni, la compatibilità tra lo spettro di risposta di riferimento e la media degli spettri di risposta degli accelerogrammi naturali selezionati. La Figura 5b illustra gli spettri di risposta elastici dei 7 accelerogrammi selezionati sovrapposti allo spettro medio. In questo caso, la selezione è stata effettuata su accelerogrammi di magnitudo compresa tra 5.71 e 6.90

Tabella 2 - Parametri ottenuti dallo studio di disaggregazione (Spallarossa e Barani, 2007) per il porto di Gioia Tauro e confronto con i valori di magnitudo attesa al sito calcolato con studio *ad hoc*

Periodo di ritorno (anni)	Parametri di disaggregazione per a_g			Studio <i>ad hoc</i>
	M_W (-)	Dist. (km)	ε (-)	M_W (-)
100	5.62	13.3	0.405	6.44
475	5.95	8.36	0.791	6.97
950	6.14	7.08	0.951	7.11

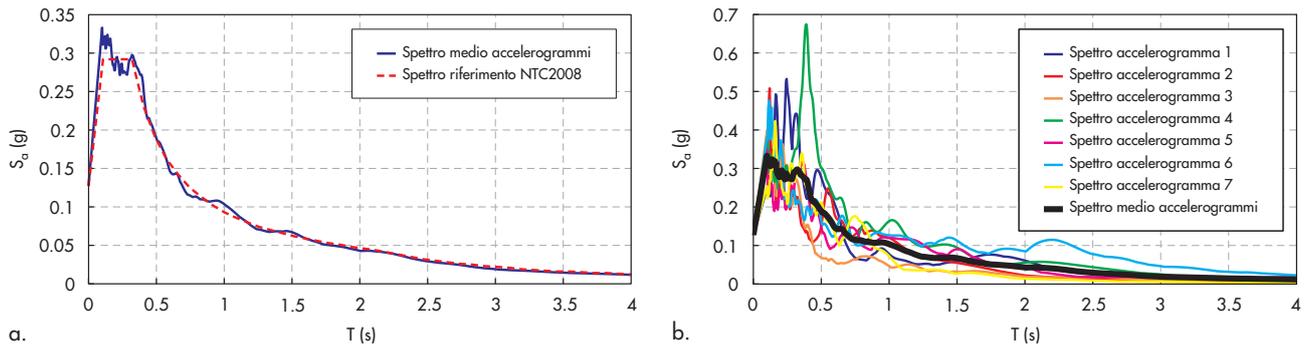


Figura 5
 Selezione degli accelerogrammi sismo- e spettro-compatibili per il periodo di ritorno 100 anni al porto di Gioia Tauro: a) confronto tra lo spettro di riferimento e lo spettro medio degli accelerogrammi selezionati; b) spettri di risposta elastici degli accelerogrammi selezionati confrontati con lo spettro di risposta medio (linea nera continua).

e distanze epicentrali comprese tra circa 21 e 38.6 km. Lo spettro di risposta calcolato dai 7 spettri (linea blu) è caratterizzato da un valore medio della differenza in valore assoluto rispetto allo spettro di riferimento pari al 4.44% e da una differenza massima negativa del 9.30% (<10% richiesto da NTC, 2008 e Circ. NTC, 2009 per gli accelerogrammi artificiali). I fattori di scala minimo e massimo valgono rispettivamente 0.44 e 1.85. La deviazione media tra lo spettro di riferimento e quello medio degli accelerogrammi selezionati è pari a 0.053.

3.2 Inquadramento geologico e dati per la caratterizzazione geotecnico-sismica del sito

La caratterizzazione geotecnico-sismica dei depositi di terreno dell'area portuale di Gioia Tauro è basata su dati provenienti da diverse campagne di indagini geognostiche fornite dall'Autorità Portuale e su informazioni geologiche individuate tramite un'approfondita ricerca bibliografica.

Da un punto di vista geologico, il porto è ubicato sulla piana costiera a Nord di Gioia Tauro interpretata come una piccola struttura di sprofondamento (*graben*), che si estende in direzione Nord-Sud dalla valle del Mesima al massiccio dell'Aspromonte, parzialmente riempita da sedimenti antichi e recenti. I depositi di terreno che caratterizzano la piana sono prevalentemente costituiti da strati di terreni granulari saturi fino ad una profondità che varia da 55 m a 80 m andando da mare verso terra (SGI, 2000) che giacciono sopra uno strato di argille compatte di ampio spessore; il substrato roccioso si trova ad una profondità stimabile tra i 500 ed i 600 m (Facciorusso e Vannucchi, 2003). Lo strato di argille compatte è stato assunto come *bedrock* sismico nell'analisi di risposta sismica locale.

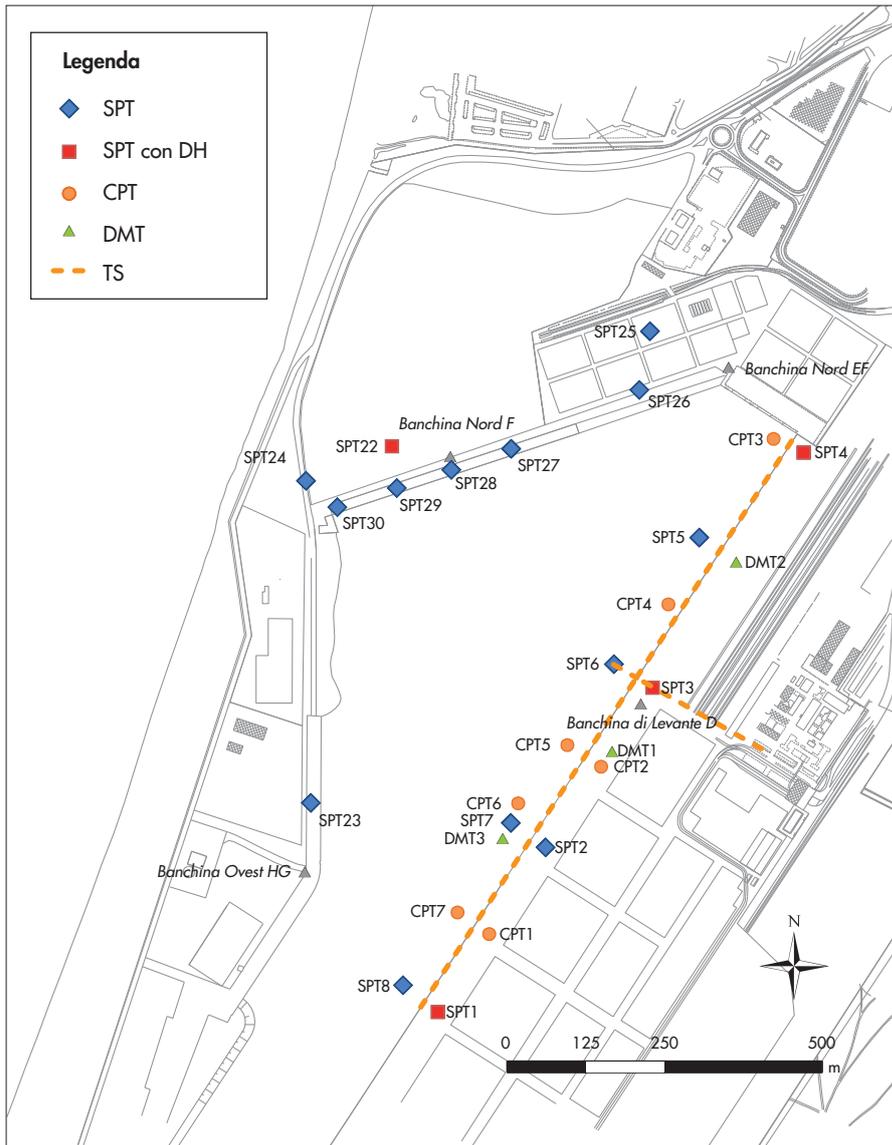
Le informazioni geologiche sono state analizzate congiuntamente ai dati geotecnici e geofisici, ottenuti in diverse campagne di indagine, eseguite nell'area portuale di Gioia Tauro dal 1975 al 2012. In particolare, i dati riguardano 45 sondaggi spinti a diverse profondità (da 6.4

m a 60 m dal piano campagna); sono state effettuate varie tipologie di prove in sito, nello specifico: 35 sondaggi con prove penetrometriche dinamiche (SPT), 7 sondaggi con prove penetrometriche statiche (CPT), 3 sondaggi con prove dilatometriche (DMT), 7 prove sismiche *down-hole* (DH), 2 tomografie sismiche (TS) e 2 prove sismiche MASW (*Multi-channel Analysis of Surface Waves*). Inoltre, per un numero modesto di campioni, sono disponibili i risultati di prove di laboratorio, quali analisi granulometriche e prove di taglio diretto.

3.3 Modellazione geotecnico-sismica dell'area portuale di Gioia Tauro

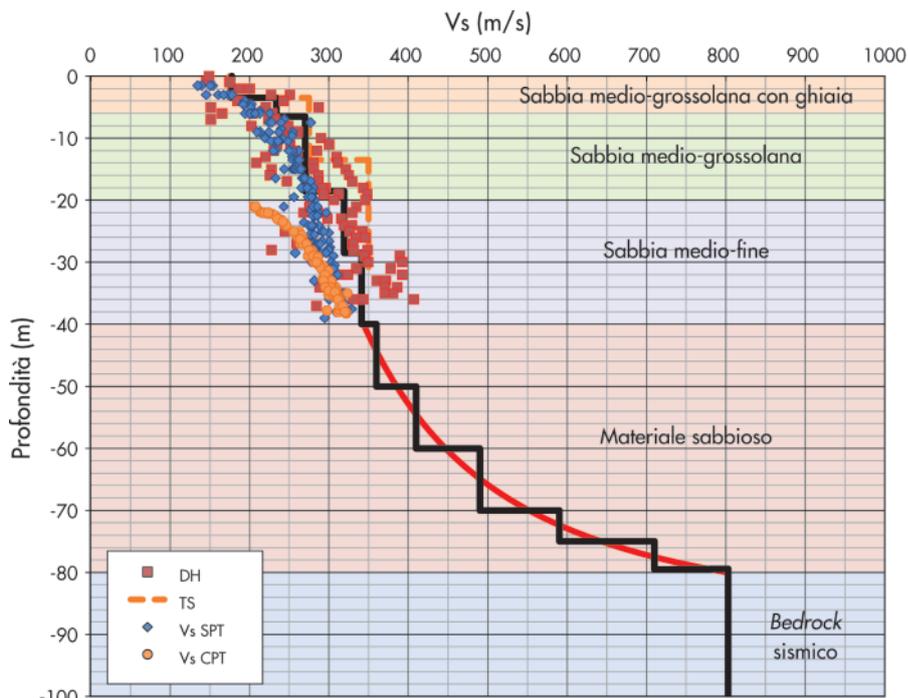
I dati disponibili, descritti nel paragrafo precedente, sono stati analizzati per la definizione del modello geotecnico-sismico da utilizzare per la valutazione della risposta sismica locale. Data la notevole estensione del porto e la distribuzione dei sondaggi che determina un diverso grado di caratterizzazione geotecnico-sismica all'interno dell'area portuale, sono stati definiti due modelli: il modello denominato Nord relativo alla zona settentrionale dell'area portuale, che comprende le aree della Banchina D, della Banchina Nord e Banchina Ovest ben caratterizzate a livello geotecnico-sismico (Figura 6a); il modello denominato Sud relativo alla zona meridionale dell'area portuale, che comprende la Banchina ABC e la Banchina Alti Fondali, per la quale sono disponibili uno scarso numero di indagini geognostiche, considerata l'ampiezza dell'area in esame (Figura 7a).

La modellazione geotecnico-sismica dell'area portuale è stata effettuata sulla base dell'analisi congiunta di tre tipologie di informazioni disponibili per ciascun sondaggio: l'andamento litostratigrafico, i valori della resistenza penetrometrica ottenuta da prove SPT e, dove disponibili, CPT ed il profilo della velocità di propagazione delle onde di taglio V_S . Quest'ultimo, se non fornito direttamente da prove sismiche (es., DH, TS), è stato ricavato da relazioni empiriche disponibili in letteratura; in particolare, è stata uti-



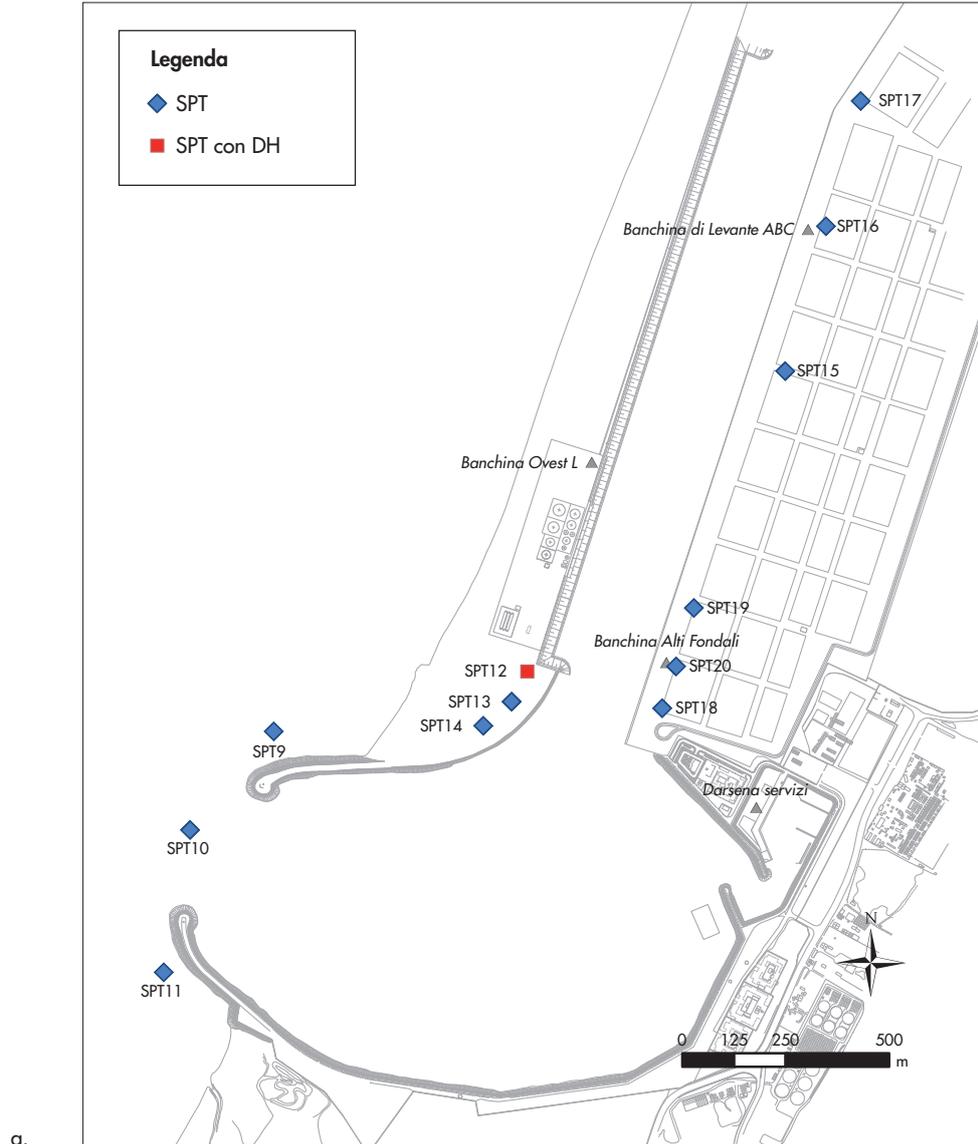
a.

Figura 6
 Modello geotecnico-sismico per la zona settentrionale del porto (modello Nord):
 a) mappa GIS delle indagini geognostiche disponibili;
 b) successione lito-stratigrafica e profilo di V_s medio (linea nera) con la profondità, definito nei primi 40 m sulla base dei dati ottenuti dalle prove in sito e dalla profondità di 40 m fino al *bedrock* sismico sulla base di una legge iperbolica alla Gibson (Gibson, 1967; Awojobi, 1975), rappresentata dalla linea rossa.

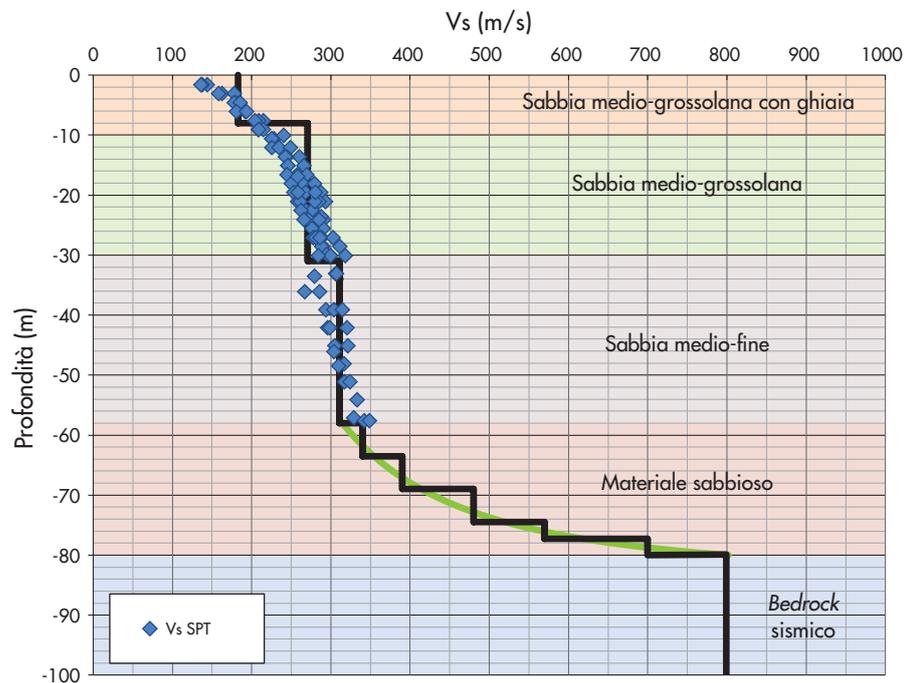


b.

Figura 7
 Modello geotecnico-sismico per la zona meridionale del porto (modello Sud):
 a) mappa GIS delle indagini geognostiche disponibili;
 b) successione litostratigrafica e profilo medio di V_s (linea nera) con la profondità, definito fino a 60 m circa di profondità sulla base dei dati ottenuti dalle prove in sito e dalla profondità di 60 m fino al *bedrock* sismico sulla base di una legge iperbolica alla Gibson (Gibson, 1967; Awojobi, 1975), rappresentata dalla linea verde.



a.



b.

lizzata la correlazione di Ohta e Goto (1978) per stimare V_S dal valore della resistenza penetrometrica N_{SPT} e la relazione empirica di Rix e Stokoe (1991), che lega il modulo di taglio a piccole deformazioni G_0 alla resistenza alla punta q_c ottenuta dalle prove CPT. Il profilo V_S rappresentativo di ciascuna zona è stato calcolato come media pesata, attribuendo peso maggiore ai valori di V_S ottenuti dalle indagini in sito che misurano direttamente la V_S .

Sulla base delle informazioni disponibili, si è assunto un *bedrock* sismico, costituito da uno strato di argille plioceniche marine, posto alla profondità media di 80 m e caratterizzato, in assenza di dati specifici, da un valore medio della velocità di propagazione delle onde di taglio V_S pari a 800 m/s. Per la zona settentrionale del porto, i dati disponibili non hanno permesso una caratterizzazione dei depositi di terreno per profondità superiori a 40 m dal piano campagna, pertanto è stata adottata una legge iperbolica secondo il modello di Gibson (Gibson, 1967; Awojobi, 1975) per definire il profilo di V_S medio da tale profondità fino alla profondità media assunta per il *bedrock* sismico, come mostrato in Figura 6b. Un approccio analogo a quello appena descritto è stato adottato per la definizione del modello geotecnico-sismico relativo alla zona meridionale del porto di Gioia Tauro (Figura 7b), per la quale i dati disponibili non hanno permesso una caratterizzazione per profondità superiori a 60 m dal piano campagna. Si precisa che per la definizione di tale modello, denominato Sud, sono stati esclusi i dati relativi alla zona dell'imbocco, in quanto i depositi di terreno presenti in questa zona hanno caratteristiche molto diverse da quelli che si trovano nelle aree delle banchine ABC ed Alti Fondali. Ulteriori dettagli sullo sviluppo dei modelli per l'area portuale di Gioia Tauro sono

illustrati in Famà (2013).

La configurazione geometrica del tetto del substrato, degli andamenti plano-altimetrici delle interfacce di separazione e dei contatti tra le diverse unità lito-stratigrafiche indicano come soddisfacente, sia per la zona settentrionale, che per l'area meridionale del porto, un modello monodimensionale (1D) a strati piani e paralleli delle principali formazioni. La Figura 8 mostra, a titolo di esempio, una vista tridimensionale del modello lito-stratigrafico, relativo alla zona settentrionale dell'area portuale di Gioia Tauro. Per tenere in considerazione le incertezze relative alla caratterizzazione geologica, geotecnica e lito-stratigrafica dell'area portuale sono state condotte analisi affidabilistiche della risposta sismica locale mediante un approccio stocastico (Lai et al., 2009a; Rota et al., 2011), descritto in dettaglio nel paragrafo seguente.

3.4 Analisi affidabilistiche della risposta sismica locale

La valutazione degli effetti di sito dovuti ad amplificazione lito-stratigrafica è stata eseguita utilizzando un approccio affidabilistico, considerando un modello monodimensionale (1D) lineare-equivalente sia per l'area settentrionale del porto, che per la zona meridionale. Il metodo stocastico adottato (Lai et al., 2009a; Rota et al., 2011) è basato su simulazioni Monte Carlo eseguite mediante la tecnica di campionamento dell'ipercubo Latino. Ad ogni simulazione, i parametri di ingresso al modello deterministico sono definiti da una particolare realizzazione di valori generata in modo casuale da apposite distribuzioni di probabilità. Un approccio affidabilistico alla valutazione della risposta sismica locale ha il vantaggio di tener conto dell'incertezza associata ai parametri di ingresso, che influenza l'affidabilità dei risultati,

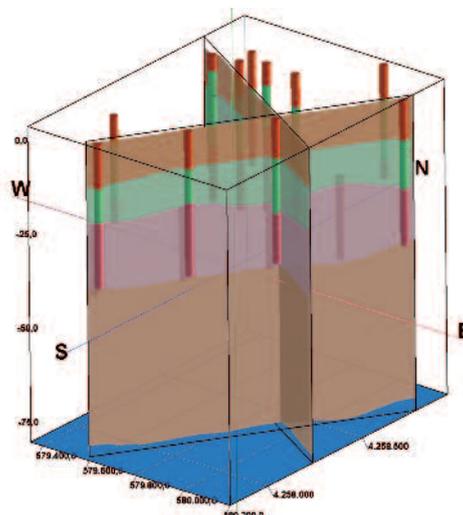
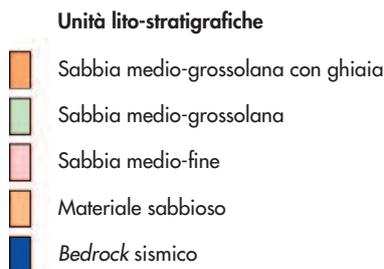


Figura 8
Vista tridimensionale del modello lito-stratigrafico per la zona settentrionale dell'area portuale di Gioia Tauro.

incluso l'*input* sismico, in questo caso rappresentato da un gruppo di 7 accelerogrammi reali sismo- e spettro-compatibili. Questo metodo trova la sua applicazione ideale quando il modello geotecnico monodimensionale del suolo è complesso e definito da un certo numero di parametri associati ad un significativo livello di incertezza. Le variabili assunte come aleatorie, in questo caso, sono:

- l'*input* sismico, considerando un gruppo di 7 accelerogrammi reali sismo- e spettro-compatibili;
- lo spessore degli strati delle unità lito-stratigrafiche definite nel modello geotecnico-sismico;
- la velocità di propagazione delle onde di taglio V_S caratteristica di ciascuno strato;
- peso di unità di volume γ , che caratterizza ciascuna unità lito-stratigrafica.

La procedura per la definizione della risposta sismica locale stocastica può essere sintetizzata nelle seguenti fasi (Lai et al., 2009a; Rota et al., 2011):

- definizione dell'*input* sismico su suolo di riferimento rigido, costituito da un gruppo di accelerogrammi sismo- e spettro-compatibili;
- scelta del modello geotecnico costitutivo. In questo caso è stato adottato un modello viscoelastico lineare-equivalente caratterizzato dai seguenti parametri per ogni strato: spessore, peso di unità di volume, velocità di propagazione delle onde di taglio e curve di degradazione del modulo di taglio e dello smorzamento;
- definizione delle distribuzioni probabilistiche dei parametri geotecnici. Spessore, velocità V_S e peso di unità di volume variano, in questo caso, secondo distribuzioni di probabilità normali; l'*input* sismico di riferimento è stato considerato come variabile aleatoria avente distribuzione uniforme. Sono state assunte curve di degradazione deterministiche, in

quanto la loro influenza sui risultati è modesta (Lai et al., 2009a);

- utilizzo dell'algoritmo di calcolo per effettuare analisi stocastiche di risposta sismica locale basato sul metodo Monte Carlo, eseguito mediante la tecnica di campionamento dell'Ipercubo Latino. Il codice utilizzato per le analisi di risposta sismica locale è SHAKE91 (Schnabel et al., 1972; Idriss e Sun, 1992) che utilizza un modello 1D con legame costitutivo viscoelastico lineare-equivalente.

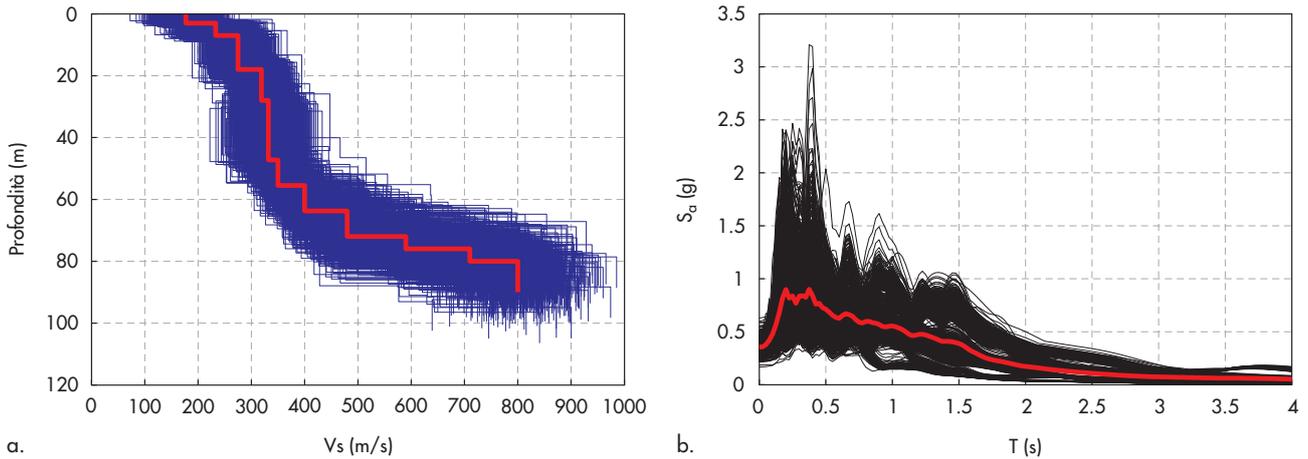
Poiché non sono disponibili, per il sito oggetto di studio, prove di laboratorio (ad es. colonna riso-nante e taglio torsionale ciclico) per la definizione delle curve di degradazione del modulo di taglio e dello smorzamento intrinseco, sono state utilizzate le curve disponibili in letteratura (Seed e Idriss, 1970; Idriss 1990; Schnabel et al., 1972). I dati relativi al modello stocastico adottato per la zona settentrionale del porto di Gioia Tauro sono riportati nella Tabella 3. Ad ogni variabile aleatoria è stato associato un valore medio e la relativa incertezza, assunta pari, ove la disponibilità di dati misurati lo ha consentito, al doppio del coefficiente di variazione, ossia il rapporto tra lo scarto quadratico medio ed il valore atteso per quel parametro.

Per ogni periodo di ritorno analizzato, sono state eseguite 1000 simulazioni ed è stato calcolato uno spettro di risposta medio con relativa incertezza. La Figura 9a mostra i 1000 profili di velocità V_S utilizzati per le simulazioni relative al modello Nord insieme all'andamento del profilo medio (linea rossa). Nella Figura 9b sono rappresentati gli spettri di risposta in accelerazione, calcolati in superficie dalle 1000 simulazioni, per il periodo di ritorno di 475 anni; in rosso, è rappresentato lo spettro di risposta medio.

Nella Figura 10 sono confrontati, con riferimento alla zona settentrionale del porto di Gioia Tauro,

Tabella 3 - Dati di ingresso del modello stocastico adottato per la stima della risposta sismica locale nella zona settentrionale del porto di Gioia Tauro (modello Nord)

Strato	Tipo di terreno	Spessore (m)	Incertezza (%)	V_S (m/s)	Incertezza (%)	γ (kN/m ³)	Incertezza (%)
1	sabbia medio-grossolana con ghiaia	3.5	40%	178	35%	19	6%
2	sabbia medio-grossolana con ghiaia	3	40%	234	35%	19	6%
3	sabbia medio-grossolana	12	30%	270	25%	20	6%
4	sabbia medio-fine	10	30%	319	20%	20	6%
5	sabbia medio-fine	11.5	30%	341	25%	20	6%
6	materiale sabbioso	10	40%	360	10%	20	6%
7	materiale sabbioso	10	40%	410	10%	20	6%
8	materiale sabbioso	10	40%	490	15%	20	6%
9	materiale sabbioso	5	40%	590	10%	20	6%
10	materiale sabbioso	5	40%	710	15%	20	6%
-	bedrock sismico	-	-	800	15%	21	6%



lo spettro di risposta elastico in accelerazione (componente orizzontale) su suolo di tipo A (NTC, 2008) e lo spettro di risposta medio calcolato mediante analisi stocastica per il periodo di ritorno di 475 anni. In figura, è mostrata, mediante la fascia di colore rosso, la stima dell'incertezza relativa alla definizione dello spettro di risposta medio calcolato in superficie (linea nera). Per la valutazione degli effetti di sito, le NTC (2008) consentono l'utilizzo di un approccio semplificato, che, attraverso l'utilizzo di opportuni coefficienti di suolo (S_S e C_C per gli effetti stratigrafici), modifica la forma e le ampiezze delle ordinate dello spettro elastico. Sulla base dei valori di velocità delle onde di taglio S , che caratterizzano il sottosuolo dell'area settentrionale del porto di Gioia Tauro, è possibile classificare il sito come appartenente alla categoria di suolo C (NTC, 2008). Lo spettro calcolato per suolo C è mostrato nella Figura 10, in cui, per completezza, sono rappresentati anche gli spettri per suolo B e D.

Nella Tabella 4, sono riportati i risultati, ottenuti, per i due modelli geotecnico-sismici (Nord e Sud), dalle analisi affidabilistiche, relative ai tre i periodi di ritorno oggetto di studio, in termini di accelerazione orizzontale di picco in superficie a_{max} . Si nota che l'amplificazione lito-stratigrafica, all'interno dell'area portuale di Gioia Tauro, risulta essere più significativa nella zona settentrionale del porto. In tabella, compaiono, inoltre, i valori dell'accelerazione orizzontale di picco per suolo di categoria A e C. I valori di a_{max} , ottenuti con la procedura semplificata proposta dalle NTC (2008), risultano meno cautelativi rispetto a quelli medi ottenuti dallo studio di risposta sismica locale per l'area settentrionale del porto, a differenza di quanto accade per la zona meridionale del porto. Il calcolo del rapporto tra il valore medio dell'accelerazione di picco in superficie a_{max} ottenuto dall'analisi stocastica ed il valore relativo a sito rigido (suolo A) restituisce, per i tre periodi di ritorno, rispettivamente i valori 1.64, 1.36 e

Figura 9
Analisi affidabilistica della risposta sismica locale relativa al periodo di ritorno di 475 anni per la zona settentrionale del porto di Gioia Tauro (modello Nord):
a) profili di velocità V_S generati dalle 1000 simulazioni Monte Carlo utilizzando la tecnica di campionamento dell'iper cubo latino; in rosso, il profilo medio; b) 1000 spettri di risposta in accelerazione calcolati in superficie (linee nere) e spettro medio (linea rossa).

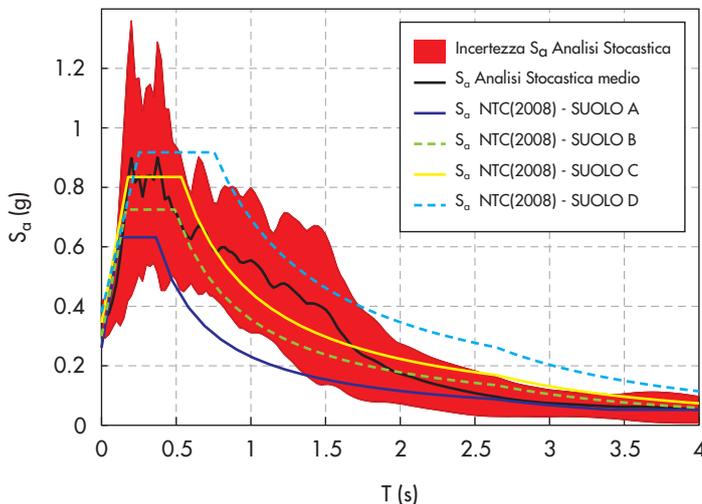


Figura 10
Spettro medio di risposta in accelerazione (linea nera) ottenuto dall'analisi stocastica di risposta sismica locale (1000 simulazioni) per la zona settentrionale del porto di Gioia Tauro con riferimento al periodo di ritorno di 475 anni; la fascia rossa rappresenta la stima dell'incertezza associata allo spettro medio (calcolata come +/- una deviazione standard). È riportato il confronto con gli spettri calcolati con l'approccio semplificato delle NTC (2008) per le categorie di suolo A, B, C e D; i depositi di terreno dell'area in esame appartengono alla categoria di suolo C.

1.24 per il modello Nord e 1.46, 1.15 e 1.05 per il modello Sud. Si nota che l'amplificazione tende a decrescere all'aumentare del periodo di ritorno; questa tendenza è attribuibile agli effetti della non-linearità del suolo, che tendono a smorzare l'amplificazione sismica del moto in ingresso e che risultano più pronunciati all'aumentare della severità dell'*input* e, quindi, del periodo di ritorno di riferimento.

I risultati illustrati in questo paragrafo sono da assumere validi in prima approssimazione. Essi, infatti, sono stati ottenuti assumendo per il suolo un legame costitutivo di tipo viscoelastico lineare-equivalente, che non è idoneo a riprodurre la risposta sismica dei terreni in presenza di forti non-linearità e comportamenti instabili (e.g., liquefazione). In tali situazioni, l'analisi della risposta sismica locale dovrebbe essere eseguita utilizzando modelli costitutivi avanzati che tengano conto dell'accoppiamento idromeccanico tra la fase fluida e quella solida del mezzo poroso e siano, quindi, in grado di simulare correttamente l'incremento delle pressioni interstiziali originato dal carico ciclico e la conseguente e progressiva riduzione degli sforzi efficaci accompagnata dalla degradazione della rigidezza e della resistenza meccanica. Occorre, tuttavia, evidenziare che a fronte di queste potenzialità, i modelli costitutivi avanzati richiedono in genere un numero relativamente elevato di parametri in ingresso e, quindi, il loro uso è giustificabile oltreché utile solo a fronte di una raffinata caratterizzazione geotecnica dei terreni che comprenda oltre ai sondaggi e alle prove in sito *standard* anche prove di laboratorio di resistenza triassiali e/o torsionali cicliche. Per il porto di Gioia Tauro, i risultati di tali indagini erano indisponibili e il livello di conoscenza del sito non ha consentito di effettuare una raffinata caratterizzazione geotecnica.

3.5 Stima della suscettibilità alla liquefazione nell'area portuale di Gioia Tauro

La procedura messa a punto per la valutazione sia in termini deterministici, che probabilistici del potenziale di liquefazione (Paragrafo 2.1.3)

è stata applicata al porto di Gioia Tauro utilizzando, come dati in *input*, i risultati ottenuti dalle prove penetrometriche dinamiche SPT.

Poiché l'individuazione delle correlazioni empiriche, basate su dati SPT, più adatte a valutare la suscettibilità a liquefazione è una questione piuttosto delicata e dibattuta dagli specialisti di tutto il mondo (Seed, 2010; Idriss e Boulanger, 2012), sono stati adottati i seguenti tre approcci metodologici indipendenti:

- *Metodologia A*, basata sugli approcci largamente impiegati, proposti da Youd et al. (2001) e, per il calcolo di P_L , sulle formule di Toprak et al. (1999); i cedimenti del terreno indotti da liquefazione sono valutati con il metodo di Ishihara e Yoshimine (1992);
- *Metodologia B*, che prevede l'impiego dell'approccio deterministico descritto nella monografia di Idriss e Boulanger (2008) e della sua versione probabilistica derivata da Boulanger e Idriss (2012); i cedimenti indotti nel terreno sono calcolati con il metodo di Yoshimine (2006), come suggerito da Idriss e Boulanger (2008);
- *Metodologia C*, basato sul metodo proposto da Cetin et al. (2004) per il calcolo di F_S e P_L e sull'approccio di Cetin et al. (2009) per la valutazione dei cedimenti indotti nel terreno.

I risultati più cautelativi si ottengono, come atteso (Seed, 2010), applicando la Metodologia C. Per il periodo di ritorno di 950 anni, l'indice del potenziale di liquefazione LPI risulta nullo in tutta l'area portuale, mentre l'indice di severità di liquefazione LSI ha un valore massimo di 0.1 limitato solo alla zona della Banchina ABC. Sulla base delle correlazioni proposte in letteratura tra LPI e LSI ed il potenziale di rottura del terreno (Iwasaki, 1978; Yilmaz, 2004), le conseguenze attese sul terreno e sulle strutture con esso interagenti a causa della liquefazione, risultano essere sostanzialmente trascurabili. I cedimenti verticali attesi non risultano particolarmente rilevanti con un valore massimo di circa 3 cm nella zona della Banchina ABC per 950 anni.

Tutte e tre le metodologie impiegate consentono

Tabella 4 - Valori di accelerazione orizzontale di picco a_{max} (g) stimati in superficie per la zona settentrionale e l'area meridionale del porto di Gioia Tauro mediante le analisi affidabilistiche di risposta sismica locale e secondo la procedura semplificata proposta nelle NTC (2008) per i tre periodi di ritorno oggetto di studio

T_R (anni)	a_{max} (g) analisi stocastica modello Nord			a_{max} (g) analisi stocastica modello Sud			a_g (g) suolo A NTC (2008)	a_{max} (g) suolo C NTC (2008)
	media	media- σ	media+ σ	media	media- σ	media+ σ		
100	0.208	0.176	0.241	0.186	0.156	0.217	0.127	0.190
475	0.355	0.291	0.420	0.299	0.239	0.359	0.261	0.344
950	0.430	0.320	0.540	0.365	0.271	0.459	0.348	0.412

la valutazione dell'indice di spostamento laterale LDI (*Lateral Displacement Index*; Zhang et al., 2004), calcolato integrando la deformazione di taglio ciclica massima γ_{max} sullo spessore di ciascuno strato mediante la seguente equazione (in cui z è la profondità):

$$LDI = \int_0^{z_{max}} \gamma_{max} \cdot dz \quad (1)$$

Il metodo di Zhang et al. (2004) fornisce, anche, due espressioni semplificate per stimare, in modo approssimato, il valore dello spostamento laterale (*Lateral Displacement*, LD) per definite configurazioni, che però non si adattano alle aree oggetto di studio al porto di Gioia Tauro. Il parametro LDI (Figura 11) raggiunge i valore massimi, che non superano i 30 cm, nella zona

della Banchina Nord F' e della Banchina ABC per 950 anni ed applicando la Metodologia C, la più cautelativa.

A partire dai valori di LPI, LSI, cedimenti e LDI, calcolati utilizzando le tre metodologie descritte in precedenza, sono state create mappe di rischio liquefazione in ambiente GIS per i tre periodi di ritorno considerati (i.e., 100, 475 e 950 anni). L'impiego di mappe di liquefazione digitali e georeferenziate non fornisce solo una rappresentazione della variabilità spaziale del fenomeno all'interno dell'area portuale, ma consente anche di estrapolare i dati di ingresso necessari alla stima del danno sismico atteso alle strutture portuali. Le mappe di rischio liquefazione sviluppate, complessivamente 36 per il porto di Gioia Tauro, sono pienamente fruibili all'interno della piattaforma webGIS, sviluppata per il Dipartimento della Protezione Civile.

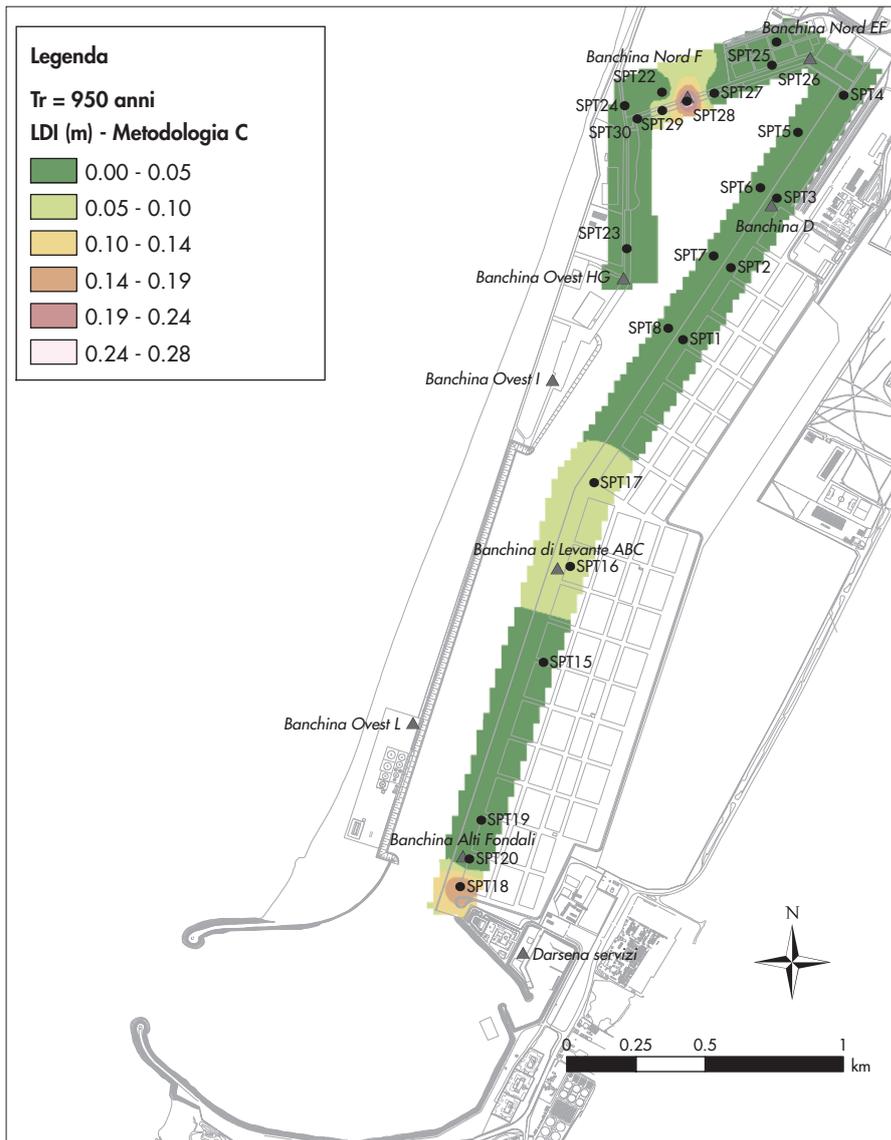


Figura 11
 Mappa georeferenzata e digitale, ottenuta in ambiente GIS, dell'indice di spostamento laterale indotto da liquefazione, LDI (*Lateral Displacement Index*; Zhang et al., 2004) al porto di Gioia Tauro applicando la Metodologia C per il periodo di ritorno di 950 anni.

3.6 Vulnerabilità sismica delle strutture ed infrastrutture portuali di Gioia Tauro

3.6.1 Applicazione della procedura standard HAZUS (NIBS, 2004)

La stima del danno atteso in caso di evento sismico è stata effettuata per le principali strutture portuali di Gioia Tauro, il cui potenziale danneggiamento influirebbe in modo significativo sulla funzionalità del porto, ossia le banchine, le attrezzature per il carico/scarico di merci e le infrastrutture di distribuzione elettriche. Il danneggiamento sismico atteso alle strutture portuali è stato valutato mediante curve di fragilità in termini di peggiore livello di danno probabile e di percentuale di funzionalità. Quest'ultimo parametro è di importanza rilevante, in quanto le conseguenze del danneggiamento indotto da un terremoto non sono solamente legate ai costi di riparazione delle strutture, ma soprattutto all'interruzione della funzionalità del porto nel periodo di tempo immediatamente successivo all'evento sismico (Pachakis e Kiremidjian, 2004).

La vulnerabilità sismica delle principali strutture dell'area portuale di Gioia Tauro è stata stimata per i tre periodi di ritorno considerati (i.e., 100, 475 e 950 anni) utilizzando la procedura standard proposta in HAZUS (NIBS, 2004). Il danneggiamento sismico alle strutture ed infrastrutture portuali è stato valutato combinando gli effetti sia dell'amplificazione locale, espressa in termini di a_{max} , che degli spostamenti permanenti indotti nel terreno, assunti pari a quelli determinati dalla liquefazione. Il danno sismico atteso alle strutture portuali è classificato secondo cinque livelli (NIBS, 2004): nullo, lieve, moderato, esteso e completo. Dalle probabilità di eccedenza ricavate con le curve di fragilità è possibile stimare il peggiore livello di danno probabile da associare alla struttura. La Figura 12a mostra le curve di fragilità proposte dalla procedura HAZUS per le strutture affacciate a

mare, che richiedono come dato in ingresso lo spostamento permanente (*Permanent Ground Displacement, PGD*); la Figura 12b mostra le curve per la stima dei tempi necessari per il ripristino della funzionalità delle strutture a mare danneggiate.

La Figura 13 mostra lo scenario di danno sismico atteso alle strutture ed infrastrutture principali del porto di Gioia Tauro, per il periodo di ritorno di 950 anni, sviluppato in ambiente GIS. Gli elementi lineari, quali banchine e linee elettriche, sono stati discretizzati in segmenti di qualche decina di metri, in modo da tener conto dell'eventuale variabilità spaziale dei parametri di ingresso alle curve di fragilità. Le gru semoventi e le linee elettriche sono di colore arancione ad indicare che il danno sismico atteso è moderato. Il livello di danno sismico stimato è nullo per la maggior parte delle banchine, rappresentate in verde nella Figura 13, ad eccezione di un tratto della Banchina Alti Fondali e della Banchina Nord F', in giallo ad indicare danno atteso lieve; in accordo con la definizione fornita in HAZUS, questo significa che potrebbero formarsi alcune fratture sulla superficie delle banchine e, quindi, essere necessari interventi di riparazione. Il tratto della Banchina Alti Fondali ha percentuale di funzionalità (Pachakis e Kiremidjian, 2004) del 92% con tempi di ripristino di circa 2 giorni, mentre i tratti della Banchina Nord F' hanno percentuale di funzionalità di almeno il 55% ed il tempo di ripristino è di circa 15 giorni. È importante ricordare che il tempo necessario per le riparazioni e la messa in funzione delle componenti portuali danneggiate dipende significativamente dalla configurazione portuale, dalla tipologia delle strutture, dal numero di addetti a disposizione e dai tempi di intervento. I tempi stimati, pertanto, sono da ritenere indicativi e validi solo in prima approssimazione.

Figura 12
a) Curve di fragilità e
b) curve per la stima dei
tempi di ripristino proposte
da HAZUS (NIBS, 2004)
per le strutture affacciate a
mare.

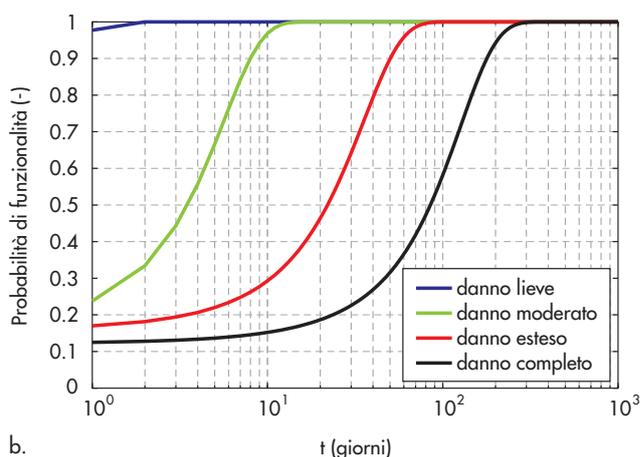
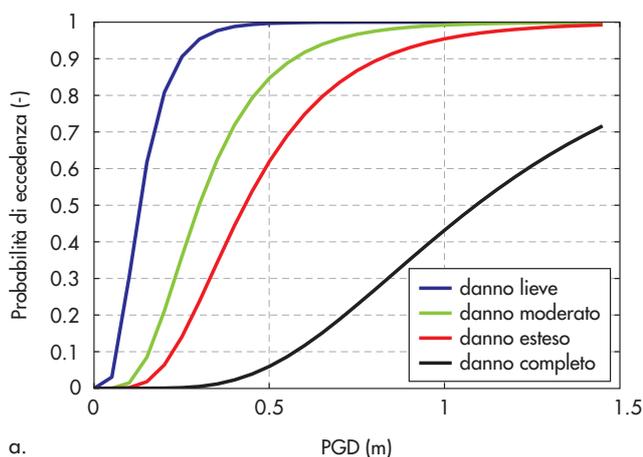




Figura 13
 Scenario di danno sismico atteso per le principali strutture ed infrastrutture del porto di Gioia Tauro per il periodo di ritorno di 950 anni, sviluppato in ambiente GIS.

3.6.2 Sviluppo di nuove curve di fragilità per banchine portuali

Progetti di ricerca, come il progetto europeo REAKT (<http://www.reaktproject.eu/>), sono attualmente in corso per definire curve di fragilità *ad hoc* per le strutture portuali più importanti, ossia le opere di accosto. In questo contesto, sono in via di sviluppo in Eucentre studi per la definizione di curve di fragilità analitiche per banchine portuali a gravità e su pali, che rappresentano le tipologie maggiormente utilizzate sul territorio nazionale.

Per quanto concerne le banchine a gravità, è stata messa a punto una procedura numerica finalizzata allo sviluppo di curve di fragilità utilizzando il concetto di rete neurale artificiale, ANN (*Artificial Neural Network*). La struttura tipo, assunta come riferimento, è molto diffusa in Italia ed, in generale, nei Paesi del Mediterra-

neo; è costituita da cinque blocchi sovrapposti per una altezza complessiva di 12.5 m e una larghezza alle due estremità, superiore ed inferiore, rispettivamente di 8 e 4 m. La procedura considera sia l'incertezza associata ai parametri meccanici che costituiscono il modello, sia quella associata all'*input* sismico. I risultati forniti dalle (numerose) analisi numeriche deterministiche non lineari sono utilizzati per calibrare la ANN. Quando si tenta di risolvere problemi complessi, la ANN può essere particolarmente utile per trovare relazioni non lineari tra un *set* di dati di ingresso e un *set* di risultati. Infatti, mentre per un'analisi di regressione tradizionale la funzione di approssimazione è fissata a priori, con la ANN questo tipo di relazione viene ottenuta direttamente dal processo di addestramento della rete. Nello studio condotto, la ANN è stata utilizzata per determinare la

relazione tra le informazioni sismiche, geotecniche e strutturali del modello della banchina portuale in funzione delle prestazioni indicate dagli EDPs (*Engineering Demand Parameters*) opportunamente definiti. Di tutte le simulazioni numeriche effettuate, costituite dall'insieme di variabili di ingresso e risultati corrispondenti, il 50% è stato utilizzato per calibrare la ANN, il 25% per validarla e il rimanente 25% per ulteriori tests. La ANN, infine, è stata impiegata direttamente per ricavare le curve di fragilità. I dettagli dello studio condotto ad oggi per lo sviluppo di curve di fragilità per banchine a gravità sono illustrati in Calabrese e Lai (2012) ed in Calabrese e Lai (2013).

L'obiettivo dello studio avviato per le banchine su pali è quello di investigare la vulnerabilità di tale tipologia di banchina portuale sottoposta a sequenze di eventi sismici. La banchina su pali tipo, a partire dalla quale è stato sviluppato il modello da usare nelle analisi dinamiche, è la Banchina Alti Fondali del porto di Gioia Tauro; questa banchina è stata realizzata con pali di diametro di 1.5 m, disposti in quattro file e di lunghezza compresa tra 25 m e 40 m; i pali sorreggono un impalcato costituito da pulvini e travi prefabbricate e da una soletta armata gettata in opera dello spessore di 65 cm. Le banchine a pali di grande diametro (compreso tra 1 e 2 m) sono molto diffuse in Italia e nell'Europa Meridionale (e.g., Turchia, Grecia, etc.). Sono stati definiti due modelli lito-stratigrafici rappresentativi a partire dai dati geotecnici di alcuni porti italiani valutando le distribuzioni statistiche dei parametri e le incertezze associate. Poiché le curve di fragilità sono state definite attraverso analisi dinamiche non lineari, una parte significativa dello studio si è concentrata sulla modellazione della non linearità dei pali che è stata introdotta nel modello attraverso l'approccio a plasticità concentrata. I pali sono stati modellati come elementi elastici collegati ai nodi da potenziali cerniere plastiche, che possono attivarsi durante l'analisi dinamica. Tutte le analisi dinamiche sono state eseguite con riferimento ad un modello numerico ben caratterizzato e validato. Sono stati identificati differenti meccanismi di rottura introducendo l'effetto dei parametri più critici. La gamma delle intensità dell'*input* sismico necessario per effettuare le analisi dinamiche incrementalì è stata definita attraverso una serie di analisi preliminari. Le curve di fragilità per le banchine portuali su pali sono state ricavate sulla base dei risultati di un numero significativo di analisi dinamiche non lineari (circa 700). Lo studio condotto per lo sviluppo di curve di fragilità per banchine su pali è illustrato in dettaglio nella tesi di dottorato Mirfatah (2013). Un'applicazione preliminare

delle curve in oggetto è stata effettuata in Bozzoni et al. (2014); i livelli di danno, stimati con le nuove curve di fragilità con riferimento alla Banchina Alti Fondali del porto di Gioia Tauro, sono in buon accordo con quelli valutati applicando la procedura *standard* proposta in HAZUS (NIBS, 2004).

4. Conclusioni

L'articolo ha illustrato lo studio condotto al porto di Gioia Tauro al fine di stimare il danno sismico atteso alle principali strutture ed infrastrutture portuali, a partire dalla definizione della pericolosità sismica, tenendo conto sia degli effetti di sito, che del potenziale rischio di liquefazione. A questo scopo, è stata adottata la procedura generale messa a punto nell'ambito del progetto finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile ad Eucentre, dal titolo "Vulnerabilità e rischio sismico di strutture portuali marittime italiane", che riguarda numerosi ed importanti porti italiani: oltre a Gioia Tauro, Salerno, Ancona e Messina, solo per citarne alcuni. La metodologia sviluppata impiega la tecnologia GIS (*Geographical Information System*), sfruttandone le potenzialità ed i vantaggi. I dati di partenza dello studio (e.g., informazioni tecniche relative alle opere portuali, dati geotecnici, rilievi batimetrici) sono stati elaborati ed organizzati in una banca dati informatica con interfaccia cartografica georeferenziata GIS, fruibile tramite *web* come piattaforma *webGIS*. La piattaforma non solo raccoglie i dati tecnici relativi ai porti, ma costituisce, anche, lo strumento di elaborazione dei dati di base per la generazione di mappe del potenziale di liquefazione e dei relativi cedimenti indotti nel terreno, nonché delle mappe di danno sismico atteso alle opere portuali.

La pericolosità sismica di base al sito del porto di Gioia Tauro è stata definita in accordo alle prescrizioni contenute nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC, 2008), in termini di spettri di risposta elastici in accelerazione ed accelerogrammi sismo- e spettro-compatibili. La valutazione della risposta sismica locale è stata condotta a partire da un'opportuna modellazione geotecnico-sismica dell'area portuale di Gioia Tauro, basata sui dati ottenuti dalle campagne di indagini geognostiche eseguite al porto. La notevole estensione del porto, la disomogenea caratterizzazione dell'area portuale e l'interpretazione dei dati da indagini geognostiche hanno portato alla definizione di due modelli geotecnico-sismici da utilizzare nelle analisi di risposta sismica locale: uno riferito alla zona settentrionale dell'area portuale di Gioia Tauro ed uno per la zona meridionale. Per tenere in

considerazione le incertezze relative alla caratterizzazione geologica, geotecnica e lito-stratigrafica delle aree portuali e della variabilità dell'input sismico sono state effettuate analisi affidabilistiche della risposta sismica locale; per entrambe le zone (Nord e Sud), è stato adottato un modello 1D con legame costitutivo di tipo viscoelastico lineare-equivalente. La valutazione della suscettibilità alla liquefazione e dei relativi spostamenti indotti nei depositi di terreno all'interno dell'area portuale di Gioia Tauro è stata condotta mediante l'utilizzo dei metodi empirici, sia di natura deterministica, che probabilistica, più accreditati a livello internazionale; sono stati impiegati tre approcci metodologici indipendenti, utilizzati congiuntamente in modo da poter pervenire ad una valutazione della suscettibilità alla liquefazione che tenga conto dell'incertezza dei metodi adottati. La stima della vulnerabilità sismica delle principali strutture portuali di Gioia Tauro è stata condotta mediante l'applicazione di curve di fragilità empiriche disponibili in letteratura; nell'articolo, sono sinteticamente illustrate le attività di ricerca svolte in questo ambito in Eucentre, in particolare, gli studi condotti per lo sviluppo di curve di fragilità analitiche per banchine a blocchi e su pali, che rappresentano le tipologie più diffuse in Italia. I dati ed i risultati delle elaborazioni effettuate per il porto di Gioia Tauro sono integrati nell'infrastruttura di dati geografici in uso da parte del Dipartimento della Protezione Civile, tramite la piattaforma webGIS. Questo sistema consente alla Protezione Civile di avere a disposizione un servizio immediatamente e pienamente fruibile che permetta, in fase di prevenzione, lo sviluppo di strategie e piani di intervento finalizzati alla

mitigazione del rischio sismico ed offra, in fase di emergenza, la possibilità di individuare in tempi brevi gli elementi strategici a rischio.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il Dipartimento della Protezione Civile (DPC), che finanzia il progetto "Vulnerabilità e rischio sismico di strutture portuali marittime italiane", in particolare, il Dott. Paolo Marsan, referente del DPC per il progetto.

Si specifica che lo studio relativo alle curve di fragilità per banchine su pali si iscrive in un obiettivo più ampio del Progetto Europeo FP7 REAKT ("*Strategies and tools for Real Time Earthquake Risk Reduction*"; <http://www.reakt-project.eu/>), Working Package 5, Task 5.2.3 ("*Development of time-dependent fragility curves for critical transportation system components*"); gli autori sono grati alla Commissione Europea per il supporto finanziario in questo ambito di ricerca.

Si ringraziano, inoltre, l'Ing. Massimo Sessa e l'Ing. Andrea Ferrante della Terza Sezione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Gli autori sono grati all'Autorità Portuale di Gioia Tauro, in particolare al personale dell'Area Tecnica, per aver reso disponibili i dati necessari allo sviluppo dello studio relativo al porto di Gioia Tauro.

Si ringrazia, infine, la Dr. Elisa Zuccolo per il supporto fornito nello studio *ad hoc* per la definizione della magnitudo attesa al sito di Gioia Tauro e nella selezione degli accelerogrammi naturali sismo- e spettro-compatibili per i periodi di ritorno di 100 e 950 anni.

Bibliografia

- Awojobi A.O. (1975) - The settlement of a foundation on Gibson soil of the second kind, *Géotechnique*, 25(2), 221-228.
- Boulangier R., Idriss I. (2012) - Probabilistic Standard Penetration Test-Based Liquefaction Triggering Procedure, *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 138(10), 1185-1195.
- Bozzoni F., Famà A., Lai C.G., Mirfatah S.A. (2014) - Seismic risk assessment of seaports using GIS: the port of Gioia Tauro in Southern Italy, 33th PIANC World Congress San Francisco, USA 2014, June 1-5 2014.
- Bozzoni F., Lai C.G. (2012) - Seismic Risk Assessment of Italian Seaports Using GIS Technology: the Ports of the Calabria Region, Proceedings 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, September 24-28, 2012.
- Bozzoni F., Lai C.G., Bianchi A. (2012) - Application of GIS Technology to Seismic Risk Assessment of Calabrian Seaports in Italy, Proceedings 2nd Mediterranean Days of Coastal and Port Engineering - Infrastructures, Logistics and Sustainability, Valencia, Spain, May 23-25, 2012.
- Bozzoni F., Scandella L., Lai C.G., Corigliano M. (2011) - Stima del danno sismico di porti marittimi attraverso la tecnologia GIS: il caso del porto di Salerno, *Progettazione Sismica*, Vol. 1, No. 1, Gennaio-Aprile 2011, pp. 117-137.
- Calabrese A., Lai C.G. (2012) - Performance-based seismic design and fragility evaluation of blockwork wharf structures, IUSS Press, Pavia, Italia - ISBN 978-88-6198-075-4.
- Calabrese A., Lai C.G. (2013) - Fragility functions of blockwork wharves using artificial neural networks, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 52, 88-102.
- Cetin K.O., Bilge H.T., Wu J., Kammerer A., Seed R.B. (2009) - Probabilistic models for the assessment of cyclically-induced reconsolidation (volumetric)

- settlements, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 135 (3), 387-398.
- Cetin K.O., Seed R.B., Der Kiureghian A., Tokimatsu K., Harder L.F. Jr., Kayen R.E., Moss R.E.S. (2004) - SPT-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(12), 1314-1340.
- Circ. NTC (2009) - Circolare del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti n. 617 del 2 febbraio 2009. Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008. G.U. n. 47 del 26 febbraio 2009.
- Corigliano M., Lai C.G., Rota M., Strobbia C. (2012) - ASCONA: Automated Selection of COmpatible Natural Accelerograms. *Earthquake Spectra*, 28 (3), 1-23.
- CSIL (2012) -, Ex post evaluation of investment projects co-financed by the European Fund For Regional Development (ERDF) and Cohesion Fund (CF) in the period 1994-1999: the port of Gioia Tauro. Centre for Industrial Studies, Milan. Report prepared for European Commission (http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/evaluation/pdf/projects/port_gioia_tauro.pdf).
- Facciorusso J., Vannucchi G. (2003) - Liquefaction Hazard Maps of the Harbour Area of Gioia Tauro (Italy) by Geostatistical Methods, *Proceedings of the 4th International Conference of Earthquake Engineering and Seismology*, Tehran, Islamic Republic of Iran, May 12-14, 2003.
- Famà A. (2013) - Modellazione geotecnica e suscettibilità alla liquefazione per la valutazione della vulnerabilità sismica delle strutture portuali marittime: il porto di Gioia Tauro. Tesi di Laurea Magistrale, Facoltà di Ingegneria - Università degli Studi di Pavia. Dicembre (2013).
- GEER-021 (2010) - Geotechnical Engineering Reconnaissance of the 2010 Haiti Earthquake. GEER Association Report No. GEER-021, V. 1: February 22, 2010 (<http://www.geerassociation.org>).
- GEER-022 (2010) - Geotechnical Engineering Reconnaissance of the 2010 Maule, Chile Earthquake. GEER Association Report No. GEER-022, V. 2: May 25, 2010 (<http://www.geerassociation.org>).
- Gibson R.E. (1967) - Some results concerning displacements and stresses in a non-homogeneous elastic half-space, *Géotechnique*, 17(1), 58-67.
- ICMS (2008) - Indirizzi e criteri generali per la Microzonazione Sismica, approvato da Dipartimento della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e Province Autonome in data 13 novembre 2008.
- Idriss I.M. (1990) - Response of soft soil sites during earthquakes. *Proc. H. Bolton Seed Memorial Symposium*, Duncan J.M. (editor), Vol. 2, 273-290.
- Idriss I.M., Boulanger R.W. (2008) - Soil Liquefaction During Earthquakes, EERI Monograph.
- Idriss I.M., Boulanger R.W. (2012) - Examination of SPT-Based Liquefaction Triggering Correlations, *Earthquake Spectra*, 28(3), 989-1018.
- Idriss J., Sun J.I. (1992) - SHAKE91 - A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits. University of California, Davis, USA.
- Ishihara K., Yoshimine M. (1992) - Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, *Soils and Foundations* 32(1). 173-188.
- Iwasaki T., Tatsuoka F., Tokida K., Yasuda S. (1978) - A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. 2nd International Conference on Microzonation for Safer Construction - Research and Application, San Francisco, Calif., 26 November - 1 December. *American Society of Civil Engineers*, New York. Vol. 2, pp. 885-896.
- Ku C., Juang H., Chang C., Ching J. (2012) - Probabilistic version of the Robertson and Wride method for liquefaction evaluation: development and application, *Canadian Geotechnical Journal*, 49 (1) pp. 27-44.
- Lai C.G., Corigliano M., Sanchez H. (2009a) - Some examples of 1D fully stochastic site response analyses of soil deposits. *Proceedings ACES workshop: advances in performance-based earthquake engineering*, Corfu, Greece.
- Lai C.G., Foti S., Rota M. (2009b) - Input sismico e stabilità geotecnica dei siti di costruzione. *Series of Manuals of Aseismic Design*, Vol. 6, IUSS Press. ISBN: 978-88-6198-035-8. Produced and distributed by Fondazione Eucentre, Via Ferrata 1 - 27100 Pavia. April 2009, pp. 312.
- Legge 30 (1998) - Conversione in legge, con modificazioni, del decreto legge 30 dicembre 1997, n. 457, recante disposizioni urgenti per lo sviluppo del settore dei trasporti e l'incremento dell'occupazione. G.U. n.49 del 28 Febbraio 1998.
- Legge 84 (1994) - Riordino della legislazione in materia portuale. G.U. n. 28 del 4 Febbraio 1994 suppl. ordinario n. 21.
- McGuire R.K., Arabasz W.J. (1990) - An introduction to probabilistic seismic hazard analysis. *Geotechnical and Environmental Geophysics*. Volume III, pp. 333-353, *Society of Exploration Geophysicists*
- Meletti C., Galadini F., Valensise G., Stucchi M., Basili R., Barba G., Vannucci G., Boschi E. (2008) - A seismic source model for the seismic hazard assessment of the Italian territory, *Tectonophysics*. 450 (1): 85-108.
- Mirfattah S.A. (2013) - Assessment of seismic vulnerability and risk of pile-supported wharves. PhD Thesis, ROSE Programme, UME School, IUSS Pavia, Italy.
- NIBS (2004) - National Institute of Building Sciences. *Earthquake loss estimation methodology, HAZUS*. Technical manual, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- NTC (2008) - Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 14 gennaio 2008. Norme tecniche per le costruzioni. G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008.
- Ohta Y., Goto N. (1978) - Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 6. pp. 167-187.
- Pachakis D., Kiremidjian A.S. (2004) - Estimation of

- Downtime-related revenue losses in seaport following scenario earthquakes, *Earthquake Spectra*, Vol. 20. N. 2. pp. 427-449.
- PIANC (2001) - *Seismic Design Guidelines for Port Structures*. Permanent International Navigation Association. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands.
- Rapporto Jones Lang LaSalle (2013) - *European seaports: the growing logistics opportunity*. November 2013. (http://www.joneslanglasalle.eu/ResearchLevel1/European_Seaports_Logistics_Industrial.pdf).
- Rix G.J., Stokoe K.H. (1991) - Correlation of initial tangent modulus and cone penetration resistance, *Proceedings of the International Symposium On Calibration Chamber Testing*, H.B. Huang ed., Elsevier Pub., New York, pp. 351-362.
- Robertson P.K. (2009) - Interpretation of cone penetration tests - a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009 46(11) pp. 1337-1355.
- Rota M., Lai C.G., Strobbia C.L. (2011) - Stochastic 1D site-response analysis at a site in central Italy, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 31, pp. 626-639.
- Rota M., Zuccolo E., Taverna L., Corigliano M., Lai C.G., Penna A. (2012) - Mesozonation of the Italian territory for the definition of real spectrum-compatible accelerograms. *Bulletin Earthquake Engineering* 01/2012 10(5) pp. 1357-1375.
- Schnabel P.B., Lysmer J., Seed H.B. (1972) - SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Rep. No. EERC 72-12, EERI, Berkeley, Calif.
- Seed H.B., Idriss I.M. (1970) - Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis. Rpt. No. UCB/EERC-70/10, U.C. Berkeley, December.
- Seed R.B. (2010) - Technical review and comments: 2008 EERI Monograph Soil Liquefaction During Earthquakes by I.M. Idriss and R.W. Boulanger. *Geotechnical Report N° UCB/GT - 2010/2011* University of California at Berkeley.
- SGI (2000) - Nuovo terminale petrolifero costiero Gioia Tauro: studio della stabilità della scarpata a mare in condizioni sismiche. Studio Geotecnico Italiano R.6046/17.
- Spallarossa D., Barani. S. (2007) - Disaggregazione della pericolosità sismica in termini di M-R-ε. Progetto DPC-INGV S1. <http://esse1.mi.ingv.it/d14.html>
- Toprak S., Holzer T.L., Bennett M.J., Tinsley J.C. III (1999) - CPT and SPT-based probabilistic assessment of liquefaction. *Proceedings of the Seventh US-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Counter-measures Against Liquefaction*, Technical Report MCEER-00-0019, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY; 69-86.
- Yang C., Wong D.W., Yang R., Kafatos M., Li Q. (2005) - Performance-improving techniques in web-based GIS, *International Journal of Geographical Information Science* 2005, 19(3): 319-342.
- Yilmaz Z. (2004) - GIS-Based Structural Performance Assessment of Sakarya City after 1999 Kocaeli Turkey Earthquake from Geotechnical and Earthquake engineering Point of View, M.Sc. Thesis. The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University (METU), Ankara, Turkey.
- Yoshimine M., Nishizaki H., Amano K., Hosono Y. (2006) - Flow deformation of liquefied sand under constant shear load and its application to analysis of flow slide of infinite slope, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26(2-4), 253-264.
- Zhang G., Robertson P.K., Brachman R.W.I. (2004) - Estimating Liquefaction-Induced Lateral Displacements Using the Standard Penetration Test or Cone Penetration Test, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 130, No. 8, pp. 861-871.

Gli Autori

Ing. Antonino Famà

Ha conseguito la Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, indirizzo Strutture, presso l'Università degli Studi di Pavia nel 2013.

Attualmente ricopre la posizione di Collaboratore alla ricerca ed all'interno della Sezione Geotecnica Sismica del Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica (Eucentre) di Pavia si occupa principalmente di analisi di risposta sismica locale, modellazione geotecnico-sismica per la valutazione degli effetti di sito, valutazione della suscettibilità alla liquefazione, vulnerabilità sismica di strutture portuali marittime, elaborazione di dati in ambiente GIS finalizzata alla creazione di mappe del potenziale di liquefazione e dei relativi cedimenti indotti e mappe di danno sismico.

Ing. Francesca Bozzoni

Ha conseguito la Laurea Specialistica in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio - Difesa del suolo e prevenzione dai rischi naturali presso il Politecnico di Milano nel 2008.

Ricopre la posizione di Ingegnere ricercatore nella Sezione Geotecnica Sismica del Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica (Eucentre) di Pavia dal Aprile 2009. L'attività di ricerca finora sviluppata ha riguardato problematiche tipiche sia della sismologia applicata all'ingegneria, che dell'ingegneria geotecnica sismica. Tra i principali lavori si segnalano lo sviluppo di piattaforme GIS per aree ed opere di particolare interesse geotecnico; studi di macro-zonazione sismica; valutazione degli effetti di sito; stima degli effetti indotti dallo scuotimento sismico come instabilità co-sismica e post-sismica dei versanti naturali, liquefazione, cedimenti ed espansioni laterali nei terreni; definizione di scenari di danno sismico; caratterizzazione geotecnico-sismica dei siti e sviluppo di modelli del sottosuolo; valutazione sul campo ed analisi degli effetti geotecnici nelle fasi di emergenza post-terremoto.

Ha ricoperto inoltre il ruolo di consulente tecnico-scientifico per enti pubblici e privati quali OUTech - Opole University of Technology e ENEL Green Power. È relatrice in congressi scientifici nazionali ed internazionali e membro del Gruppo di Lavoro Interistituzionale

nale per la Valutazione degli Aspetti Geotecnico-Sismici nelle fasi Post-Evento (Decreto del Capo Dipartimento 828 del 5 marzo 2012).

Prof. Ing. Carlo G. Lai

Ricopre attualmente la posizione di Professore Associato di *Geotecnica e Geotecnica Sismica* alla Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Pavia e di Responsabile della Sezione Geotecnica Sismica presso il Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica (Eucentre) a Pavia. Il Prof. Lai è anche docente di *Wave Propagation in Elastic Solids* e *Geotechnical Earthquake Engineering* alla Scuola Europea di Studi Avanzati per la Riduzione del Rischio Sismico (ROSE School - IUSS) che ha sede a Pavia.

Laureato in Ingegneria Civile al Politecnico di Torino, il Prof. Lai ha conseguito i titoli accademici di dottorato in Ingegneria Civile, di Laurea Magistrale in Scienze dell'Ingegneria e della Meccanica, e di Laurea Magistrale in Scienze dell'Ingegneria Civile presso la Georgia Institute of Technology di Atlanta (USA).

I suoi interessi di ricerca riguardano la geotecnica sismica e la sismologia applicata con particolare riferimento alla valutazione affidabilistica degli effetti dell'amplificazione sismica, alla macro- e micro- zonazione sismica di un territorio, alla propagazione delle onde di Rayleigh in mezzi dissipativi, alla soluzione di problemi di interazione dinamica terreno-struttura, alla definizione dell'input sismico ai siti di costruzione.

Il Prof. Lai è autore/co-autore di oltre 150 pubblicazioni scientifiche incluse due monografie e alcuni software applicativi. È stato coordinatore di numerosi progetti di ricerca aventi per oggetto varie tematiche di geotecnica sismica e sismologia applicata all'ingegneria. Attualmente coordina progetti sulla mitigazione del

rischio sismico negli aeroporti e nelle strutture portuali marittime, sui sistemi di pre-allarme sismico nella regione caraibica orientale, sulla risposta sismica locale in suoli liquefacibili, sulla simulazione numerica del terremoto del 2012 in Emilia, sulla definizione di spettri di risposta di normativa che tengano conto dell'amplificazione sismica locale.

Come attività professionali rilevanti, il Prof. Lai ha lavorato tre anni in Etiopia come responsabile di progetto alle dipendenze dell'Istituto per la Cooperazione Universitaria (ONG) per conto del Ministero degli Affari Esteri Italiano. Egli inoltre è stato per 5 anni consulente scientifico presso lo Studio Geotecnico Italiano a Milano.

È membro attivo e/o affiliato di diverse istituzioni scientifiche e professionali tra cui il comitato tecnico 202 (Transportation Geotechnics) e 203 (Geotechnical Earthquake Engineering) dell'International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), la Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Association (GEER) l'International Society for the Interaction of Mechanics and Mathematics (ISIMM), l'Associazione Geotecnica Italiana (AGI).

Il Prof. Lai è revisore di articoli scientifici in ingegneria geotecnica, sismologia applicata e geofisica applicata di oltre 15 riviste internazionali. Egli è membro del comitato editoriale della rivista internazionale "Transportation Geotechnics" edita da Elsevier.

Nel 2003 gli è stata conferita la Bishop Research Medal per il miglior contributo nella ricerca in ingegneria geotecnica pubblicato nel 2002 dalla British Institution of Civil Engineers di Londra.

■ Per ulteriori dettagli sugli Autori e per l'elenco delle principali pubblicazioni si veda il link: www.eucentre.it/geotecnica-sismica/risorse-umane/