

Stima del danno sismico di porti marittimi attraverso la tecnologia GIS: il caso del porto di Salerno

F. Bozzoni¹, L. Scandella², C.G. Lai³, M. Corigliano⁴ ■

Sommario

L'economia di molti Paesi industrializzati, tra cui l'Italia, si basa sull'exportazione ed importazione di merci. Una quota rilevante degli scambi commerciali è compiuta attraverso i porti marittimi, molti dei quali, in Italia, sono ubicati in zone sismicamente attive. L'esperienza acquisita in recenti terremoti (Kobe, Giappone, 1995; Port-au-Prince, Haiti, 2010; Maule, Cile, 2010), che hanno mostrato la significativa vulnerabilità sismica delle opere portuali, ha evidenziato la necessità di valutare e successivamente mitigare il rischio sismico associato alle strutture portuali esistenti.

1. Introduzione

La globalizzazione dei mercati stimola e sostiene la crescita dell'interscambio di merci tra i continenti, su cui si basa una parte considerevole dell'economia di molti Paesi industrializzati, tra cui l'Italia. I porti marittimi rappresentano un nodo fondamentale per gli scambi commerciali e l'ubicazione in zone a sismicità medio-elevata, che caratterizza numerosi ed importanti porti italiani come Gioia Tauro, Ancona, Salerno, Livorno, Catania, tanto per citarne alcuni, costituisce una situazione di potenziale rischio al verificarsi di un evento sismico.

Nella storia recente, a seguito di forti terremoti (Loma Prieta, Stati Uniti, 1989; Kobe, Giappone, 1995; Tokachi-Oki, Giappone, 2003; Port-au-Prince, Haiti, 2010; Maule, Cile, 2010) 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 e di deformazione ed instabilità del terreno, quali liquefazione e cedimenti indotti dallo scuotimento sismico (Rathje et al., 2010; Bray e Frost, 2010). Il danneggiamento di strutture portuali ha sia effetti immediati, per il ruolo strategico rivestito dai porti per le fina-

Obiettivo principale di questo articolo è illustrare la stima del danno potenziale, indotto dallo scuotimento sismico, sulle strutture portuali marittime. A tal fine è stata impiegata la tecnologia GIS (*Geographical Information System*), della quale sono presentate potenzialità e vantaggi. Una procedura di calcolo per la stima del danno sismico in aree portuali è stata messa a punto a partire dalla definizione della pericolosità sismica, tenendo conto sia degli effetti di sito che del potenziale rischio di liquefazione. Un esempio di applicazione è effettuato con riferimento al porto di Salerno.

lità di Protezione Civile, sia conseguenze di lungo termine, incidendo in modo significativo sull'economia di intere regioni, a causa dei considerevoli tempi di ricostruzione o riparazione dei danni necessari per il ripristino delle normali condizioni di esercizio.

La stima della vulnerabilità e del danneggiamento sismico di strutture portuali marittime italiane, ubicate in zone a media-alta sismicità, è oggetto della ricerca di un progetto finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile (DPC-PE d5 2009-2012), che ha come obiettivi principali:

- i) lo sviluppo di una banca dati informatica con interfaccia cartografica georeferenziata GIS (*Geographical Information System*) dei porti italiani;
- ii) la stima di scenari di danneggiamento sismico per i porti di maggiore rilevanza economica e commerciale;
- iii) lo sviluppo di una metodologia riguardante le banchine portuali marittime, finalizzata alla definizione delle modalità di progettazione e di verifica sismica, necessarie a rendere queste strutture idonee a sopportare l'*input* sismico.

Benchè il progetto sia multi-disciplinare, l'attenzione in questo articolo è posta sullo sviluppo

¹ Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Pavia - ✉ francesca.bozzoni@eucentre.it

² Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Pavia - ✉ laura.scandella@eucentre.it

³ Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Pavia - ✉ carlo.lai@eucentre.it

⁴ Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Pavia - ✉ mirko.corigliano@eucentre.it

della piattaforma GIS, che non solo consente la raccolta di dati tecnici relativi ai porti, ma costituisce anche un potente strumento di elabora-

zione dati, finalizzato alla definizione di scenari di danneggiamento sismico.

2. Tecnologia GIS per la stima del danneggiamento sismico di strutture portuali

Una banca dati di tipo GIS può essere efficacemente sviluppata ed utilizzata per la previsione del danneggiamento sismico di strutture portuali marittime. Essa permette di considerare e valutare congiuntamente i diversi fattori che contribuiscono alla pericolosità sismica in un'area portuale, fornendo, inoltre, la possibilità di identificare gli elementi strutturali ed infrastrutturali vulnerabili. A tal proposito, la rappresentazione in ambiente GIS della vulnerabilità, coadiuvata dai linguaggi di interrogazione spaziale e topologica sugli attributi e da potenti strumenti di analisi spaziale, costituisce uno strumento di notevole impatto visivo e di grande utilità per l'identificazione in tempi brevi di anomalie e/o situazioni che richiedano interventi urgenti per la mitigazione del rischio. Inoltre, tale rappresentazione consente di individuare, durante gli eventi sismici ed il possibile verificarsi di maremoti, gli elementi in grado di svolgere un ruolo strategico per le finalità di Protezione Civile o tali da assumere rilievo in relazione alle conseguenze di eventuali collassi o incidenti (per esempio siti di stoccaggio di sostanze e merci pericolose).

Tecnicamente, un GIS è una banca dati di tipo spaziale, pertanto consente di collegare le informazioni disponibili ai relativi "oggetti", o elementi grafici, posizionati con precisione nello spazio geografico, quindi individuati da coordinate relative ad un fissato sistema di georeferenziazione. Le peculiarità e potenzialità di una banca dati GIS consentono la gestione di imponenti moli di dati georeferenziati, l'integrazione di differenti categorie informative e la creazione di mappe.

I risultati delle elaborazioni possono essere resi consultabili ed interrogabili in rete tramite la realizzazione di mappe interattive con appositi applicativi di *webGIS* e la predisposizione di specifiche funzionalità GIS (Yang et al., 2005). Nell'ambito del progetto DPC-PE d5 2009-2012, tramite una piattaforma *webGIS*, le informazioni vengono rese fruibili all'interno dell'infrastruttura di dati geografici in uso da parte del DPC.

2.1 Piattaforma GIS dei porti italiani ubicati in zone a sismicità medio-elevata

L'attuale progetto Eucentre finanziato dal DPC costituisce la seconda fase di un progetto sviluppato da Eucentre per il DPC nel triennio 2005-

2008 (Eucentre-PE5, 2008). Il progetto in corso di svolgimento ha ampliato la banca dati sviluppata nella fase precedente con la selezione di tutti i più importanti porti a livello economico-commerciale situati in zone a medio-elevata sismicità. Complessivamente, i porti oggetto di indagine (Fig. 1) sono 24. Ai porti di Gioia Tauro (Calabria), Napoli e Salerno (Campania), Ancona (Marche), Augusta, Catania, Messina, Palermo e Trapani (Sicilia), Carrara e Livorno (Toscana), si sono aggiunti, nella seconda fase del progetto, i porti di Reggio Calabria (Calabria), Castellammare di Stabia e Torre Annunziata (Campania), Formia e Gaeta (Lazio), Bari, Barletta e Manfredonia (Puglia), Gela, Milazzo, Pozzallo, Riposto e Siracusa (Sicilia).

I dati tecnici relativi ai porti, raccolti ed organizzati all'interno della banca dati GIS, sono forniti dalle Autorità Portuali o, in generale, dagli enti che gestiscono i porti, mediante una scheda di raccolta dati opportunamente predisposta. La scheda è organizzata in tre parti: la prima, più generale, include gli indicatori che definiscono il ruolo svolto dal porto a livello nazionale, le informazioni riguardanti la tipologia dei traffici e le funzioni svolte dalle strutture portuali, i dati geomorfologici, litologici e batimetrici; la seconda concerne le caratteristiche strutturali delle banchine e le proprietà geotecniche dei fondali prospicienti l'area portuale; la terza parte della scheda è stata inserita nell'ambito della seconda fase progettuale (DPC-PE d5 2009-2012) al fine di includere i dati relativi alla gestione della sicurezza all'interno del porto, in accordo con il D.Lgs. 272 (1999).

Il GIS rappresenta lo strumento ideale per archiviare, gestire, interrogare, trasformare e rappresentare visivamente le informazioni e i dati georeferenziati, con i loro relativi attributi, afferenti a diversi ambiti tematici (Wright e Yoon, 2007). Dati di natura geologica, geotecnica, geomorfologica e batimetrica ed informazioni relative a strutture ed infrastrutture del sistema portuale sono organizzati in diversi *layers* tematici fra loro correlati. Nello specifico, la piattaforma GIS fornisce la possibilità di:

- aggiornare le informazioni disponibili tramite la modifica/aggiunta di temi all'interno di un *set* di dati (*editing*); ad esempio, possono essere agevolmente incluse all'interno della banca dati le informazioni relative agli ele-

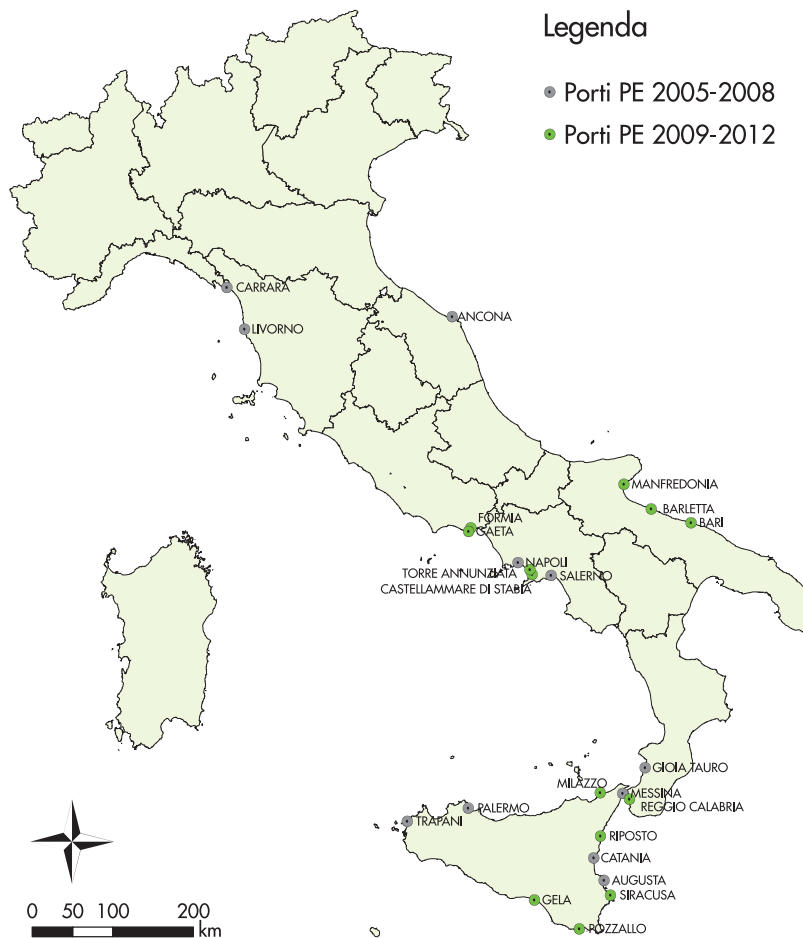


Fig. 1
Porti italiani situati in zone caratterizzate da sismicità medio-elevata, oggetto d'indagine nel progetto Eucentre.

- associare all'oggetto geografico varie tipologie di documenti (immagini, tabelle, *link* a siti *Internet* di interesse, etc.), gestibili e visualizzabili tramite apposite funzioni di interrogazione dell'oggetto, che permettano di valutare congiuntamente i diversi fattori che contribuiscono alla pericolosità sismica in un'area portuale e di identificare gli elementi strutturali ed infrastrutturali vulnerabili;
- effettuare ricerche interrogazioni spaziali e topologiche degli attributi degli oggetti reali rappresentati al fine di localizzare rapidamente oggetti/elementi di interesse e di circoscrivere aree di influenza per varie tipologie di fenomeni (ad esempio, la liquefazione);
- ottenere nuovi dati mediante strumenti di composizione e di elaborazione delle informazioni;
- definire scenari evolutivi (analisi "what if") per l'identificazione in tempi brevi di anomalie e/o situazioni che richiedano interventi urgenti per la mitigazione del rischio sismico in aree portuali.

A titolo di esempio, in figura 2 sono mostrati gli elementi vulnerabili del porto di Salerno che

sono stati georeferenziati e per ognuno dei quali sono state individuate le caratteristiche di interesse: banchine/moli, attrezzature per il carico/scarico di merci e componenti di stoccaggio, sistemi di trasporto, edifici e magazzini, infrastrutture di distribuzione.

Nella banca dati sono stati, inoltre, integrati i dati di pericolosità sismica, necessari, insieme alla stima della vulnerabilità e dell'esposizione degli elementi portuali, a valutare il potenziale danneggiamento sismico del sistema portuale. La piattaforma GIS include anche informazioni relative alla pericolosità tsunamigenica per aree portuali e retro portuali di alcuni importanti porti, rappresentate in termini di mappe digitali di massima e minima area di inondazione attesa per maremoti associati a diversi periodi di ritorno (Eucentre-PE5, 2008).

Il programma GIS utilizzato è ArcGIS 9.1 (ESRI). La struttura adottata per l'organizzazione dei dati relativi ai porti è un modello di dati "object oriented", costituito dal *personal geodatabase*. All'interno di questa banca dati centrale è possibile inserire dati vettoriali, puntuali, lineari o areali (*feature class*), e *raster*, ma anche regole e relazioni topologiche tra gli oggetti reali rappresentati. Pertanto, tutti i dati geografici relativi a ciascun porto risultano immagazzinati in un

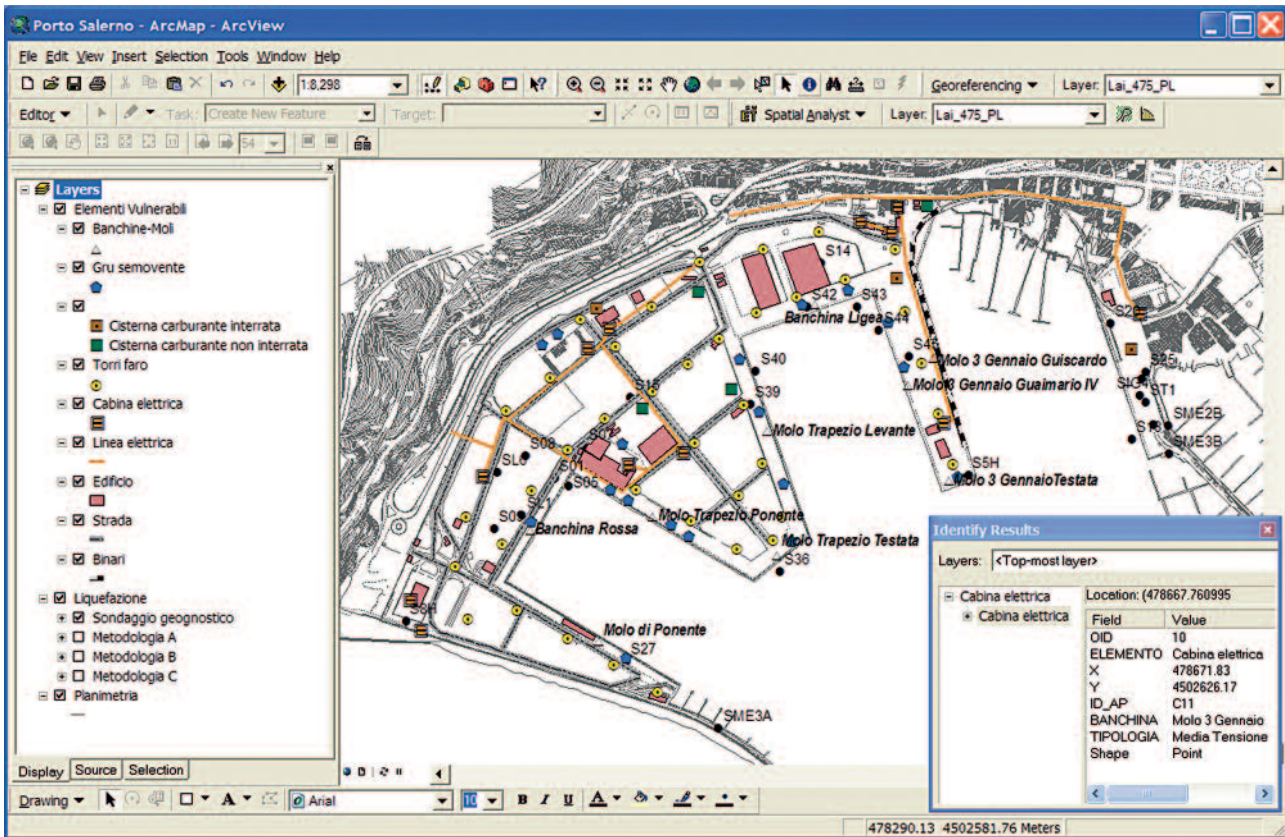


Fig. 2 Estratto della banca dati GIS predisposta per l'area portuale di Salerno. In evidenza, i sondaggi geognostici e gli elementi vulnerabili all'azione sismica.

unico "contenitore", organizzato in un opportuno numero di "sub-contenitori" (*feature data-set*) distinti per categoria informativa, che contengono le informazioni di carattere generale riguardanti il porto e l'ente che lo gestisce, le caratteristiche tecniche delle opere portuali ed i dati di natura geotecnica relativi all'area portuale. La piattaforma GIS non solo raccoglie i dati tecnici relativi ai porti, ma costituisce anche un potente strumento di elaborazione dei dati primitivi mediante l'applicazione delle procedure di calcolo messe a punto per la valutazione del potenziale di liquefazione, dei cedimenti indotti nel terreno e del danneggiamento sismico di infrastrutture portuali, che saranno illustrate nei paragrafi successivi.

Tramite la piattaforma webGIS, attualmente in fase di implementazione, le informazioni vengono visualizzate all'interno dell'infrastruttura di dati geografici in uso da parte del DPC congiuntamente alle informazioni contenute nelle banche dati sviluppate da Eucentre nell'ambito di altri progetti finanziati dal DPC riguardanti dighe, scuole e sistema viabilistico presenti sul territorio italiano. Al termine del progetto questo sistema consentirà 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 ed offra, in fase di emergenza, la possibilità di individuare in tempi brevi gli elementi strategici a rischio.

2.2 Scenari di danno sismico per le infrastrutture portuali

La stima del danno sismico potenzialmente indotto sulle infrastrutture portuali è di fondamentale importanza, dato il ruolo strategico rivestito dai porti marittimi. La riduzione o, addirittura, 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 alle strutture portuali è stata sviluppata una procedura di calcolo, le cui fasi principali, schematizzate in figura 3, sono: la stima della pericolosità sismica, la definizione della vulnerabilità e dell'esposizione delle strutture portuali e la valutazione del livello di danno. La flessibilità della metodologia messa a punto consente l'applicazione per diversi livelli di dettaglio, in funzione della tipologia e della qualità dei dati disponibili. In questo contesto, la piattaforma GIS svolge un ruolo chiave, sia per la raccolta dei dati tecnici relativi alle strutture, sia per l'elaborazione delle informazioni finalizzata alla definizione di scenari di danno sismico. In seguito, vengono illustrate le fasi della procedura.

2.2.1 Pericolosità sismica

La pericolosità sismica rappresenta qualunque effetto, diretto (ad esempio lo scuotimento del suolo) o indotto, capace di causare conseguenze avverse sulle attività umane, riconducibile ai terremoti (Faccioli e Paolucci, 2005). Nell'ambito delle infrastrutture portuali i danni causati da eventi sismici possono essere dovuti a diversi fenomeni: scuotimento del suolo, liquefazione, cedimenti del terreno e, per forti terremoti, rottura di faglia. Pertanto, la procedura di calcolo implementata per la stima della pericolosità sismica prevede:

- la definizione dell'azione sismica su suolo rigido - pericolosità sismica di base;
- l'analisi della risposta sismica locale per tener conto di possibili effetti di amplificazione dovuti alla presenza di terreni soffici;
- la valutazione della suscettibilità alla liquefazione e dei cedimenti indotti nel terreno.

Azione sismica su suolo rigido - pericolosità sismica di base

La pericolosità sismica di base può essere definita sia con metodi deterministici, assumendo uno specifico terremoto di scenario, che con metodi probabilistici, nei quali le incertezze dovute alla magnitudo, alla localizzazione ed al tempo di occorrenza del terremoto sono esplicitamente considerate.

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/>). La pericolosità è calcolata in ogni nodo di un reticolo di riferimento costituito da 10751 punti situati ad una distanza media l'uno dall'altro inferiore a 10 km. Per ogni nodo del reticolo e per diversi periodi di ritorno lo studio dell'INGV fornisce lo spettro a pericolosità uniforme. Le NTC (2008), che hanno recepito i risultati dello studio di pericolosità dell'INGV, definiscono, per ogni nodo della griglia, uno spettro di risposta elastico caratterizzato da un'espressione analitica che dipende da tre parametri: accelerazione orizzontale di picco su suolo rigido a_g ; valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale F_0 ; periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro isoprobabile in accelerazione T_c^* .

Le moderne norme tecniche, tra le quali le NTC (2008), introducono un approccio di tipo prestazionale per la valutazione della sicurezza e della funzionalità delle strutture. La prestazione attesa della struttura è valutata con riferimento a diversi stati limite caratterizzati da una determinata probabilità di eccedenza nel periodo di

riferimento considerato. Per le strutture portuali gli stati limite da considerare secondo le NTC (2008) sono lo Stato Limite di Danno (SLD) e lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV), ai quali corrispondono rispettivamente le probabilità di eccedenza del 63% e del 10% durante la vita di riferimento (V_R).

Nelle NTC (2008) il periodo di riferimento è ottenuto come prodotto della vita nominale dell'opera (V_N) per il coefficiente della classe d'uso (C_U). V_N rappresenta la durata della vita di progetto della struttura e per opere ordinarie deve essere ≥ 50 anni.

Per la definizione della classe d'uso il DCDPC 3685 (2003) cita i porti tra le "opere infrastrutturali di interesse strategico di competenza statale, la cui funzionalità durante gli eventi sismici assume rilievo fondamentale per le finalità di protezione civile". Alla luce della Circ. NTC (2009), le opere portuali ricadono in classe d'uso IV ($C_U = 2$), a cui corrisponde una vita di riferimento $V_R = 100$ anni. Pertanto, i periodi di ritorno da considerare sono i seguenti:

- Stato Limite di Danno (SLD): 101 anni - probabilità di eccedenza (P_{VR}) 63%;
- Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV): 950 anni - probabilità di eccedenza (P_{VR}) 10%.

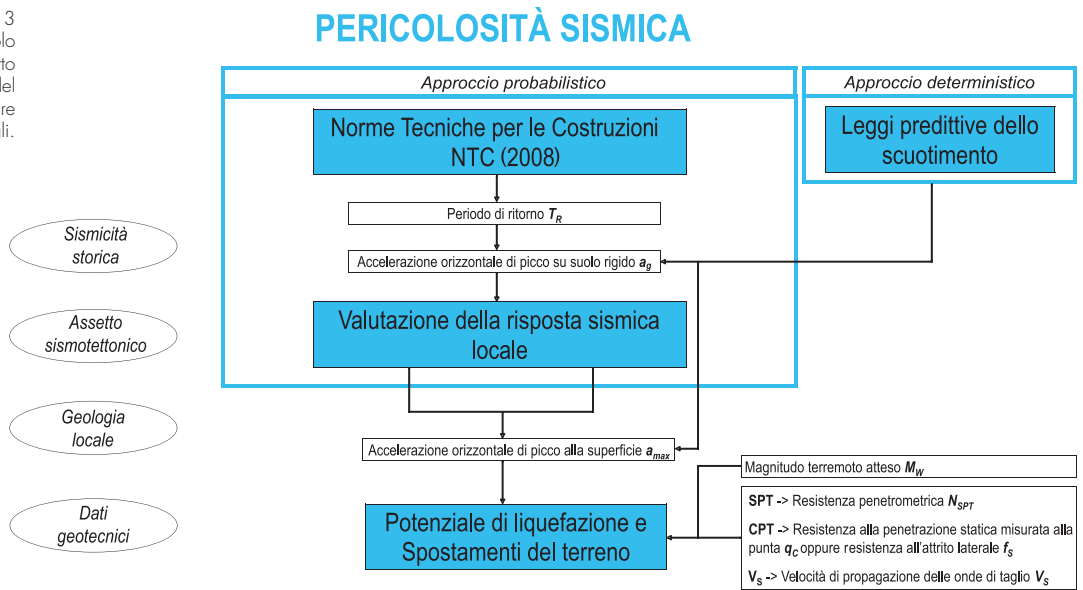
Anche a livello internazionale è diffuso un approccio di tipo prestazionale per le verifiche sismiche delle opere portuali. A tal proposito è di interesse valutare il livello di severità dell'azione sismica utilizzato dai più importanti riferimenti relativi alle tematiche portuali (e.g. Werner, 1998; PIANC, 2001; Pitilakis et al., 2006; POLA, 2007). Werner (1998), PIANC (2001) e POLA (2007) considerano due stati limite di riferimento, corrispondenti ai periodi di ritorno di 75 e 475 anni. Pitilakis et al. (2006) suggeriscono, nel caso di opere strategiche come i porti, la verifica delle prestazioni della struttura con riferimento all'azione sismica associata a tre periodi di ritorno pari a 100, 475 e 950 anni. Alla luce di questo, si è ritenuto necessario sviluppare scenari di danno con riferimento a tre periodi di ritorno: i due proposti dalle NTC (2008), i.e. 101 e 950 anni, ai quali è stato aggiunto il periodo di ritorno (T_R) di 475 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 nell'ambito del progetto prevede, inoltre, per la definizione della pericolosità sismica, l'impiego di un

approccio deterministico finalizzato all'identificazione di uno o più eventi di scenario caratteristici. Tali eventi sono definiti in due modi: sulla base di coppie magnitudo-distanza desumibili dallo studio di deaggregazione della pericolosità sismica condotto dall'INGV e pubblicato da Spallarossa e Barani (2007). Nota la coppia magnitudo-distanza dell'evento di scenario, per la stima del livello di scuotimento atteso sono

selezionate le leggi predittive dello scuotimento adatte ai siti oggetto di studio. In alternativa, l'evento di scenario può essere individuato sulla base delle faglie identificate nella banca dati delle sorgenti sismogenetiche italiane DISS (*Database of Individual Seismogenic Sources*, v.3.1.1, 2010, <http://diss.rm.ingv.it/diss/Version311.html>), che è stato integrato all'interno della piattaforma GIS.

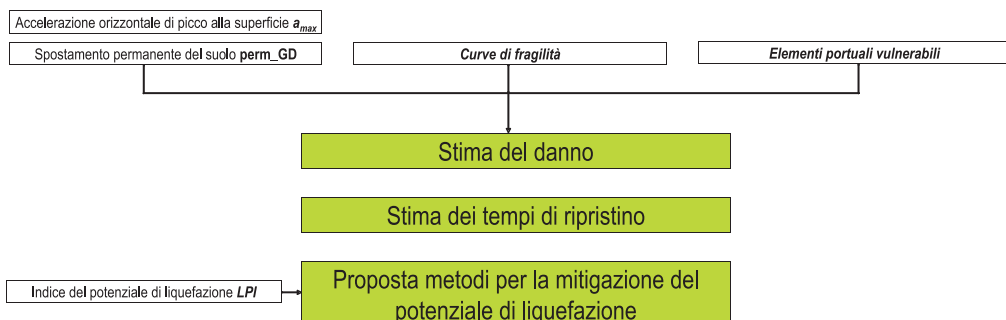
Fig. 3
Procedura di calcolo utilizzata nel progetto Eucentre per la stima del danno sismico di strutture portuali.



VULNERABILITÀ ed ESPOSIZIONE



DANNEGGIAMENTO SISMICO



Amplificazione locale

L'azione sismica riferita al substrato affiorante (suolo rigido) costituisce l'*input* per l'analisi di risposta sismica locale, finalizzata alla quantificazione dell'amplificazione lito-stratigrafica.

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 per gli effetti 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, che richiedono l'utilizzo di accelerogrammi. Nell'ambito di questo progetto, per i diversi periodi di ritorno considerati, sono stati selezionati gruppi di 7 accelerogrammi reali (il numero minimo secondo quanto prescritto nelle NTC, 2008) spettro-compatibili in media con lo spettro di riferimento. Questo tipo di analisi presuppone un'adeguata conoscenza delle proprietà geotecniche dei terreni, da determinare mediante specifiche indagini e prove, in sito e di laboratorio, che consentano la definizione di un adeguato modello geotecnico del sottosuolo. 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. SHAKE2000, EERA, STRATA, ProShake, DEEPSOIL, ecc.). In caso di configurazione del suolo più complessa, per la quale un modello 1D non è adeguato, devono essere utilizzati modelli più sofisticati, bidimensionali o tridimensionali.

Seguendo l'approccio deterministico, l'amplificazione locale può essere stimata, in prima approssimazione, dalle leggi predittive dello scuotimento sismico attraverso coefficienti correttivi, introdotti durante lo sviluppo delle leggi stesse.

In linea generale, la scelta del metodo più appropriato per la stima degli effetti locali dipende fortemente dalla quantità e dalla qualità dei dati disponibili. La procedura di calcolo proposta è flessibile ed è stata messa a punto allo scopo di consentire l'applicazione per diverse situazioni.

Suscettibilità a liquefazione e cedimenti indotti

Il fenomeno della liquefazione implica una perdita totale o parziale della resistenza al taglio e della rigidità del suolo, a causa dell'incre-

mento 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 basato 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. I dati geologico-geotecnici relativi ai porti oggetto d'indagine sono acquisiti tramite la Scheda Tecnica precedentemente descritta ed organizzati all'interno della piattaforma GIS. La stima del potenziale di liquefazione e dei cedimenti indotti nel terreno è stata condotta mediante l'impiego di correlazioni di natura empirica, a partire dai risultati ottenuti dalle indagini geotecniche in sito maggiormente utilizzate (Youd et al., 2001), ossia:

- prova penetrometrica dinamica standardizzata (SPT);
- prova penetrometrica statica (CPT);
- prove geofisiche per la stima di V_s .

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 dei metodi adottati.

I metodi delle "correlazioni di campagna" possono essere 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). Si veda il paragrafo 3.2.5 per le definizioni di questi indici relativamente al caso studio del porto di Salerno.

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). L'impiego di questi parametri in ambiente GIS, unitamente ai valori di cedimento del terreno (verticale ed orizzontale), valutato con metodi empirici, non solo fornisce una rappresentazione della variabilità geografica del potenziale di liquefazione, ma consente anche di estrapolare i dati di ingresso necessari alla stima del danno per le infrastrutture portuali. Infatti, l'interpolazione, all'interno della piattaforma GIS, dei dati calcolati per ogni sondaggio consente di ottenere matrici di LPI, LSI, cedimenti verticali e spostamenti laterali del terreno in forma di mappe continue (*raster*), che descrivono l'andamento spaziale di questi parametri. Da queste mappe è, quindi, possibile estrarre i valori dei parametri in corrispondenza dei punti in cui sono ubicate le strutture portuali di interesse.

2.2.2 Vulnerabilità e stima del danno per strutture portuali

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. Generalmente le componenti portuali vengono raggruppate in tre categorie principali (Fig. 3): 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 viene comunemente valutata sulla base di curve di fragilità empiriche 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. Tipica-

mente i parametri di scuotimento adottati sono il picco di accelerazione (a_{max}) e lo spostamento permanente ($perm_{GD}$) stimati alla base della struttura. Nel presente lavoro si è seguita la procedura *standard* proposta in HAZUS (NIBS, 2004), supportata dai risultati raccolti nei progetti europei Risk_Ue (Pitilakis et al., 2006; Monge et al., 2004) e LessLoss (Deliverable 89, 2006; Faccioli, 2008). Nonostante le procedure per la stima del danno siano per lo più basate su dati americani e giapponesi (NIBS, 2004; ALA, 2001; Ichii, 2003, 2004), studi europei, che considerano i pochi dati disponibili di danneggiamento di strutture portuali europee (ad esempio quelli osservati dopo il terremoto di Lefkas, Grecia, 2003), hanno mostrato che le curve di fragilità messe a punto per i contesti nord-americano e nipponico possono essere ragionevolmente applicate anche in ambito europeo (Kakderi et al., 2006). Allo stato attuale studi sono in corso sulla messa a punto di nuove curve di fragilità adatte per le tipologie costruttive portuali europee (Kakderi e Pitilakis, 2010; tesi di *master* e dottorato, in fase di sviluppo, rispettivamente di Constantinos Thomopoulos e di Armando Calabrese, studenti della ROSE School, Centre for Post-Graduate Training and Research in Earthquake Engineering and Engineering Seismology).

Il danno di una struttura è classificato secondo cinque livelli (NIBS, 2004): nullo, lieve, moderato, esteso e completo. La tabella 1 illustra, a titolo di esempio, i livelli di danno ed i parametri delle corrispondenti curve di vulnerabilità per le banchine, in funzione dello spostamento permanente del suolo, secondo la procedura proposta in HAZUS (NIBS, 2004). Dalle probabilità di eccedenza ricavate con le curve di fragilità è possibile stimare il peggiore livello di danno probabile da associare alla struttura, assunto pari al livello di danno che per primo, nella scala decrescente dei livelli, ha la probabilità di eccedenza superiore al 50% (Pitilakis et al., 2007). In alternativa, si ottengono risultati analoghi assumendo come il peggiore livello di danno probabile quello che ha la maggiore probabilità di accadimento, calcolata come differenza tra le probabilità di superamento tra un livello e l'altro (NIBS, 2004). La metodologia di calcolo messa a punto prevede, inoltre, la stima dei tempi necessari per il ripristino della funzionalità delle strutture danneggiate utilizzando la procedura suggerita in NIBS (2004).

Tabella 1 - Livelli di danno e parametri delle corrispondenti curve di vulnerabilità per le banchine in funzione dello spostamento permanente del suolo (perm_GD) secondo la procedura proposta in HAZUS (NIBS, 2004)

Livello di danno	Descrizione	Funzionalità		Perm_GD	
				Media [m]	Deviaz. standard logaritmica [-]
Lieve	Lieve cedimento del suolo in prossimità di alcuni pali (per banchine e muri di sostegno e protezione da erosione) fessurati e danneggiati. Crepe sulle banchine. Necessarie riparazioni.	Uso ridotto	Operatività senza riparazioni	0.13	0.50
Moderato	Considerevole cedimento del suolo osservabile in prossimità di parecchi pali (per banchine e muri di sostegno e protezione da erosione) fessurati e danneggiati.	Non utilizzabile	Operatività dopo riparazioni	0.30	0.50
Esteso	Rotture di numerosi pali, scivolamento esteso dei pontili e significativo cedimento del suolo, causa di crepe estese nella pavimentazione.		Non riparabile	0.43	0.50
Totale	Rotture della maggior parte dei pali dovute al significativo cedimento del suolo. Danni estesi alle strutture portuali.			1.09	0.50

3. Caso studio: il porto di Salerno

La procedura di calcolo messa a punto per la stima del danneggiamento sismico potenzialmente indotto su infrastrutture portuali viene ora illustrata attraverso l'applicazione al porto di Salerno, situato in una zona a media sismicità. Il porto di Salerno, grazie alla sua posizione baricentrica nel mar Mediterraneo, assume un ruolo strategico sia per il sistema industriale e commerciale dell'area campana, con un bacino di utenza che comprende anche basso Lazio, Abruzzo e Molise, Lucania, Puglia e Calabria, sia, in generale, per l'economia marittima italiana. Infatti, da questo porto è possibile raggiungere rapidamente tutte le località del Centro e del Sud Italia attraverso un agevole collegamento con la rete autostradale nazionale. Inoltre, il porto di Salerno è collegato via mare a numerosi porti del mar Tirreno e dell'intero Mediterraneo.

I dati tecnici disponibili per il porto di Salerno (sondaggi geotecnici, elementi portuali vulnerabili, infrastrutture viarie, sistema elettrico, etc.) sono stati raccolti ed organizzati nella piattaforma GIS, che 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 danneggiamento sismico delle strutture portuali.

In seguito all'inquadramento geologico è stato costruito un modello di sottosuolo finalizzato alla valutazione della risposta sismica locale. Oltre alla stima degli effetti locali, particolare attenzione è stata dedicata alla stima dei cedimenti verticali e degli spostamenti orizzontali potenzialmente indotti dal fenomeno della liquefazione e della densificazione, sotto carico ciclico, dei sedimenti.

3.1 Pericolosità sismica

3.1.1 Inquadramento geologico

L'inquadramento geologico dell'area portuale di Salerno è basato sulle relazioni geologico-tecniche fornite dall'Autorità Portuale (AP) di Salerno, integrate dalla documentazione individuata tramite un'approfondita ricerca bibliografica, tra cui il Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico redatto dall'Autorità di Bacino Regionale in Destra Sele (<http://www.autoritabacino-destrasele.it>), il lavoro di ricerca di Vitale (2005) e la Relazione Geologica del Comune di Cava de' Tirreni (prot. 33813 del 26/05/2009, dal sito web <http://urbanistica.cittadicava.it>).

La zona oggetto di studio è ubicata nella fascia occidentale del comprensorio comunale salernitano. I sedimenti affioranti sono caratterizzati da un'intensa rete di discontinuità, in quanto sono di età triassica e, pertanto, hanno avuto modo di risentire non solo degli effetti tettonici dell'epoca terziaria e quaternaria, ma anche di quelli dovuti alle fasi retico-liassiche. In particolare, a grande scala, è possibile distinguere nella zona di indagine tre differenti litologie: calcari marnosi (Carnico), cioè alternanze di calcari, calcari marnosi, marne ed argille giallastre; dolomie (Norico), ossia dolomie grigie ben stratificate, talora straterellate e zonate, con alternanze di livelli argillosi grigi e verdastri; depositi di spiagge recenti (Quaternario).

3.1.2 Pericolosità sismica di base

La pericolosità sismica di base è stata definita in accordo alle prescrizioni contenute nelle NTC (2008). La tabella 2 riassume i valori dei parametri α_g , F_0 e T_c che servono a definire gli spettri di risposta elastici (per i periodi di ritorno indi-

Tabella 2 - Dati per la definizione delle pericolosità sismica di base secondo le NTC (2008) e risultanti dalla deaggregazione (Spallarossa e Barani, 2007) per il porto di Salerno (lat. 14.743°, long. 40.678°)

Periodo di ritorno [anni]	Pericolosità di base			Parametri di deaggregazione per a_g	
	a_g [g]	F_0 [-]	T_c^* [s]	M_W [-]	Dist. [km]
100	0.062	2.474	0.359	6.1	57.1
475	0.104	2.593	0.436	6.45	51.5
950	0.125	2.682	0.457	6.58	49.7

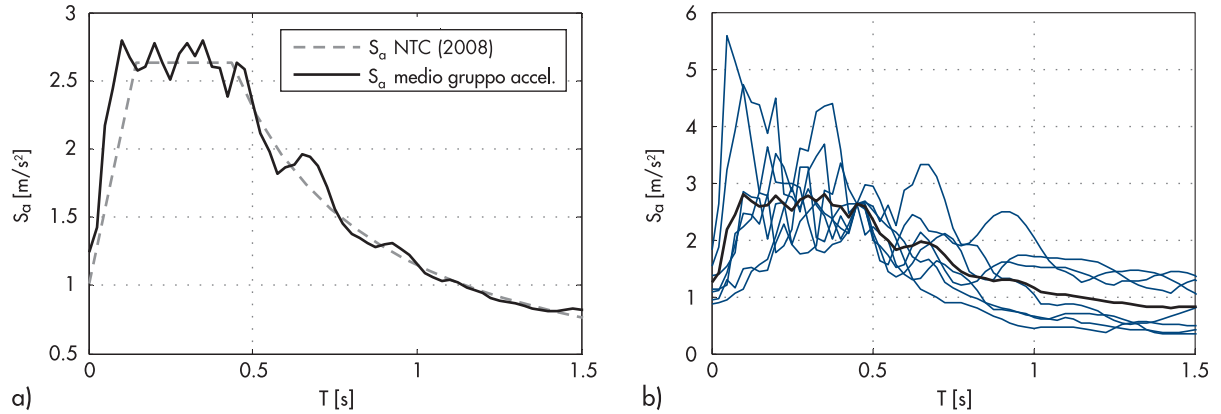


Fig. 4 Selezione degli accelerogrammi spettro-compatibili per il periodo di ritorno 475 anni al porto di Salerno: a) confronto tra lo spettro di riferimento e lo spettro medio degli accelerogrammi selezionati; b) spettri di risposta elastici degli accelerogrammi selezionati confrontati con lo spettro di risposta medio (linea nera continua).

cati nel paragrafo 2.2.1) per il porto di Salerno (coordinate geografiche: lat. 14.743°, long. 40.678°).

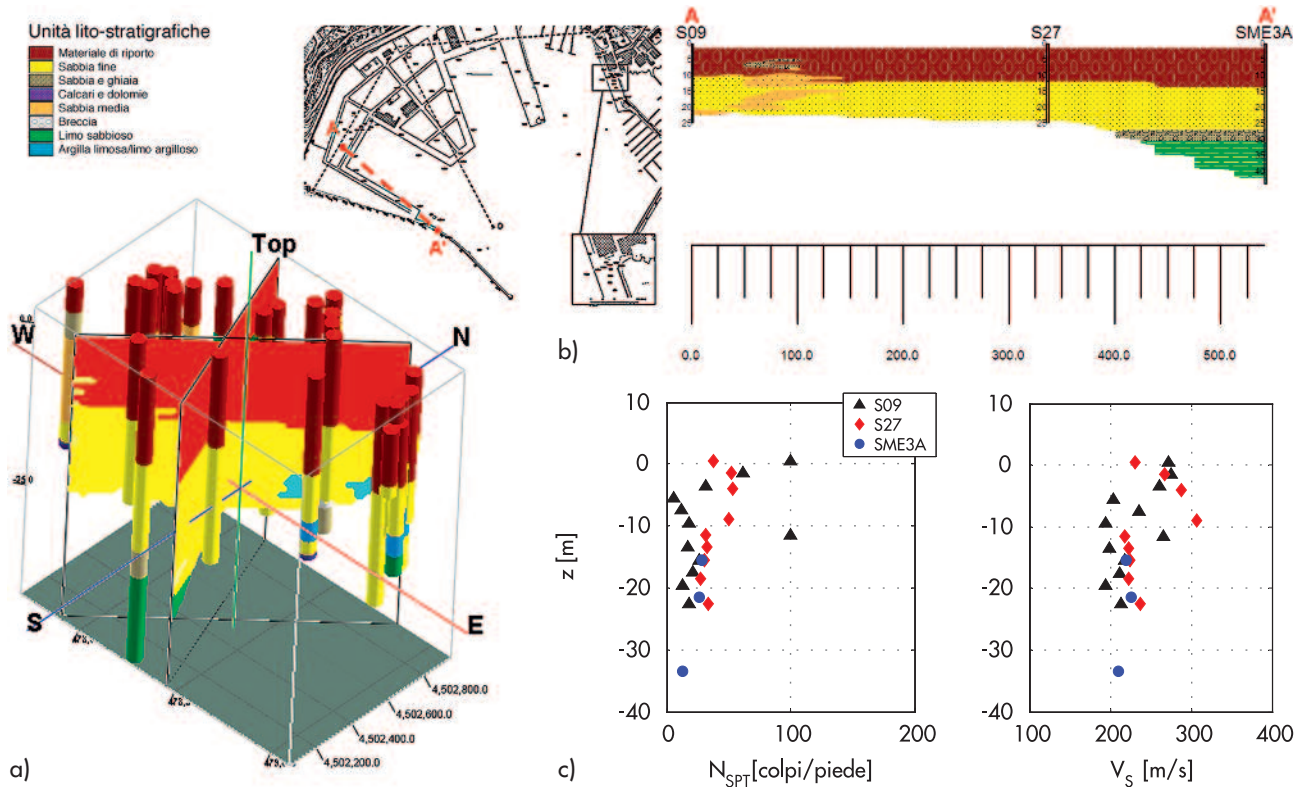
Per ciascuno spettro di risposta corrispondente ai tre periodi di ritorno considerati, è stato selezionato un gruppo di 7 accelerogrammi naturali compatibili, in media, allo spettro di riferimento delle NTC (2008) nell'intervallo di periodi compresi tra 0.1 e 1.5 sec, in accordo alle raccomandazioni della Circ. NTC (2009). Gli accelerogrammi sono stati selezionati considerando un intervallo di magnitudo e distanza coerente al contesto sismotettonico afferente al sito in esame. Le coppie magnitudo-distanza derivanti dallo studio di deaggregazione (Spallarossa e Barani, 2007) per l'ordinata spettrale corrispondente all'accelerazione orizzontale di picco su suolo rigido a_g per il sito di Salerno sono riportati in tabella 2.

Gli accelerogrammi sono stati selezionati con il codice ASCONA (*Automated Selection of COmpatible Natural Accelerograms*, Corigliano et al., 2010) e sono stati scalati al valore dell'ordinata spettrale corrispondente al periodo dello spettro di riferimento di inizio del tratto a velocità costante (T_c^*). La figura 4a) mostra la compatibilità tra lo spettro di risposta di riferimento e la media degli spettri di risposta degli accelerogrammi reali selezionati per il periodo di ritorno di 475 anni. La figura 4b) illustra gli spettri di

risposta elastici dei 7 accelerogrammi selezionati sovrapposti allo spettro medio. La selezione è stata effettuata su accelerogrammi di magnitudo compresa tra 6.46 e 6.93 e distanze epicentrali comprese tra 23 e 105 km. Lo spettro di risposta medio è caratterizzato da un valore medio della differenza in valore assoluto rispetto allo spettro di riferimento pari al 3.98% e da una differenza massima negativa del 9.44% (<10% richiesto da NTC (2008) e Circ. NTC (2009) per gli accelerogrammi artificiali). Il fattore di scala medio adottato è pari a 1.48 mentre il fattore di scala minimo e massimo valgono rispettivamente 0.56 e 1.78. La deviazione media tra lo spettro di riferimento e quello medio degli accelerogrammi selezionati è pari a 0.056.

3.1.3 Modello lito-stratigrafico del sottosuolo

Per poter quantificare accuratamente potenziali effetti di amplificazione sismica nell'area prospiciente il porto di Salerno, è stata effettuata una ricostruzione lito-stratigrafica del sottosuolo, resa possibile dalla disponibilità di dati relativi a sondaggi geognostici effettuati durante diverse campagne di indagine commissionate dalla Autorità Portuale (AP) di Salerno dal 1995 al 2005. In particolare, sono stati utilizzati i dati relativi a 29 sondaggi distribuiti su tutta l'area occupata dal porto, 6 dei quali a mare (Fig. 2). In ogni sondaggio sono state eseguite prove



penetrometriche dinamiche (SPT). Per un sondaggio, collocato sul Molo Manfredi (ST1), sono disponibili anche i risultati di una prova sismica *Down-Hole*, finalizzata alla definizione del profilo delle V_s , e di prove di laboratorio, in particolare analisi granulometriche e prove di taglio diretto per due campioni prelevati a diverse profondità.

Il modello tridimensionale del sottosuolo è stato sviluppato sulla base dell'analisi congiunta di tre tipologie di informazioni disponibili per ciascun sondaggio: l'andamento lito-stratigrafico, i valori N_{SPT} della resistenza penetrometrica ed il profilo delle velocità V_s (esempio in figura 5c relativamente alla sezione A-A' di figura 5b). Quest'ultimo è stato calcolato mediante l'applicazione della correlazione empirica di Ohta e Goto (1978). Nella costruzione del modello mostrato in figura 5a, per semplicità di rappresentazione, si è trascurata la presenza dell'acqua del mare e si è assunto un unico strato superficiale costituito dal materiale di riporto delle banchine.

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 un modello monodimensionale (1D) a strati piani e paralleli delle principali formazioni. In particolare, è stato assunto un

modello 1D costituito da due strati: uno superiore, che rappresenta il materiale di riporto di cui sono costituite le banchine, ed uno inferiore di sabbia medio-fine. Non si è tenuto conto delle inclusioni di breccia, presenti in un'area limitata del Molo 3 Gennaio, e delle lenti argillose-limose, che compaiono in strati di spessore ridotto nella zona del Molo Manfredi, in quanto risultano essere di non rilevanti spessori in relazione alla formazione sabbiosa che caratterizza l'intera area portuale. I dati disponibili non permettono una caratterizzazione del suolo a profondità superiori a 30 m, nonostante alcuni sondaggi arrivino a profondità maggiori. In alcuni di questi sondaggi, si nota la presenza di formazioni calcaree e dolomitiche, assunte come letto roccioso nell'ambito delle analisi di risposta sismica locale. La caratterizzazione geotecnico-sismica del substrato roccioso è basata sulle informazioni ricavate dalle relazioni geologico-tecniche fornite dall'AP di Salerno, integrate dai dati presenti nella documentazione geologica recuperata attraverso la ricerca bibliografica precedentemente descritta (paragrafo 3.1.1). Per tenere in considerazione le incertezze relative alla caratterizzazione geologica, geotecnica e lito-stratigrafica dell'area portuale è stato adottato un modello 1D completamente stocastico (Lai et al., 2009a), descritto in dettaglio nel paragrafo seguente.

Fig. 5. Modello lito-stratigrafico del sottosuolo dell'area portuale di Salerno: a) modello tridimensionale delle unità lito-stratigrafiche ricavato dai dati dei sondaggi geognostici; b) esempio di sezione bidimensionale (A-A') con relativa collocazione nell'area portuale; c) profilo della resistenza penetrometrica (N_{SPT}) e della velocità delle onde S (V_s in m/s) lungo la sezione A-A'.

Tabella 3 - Dati di ingresso del modello 1D stocastico adottato per la stima della risposta sismica locale al porto di Salerno

Layer	Tipo di terreno	Spessore [m]	Incertezza [%]	V_S [m/s]	Incertezza [%]	γ [kN/m ³]	Incertezza [%]
1	Materiale di riporto	11	59	271	48	19	6
2	Sabbia medio-fine	21	64	241	53	19	6
3	Substrato roccioso	-	-	878	36	21	17

3.1.4 Analisi stocastica della risposta sismica locale

La valutazione degli effetti di sito dovuti ad amplificazione lito-stratigrafica è stata eseguita utilizzando un approccio stocastico, considerando un modello 1D lineare equivalente. Il metodo stocastico adottato (Lai et al., 2009a) è basato su simulazioni Monte Carlo eseguite mediante la tecnica di campionamento dell'iper cubo 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 di tipo stocastico per la valutazione della risposta sismica locale ha il vantaggio di poter tener conto dell'incertezza associata ai parametri di ingresso, che influenza l'affidabilità dei risultati, incluso l'input sismico, in questo caso rappresentato da un gruppo di 7 accelerogrammi spettro-compatibili. Questo metodo trova la sua applicazione ideale quando il modello geotecnico monodimensionale del suolo è complesso, non lineare 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 opportuno gruppo di accelerogrammi spettro-compatibili allo spettro di riferimento;
- lo spessore degli strati delle unità lito-strati-

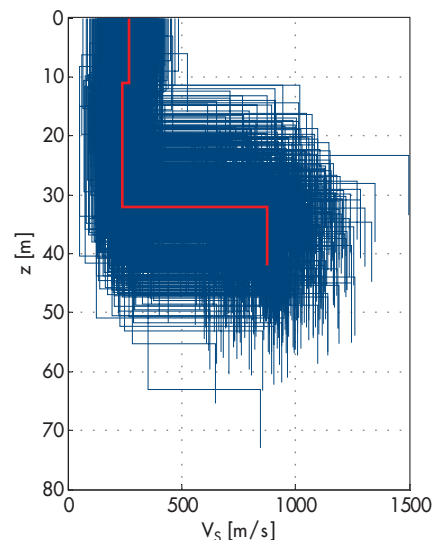
grafiche definite nel modello geotecnico;

- la velocità V_S caratteristica di ciascuno strato;
- il peso specifico che caratterizza ciascuna unità lito-stratigrafica.

La procedura per la definizione della risposta sismica locale stocastica può essere sintetizzata nei seguenti passi (Lai et al., 2009a):

- definizione dell'input sismico su suolo di riferimento rigido, costituito da un gruppo di accelerogrammi spettro-compatibili;
- definizione del modello geotecnico stocastico. In questo caso è stato adottato un modello costitutivo lineare-equivalente caratterizzato dai seguenti parametri per ogni strato: spessore, peso di unità di volume, coefficiente di smorzamento, velocità di propagazione delle onde di taglio e curve di degradazione del modulo e dello smorzamento. Sono state assunte curve di degradazione deterministiche, in quanto la loro influenza sui risultati è modesta (Lai et al., 2009a) e la severità dell'input sismico moderata;
- definizione delle distribuzioni probabilistiche dei parametri geotecnici;
- algoritmo di implementazione dell'analisi di risposta sismica stocastica utilizzando il metodo Monte Carlo, eseguito mediante la tecnica di campionamento dell'iper cubo

Fig. 6. Profili di velocità V_S utilizzati per le simulazioni relative al periodo di ritorno di 475 anni al porto di Salerno. In rosso è rappresentato il profilo medio.



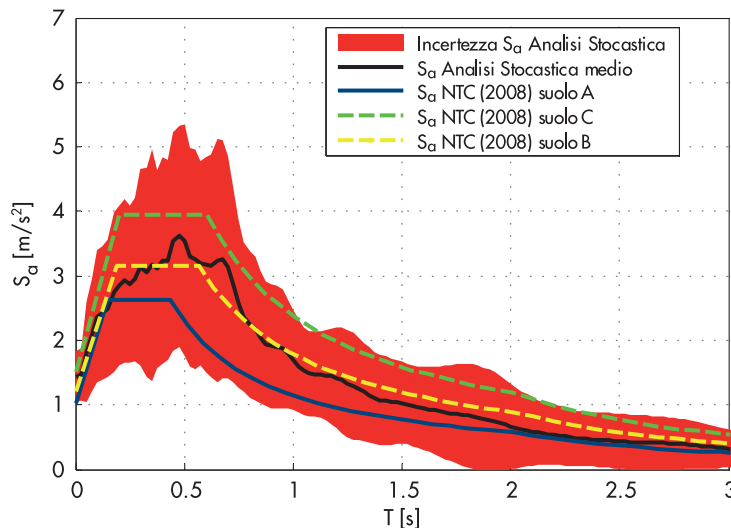


Fig. 7
Confronto tra lo spettro di risposta elastico calcolato secondo le NTC (2008), per suolo A (linea blu continua), B (linea gialla tratteggiata) e C (linea verde tratteggiata), e lo spettro medio ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale al porto di Salerno (linea nera continua) per $T_R = 475$ anni. La fascia rossa rappresenta la stima dell'incertezza dello spettro medio (+/- uno scarto quadratico medio).

Latino. Il codice utilizzato per le analisi di risposta sismica locale è SHAKE91 (Idriss e Sun, 1992) che utilizza un modello 1D con legame costitutivo lineare-equivalente.

Il deposito è stato schematizzato considerando 3 strati di spessore e velocità di propagazione delle onde di taglio variabili. I dati relativi al modello stocastico adottato sono riportati in tabella 3. Ad ogni variabile aleatoria è stato associato un valore medio e la relativa incertezza, assunta pari al doppio del rapporto tra lo scarto quadratico medio ed il valore atteso.

Per ogni periodo di ritorno analizzato, sono state eseguite circa 1000 simulazioni ed è stato calcolato uno spettro di risposta medio. La figura 6 mostra, a titolo di esempio, i 1000 profili di velocità V_S utilizzati per le simulazioni relative al periodo di ritorno di 475 anni.

I risultati ottenuti per periodo di ritorno pari a 475 anni sono mostrati in figura 7, in cui sono confrontati lo spettro di risposta elastico in accelerazione (componente orizzontale) su suolo rigido (di tipo A) e lo spettro di risposta medio calcolato mediante l'analisi di risposta sismica locale stocastica. In figura 7 è mostrata anche la stima dell'incertezza relativa alla definizione dello spettro di risposta, rappresentata dalla

fascia di colore rosso.

Poiché il valore di accelerazione orizzontale di picco in superficie (a_{max}) è un parametro di ingresso sia per la valutazione del potenziale di liquefazione, sia per la stima del danno sismico, in tabella 4 sono riportati i risultati ottenuti dalle analisi per i tre periodi di ritorno considerati in termini di a_{max} .

Sulla base dei valori medi di velocità delle onde di taglio S che caratterizzano il sottosuolo dell'area portuale di Salerno, è possibile classificare il sito come suolo di categoria C. In figura 7 e tabella 4 sono riportati rispettivamente lo spettro di risposta ($T_R = 475$ anni) ed i valori di a_{max} per suolo C.

In termini di a_{max} i valori medi ottenuti dall'analisi stocastica sono in buon accordo con i valori prescritti dalle NTC (2008) per suolo C (Tab. 4), tuttavia lo spettro di risposta elastico NTC (2008) risulta essere più cautelativo rispetto allo spettro ricavato dall'analisi stocastica (Fig. 7). A titolo di confronto, si riporta in figura 7 anche lo spettro NTC (2008) per suolo B. Esso presenta, in corrispondenza delle ordinate spettrali di maggiore interesse, valori di S_a (m/s²) inferiori rispetto a quelli dello spettro medio ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale stocastica.

Tabella 4 - Valori di accelerazione orizzontale di picco stimati in superficie al porto di Salerno mediante l'analisi stocastica di risposta sismica locale e secondo la procedura semplificata proposta nelle NTC (2008) per suolo C

Periodo di ritorno T_R [anni]	a_{max} [g] - analisi stocastica			a_{max} [g] suolo C - NTC (2008)
	medio	medio - σ	medio + σ	
100	0.094	0.068	0.119	0.093
475	0.146	0.106	0.187	0.155
950	0.174	0.121	0.227	0.187

3.1.5 *Liquefazione e spostamenti indotti nel terreno*
 I metodi impiegati per la valutazione della suscettibilità alla liquefazione, nel caso del porto di Salerno, sono basati su dati ottenuti da prove penetrometriche SPT. In particolare, sono stati adottati approcci sia di natura deterministica, che probabilistica.

Nei metodi di natura deterministica la curva di resistenza alla liquefazione (o curva di stato limite), che esprime la resistenza del terreno in termini di rapporto di tensione ciclica (CRR, *Cyclic Resistance Ratio*) in funzione del parametro di natura geotecnica misurato (corretto mediante opportuni coefficienti e normalizzazioni), viene determinata tracciando una curva che discrimina i casi di liquefazione osservati da quelli di non liquefazione, senza alcun trattamento probabilistico dei dati (Seed et al., 2003). Il verificarsi o meno della liquefazione viene predetto calcolando il fattore di sicurezza (F_S), inteso come rapporto tra la resistenza alla liquefazione del terreno (CRR) e la domanda sismica corrispondente al terremoto atteso di progetto, anch'essa espressa come rapporto di tensione ciclica (CSR, *Cyclic Stress Ratio*), e valutando se esso sia minore di uno (liquefazione) o maggiore di uno (non liquefazione).

Nell'approccio probabilistico, invece, si considera simultaneamente l'influenza di più variabili, ciascuna trattata come grandezza aleatoria. Si stimano le incertezze riguardanti gli errori di misura e le imperfezioni del modello adottato e, tramite modelli caratterizzati da diversi livelli di complessità, viene ottenuta una famiglia di curve di resistenza alla liquefazione, ciascuna delle quali corrispondente ad una differente probabilità di inizio liquefazione (Seed et al., 2003). In tal caso il potenziale di liquefazione di un terreno, sempre in relazione ad un evento sismico prefissato, è descritto in termini di probabilità di liquefazione P_L .

Una stima globale dell'incidenza del fenomeno della liquefazione e delle sue conseguenze viene ottenuta a livello deterministico mediante l'indice del potenziale di liquefazione LPI (*Liquefaction Potential Index*), proposto da Iwasaki et al. (1978), ed a livello probabilistico tramite l'indice di severità di liquefazione LSI (*Liquefaction severity index*), introdotto da Yilmaz (2004).

L'indice LPI è definito dalla seguente formula (Iwasaki et al., 1978):

$$LPI = \int_0^{20} F(z) \cdot w(z) \cdot dz \quad (1)$$

dove z è la profondità dal piano campagna (PC) espressa in metri, F è una funzione del fattore di

sicurezza F_S nei confronti della liquefazione alla profondità z , data da:

$$F(z) = \begin{cases} 1 - F_S(z) & \text{per } F_S(z) \leq 1 \\ 0 & \text{per } F_S(z) > 1 \end{cases} \quad (2)$$

e $w(z)$ è una funzione peso della profondità dell'elemento di volume dal piano campagna (PC):

$$w(z) = 10 - 0.5 \cdot z \quad (3)$$

L'indice di severità di liquefazione LSI è definito da Yilmaz (2004) mediante la seguente relazione:

$$LSI = \int_0^{20} P_L(z) \cdot w_F(z) \cdot dz \quad (4)$$

in cui z è la profondità dal PC espressa in metri, $P_L(z)$ è la probabilità di liquefazione alla profondità z e $w_F(z)$ è una funzione della profondità dell'elemento di volume dal PC, data da:

$$w_F(z) = 1 - 0.05 \cdot z \quad (5)$$

Tipicamente, LPI ed LSI sono valutati considerando uno spessore totale di 20 m a partire dal PC. Infatti, raramente sono stati riportati in letteratura effetti in superficie associabili a fenomeni di liquefazione avvenuti a profondità maggiori (Lai et al., 2009b).

La natura dei metodi impiegati è di tipo empirico, pertanto sono stati selezionati vari approcci in modo da poter pervenire ad una valutazione comparata del potenziale di liquefazione e dei cedimenti indotti nel terreno. Un'approfondita disamina dei metodi disponibili in letteratura ha condotto all'implementazione di tre procedure di calcolo, seguendo in particolar modo le indicazioni riportate nei più recenti riferimenti bibliografici in materia: Lai et al. (2009b), Idriss e Boulanger (2008) e Seed (2010). Le metodologie implementate fanno riferimento ai seguenti metodi di calcolo:

■ **Metodologia A**

- fattore di sicurezza (F_S) e probabilità di liquefazione (P_L) calcolati secondo Youd et al. (2001);
- indice del potenziale di liquefazione LPI (*Liquefaction Potential Index*) calcolato secondo Iwasaki et al. (1978);
- indice di severità di liquefazione LSI (*Liquefaction Severity Index*) calcolato secondo Yilmaz (2004);
- cedimenti verticali del terreno calcolati secondo Ishihara e Yoshimine (1992);
- spostamenti laterali del terreno calcolati secondo Zhang et al. (2004).

■ **Metodologia B**

- fattore di sicurezza (F_S) calcolato secondo Idriss e Boulanger (2008);
- probabilità di liquefazione (P_L) calcolato secondo Toprak et al. (1999);
- indice del potenziale di liquefazione LPI (*Liquefaction Potential Index*) calcolato secondo Iwasaki et al. (1978);
- indice di severità di liquefazione LSI (*Liquefaction Severity Index*) calcolato secondo Yilmaz (2004);
- cedimenti verticali del terreno calcolati secondo Yoshimine (2006);
- spostamenti laterali del terreno calcolati secondo Idriss e Boulanger (2008).

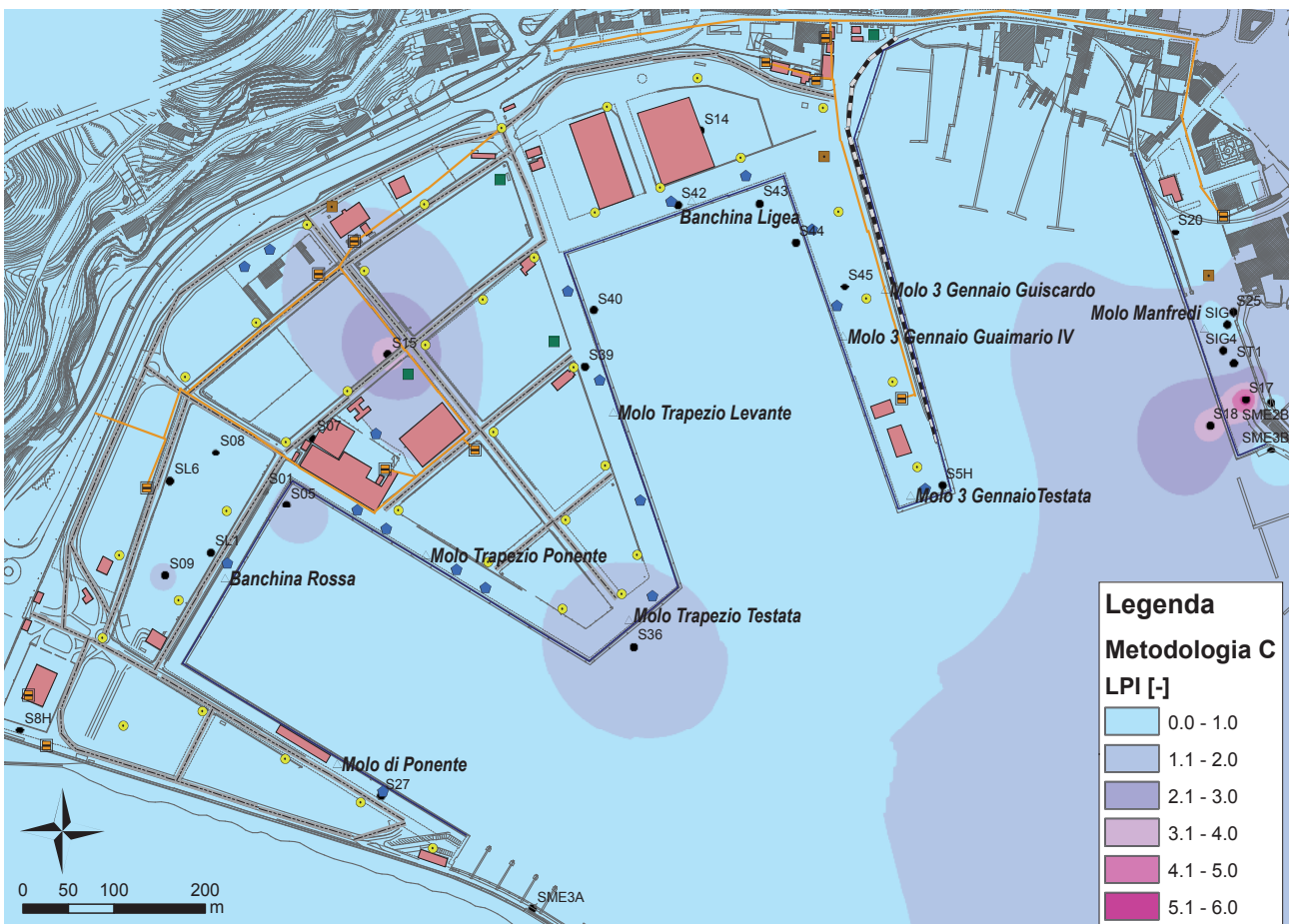
■ **Metodologia C**

- fattore di sicurezza (F_S) e probabilità di liquefazione (P_L) calcolati secondo Cetin et al (2004);
- indice del potenziale di liquefazione LPI (*Liquefaction Potential Index*) calcolato secondo Iwasaki et al. (1978);
- indice di severità di liquefazione LSI (*Liquefaction Severity Index*) calcolato secondo Yilmaz (2004);
- cedimenti verticali del terreno calcolati secondo Cetin et al (2009);

- spostamenti laterali del terreno calcolati Youd et al. (2002).

La metodologia A include i metodi che rappresentano lo stato dell'arte e più diffusamente impiegati. Come sottolineato nelle recenti monografie di Idriss e Boulanger (2008) e di Seed (2010), l'aspetto più critico di metodi quali quelli proposti in Youd et al. (2001) ed in Ishihara e Yoshimine (1992) consiste nell'essere stati sviluppati più di dieci anni fa. Le banche dati, che costituiscono l'elemento essenziale per lo sviluppo di correlazioni empiriche, non risultano pertanto aggiornate con i dati raccolti recentemente. Seed (2010) critica anche diversi aspetti formali delle indicazioni riportate nella monografia di Idriss e Boulanger (2008). In particolare, egli sostiene che i risultati ottenuti applicando i metodi suggeriti da Idriss e Boulanger (2008) risultino essere fortemente non conservativi. Cetin et al (2004; 2009) propone un approccio probabilistico, basato su metodi bayesiani avanzati, sia per la valutazione del potenziale di liquefazione che per il calcolo dei cedimenti verticali indotti nel terreno. Ad ogni parametro calcolato seguendo Cetin et al (2004; 2009) è associato un valore medio e la relativa incertezza.

Fig. 8
Mappa georeferenziata e digitale, ottenuta in ambiente GIS, dei valori di LPI al porto di Salerno, calcolati applicando la Metodologia C per $T_R=950$ anni.



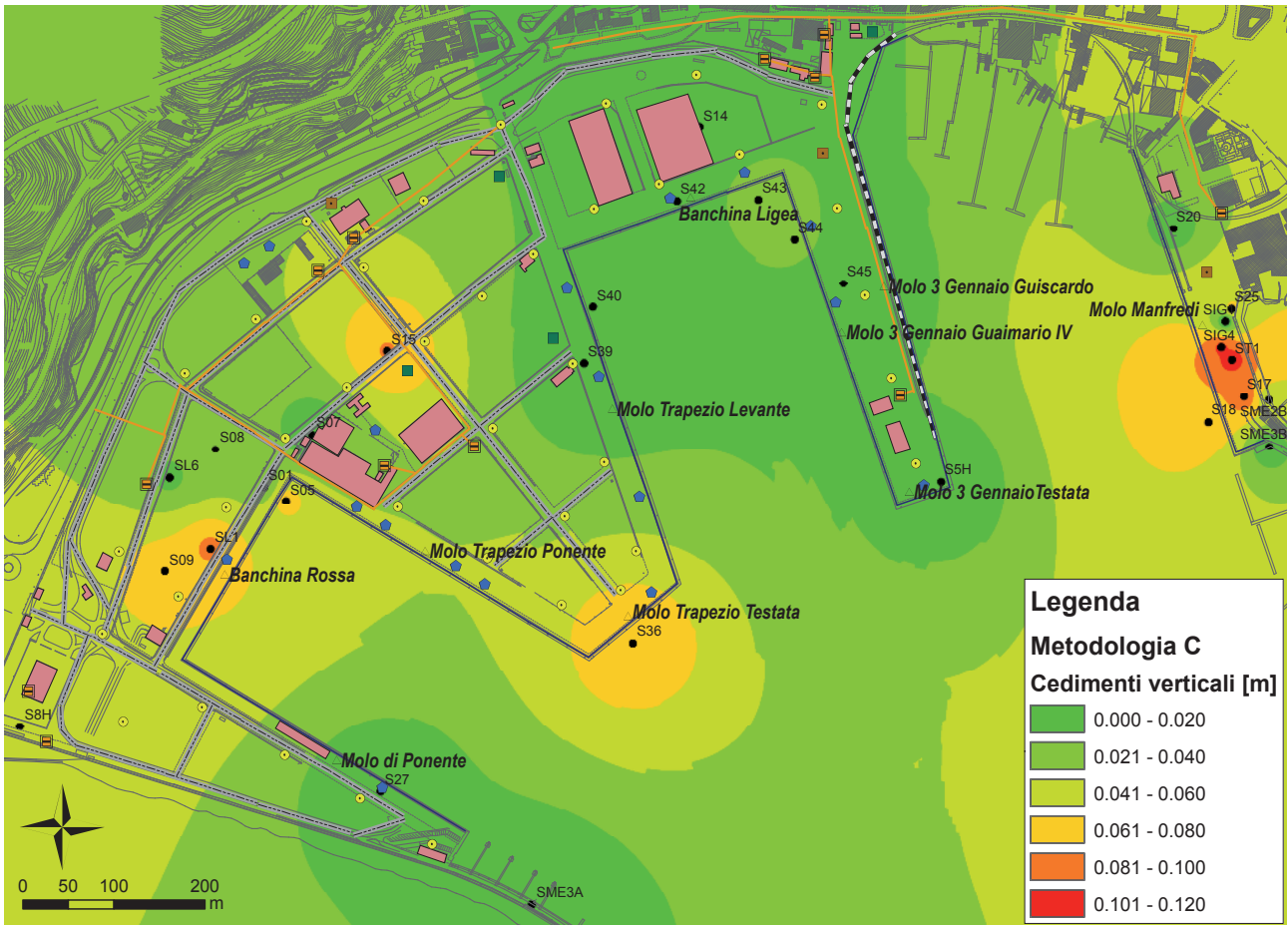


Fig. 9
 Mappa georeferenziata e digitale, ottenuta in ambiente GIS, dei cedimenti verticali del terreno indotti da liquefazione al porto di Salerno, stimati applicando la Metodologia C per $T_R=950$ anni.

La stima della suscettibilità alla liquefazione e dei relativi spostamenti nel terreno per l'area portuale di Salerno è stata effettuata applicando tutte e tre le metodologie descritte. In figura 8 ed in figura 9 sono mostrate le mappe georeferenziate e digitali ottenute in ambiente GIS, che rappresentano rispettivamente i valori di LPI e dei cedimenti verticali del terreno, calcolati per il periodo di ritorno di 950 anni applicando la

Metodologia C, la più cautelativa tra quelle considerate (Seed, 2010). I valori di LPI (Fig. 8) sono inferiori a 6, pertanto, sulla base delle correlazioni proposte in letteratura tra LPI e potenziale di rottura del terreno (Lai et al., 2009b), le conseguenze attese sul terreno e sulle strutture con esso interagenti, a causa della liquefazione, risultano essere di scarsa entità. La figura 9 mostra come, anche, i cedimenti verticali attesi



non risultino essere particolarmente rilevanti, con un valore massimo pari a 11 cm.

3.2 Infrastrutture portuali vulnerabili

L'area del porto si sviluppa sulle seguenti strutture "affacciate a mare": Molo di Ponente, Banchina Rossa, Molo Trapezio, Banchina Ligea, Molo 3 Gennaio, Molo Manfredi. Mentre il Molo Manfredi ha una finalità prevalentemente turistica, le rimanenti banchine costituiscono la parte commerciale del porto di Salerno, che può essere suddiviso in 3 macro aree omogenee operative (terminali): il terminale A (Banchina Ligea e Molo 3 Gennaio) destinato a merci varie per una superficie totale di 37.143 m², il terminale B (Molo Trapezio) per *containers* con una superficie di 120.975 m² e il terminale C (Banchina Rossa e Molo di Ponente) con 80.500 m² destinati alla gestione delle operazioni di imbarco e sbarco di *Ro-Ro* (navi-traghetto con modalità di carico del gommato) ed Autostrade del Mare.

In figura 2 sono mostrate le strutture portuali vulnerabili presenti nel porto di Salerno, georeferenziate in ambiente GIS. La stima del danno atteso in caso di evento sismico è stata effettuata per le principali infrastrutture portuali il cui potenziale danneggiamento influirebbe in modo significativo sulla funzionalità del porto, ossia banchine/moli, attrezzature per il carico/scarico di merci (gru semoventi), sistemi di trasporto (ferrovia e strade), strutture per il rifornimento (cisterne per il carburante) ed infrastrutture di distribuzione (linea elettrica e cabine elettriche).

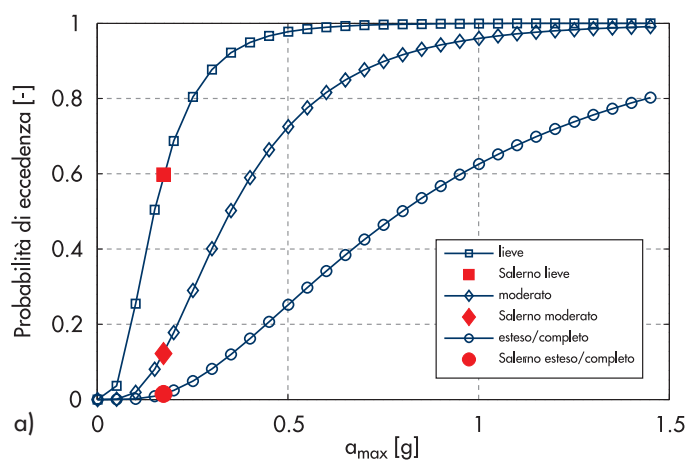
3.3 Scenari di danneggiamento sismico

Il danneggiamento delle strutture portuali è stato valutato mediante curve di fragilità in termini di peggiore livello di danno probabile e di percen-

tuale 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).

Per tutti i periodi di ritorno considerati, il danneggiamento alle strutture portuali precedentemente elencate è stato, quindi, valutato combinando gli effetti sia dell'amplificazione locale in termini di α_{max} , sia degli spostamenti permanenti indotti nel terreno dalla liquefazione e l'associata probabilità di liquefazione. Per il caso studio al porto di Salerno, a seguito dell'assunzione di un modello di sottosuolo monodimensionale, a tutte le strutture portuali è stata associata la stessa amplificazione lito-stratigrafica, mentre gli spostamenti permanenti dovuti alla liquefazione sono differenziati. I bassi valori di spostamento permanente, determinati dai cedimenti indotti nel terreno dalla liquefazione, hanno effetti lievi sul

Fig. 10
Gru non ancorate del porto di Salerno:
a) applicazione delle curve di fragilità proposte dalla procedura HAZUS al caso studio ($T_R=950$ anni);
b) gru su gomma.



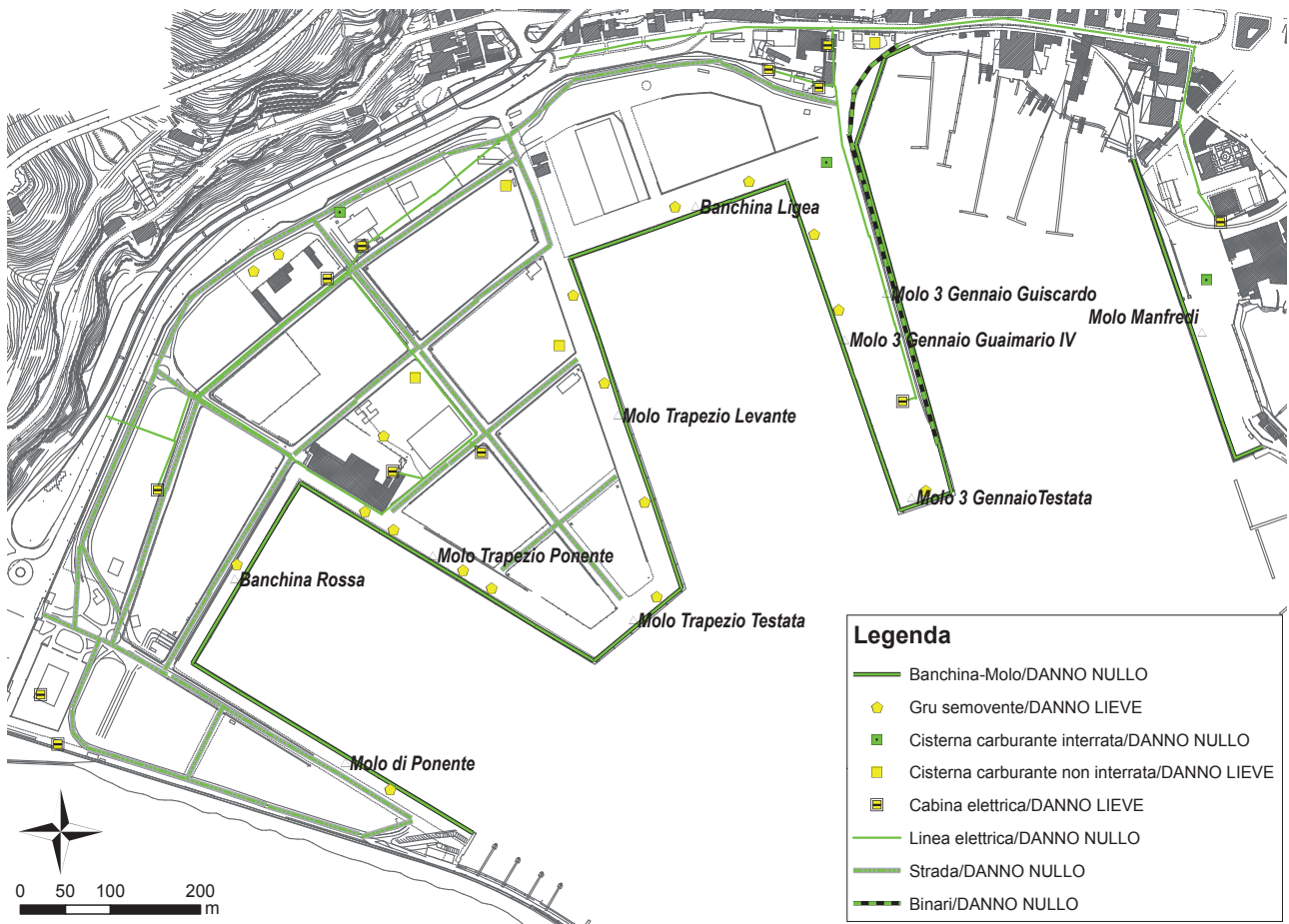


Fig. 11
 Scenario di danno sismico atteso per le strutture del porto di Salerno per $T_R=950$ anni, sviluppato in ambiente GIS (adottando la Metodologia C per la stima dello spostamento permanente).

potenziale danneggiamento delle infrastrutture. La figura 10 mostra l'applicazione delle curve di fragilità proposte dalla procedura HAZUS alle gru non ancorate per il caso del porto di Salerno. In questo caso il dato di ingresso è l'accelerazione orizzontale di picco in superficie (α_{max}), quindi, alla base della struttura. Il probabile danno atteso alle strutture del porto risulta nullo per i periodi di ritorno di 101 e 475 anni, mentre è stimato un danno lieve per un periodo di ritorno di 950 anni, per le gru semoventi, le cisterne di carburante non interrata e le cabine elettriche, come mostrato in figura 11. Nel dettaglio, la figura 11 riporta lo scenario di danno sismico atteso per gli elementi portuali, associato al periodo di ritorno di 950 anni. Le gru semoventi, le cisterne di carburante non interrata e le cabine elettriche sono state colo-

rate in giallo ad indicare che il peggiore danno probabile atteso è lieve; per le cisterne di carburante interrata, invece, il livello di danno stimato è nullo. Nel caso degli elementi lineari, ossia banchine/moli, strade, binari ferroviari, linee elettriche, opportunamente discretizzati in segmenti di lunghezza massima pari a 100 m, in modo da tener conto dell'eventuale variabilità spaziale dei parametri di ingresso alle curve di fragilità, il probabile livello di danneggiamento sismico atteso è nullo, pertanto in figura 11 sono rappresentati in colore verde. Gli scenari di danno precedentemente illustrati si basano su una definizione probabilistica della pericolosità sismica di base. Sono in corso di svolgimento valutazioni deterministiche per lo sviluppo di scenari di danno riferiti ad uno o più eventi caratteristici.

4. Conclusioni

L'articolo ha illustrato alcuni aspetti e peculiarità del progetto di ricerca finanziato dal DPC ad Eucentre, che ha come obiettivo la valutazione della vulnerabilità e del rischio sismico delle strutture portuali marittime italiane. Una delle finalità principali del progetto, tuttora in fase di sviluppo,

consiste nello sviluppo di una banca dati georeferenziata webGIS di tutti i più importanti porti marittimi italiani situati in zone caratterizzate da livelli di sismicità medio-elevata. Nell'articolo si sono illustrate le principali caratteristiche e potenzialità di questo sistema di gestione elettronica dei dati tecnici. La tecnologia GIS rappre-

senza uno strumento potente per la predizione del danno sismico, permettendo l'individuazione in tempi brevi di anomalie e/o situazioni che richiedano interventi urgenti per la mitigazione del rischio. Inoltre questo sistema, grazie alla possibilità che offre di integrare, aggiornare in tempo reale e processare i dati disponibili, consente di individuare gli elementi in grado di svolgere un ruolo strategico per le finalità di Protezione Civile nelle fasi immediatamente successive all'evento sismico. La piattaforma GIS rappresenta, quindi, un potente strumento di elabora-

zione per la stima del danneggiamento sismico di strutture portuali. Un'applicazione della procedura di calcolo sviluppata ed integrata in ambiente GIS è stata illustrata con riferimento al caso studio del porto di Salerno. Il danno probabile atteso alle strutture dell'area portuale di Salerno risulta nullo per i periodi di ritorno di 100 e 475 anni, mentre si stima che per il periodo di ritorno di 950 anni alcune strutture portuali, ossia gru semoventi, cisterne di carburante non interrato e cabine elettriche, possano essere lievemente danneggiate.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il Dipartimento della Protezione Civile, che finanzia il progetto DPC-PE d5 2009-2012 e, in particolare, il Dott. Paolo Marsan, referente del DPC per il progetto. Gli autori sono grati all'Autorità Portuale di Salerno, in particolare all'Ing.

Elena Valentino ed al Geom. Pasquale Memoli per la disponibilità dimostrata nel fornire i dati tecnici utili allo studio. Si ringraziano, inoltre, per il supporto fornito, l'Ing. Massimo Sessa e l'Ing. Andrea Ferrante del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Bibliografia

- ALA (2001) - American Lifelines Alliance. Guidelines for utility performance assessment. Reference web site: <http://www.americanlifelinesalliance.org>.
- Bray J., Frost D. (2010) - Geo-engineering Reconnaissance of the 2010 Maule, Chile Earthquake. Report No. GEER-022 of the NSF Sponsored GEER Association Team, V.1, April 2010.
- 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. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 130(12), 1314-1340.
- 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.
- 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. (2010) - ASCONA: Automated Selection of COmpatible Natural Accelerograms. Sottoposto a revisione alla rivista *Earthquake Spectra*, Luglio 2010.
- DCDPC 3685 (2003) - Decreto del Capo del Dipartimento della Protezione Civile n. 3685 del 21 ottobre 2003. Disposizioni attuative dell'art. 2, commi 2, 3 e 4, dell'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003, recante "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica". G.U. n. 252 del 29 Ottobre 2003.
- D. Lgs. 272 (1999) - Decreto Legislativo n. 272 del 27 luglio 1999. Adeguamento della normativa sulla sicurezza e salute dei lavoratori nell'espletamento di operazioni e servizi portuali, nonché di operazioni di manutenzione, riparazione e trasformazione delle navi in ambito portuale, a norma della legge n. 485 del 31 dicembre 1998. G.U. n. 185 del 9 agosto 1999.
- 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.
- Eucentre-PE5 (2008) - Progettazione Sismica di Strutture Portuali Marittime. Research Report, European Centre for Training and Research in Earthquake Engineering. Luglio 2008, pp. 201.
- Faccioli E. (2008) - LESSLOSS- Risk mitigation for Earthquake and landslides-Lessloss Report No. 2007-2008 - Prediction of ground motion and loss scenarios for selected infrastructure systems in European urban environments. IUSS Press (Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia).
- Faccioli E., Paolucci R. (2005) - Elementi di sismologia applicata all'ingegneria. Pitagora Editrice Bologna.
- Ichii K. (2003) - Application of performance-based seismic design concept for caisson-type quay walls, Dissertation, Kyoto University.
- Ichii K. (2004) - Fragility curves for gravity-type quay walls based on effective stress analyses, Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada, August.
- Idriss I.M., Boulanger R.W. (2008) - Soil Liquefaction During Earthquakes, EERI Monograph.
- 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. *In Proceedings of the 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.
- Kakderi K., Pitilakis K. (2010) - Seismic analysis and fragility curves of gravity waterfront structures, Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, May 24-29, 2010, San Diego, California
- Kakderi K., Raptakis D., Argyroudis S., Alexoudi M., Pitilakis K. (2006) - Seismic Response and Vulnerability Assessment of Quaywalls. The Case of Lefkas, Proceedings of the 5th National Conference of Geotechnical and Environmental Engineering, Xanthi, Greece (in Greek).
- Lai C.G., Corigliano M., Sanchez H. (2009a) - Some examples of 1D fully stochastic site response analyses of soil deposits. M.N. Fardis (ed.), *Advances in Performance-Based Earthquake Engineering, Geotechnical, Geological, and Earthquake Engineering 13*, Springer Science+Business Media B.V. 2010, DOI 10.1007/978-90-481-8746-1_2. Editor: Fardis, Michael N.
- 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.
- Lessloss (2006) - Deliverable 89 - Technical report on the assessment of vulnerability functions for pipelines, shallow tunnels and waterfront structures. Sub-Project 11 - Earthquake disaster scenario predictions and loss modelling for infrastructures. Lessloss Project - Risk mitigation for earthquake and landslides integrated project - Project No.: GOCE-CT-2003-505488.
- Monge O., Alexoudi M., Argyroudis S., Martin C., Pitilakis K. (2004) - Vulnerability assessment of lifelines and essential facilities (WPO6): basic methodological handbook. Risk_UE An advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different european towns, Research Project, European commission, DG XII2001-2004, CEC Contract number EVK4-CT-2000-00014.
- NIBS (2004) - National Institute of Building Sciences. Earthquake loss estimation methodology, HAZUS. Technical manual, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- NTC (2008) - Norme tecniche per le costruzioni. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008, supplemento ordinario alla 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, 427-449.
- PIANC (2001) - Seismic Design Guidelines for Port Structures, Permanent International Navigation Association. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands.
- Pitilakis K., Alexoudi A., Argyroudis S., Monge O., Martin C. (2006) - Chapter 9: Vulnerability assessment of lifelines. in C.S. Oliveira, A. Roca and X. Goula ed. *Assessing and Managing Earthquake Risk. Geo-Scientific and Engineering Knowledge for Earthquake Risk mitigation: Developments, Aols and Techniques*, Springer Publ.
- Pitilakis K., Anastadias A., Kakderi K., Argyroudis S., Alexoudi M. (2007) - Vulnerability assessment and risk management of lifelines, infrastructures and critical facilities. The case of Thessaloniki's metropolitan area. Proceeding of the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, paper n. 11774, Thessaloniki, Greece.
- POLA (2007) - Port of Los Angeles Seismic Code for Port Structures. City of Los Angeles Board of Harbor Commissioners (December 2007).
- Rathje E., Bachhuber J., Cox B., French J., Green R., Olson S., Rix G., Wells D., Sunca O., Harp E., Mann P., Koehler R. (2010) - Geotechnical engineering reconnaissance of the 2010 Haiti earthquakes. V.1, February 22, 2010.
- 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.
- Seed R.B., Cetin K.O., Moss R.E.S., Kammerer A., Wu J., Pestana J., Riemer M., Sancio R.B., Bray J.D., Kayen R.E., Faris A. (2003) - Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering: A Unified and Consistent Framework. White Paper for Keynote Presentation, 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Long Beach.
- Spallarossa D., Barani, S. (2007) - Disaggregazione della pericolosità sismica in termini di M-R-e. 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.
- Vitale C. (2005) - L'evoluzione morfotettonica plio-quaternaria del sistema Golfo di Salerno-Piana del Sele-Monti Picentini (Appennino Meridionale). Tesi di dottorato in Scienze della Terra, presso l'Università degli Studi "Federico II" di Napoli - Dipartimento di Scienze della Terra.
- Werner S.D. (1998) - Seismic Guidelines for Ports,

- Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Monograph No. 12, 377 pp., American Society of Civil Engineers.
- Wright N.T., Yoon J. (2007) - Application of GIS technologies in port facilities and operations management. Reston, Va.: American Society of Civil Engineers.
- Yang C., Wong D.W., Yang R., Kafatos M., Li Q. (2005) - Performance-improving techniques in web-based GIS. *Int. J. 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.
- Youd T.L., Hansen C.M., Bartlett S.F. (2002) - Revised multilinear regression equations for prediction of lateral spread displacement. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 128(12), 1007-1017.
- Youd T.L., Idriss I.M., Andrus R.D., Arango I., Castro C., Christian J.T., Dobry R., Finn W.D.L., Harder L.F., Hynes M.E., Ishihara K., Koester J.P., Liao S.C.C., Marcuson W.F., Martin G.R., Mitchell J.K., Moriwaku Y., Power M.S., Robertson P.K., Seed R.B., Stokoe K.H. (2001) - Liquefaction Resistance of Soils. Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng. ASCE* 127 (10), 817-833.
- 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.