



Scenari di danno e perdite per strutture e infrastrutture della costa

Marta Faravelli^a, Barbara Borzi^a, Francesca Bozzoni^a, Venanzio Pascale^a, Davide Quaroni^a

^a Eucentre, Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Via Ferrata 1, Pavia, Italia

Keywords: faglie potenzialmente sismogeniche, vulnerabilità, impatto, scenari di danno, piattaforma WebGIS

ABSTRACT

Eucentre ha partecipato al progetto SPOT (Sismicità Potenzialmente innescabile Offshore e Tsunami), ideato e finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico italiano (MISE) con il supporto tecnico del Dipartimento Nazionale della Protezione Civile. Il progetto, che ha visto coinvolti anche CNR-ISMAR, INGV e ReLUIS, ha indagato l'esistenza di faglie potenzialmente sismogeniche in prossimità di piattaforme di estrazione olio e gas esistenti. Eucentre ha valutato l'impatto dei possibili terremoti naturali derivanti dall'attivazione delle suddette faglie in termini di scenari di danno per le strutture e infrastrutture della costa. Le aree costiere prese in considerazione sono quelle che ricadono entro un raggio di 100 km dai punti di estrazione indicati dal MISE. Lo scenario di danno è stato definito per l'edilizia residenziale, nota con il dettaglio del territorio comunale, per le scuole, le infrastrutture viabilistiche e i porti. Una volta selezionate le strutture e infrastrutture per le quali calcolare lo scenario di danno, è stata definita la loro vulnerabilità sismica, cioè la propensione a danneggiarsi se soggette a scuotimento sismico, assegnando ad ogni struttura/infrastruttura un set di curve di fragilità. È stato poi necessario quantificare lo scenario di scuotimento rappresentativo per gli eventi selezionati. EUCENTRE ha implementato tre relazioni di attenuazione del moto sismico ed ha sviluppato un tool per il calcolo dell'accelerazione al sito risentita dalle strutture/infrastrutture in seguito all'attivarsi delle faglie identificate da INGV. Infine è stato creato uno strumento per il calcolo dello scenario di danno ed una piattaforma WebGIS che consente di georeferenziare i dati delle strutture/infrastrutture esposte, le sorgenti degli eventi e visualizzare su mappe e tabelle gli scenari di danno calcolati.

1 IL PROGETTO SPOT

Il progetto SPOT (Sismicità Potenzialmente innescabile Offshore e Tsunami) rientra tra le attività tecnico-scientifiche a supporto delle Autorità italiane per l'applicazione della Direttiva Europea sulla sicurezza delle operazioni in mare nel settore degli idrocarburi (2013/30/EU) e dei decreti che ne derivano. Il progetto è stato ideato e finanziato dal MISE con il supporto tecnico del Dipartimento Nazionale della Protezione Civile (DPC). Gli istituti di ricerca coinvolti sono l'Istituto di Scienze Marine del Consiglio Nazionale delle Ricerche (ISMAR), l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), il Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica (EUCENTRE), e la Rete Universitaria dei Laboratori di Ingegneria Sismica (ReLUIS). Le attività sono iniziate il 1° febbraio 2017, per una durata complessiva di 21 mesi.

Il progetto ha previsto un'ampia analisi delle strutture geologiche offshore, volta a valutare l'esistenza di faglie potenzialmente sismogeniche in prossimità di piattaforme di estrazione olio e gas esistenti.

Per identificare le zone marine di interesse per il progetto, si è partiti dal considerare tutte le licenze assegnate e attualmente attive nell'offshore delle coste italiane. Sono stati poi tracciati i perimetri dei relativi *reservoir* (o "roccia serbatoio": volume di roccia del sottosuolo che ha sufficiente porosità e permeabilità da consentire l'accumulo di idrocarburi in presenza di appropriate condizioni strutturali), forniti dagli operatori al Ministero dello Sviluppo Economico. Facendo riferimento agli "Indirizzi e Linee Guida per i monitoraggi" (Dialuce et al. 2014), è stato poi tracciato un buffer di 15 km intorno a tali perimetri. Le zone così ottenute definiscono le aree di studio del progetto. Esse sono ubicate in prevalenza nel Mare Adriatico, nello Ionio e nel Canale di Sicilia. È in queste aree che è stata analizzata la

possibile presenza di faglie attive e il loro potenziale sismogenico e tsunamigenico. Inoltre, è stata valutata la possibilità che lo scuotimento sismico attivi frane sottomarine e, in caso, il potenziale tsunamigenico di queste ultime.

Sulla base delle valutazioni di impatto di questi terremoti e maremoti (tsunami) naturali lungo le coste e dei modelli di vulnerabilità associati alle strutture e infrastrutture presenti sul territorio, sono state stimate le potenziali perdite di vite umane ed economiche.

2 IL RUOLO DI EUCENTRE IN SPOT

Nel progetto SPOT Eucentre ha definito gli scenari di danno derivanti dall'innescio di faglie nelle aree di estrazione sulle strutture e infrastrutture della costa. A tal fine, ha interagito con INGV per l'identificazione delle faglie potenzialmente innescabili, con CNR-ISMAR per condividere le scelte sulla creazione dello scenario di scuotimento che Eucentre ha utilizzato per generare scenari di danno e CNR-ISMAR per valutare il potenziale accadimento delle frane sottomarine e infine con ReLUIIS per i modelli di valutazione delle perdite.

Gli scenari di scuotimento sono stati generati per aree della costa che ricadono entro un raggio di 100 km dai punti di estrazione indicati dal MISE. Le aree di interesse per gli scenari di danno sono indicate in Figura 1.

All'interno delle aree indicate in verde in Figura 1 sono presenti 1563 comuni italiani. Lo scenario di danno è stato definito per l'edilizia residenziale, per le scuole, per le infrastrutture viabilistiche (ponti, opere di sostegno e gallerie) e per i porti. Una volta identificate le strutture e infrastrutture per le quali calcolare lo scenario di danno, Eucentre si è occupato di quantificarne la vulnerabilità sismica, cioè la loro propensione a danneggiarsi se soggette a scuotimento sismico. Tale obiettivo è stato raggiunto assegnando ad ogni struttura e infrastruttura un set di curve di fragilità. Nota la vulnerabilità, è stato necessario quantificare lo scenario di scuotimento rappresentativo per gli eventi innescati. A tal fine Eucentre ha selezionato le relazioni di attenuazione del moto sismico da implementare ed ha sviluppato un tool per il calcolo dell'accelerazione al sito risentita dalle strutture e infrastrutture in seguito all'innescarsi delle faglie identificate da INGV. Infine Eucentre ha sviluppato strumenti per il calcolo dello scenario di danno ed ha creato un GIS web-based, WebGIS in seguito, che consente di georeferenziare i dati delle strutture e

infrastrutture esposte, le sorgenti degli eventi e visualizzare su mappa e in tabella gli scenari di danno calcolati in termini di livelli di danno raggiunti e perdite. Nei prossimi capitoli verranno descritti tutti questi elementi.

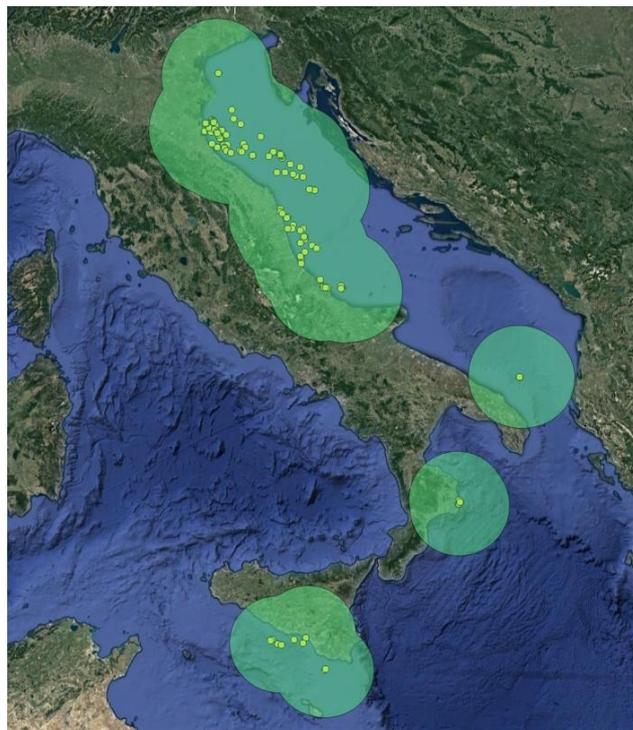


Figura 1. Identificazione delle aree oggetto di studio nel progetto SPOT

3 BANCA DATI GIS DELLE STRUTTURE ED INFRASTRUTTURE

Come anticipato nel capitolo precedente, gli scenari di danno sono stati calcolati per edilizia residenziale, scuole, infrastrutture viabilistiche e opere portuali.

In particolare per l'edilizia residenziale sono stati presi in considerazione 1563 comuni. Le informazioni su numero di edifici, numero di abitazioni, popolazione e superficie abitativa per ogni comune deriva dal database ISTAT 2001. Non è stato possibile utilizzare database più recenti in quanto il database ISTAT 2011 è stato reso disponibile solo nel 2019 quando il progetto era già stato ultimato. Nel database 2001 i dati sono aggregati per comune quindi è stato possibile elaborare gli scenari per l'edilizia residenziale solo per l'intero comune e non per il singolo edificio. Il database fornisce per ogni comune il numero di edifici suddivisi in funzione della tipologia costruttiva (muratura, c.a.) e dell'anno di costruzione. Sulla base di queste due informazioni, è stata calcolata per ogni comune la percentuale di edifici appartenenti alle seguenti classi di vulnerabilità della scala EMS98 (Grünthal 1998):

- Classe A: edifici in muratura ad alta vulnerabilità;
- Classe B: edifici in muratura a media vulnerabilità;
- Classe C1: edifici in muratura a bassa vulnerabilità;
- Classe C2: edifici in c.a. non sismicamente progettati;
- Classe D: edifici in c.a. sismicamente progettati.

Per gli edifici in muratura la classe di vulnerabilità di appartenenza (A, B o C1) è stata assegnata in funzione dell'anno di costruzione sulla base delle distribuzioni riportate in Tabella 1. Tali distribuzioni derivano dall'elaborazione dei dati di danno osservato dopo il terremoto dell'Irpinia del 1980 e sono riportate nel rapporto finale del programma 2002 del DPC (Angeletti et al. 2002).

Tabella 1. Distribuzione degli edifici in muratura nelle tre classi di vulnerabilità A, B e C1 (Angeletti et al. 2002)

Anno di costruzione	A	B	C1
Prima del 1900	75%	23%	2%
Dal 1901 al 1943	56%	40%	4%
Dal 1944 al 1962	26%	54%	20%
Dal 1963 al 1971	4%	38%	58%
Dopo il 1971	2%	21%	77%

Per gli edifici in c.a. le classi C2 e D sono state assegnate considerando l'anno di costruzione confrontato con l'anno di classificazione sismica del comune al fine di distinguere tra edifici non sismicamente progettati ed edifici sismicamente progettati. Come osservato da Vona e Masi (2004), va ricordato che la classificazione sismica del territorio italiano è stata effettuata in gran parte soltanto a partire dal 1981 e sostanzialmente completata con l'OPCM 3274. Inoltre, anche nei casi di progettazione antisismica, le prime normative italiane non erano adeguate a conseguire in modo soddisfacente i livelli di prestazione oggi richiesti rispetto al danno ed al collasso come indicato nel DM 14.01.2008 e successivi. Per tale ragione, è stato assunto che gli edifici costruiti prima del 1981 sono tutti "non sismicamente progettati" (classe C2), indipendentemente dall'anno di classificazione sismica del comune in cui si trovano.

Il secondo elemento preso in considerazione negli scenari di danno sono le scuole. Sono stati identificati 11167 edifici scolastici dal Censimento Anagrafe dell'Edilizia Scolastica reperito tramite il MIUR. Per 418 scuole sono disponibili anche le schede di verifica sismica di livello 1 e 2. Le informazioni presenti nel Censimento consentono di definire, quando complete, la tipologia delle strutture verticali e

orizzontali, il numero dei piani, l'anno di costruzione. Nei casi di incompletezza, alcuni dati sono stati dedotti sulla base di altre informazioni disponibili: ad esempio un edificio costruito prima del 1920 viene considerato in muratura anche se il dato di struttura non è indicato. Per gli edifici in muratura, ad ogni edificio scolastico è stata associata una classe di vulnerabilità della scala EMS98 (Grünthal 1998) a partire dalla tipologia delle strutture verticali e orizzontali utilizzando la Tabella 2 elaborata sulla base dei dati Irpinia '80 e riportata in Braga et al. (1982).

Tabella 2. Classi di vulnerabilità in funzione della tipologia delle strutture verticali e orizzontali (Braga et al. 1982)

Tipologia orizzontale	Tipologia verticale		
	Pietrame	Tufo	Mattoni
Volte	A	A	A
Legno	A	A	B
Ferro	B	B	C1
C.A.	B	C1	C1

Gli edifici scolastici in c.a. invece sono stati suddivisi nelle due classi C2 e D della scala EMS98 (Grünthal 1998) in funzione dell'anno di costruzione, come nel caso dell'edilizia residenziale.

Per quanto riguarda le infrastrutture della rete viabilistica, sono stati presi in considerazione 4837 ponti, 11514 opere di sostegno e 286 gallerie. Le informazioni relative ai ponti derivano da ANAS e dalle Schede di verifica sismica di livello 1 e 2 disponibili presso il DPC ed hanno un livello di dettaglio differente. I ponti per i quali è nota solo la posizione e l'anagrafica sono 4170, quelli per i quali il livello di conoscenza è completo sono 315 mentre quelli per i quali è nota la scheda di verifica sismica di livello 1 e 2 sono 352. Il database sulle opere di sostegno contiene dati parziali di geometria derivanti dalla scheda di accatastamento ANAS. Per le gallerie è nota da ANAS e Autostrade per l'Italia la georeferenziazione e alcune caratteristiche geometriche, mentre la profondità è stata stabilita utilizzando il DEM (Digital Elevation Model) scaricato dal geoportale: <http://www.pcn.minambiente.it/mattm/servizio-wms/>.

All'interno delle aree di studio selezionate nel progetto SPOT, sono ubicati 55 porti marittimi, le cui informazioni sono state ricavate dalla banca dati su base cartografica georeferenzata messa a punto da Eucentre per la valutazione del rischio sismico dei porti marittimi italiani nell'ambito di un progetto svolto per il DPC con il supporto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, di PIANC Italia e delle autorità portuali (ulteriori

dettagli in Bozzoni et al. 2018). Tale banca dati è stata recentemente riorganizzata ed ampliata tenendo conto delle disposizioni del Decreto legislativo n. 169 del 2016 “recante riorganizzazione, razionalizzazione e semplificazione della disciplina concernente le autorità portuali”, che identifica i 58 di interesse nazionale. Nelle aree di studio del progetto SPOT, sono ubicati 8 porti rilevanti per i quali sono disponibili nella suddetta banca dati le informazioni relative alle opere portuali (banchine, mezzi per la movimentazione delle merci, binari, ecc.) collezionate presso le autorità portuali che ad essi sovrintendono.

4 CURVE DI FRAGILITÀ ASSEGNATE

Le curve di fragilità sono relazioni che forniscono il valor medio del danno in una costruzione in funzione di un parametro di intensità sismica (accelerazione di picco, intensità spettrale, intensità macrosismiche) ovvero la probabilità di superamento di un certo livello di danno al variare dell'input (Whitman et al. 1973).

Eucentre ha identificato e definito le curve di fragilità da assegnare alle opere prese in considerazione per l'elaborazione degli scenari di danno derivanti da innesco di faglie. Per alcune opere le curve di fragilità sono state selezionate tra quelle presenti in letteratura, per altre sono state appositamente sviluppate. Nei prossimi paragrafi vengono descritte le scelte fatte.

4.1 Edifici residenziali e scolastici

Per gli edifici, residenziali e scolastici sono state definite curve di fragilità in relazione alla classe di vulnerabilità e al numero di piani della struttura. La metodologia selezionata per la definizione delle curve di fragilità è SP-BELA (Simplified Pushover-Based Earthquake Loss Assessment). Il metodo meccanico implementato in SP-BELA (Borzi et al. 2008a, 2008b) prevede una metodologia semplificata per la definizione della curva di capacità dell'edificio (*pushover*), sviluppata per edifici in muratura ed in c.a.. Per la determinazione della *pushover* vengono definiti la resistenza dell'edificio e i valori di spostamento associati a prestabilite condizioni limite di danno. Sono stati presi in considerazione i seguenti 3 stati limite di riferimento (Calvi 1999): danno lieve (l'edificio è ancora utilizzabile senza la necessità di riparazioni e rinforzi), danno severo (l'edificio non può essere utilizzato senza interventi di riparazione e rinforzo), collasso (l'edificio non è più sicuro per l'incolumità degli occupanti, interventi di riparazione non sono

applicabili o comunque non risultano economicamente vantaggiosi, l'edificio deve pertanto essere demolito).

Per gli edifici a telaio in c.a., che sono flessibili e si deformano senza danneggiarsi oltre i limiti che producono danno non strutturale ad elementi quali le tamponature, la selezione dei limiti di spostamento per il danno lieve deve tenere conto anche del danno non strutturale. In tutti gli altri casi è stato fatto riferimento solo al danno strutturale.

Nota la distribuzione per ogni stato limite della capacità di spostamento tramite la *pushover*, del periodo di vibrazione equivalente e dello smorzamento, mediante un confronto fra la capacità e la domanda di spostamento si calcolano le probabilità di superamento degli stati limite che costituiscono i punti della curva di fragilità. La domanda di spostamento è espressa dall'ordinata spettrale di spostamento corrispondente al parametro di severità di scuotimento selezionato. Tale ordinata è quella corrispondente al periodo di vibrazione per ciascun edificio della popolazione.

SP-BELA è stato calibrato per essere rappresentativo della realtà del costruito in Italia utilizzando dati di danno osservato (Faravelli et al. 2019). In particolare, i dati di danno osservato sono stati utilizzati per:

1. Passare dai tre stati limite di danno identificati numericamente in SP-BELA ai sei livelli di danno (da D0=nessun danno a D5=collasso) della scala EMS98 (Grünthal 1998) utilizzati in Italia nei rilievi del danno post terremoto a partire dal terremoto dell'Abruzzo 1984;
2. Ottenere curve di fragilità per tutte le tipologie rappresentative del patrimonio edilizio italiano poiché SP-BELA per la muratura non prende in considerazione i meccanismi fuori piano e quindi non coglie il comportamento degli edifici più vulnerabili. Per ovviare a questa mancanza è stato introdotto l'utilizzo di coefficienti di vulnerabilità per passare dalle curve di fragilità per edifici in muratura a bassa vulnerabilità (classe C1), calcolate con il metodo meccanico SP-BELA, alle curve per edifici in muratura a media (classe B) e alta (classe A) vulnerabilità per i quali non è stato identificato un modello meccanico del comportamento strutturale. La procedura di calibrazione è consistita nel confronto fra scenari di danno numericamente calcolati e i dati di danno osservato per terremoti avvenuti in Italia a

partire dal Friuli 1976 fino all'Aquila 2009 (Faravelli et al. 2019).

Si riportano in Figura 2 a titolo d'esempio le curve di fragilità utilizzate nel progetto SPOT per la valutazione della fragilità degli edifici residenziali e scolastici di due piani in classe A (edifici in muratura ad alta vulnerabilità).

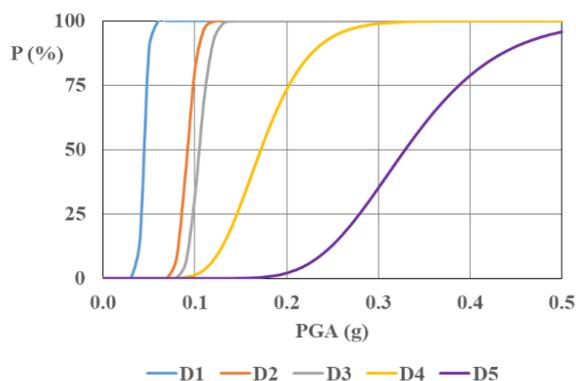


Figura 2. Curve di fragilità per edifici di 2 piani residenziali e scolastici in classe di vulnerabilità A

4.2 Ponti stradali

Gli stati limite presi in considerazione per i ponti sono lo stato limite di danno (SLD), superato il quale il ponte non può essere utilizzato senza interventi di riparazione, e lo stato limite di collasso (SLC), superato il quale il ponte non è più sicuro per sostenere i carichi gravitazionali per i quali è stato progettato. Per verificare il raggiungimento di ciascuno stato limite sono stati considerati meccanismi che coinvolgono esclusivamente le pile e gli appoggi essendo gli elementi che più comunemente, sulla base di quanto osservato in terremoti passati, hanno subito danni condizionando quindi il danneggiamento riportato dall'intera opera a seguito del carico sismico.

Per calcolare le curve di fragilità dei 315 ponti con un livello di conoscenza completo è stato utilizzato l'applicativo B.R.I.T.N.E.Y. (BRIdge auTomatic NItha-based Earthquake fragilitY) che consente una rigorosa modellazione non lineare ad elementi finiti con analisi nel dominio del tempo (Franchin et al. 2015). Con tale applicativo le tipologie di opere per le quali è possibile condurre in automatico il calcolo della curva di fragilità sono i ponti in c.a. a travata. L'applicazione è predisposta per fare una doppia ipotesi di modellazione dei dispositivi di appoggio: (a) ipotizzando i vincoli fissi, cioè facendo riferimento alla condizione in cui i giunti si chiudono, i vari segmenti di campata si trascinano e, quindi, l'intero impalcato trasferisce i carichi sulle sottostrutture, penalizzando le pile più rigide al fine di effettuare una verifica

cautelativa degli stati limite propri delle pile (rotazione e taglio), e (b) ipotizzando appoggi scorrevoli assumendo un coefficiente di attrito al fine di poter effettuare una verifica cautelativa del meccanismo di perdita di appoggio. In Figura 3 sono mostrate a titolo d'esempio le curve di fragilità elaborate con B.R.I.T.N.E.Y. e poi interpolate con la funzione lognormale per il Viadotto Tumarrano II situato sulla SS 189 in provincia di Agrigento.

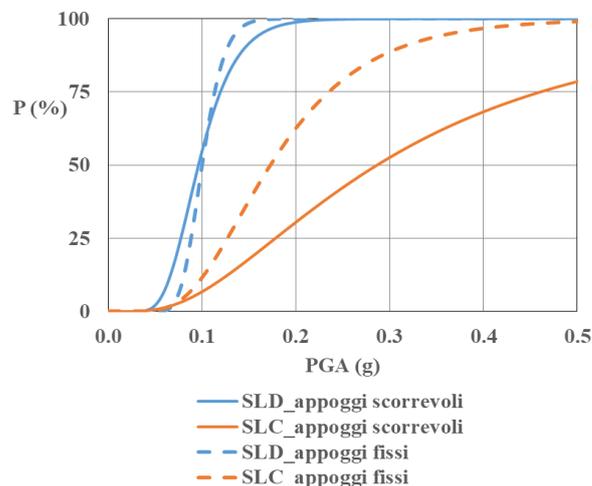


Figura 3. Curve di fragilità per un ponte calcolate con B.R.I.T.N.E.Y.

Per 4170 ponti gestiti da ANAS è noto solo il dato di georeferenziazione, ovvero la loro localizzazione, senza alcuna informazione relativa alla struttura. Non è stato quindi possibile svolgere analisi di dettaglio che prevedano la modellazione dell'opera. A tali strutture sono state assegnate curve di fragilità "medie" rappresentative dei 315 ponti per i quali si hanno informazioni con dettaglio di conoscenza elevato, ovvero quelli per i quali è stato possibile procedere ad una rigorosa modellazione non lineare ad elementi finiti con l'applicativo B.R.I.T.N.E.Y. L'operazione finalizzata alla definizione della curva "media" è stata condotta considerando condizioni di vincolo omogenee in corrispondenza dell'appoggio. Si è infatti ritenuto inopportuno mescolare dati derivanti da curve di fragilità per ponti con altre tipologie di appoggio in quanto le condizioni di vincolo in corrispondenza dell'appoggio governano in modo rilevante la risposta sismica del ponte. Per il calcolo delle curve "medie" è stata condotta una regressione ai minimi quadrati con una distribuzione cumulata lognormale dei punti delle curve calcolate.

Infine per i 352 ponti di Autostrade per l'Italia per i quali è nota la scheda di verifica sismica di livello 1 e 2 è stata condotta una campagna di analisi al fine di ottenere una correlazione tra le

verifiche sismiche di un ponte considerando e non i coefficienti di sicurezza dei materiali per quantificare la relazione che esiste tra i risultati delle verifiche riportati sulla scheda e la verosimile vulnerabilità del ponte. Le analisi svolte hanno permesso di definire dei coefficienti che legano tra loro gli indici di verifica calcolati con e senza i coefficienti di sicurezza dei materiali. Il risultato è stato utilizzato per legare la capacità dei ponti di Autostrade per l'Italia noti con i parametri delle curve di fragilità. In Figura 4 sono mostrate due curve di fragilità calcolate per uno dei ponti di Autostrade per l'Italia.

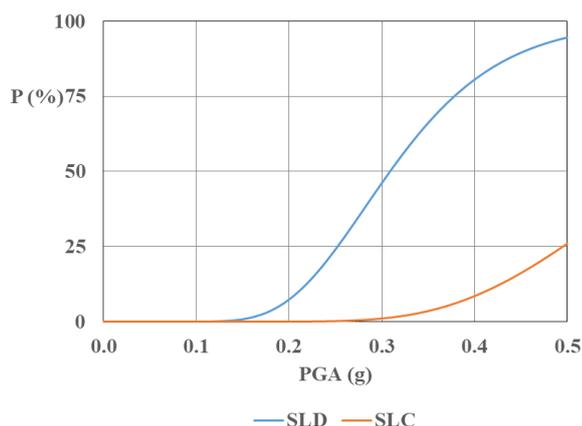


Figura 4. Curve di fragilità per un ponte di cui è nota la scheda di verifica sismica di livello 1 e 2

4.3 Gallerie

Dopo una revisione delle curve di fragilità presenti in letteratura, si è deciso di assegnare alle gallerie presenti nel database derivante da ANAS e Autostrade per l'Italia le curve di fragilità di ALA (2001). Tali curve sono state elaborate per gallerie superficiali, cioè con profondità minore o uguale a 50 metri, e per gallerie profonde, ovvero con profondità maggiore di 50 metri. Al fine di assegnare correttamente le curve di fragilità è stato necessario calcolare la profondità di ogni galleria. Attraverso il software QGIS (<https://www.qgis.org/it/site/>) le coordinate delle gallerie sono state confrontate con mappe raster delle varie regioni d'Italia riportanti l'altitudine del terreno: si è convenuto che la differenza di altitudine (massima - minima) riscontrata sulla geometria della galleria potesse rappresentare la quantità di terreno presente al di sopra di essa. In funzione di tale valore è stato assegnato il corrispondente set di curve di fragilità. In Figura 5 sono riportate a titolo d'esempio le curve di fragilità di ALA (2001) per gallerie superficiali. Le curve prevedono 4 livelli di danno: nullo, lieve (i.e. piccole fessurazioni, scheggiature e altri piccoli problemi al rivestimento), moderato (importanti fessurazioni, scheggiature e cadute di

massi) e grave (collasso del rivestimento o roccia circostante).

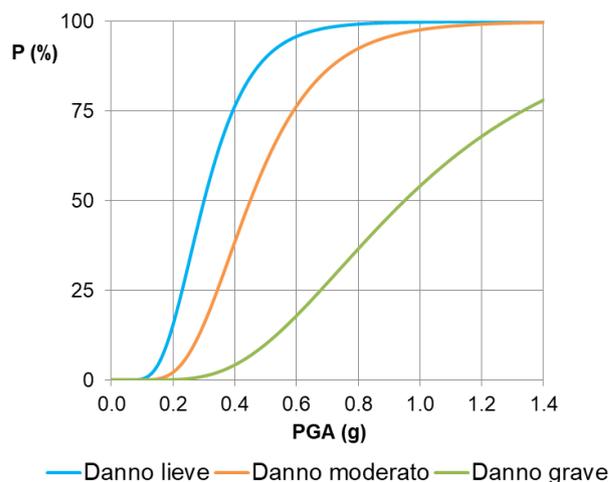


Figura 5. Curve di fragilità per gallerie superficiali (ALA 2001)

4.4 Opere di sostegno

Per le opere di sostegno si è deciso di sviluppare curve di fragilità ad hoc. Poiché i dati presenti nel database a disposizione derivanti dalla scheda di accatastamento ANAS sono solo parziali, la metodologia adottata include un passo di progettazione simulata per definire le variabili che sono legate ad altre presenti nel database. I dati a disposizione di ciascuna opera di sostegno sono: (i) la georeferenziazione, (ii) la tipologia strutturale (a gravità, di cemento armato, etc.), (iii) la tipologia di fondazioni (superficiali o indirette) e (iv) l'altezza. Sulla base di questi dati è stata svolta una progettazione simulata per un campione di muri generati mediante una simulazione Monte Carlo. Sulla base di un confronto fra la capacità e la domanda, i cui rapporti sono trattati in un *framework* probabilistico, si calcolano le curve di fragilità. Si è deciso di calcolare le curve solo per le opere con altezza compresa tra 1 e 11 m in quanto sono stati considerati irrilevanti ai fini del rischio sismico i muri con altezza inferiore ad 1 metro ed è stato considerato inadeguato il metodo di progettazione e di verifica implementato per opere importanti con altezza superiore a 11 metri che richiederebbero analisi *ad hoc*. Le opere di sostegno sono state suddivise in opere in c.a. e muri a gravità. È stato preso in considerazione solo lo stato limite di collasso. In Figura 6 è mostrata a titolo d'esempio una curva di fragilità calcolata per un'opera di sostegno in c.a. alta 9.5m.

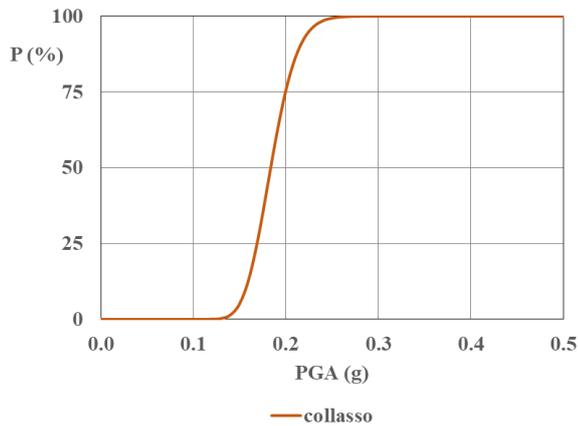


Figura 6. Curva di fragilità per un'opera di sostegno in c.a.

4.5 Opere portuali

Gli elementi portuali sono tipicamente classificati in tre categorie principali:

- Strutture affacciate a mare (e.g. opere di accosto);
- Attrezzature per il carico/scarico di merci e componenti di stoccaggio;
- Infrastrutture portuali (e.g. infrastrutture di distribuzione dell'elettricità).

Per la stima del livello di danno delle opere di accosto sono state adottate le curve di fragilità sviluppate da Eucentre per banchine portuali a gravità utilizzando una procedura numerica che considera sia l'incertezza associata ai parametri meccanici che costituiscono il modello, sia quella associata all'input sismico (Calabrese e Lai 2013, 2016). La stima delle vulnerabilità sismica delle altre tipologie di strutture ed infrastrutture viene effettuata mediante l'applicazione di curve di fragilità disponibili in letteratura, seguendo le raccomandazioni più recenti in materia (e.g. progetto di ricerca europeo SYNER-G; <http://www.vce.at/SYNER-G/files/project/project-overview.html>). Per le attrezzature per carico/scarico merci, le cabine elettriche e le linee elettriche si fa riferimento alle curve di fragilità proposte nella procedura standard di HAZUS (2003); in Figura 7 sono mostrate, a titolo di esempio, le curve di fragilità proposte in HAZUS adottate per la stima del danno delle infrastrutture di distribuzione dell'elettricità (cabine elettriche) in area portuale. Nel caso delle attrezzature per lo stoccaggio di carburante invece sono state adottate le curve di fragilità sviluppate nell'ambito del progetto di ricerca greco SRM-LIFE (2007).

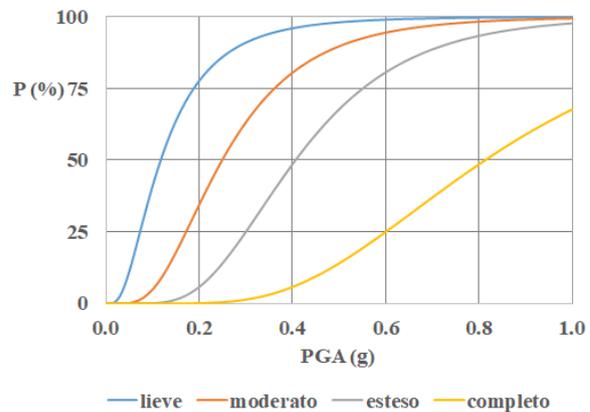


Figura 7. Curve di fragilità proposte nella procedura HAZUS (2003) adottate per la stima del danno delle cabine elettriche in area portuale

5 FAGLIE SELEZIONATE

Gli scenari di danno sono stati elaborati considerando come input sismico le 11 faglie potenzialmente sismogeniche mostrate in Figura 8.

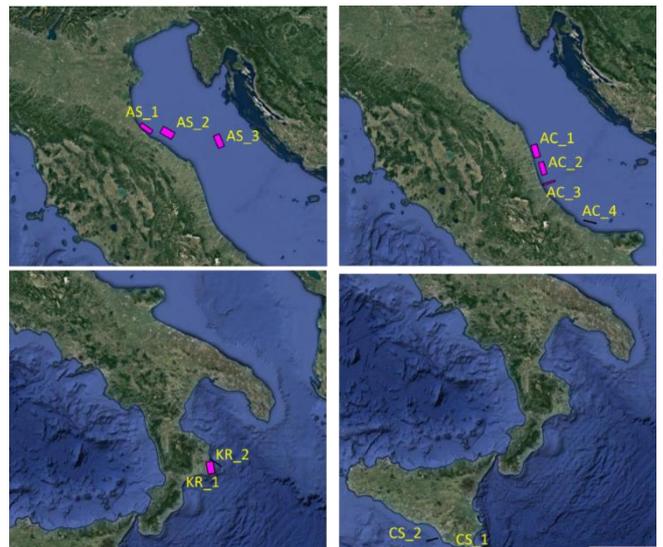


Figura 8. Visualizzazione delle 11 faglie sulla piattaforma WebGIS

INGV le ha identificate, ne ha definito le geometrie ed il meccanismo focale. Per il progetto SPOT si è deciso di comune accordo tra tutti i partner di assegnare ad ogni faglia una Magnitudo momento (M_w) pari a 6.5. Le 11 faglie sono situate in 4 zone d'Italia: 3 faglie nell'Adriatico Settentrionale (AS), 4 faglie nell'Adriatico Centrale (AC), 2 faglie nella Calabria Ionica (KR) e 2 faglie nel Canale di Sicilia (CS).

Eucentre ha inserito queste 11 faglie nel database delle faglie sul quale si appoggia il WebGIS sviluppato e l'applicativo che consente di generare scenari di danno.

6 APPROCCIO PER IL CALCOLO DI SCENARI DI DANNO

Il rischio viene definito per un territorio o per una popolazione di elementi, edifici, persone e beni considerando i danni che possono derivare dal verificarsi di eventi calamitosi di origine naturale o antropica. Il rischio sismico è determinato da una combinazione della pericolosità (input sismico), della vulnerabilità (rappresentata ad esempio dalle curve di fragilità) e dell'esposizione (numero di persone, valore dei beni esposti, etc.) ed è una misura delle perdite che ci si può attendere in un dato intervallo di tempo. Nel caso in cui la pericolosità sismica sia rappresentata da un singolo terremoto, anziché da un modello di pericolosità, si parla di scenario di evento e conseguentemente di danno e di perdite ad esso condizionate. Nel progetto SPOT sono stati calcolati 11 scenari di danno, in relazione alle 11 faglie identificate da INGV, per tutte le opere prese in considerazione. Gli scenari sono stati calcolati sia in termini di probabilità di danno che in termini di impatto e di perdite.

6.1 Probabilità di danno

La probabilità di danno rappresenta la probabilità di raggiungere un determinato livello di danno dato un certo input sismico. La probabilità di danno può essere letta direttamente sulla curva di fragilità entrando in ascissa con l'accelerazione di picco (PGA) al sito. Tale PGA è stata calcolata con tre diverse relazioni di attenuazione: Akkar & Bommer (2010), Boore & Atkinson (2008) e Bindi et al. (2011). Queste relazioni non prendono in considerazione la profondità della faglia in quanto attenuano il parametro considerato in funzione della distanza dai bordi della proiezione in superficie della faglia. Per ogni elemento oggetto di studio è stata calcolata con le tre relazioni di attenuazione la PGA derivante dalle faglie identificate.

Il calcolo della probabilità di danno è stato poi svolto solo per gli elementi (edifici, ponti, ecc.) che si trovano ad una distanza dalla sorgente sismogenetica tale da risentire della scossa di terremoto. Si ipotizza che le strutture prese in considerazione subiscano danni per accelerazioni maggiori o uguali al 7% di g (accelerazione di gravità) corrispondente secondo la relazione di Margottini et al. (1992) ad un'intensità macrosismica pari al grado 5 MCS. Gli elementi che si trovano ad una distanza tale per cui l'accelerazione calcolata con la relazione di attenuazione è minore di 0.07g non vengono presi in considerazione nello scenario di danno. Sulla piattaforma WebGIS sviluppata viene

visualizzato solo lo scenario medio derivante dalle tre relazioni di attenuazione.

6.2 Impatto

Per l'edilizia residenziale sono state condotte ulteriori elaborazioni: gli scenari sono stati formulati, infatti, anche in termini di impatto e di perdite. Con il termine impatto si vuole indicare il numero di edifici, % edifici, numero abitazioni, % abitazioni, popolazione e superficie "agibili", "danneggiati" e "inagibili". La relazione tra livelli di danno della scala EMS98 (Grünthal 1998) da D0 (nessun danno) a D5 (collasso) ed impatto utilizzata in questo progetto deriva dall'analisi del database di danno osservato per il terremoto di L'Aquila 2009 (Sabetta et al. 2013) ed è la seguente:

- Agibili: $D0+0.646 \cdot D1$
- Danneggiati: $0.354 \cdot D1+0.184 \cdot (D2+D3)$
- Inagibili: $0.816 \cdot (D2+D3)+D4+D5$

6.3 Perdite

Oltre al calcolo delle probabilità di danno e dell'impatto, per l'edilizia residenziale sono state calcolate anche le perdite in termini economici e di vite umane. I parametri utilizzati per il calcolo delle perdite sono stati condivisi con ReLUIS che analogamente a quanto fatto da Eucentre li ha utilizzati per il calcolo delle perdite economiche relative agli scenari di danno da tsunami.

Le perdite in termini di vittime e feriti vengono calcolate a partire dalla popolazione che risiede in edifici che hanno raggiunto il livello di danno D4 e D5 utilizzano le percentuali riportate in Tabella 3.

Tabella 3. Parametri per il calcolo delle vittime e dei feriti

Livelli di danno	% vittime	% feriti
D4	1	5
D5	10	30

Per il calcolo delle perdite economiche si è fissato un costo di ricostruzione al mq pari a 1500 euro per tutta Italia. In Tabella 4 sono mostrate le percentuali del costo al mq da applicare alle superfici degli edifici che raggiungono i diversi livelli di danno da D1 a D5.

Tabella 4. Parametri per il calcolo delle perdite economiche

Livelli di danno	% del costo di ricostruzione
D1	10
D2	30
D3	60
D4	100
D5	100

Le percentuali riportate in Tabella 4 indicano, ad esempio, che il costo per riparare un edificio che ha raggiunto il livello di danno D1 è il 10% del costo di ricostruzione, ovvero 150 euro al mq.

7 SCENARI CALCOLATI

In riferimento alle 11 faglie identificate, sono stati calcolati gli scenari di danno e le perdite conseguenti per le opere selezionate. I risultati sono visualizzabili sulla piattaforma WebGIS appositamente sviluppata da Eucentre.

La piattaforma rende fruibili tutti i numerosi risultati ottenuti che, altrimenti, risulterebbero difficilmente consultabili. Un breve sommario di questi risultati per l'edilizia residenziale è riportato nei grafici che seguono. Nel grafico di Figura 9 è riportato il numero di edifici residenziali che raggiungono il livello di danno D1, corrispondente al danno lieve associato ad ogni faglia. In Figura 10 è invece mostrato il numero di feriti, calcolati utilizzando le assunzioni riportate in Tabella 3. È necessario specificare che gli scenari calcolati, e quindi le relative mappe consultabili sulla piattaforma WebGIS e i grafici qui mostrati, si riferiscono ad eventi ipotetici, associati ad una magnitudo (fissata a $M_w=6.5$).

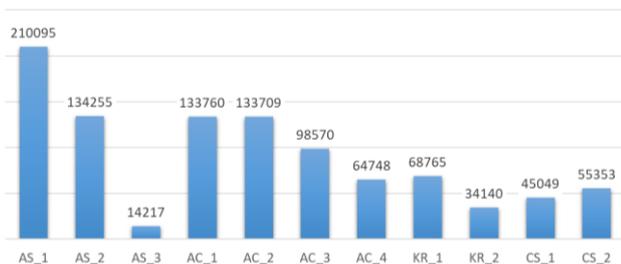


Figura 9. Numero di edifici che raggiungono il livello di danno D1 per ciascuno scenario

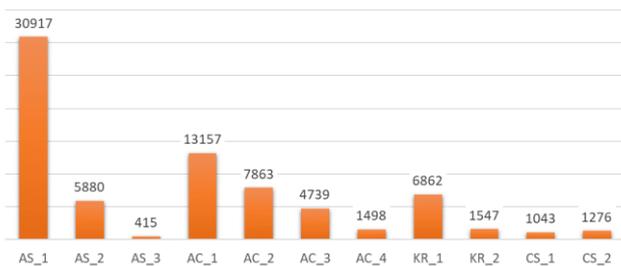


Figura 10. Numero di feriti associati a ciascuno scenario elaborato

In Figura 11 è riportata una mappa relativa allo scenario di danno per l'edilizia scolastica nell'ipotesi di attivazione della faglia dell'Adriatico Centrale AC_3: la mappa mostra la probabilità per ogni scuola di raggiungere il livello di danno D3.

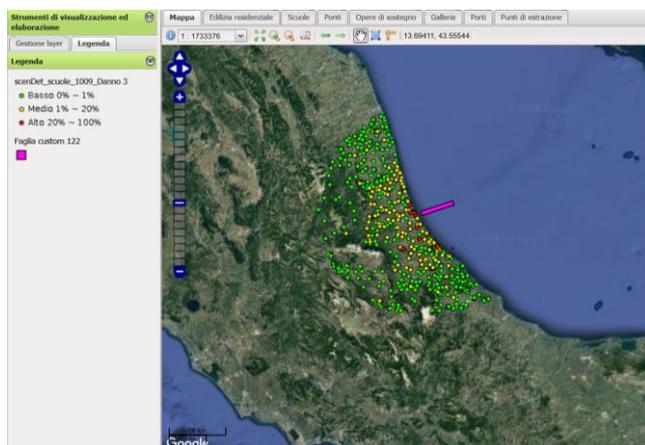


Figura 11. Scenario per faglia AC_3: probabilità per ogni edificio scolastico di raggiungere il livello di danno D3

In Figura 12 è riportato lo scenario di danno per il porto di Crotona nell'ipotesi di attivazione della faglia denominata KR_2: la mappa mostra la probabilità per ogni elemento portuale in esame di raggiungere il livello di danno D2.

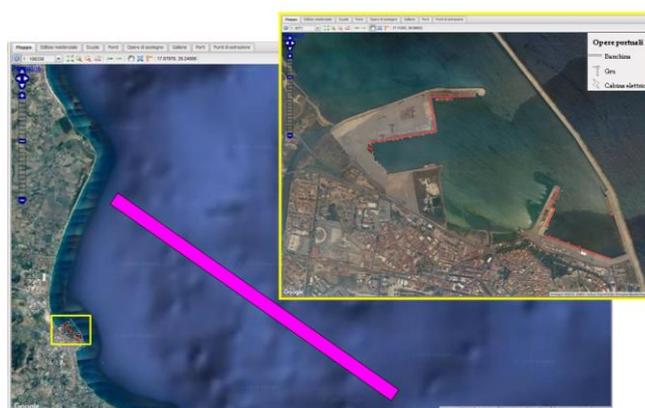


Figura 12. Scenario relativo alla faglia KR_2 calcolato al porto di Crotona: probabilità per ogni elemento del porto (zoom nel riquadro) di raggiungere il livello di danno D2.

8 PIATTAFORMA WEBGIS

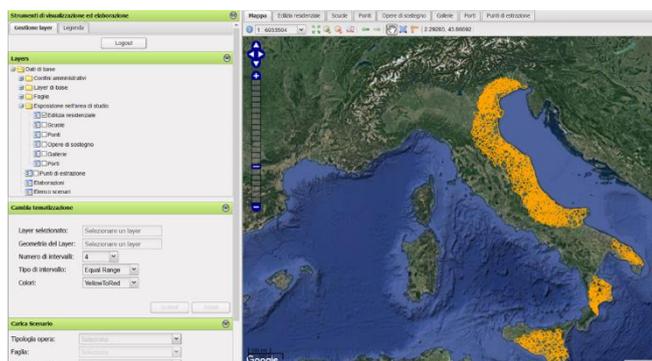
Per presentare in modo organico sotto forma di tabelle e mappe i risultati ottenuti, Eucentre ha sviluppato una piattaforma WebGIS, cioè un sistema informativo geografico (GIS) pubblicato su web. Un WebGIS è quindi l'estensione al web degli applicativi nati e sviluppati per gestire la cartografia numerica. Più precisamente, un progetto WebGIS si distingue da un progetto GIS per le specifiche finalità di comunicazione e di condivisione delle informazioni con altri utenti. Infatti con i WebGIS le applicazioni GIS tradizionalmente sviluppate per utenze stand-alone o in ambienti LAN possono essere implementate su web server, consentendo l'interazione attraverso internet con la cartografia e con i dati ad essa associati.

Il WebGIS sviluppato per il progetto SPOT ha cinque funzionalità principali:

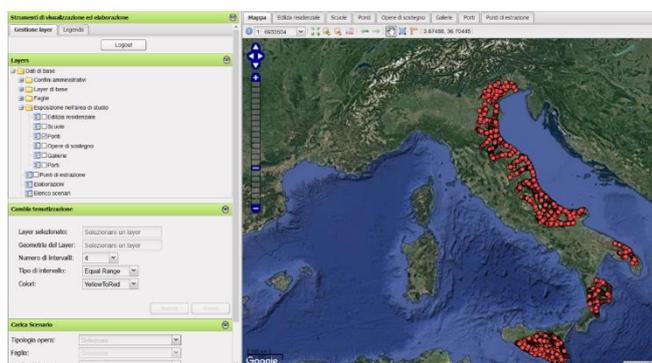
1. Consentire la visualizzazione su mappa delle strutture e infrastrutture oggetto d'analisi;
2. Al click sull'elemento di interesse deve essere possibile visualizzare i dati di esposizione relativi; ad esempio se si seleziona un comune viene in automatico compilato un tab che mostra il numero di edifici, abitazioni, popolazione e superficie abitativa presenti nel comune, espressi come numero totale o suddivisi in funzione della classe di vulnerabilità;
3. Visualizzare su mappa le sorgenti degli eventi ovvero le 11 faglie identificate;
4. Visualizzare i risultati degli scenari di danno elaborati;
5. Tematizzare i layer relativi agli scenari di danno.

In questo capitolo vengono riportate alcune figure che illustrano le principali potenzialità della piattaforma.

In Figura 13 sono mostrati i comuni e i ponti presenti all'interno dell'area di studio così come vengono visualizzati sul WebGIS SPOT. In modo del tutto analogo vengono visualizzati gli edifici scolastici, le gallerie, le opere di sostegno e le opere portuali.



(a)



(b)

Figura 13. Visualizzazione sul WebGIS SPOT dei comuni (a) e dei ponti (b) presenti all'interno dell'area di studio

In Figura 14 è mostrata la visualizzazione su WebGIS di alcune informazioni relative ad un ponte selezionato su mappa: in particolare si tratta della foto e dello schema statico di uno dei

315 ponti per i quali è stato possibile elaborare il modello ad elementi finiti. Analogamente, sono presenti altri tab che consentono di visualizzare i dati relativi a tutte le strutture e infrastrutture oggetto di studio.



Figura 14. Visualizzazione della foto e dello schema statico di un ponte sul WebGIS SPOT

In Figura 15 è mostrato, a titolo d'esempio, lo scenario di danno relativo all'edilizia residenziale per la faglia KR_1, una delle due faglie identificate nella Calabria Ionica. In particolare la mappa riporta, per ogni comune, la % di abitazioni che raggiungono il livello di danno D3, che corrisponde a "danno da notevole a grave" secondo la scala EMS98 (Grünthal 1998).

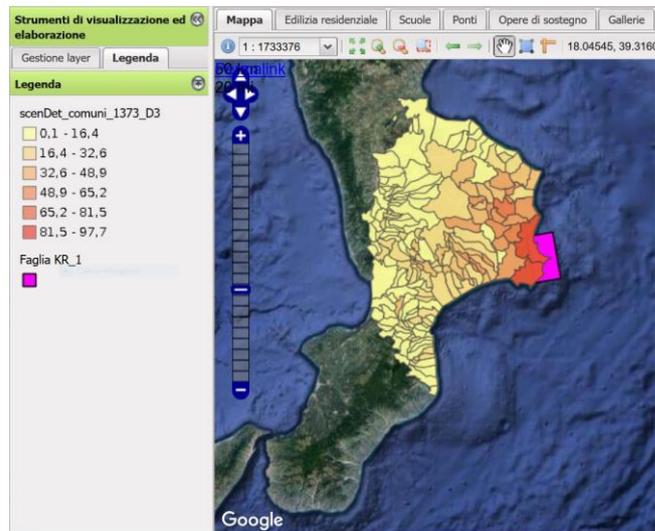


Figura 15. Esempio di scenario di danno per edilizia residenziale visualizzato sul WebGIS SPOT

Infine, l'esito di uno scenario di danno può essere visualizzato anche in tabella, oltre che su mappa. In Figura 16 ne è riportato un esempio: per il ponte selezionato, la prima tabella mostra l'elenco di tutti gli scenari di danno calcolati mentre la seconda tabella mostra la probabilità di raggiungere i diversi livelli di danno per lo scenario evidenziato in grigio.

Mappa Edilizia residenziale Scuole Ponti Opere di sostegno Gallerie Ponti Punti di estrazione			
Dati generali Scenari			
Scenari calcolati			
Identificativo	Magnitudo	ID Faglia	Tipo di faglia
1101	6.5	KR_1	Inversa
1133	6.5	KR_2	Trascorrente
Valori di scenario per il ponte selezionato			
Livello di danno	Percentile	Modellazione appoggi	Probabilità di superamento
Danno	50	Appoggi fissi	61 %
Danno	50	Appoggi scorrevoli	49 %
Collasso	50	Appoggi fissi	4 %
Collasso	50	Appoggi scorrevoli	5 %

Figura 16. Visualizzazione in tabella sul WebGIS SPOT degli scenari di danno per un ponte selezionato

9 CONCLUSIONI

Nell'ambito del progetto SPOT Eucentre ha intrapreso la valutazione degli scenari di danno e delle relative perdite ed impatto atteso per un numero molto elevato di strutture ed infrastrutture. La valutazione a grande scala effettuata in questo studio può essere migliorata focalizzandosi su un'area più ristretta: in tal caso potrebbe essere migliorato il livello di conoscenza dei dati di esposizione, sia dell'edilizia residenziale che delle infrastrutture. La valutazione delle perdite è stata condotta per l'edilizia residenziale, ma modelli di perdita potrebbero essere implementati anche per le infrastrutture, sia in termini di perdite dirette che in termini di perdite indirette.

Un eventuale miglioramento del livello di conoscenza dell'esposizione dovrebbe essere accompagnato da modelli di vulnerabilità più raffinati in grado di processare i nuovi dati e migliorare di conseguenza la valutazione del danno atteso. I modelli, inoltre, potrebbero considerare anche il fenomeno di accumulo del danno.

Gli scenari sono stati generati per aree della costa che ricadono entro un raggio di 100 km dai punti di estrazione indicati dal MISE. Il valore di 100 km assunto come massimo raggio di impatto dei terremoti considerati è da ritenere valido solamente in prima approssimazione. Molti terremoti (e.g. Città del Messico, 1985, etc.) hanno, infatti, mostrato come le caratteristiche locali del territorio (e.g. spessori e caratteristiche geotecniche dei terreni presenti negli strati più superficiali, topografia, etc.) possano alterare in modo significativo l'azione sismica, amplificando lo scuotimento anche a siti ubicati a considerevoli distanze dall'epicentro. In una successiva fase di approfondimento, sarebbe interessante estendere la zona di studio tenendo conto delle caratteristiche locali del territorio. Inoltre, è importante precisare che, in questo studio, non sono stati presi in considerazione i cosiddetti effetti di campo vicino ("near-fault"), che possono influenzare in modo significativo,

congiuntamente ad eventuali effetti di sito, la risposta dinamica di strutture ed infrastrutture ubicate nelle vicinanze della faglia.

Infine è necessario precisare che gli scenari di scuotimento presi in considerazione, ovvero le 11 faglie identificate alle quali è stata associata una $M_w=6.5$, rappresentano solo un campione della potenziale sismicità naturale dell'area. È bene ricordare quindi che lo studio qui presentato è un'analisi verosimile ma relativa a scuotimenti per i quali non è stata definita la probabilità di accadimento.

RINGRAZIAMENTI

Lo studio presentato è stato finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico italiano (MISE). Si ringraziano la Dott.ssa Ilaria Antoncicchi (Direzione Generale per la sicurezza anche ambientale delle attività minerarie ed energetiche - Ufficio nazionale minerario per gli idrocarburi e le georisorse) e la Dott.ssa Daniela Di Bucci (Dipartimento della Protezione Civile) per aver coordinato il progetto e per le utili discussioni che hanno contribuito allo svolgimento del lavoro. Infine si ringraziano tutti i partner del progetto con i quali c'è stata una proficua collaborazione.

RIFERIMENTI

- Akkar, S., Bommer, J.J., 2010. Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East, *Seismological Research Letters*, **81**(2), 195-206.
- American Lifelines Alliance, 2001. *Seismic Fragility Formulations for Water System, part 2 - Guideline*, ASCE - FEMA.
- Angeletti, P., Baratta, A., Bernardini, A., Cecotti, C., Cherubini, A., Colozza, R., Decanini, L., Diotallevi, P., Di Pasquale, G., Dolce, M., Goretti, A., Lucantoni, A., Martinelli, A., Molin, D., Orsini, G., Papa, F., Petrini, V., Riuscetti, M., Zuccaro, G., 2002. Valutazione e riduzione della vulnerabilità sismica degli edifici, con particolare riferimento a quelli strategici per la protezione civile, *Rapporto finale*, Dipartimento della Protezione Civile-Ufficio Servizio Sismico Nazionale, Roma.
- Bindi, D., Pacor, F., Luzi, L., Puglia, R., Massa, M., Ameri, G., Paolucci, R., 2011. Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **9**, 1899-1920.
- Boore, D.M., Atkinson, G.M., 2008. Ground motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 and 10.0 s, *Earthquake Spectra*, **24**, 99-138.

- Borzi, B., Pinho, R., Crowley, H., 2008a. Simplified pushover-based vulnerability analysis for large scale assessment of RC buildings, *Eng Struct*, **30**(3), 804-820.
- Borzi, B., Crowley, H., Pinho, R., 2008b. Simplified Pushover-Based Earthquake Loss Assessment (SPBELA) Method for Masonry Buildings, *International J of Architectural Heritage*, **2**(4), 353-376.
- Bozzoni, F., Lai, C.G., Marsan, P., Conca, D., Famà, A., 2018. WebGIS Platform for Seismic Risk Assessment of Maritime Port Systems in Italy, *Proceedings, 4th PIANC Mediterranean Days Congress*, Sevilla, Spain, October 17-19, 2018.
- Braga, F., Dolce, M., Liberatore, D., 1982. Southern Italy November 23, 1980 Earthquake: A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the M.S.K. – 76 scale”, *Atti del 7 ECEE*, Atene, pubblicazione CNR-PFG n. 503, Roma.
- Calabrese, A., Lai, C.G., 2013. Fragility functions of blockwork wharves using artificial neural networks, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **52**(1), 88-102.
- Calabrese, A., Lai, C.G., 2016. Sensitivity analysis of the seismic response of gravity quay walls to perturbations of input parameters, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **82**, 55-62.
- Calvi, G.M., 1999. A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, **3**(3), 411-438.
- Dialuce, G., Chiarabba, C., Di Bucci, D., Doglioni, C., Gasparini, P., Lanari, R., Priolo, E., Zollo, A., 2014. Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell’ambito delle attività antropiche, *Gruppo di Lavoro istituito dal MiSE il 27 febbraio 2014 nell’ambito della Commissione Idrocarburi e Risorse Minerarie (CIRM)*.
- Direttiva 2013/30/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 12 giugno 2013. sulla sicurezza delle operazioni in mare nel settore degli idrocarburi e che modifica la direttiva 2004/35/CE Testo rilevante ai fini del SEE.
- D.M. 14.01.2008. Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni. *G.U. 04.02.2008 n.29*.
- Faravelli, M., Borzi, B., Polli, D., Pagano, M., 2019. Calibration of a mechanics-based method for large-scale vulnerability assessment, *Bull Earthquake Eng*, **17**(5), 2485-2508.
- Franchin, P., Lupoi, A., Noto, F., Tesfamariam, S., 2015. A Bayesian Network Model to Assess Seismic Risk of Reinforced Concrete Girder Bridges, *12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, ICASP12, Vancouver, Canada, July 12-15.
- Grünthal, G., 1998. European Macroseismic Scale 1998 (EMS 1998), *Council of Europe, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Sismologie*, Vol. **15**.
- HAZUS, 2003. Multi-hazard Loss Estimation Methodology –Earthquake Model, *Technical Manual, National Institute of Buildings Science (NIBS) for the Federal Emergency Management Agency (FEMA)*, Washington D.C., USA.
- Margottini, C., Molin, D., Serva, L., 1992. Intensity versus ground motion: A new approach using Italian data, *Engineering Geology*, **33**(1), 45-58.
- OPCM n.3274 del 20.03.2003. 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. 08.05.2003 n.105*
- Sabetta, F., Speranza, E., Borzi, B., Faravelli, M., 2013. Scenari di danno empirici e analitici a confronto con recenti terremoti italiani, *Proceedings of 32th National Conference of GNGTS*, Trieste, Italy.
- SRM-LIFE, 2007. Development of a global methodology for the vulnerability assessment and risk management of lifelines, infrastructures and critical facilities. Application to the metropolitan area of Thessaloniki, *Research project, G. Secretariat for Research and Techniques*, Greece.
- Vona, M., Masi, A., 2004. Resistenza sismica di telai in c.a. progettati con il R.D. 2229/39, *Atti del XI Congresso ANIDIS 2004*, Genova, Italy.
- Whitman, R.V., Reed, J.W., Hong, S.T., 1973. Earthquake Damage Probability Matrices, in *Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering*, 2, 2531-2540, Palazzo dei Congressi (EUR), Rome.