

Valutazione della risposta sismica di dighe in terra della Regione Campania mediante approcci semplificati

Seismic response assessment of embankment dams in Campania Region (southern Italy) by means of simplified approaches

Francesca Bozzoni¹, Stefania Chiarolla², Carlo G. Lai³ ■

Sommario

Il patrimonio delle grandi dighe italiane conta più di 500 opere di diversa tipologia (ad es. a gravità, arco, arco-gravità, etc.), materiali (ad es. in terra, calcestruzzo, muratura) ed età. Circa 165 sono dighe in terra e più del 50% di queste opere sono situate in aree a media-elevata sismicità. In questo contesto, emerge come sia di fondamentale importanza la valutazione del rischio sismico delle dighe esistenti e la stima della loro sicurezza. Il presente articolo illustra l'applicazione di una procedura messa a punto per la valutazione speditiva della risposta sismica di dighe in terra mediante approcci semplificati con riferimento a tre dighe in esercizio, ubicate nella Regione Campania. Lo strumento sviluppato consente di valutare, in tempo quasi-reale, la risposta sismica delle dighe in terra nelle fasi immediatamente successive ad un terremoto, in termini di fattore di sicurezza pseudo-statico e spostamento permanente atteso, calcolato mediante correlazioni empiriche della letteratura tecnica.

Parole chiave: Dighe in terra, risposta sismica, approcci semplificati, Regione Campania.

Abstract

The heritage of Italian large dams includes more than 500 structures of various typologies (e.g. gravity dams, arch dams, arch-gravity dams, etc.), materials (e.g. earth, concrete, masonry) and age. About 165 are embankment dams and more than 50% of these structures are located in areas of medium to high seismicity. In this framework, the seismic risk assessment and evaluation of safety conditions of the existing dams is of foremost importance. This article illustrates the application of a procedure that has been developed for the assessment of the seismic response of embankment dams by means of simplified approaches. The methodology has been applied to 3 in-service embankment dams located in Campania Region (southern Italy). The procedure allows to evaluate, in quasi-real time, the seismic response of embankment dams in the immediate aftermath of an earthquake, in terms of both the pseudo-static factor of safety and the expected permanent displacement, computed by using empirical correlations from the technical literature.

Keywords: Embankment dams, seismic response, simplified approaches, Campania Region.

1. Introduzione

Il territorio italiano vede la presenza di numerose opere di sbarramento, diverse per tipologia (ad es. a gravità, a volta, sostenute da contrafforti, etc.), per materiale (ad es. in terra, calcestruzzo, muratura) e per anno di costruzione. Le dighe in terra attualmente esistenti sono numerose (165). Si tratta di una tipologia di sbarramento che presenta sensibili vantaggi rispetto alle dighe in calcestruzzo o muratura, tra cui l'*economicità*, in quanto per la realizzazione sono utilizzati materiali reperibili in loco, la *duttilità*, poiché i

geomateriali possiedono una intrinseca capacità di adattamento senza lesionarsi agli inevitabili assestamenti del piano di fondazione e del corpo diga, l'*impatto ambientale*, in quanto le dighe in terra si inseriscono nell'ambiente naturale in maniera più armoniosa rispetto agli sbarramenti murari.

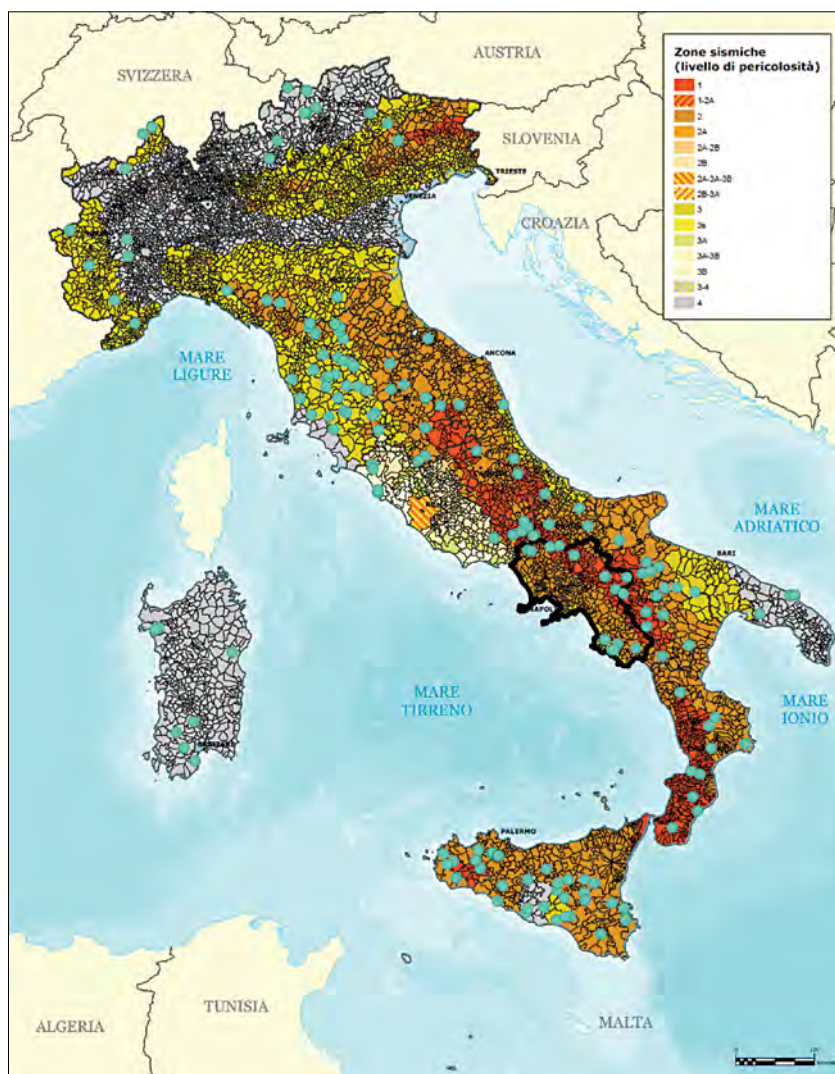
Delle 538 "grandi dighe" italiane (e cioè quelle di altezza superiore a 15 m e/o invaso di capacità superiore a 1000000 m³), 165 sono in terra (dato aggiornato a maggio 2014; <http://www.registroyitalianodighe.it/>). Di queste, più del 50%

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

² Università degli Studi di Pavia - ✉ stefania.chiarolla01@universitadipavia.it

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

Figura 1
 Mappa della classificazione sismica del territorio nazionale aggiornata al 2014 con indicazione dell'ubicazione delle dighe in terra italiane (puntini verdi). (Fonte mappa della classificazione sismica: Dipartimento della Protezione Civile <http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/classificazione.wp>).



sono situate in zone a media-elevata sismicità, ossia zona 1 oppure 2 secondo la classificazione sismica del territorio nazionale aggiornata al 2014 (<http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/classificazione.wp>), come illustra la Figura 1. Le dighe assumono un ruolo spesso preminente in un territorio, sia per l'impatto rispetto ai centri abitati limitrofi, sia per gli aspetti economici legati alle attività indotte. La necessità di conoscere nel minor tempo eventuali danneggiamenti, che gli sbarramenti potrebbero subire a seguito del verificarsi di un terremoto, si traduce nella possibilità di mitigarne gli effetti relativi a perdite di vite umane, finanziarie ed impatto ambientale. La stima della risposta sismica delle dighe in terra italiane, con particolare riferimento a quelle ubicate in regioni a sismicità più elevata, è oggetto di un progetto finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile al Centro Europeo di Ricerca e Formazione in Ingegneria Sismica (Eucentre) di Pavia, dal titolo "Rischio sismico di dighe in terra". Tra gli obiettivi principali conseguiti nell'am-

bito del progetto, vi è la realizzazione di una banca dati informatica con interfaccia cartografica georeferenziata GIS, fruibile tramite web come piattaforma webGIS, per la gestione dei dati relativi alle numerose dighe presenti sul territorio nazionale, sia durante la fase di esercizio, che in fase di emergenza. Con particolare riferimento alle fasi immediatamente successive ad un terremoto di scenario, è stata messa a punto una metodologia che consente di effettuare una stima speditiva della risposta sismica delle dighe in terra in tempo quasi-reale. La procedura di analisi ha richiesto uno studio preparatorio preliminare che si è svolto "in tempo di pace" al fine di disporre dei parametri necessari alla verifica sismica durante la fase emergenziale. Un'applicazione pilota della procedura è stata effettuata, nell'ambito delle attività condotte per la redazione del piano di emergenza a scala nazionale "Calabria 2011" alle principali dighe in terra in esercizio della Regione Calabria (i dettagli sono contenuti nel

rapporto Eucentre-PE d6, 2012).

Per garantire la piena fruibilità di questo strumento di analisi, è stato sviluppato, all'interno della piattaforma webGIS, un tool che consente il calcolo, in tempo quasi-reale, del fattore di sicurezza globale e dello spostamento permanente indotto dal terremoto di scenario, valutati, rispettivamente, attraverso analisi pseudo-statiche e metodi dinamici semplificati basati sulle più accreditate correlazioni empiriche pubblicate nella letteratura tecnica specialistica.

Il presente articolo illustra, in sintesi, la procedura di analisi che è stata sviluppata concentrandosi sulla applicazione alle dighe in terra in esercizio ubicate nella Regione Campania, per le quali è stato possibile recuperare i dati di partenza necessari (sezione trasversale del corpo diga e tipologia dei materiali che lo costituiscono), ossia: Piano della Rocca (SA), Lago Matese (CE) e Fabbrica (SA).

2. Procedura di analisi

La verifica della sicurezza sismica di una diga in materiale sciolto può essere valutata utilizzando diversi approcci, tra cui il metodo pseudo-statico, che valuta la stabilità dell'opera rispetto a condizioni di equilibrio limite definendo un fattore di sicurezza globale. Esistono poi i metodi dinamici secondo i quali la stabilità è definita dal confronto tra gli spostamenti e/o le deformazioni accumulate durante l'evento sismico ed i corrispondenti valori ritenuti ammissibili. Negli approcci dinamici, che si distinguono in metodi semplificati ed avanzati, il raggiungimento di una condizione di equilibrio limite non corrisponde necessariamente al collasso dell'opera; piuttosto, è il superamento di uno spostamento o di una deformazione limite la condizione critica corrispondente al collasso o alla perdita di funzionalità a seconda dello stato limite considerato (AGI, 2005). Una stima semplificata degli spostamenti permanenti indotti da un evento sismico può anche essere ottenuta mediante l'uso di correlazioni empiriche derivate dalla applicazione diretta del metodo di Newmark (1965) classico o modificato, utilizzando numerose registrazioni accelerometriche da terremoti reali e raffinate analisi statistiche per il calcolo dello spostamento permanente.

La procedura di analisi, presentata in questo articolo, consente di effettuare una valutazione speditiva della risposta sismica delle dighe in terra, durante le fasi immediatamente successive ad un terremoto. In quest'ottica, i metodi pseudo-statici e dinamici semplificati consentono di analizzare la risposta sismica dello sbarramento in tempo reale o quasi-reale; analisi più complesse richiederebbero tempi di calcolo maggiori

ed una notevole quantità di informazioni e dati. D'altra parte, il livello di accuratezza delle analisi in tempo quasi-reale è adeguato agli scopi: nelle ore immediatamente successive al terremoto, è utile, infatti, capire se il terremoto può aver indotto danni importanti ad una diga mediante una risposta rapida e di tipo binario (esiste un potenziale problema oppure no).

La procedura messa a punto prevede che la verifica sismica delle opere sia effettuata sia in termini di fattore di sicurezza globale, sia in termini di spostamento permanente, valutati, rispettivamente, attraverso analisi pseudo-statiche (paragrafo 2.1) e metodi dinamici semplificati, basati sull'impiego di opportune correlazioni empiriche (paragrafo 2.2). La procedura di analisi che è stata messa a punto ha richiesto uno studio preliminare della risposta sismica degli sbarramenti al fine di ottenere i parametri necessari alla verifica sismica in fase di emergenza, quali, ad esempio, l'andamento del fattore di sicurezza pseudo-statico F_S rispetto al valore dell'accelerazione di picco (componente orizzontale) su sito rigido a_g per ciascuna diga esaminata. Si rimanda al paragrafo 2.3 per la descrizione dei dettagli sulle analisi che possono essere condotte in tempo reale o quasi-reale. Il lavoro svolto nella fase preparatoria è riferito a 7 periodi di ritorno, ossia 30, 60, 100, 475, 950, 1950 e 2475 anni. La scelta di questi periodi di ritorno tiene conto delle prescrizioni normative vigenti, in particolare quelle contenute nelle NTC (2008) e nelle "Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)", emanate con il Decreto Ministeriale del 26 giugno 2014 (DM, 2014). I periodi di ritorno di 60, 100, 950 e 1950 anni sono relativi ai 4 stati limite previsti per le opere di sbarramento esistenti, che rientrano nella categoria delle "dighe strategiche". A questi periodi di ritorno sono stati aggiunti i valori estremi previsti dalle NTC (2008) di 30 e 2475 anni oltre al periodo di ritorno *standard* di 475 anni, data la necessità di disporre di un numero di valori della risposta sismica degli sbarramenti sufficiente a costruire le curve F_S - a_g .

2.1 Analisi pseudo-statiche

I metodi pseudo-statici assumono che il terreno obbedisca ad un modello costitutivo rigido-plastico secondo il quale la massa instabile si comporta come un blocco rigido e che la rottura si verifichi simultaneamente in tutti i punti della superficie di scorrimento lungo la quale la mobilitazione della resistenza è costante. La stabilità dello sbarramento è valutata confrontando la risultante delle forze attive e quella delle forze resistenti mobilitate lungo la potenziale superficie di scorrimento. Il rapporto tra queste forze definisce il fattore

globale di sicurezza pseudo-statico F_s , parametro indicativo delle condizioni di stabilità dell'opera. Un valore F_s unitario indica una condizione di equilibrio limite o collasso incipiente (perlomeno istantaneo), mentre un valore di F_s superiore all'unità individua uno stato di equilibrio caratterizzato da un certo margine di sicurezza.

Per l'esecuzione delle analisi pseudo-statiche, viene costruito un modello bidimensionale caratteristico della sezione trasversale di ciascuna diga in esame con il programma SLOPE/W (2007), includendo i materiali che costituiscono le diverse parti dello sbarramento nonché l'andamento della superficie piezometrica. La resistenza è espressa in termini di tensioni efficaci mediante il criterio di rottura di Mohr-Coulomb. SLOPE/W è un codice di calcolo dedicato all'analisi di stabilità di pendii (naturali o artificiali) attraverso i metodi dell'equilibrio limite applicato alle sezioni piane. In generale, il software, una volta definite tipologia e geometria delle opere, nonché le proprietà del terreno, effettua il calcolo delle azioni stabilizzanti ed instabilizzanti coinvolte e dei relativi coefficienti di sicurezza sia in condizioni statiche, che sismiche (metodo pseudo-statico). Nei metodi pseudo-statici, le azioni sismiche sono rappresentate da forze statiche equivalenti proporzionali al peso della potenziale massa instabile e applicate nel baricentro di quest'ultima. Queste forze sono costanti nel tempo in modulo, direzione e verso e sono di norma assunte proporzionali all'accelerazione massima del terremoto di progetto secondo dei coefficienti inferiori all'unità. Nel presente lavoro, le forze pseudo-statiche sono calcolate in accordo alle prescrizioni delle NTC (2008), utilizzando le seguenti espressioni:

$$F_h = k_h \cdot W \quad (1)$$

$$F_v = k_v \cdot W \quad (2)$$

nelle quali W rappresenta il peso della massa instabile mentre k_h e k_v sono i coefficienti sismici, che vengono definiti come una frazione dell'accelerazione orizzontale di picco al suolo attesa a_{max} , normalizzata rispetto all'accelerazione di gravità g ; in particolare:

$$k_h = \beta_s \cdot a_{max} / g \quad (3)$$

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h \quad (4)$$

Il coefficiente riduttivo β_s è funzione dell'accelerazione di picco al suolo su sito rigido a_g e della categoria di sottosuolo, come indicato in Tabella 1. L'accelerazione di picco al suolo a_{max} può essere valutata mediante uno studio di risposta sismica locale oppure, per suoli stabili, stimata con la procedura semplificata proposta nelle NTC (2008). La forza d'inerzia verticale influisce in modo bivalente sulle condizioni di equilibrio, a seconda del verso in cui agisce. Quando agisce secondo la gravità (orientamento verso il basso), essa aumenta la resistenza allo scorrimento, incrementando lo sforzo normale lungo la superficie di rottura e viceversa. Pertanto la forza d'inerzia verticale va considerata agente una volta verso l'alto e una volta verso il basso, ripetendo le verifiche nelle due condizioni.

Il metodo pseudo-statico, come tutti i metodi basati sull'equilibrio limite globale, consente di determinare un indice di stabilità, ma non fornisce alcuna informazione circa gli spostamenti permanenti indotti dal sisma. Da questo punto di vista esso appartiene ai "metodi basati sulle forze" e si contrappone ai "metodi basati sugli spostamenti", i soli che consentono un approccio davvero prestazionale alla progettazione (non solo sismica).

2.2 Metodi dinamici approssimati

La risposta sismica di una diga in terra può anche essere valutata in termini di spostamento residuo al termine del terremoto. Il primo metodo per la stima di questo parametro, spesso utilizzato nella pratica ingegneristica ancora oggi, fu messo a punto, proprio con riferimento alle dighe in terra, da Newmark (1965), il quale assimilò la massa potenzialmente instabile ad un blocco rigido che scivola lungo un piano ruvido inclinato. Se le forze di inerzia indotte dal sisma, sommate alle forze statiche, superano la resistenza disponibile lungo la superficie di rottura, la massa potenzialmente instabile non si trova più in condizioni di equilibrio e il blocco subisce uno spostamento lungo un piano avente inclinazione sull'orizzontale pari a quella media della super-

Tabella 1 - Coefficienti di riduzione dell'accelerazione di picco per la valutazione delle forze pseudo-statiche (NTC, 2008)

	Categoria di sottosuolo	
	A β_s	B, C, D, E β_s
$0.2 < a_g(g) \leq 0.4$	0.30	0.28
$0.1 < a_g(g) \leq 0.2$	0.27	0.24
$a_g(g) \leq 0.1$	0.20	0.20

ficie di scivolamento critica (Newmark, 1965). Lo spostamento permanente viene calcolato mediante doppia integrazione dell'accelerogramma di ingresso negli istanti di tempo in cui esso supera un valore "critico" dell'accelerazione funzione dell'inclinazione del piano di scivolamento e del fattore globale di sicurezza ottenuto con il metodo pseudo-statico. L'accelerazione critica è quella corrispondente al raggiungimento delle condizioni incipienti di instabilità del blocco.

Per stime preliminari, si può far riferimento alle numerose espressioni empiriche riportate in letteratura, che consentono una valutazione approssimata degli spostamenti permanenti in funzione dell'accelerazione critica e dei parametri di severità del moto sismico. Tali correlazioni sono state ottenute attraverso l'applicazione del metodo classico di Newmark (1965) o da sue varianti, utilizzando anche dati accelerometriche di terremoti reali ed applicando raffinate analisi statistiche per ottenere regressioni medie o mediane e misure della dispersione dei valori calcolati.

La procedura utilizzata in questo studio prevede l'impiego degli approcci più recenti, tra i quali quelli proposti da Bray e Travararou (2007), Tropeano et al. (2009), Rathje e Antonakos (2011), che tengono conto della deformabilità della massa potenzialmente instabile. Questi metodi sono stati applicati congiuntamente ai metodi più classici, come quello di Newmark (1965), di Ambroseys e Manu (1988) e di Saygili e Rathje (2008), i quali assumono che la massa instabile si comporti come un blocco rigido. L'applicazione di questi metodi richiede la stima dell'accelerazione critica e, in funzione del particolare metodo, diversi parametri rappresentativi della severità dello scuotimento sismico, tra cui, ad esempio, l'accelerazione o la velocità orizzontale di picco al suolo, la durata intervallo D_{5-95} , l'accelerazione spettrale in corrispondenza del periodo fondamentale di vibrazione della diga (T_s).

2.3 Analisi in tempo reale

Sulla base di una analisi preliminare condotta sulle dighe in terra oggetto di studio, utilizzando gli approcci descritti nei paragrafi precedenti, è stato possibile ricavare i dati necessari per effettuare la verifica sismica preliminare ed in tempo reale di questi sbarramenti durante la fase di emergenza. La risposta sismica delle dighe è stata valutata in termini di fattore globale di sicurezza e spostamento permanente, durante le fasi immediatamente successive ad un terremoto, come schematicamente illustrato in Figura 2. Questa valutazione speditiva può essere effettuata utilizzando il sistema di calcolo automatico per le analisi in tempo reale, integrato all'interno della piattaforma webGIS, messa a punto nell'ambito del progetto "Rischio sismico di dighe in terra" finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile e sviluppato da Eucentre (<http://www.eucentre.it/>).

2.3.1 Stima del fattore globale di sicurezza

Per poter effettuare la stima del fattore globale di sicurezza di una diga a seguito di un evento sismico sono state preliminarmente condotte analisi pseudo-statiche per un'intensità dell'azione sismica corrispondente a 7 periodi di ritorno: 30, 60, 100, 475, 950, 1950 e 2475 anni. Lo scopo è stato ricavare l'andamento del fattore globale di sicurezza pseudo-statico F_s funzione dell'accelerazione di picco al suolo su sito rigido a_g per la diga esaminata. Nella fase di emergenza, note le caratteristiche sismologiche principali dell'evento sismico (magnitudo e localizzazione dell'epicentro), il valore di a_g al sito di ubicazione della diga oggetto di indagine viene stimato attraverso una legge predittiva dello scuotimento sismico. Da questo, utilizzando la curva F_s-a_g , ottenuta precedentemente, è possibile ricavare una stima del fattore globale di sicurezza atteso per la diga.

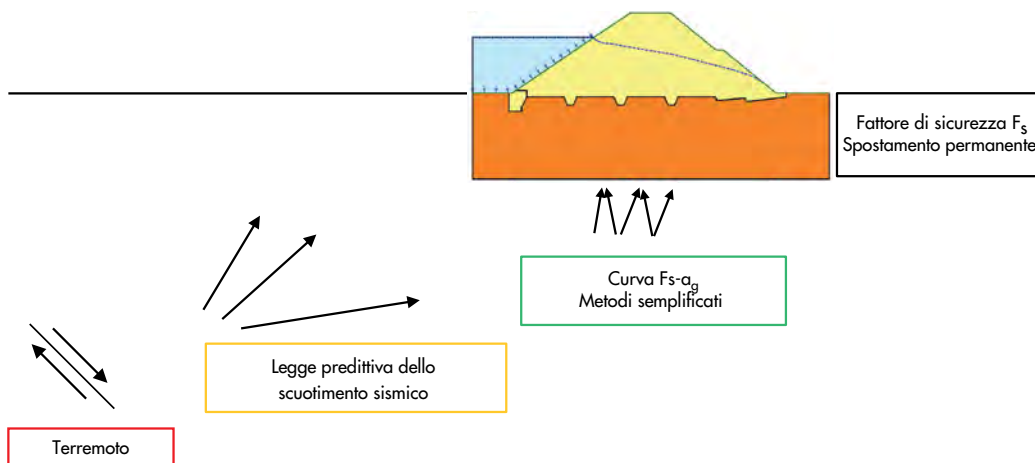


Figura 2
Schema generale della metodologia di calcolo messa a punto per la valutazione preliminare, in tempo reale, della risposta sismica di dighe in terra nelle fasi di emergenza immediatamente successive ad un evento sismico.

2.3.2 Valutazione dello spostamento permanente

Una stima preliminare dello spostamento permanente indotto da un terremoto in una diga in terra può essere effettuata in modo rapido ed automatico nelle fasi immediatamente successive al terremoto applicando le correlazioni empiriche, descritte nel paragrafo 2.2, sviluppate a partire dal metodo di Newmark. A tal fine, per ogni diga, è stato necessario valutare preventivamente l'accelerazione critica. L'applicazione delle suddette correlazioni empiriche richiede la conoscenza di specifici parametri di severità del moto sismico che variano in funzione del metodo utilizzato. Tra essi si cita, ad esempio, l'accelerazione di picco al suolo, calcolata a partire da una legge predittiva dello scuotimento opportunamente selezionata dall'utente.

3. Applicazione alle dighe in terra campane

La Regione Campania conta 11 grandi dighe in terra, 7 in esercizio normale e 4 ad invaso sperimentale, di dimensioni variabili da 6 m di altezza a quasi 50 m, omogenee e zonate, costituite essenzialmente da terra e/o pietrame, alcune con copertura in manto impermeabile.

La raccolta delle informazioni, effettuata sia attraverso una ricerca bibliografica di pubblicazioni scientifiche, rapporti dei concessionari e relazioni dei progettisti, sia attraverso la consultazione del materiale estratto dall'archivio cartaceo gestito dall'Ufficio II Rischi idrogeologici e antropici del Dipartimento della Protezione Civile, si è concentrata sui dati tecnici necessari per effettuare le analisi, quali, ad esempio, la sezione trasversale del corpo diga e la caratterizzazione geotecnica dei materiali. Delle 7 dighe in terra in esercizio ubicate nella Regione Campania, solamente per 3 è stato possibile disporre di dati sufficienti per effettuare le analisi. Si tratta delle dighe di Piano della Rocca (SA), Lago Matese (CE) e Fabbrica (SA). La Figura 3 mostra l'ubicazione geografica di questi sbarramenti le cui caratteristiche principali sono sinteticamente illustrate nel prossimo paragrafo.

3.1 I casi studio

Piano della Rocca

La diga di Piano della Rocca è in terra omogenea con manto di tenuta bituminoso sul paramento di monte. Essa è ubicata in località Piano della Rocca nel Comune di Prignano Cilento (SA). La finalità principale è la regolazione su base annuale

Figura 3
Ubicazione in Campania
delle tre dighe in terra
oggetto di studio.



delle portate del fiume Alento per un uso della risorsa idrica nei comparti di utenza potabile, irriguo, civile non potabile ed idroelettrico. Sia la concessione di derivazione delle acque, che la gestione dell'opera è affidata al Consorzio Velia per la Bonifica del bacino dell'Alento. Lo sbarramento è entrato in esercizio nel 1995, dopo il primo invaso sperimentale.

Come indicato in De Vita e La Barbera (2006), si tratta di una diga a sezione trapezia, in terra omogenea, costituita da depositi alluvionali sabbio-ghiaiosi con fianchi aventi inclinazione pressoché uguali. L'impermeabilizzazione è garantita da un manto di tenuta di conglomerato bituminoso sul paramento di monte. Il paramento di valle è rivestito da uno spessore di circa 30 cm di terreno vegetale. In alveo, la diga poggia direttamente sul materasso alluvionale di natura sabbio-ghiaiosa, mentre sulle sponde insiste sulla formazione rocciosa di base, rappresentata

da alternanze arenaceo-pelitiche, marne argillose fogliettate, marne calcaree e calcari marnosi in strati e banchi. La Figura 4 mostra la sezione trasversale della diga di Piano della Rocca, mentre la Tabella 2 contiene i dati geometrici principali.

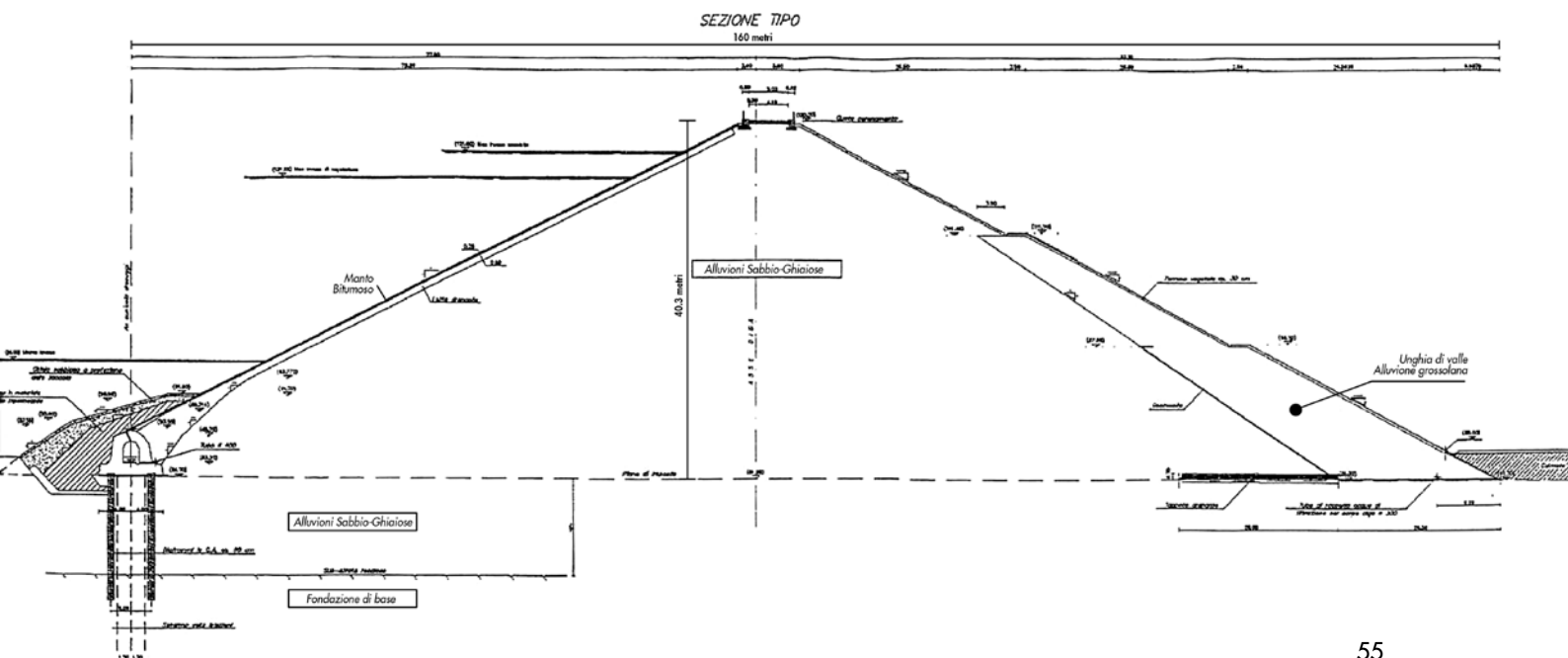
Lago Matese

Si tratta, in realtà, di 6 opere di sbarramento, che sorgono lungo la sponda sud del lago Matese, ubicato su un aspro massiccio montuoso a sinistra del fiume Volturno, a Nord della pianura tra Caiazzo e Piedimonte, in Provincia di Caserta. Le 6 dighe sono state costruite per isolare gli inghiottitoi naturali e le altre zone assorbenti per un tratto di lunghezza complessiva pari a 3600 m. Esse sono: la diga delle Brecce, la più lunga con i suoi 1700 m, la diga di Scennerato, lunga 1000 m, la diga della Bufalara, la diga del Fosso del Caporale, la diga del Riotorto e la diga S.

Tabella 2 - Dati geometrici principali della diga di Piano della Rocca

Caratteristiche geometriche della diga	
Altezza	40.3 m
Franco rispetto al piano di coronamento	
Sul livello di ritenuta normale	6.8 m
Sul livello di massimo invaso	3.7 m
Larghezza del coronamento	8.4 m
Sviluppo del coronamento	612 m
Inclinazione paramento di monte	2/1
Inclinazione paramento di valle	2/1
Volume della diga	1500000 m ³

Figura 4
Sezione trasversale della diga di Piano della Rocca (modificata dalla versione originale estratta dall'archivio cartaceo del Dipartimento della Protezione Civile).



Michele. Come indicato in Selmo (1926), esse fanno parte dell'impianto idroelettrico del Matese, costruito nei primi anni '20 ad opera della Società Meridionale di Elettricità e costituito da due centrali che sfruttano le acque del serbatoio per produrre energia attraverso due salti successivi, per una caduta totale di 840 m.

Gli sbarramenti hanno le medesime sezioni trasversali e caratteristiche tipologiche. Sono costituite da un corpo in terra argillosa ben assestata e compressa; anteriormente presentano un'unghia di guardia in muratura con malta che sprofonda nella fondazione, caratterizzata da terreni limo-argillosi con livelli sabbiosi (ANIDEL, 1952). Il profilo è trapezoidale, con paramento di monte protetto con breccie a scarpa naturale per contrastare il moto ondoso e paramento di valle costituito da terra battuta rivestita con zolle erbose. La Figura 5 mostra la sezione trasversale della diga di Scennerato, mentre la Tabella 3 riporta i dati geometrici principali.

Fabbrica

Si tratta di una diga zonata con nucleo centrale verticale, che sorge nell'omonima località nel Comune di Ceraso, in provincia di Salerno, lun-

go il fiume Alento. L'utilizzo del serbatoio prevede la regolazione annuale, per scopi irrigui, delle portate dei torrenti Mandrone della Fabbrica e Palistro. Come per Piano Della Rocca, il concessionario e gestore dell'opera è il Consorzio Velia per la Bonifica del bacino dell'Alento. Dal dicembre del 1988 la diga è entrata in esercizio. Lo sbarramento consta di un nucleo centrale di ritenuta in limi argillosi, rinfianchi in materiale alluvionale arenaceo (sabbioso-ghiaioso) e unghia di valle in elementi lapidei. Il nucleo si allarga in fondazione, appoggiandosi sulla formazione rocciosa di base, di natura flyschoidale, prevalentemente argillosa ed integra. La tenuta in fondazione è garantita da un taglione, profondo 2 m e largo alla base 12 m. Il rinfianco di monte, ricoperto da un mantello di protezione (scogliera), è costituito da pietrame, mentre quello di valle è protetto da tappeto vegetale; il primo è separato dal nucleo da un filtro ed una zona di transizione di materiale alluvionale sabbioso-ghiaioso, il secondo da un filtro che si estende fino alla muratura d'unghia. La Figura 6 mostra la sezione trasversale della diga di Fabbrica, mentre la Tabella 4 contiene i dati geometrici principali.

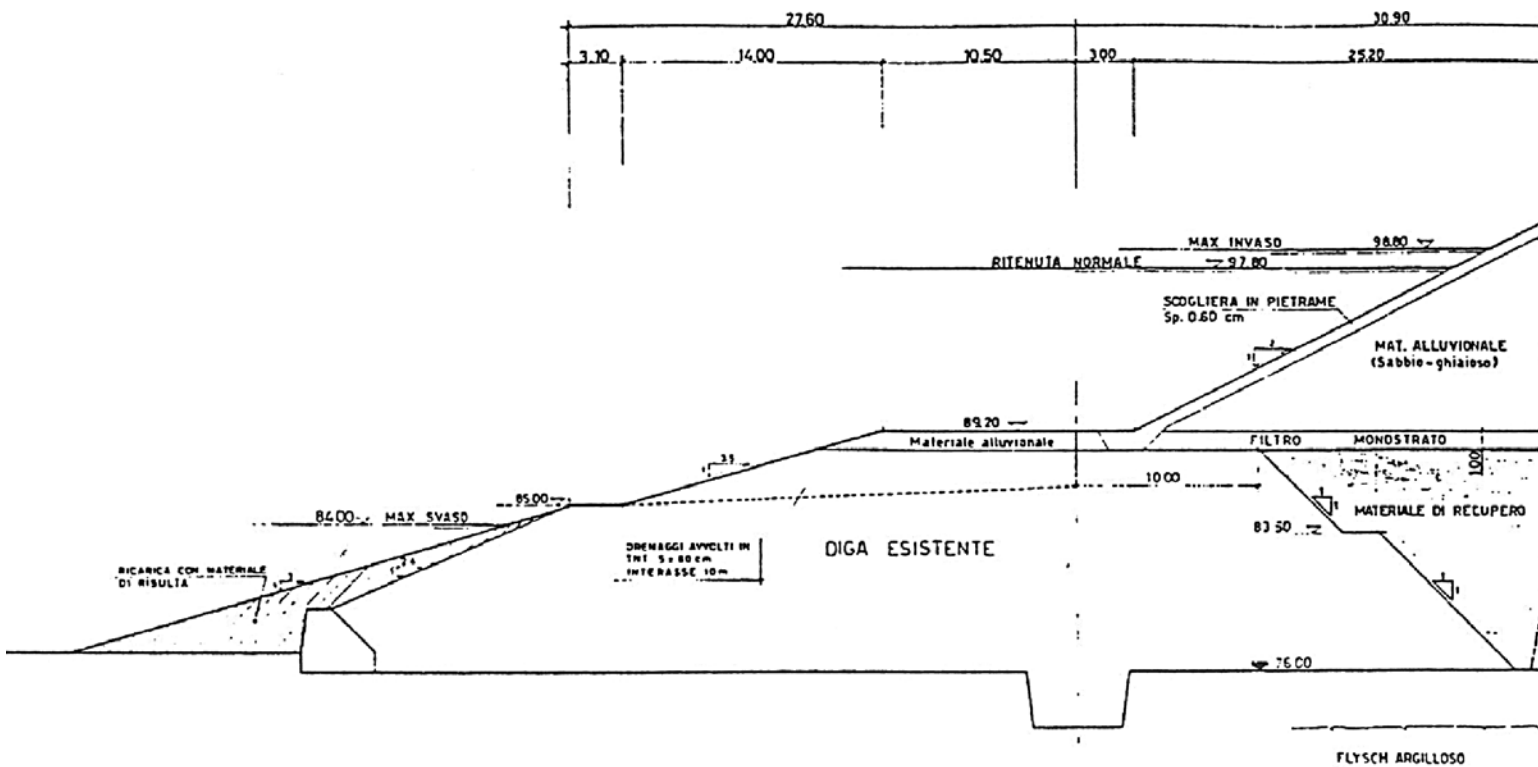


Figura 5
Sezione trasversale tipo delle dighe del Matese (modificata dalla versione originale estratta dall'archivio cartaceo del Dipartimento della Protezione Civile). Gli sbarramenti hanno le medesime sezioni trasversali e caratteristiche tipologiche; si riporta la sezione trasversale della diga di Scennerato.

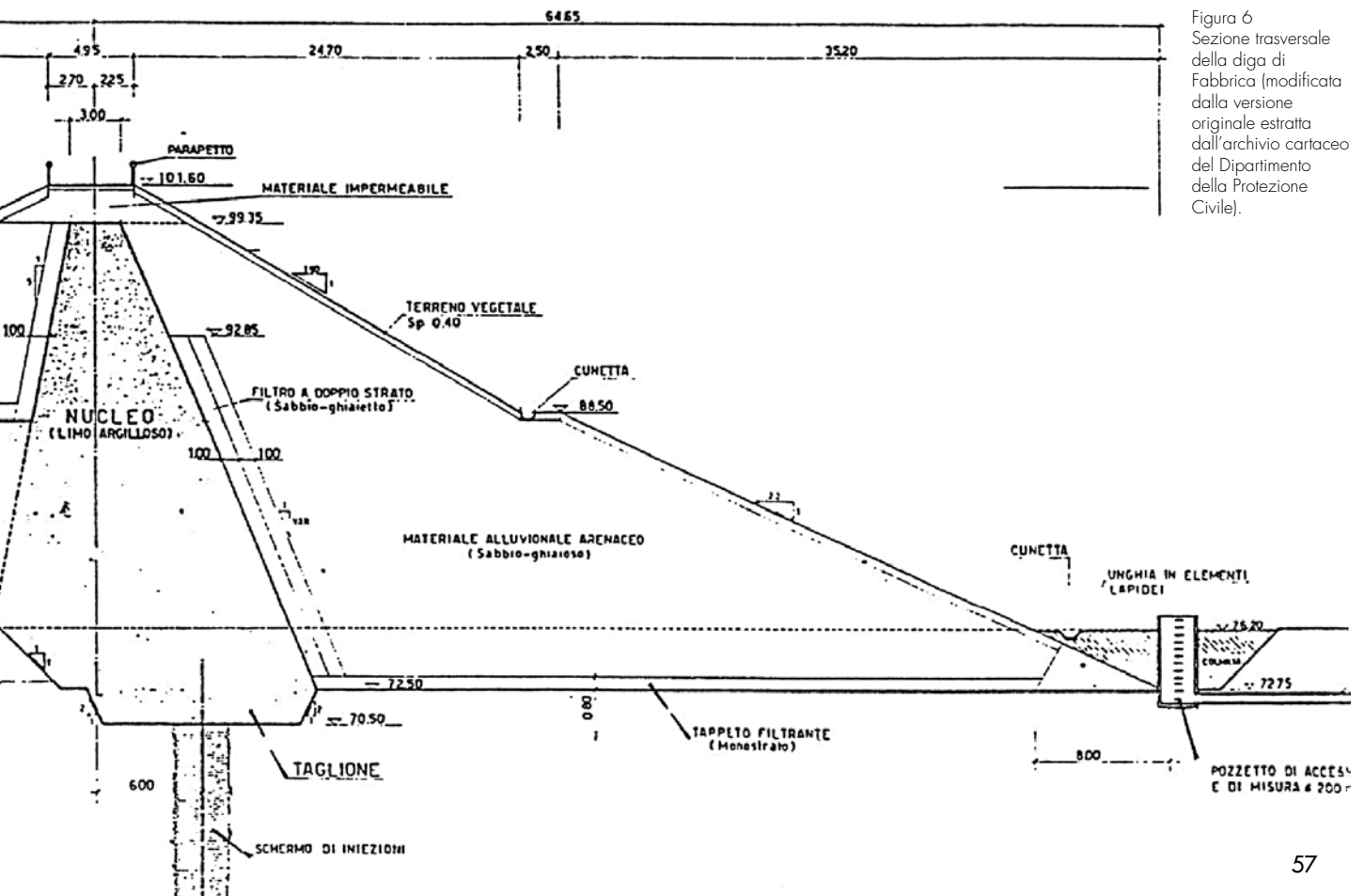
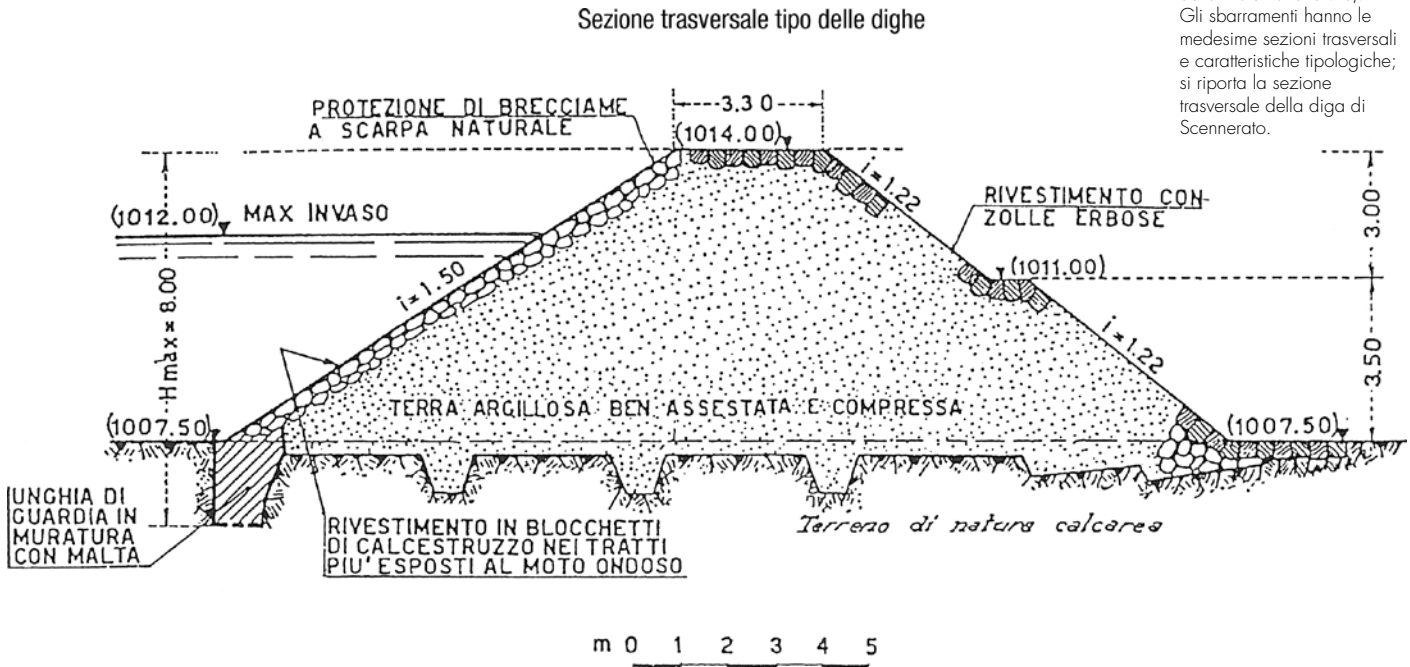


Figura 6
Sezione trasversale della diga di Fabbica (modificata dalla versione originale estratta dall'archivio cartaceo del Dipartimento della Protezione Civile).

Tabella 3 - Dati geometrici principali della diga di Scennerato (Lago Matese)

Caratteristiche geometriche della diga	
Altezza	6.5 m
Franco rispetto al piano di coronamento	
Sul livello di ritenuta normale	2 m
Sul livello di massimo invaso	1.35 m
Larghezza del coronamento	3.30 m
Sviluppo del coronamento	-
Inclinazione paramento di monte	2/3
Inclinazione paramento di valle	4/5
Volume della diga	350000 m ³

Tabella 4 - Dati geometrici principali della diga di Fabbrica

Caratteristiche geometriche della diga	
Altezza	25.4 m
Franco rispetto al piano di coronamento	
Sul livello di ritenuta normale	3.8 m
Sul livello di massimo invaso	2.8 m
Larghezza del coronamento	4.95 m
Sviluppo del coronamento	300 m
Inclinazione paramento di monte	2/1 - 3.5/1 - 3/1 - 2.4/1
Inclinazione paramento di valle	1.9/1 - 2.2/1
Volume della diga	206000 m ³

3.2 Costruzione dei modelli 2D

Sulla base delle informazioni reperite, sono stati costruiti modelli bidimensionali (2D) delle sezioni trasversali di ogni diga con il programma SLOPE/W (2007), includendo i materiali costituenti il corpo diga e l'andamento plano-altimetrico della superficie piezometrica. Quest'ultimo, in assenza di dati specifici, è stato ricavato sulla base delle formule semplificate proposte da Casagrande (1937), a partire dalle informazioni note sulla permeabilità e sul comportamento idraulico dei materiali costituenti nucleo e fianchi. Queste soluzioni approssimate descrivono l'andamento parabolico della linea di saturazione in funzione delle condizioni idrauliche al contorno: a monte, all'intersezione con il paramento, la superficie libera

deve risultare perpendicolare all'equipotenziale mentre a valle, le linee di flusso possono intersecare liberamente il paramento di valle della diga oppure può essere presente un'unghia di valle drenante o un filtro di valle orizzontale. Per quando riguarda i parametri geotecnici dei materiali, i dati mancanti sono stati assunti dalla letteratura tecnica (si veda ad es. Lancellotta, 1987).

A titolo di esempio, si riporta in Figura 7 il modello 2D della sezione trasversale della diga di Piano della Rocca. Ad ogni materiale è stato assegnato un colore diverso, cui corrispondono i valori dei parametri geotecnici riportati nella Tabella 5. Si noti che il modello 2D della sezione della diga di Piano della Rocca non presenta alcuna superficie piezometrica che interessi il cor-

Tabella 5 - Parametri geotecnici dei materiali costituenti la diga di Piano della Rocca: densità, angolo di attrito interno e coesione efficace, assunti, in mancanza di dati specifici, dalla letteratura tecnica

Piano della Rocca	Descrizione	γ (kg/m ³)	ϕ' (°)	c' (kPa)
Corpo diga	Alluvioni sabbio-ghiaiose con manto di conglomerato bituminoso sul paramento di monte	1300-1800	31-35	5-15
Zoccolo di protezione del cunicolo d'ispezione	Argilla con protezione di ghiaia sabbiosa	1300-1800	31-35	5-15
Strato di base	Materiali alluvionali di natura sabbio-ghiaiosa	1700-2000	33-37	0-10
Fondazione di base	Roccia costituita da alternanze arenaceo-pelittiche, marne argillose fogliettate, marne calcaree e calcari marnosi in strati e banchi	2300-2450	40	350

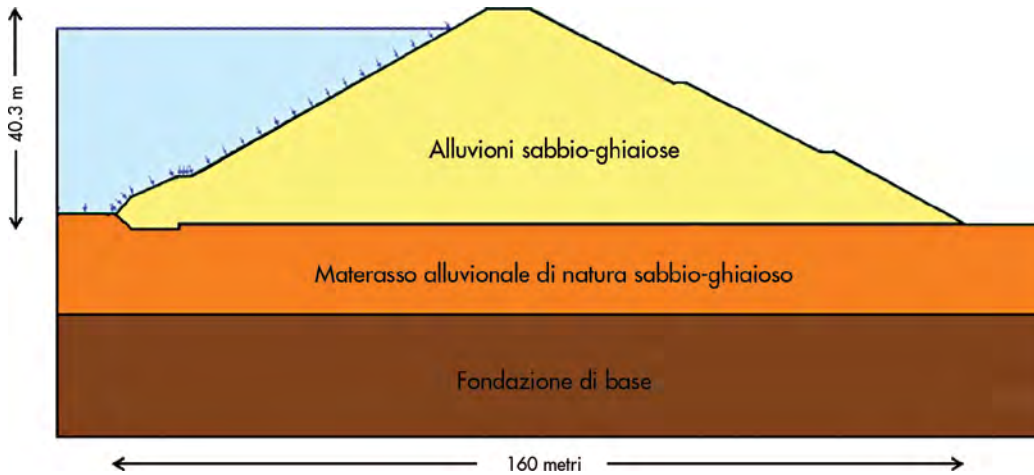


Figura 7
Modello bidimensionale della sezione trasversale della diga di Piano della Rocca.

po diga a causa della presenza di un manto bituminoso impermeabile sul paramento di monte.

3.3 Definizione della pericolosità sismica ai siti delle dighe

La pericolosità sismica può essere definita con metodi deterministici, assumendo uno specifico terremoto di riferimento, o con metodi probabilistici, nei quali le incertezze associate alla severità dei sismi, alla loro localizzazione e al tempo di occorrenza sono esplicitamente considerati. La definizione della pericolosità include l'analisi della pericolosità sismica di base (calcolata sulla roccia affiorante e superficie topografica orizzontale) e l'analisi degli effetti locali (Lai et al., 2009). In Italia, la pericolosità sismica su roccia affiorante è definita sulla base dei risultati di uno studio probabilistico condotto dall'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, <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 4 rami descritti da una espressione analitica, che

dipende da tre parametri: l'accelerazione orizzontale di picco su roccia affiorante a_g ; il fattore di amplificazione massimo dello spettro in accelerazione orizzontale F_0 ; il periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro isoprobabile in accelerazione T_c^* .

Informazioni sull'evento sismico che maggiormente contribuisce alla pericolosità sismica di un dato sito sono ben note qualora l'analisi di pericolosità sia stata effettuata con il metodo deterministico. Nel caso, invece, in cui sia stato utilizzato il metodo probabilistico, è necessario disaggregare la pericolosità sismica. Questa operazione consente di separare i contributi alla pericolosità calcolata delle diverse coppie magnitudo-distanza, identificando per una prefissata probabilità di eccedenza del parametro di moto selezionato, la coppia magnitudo-distanza che fornisce il contributo più significativo alla pericolosità del sito di interesse (Lai et al., 2009).

Ai siti delle tre dighe oggetto di studio, la pericolosità sismica è stata definita in accordo alle prescrizioni contenute nelle NTC (2008) per i 7 periodi di ritorno considerati (si veda sezione 2). La Tabella 6 riporta i valori dei parametri a_g , F_0 e T_c^* relativi ai siti delle dighe in terra selezionate, per il periodo di ritorno di 475 anni. In tabella sono, inoltre, riportate le coppie magnitudo-distanza, che dominano lo scenario di pericolosità, ricavate dallo studio di disaggregazione

Tabella 6 - Parametri per la definizione della pericolosità sismica di base (NTC, 2008) e dati dallo studio di disaggregazione di Spallarosa e Barani (2007), relativi al periodo di ritorno di 475 anni, per le dighe oggetto di studio: Piano della Rocca, Lago Matese e Fabbrica

$T_R=475$ anni	Pericolosità sismica di base			Parametri di disaggregazione per a_g	
	a_g (g)	F_0 (-)	T_c^* (s)	M_w (-)	D (km)
Piano della Rocca	0.087	2.649	0.474	6.76	56
Lago Matese	0.264	2.307	0.370	6.08	26.6
Fabbrica	0.087	2.637	0.474	6.57	24.6

condotto da Spallarossa e Barani (2007) per il territorio nazionale.

La pericolosità sismica di base è definita con riferimento a condizioni *standard* di suolo, ovvero substrato roccioso affiorante con superficie topografica orizzontale. È noto che le caratteristiche dello scuotimento del terreno sono fortemente influenzate dalle condizioni geologiche, geomorfologiche e geotecniche locali che modificano, a volte in modo significativo, il moto sismico corrispondente alla pericolosità sismica di base. Gli effetti locali concorrono a modificare ampiezza, frequenza e durata dell'azione sismica di progetto che risulta da uno studio di pericolosità di base. Gli effetti locali comprendono due categorie principali di fenomeni di amplificazione: quelli di natura lito-stratigrafica e gli effetti topografici.

Gli effetti di sito possono essere valutati mediante uno studio della risposta sismica locale *ad hoc* oppure, in suoli stabili, utilizzando l'approccio semplificato consentito dalle NTC (2008), che, attraverso opportuni coefficienti di suolo e topografici, modifica la forma e le ampiezze delle ordinate dello spettro elastico. Nell'approccio semplificato, l'accelerazione di picco al suolo a_{max} è data dal prodotto dell'accelerazione di picco su sito rigido (a_g) per il coefficiente di amplificazione S , che include un coefficiente stratigrafico S_s ed uno topografico S_T . Il coefficiente stratigrafico S_s è dipendente dalla categoria di sottosuolo del sito, mentre il coefficiente topografico S_T è funzione della geomorfologia del sito definita attraverso opportune categorie topografiche (NTC, 2008; Circ. NTC, 2009).

Per le tre dighe in esame, in mancanza di dati specifici, è stato assunto per il coefficiente strati-

grafico S_s il valore associato alla categoria di sottosuolo più cautelativa per questo tipo di opere, ossia la C (NTC, 2008). Il coefficiente topografico S_T è stato invece definito in accordo a categorie topografiche definite sulla base delle configurazioni geometriche di ciascuno sbarramento.

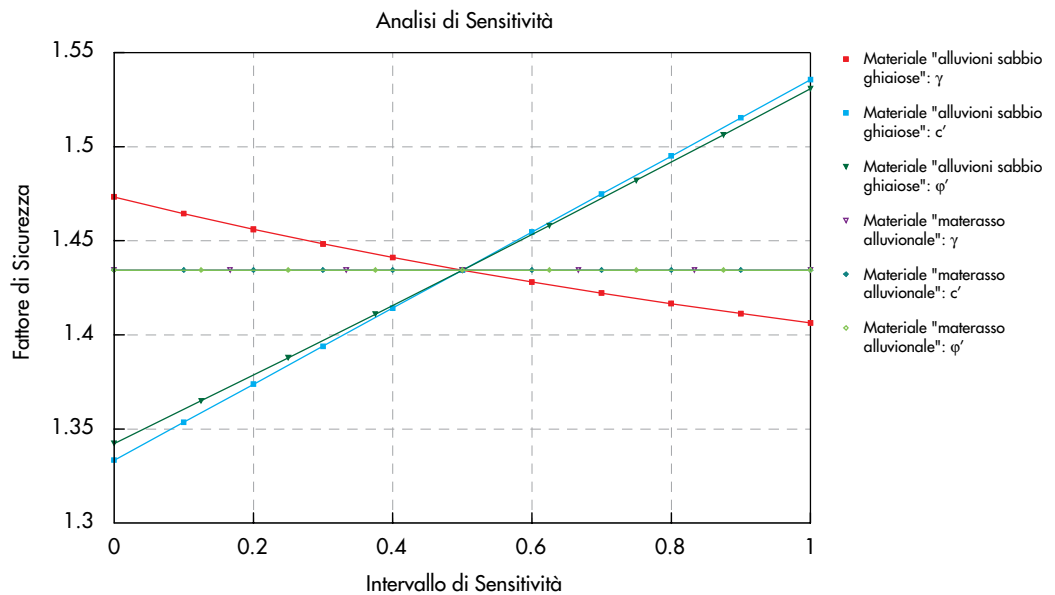
3.4 Verifica sismica delle dighe

La risposta sismica delle dighe in terra selezionate è stata valutata mediante analisi pseudo-statiche per la valutazione del fattore globale di sicurezza (paragrafo 2.1) ed utilizzando le più accreditate correlazioni empiriche di letteratura per la stima dello spostamento permanente atteso (paragrafo 2.2). Per tener conto dell'incertezza associata alla definizione dei parametri geotecnici necessari alla definizione delle forze resistenti attraverso il criterio di rottura di Mohr-Coulomb, per ogni diga sono stati assunti due scenari con riferimento ai quali sono state effettuate le analisi pseudo-statiche: il primo utilizzando i valori medi dei parametri geotecnici, il secondo impiegando i valori più sfavorevoli. Le analisi sono state condotte con riferimento ai parametri, e alle loro combinazioni, che maggiormente influenzano il valore ottenuto per il fattore globale di sicurezza. Per individuare le suddette combinazioni di parametri, sono state eseguite analisi di sensitività sfruttando le potenzialità del codice di calcolo SLOPE/W (2007). I risultati sono riportati nel seguito.

Piano della Rocca

La Figura 8 mostra i risultati delle analisi di sensitività condotte per la diga di Piano della Rocca. Come si poteva facilmente anticipare, i parametri che maggiormente influenzano i risultati sono

Figura 8
Rappresentazione degli esiti delle analisi di sensitività condotte per la diga di Piano della Rocca utilizzando SLOPE/W (2007): per ciascun parametro geotecnico dei materiali della diga, è stata ottenuta una retta, la cui inclinazione indica l'influenza di tale parametro sul valore del fattore globale di sicurezza pseudo-statico F_S (in ordinata). In questo caso, i parametri che maggiormente influenzano F_S sono l'angolo di attrito interno ϕ' e la coesione efficace c' del materiale costituente il corpo diga.



l'angolo di attrito interno (ϕ o di resistenza al taglio) ϕ' e la coesione efficace c' del materiale costituente il corpo diga. Per lo scenario cautelativo si è quindi scelto di considerare i valori più sfavorevoli dei suddetti parametri. Per lo scenario atteso si è invece fatto riferimento ai valori medi dei parametri geotecnici negli intervalli di variazione definiti in Tabella 5.

Per i due gruppi di parametri geotecnici in ingresso, è stata calcolata l'accelerazione critica (a_{cr}) pari rispettivamente a 0.257 g nel caso dello scenario atteso e 0.175 g per lo scenario cautelativo. La Figura 9 mostra la superficie di scivolamento critica lungo il paramento di valle della diga di Piano della Rocca associata ad a_{cr} pari a 0.175 g.

Per ciascun periodo di ritorno considerato e per i due scenari di parametri assunti, sono stati calcolati i valori del fattore globale di sicurezza pseudo-statico con il programma SLOPE/W (2007) applicando il metodo di Spencer (1967). Essi sono riportati nella Tabella 7.

Gli spostamenti permanenti sono stati calcolati mediante le correlazioni empiriche descritte nel paragrafo 2.2. La Figura 10 mostra i risultati in forma grafica attraverso il fattore globale di sicurezza (F_s) e degli spostamenti permanenti ottenuti considerando lo scenario più sfavorevole dei

parametri geotecnici. Nei grafici sono riportati i valori medi degli spostamenti e, dove previsto dal metodo, una stima dell'incertezza.

La valutazione dell'ammissibilità degli spostamenti permanenti calcolati può essere effettuata confrontando i valori ottenuti con uno spostamento limite prescritto da normative specifiche. Le norme svizzere (BWG, 2003), tra le più avanzate a livello internazionale, indicano che lo spostamento indotto da carico sismico è ammissibile se inferiore a 50 cm nel caso in cui il blocco di scivolamento sia *profondo* oppure a 20 cm nel caso in cui esso sia *superficiale*. Per "*superficiale*", si intende che la profondità del blocco misurata nella direzione perpendicolare alla superficie del paramento sia inferiore al 10-20% dell'altezza della diga. Nel caso della diga di Piano della Rocca, come per le altre due in esame, la superficie di scivolamento critica è di tipo profondo, quindi lo spostamento limite è di 50 cm. Dai grafici della Figura 10, si evince come gli spostamenti siano abbondantemente al di sotto di tale limite.

Lago Matese

Le analisi di sensitività condotte per la diga di

Tabella 7 - Valori del fattore globale di sicurezza pseudo-statico per la diga di Piano della Rocca, calcolati per i 7 periodi di ritorno in esame, considerando i due scenari di parametri geotecnici in ingresso. F_{sa} e F_{sc} denotano il fattore globale di sicurezza ottenuto con riferimento, rispettivamente, allo scenario atteso ed a quello cautelativo

T_R (anni)	F_{sa} (-)	F_{sc} (-)
30	1.64	1.42
60	1.63	1.40
101	1.62	1.39
475	1.58	1.35
949	1.51	1.30
1950	1.49	1.28
2475	1.48	1.27

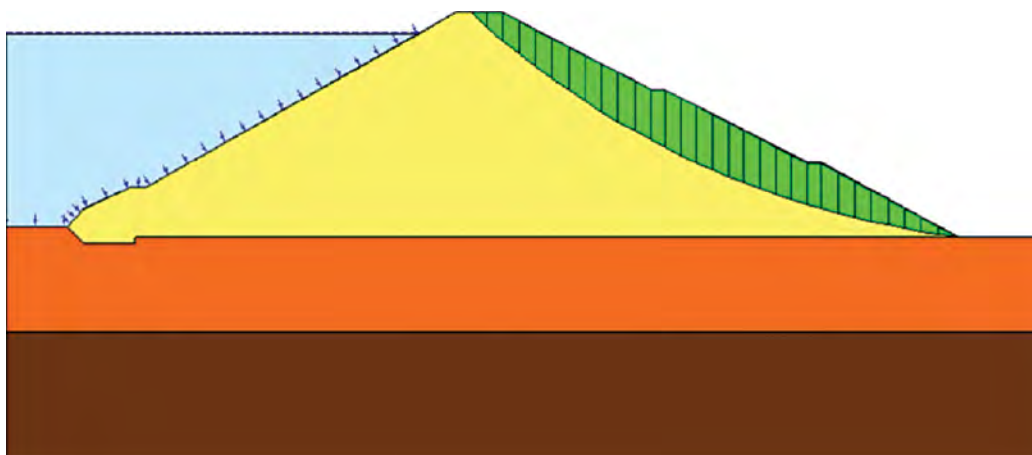


Figura 9
Superficie di scivolamento critica lungo il paramento di valle della diga di Piano della Rocca ottenuta considerando lo scenario più sfavorevole dei parametri geotecnici in ingresso.

Figura 10
Valori del fattore globale di sicurezza pseudo-statico e degli spostamenti permanenti calcolati per la diga di Piano della Rocca per i 7 periodi di ritorno adottando lo scenario più sfavorevole dei parametri geotecnici in ingresso.

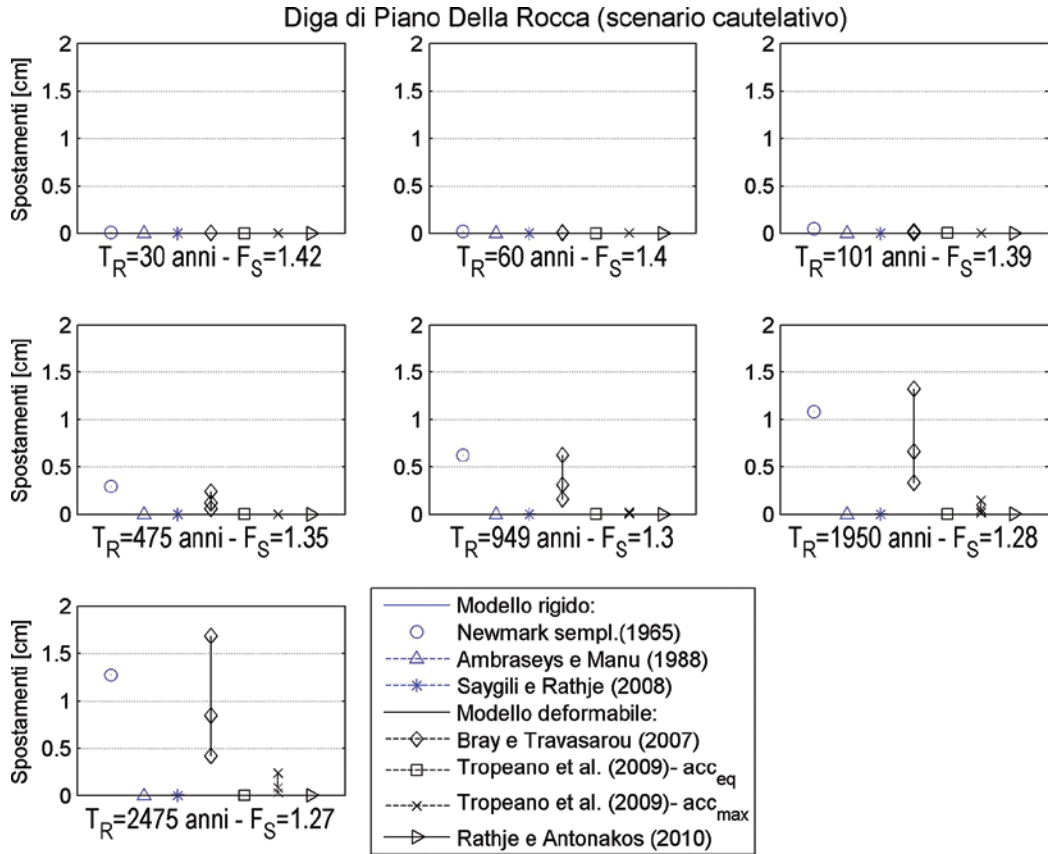
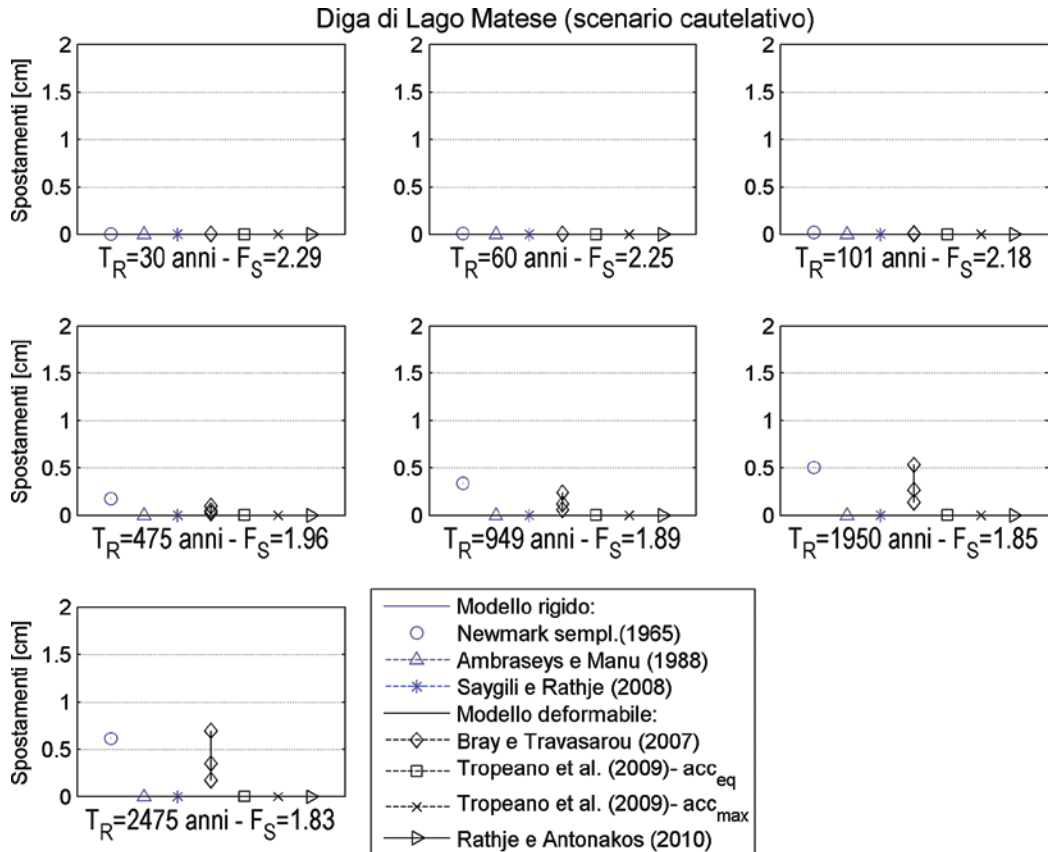


Figura 11
Valori del fattore globale di sicurezza pseudo-statico e degli spostamenti permanenti calcolati per una sezione rappresentativa delle dighe in terra del Lago Matese (relativa alla diga di Scennerato), per i 7 periodi di ritorno adottando lo scenario più sfavorevole dei parametri geotecnici in ingresso.



Lago Matese (diga di Scennerato) hanno mostrato come, in questo caso, il peso specifico e la coesione efficace del corpo diga risultino essere i parametri che maggiormente influenzano i risultati. Nelle analisi sono stati, pertanto, considerati i due seguenti scenari: uno che prevede l'impiego dei valori medi dei parametri geotecnici negli intervalli di variazione assunti per tali parametri; l'altro, più cautelativo, fa riferimento al valore massimo di γ e minimo di c' . Per ogni periodo di ritorno e per i due scenari di parametri, sono stati calcolati i valori del fattore globale di sicurezza pseudo-statico con il programma SLOPE/W (2007) applicando il metodo di Spencer (1967). Gli spostamenti permanenti sono stati calcolati mediante le correlazioni empiriche descritte nel paragrafo 2.2. La Figura 11 mostra i risultati ottenuti per lo scenario cautelativo.

Fabbrica

Il procedimento illustrato con riferimento alle dighe di Piano della Rocca e Lago Matese (diga di Scennerato) è stato applicato anche allo sbarramento di Fabbrica. Dalle analisi di sensibilità condotte, è emerso che i parametri che maggiormente influenzano i risultati sono φ' e c' dei rinfianchi. Si ricorda a questo proposito che Fabbrica è una diga zonata (l'unica tra quelle esaminate). Analogamente a quanto svolto in

precedenza, per ogni periodo di ritorno e per i due scenari di parametri geotecnici, sono stati calcolati il fattore globale di sicurezza pseudo-statico e lo spostamento permanente. La Figura 12 mostra i risultati ottenuti per lo scenario di parametri cautelativo.

3.5 Esempio di applicazione "in tempo reale"

Questo paragrafo illustra un esempio di applicazione dello strumento di analisi messo a punto per effettuare, nelle fasi immediatamente successive ad un terremoto, una stima speditiva, in tempo reale, della risposta sismica di dighe in terra. A partire dai risultati delle analisi condotte sulle dighe campane selezionate, descritti nel paragrafo precedente, è stato possibile ottenere, per interpolazione, i risultati della verifica sismica per il terremoto di scenario.

La Figura 13 mostra una immagine catturata dalla piattaforma webGIS, sviluppata da Eucentre nell'ambito del progetto "Rischio sismico di dighe in terra" finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile, che consente la visualizzazione ed elaborazione dei dati relativi alle dighe presenti sul territorio nazionale, sia in condizioni di esercizio, che durante le fasi di emergenza che seguono il verificarsi di un terremoto. Ad essere individuata in Figura 13 è la diga Fabbrica che sarà oggetto dell'esempio di applicazione di

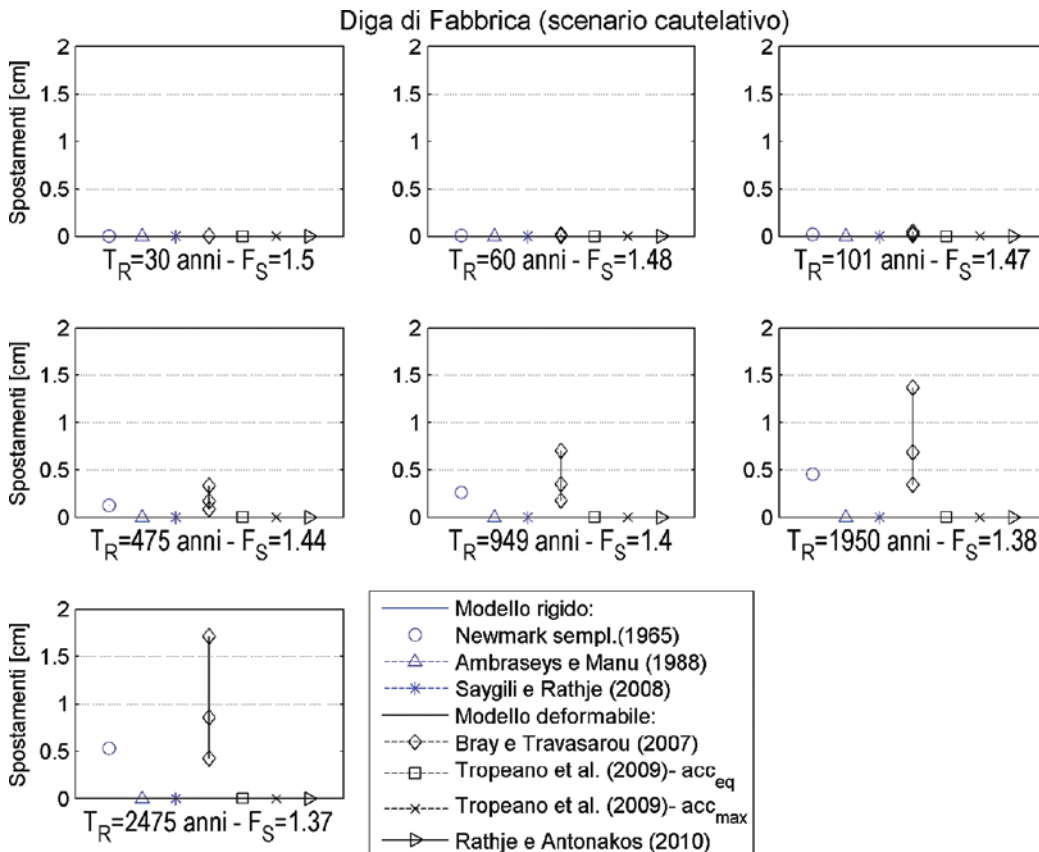


Figura 12
Valori del fattore globale di sicurezza pseudo-statico e degli spostamenti permanenti calcolati per la diga di Fabbrica, per i 7 periodi di ritorno adottando lo scenario più sfavorevole dei parametri geotecnici in ingresso.



Figura 13 Estratto dalla piattaforma webGIS con indicata l'ubicazione della diga di Fabbrica, nella Regione Campania.

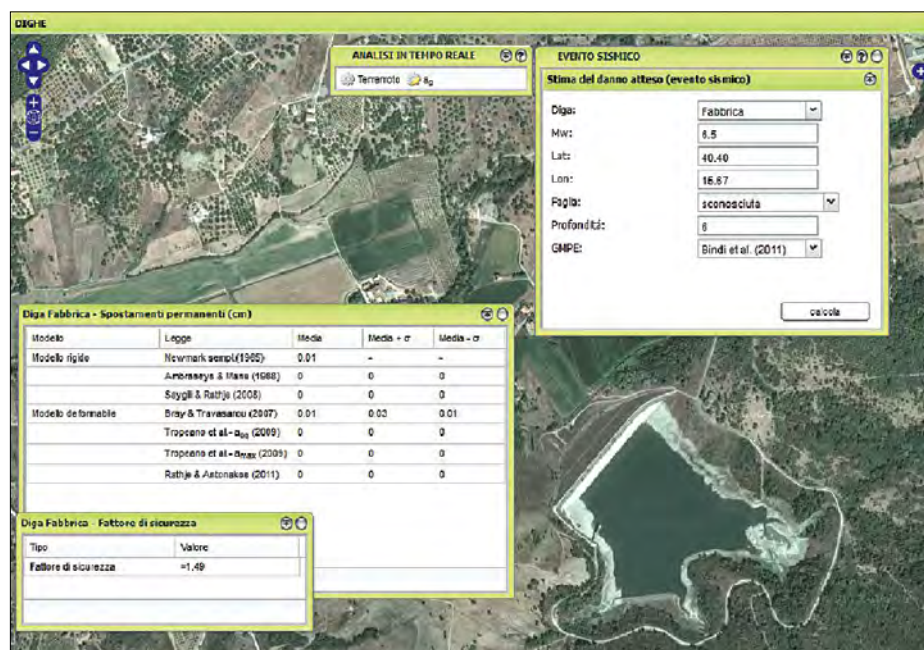
seguito presentato. Si è scelto come evento di scenario un terremoto verificatosi nei pressi della diga di Fabbrica. Le principali caratteristiche sismologiche sono riportate in Tabella 5. Esse sono compatibili con il contesto sismo-tettonico regionale (DISS - Database of Individual Seismogenic Sources, ver. 3.1.1; <http://diss.rm.ingv.it/diss/>). All'interno del webGIS (Figura 14), l'utente ha la possibilità di inserire le caratteristiche sismologiche dell'evento sismico, come magnitudo

e localizzazione dell'epicentro (se noti anche profondità focale e meccanismo di sorgente), e di scegliere una tra una serie di leggi predittive dello scuotimento sismico tra le più accreditate. Il sistema fornisce, in tempo reale, i risultati delle analisi pseudo-statiche e dinamiche semplificate in termini, rispettivamente, di fattore globale di sicurezza e di spostamento permanente atteso. Questi parametri sono calcolati per interpolazione a partire dai risultati delle analisi eseguite precedentemente ed illustrate nel paragrafo 3.4.

Tabella 8 - Caratteristiche sismologiche principali del terremoto di scenario simulato nei pressi della diga di Fabbrica

M_w	Latitudine	Longitudine	Faglia	Profondità (km)
6.5	40.40	15.67	Non nota	6

Figura 14 Applicazione dello strumento di analisi, integrato nella piattaforma webGIS sviluppata da Eucentre per il Dipartimento della Protezione Civile, per effettuare, nelle fasi immediatamente successive ad un terremoto, una stima speditiva della risposta sismica di dighe in terra. In questo caso, la risposta sismica della diga di Fabbrica in seguito ad un terremoto di magnitudo 6.5, con epicentro localizzato ad una distanza di circa 46 km dal manufatto, è stata valutata "in tempo reale".



Nel caso della diga di Fabbrica, il fattore globale di sicurezza ottenuto dalla simulazione è risultato pari a 1.49. Gli spostamenti attesi, rappresentati in formato tabulare nell'estratto di Figura 14, sono risultati trascurabili per tutti i metodi considerati. Nei calcoli di interpolazione, si è fatto riferimento allo scenario più cautelativo e cioè corrispondente ai valori più sfavorevoli dei parametri geotecnici in ingresso. L'esempio mostrato ha validità generale. Esso potrebbe essere ripetuto scegliendo un diverso terremoto di scenario oppure un diverso sbarramento. Inoltre la metodologia potrebbe essere applicata anche a dighe diverse da quelle selezionate.

4. Conclusioni

Il presente lavoro ha illustrato la messa a punto di una metodologia finalizzata a svolgere valutazioni "in tempo reale" della risposta sismica di dighe in terra mediante l'approccio pseudo-statico ed i metodi dinamici semplificati per la stima dello spostamento permanente. Il metodo è stato applicato a tre dighe in terra della Regione Campania attualmente in esercizio. Lo strumento di analisi è stato integrato nella piattaforma web-GIS sviluppata da Eucentre per il Dipartimento della Protezione Civile allo scopo di consentire una stima speditiva della risposta sismica di dighe in terra nelle fasi immediatamente successive al verificarsi di un terremoto.

L'idea di base del metodo si fonda sulla esecuzione *offline* per le dighe oggetto di studio di un certo numero di analisi parametriche di tipo pseudo-statico e dinamico semplificato per valori crescenti di severità dell'azione sismica. I risultati di queste analisi sono registrati e successivamente utilizzati per valutare la risposta sismica delle dighe di interesse ad un ipotetico terremoto di scenario attraverso una interpolazione numerica. Dalle analisi condotte sulle tre dighe in terra campane per i 7 periodi di ritorno selezionati (e cioè 30, 60, 101, 475, 949, 1950 e 2475 anni), si ottengono fattori globali di sicurezza sempre superiori a 1.2 e valori dello spostamento atteso di scarsa entità (non oltre qualche centimetro). Questi risultati sono stati ottenuti assumendo i valori più sfavorevoli dei parametri geotecnici che maggiormente influenzano la risposta degli sbarramenti, questi ultimi individuati mediante analisi di sensitività. Tali esiti sono confortanti e trovano giustificazione sia nella moderata severità della azione sismica attesa ai siti di ubicazione delle dighe, sia in una buona progettazione delle stesse. Per la stima degli spostamenti permanenti, il metodo che fornisce i valori più cautelativi è quello di Bray e Travarou (2007). Esso si basa sull'utilizzo di un modello alla Newmark avanzato che prende in considerazione la deformabilità

del blocco che scivola attraverso l'introduzione dell'accelerazione spettrale al periodo fondamentale del materiale degradato, calcolato a partire dal periodo fondamentale della massa instabile. Come indicato dagli autori dell'articolo, questo valore di accelerazione spettrale risulta essere la misura di intensità più adatta a rappresentare la severità dell'input sismico, in quanto minimizza la dispersione della correlazione empirica proposta e rende tale correlazione indipendente da altre misure di intensità. Gli spostamenti, infatti, sembrano ben correlati a tale parametro ed esso riesce a catturarne l'andamento anche al variare della magnitudo, dell'accelerazione critica, etc.

I risultati ottenuti sono fortemente influenzati dai valori dei parametri geotecnici utilizzati nelle analisi. Tra i più influenti, vi sono l'angolo di resistenza al taglio e la coesione efficace dei materiali interessati dalla superficie di scorrimento. Essi oltre a caratterizzare la resistenza al taglio dei terreni, influenzano il valore dell'accelerazione critica e, quindi, gli spostamenti permanenti attesi. Nonostante i limiti intrinseci dei metodi di analisi utilizzati che forniscono risultati validi solo in prima approssimazione, essi sono un utile strumento per una stima rapida della risposta sismica di una diga in terra. Infatti, la procedura di analisi sviluppata, permette di effettuare valutazioni speditive ed in tempo reale della sicurezza sismica delle dighe in terra, nelle fasi immediatamente successive al verificarsi di un evento sismico. Sulla base dei risultati ottenuti, si può decidere successivamente di effettuare ulteriori analisi con metodi più avanzati, le quali richiedono necessariamente una approfondita caratterizzazione geotecnico-sismica dei materiali costituenti la diga.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il Dipartimento della Protezione Civile (DPC) che ha finanziato nell'ambito del PE 2014-2016 il progetto "Rischio sismico di dighe in terra", di cui Eucentre è l'ente esecutore. Si esprime un particolare apprezzamento al Prof. Mauro Dolce e all'Ing. Giovanni Paoli per l'assistenza ed i preziosi consigli forniti durante lo svolgimento del progetto.

Gli autori sono anche grati alla Dott.ssa Daniela Di Bucci ed all'Ing. Paola Bertuccioli del DPC per la disponibilità ed il supporto fornito nella raccolta dei dati relativi alle dighe in terra campane.

Si desiderano, infine, ringraziare l'Ing. Laura Scandella per il supporto durante le fasi iniziali del lavoro e l'Ing. Mario Martinelli per l'aiuto fornito nell'assunzione dei parametri geotecnici relativi ai materiali costituenti le dighe in terra oggetto di studio.

Bibliografia

- AGI, Associazione Geotecnica Italiana (2005) - Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica - Linee guida. Pàtron. Bologna.
- Ambraseys N.N., Menu J.M. (1988) - Earthquake-induced ground displacements. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, 985-1006.
- ANIDEL (1952) - Le dighe di ritenuta degli impianti idroelettrici italiani - Diga del Lago Matese, vol. 5.
- 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(6), 1899-1920.
- Bray J.D., Travasarou T. (2007) - Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(4), 381-392.
- BWG (2003) - Richtlinie für den Nachweis der Erdbebensicherheit von Stauanlagen, (in german), Version 1.2, Bundesamt für Energie (vormals Bundesamt für Wasser und geologie).
- Circ. NTC (2009) - Circolare del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti n. 61 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. 4, 26 febbraio 2009.
- De Vita P., La Barbera G. (2006) - Studi per il progetto di gestione dell'invaso di Piano della Rocca sul fiume Alento (Campania Meridionale): qualità delle acque e stima dell'interrimento. XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche - IDRA.
- D.M. 26 giugno 2014 (2014) - Decreto Ministeriale del 26 giugno 2014. Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse). G.U., 8 luglio 2014.
- Eucentre-PE d6 (2012) - Rischio sismico di dighe in terra. Rapporto tecnico (non pubblicato). Febbraio, 2012.
- Lai C.G., Foti S., Rota M. (2009) - 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. Prodotto e distribuito dalla Fondazione Eucentre, Via Ferrata 1 - 27100 Pavia. Aprile 2009, pp. 312.
- Lancellotta R. (1987) - Geotecnica. Zanichelli.
- Newmark N.M. (1965) - Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, 15(2), 139-160.
- NTC (2008) - Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 14 gennaio 2008. Norme tecniche per le costruzioni. G.U. n. 29, 4 febbraio 2008.
- Rathje E.M., Antonakos G. (2011) - Recent avances in predicting earthquake-induced sliding displacements of slope. *Fifth International Conference on Recent avances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics and symposium in honor of Professor I.M. Idriss*, May 24-29, 2011. San Diego, California.
- Saygili G., Rathje E.M. (2008) - Empirical predictive models for earthquake-induced sliding displacements of slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(6), 790-803.
- Selmo L. (1926) - Impianto del Matese. *L'Elettrotecnica*, 15 luglio 1926, pag. 470, 5 agosto 1926, pag. 494.
- SLOPE/W (2007) - GEO-SLOPE International; <http://www.geo-slope.com>
- Spallarossa D., Barani. S. (2007) - Disaggregazione della pericolosità sismica in termini di M-R - Progetto DPC- INGV S1. <http://esse1.mi.ingv.it/d14.html>
- Spencer E. (1967) - A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. *Geotechnique*, 17(1), 11-26.
- Tropeano G., Ausilio E., Costanzo A., Silvestri F. (2009) - Valutazione della stabilità sismica di pendii naturali mediante un approccio semplificato agli spostamenti. XIII Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", 28 giugno - 2 luglio 2009. Bologna, Italia.

Gli Autori

Ing. Francesca Bozzoni

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

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

di scenari di danno sismico; caratterizzazione geotecnico-sismica dei siti e sviluppo di modelli del sottosuolo; valutazione sul campo ed analisi degli effetti geotecnici nelle fasi di emergenza post-terremoto.

Ha ricoperto inoltre il ruolo di consulente tecnico-scientifico per enti pubblici e privati quali OUTech - Opole University of Technology e ENEL Green Power.

È relatrice in congressi scientifici nazionali ed internazionali e membro del Gruppo di Lavoro Interistituzionale per la Valutazione degli Aspetti Geotecnico-Sismici nelle fasi Post-Evento (Decreto del Capo Dipartimento 828 del 5 marzo 2012).

Ing. Stefania Chiarolla

Ha conseguito la laurea in Ingegneria Civile e Ambientale, indirizzo Ambiente e Territorio, presso l'Università Degli Studi di Pavia nel 2013. All'interno del gruppo di Geotecnica Sismica del Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica (Eucentre) di

Pavia si è occupata principalmente della verifica sismica di dighe in terra con approcci semplificati. Ammessa al Programma dell'Unione Europea "Erasmus+", sta completando un periodo di mobilità ai fini di studio presso l'Institut National Polytechnique di Grenoble (Francia).

Prof. Ing. Carlo G. Lai

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

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

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

Il Prof. Lai è autore/co-autore di oltre 150 pubblicazioni scientifiche incluse tre monografie e alcuni software applicativi. È stato coordinatore di numerosi progetti di

ricerca aventi per oggetto varie tematiche di geotecnica sismica e sismologia applicata all'ingegneria.

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

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

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

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

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

NPS® SYSTEM

Trave, Pilastro, Solaio. Nasce il sistema costruttivo di nuova generazione marcato CE.



“ NPS® SYSTEM è l'ulteriore risposta di Tecnostrutture all'esigenza di maggiore **industrializzazione di cantiere** che unisce ad una migliore **risposta sismica** una qualità prestazionale di tutti i componenti certificata CE EN 1090-1. ”

Evoluzione delle strutture autoportanti miste acciaio-calcestruzzo, NPS® SYSTEM è la tecnologia costruttiva di nuova generazione, altamente performante e ad elevata resistenza sismica, nata in casa Tecnostrutture, la società italiana leader di mercato nella produzione di sistemi prefabbricati acciaio-calcestruzzo.

Una consulenza aggiornata, costante e diretta!

Accedi al software di predimensionamento on-line per verificare la compatibilità della Trave reticolare mista NPS® già in fase preliminare! Inserendo i dati di input della trave si ottiene in tempo reale il giudizio di compatibilità della sezione: compatibile, non ottimale o non compatibile. Visita la sezione Predimensionamento NPS® su www.tecnostrutture.eu.

Scarica la APP su iPad e iPhone!



Scopri NPS® SYSTEM su www.tecnostrutture.eu
l'evoluzione delle strutture autoportanti miste acciaio-calcestruzzo.

Tecnostrutture srl - Via Antonio Meucci, 26 - 30020 Noventa di Piave (VE) - Tel. +39 0421 570970 - E-mail: com@tecnostrutture.eu

Seguici anche su:

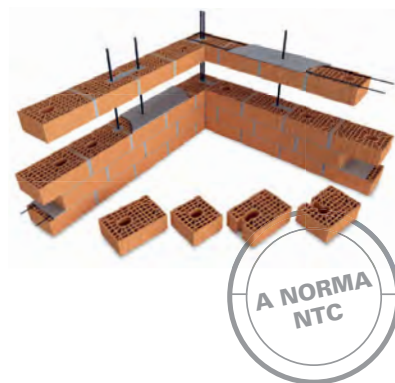


Tecnostrutture®
NPS® SYSTEM



“CREDETEMI QUESTO SISTEMA NON FUNZIONA”

Non fatevi ingannare dalle teste di legno, credete solo a ciò che si può dimostrare: affidatevi ai numeri e alla qualità comprovata del sistema Taurus.



**SICUREZZA
BREVETTATA**



**TEMPI E COSTI
RIDOTTI**



**ANTISISMICO
TESTATO***

TAURUS

ALVEOLATER BIO

www.gruppostabila.it

L'ORIGINALE SISTEMA ANTISISMICO BREVETTATO CHE NON TEME SMENTITE

gruppo
stabila®

Valore nel tempo

Supporto alla progettazione e alla posa Tel. 0444599019 - ufficiotecnico@gruppostabila.it

* Università degli Studi di Padova (ricerca c/o dip. I.C.E.A.)