

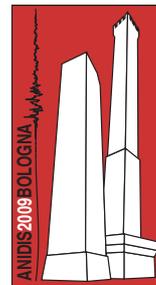
Una scheda “geologica” per la valutazione degli effetti sismici locali nei siti di ubicazione di edifici: primi risultati della sperimentazione

Giuseppe Di Capua, Silvia Peppoloni

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Via di Vigna Murata 605, 00143 Roma (sede distaccata di via Nizza 128, 000198 Roma)

Massimo Compagnoni, Floriana Pergalani

Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Strutturale. Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano



Keywords: scheda geologica, effetti sismici locali, amplificazioni sismiche, rischio sismico

RIASSUNTO

La risposta sismica ad un terremoto dipende dalle modalità di genesi e propagazione del segnale sismico e dalle caratteristiche litologiche e morfologiche locali. Al fine di comprendere meglio le modalità con le quali la geologia influenza lo scuotimento sismico, occorre caratterizzare il sito in modo semplice e standardizzato, raccogliendo dati in campagna e informazioni bibliografiche. Con questo obiettivo, è stata messa a punto una scheda "geologica" che consente una parametrizzazione semplificata delle caratteristiche geologiche, geomorfologiche, geotecniche e geofisiche del sito. Essa è in grado di fornire anche una prima quantificazione degli effetti di amplificazione attesi, attraverso l'introduzione del fattore di amplificazione. Inoltre, la scheda può essere ben integrata nei diversi livelli di approfondimento previsti dalle recenti norme regionali e nazionali. Utilizzando i soli dati qualitativi, si giunge a considerazioni paragonabili a quelle degli studi di I livello. Se si considerano invece tutti i dati, si può pervenire a considerazioni semiquantitative, paragonabili a quelle degli studi di II livello. Infine, l'insieme di tutti i dati raccolti può costituire una base di partenza per gli studi di III livello. Un primo test di compilazione è stato compiuto sui siti di ubicazione di 72 chiese che sono state danneggiate dai terremoti dell'Irpinia-Basilicata (1980), dell'Abruzzo-Molise (1984) e del Molise (2002).

1 PREMESSA

Numerose osservazioni in occasione di eventi sismici hanno evidenziato che le caratteristiche morfologiche e lito-stratigrafiche di un sito sono alla base delle modifiche dello scuotimento sismico: in particolare, le eterogeneità litologiche laterali e verticali presenti nel sottosuolo e le variazioni nell'andamento topografico della superficie terrestre determinano modifiche del contenuto in frequenza, ampiezza e durata del segnale sismico incidente. Inoltre, le caratteristiche morfologiche di sito condizionano la propensione di un'area a manifestare effetti co-sismici (frane sismo-indotte, densificazione, liquefazione del terreno, ecc.) in occasione di un terremoto (Crespelani 1999), (Faccioli 1986), (Lanzo e Silvestri 1999), (Seed et al. 1988).

Questi fenomeni vengono definiti nel loro insieme “effetti sismici locali” e la loro individuazione e quantificazione è di fondamentale impor-

tanza, in quanto la loro presenza può determinare anomalie e forti incrementi nel danneggiamento nel caso, ad esempio, di edifici aventi medesime caratteristiche tipologico-strutturali, ovvero con vulnerabilità sismica comparabile.

Gli studi geologici condotti prima e dopo un terremoto, al fine di caratterizzare un territorio dal punto di vista morfologico, litologico, geotecnico e geofisico, hanno un carattere prevalentemente areale. L'insieme di questi studi costituisce la base per la microzonazione sismica di un territorio, il cui risultato finale è rappresentato dall'individuazione e delimitazione di zone che possono essere considerate omogenee dal punto di vista del comportamento dinamico o dei possibili effetti co-sismici a seguito di un evento sismico.

Con il rilievo geologico e morfologico, l'analisi delle stratigrafie dei sondaggi geognostici, l'esame dei parametri geotecnici e geofisici dei litotipi presenti nel sottosuolo e la modellazione numerica e/o sperimentale del fenomeno è

possibile valutare e quantificare gli effetti sismici locali per un'area (Bakir et al. 2002), (Bard e Bouchon 1985), (Bouckovalas e Papadimitriou 2005), (Chavez-Garcia et al. 2000), (Geli et al. 1998), (Pergalani et al. 2006), (Raptakis et al. 2000, 2005), (Sanchenz-Sesma 1990), (Semblat et al. 2002).

Tuttavia, uno studio completo di microzonazione sismica può richiedere tempi e costi di esecuzione alti, in relazione alla complessità geologica dell'area indagata. Pertanto, se la finalità dell'analisi è di avere indicazioni sulla risposta sismica di un determinato sito nel quale sia presente un edificio oggetto di studio, può risultare molto utile una prima valutazione delle sue caratteristiche litologiche e morfologiche, in grado di fornire indicatori qualitativi della propensione di quel sito a manifestare effetti sismici locali. Sulla base delle informazioni raccolte ed utilizzando metodologie speditive, quali quelle contenute nei principali codici normativi internazionali (AFPS 1995), (ENV 1998-1-1 Eurocodice 8 2003), (FEMA 2004), (ISSMGE-TC4 1999), nazionali (NTC 2008), (Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – Presidenza del Consiglio dei Ministri 2008) e regionali (Regione Lombardia 2008), (Regione Emilia-Romagna 2007), è possibile pervenire ad una prima quantificazione degli effetti di amplificazione sismica attesi al sito. Partendo da queste considerazioni generali, è stata messa a punto una scheda “geologica” per la *“Valutazione dei possibili effetti locali nei siti di ubicazione di singoli edifici (edilizia ordinaria, strategica e monumentale)”*.

2 STATO DELL'ARTE

A partire dai terremoti del Friuli (1976) e dell'Irpinia-Basilicata (1980) la comunità scientifica ha approntato una serie di strumenti schedografici (CNR-GNDT 1993a, 1993b, 1993c), (SSN-GNDT 2002) per il censimento della vulnerabilità sismica, del danno e dell'agibilità degli edifici, raggiungendo così un duplice risultato: da un lato la messa a punto di procedure sistematiche per la raccolta omogenea di un gran numero di dati tipologico-strutturali tali da costituire campioni statisticamente affidabili per gli studi di vulnerabilità e per le correlazioni tra i parametri sismologici ed i danni accertati; dall'altro l'offerta di un servizio alla società civile per definire in modo più accurato e oggettivo quando un fabbricato danneggiato debba essere considerato

agibile. Invece, dal punto di vista geologico non c'è stata un'analogia attenzione per gli strumenti di rilievo.

Nel 1999, nell'ambito di un progetto GNDT (AA.VV. 2002), fu predisposta una scheda di rilevamento, che permetteva la raccolta di informazioni geologiche e geomorfologiche per il sito di ubicazione di un bene monumentale (Di Capua e Peppoloni 2002), (Di Capua et al. 2005b). Questo strumento è stato successivamente utilizzato in occasione del terremoto del Molise (2002), per raccogliere informazioni preliminari sui siti di ubicazione delle chiese danneggiate. Il particolare vantaggio di questa scheda, già evidenziato durante questo suo primo impiego, è quello di consentire il rapido confronto delle caratteristiche morfo-litologiche dei diversi siti e di agevolare l'analisi delle possibili relazioni tra queste caratteristiche locali e il danneggiamento sismico osservato negli edifici (Di Capua e Peppoloni 2005a). È evidente, infatti, che nel condurre una campagna di censimento dati è importante poter disporre di uno strumento, che permetta una raccolta omogenea delle informazioni disponibili e una riduzione dei fattori soggettivi nel rilievo geologico e geomorfologico, e che agevoli il tecnico con una descrizione standardizzata dei vari elementi, evitando che egli possa dimenticare particolari importanti per la caratterizzazione del sito. Pertanto, a partire dall'esperienza del terremoto del Molise, ci si è posti l'obiettivo di migliorare la scheda “geologica” già esistente, elaborando una nuova scheda più completa ed esaustiva per valutare in modo più efficace i possibili effetti locali nei siti di ubicazione di edifici ordinari, strategici e monumentali.

Quindi, è stato condotto un censimento delle informazioni contenute in altre schede di tipo “geologico”, utilizzate in rilievi multidisciplinari per centri storici o siti di ubicazione di edifici a partire dal terremoto dell'Umbria-Marche del 1997 (AA.VV. 2001) (Amato e Selvaggi 2004). Lo studio ha consentito di individuare importanti informazioni che potevano integrare la scheda esistente, migliorando così il livello di accuratezza nella raccolta dei dati bibliografici e di campagna, ottenendo un valido risultato in termini di sintesi delle varie informazioni raccolte.

3 LA NUOVA SCHEDA “GEOLOGICA”

Il nuovo strumento schedografico consente la raccolta sistematica e ragionata di informazioni

puntuali, senza che in questa operazione si perda la prospettiva areale della conoscenza geologica locale. Il percorso logico da seguire nella raccolta dei dati è tale da consentire al rilevatore di effettuare anche una graduale elaborazione dei dati stessi via via che vengono inseriti, riducendo al minimo i fattori soggettivi che generalmente condizionano i risultati di qualsiasi rilievo geologico. La compilazione della scheda permette una codifica omogenea delle caratteristiche morfologiche locali e, laddove esistano sufficienti dati, una caratterizzazione geotecnica e geofisica del sottosuolo del sito esaminato.

Le operazioni di compilazione possono avvenire in due distinte fasi, non necessariamente consecutive: alcune informazioni infatti sono reperibili attraverso la sola consultazione bibliografica e di specifiche banche dati (pericolosità sismica di base, sismicità storica o cartografia tecnica disponibile), mentre altri dati devono necessariamente essere raccolti attraverso rilievi in campagna. I dati che devono essere raccolti e inseriti sono sia di tipo qualitativo sia quantitativo e possono essere osservabili in campagna e dunque riferirsi esclusivamente a quanto visibile in superficie, o essere relativi al sottosuolo e quindi provenire dai risultati delle indagini geognostiche esaminate. Infatti, nella scheda sono presenti appositi campi in cui riportare valori numerici, ad esempio parametri geometrici o morfometrici, o in cui sintetizzare i risultati di sondaggi, di prove geofisiche e di analisi di laboratorio sui campioni prelevati. Pertanto, attraverso la descrizione qualitativa e quantitativa, i dati appartenenti a siti diversi trovano un'efficace omogeneizzazione, che ne permette un agevole confronto.

La nuova scheda proposta, opportunamente compilata, permette di fornire una valutazione qualitativa degli effetti sismici locali ed in particolare consente, a fronte di sufficienti dati raccolti e rilevati, una prima quantificazione degli effetti di amplificazione attesi sulla base delle recenti normative nazionali e regionali di settore. Ciò avviene attraverso la definizione del fattore di amplificazione (F_a), parametro sintetico che riassume ed esprime in termini numerici tutte le informazioni qualitative e quantitative contenute nella scheda e riguardanti direttamente il fenomeno dell'amplificazione sismica. Altra caratteristica fondamentale della nuova scheda è la grande quantità di informazioni che l'operatore può raccogliere ed organizzare a fronte di tempi brevi di rilevamento in campagna e costi di esecuzione

contenuti. Per questi motivi la scheda proposta può trovare un facile impiego per qualunque tipologia di edificio, affiancando le specifiche schede di vulnerabilità e danno/agibilità messe a punto per le diverse tipologie edilizie (edifici ordinari e beni monumentali).

4 STRUTTURA DELLA SCHEDA

La struttura della nuova scheda è tale da permettere una progressiva conoscenza del sito attraverso una sequenza di moduli e sotto-moduli conoscitivi, che consentono la raccolta di un insieme di informazioni sul sito, dalla denominazione alla localizzazione, dalla geologia alla geomorfologia, fino ad arrivare alla geotecnica e alla geofisica, oltre a moduli predisposti per raccogliere informazioni sismologiche, relative sia ad un evento sismico appena accaduto sia ad eventi del passato.

I vari moduli (complessivamente 22) individuano alcuni macrogruppi di informazioni riguardanti:

- l'identificazione del rilevatore e la cartografia del sito;
- l'edificio (ubicazione e tipologia);
- la pericolosità sismica di base e locale;
- la geologia (litologia e tettonica);
- la geomorfologia (forme e processi morfogenetici);
- le indagini geognostiche e i risultati delle analisi di laboratorio;
- le indagini geofisiche;
- la classificazione di sito secondo la normativa nazionale e le linee guida regionali.

Nei paragrafi successivi si riporta una breve descrizione dei macrogruppi di informazioni contenute nella scheda e alcune illustrazioni dei moduli, mentre una descrizione dettagliata dei moduli e dei sottomoduli con le relative istruzioni d'uso sono riportate in (Compagnoni et al. 2009).

4.1 Identificazione ed inquadramento

Nel modulo A1 sono contenuti i riferimenti del tecnico rilevatore e la denominazione dell'attività nell'ambito della quale viene redatta la scheda; nel modulo A2 è riportata la data del rilievo, il numero che identifica univocamente la scheda (numero progressivo) e il numero che viene assegnato dall'ufficio che coordina il censimento (numero scheda); nel modulo A3 è riportato uno stralcio della cartografia dell'area con evidenziata l'ubicazione dell'edificio.

4.2 Edificio

Nel modulo A4 sono riportati i riferimenti del centro abitato in cui è ubicato l'edificio, mentre il modulo A5 riporta il tipo e la denominazione dell'edificio, l'orientazione del suo asse maggiore rispetto al nord, le sue coordinate geografiche e la quota in m s.l.m. L'orientazione può essere utile nelle analisi post-evento per verificare la possibilità che il quadro di danneggiamento sia stato condizionato da effetti di direttività del segnale sismico incidente, mentre il codice Istat della località, la denominazione dell'edificio e le sue coordinate geografiche permettono il collegamento ad un qualsiasi sistema di rappresentazione spaziale, garantendo inoltre l'aggancio con le eventuali schede ingegneristiche compilate per lo stesso edificio.

4.3 Pericolosità sismica di base e locale

Nel modulo A6 sono riportate alcune informazioni sulla sismicità storica del sito, quali l'intensità macrosismica massima osservata nel passato e le caratteristiche dell'ultimo evento sismico risentito; inoltre, è riportata la pericolosità sismica attesa in termini di valore massimo di accelerazione orizzontale atteso su suolo rigido e pianeggiante con tempo di ritorno di 475 anni estratto dalla carta di pericolosità sismica nazionale (GdL MSP 2004). Nel modulo A7 sono raccolte le evidenze di effetti sismici verificatisi in passato nel comune in cui l'edificio è ubicato. Il modulo A8 è compilabile solo in fase di emergenza e contiene tutte le informazioni riguardanti l'evento sismico avvenuto, causa dell'emergenza stessa; il modulo è organizzato in due sottomoduli che distinguono i parametri sismologici dell'evento (A8.a) e gli eventuali effetti locali osservati nel sito (A8.b).

4.4 Geologia

Nel modulo A9 sono raccolte tutte le informazioni riguardanti la litologia presente nel sito e costituente il terreno di fondazione dell'edificio: esso è distinto, sulla base della rigidità dei materiali, in due gruppi, substrato o copertura; è possibile, in funzione dei dati disponibili, riportare la stima della profondità del substrato dal piano campagna, nel caso di presenza di copertura, ed alcune principali caratteristiche litologiche e giaciture dei materiali presenti nel sito ed osservabili in campagna attraverso affioramenti. Sulla base della tipologia e delle caratteristiche areali

degli affioramenti presenti si valuta la possibilità di non compilare il modulo A10 (Principali caratteristiche dell'ammasso roccioso) nel caso di affioramenti di materiale sciolto, di compilarlo parzialmente nel caso di affioramenti rocciosi di limitate estensioni, di compilarlo interamente nel caso di affioramenti rocciosi di estensione superiore ai 50 m². Questo modulo è stato previsto in conseguenza del fatto che in letteratura (Martino et al. 2006) sono stati segnalati fenomeni di amplificazione sismica in presenza di rocce fortemente fratturate. Il modulo A11 fa riferimento alla presenza nel sito di faglie e richiede, oltre ai parametri che ne definiscono la geometria nello spazio, la sua distanza minima dall'edificio e l'eventuale presenza di cataclasi. La presenza di una faglia infatti può condizionare il livello di pericolosità locale di un sito, direttamente, nel caso la faglia sia attiva e capace, e/o indirettamente, in quanto le fasce di fratturazione associate ad elementi tettonici, anche inattivi, sono responsabili di fenomeni di intrappolamento e concentrazione dell'energia sismica incidente (Rovelli et al. 2002).

4.5 Geomorfologia

Il modulo A12 è suddiviso in due sottomoduli, il primo (A12.a) si riferisce al contesto morfologico in cui è inserito l'edificio, il secondo (A12.b) si riferisce specificamente al sito di ubicazione dell'edificio. In particolare, si richiede di evidenziare una delle forme morfologiche presenti: pianura, valle, sella, versante, conoide, dorsale, ciglio di scarpata o orlo di terrazzo e le loro caratteristiche geometriche. Questo modulo permette una prima individuazione qualitativa delle aree che possono presentare effetti di amplificazione legati a condizioni morfologiche. Il modulo A13 è utilizzato per raccogliere alcune informazioni sulle caratteristiche idrologiche del sito, segnalando la presenza di acque superficiali, sorgenti, pozzi e la loro distanza dall'edificio. Il modulo A14 è dedicato ai processi morfogenetici in atto nel sito ed è suddiviso in sottomoduli: A14.a segnala la presenza di una frana, la sua tipologia, l'attività, le caratteristiche geometriche e la sua influenza sull'edificio; inoltre, possono essere segnalate anche le aree potenzialmente franose e i fenomeni precursori osservati. Il sottomodulo A14.b riguarda le forme di dilavamento presenti, quali il ruscellamento e l'erosione calanchiva, infine il sottomodulo A14.c si riferisce alla presenza di erosione fluviale. La raccolta di tali infor-

mazioni è di estremo interesse ai fini della valutazione della pericolosità sismica locale dal momento che la presenza di frane nell'area esaminata costituisce motivo di potenziale instabilità dinamica del versante (Keefer 1984) e determina la presenza di una coltre di terreno mobilizzata che ha le caratteristiche dinamiche di un terreno di copertura, e quindi può amplificare l'input sismico (Del Gaudio e Wasowski 2007). Il fenomeno del dilavamento segnala invece la presenza di terreno in degradazione con aumento dello spessore della coltre superficiale di copertura. Infine, l'esistenza di processi fluviali erosivi contribuisce alla potenziale instabilità del sito, producendo, ad esempio, lo scalzamento al piede di un versante, con l'incremento delle pendenze del pendio di sponda. Il modulo A15 è dedicato alla presenza di forme antropiche (cavità, materiali di riporto, muri di sostegno, sbancamenti) che possano influenzare direttamente l'edificio e che possono rappresentare elementi di pericolosità soprattutto in aree di urbanizzazione intensa e molto antica.

4.6 Geotecnica e geofisica

In questi moduli si raccolgono tutte le informazioni geotecniche e geofisiche reperite nell'area di ubicazione dell'edificio. In particolare, nel modulo A16 si richiede la localizzazione cartografica di tutte le indagini e prove in situ che sono state raccolte, utilizzando il modulo A3. Nel modulo A17 vengono sintetizzati le stratigrafie dei sondaggi, i risultati delle prove SPT, del Pocket Penetrometer, del Vane Test, delle Prove Penetrometriche dinamiche e statiche, delle analisi di laboratorio sui campioni, delle prove Down-Hole e Cross-Hole, delle prove di sismica superficiale (rifrazione, MASW, ecc.), delle misure di H/V. Il modulo A17 è di fondamentale importanza in quanto raccoglie tutte le informazioni necessarie per una corretta quantificazione dei fenomeni di amplificazione e, in particolare, per la valutazione dei fattori di amplificazione (S_S , Fa), prevista nei successivi moduli. Nel modulo A18 vengono riportate le curve di decadimento del modulo di taglio e del rapporto di smorzamento con la deformazione. Solitamente queste informazioni non risultano facilmente disponibili anche se sono di grande importanza in quanto descrivono in modo sintetico il comportamento del terreno sotto una sollecitazione dinamica. Questo modulo è stato comunque previsto, dal momento che la crescente attenzione degli Enti Locali per gli studi di microzonazione sismica, comincia a

stimolare l'esecuzione di prove cicliche sui campioni di terreno.

4.7 Valutazione dei fattori di amplificazione

I moduli A19 e A20 sono dedicati alla valutazione quantitativa dei fattori di amplificazione (S_S , S_T , Fa). In particolare, il modulo A19 ha la finalità di classificare il sito in base alle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008), e quindi di assegnare i relativi fattori di amplificazione S_S e S_T , sia derivanti da studi precedentemente effettuati, sia desunti dai dati raccolti nella scheda. Il modulo è suddiviso in due sottomoduli (A19.a e A19.b) riferiti rispettivamente alla categoria di sottosuolo ed alla categoria topografica, in modo tale da ottenere sia il fattore di amplificazione litologica (S_S), sia il fattore di amplificazione topografica (S_T) (Fig. 1).

A19 - CLASSIFICAZIONE DISPONIBILE PER IL SITO DA N.T.C.

		<input type="radio"/> dati esistenti	<input type="radio"/> dati desunti dalla scheda					
A19.a - VALUTAZIONE DELLA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO								
<input type="radio"/>	A	Annessi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di V_{330} superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m		$V_{330} > 800$ m/s	1.0			
<input type="radio"/>	B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{330} compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SP130} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina)		$360 < V_{330} \leq 800$ m/s	1.0-1.2			
<input type="radio"/>	C	Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{330} compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SP130} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina)		$180 < V_{330} \leq 360$ m/s	1.0-1.5			
<input type="radio"/>	D	Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{330} inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SP130} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina)		$V_{330} \leq 180$ m/s	0.9-1.8			
<input type="radio"/>	E	Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s)		$180 < V_{330} \leq 360$ m/s $V_{330} \leq 180$ m/s	1.0-1.0			
<input type="radio"/>	S1	Depositati di terreni caratterizzati da valori di V_{330} inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche		$V_{330} < 100$ m/s	Specifiche analisi			
<input type="radio"/>	S2	Depositati di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti		-	Specifiche analisi			
Provenienza dell'informazione								
<input type="radio"/>	Rilevamento geologico		<input type="radio"/>	Prove geofisiche	<input type="radio"/>	SPT	<input type="radio"/>	c_u
			$V_{330} =$ _____		$N_{SP130} =$ _____		$c_{u30} =$ _____	
A19.b - VALUTAZIONE DELLA CATEGORIA TOPOGRAFICA								
<input type="radio"/>	T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$		Inclinazione media (i)	$i \leq 15^\circ$	1.0		
<input type="radio"/>	T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$			$i > 15^\circ$	1.2		
<input type="radio"/>	T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$			$15^\circ \leq i \leq 30^\circ$	1.2		
<input type="radio"/>	T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$			$i > 30^\circ$	1.4		

Figura 1. Valutazione del fattore di amplificazione da NTC

Il modulo A20 ha la finalità di individuare e quantificare i possibili effetti di amplificazione, sia desunti da lavori condotti per il sito e che abbiano già applicato i criteri previsti da Linee Guida specifiche messe a disposizioni da Enti statali e regionali, sia applicando gli stessi criteri citati, utilizzando i dati raccolti durante la compilazione della scheda (Fig. 2).

A20 - VALUTAZIONE DEI FATTORI AMPLIFICAZIONE

		<input type="radio"/> dati esistenti	<input type="radio"/> dati desunti dalla scheda	
<input type="radio"/>	F1	Valore del coefficiente Fa da "Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica"		F
<input type="radio"/>	F2	Valore del coefficiente Fv da "Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica"		
<input type="radio"/>	F3	Valore del coefficiente F da Linee guida Regionali (1)		

Figura 2. Valutazione del fattore di amplificazione da Norme specifiche

Gli ultimi due moduli A21 e A22 prevedono la possibilità di inserire note e foto del sito e dell'edificio.

5 IMPIEGHI E SPERIMENTAZIONI

La scheda trova applicazione nell'ambito di tutte le fasi temporali di un evento sismico, dalla prevenzione all'emergenza, fino alla ricostruzione. Nella fase preventiva può essere utilizzata, unitamente alle schede ingegneristiche, per campagne di censimento dati finalizzate a valutazioni di rischio sismico e per l'allocazione più attenta delle risorse finanziarie per la sua mitigazione. In tale ambito la scheda può rappresentare uno strumento indispensabile per le verifiche sismiche sul patrimonio edilizio scolastico e strategico, che già da qualche anno sono in corso di svolgimento su tutto il territorio nazionale per iniziativa del Dipartimento della Protezione Civile e delle Regioni. Nella fase di emergenza può essere utilizzata nei rilievi di agibilità/danno, per consentire un immediato collegamento tra il tipo e l'entità del danno riscontrato e le condizioni morfo-litologiche del sito di ubicazione dell'edificio e per effettuare un'analisi più accurata della distribuzione areale del danno stesso. Inoltre, il suo impiego può risultare molto utile nella caratterizzazione dei siti della rete strumentale mobile installata in occasione di eventi sismici da diversi Enti/Istituzioni di ricerca per il monitoraggio delle sequenze sismiche. Nella fase post-evento l'utilizzo della scheda consente di redigere un documento geologico omogeneo sulla base del quale predisporre graduatorie di finanziamento per i progetti di ricostruzione, che tengano conto della pericolosità sismica locale accertata. La scheda può diventare di ausilio alla sintesi di dati provenienti dagli studi geologico-tecnici che accompagnano le varie fasi di progettazione di nuovi edifici. Infine, l'insieme delle schede compilate per diverse finalità o in momenti differenti per una determinata area può costituire un supporto conoscitivo di base, da cui partire per approfondimenti successivi, o per applicazioni nell'ambito della pianificazione territoriale.

È evidente che i fruitori della scheda sono rappresentati da tutti coloro che sono interessati ad una raccolta sistematica e ragionata di informazioni geologiche per la valutazione dei possibili effetti locali (ricercatori, professionisti, tecnici della pubblica amministrazione).

La nuova scheda è stata sperimentata in alcune aree campione, scelte dall'Unità di Ricerca INGV Roma del Progetto Reluis – Linea 10 (Definizione e sviluppo di archivi di dati per la valutazione del rischio e di scenari post-evento), per valutare le caratteristiche dei siti di ubicazione di chiese su

cresta e ciglio di scarpata danneggiate in occasione dei terremoti dell'Irpinia-Basilicata (1980), Abruzzo-Molise (1984) e Molise (2002). L'obiettivo di questo studio è stato quello di analizzare le possibili correlazioni tra l'entità del danneggiamento sismico osservato, valutato attraverso l'elaborazione dei dati provenienti dal rilievo della scheda ingegneristica "chiese" (Lagomarsino et al. 2004a), (Lagomarsino e Podestà 2004b) e le caratteristiche morfo-litologiche di sito così come rilevate attraverso la scheda "geologica" proposta. In tale ambito sono stati rilevati un totale di 72 edifici, ubicati in 31 centri abitati del Molise e della Basilicata (Compagnoni et al. 2007), (Di Capua et al. 2006), (Di Capua et al. 2007).

I dati raccolti sono organizzati in modo omogeneo e pertanto permettono di eseguire più agevolmente analisi comparative. La compilazione della scheda "geologica" per i 72 siti analizzati ha permesso di distinguerli, in funzione della litologia, in 19 siti su depositi sciolti e 53 su substrato roccioso (pari al 74% del campione) e, in funzione delle situazioni morfologiche previste, in 39 siti collocati su cresta, 21 su ciglio di scarpata, 9 su versante, 2 su sella e 1 su superficie pianeggiante (Fig. 3).

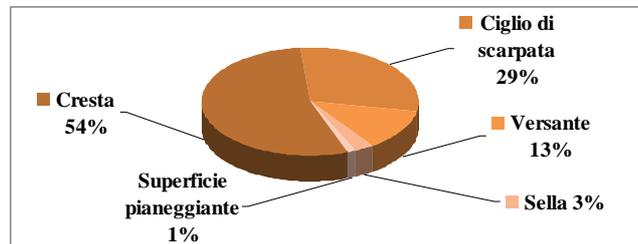


Figura 3. Distribuzione percentuale delle situazioni morfologiche per il campione analizzato

Attraverso la tipologia morfologica è stato possibile assegnare ai 72 siti analizzati la rispettiva categoria topografica prevista dalle NTC; in particolare, 37 siti sono appartenenti alla categoria topografica T1, 5 alla categoria T2, 22 alla T3 e 8 alla T4. La conoscenza della categoria topografica ha permesso la valutazione diretta del fattore di amplificazione S_T , così come previsto dalle NTC.

La compilazione delle schede "geologiche" ha consentito la raccolta dei risultati di 278 indagini geognostiche, geotecniche, in sito e in laboratorio, e geofisiche, distinte in 87 stratigrafie di sondaggio, 61 prove in foro SPT, 77 analisi di laboratorio su campioni disturbati e indisturbati, 26 prove sismiche in foro tipo Down-Hole (DH) e 27

misure di microtremori elaborate con tecnica HVSR.

Dai risultati delle prove DH è stato stimato il valore di V_{S30} per 26 siti; questi dati hanno permesso di classificare i siti stessi utilizzando la categoria di sottosuolo prevista dalle NTC; in particolare, 24 siti appartengono alla categoria di sottosuolo B (dei quali 15 presentano valori di V_{S30} superiori a 500 m/s e quindi sono soggetti a limitati fenomeni di amplificazione litologica), 1 alla categoria C ed 1 alla categoria E. Per 6 siti non è stato possibile assegnare la categoria di sottosuolo (trovandosi su depositi prevalentemente sciolti e non disponendo dei relativi valori di V_{S30}), mentre per gli altri 40 siti, ove è stata rilevata la presenza di substrato affiorante, è stata assegnata la categoria di sottosuolo A sulla base delle sole valutazioni geologiche.

Inoltre, per 50 siti sui 72 analizzati è disponibile un valore del fattore di amplificazione F_a (di seguito indicato come F_{aMICR}) derivante da studi di microzonazione esistenti e calcolato con metodologie diverse.

Tra i 19 siti ubicati su depositi prevalentemente sciolti solo per 12 è disponibile, da prove DH, l'andamento del valore di V_S con la profondità. Per questi 12 siti, applicando quanto previsto dalle NTC, è stato valutato, in funzione del Comune di appartenenza, il valore del fattore di amplificazione S_S . Inoltre, applicando quanto previsto dagli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica" (Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome e della Presidenza del Consiglio dei Ministri, 2008), è stato valutato, in funzione della litologia prevalente e del valore di accelerazione orizzontale massima attesa al suolo rigido, il valore del fattore di amplificazione F_a (di seguito indicato come F_{aICMS}).

In Tab. 1 sono riportati i Comuni di appartenenza dei 12 siti analizzati, la litologia prevalente, la categoria di sottosuolo di appartenenza, i valori dei fattori di amplificazione S_S , F_{aICMS} e, ove disponibile, F_{aMICR} .

L'osservazione dei dati contenuti in Tab. 1 evidenzia che, confrontando i valori di S_S e di F_{aICMS} , per quasi tutti i casi (ad esclusione di uno, in cui i risultati ottenuti sono equivalenti), i valori che derivano dall'applicazione delle NTC sono meno cautelativi rispetto a quelli ottenuti attraverso la metodologia proposta dagli "Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica" (evidenziati con il colore giallo); confrontando i valori di S_S e di F_{aMICR} , per circa il 40% dei casi i

due criteri di valutazione conducono a risultati equivalenti (evidenziati con il colore grigio), per circa il 50% i valori derivanti dall'applicazione delle NTC (S_S) sono meno cautelativi (evidenziati con il colore giallo), mentre in un caso la situazione è opposta (il valore è evidenziato con il colore arancio).

Tabella 1. Valore dei fattori di amplificazione (S_S , F_{aICMS} e F_{aMICR}) per i 12 siti ubicati su depositi sciolti

Comune di appartenenza	Litologia prevalente	Categoria sottosuolo	S_S	F_{aICMS}	F_{aMICR}
Rotello (CB)	Argilla	C	1.40	1.4	1.25
Montagano 1 (CB)	Argilla	B	1.18	1.6	1.25
Castellino del Biferno (CB)	Sabbia	B	1.19	1.5	1.25
Guardialfiera (CB)	Argilla	B	1.20	1.6	1.15
Morrone del Sannio (CB)	Argilla	B	1.19	1.5	1.25
Colletorto (CB)	Argilla	B	1.19	1.5	1.15
Limosano (CB)	Argilla	B	1.18	1.5	1.15
Campodipietra (CB)	Sabbia	B	1.19	1.4	1.15
Montagano 2 (CB)	Argilla	B	1.18	1.3	1.25
Santa Croce di Magliano (CB)	Argilla	E	1.44	2.2	1.35
Ururi (CB)	Ghiaia	B	1.20	1.4	1.15
Ripabottoni (CB)	Ghiaia	B	1.19	1.3	1.38

I 53 siti collocati su substrato roccioso (pari al 74% del campione analizzato e comprensivi dei 15 siti di categoria di sottosuolo B, caratterizzati da valori di V_{S30} superiori a 500 m/s) sono stati distinti, in funzione delle situazioni morfologiche, in 34 siti collocati su cresta, 14 su ciglio di scarpata, 4 su versante e 1 su sella (Fig. 4).

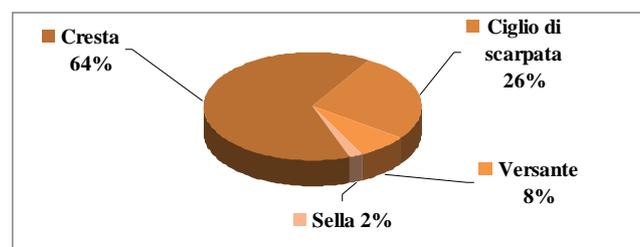


Figura 4. Distribuzione percentuale delle situazioni morfologiche rilevate per il campione posto su substrato roccioso

Per i 48 siti su cresta o su ciglio di scarpata sono stati calcolati i fattori di amplificazione applicando sia quanto previsto dalle NTC ($S_S=1.0$, S_T è funzione della categoria topografica) sia quanto previsto negli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica". Nel grafico di Fig. 5 sono riportati i rispettivi valori di altezza media (H) ed inclinazione media (α) dei 48 siti considerati, distinti in cresta e ciglio di scarpata; inoltre, sono riportati i limiti morfologici per i quali, secondo le NTC, sono possibili fenomeni di amplificazione topografica ($H \geq 30$ m e $\alpha \geq 15^\circ$).

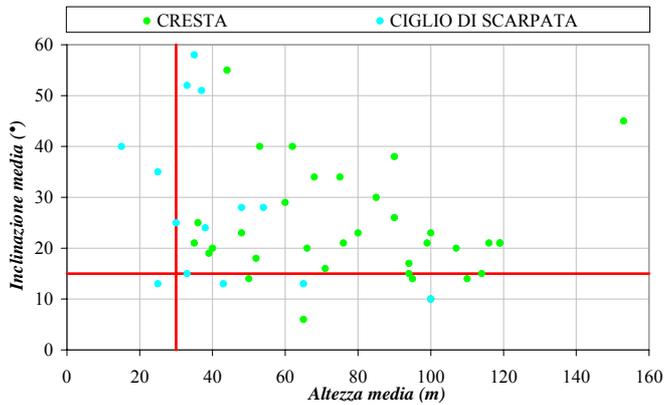


Figura 5. Distribuzione dei 48 siti in funzione dell'altezza media del versante (H) e dell'inclinazione media del pendio (α)

In Tab. 2 sono raccolti per confronto i valori di S_T e di $F_{a_{ICMS}}$ calcolati per i 48 siti selezionati, distinti in cresta, con colore verde, e ciglio di scarpata, con colore azzurro; inoltre, sono riportati, ove disponibili, i valori di $F_{a_{MICR}}$ calcolati attraverso studi di microzonazione sismica. Il confronto è stato fatto prendendo come riferimento il valore di S_T da NTC (dal momento che questi siti sono stati classificati su substrato, $S_S=1.0$): con il colore grigio sono evidenziati i casi di corrispondenza tra i fattori di amplificazione, con colore arancione i casi in cui il valore di S_T è maggiore di $F_{a_{ICMS}}$ o $F_{a_{MICR}}$, con colore giallo i casi in cui S_T è minore.

Tabella 2. Valori dei fattori di amplificazione (S_S , $F_{a_{ICMS}}$, $F_{a_{MICR}}$) per i 48 siti su substrato, ubicati su cresta (in verde) e su ciglio di scarpata (in azzurro)

Sito	Categoria topografica	S_T	$F_{a_{ICMS}}$	$F_{a_{MICR}}$	Sito	Categoria topografica	S_T	$F_{a_{ICMS}}$	$F_{a_{MICR}}$
1	T4	1.4	1.4	N.D	25	T3	1.2	1.2	N.D
2	T4	1.4	1.2	1.20	26	T3	1.2	1.2	N.D
3	T4	1.4	1.2	1.20	27	T3	1.2	1.2	N.D
4	T3	1.2	1.2	1.20	28	T3	1.2	1.2	N.D
5	T3	1.2	1.2	1.27	29	T3	1.2	1.1	N.D
6	T4	1.4	1.3	1.38	30	T1	1.0	1.1	1.27
7	T4	1.2	1.2	1.20	31	T3	1.2	1.1	1.27
8	T3	1.2	1.1	1.27	32	T1	1.0	1.1	1.15
9	T4	1.4	1.3	N.D	33	T1	1.0	1.1	1.00
10	T3	1.2	1.2	1.15	34	T1	1.0	1.0	1.25
11	T3	1.2	1.1	1.27	35	T2	1.2	1.2	N.D
12	T4	1.4	1.3	1.38	36	T1	1.0	1.0	1.15
13	T3	1.4	1.3	1.20	37	T1	1.0	1.0	1.15
14	T4	1.4	1.6	N.D	38	T2	1.2	1.2	1.38
15	T3	1.2	1.2	1.25	39	T1	1.0	1.1	1.15
16	T3	1.2	1.2	1.25	40	T2	1.2	1.2	1.15
17	T3	1.2	1.3	N.D	41	T1	1.0	1.0	1.27
18	T3	1.2	1.3	N.D	42	T1	1.0	1.1	1.15
19	T3	1.2	1.2	N.D	43	T1	1.0	1.1	1.25
20	T1	1.0	1.1	1.15	44	T1	1.0	1.2	1.25
21	T3	1.2	1.3	N.D	45	T2	1.2	1.2	1.51
22	T3	1.2	1.2	N.D	46	T1	1.0	1.0	1.15
23	T3	1.2	1.2	N.D	47	T1	1.0	1.2	1.15
24	T3	1.2	1.2	N.D	48	T1	1.0	1.1	N.D

L'osservazione dei dati contenuti in Tab. 2 evidenzia che, confrontando i valori di S_T e di $F_{a_{ICMS}}$, per il 50% dei casi i due criteri di valutazione sono equivalenti, mentre per circa il 20% i

valori derivanti dall'applicazione delle NTC (S_T) sono più cautelativi rispetto a quelli derivanti dagli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica" ($F_{a_{ICMS}}$); il restante 30% dei casi, ove la situazione è opposta, mostra una netta prevalenza dei casi (circa il 70%) ove l'applicazione delle NTC non prevede fenomeni di amplificazione ($S_T=1.0$).

Confrontando i valori di S_T e di $F_{a_{MICR}}$ (disponibili per il 65% del campione), per il 23% dei casi i due criteri di valutazione sono equivalenti, per circa il 10% i valori derivanti dall'applicazione delle NTC sono più cautelativi, mentre per il restante 67% circa dei casi la situazione è opposta.

6 CONCLUSIONI

In passato gli Autori hanno elaborato una scheda di rilevamento geologico, che consentiva di raccogliere informazioni di tipo qualitativo sul sito di ubicazione di un bene monumentale, finalizzata alla valutazione degli effetti sismici locali. A partire da questa esperienza e tenendo conto di quanto già sviluppato in ambito ingegneristico in merito a strumenti schedografici per il rilievo delle caratteristiche tipologico-strutturali degli edifici, è stata messa a punto una nuova scheda "geologica" per il rilievo qualitativo e quantitativo delle caratteristiche morfo-litologiche dei siti di ubicazione di singoli edifici.

Questa scheda consente di condurre in modo autonomo il rilievo geologico, svincolandolo dal rilievo ingegneristico e separando definitivamente le informazioni geologiche da quelle strutturali, che in precedenza confluivano e spesso andavano a sovrapporsi in un'unica scheda dal momento che non esisteva una scheda "geologica" di riferimento. In questo tipo di schede "ibride" le informazioni relative alla morfologia e alla geologia di sito potevano condurre, in alcuni casi, ad errori nel rilievo, poiché venivano codificate situazioni morfo-litologiche terminologicamente errate e/o eccessivamente semplificate rispetto alla realtà naturale. Del resto l'ambiguità delle indicazioni riportate nasceva da questa mancanza in ambito geologico di uno strumento che potesse garantire la stessa accuratezza ed omogeneità di rilievo delle schede di tipo ingegneristico, applicabile a studi sul rischio sismico o ad analisi integrate tra il danneggiamento post-terremoto e le condizioni geologiche di sito.

La nuova scheda “geologica” si propone, quindi, come valido strumento di rilievo ad integrazione e completamento delle schede ingegneristiche già esistenti ed ampiamente collaudate, avendo come finalità una prima quantificazione degli effetti di amplificazione sismica potenziali, attraverso la valutazione del fattore di amplificazione. La scheda rende possibile una sintesi efficace di tutte le informazioni qualitative e quantitative di natura “geologica” relative al sito esaminato, altrimenti difficilmente utilizzabili in modo operativo.

Inoltre, la scheda può essere ben integrata nei diversi livelli di approfondimento previsti negli studi di microzonazione dalle recenti norme regionali e dalle Linee Guida nazionali. Utilizzando i soli dati qualitativi, si giunge a considerazioni paragonabili a quelle ottenute da studi di I livello. Se si considerano invece tutti i dati inseriti nella scheda, si può pervenire a considerazioni semi-quantitative, paragonabili a quelle che si ottengono in studi di II livello. Infine, l’insieme di tutti i dati raccolti può costituire un’ottima base di partenza per gli approfondimenti richiesti negli studi di III livello.

Ulteriori perfezionamenti della scheda potranno essere attuati con adeguate sperimentazioni sul campo nei vari ambiti di utilizzo, al fine di renderla sempre più utile per studi di rischio sismico.

RINGRAZIAMENTI

La scheda è stata realizzata nell’ambito delle attività dell’UR INGV Roma che ha operato nella Linea 10 (Definizione e sviluppo di archivi di dati per la valutazione del rischio e di scenari post-evento) della Convenzione Dipartimento della Protezione Civile-Consorzio RELUIS, firmata in data 11/07/2005 (repertorio n. 540). Si ringrazia il coordinatore della Linea 10, Prof. Ing. D. Liberatore, per la sensibilità all’argomento e per il finanziamento accordato.

BIBLIOGRAFIA

AA.VV., 2001. *Progetto Eme.Rico – Parte A: supporto tecnico-scientifico alle attività di rilievo dei danni, della vulnerabilità, nonché per le analisi di rischio occorrenti per la corretta attività di ricostruzione. Progetto Inter-regionale a sostegno delle attività tecniche, amministrative e sociali nelle regioni Umbria e Marche, a seguito dell’evento sismico del 26 settembre 1997 e successivi (Lavori Socialmente Utili)*. CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Terni.

- AA.VV., 2002. *Mitigazione del rischio sismico dei centri storici e degli edifici di culto dell’area del Matese nella regione Molise*. Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (INGV) - Regione Molise, L’Aquila http://gndt.ingv.it/Pubblicazioni/POP_Molise/sommario_pop_Molise.html.
- AFPS, 1995. *Guidelines for seismic microzonation studies*. AFPS/DRM.
- Amato, A., Selvaggi, G., 2004. *Prodotti sviluppati nel Progetto GNDT “Terremoti probabili in Italia tra l’anno 2000 e il 2003: elementi per la definizione di priorità degli interventi di riduzione del rischio sismico”*. <http://gndt.ingv.it>.
- Bakir, B.S., Ozkan, M.Y., Ciliz, S., 2002. Effects of basin edge on the distribution of damage in 1995 Dinar, Turkey earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**, 335-345.
- Bard, P.Y., Bouchon, M., 1985. The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **75**.
- Bouckovalas, G.D., Papadimitriou, A.G., 2005. Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**, 547-558.
- Chavez-Garcia, F.J., Raptakis, D., Makra, K., Pitilakis, K., 2000. Site effects at Euroseistest-II. Results from 2D numerical and modeling and comparison with observations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **19**, 23-39.
- CNR-GNDT, 1993a. *Rilevamento dell’esposizione e vulnerabilità sismica degli edifici: istruzioni per la compilazione della scheda di I livello. Appendice n. 1 alla pubblicazione “Rischio sismico di edifici pubblici” – Parte I – Aspetti metodologici*. Roma.
- CNR-GNDT, 1993b. *Rilevamento della vulnerabilità sismica degli edifici in muratura: istruzioni per la compilazione della scheda di II livello. Appendice n. 2 alla pubblicazione “Rischio sismico di edifici pubblici” – Parte I – Aspetti metodologici*. Roma.
- CNR-GNDT, 1993c. *Rilevamento della vulnerabilità sismica degli edifici in cemento armato: istruzioni per la compilazione della scheda di II livello. Appendice n. 3 alla pubblicazione “Rischio sismico di edifici pubblici” – Parte I – Aspetti metodologici*. Roma.
- Compagnoni, M., Curti, E., Di, Capua G., Lemme, A., Peppoloni, S., Pergalani, F., Podestà, S., 2007. Danni al patrimonio monumentale ed effetti di amplificazione sismica per cause topografiche. *ANIDIS 2007 - XII Convegno nazionale “L’Ingegneria sismica in Italia”*. Pisa, 10-14 Giugno 2007.
- Compagnoni, M., Di Capua, G., Peppoloni, S., Pergalani, F., 2009. Valutazione degli effetti sismici locali in siti associati a singoli edifici: un nuovo strumento schedo grafico “geologico”. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, **128** (1).
- Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – Presidenza del Consiglio dei Ministri, 2008. *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*.
- Crespellani, T., a cura di 1999. *Ingegneria geotecnica nelle aree sismiche*. CISM, International Center for Mechanical Sciences.
- Del Gaudio, V., Wasowski, J., 2007. Directivity of slope dynamic response to seismic shaking. *Geophysical Re-*

- search Letters*, **34**, L12301, doi:10.1029/2007GL029842.
- Di Capua, G., Peppoloni, S., 2002. *Pettoranello del Molise (IS): studio di dettaglio finalizzato all'individuazione delle aree soggette a possibili effetti locali*. In: *Mitigazione del rischio sismico dei centri storici e degli edifici di culto dell'area del Matese nella regione Molise*. Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (INGV) - Regione Molise, L'Aquila.
- Di Capua, G., Peppoloni, S., 2005a. La pericolosità sismica locale: geomorfologia dei siti di ubicazione delle chiese e procedure speditive di valutazione dei possibili effetti locali. In: *Beni monumentali e terremoto. Dall'emergenza alla Ricostruzione*. Presidente Regione Molise Commissario Delegato – Consiglio Nazionale delle Ricerche DAST-UOIG L'Aquila. Tipografia del Genio Civile DEI, Roma.
- Di Capua, G., Peppoloni, S., Pergalani, F., 2005b. Effetti locali nei centri storici: la scheda per valutazioni qualitative sui siti di edifici strategici e monumentali. In: *Atti del Convegno Nazionale "Rischio Sismico, territorio e centri storici. Salvaguardia dei beni culturali e ambientali. Azione di prevenzione e mitigazione del rischio"*. Sanremo (IM), 2-3 luglio 2004. Edizioni FrancoAngeli, Milano, ISBN 88-464-6738-8.
- Di Capua, G., Curti, E., Lemme, A., Peppoloni S., Podestà, S., 2006. Simplified parameters for the evaluation of site effects in the seismic risk analyses of monuments. *Proc. of First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, CD-ROM, paper n° 656, Geneva.
- Di Capua, G., Compagnoni, M., Curti, E., Lemme, A., Peppoloni, S., Pergalani, F., Podestà, S., 2007. Correlation between local amplification effects and damage mechanisms for monumental buildings. *4TH International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. 25-28 June 2007 – Thessaloniki, Greece.
- ENV 1998-1-1 Eurocode 8, 2003. *Design of Structures for Earthquake Resistance*. December, 2003.
- Faccioli, E., a cura di 1986. *Elementi per una guida alle indagini di Microzonazione Sismica*. CNR, Quaderni de "La Ricerca Scientifica", n. 114, 7, Roma.
- FEMA, 2004. *NEHRP Recommended Provisions for seismic regulations for new buildings and other structures*.
- GDL MPS, 2004. *Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003. Rapporto Conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile*. INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici, <http://zonesismiche.mi.ingv.it/>.
- Géli, L., Bard, P.Y., Jullien, B., 1998. The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **78** (1).
- ISSMGE-TC4, 1999. *Manual for zonation on seismic geotechnical hazards*. The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- Keefer, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society American Bulletin*, **95**, 406-421.
- Lagomarsino, S., Podestà, S., Cifani, G., Lemme, A., 2004a. The 31st October 2002 earthquake in Molise (Italy): a new methodology for the damage and the seismic vulnerability survey of the churches, *XIII WCEE*, Vancouver, Canada.
- Lagomarsino, S., Podestà, S., 2004b. Seismic vulnerability of ancient churches. Part 2: statistical analysis of surveyed data and methods for risk analysis. *Earthquake Spectra*, **20** (2), 395-412.
- Lanzo, G., Silvestri, F., 1999. *Risposta Sismica Locale*. Helvius Edizioni.
- Martino, S., Minutolo, A., Paciello, A., Rovelli, A., Scarscia Mugnozza, G., Verrubbi, V., 2006. Seismic microzonation of jointed rock-mass ridges through a combined geomechanical and seismometric approach. *Natural Hazards*, **39**, 419-449.
- NTC, 2008. *Norme Tecniche per le Costruzioni*. DM 14 gennaio 2008, Gazzetta Ufficiale, n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma (www.cslp.it).
- Pergalani, F., De Franco, R., Compagnoni, M., Caielli, G., 2006. Evaluation of site effects using numerical and experimental analyses in Città di Castello (Italy). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **26** (10), 941-951.
- Raptakis, D., Chávez-García, F.J., Makra, K., Pitilakis, K., 2000. Site effects at Euroseistest – I. Determination of the valley structure and confrontation of observations with 1D analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **19**, 1-22.
- Raptakis, D.J., Manakou, M.V., Chavez-Garcia, F.J., Makra, K.A., Pitilakis, K.D., 2005. 3D configuration of Mygdonian basin and preliminary estimate of its site response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**, 871-887.
- Regione Emilia Romagna, 2007. *Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, c. 1, della L. R. 20/2000 per "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica"*. Delibera dell'Assemblea legislativa progr. n°112 - oggetto n°3121 del 2 maggio 2007.
- Regione Lombardia, 2008. *DGR n. 8/7374 del 28 maggio 2008 "Aggiornamento dei criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio in attuazione dell'art. 57 della L.R. 11 marzo 2005 n. 12, approvati con DGR 22 dicembre 2005 n. 8/1566"* (Allegato 5 "Analisi e valutazione degli effetti sismici di sito in Lombardia finalizzate alla definizione dell'aspetto sismico nei Piani di Governo del Territorio"). BURL 2° Supplemento Straordinario al n. 24 del 12 giugno 2008.
- Rovelli, A., Caserta, A., Marra, F., Ruggiero, V., 2002. Can seismic waves be trapped inside an inactive fault zone? The case study of Nocera Umbra, Central Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **92**, 2217-2232.
- Sánchez-Sesma, F.J., 1990. Elementary solutions for response of a wedge-shaped medium to incident SH and SV waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **80** (3).
- Seed, H.B., Romo, M.P., Sun, J.I., Jaime, A., Lysmer, J., 1988. Relationships between soil conditions and earthquake ground motions. *Earthquake Spectra*, **4**, 687-729.
- Semblat, J.F., Dangla, P., Kham, M., Duval, A.M., 2002. Seismic site effects for shallow and deep alluvial basins: in-depth motion and focusing effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**, 849-854.
- SSN-GNDT, 2002. *Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica (AeDES)*. Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento della Protezione Civile, Roma.