

Introduzione alla modellazione degli effetti di sito a San Giuliano di Puglia

Marco Mucciarelli,* Francesca Pacor**

Tra il 2004 ed il 2007 il Dipartimento della Protezione Civile (DPC) tramite l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ha finanziato 5 progetti finalizzati nel settore sismologico (<http://portale.ingv.it/l-ingv/progetti/progetti-finanziati-dal-dipartimento-di-protezione-civile-1>).

Il terzo di questi progetti (Progetto S3, *Scenari di scuotimento in aree di interesse prioritario e/o strategico*; <http://esse3.mi.ingv.it>) si poneva come obiettivo il calcolo di scenari di scuotimento in alcune aree italiane nel caso di accadimento del terremoto massimo credibile. Il progetto si articolava in sette attività. Le prime due erano a carattere prevalentemente metodologico e comprendevano le attività propedeutiche e conoscitive per la generazione di scenari di scuotimento a scala urbana; l'ultimo era relativo al trasferimento dei risultati degli studi di scenario di scuotimento atteso alla comunità ingegneristica per valutazioni relative al danno e al DPC per la gestione del territorio; infine le altre quattro attività corrispondevano ciascuna ad una delle aree proposte come oggetto di studio. Nelle due aree di validazione (Salò (BS) e San Giuliano di Puglia (CB)) sono stati generati scenari di scuotimento corrispondenti agli eventi sismici occorsi; viceversa, nelle due aree di previsione (Potenza e Gubbio (PG)) si sono generati più scenari di scuotimento, corrispondenti alle diverse ipotesi di accadimento del terremoto massimo credibile.

La scelta dell'area colpita del terremoto del Molise nel 2002 era giustificata dal fatto che per i comuni colpiti era disponibile una notevole messe di dati sulla risposta sismica locale e sulla vulnerabilità degli edifici, ma non esisteva una registrazione sismica delle scosse principali in area epicentrale (escluso un dato all'interno di un edificio di Bonefro, MUCCIARELLI *et al.*, 2004).

Inoltre, durante la sequenza sismica erano stati registrati molti eventi sismici che potevano essere utilizzati per calibrare le leggi di attenuazione del moto e i parametri sismologici della regione, quali i termini di sorgente e di attenuazione geometrica e

anelastica. La disponibilità di accurati studi sul danneggiamento permetteva infine di confrontare gli scenari teorici con quanto realmente accaduto e di valutare la sensibilità degli scenari ai vari parametri di modello.

Si precisa che lo scopo del lavoro non era la ricerca delle possibili cause del crollo di un'ala della scuola elementare "Francesco Jovine" a San Giuliano di Puglia, ove persero la vita 27 bambini e un'insegnante, bensì un'analisi dettagliata della risposta sismica locale nell'intero centro urbano di San Giuliano di Puglia, finalizzato alla comprensione dell'anomala distribuzione del danneggiamento indotto dalla sequenza sismica iniziata il 31 ottobre 2002.

Gli scenari di moto del suolo per l'area colpita dal terremoto del Molise costituivano il tentativo più ambizioso del progetto S3. La verifica a posteriori delle capacità predittive degli scenari teorici si doveva confrontare con un quadro estremamente diversificato sia a scala intra- che inter-comunale. Gli effetti congiunti di sito e sorgente a San Giuliano di Puglia dovevano spiegare alcune osservazioni:

- la discrepanza di due gradi di intensità macrosismica in più osservati in questo centro urbano rispetto quelli dei comuni limitrofi;
- la distribuzione estremamente variabile del danno nel centro abitato;
- la necessità di avere almeno un fattore 2 sul picco di accelerazione tra le zone più o meno danneggiate, per interpretare la differenza dei danni al netto delle vulnerabilità, identiche nei 4 comuni più colpiti dal terremoto [AUGLIERA *et al.*, 2004].
- la presenza di evidenti fenomeni di amplificazioni della componente verticale [AUGLIERA *et al.*, 2004; CARA *et al.*, 2005] e di forti effetti direzionali nella risposta sismica locale (con prevalenza della accelerazioni in direzione EW, STROLLO *et al.*, 2007]

Per ottenere un risultato in linea con le osservazioni a San Giuliano di Puglia, gli elementi fondamentali sono stati la ricostruzione 3D del sottosuolo e l'accurata misura dei parametri di propagazione delle onde sismiche nei terreni, che hanno permesso di effettuare sia modellazioni 2D sia 3D della risposta sismica locale. Le modellazioni 2D hanno infatti fornito risultati coerenti con le registrazioni

* Dipartimento di Strutture, Geotecnica e Geologia Applicata, Università della Basilicata, Potenza

** Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Milano Pavia, Milano

sismiche solo quando sono state prodotte utilizzando sezioni del modello 3D insieme a parametri dei terreni più realistici, e abbandonando quindi i modelli sovra-semplificati proposti in passato per l'area (bacini simmetrici, sinclinali, ecc.).

Gli scenari di scuotimento ricostruiti nell'area di San Giuliano di Puglia sono il risultato di un lavoro integrato e sinergico tra esperti in diverse discipline. Geologi, sismologici ed ingegneri hanno raccolto ed elaborato i dati disponibili per definire al meglio i vari ingredienti, dal calcolo dell'input sismico su roccia, alla caratterizzazione dei terreni, dalla modellazione della risposta sismica locale, al censimento della vulnerabilità degli edifici, fino alle stime del danneggiamento.

In questo volume, tutte le varie fasi del lavoro sono descritte in dettaglio.

Il primo articolo, a cura di FRANCESCHINA *et al.*, descrive le modalità con le quali è stato definito il moto su roccia indotto durante la scossa principale del 31 ottobre 2002 (10:32 UTC, Mw=5.7), da applicare per la successiva modellazione degli effetti di sito a San Giuliano di Puglia e comuni limitrofi.

A tal fine sono state impiegate tecniche di simulazione per la generazione di accelerogrammi sintetici, che modellano la rottura di una faglia estesa immersa in un mezzo di propagazione 1-D a strati piani e paralleli. Prima di giungere alla definizione del moto di riferimento, gli autori hanno riprodotto gli scenari al *bedrock*, a tre diversi livelli di complessità. Il livello 0 è stato ottenuto utilizzando equazioni empiriche predittive del moto del suolo, mentre i livelli 1 e 2 attraverso l'impiego di due tecniche di simulazione a sorgente estesa, la prima semplificata, per generare il moto in alta frequenza (DSM - Deterministic Stochastic Method, PACOR *et al.*, 2005) e la seconda, ibrida, per riprodurre il campo d'onda completo (HIC - Hybrid Integral Composite Method, GALLOVIC e BROKESOVA, 2007).

L'evento sismico del Molise è stato un evento inatteso in quanto si è verificato tra due zone caratterizzate da un maggiore livello di sismicità, gli Appennini centro-meridionali ad Est e il promontorio del Gargano ad Ovest. Anche la distribuzione delle scosse successive è risultata anomala, con il verificarsi, il 1° novembre (15:09 UTC Mw = 5.7), di un secondo evento di intensità simile all'evento principale e di molte repliche relativamente forti nei giorni successivi. La sequenza sismica, durata diversi mesi, si è verificata lungo una struttura quasi verticale con meccanismo trascorrente, a profondità compresa tra i 10 e 24 km, del tutto sconosciuta e non assimilabile alle strutture tipiche con meccanismo normale caratterizzanti l'Appennino meridionale [VALENSISE *et al.*, 2004]. Per tale area, la letteratura non è vasta e solo dopo gli eventi del 2002, sono iniziati studi approfonditi, che hanno fornito

diverse ipotesi simogenetiche e interpretazioni della struttura crostale.

FRANCESCHINA *et al.* [2009, questo volume] hanno utilizzato le registrazioni sismiche disponibili nell'area, provenienti sia dalla rete accelerometrica nazionale, sia dalle reti temporanee installate immediatamente dopo la scossa principale, per calibrare i modelli di sorgente proposti in letteratura e stimare le proprietà attenuative del mezzo di propagazione da simulare con le diverse tecniche adottate nello studio.

Il confronto fra i risultati ottenuti dalle diverse tecniche di simulazione ha permesso di validare le predizioni ottenute con le tecniche più complesse che, se da una parte sono in grado di riprodurre differenti caratteristiche del campo d'onda, dall'altra sono maggiormente sensibili ai valori parametri di ingresso dei modelli.

Gli scenari calcolati ai diversi livelli di complessità hanno fornito stime consistenti in termini di valori di picco del moto. In area epicentrale, i valori di accelerazione al bedrock risultano compresi tra 60 e 120 gal, con valori massimi simulati nella località di San Giuliano di Puglia per l'evento del 31 ottobre 2002. Benché i sismogrammi sintetici mostrino, in generale, ampiezze e contenuto in frequenza simili, le forme d'onda generate dalla tecnica HIC, come atteso, risultano più realistiche anche in termini di durata ed ampiezze spettrali ai lunghi periodi.

I risultati ottenuti con diversi metodi di simulazione confermano la complessità dell'area Molisana per quanto riguarda sia l'aspetto simogenetico che le proprietà attenuative del mezzo di propagazione. Va tuttavia sottolineato che, nell'area molisana, i dati registrati presentano forme d'onda estremamente complesse, le cui caratteristiche non possono essere interpretate solo in termini di sorgente e di sito. In questa area dovrebbero essere realizzati modelli di propagazione anisotropi e le funzioni di Green dovrebbero essere simulate con codici di calcolo 2D.

Il secondo lavoro di questo volume, a cura di MUCCIARELLI *et al.*, affronta il problema della struttura profonda del sottosuolo a San Giuliano di Puglia. L'obiettivo dello studio è la costruzione di un modello geologico-strutturale tridimensionale basato su nuovi dati appositamente raccolti nell'ambito del Progetto S3.

Il centro urbano di San Giuliano di Puglia è costruito alla quota media di 450 metri s.l.m., su una stretta dorsale, orientata in direzione NNW-SSE, e delimitata da due valli abbastanza incise che circondano tutto l'abitato fino alla loro confluenza. In sommità, tale dorsale si presenta abbastanza spianata, con una blanda depressione al centro (una cosiddetta sella morfologica, caratterizzata da un dislivello di circa 10 metri), che indica la presenza di terreni relativamente più consistenti nella zona meri-

dionale dell'abitato. Il sottosuolo dell'area di San Giuliano di Puglia è noto, nella letteratura geologica, come unità Dauna. Di questa unità fanno parte, tra le altre, le formazioni del flysch di Faeto e delle marne argillose di Toppo Capuana, entrambe affioranti nell'abitato.

La complessità dello stile deformativo dell'area [GALLIPOLI *et al.*, 2004; CASCIELLO *et al.*, 2004; GIACCIO *et al.*, 2004; STROLLO *et al.*, 2007] è stata probabilmente causa delle differenti, e per molti versi contrastanti, ipotesi sulla geometria del deposito di marne argillose di Toppo Capuana al di sotto del centro urbano di San Giuliano di Puglia, che si sono succedute, nell'arco degli ultimi anni, dopo l'evento sismico del 2002.

Nel periodo compreso tra il novembre 2002 e il marzo 2003, docenti e ricercatori dell'Università del Molise, in collaborazione con l'Ufficio Servizio Sismico Nazionale del DPC e la Geoservizi (CB), hanno effettuato ricerche e rilievi geologico-strutturali nell'area in cui ricade il centro abitato di San Giuliano di Puglia. L'assetto geologico elaborato a partire da tali rilievi consiste in una carta geologica e relative sezioni in scala 1:5000, contenute nel Rapporto finale sulla Microzonazione Sismica del centro abitato di San Giuliano di Puglia [BARANELLO *et al.*, 2003]. Il modello geologico corrispondente è caratterizzato da una struttura a doppia sinclinale. In particolare, si ipotizza che il substrato delle argille sia costituito dalla formazione flyschoidale, deformata da un sistema di pieghe con assi orientati all'incirca NWSE, e caratterizzata da strutture di tipo asimmetrico verso i quadranti nordorientali. L'area risulta inoltre attraversata da faglie subverticali con cinematica prevalentemente estensionale e con orientazioni variabili da circa N-S a NW-SE. Tuttavia, sebbene siano stati eseguiti sondaggi fino ad oltre 100m nessuno di questi ha raggiunto profondità tali da poter confermare l'andamento del substrato.

Successivi studi geologici [GIACCIO *et al.*, 2004], hanno fornito una diversa interpretazione dei rapporti stratigrafici tra le due formazioni principali, ipotizzando un meccanismo di sovrascorrimento del flysch sul deposito delle marne argillose che porta ad una struttura geometricamente ancora più complessa rispetto all'ipotesi a doppia sinclinale.

In questo articolato contesto si inserisce il lavoro di MUCCIARELLI *et al.* [2009, questo volume] che descrive e discute il modello del sottosuolo di San Giuliano di Puglia ottenuto nell'ambito del Progetto S3, mediante approcci metodologici ben distinti ma fortemente complementari, come quello I) geologico-strutturale, II) gravimetrico, III) geo-elettrico e IV) di sismica ad alta risoluzione. In particolare, è stato effettuato un rilevamento geologico, strutturale e geomorfologico di dettaglio principalmente finalizzato alla ricostruzione delle geometrie delle unità stratigrafiche principali e delle strutture tettoniche

maggiori che interessano questo settore dell'Appennino meridionale. Nella stessa area, è stata effettuata una campagna di misure gravimetriche con lo scopo di dedurre, dalle anomalie del campo gravitazionale, la distribuzione delle densità nel sottosuolo, permettendo, così, di meglio definire la geometria, lo spessore, l'assetto tettonico, ecc, degli elementi geologici che caratterizzano questo sito. Similmente, lungo profili selezionati, sono state effettuate delle tomografie di resistività elettrica e profili sismici a riflessione ad alta risoluzione. Il confronto incrociato dei risultati ottenuti con i diversi approcci indipendenti ha permesso di vincolare fortemente la geologia del sottosuolo nell'area epicentrale e di ricostruire un modello geologico 3D. La forma delle coperture è risultata priva di simmetria e non riconducibile a semplici modelli di bacino (sinclinale) che erano stati precedentemente proposti, evidenziando l'importanza di contatti subverticali.

Il terzo articolo di questo volume, a cura di D'ONOFRIO *et al.*, si occupa della caratterizzazione geotecnica degli strati più superficiali dei terreni appartenenti all'unità Toppo Capuana, definendone la sequenza e la geometria, senza tuttavia fornire indicazioni sulla geometria profonda del substrato, non intercettato in nessuno dei sondaggi eseguiti. La caratterizzazione degli strati più superficiali del sottosuolo di San Giuliano di Puglia rappresenta certamente un caso limite per numero, varietà e qualità di indagini geotecniche eseguite ai fini dell'analisi della risposta sismica locale. Il territorio di San Giuliano di Puglia è stato interessato, in diverse fasi, da campagne di indagini *in situ*:

- prima della crisi sismica: indagini del Comune di San Giuliano di Puglia per il P.R.G. (1992) e della Regione Molise (1996), localizzate prevalentemente nelle zone di potenziale espansione a N-NW del centro urbano;
- subito dopo la crisi sismica: programma congiunto DPC-Procura (gennaio-marzo 2003) orientato alla Microzonazione Sismica e alle indagini giudiziarie sul crollo della "Scuola F. Jovine"⁶, con l'obiettivo principale di caratterizzare una sezione longitudinale e una trasversale alla dorsale del centro abitato;
- indagini per la ricostruzione del centro urbano (2004-05), eseguite intensivamente nell'intero abitato.

In totale sono disponibili circa 129 colonne stratigrafiche, di cui la maggior parte si sviluppa interamente nella formazione argillo-marnosa. Le indagini *in situ* hanno, soprattutto, permesso di conoscere i caratteri litostratigrafici dell'area di studio e, per mezzo di prove *down-hole* e *cross-hole*, le velocità delle onde di taglio e di compressione a basse deformazioni. Inoltre, numerose prove geotecniche di laboratorio sono state eseguite - in particolare nel

corso del programma DPC-Procura – su campioni indisturbati di terreno argilloso (oltre le usuali prove di classificazione, prove di compressione edometrica e isotropa, prove triassiali consolidate non drenate e prove di taglio torsionale ciclico e dinamico).

Il lavoro di D'ONOFRIO *et al.* [2009, questo volume] descrive il processo di elaborazione e sintesi della ingente mole di dati sperimentali disponibili, concentrandosi in particolare sulle caratteristiche del deposito di marne argillose di Topo Capuana, dove si sono verificati i maggiori danni all'edificato. Il deposito argillo-marnoso è distinguibile in diversi spessori, differenziati in relazione all'intensità di fessurazione. Tale fessurazione, insieme all'alterazione dei terreni, benché non influenzi le proprietà fisiche e mineralogiche dei terreni, sembra invece condizionarne la risposta meccanica e, in particolare, il comportamento tensio-deformativo nella risposta sismica locale del deposito. Oltre alla definizione delle proprietà meccaniche e geometriche della formazione argillo-marnosa, gli autori hanno riconosciuto che i materiali alterati in superficie sono caratterizzati da spessori variabili con continuità e che si ispessiscono verso il contatto con la formazione flyschoidale. Tale fattore, in virtù del contrasto d'impedenza sismica tra le argille marnose più e meno intensamente fessurate, determina una congruente variabilità dell'amplificazione locale, in bande di frequenze medie-elevate, lungo il centro abitato.

La modellazione della risposta sismica locale di San Giuliano di Puglia è affrontata nel lavoro di PUGLIA *et al.* L'articolo presenta un confronto tra le simulazioni numeriche della risposta sismica locale a San Giuliano di Puglia calcolate mediante modelli 1D, 2D e 3D e i risultati ottenuti dall'elaborazione delle registrazioni di diverse repliche del terremoto del Molise del 2002, provenienti da stazioni sismiche installate sia sul deposito argilloso e sia sulla formazione flyschoidale. Tali confronti sono stati effettuati allo scopo di validare, in campo lineare, i differenti modelli numerici da utilizzare per la simulazione del moto sismico al sito indotto dall'evento principale del 31 ottobre 2002. Le modellazioni, infatti, sfruttano molti dei risultati dei lavori presentati in questo volume per realizzare il modello 3D del sottosuolo e per caratterizzare il comportamento dei terreni. Dal modello 3D sono stati ricavati sia la sezione 2D, nella direzione longitudinale del rilievo su cui è costruito l'abitato di San Giuliano di Puglia, sia i modelli 1D, in corrispondenza delle verticali passanti per tre stazioni sismiche, mentre le proprietà meccaniche attribuite ai materiali si basano sulle elaborazioni di D'ONOFRIO *et al.* [2009, questo volume]. È importante sottolineare che i modelli 1D e 2D, al contrario di quello 3D, includono anche l'eterogeneità verticale e orizzontale degli

strati superficiali del deposito argillo-marnoso evidenziata dall'estesa campagna di indagine geotecnica.

Subito dopo il terremoto, diversi studi sono stati avviati per definire la risposta sismica locale a San Giuliano di Puglia, principalmente basate sull'elaborazione di registrazioni accelerometriche e velocimetriche, derivanti da reti temporanee installate da diversi Istituti ed Enti: il Dipartimento della Protezione Civile, l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e l'Università della Basilicata. Il Dipartimento di Protezione Civile ha effettuato una campagna di misure e successive analisi finalizzate alla microzonazione del Comune di San Giuliano di Puglia (Rapporto commissione – tecnica). Dall'analisi delle registrazioni dei terremoti deboli, attraverso tecniche standard, quali i rapporti spettrali rispetto ad un sito di riferimento (SSR) e rapporti tra le componenti orizzontali e verticali degli spettri osservati ad uno stesso sito, si è concluso che gli effetti di amplificazione sono diffusi su tutto il centro abitato, e raggiungono i valori massimi nei siti posti sulla formazione di argille marnose compatte, presenti sull'asse della sella.

Analogamente il lavoro di CARA *et al.* [2005] e AUGLIERA *et al.* [2004] entrambi basati sull'analisi di registrazioni velocimetriche, mostrano che le amplificazioni della formazione argillosa sono comprese in una banda di frequenze intermedie tra i 2 e 7 Hz.

Significative sono anche le analisi spettrali condotte da STROLLO *et al.* [2004] e LADINA [2009] dalle quali si evince che le amplificazioni sono massime in corrispondenza di una direzione preferenziale, coincidente con quella della sella morfologica su cui è posizionato il paese di San Giuliano di Puglia, testimoniando l'origine complessa di tali fenomeni (2D e/o 3D) che non può essere interpretata con semplici modelli 1D.

Le simulazioni teoriche presentate da PUGLIA *et al.* [2009, questo volume], mostrano che il modello 2D è in grado di interpretare alcuni fenomeni che caratterizzano la risposta sismica locale a San Giuliano di Puglia, e, in particolare, la generazione di onde di superficie e la focalizzazione delle onde di volume, associati all'andamento irregolare del contatto flysch-formazione argillosa. Inoltre, stimano le amplificazioni indotte dalle eterogeneità delle proprietà meccaniche all'interno del deposito di argille marnose insieme al contrasto di impedenza tra questa formazione e la coltre superficiale. Il modello 3D, benché riproduca la variabilità del moto sismico in superficie su una scala maggiore rispetto ai modelli 1D e 2D, includendo l'andamento tridimensionale della morfologia superficiale e profonda, tuttavia fornisce sottostime delle ampiezze dei valori di amplificazione. Gli enormi tempi di calcolo non consentono, infatti, di modellare in dettaglio la variabilità delle proprietà meccaniche dei depositi di ter-

reno superficiali, responsabili delle variabilità delle componenti ad alta frequenza del moto in superficie.

L'ultimo articolo di questo volume, a cura di VONA *et al.*, è finalizzato all'interpretazione dei danni agli edifici osservati nell'abitato di San Giuliano di Puglia a seguito del terremoto del 2002, in termini della risposta sismica locale e della vulnerabilità degli edifici. La distribuzione del danneggiamento è risultata anomala e non uniforme: infatti gli edifici nella parte più antica della città, di origine medievale, hanno riportato meno danni rispetto alla più moderna zona di espansione, mentre il comune nella sua interezza ha subito un livello di danneggiamento decisamente superiore a quello riscontrato nei comuni limitrofi.

Un mese dopo il terremoto, un gruppo di lavoro delle Università della Basilicata (DiSGG) e della "Federico II" di Napoli ha effettuato un rilievo sistematico delle caratteristiche tipologiche e del danneggiamento degli edifici del centro abitato di San Giuliano di Puglia [DOLCE *et al.*, 2004]. La mole di dati raccolta nella campagna di rilievo (circa 450 edifici rilevati) è confluita in due basi di dati, implementate su supporto GIS, che hanno costituito il punto di partenza di tutte le considerazioni, sia qualitative che quantitative, sui caratteri di vulnerabilità e di danneggiamento del patrimonio edilizio di San Giuliano di Puglia.

La distribuzione del danno sembra confermare forti effetti di amplificazione sismica locale in tutta la zona di recente espansione del centro urbano di San Giuliano di Puglia, e in particolare nelle zone situate lungo la sella morfologica, note come Zone 2A e 2B [PUGLIA, 2008].

Nel lavoro di VONA *et al.* [2009, questo volume] sono descritte brevemente le caratteristiche tipologiche degli edifici e, sulla base della distribuzione della vulnerabilità conseguentemente stimata, sono stati predisposti gli scenari di danno fisico. Tali scenari sono generati utilizzando come input l'azione sismica, espressa in termini di intensità di Housner, trasmessa alla superficie dei modelli 2D e 3D [PUGLIA *et al.*, 2009; questo volume] dal sismogramma sintetico del 31 ottobre [FRANCESCHINA *et al.*, 2009; questo volume]. I risultati delle simulazioni sono quindi confrontati con la distribuzione di danno rilevato nell'immediato post-sisma.

Per il calcolo degli scenari di danno fisico, gli autori hanno adottato il classico modello di valutazione della vulnerabilità e del danno basato sulle Matrici Probabilità di Danno (DPM), le quali richiedono, come dato sismico di ingresso, l'utilizzo di valori di intensità macrosismiche [DOLCE *et al.*, 2003]. A tal fine, è stata considerata una legge di correlazione tra intensità di Housner ed intensità macrosismica [CHIAZZI *et al.*; 2009], proposta inizialmente nell'ambito del Progetto S3.

Gli scenari di danno così stimati non sono risultati congruenti con il danno osservato; una possibile causa è da ricercarsi nell'utilizzo dell'intensità macrosismica come dato per descrivere l'input sismico. Infatti, se dal punto di vista delle capacità predittive in termini di rapporti di amplificazione i modelli sono risultati soddisfacenti [cfr. per dettagli PUGLIA *et al.*, 2009, questo volume], i valori di intensità macrosismica definiti dai modelli sono decisamente bassi e conducono ad un danno stimato visibilmente inferiore a quello rilevato.

La conclusione più importante a fini di protezione civile riguarda la complessità delle indagini e dei modelli necessari per riprodurre il danno osservato: è ragionevole ipotizzare che a priori nessun modello semplificato attualmente noto avrebbe potuto prevedere in dettaglio quanto accaduto. Per terremoti non molto forti ma in aree caratterizzate da effetti di sito e di propagazione particolarmente complessi (Molise) il contributo della sorgente è identificabile ma insufficiente per produrre i valori di moto del suolo necessari per giustificare i danni osservati. La complessità delle indagini volte ad acquisire i dati geotecnici e geometrici delle coperture, nonché quella dei modelli di calcolo tridimensionali costituiscono una barriera per possibili applicazioni preventive a fine di Protezione Civile. I valori di moto del suolo ottenibili da modelli semplificati sono insufficienti quando non addirittura anticorrelati con il danno (es. amplificazione topografica a San Giuliano). Un possibile scopo di studi futuri potrebbe essere quello di valutare la probabilità dell'occorrenza di effetti di sito anomali, al fine di rendere edotto DPC sulla probabilità che stime ordinarie di moto del suolo vengano largamente eccedute con conseguenze potenzialmente catastrofiche.

Bibliografia

- AUGLIERA P., DOLCE M., FRANCESCHINA G., FRAPICCINI M., GALLIPOLI M. R., HARABAGLIA P., LUZI L., MASI A., MARZORATI S., MUCCIARELLI M., PACOR F., SAMELA L. (2004) - *Site amplification in the epicentral area of the 31/10/2002 earthquake (Molise, Italy): comparison between damage data, microtremors, weak and strong-motions*. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, 2004 – CD-Rom, Paper n. 725.
- BARANELLO S., BERNABINI M., DOLCE M., PAPPONE G., ROSSKOPF C., SANÒ T., CARA P. L., DE NARDIS R., DI PASQUALE G., GORETTI A., GORINI A., LEMBO P., MARCUCCI S., MARSAN P., MARTINI M. G., NASO G. (2003) - *Rapporto finale sulla Microzonazione Sismica del centro abitato di San Giuliano di Puglia*. Dipartimento di Protezione Civile, Roma.

- CARA F., ROVELLI A., DI GIULIO G., MARRA F., BRAUN T., CULTRERA G., AZZARA R., BOSCHI E. (2005) - *The role of site effects on the intensity anomaly of San Giuliano di Puglia inferred from aftershocks of the Molise, central southern Italy, sequence, November 2002*. Bulletin of the Seismological Society of America, 95, pp.1457-1468.
- CASCIELLO E., CESARANO M., NASO G., PAPPONE G., ROSSKOPF C. (2004) - *The 2002 Molise, Italy, earthquake: geological and geomorphological data of the San Giuliano di Puglia area*. Earthquake Spectra, vol. XX, n. S1, pp. S53-S64.
- DOLCE M., MASI A., SAMELA C., SANTARSIERO G., VONA M., ZUCCARO G., CACACE F., PAPA F. (2004) - *Esame delle caratteristiche tipologiche e del danneggiamento del patrimonio edilizio di San Giuliano di Puglia*. XI National Conference "L'ingegneria Sismica in Italia", Genova, ANIDIS, Roma.
- GALLIPOLI M. R., MUCCIARELLI M., GALLICCHIO S., TROPEANO M., LIZZA C. (2004) - *Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) measurements in the area damaged by the 2002 Molise, Italy, earthquake*. Earthquake Spectra, vol. XX, n. S1, pp. S81-S93.
- GALLOVIC F. e BROKESOVA J. (2007) - *Hybrid k-squared Source Model for Strong Ground Motion Simulations: Introduction*. Physics.Earth. Planet. Int., 160, pp. 34-50.
- GIACCIO B., CIANCIA S., MESSINA P., PIZZI A., SAROLI M., SPOSATO A., CITTADINI A., DI DONATO V., ESPOSITO P., GALADINI F. (2004) - *Caratteristiche geologicogeomorfologiche ed effetti di sito a San Giuliano di Puglia (CB) e in altri abitati colpiti dalla sequenza sismica dell'ottobre-novembre 2002*. Il Quaternario, 17 (1), Ed. Aiqua, pp.83-99.
- LADINA C. (2008) - *Studio della risposta sismica locale a San Giuliano di Puglia (CB) attraverso l'analisi di dati empirici*. Tesi di Laurea in Scienze e Tecnologie Geologiche, Università degli studi Bicocca.
- MUCCIARELLI M., MASI A., GALLIPOLI M.R., HARABAGLIA P., VONA M., PONZO F., DOLCE M. (2004) - *Analysis of r.c. building dynamic response and soil-building resonance based on data recorded during a damaging earthquake (Molise, Italy 2002)*. Bull. Seism. Soc. Am., 94, 5, pp.1943-1953.
- PACOR F., CULTRERA G., MENDEZ A., COCCO M. (2005) - *Finite Fault Modeling of Strong Motion Using a Hybrid Deterministic-Stochastic Approach*. Bull. Seism. Soc. Am., 95, pp. 225-240.
- PUGLIA R. (2008) - *Analisi della Risposta Sismica a San giuliano di Puglia*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Geotecnica - XX CICLO - S.S.D.: ICAR/07.
- STROLLO A., RICHWALSKI S. M., PAROLAI S., GALLIPOLI M. R., MUCCIARELLI M., CAPUTO R. (2007) - *Site effects of the 2002 Molise earthquake, Italy: analysis of strong motion, ambient noise, and synthetic data from 2D modelling in San Giuliano di Puglia*, Bull. Earthq. Eng., doi 10.1007/s10518-007-9033-6.
- VALENSISE G., PANTOSTI D., BASILI R. (2004) - *Seismology and Tectonic Setting of the 2002 Molise, Italy, Earthquake*. Earthquake Spectra, 20-S1, pp. S23-S37.