

Valutazione della risposta sismica locale a Sant'Angelo dei Lombardi: il caso dell'ex tribunale.

Claudio Cherubini¹, Giovanna Vessia¹, Giovanni Mannara², Donatella Pingitore³

¹Politecnico di Bari, D.I.C.A. - Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale; ²Strago, Napoli; ³Geologo, Roma
c.cherubini@poliba.it, g.vessia@poliba.it, mannara@strago.it, cmgtesting@libero.it

Local seismic response assessment at Sant'Angelo dei Lombardi site: the case study of the court building.

ABSTRACT: The historical centre of Sant'Angelo dei Lombardi (AV) was struck by the Irpino-Lucano earthquake occurred on the 23th of November 1980. Heterogeneous damage of middle-high level was distributed in the surrounding of the Court building (CNR, 1983). The building was slightly damaged by the 1980 earthquake despite of its irregular plan which resembles to a Y. The RESIS Project (Research and Development for the Seismology and Seismic Engineering) promoted by the MURST-INGV, tried to evaluate the vulnerability of the building also by means of the assessment of local soil filtering effects. The following study, developed within the RESIS Project, focuses on the evaluation of the amplification or deamplification effect due to the mechanical characteristics of the soils. The study has been organized into multiple stages. The first one was the physical and mechanical characterization of soils by means of three boreholes drilled around the Court building. The in situ investigations provided information on the seismic behaviour of soils at very low strain level. Moreover the laboratory tests on cohesive soil samples provided mechanical behaviour at middle-high strain level which are needed to numerical analyses. Then numerical simulations were carried out by means of an equivalent elastic behaviour model implemented into the ProShake code. Finally the Response Spectra and the Amplification Factors were evaluated and assessments were done about the local amplification effect. Results point out the absence of amplification phenomena which could be the reason for the low damage reported by the Court building.

Key terms: Seismic local effects, Structural seismic response, Equivalent elastic soil behaviour

Termini chiave: Effetti sismici locali, Risposta sismica della struttura, Comportamento del terreno lineare equivalente

Riassunto

A seguito del forte terremoto Irpino-Lucano occorso il 23.XI.1980, il centro storico di Sant'Angelo dei Lombardi (AV) ha registrato un danneggiamento eterogeneo di medio-alto livello distribuito nell'intorno dell'ex Palazzo di Giustizia (CNR, 1983). Ciononostante l'edificio ha riportato solo danni lievi.

Nell'ambito del Progetto RESIS (Ricerca e Sviluppo per la Sismologia e l'Ingegneria Sismica) promosso dal MURST-INGV, ci si è proposti di ricercare una spiegazione plausibile che, malgrado la configurazione geometrica sfavorevole dell'edificio, potesse motivare il suo comportamento sismoresistente alle sollecitazioni indotte dal sisma.

Lo studio è stato rivolto ad accertare quali effetti locali induce sull'edificio la particolare conformazione geomorfologica del sito (piastrone ghiaioso-conglomeratico sovrastante un substrato argillitico-calcarenitico di elevato spessore).

I risultati delle analisi 1D mostrano come le caratteristiche dei terreni su cui l'edificio in studio è fondato abbiano prodotto amplificazioni locali di entità

modesta.

1. Introduzione

La risposta dinamica di una struttura soggetta ad azione sismica risulta influenzata dalle caratteristiche di resistenza e deformabilità del terreno su cui è fondata. A causa della variabilità geomorfologico-stratigrafica e meccanica dei depositi superficiali la risposta sismica locale può subire sostanziali variazioni anche a brevi distanze sia in termini di ampiezza delle sollecitazioni che in termini di contenuto in frequenza.

Di seguito si presenta lo studio della risposta sismica condotto sul sito su cui sorge la sede del vecchio tribunale di Sant'Angelo dei Lombardi. La particolare configurazione geomorfologica che caratterizza il centro urbano di Sant'Angelo dei Lombardi, se da un lato ha costituito un elemento di difesa del suo patrimonio edilizio dagli attacchi esterni, dall'altro ha senz'altro rappresentato un fattore di vulnerabilità ambientale nei confronti anche di eventi sismici (Hutchinson e Del Prete, 1986; Cotecchia *et alii*, 1986; Budetta *et alii*, 1990; Fenelli *et alii*, 1992).

Si comprende quindi l'importanza che assume la valutazione degli effetti locali nella stima della vulnerabilità degli edifici pubblici e di interesse strategico.

2. Inquadramento geologico-strutturale della zona di Sant'Angelo dei Lombardi

Sotto il profilo geologico l'area di Sant'Angelo dei Lombardi si colloca all'interno del settore assiale della "Catena" Appenninica Meridionale, ove è assai diffusa la presenza di unità geologiche intensamente deformate, rimaneggiate e con comportamento franoso (Ogniben, 1969).

I materiali costituenti i versanti che circondano il centro abitato, rientrano nell'ambito delle formazioni strutturalmente complesse sinorogene (Cotecchia e Del Prete, 1977). In queste formazioni l'originaria sequenza sedimentaria di terreni pelitici alternati a componenti lapidei (calcarei o arenacei) è stata profondamente modificata da meccanismi tettonici polifase e da fenomeni gravitativi profondi che hanno generato strutture complesse in cui una matrice argillosa caotica contiene relitti di orizzonti lapidei di vario spessore, sovente smembrati e disarticolati sino a presentarsi sotto forma di frammenti lapidei, di grandezza variabile dal centimetro ai metri.

Tale segmento di "Catena" si presenta, sotto il profilo geo-strutturale, con un assetto a falde di ricoprimento sottoposto a regimi tettonico-cinematici opposti: di compressione lungo il suo margine orientale e di distensione su quello occidentale (Ciaranfi *et alii*, 1983a e b). Questo è il prodotto di un'evoluzione tettonica assai complessa strettamente legata a quella dell'Appennino Meridionale che vede, a partire dal Tortoniano, le fasi congiunte di convergenza delle placche Africana ed Europea e di apertura del Mar Tirreno, inducenti movimenti migratori del sistema Catena-Avanfossa-Avampaese verso E con subduzione SE-NW via via trascurabile (Patacca *et alii*, 1990, Luongo *et alii*, 1992).

Tale evoluzione ha dato luogo a processi di accavallamento delle falde di ricoprimento che hanno portato, ad una localizzazione e strutturazione eterogenea delle numerose unità tettoniche affioranti, a loro volta fortemente differenziate per età e facies. Tali assetti sono poi stati esasperati da numerosi stadi compressivi che hanno stravolto la geometria strutturale iniziale, comportando uno scollamento, con conseguente sovrascorrimento a E e NE e, in alcuni punti, smembramento di siffatte falde. La geometria derivante è estremamente astrutturata, soprattutto perché ogni fase tettonica ha modificato i rapporti geometrici costruiti nelle fasi precedenti, coinvolgendo prima le unità più interne e successivamente quelle più esterne, in un arco di tempo molto esteso compreso tra il Miocene inferiore ed il Pliocene. Dal Pleistocene, una fase tettonica

compressiva ha ulteriormente modificato l'edificio strutturale determinando un fitto reticolo di fratture sub-verticali e innescando la formazione di depressioni tettoniche, delimitate da un sistema di faglie dirette orientate prevalentemente NW-SE e NE-SW, alcune delle quali tuttora sismicamente attive, in cui si sono differenziate deposte potenti successioni sedimentarie continentali (Ogniben, 1969, 1985; Ciaranfi *et alii*, 1983a e b; Vai, 2001). L'ambiente geologico, così descritto, appartiene ad un attuale distretto altamente sismico (Berardi *et alii*, 1981).

2.1 Caratteri geologici, idrogeologici e geomorfologici di dettaglio

Il centro abitato di Sant'Angelo dei Lombardi (AV), ubicato a circa 850 m s.l.m. su un altopiano bordato da versanti ad elevata acclività, sorge sulla sommità di un piastrone ghiaioso-conglomeratico sovrastante un potente banco di argilliti cretacio-oligoceniche a scaglie. Il piastrone è a sua volta attraversato da fratture sub-verticali ed ha spessore massimo di circa 100 m. La potenza stimata per il banco di argille è di almeno 200 m (Di Nocera *et alii*, 1995).

Il contesto morfologico in cui il sito in esame s'inserisce è marcatamente acclive e densamente urbanizzato tanto da rendere difficoltosa una precisa analisi delle forme presenti (visto il quasi totale mascheramento delle originarie superfici orografiche). Si ritiene tuttavia che l'altopiano sia esente da processi di trasformazione geomorfologica significativi.

Nel settore esaminato affiorano quattro unità lito-stratigrafiche principali, che confermano il modello strutturale "in grande" descritto per il settore appenninico Campano-Lucano:

1. *I materiali di copertura* sono costituiti dall'alterazione del complesso ghiaioso-conglomeratico sottostante. Proprio per le particolari condizioni della loro formazione, questa unità presenta caratteristiche granulometriche e litologiche estremamente variabili sia in senso verticale che orizzontale. Si tratta comunque di limi da argillosi a sabbiosi con sabbie, di colore bruno o rossastro, inglobanti ciottoli arenacei e calcarei con giacitura di tipo primario e secondario in quanto hanno subito un breve trasporto che li ha portati a colmare le depressioni e le discontinuità presenti nel substrato ghiaioso-conglomeratico. Nel caso di giacitura primaria il passaggio tra le due formazioni è graduale, nell'altro caso può essere anche netto. La superficie di separazione è comunque generalmente estremamente articolata ed irregolare e lo spessore del complesso estremamente variabile;

2. *Il piastrone ghiaioso-conglomeratico* è costituito da terreni *pliocenici*, di origine riconducibile ad un ambiente fluviale di tipo deltizio, variamente ricoperti da coltri di materiali alterati di natura calcareo-arenacea. La struttura è indifferenziata con tracce di pseudo-stratificazione messe in evidenza dai livelli lenticolari

sabbioso-limosi intercalati nel deposito o, più raramente, dalla distribuzione di clasti. Il grado di cementazione è generalmente basso ma in alcuni casi diviene elevato e conferisce all'unità caratteristiche di conglomerato lapideo a legame calcitico;

3. *I depositi limo-argillosi e limo-sabbiosi (Pliocene medio-inferiore)* sottostanti il piastrone, sono disposti secondo superfici di contatto sub-orizzontali dislocate da fratture sub-verticali, che costituiscono l'ossatura di una più vasta area circostante il paese. L'unità è strutturata, giuntata e fessurata e presenta strati con giacitura molto variabile, immersione verso i quadranti settentrionali e inclinazione modesta. Verso gli strati superiori sono presenti banchi di marne argillose nelle quali s'intercalano livelli di sabbie limose con lenti di ghiaie ad abbondante matrice sabbiosa;

4. *Il complesso flyschioide*, sottostante l'unità argilloso-sabbiosa, con contatto tettonico, costituisce il termine più antico del substrato ed è composto da pacchi alternati a strati di argilliti, arenarie e calcari riferibili al Miocene inferiore. Tale complesso assume caratteristiche litologico-strutturali variabili in funzione dello spessore dei singoli orizzonti e della prevalenza dell'uno o dell'altro termine litologico che lo costituiscono. La struttura è estremamente disordinata per fenomeni di intensa tettonizzazione conseguente alle fasi di corrugamento della "Catena" appenninica.

Per quanto concerne la presenza della falda freatica, si può affermare che questa ha sede nel complesso ghiaioso-conglomeratico avendo come basamento una formazione argillo-sabbiosa ed alimenta alcune sorgenti superficiali ubicate al contatto tra le due formazioni a quota 780 m circa.

3. Individuazione degli scenari e del moto sismico atteso

Il comprensorio irpino è stato oggetto di numerosi studi di pericolosità sismica condotti a seguito del forte terremoto del 23/11/1980. In particolare, il comune di Sant'Angelo dei Lombardi insieme a Lioni, Torella dei Lombardi, Conza della Campania e Teora sono stati tra i comuni più colpiti dal sisma ed anche i più studiati (Gavarini, 1986; Scirè *et alii*, 1986). Tuttavia, la mancanza di un numero significativo di misure delle proprietà fisico-meccaniche dei depositi superficiali e di pratica, supportata da una solida esperienza scientifica, nella conduzione di studi di pericolosità e di rischio sismico negli anni successivi all'evento, portò a risultati non soddisfacenti che divisero il mondo scientifico italiano (Comitgeo 1982, 1984). Più di recente, sono state invece prodotte carte di pericolosità sismica in termini di PGA per tutto il territorio nazionale (Lucantoni *et al.*, 2001, OPCM n. 3274, 2003) (Figura 1a e b).

Il territorio su cui sorge Sant'Angelo dei Lombardi presenta discontinuità dovute al regime geodinamico del sistema appenninico (Romeo e Pugliese, 1997). Tali discontinuità sono concentrate secondo allineamenti coassiali alla dorsale appenninica centro-meridionale e diradano velocemente verso aree contigue esterne all'asse. Per tale ragione la pericolosità sismica di questa fascia, in cui ricade il territorio di Sant'Angelo dei Lombardi, prevede valori massimi di PGA (con probabilità di superamento del 10% in 50 anni) compresi rispettivamente tra 0.25 g e 0.30 g (Lucantoni *et alii*, 2001) e tra 0.25 g-0.275 g (OPCM n.3274, 2003) (Figura 1).

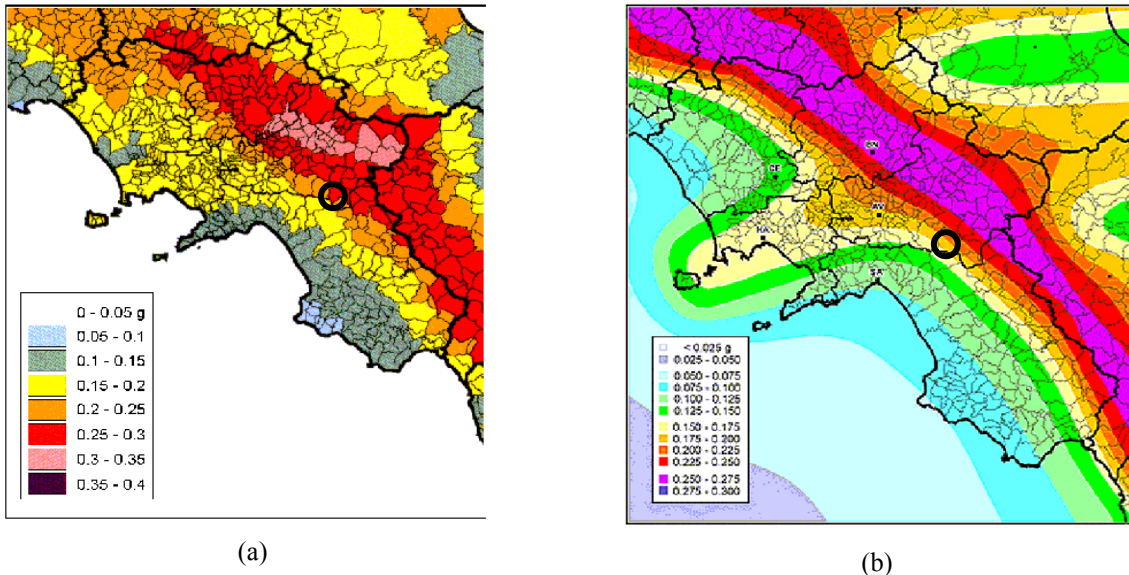


Figura 1: Mappe di pericolosità sismica del territorio di Sant'Angelo dei Lombardi (cerchio in neretto): valori massimi attesi di PGA. (a) da Lucantoni *et alii*, (2001) modificata; (b) da OPCM n.3274, (2003) modificata.

Figure 1: Seismic hazard maps for the Sant'Angelo dei Lombardi area (black circle): PGA maximum value expected. (a) after Lucantoni *et alii*, (2001) modified; (b) after OPCM n.3274, (2003) modified.

Tabella 1: Terremoti di maggiore intensità che hanno interessato il centro abitato di Sant'Angelo dei Lombardi (CPTI2, 2004).
 Table 1: Historical seismic activity at Sant'Angelo dei Lombardi district (CPTI2, 2004).

Data aa/mm/gg	Zona Epicentrale	I ₀ (x10) (MCS)	I _l (x10) (MCS)	L (km)	M _s	Errore associato alla stima di M _s	ZS9
1456 12 05	Beneventano	100	100	34	6.60	0.30	927
1688 06 05*	Sannio	110	95	64	6.72	0.11	927
1694 09 08	Irpinia-Lucania	105	105	15	6.87	0.10	927
1702 03 14	Beneventano-Irpinia	95	90	30	6.32	0.16	927
1732 11 29	Irpinia	105	75	20	6.61	0.14	927
1805 07 26*	Molise	100	65	87	6.57	0.11	927
1857 12 16*	Basilicata	105	75	86	6.96	0.10	927
1930 07 23	Irpinia	100	80	21	6.72	0.04	925
1980 11 23	Irpinia-Lucania	100	100	12	6.89	0.04	927

I₀= Intensità epicentrale; I_l= Intensità locale risentita a Sant'Angelo dei Lombardi; L= distanza epicentrale; M_s=Magnitudo dalle onde superficiali; ZS9= zona sismogenetica di appartenenza secondo la classificazione del 2004; *= I terremoti asteriscati sono eventi far-field che hanno provocato risentimenti significativi nell'abitato di Sant'Angelo dei Lombardi, i rimanenti eventi sono near-field.

Inoltre, la Tabella 1 mostra che Sant'Angelo dei Lombardi è stato interessato sia da eventi sismici *far-field* a distanza epicentrale variabile superiore ai 60 km ed origine per lo più lucana e molisana, sia da eventi *near-field*, con distanze epicentrali di 10-40 km ed origine in corrispondenza dei segmenti coassiali all'Appennino Campano-Lucano. Più recentemente, tale settore appenninico è stato interessato dalla sequenza sismica occorsa nell'aprile del 1996 localizzata in un intorno quasi coincidente con la porzione epicentrale del terremoto del 23/11/1980 (CPTI2, 2004).

Benché l'area sia caratterizzata da un elevato tasso di attività sismica, il terremoto del 1980 rimane ancora l'evento più importante com'è mostrato in Figura 2 (Luongo *et alii*, 1992).

Tuttavia, gli Autori che riferirono nei periodi immediatamente successivi all'evento sismico del novembre 1980 (CNR, 1983) hanno sottolineato che gli effetti del sisma sono stati differenziati in intensità in base alla natura geologica dei siti interessati (aree a significativa pericolosità locale). In questo contesto s'inserisce anche il centro abitato di Sant'Angelo dei Lombardi, caratterizzato da un assetto geologico e presenza di materiali dalle proprietà fisico-meccaniche variabili, che ha condizionato fortemente la distribuzione areale del danneggiamento, risultata eterogenea e assai complessa.

La regione irpina d'altronde presenta un'attività sismica importante, ben documentata nell'intervallo temporale compreso tra il 1456 e il 1980. Essa è caratterizzata da terremoti distruttivi con intensità superiori all'VIII grado MCS e con magnitudo variabile tra 6.4 e 7.0 (Tabella 1) (CPTI2, 2004).

Studi condotti sulla sismicità storica di quest'area hanno consentito di schematizzare i seguenti tratti peculiari:

1. *Meccanismi di rottura complessi prevalenti per i grandi terremoti*, come nei terremoti del 1456 e del 1980. Tale complessità può trovare giustificazione in una costituzione fratturata del mezzo dove le strutture

longitudinali alla Catena possono essere notevolmente segmentate da faglie trasversali generate dal regime geodinamico tuttora in atto (Luongo *et alii*, 1992);

2. *Attivazione di strutture trasversali alla catena prodotte da terremoti coassiali alla catena stessa, oppure effetto di canalizzazione di energia sismica ad opera di quest'ultimi*. In tal caso si assiste ad una tendenziale rotazione delle isosiste dalla direzione prevalente NW-SE a quella NS come si osserva per il campo macrosismico dell'evento del 1805 (Luongo *et alii*, 1992);

3. *Variazione delle condizioni di sforzo nelle faglie adiacenti alle strutture di innesco di forti terremoti normali dell'Appennino meridionale*: i terremoti del 1702 e 1732 sono stati influenzati dagli eventi del 1694 e 1688 (Nostro *et alii*, 1996);

4. *Separazione dei periodi di sismicità da periodi di quiescenza talvolta brevi e a volte molto estesi*. Ciò è dovuto al notevole quantitativo energetico rilasciato dalle strutture di rottura che cambia lo stato di sforzo anticipandone l'occorrenza attesa di circa 50-100 anni (Nostro *et alii*, 1996).

La complessità sismica dell'area è testimoniata non solo dalla notevole variabilità del campo *stress-strain*, ma anche dalla differenziazione dello stesso rispetto ai campi di sforzi agenti nella parte meridionale (Arco Calabro) e centro-settentrionale dell'Appennino (Arco Toscano-Umbro-Marchigiano). Ne consegue che nell'ambito dell'evoluzione geodinamica della penisola italiana, tale settore è tuttora considerato *zona di transizione*, caratterizzato da differenti e complesse strutture tettoniche (Meletti *et alii*, 2000; Montone *et alii*, 2003). Quanto detto ribadisce l'elevata pericolosità sismica, che contraddistingue l'area, suffragata anche dalla più recente proposta di *Zonazione sismogenetica* di tutto il territorio italiano. Tale settore si considera ricadente nel dominio della zona-sorgente 927 (Meletti e Valensise, 2004).

Dalla conoscenza dell'evoluzione spazio-temporale della sismicità della regione di appartenenza di Sant'Angelo dei Lombardi, derivano due considerazioni. La prima riguarda l'attività sismica recente e attuale che

non risulta affatto associata ad una particolare struttura tettonica, ma al contrario è influenzata da molteplici sorgenti. La seconda riguarda la redistribuzione dello sforzo conseguente ad un forte terremoto; essa è influenzata di volta in volta dall'evento sismico occorso.

3.1. Scelta delle registrazioni accelerometriche di riferimento

I dati strumentali più recenti e più significativi per il sito di Sant'Angelo dei Lombardi sono quelli registrati durante il terremoto del 23/11/1980. Tra tutte le stazioni di registrazione attive durante l'evento è stata considerata la terna costituita dalla stazione di Bisaccia (AV), di Calitri (AV) e di Sturno (AV), più prossime al sito in studio. Tali stazioni saranno di seguito riferite rispettivamente con le sigle BIS, CAL e STU.

La scelta della terna di registrazioni è stata operata in funzione delle analisi numeriche 1D da effettuarsi. Infatti non è stata considerata la direttività dell'azione sismica risentita in Sant'Angelo e si è cercato di esaminare registrazioni accelerometriche con differenti caratteristiche per indagare diverse tipologie di input. Inoltre, le tre stazioni accelerometriche sono state scelte sulla base delle informazioni fornite dallo ESD (*European Strong-motion Database* <http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/>) in riferimento ai suoli su cui le tre stazioni sono state fondate:

- Bisaccia: substrato roccioso, componente orizzontale E-W con $PHA = 0.076 \text{ m/s}^2$, registrata alle 19:35:04 filtrato con HP: 0.13 Hz e LP: 20 Hz;
- Sturno: substrato roccioso, componente orizzontale E-W con $PHA = 0.056 \text{ m/s}^2$, registrata alle 19:24:54 filtrato con HP: 0.21 Hz e LP: 23 Hz;
- Calitri: substrato costituito da suolo rigido, componente orizzontale E-W con $PHA = 0.177 \text{ m/s}^2$, registrata alle 19:24:54 filtrato con HP: 0.2 Hz e LP: 23 Hz.

La Figura 3 mostra gli spettri di risposta in accelerazione relativi alle registrazioni considerate non normalizzate rispetto al picco al suolo di Sant'Angelo.

Nella Tabella 2 sono stati riportati in sintesi i parametri caratteristici delle registrazioni accelerometriche delle tre stazioni con PHA riportate al valore di ancoraggio al sito di Sant'Angelo.

Infatti, per effetto della differente distanza sito-sorgente tra gli accelerogrammi campione e quelli da applicare al sito in esame, si sono scalate tutte le accelerazioni orizzontali di picco delle componenti E-W al valore di ancoraggio dell'accelerazione massima a_{max} attesa al suolo di Sant'Angelo dei Lombardi, pari a 0.3316 g (indicato dal Servizio Sismico Nazionale secondo la recente Riclassificazione Sismica 2003).

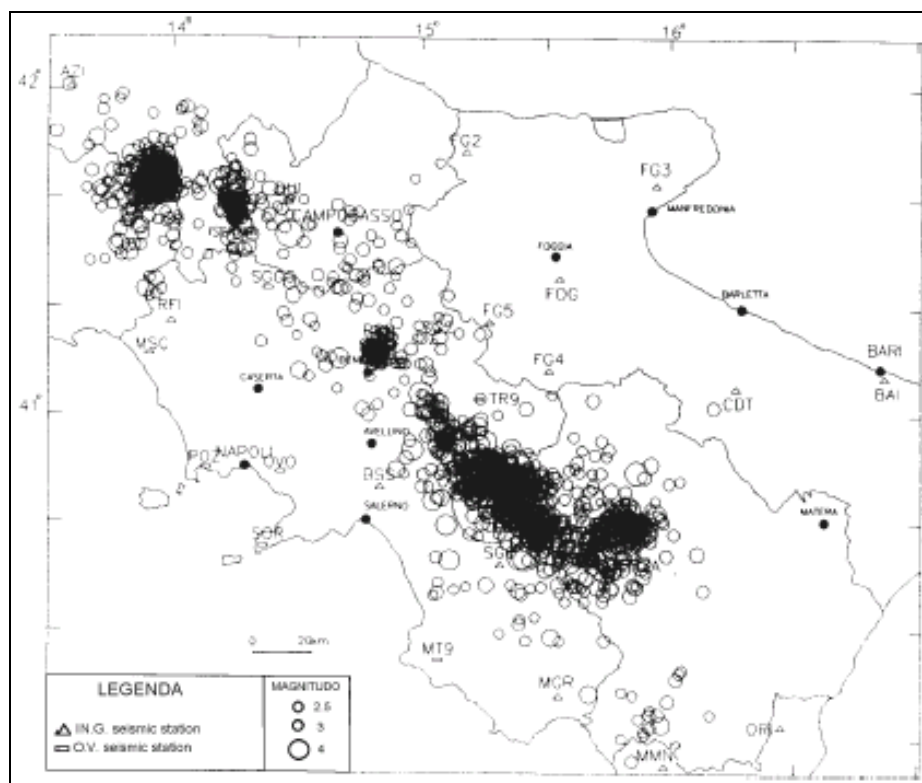


Figura 2: Distribuzione epicentrale e livelli energetici dell'attività sismica dal 1980 al 1991 nell'Appennino Meridionale (Alessio et alii, 1993).

Figure 2: Epicenter and Magnitude of earthquake events occurred from 1980 to 1991 in the Southern Apennine (Alessio et alii, 1993).

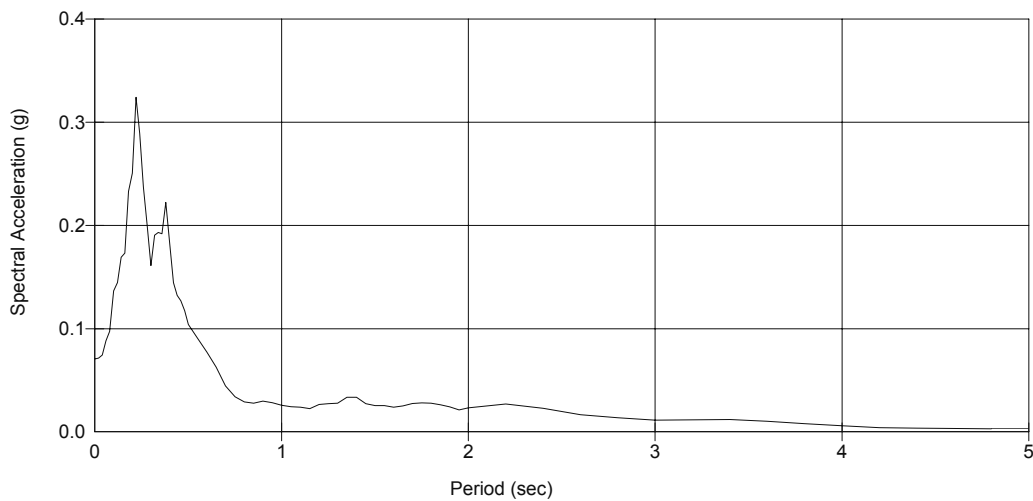
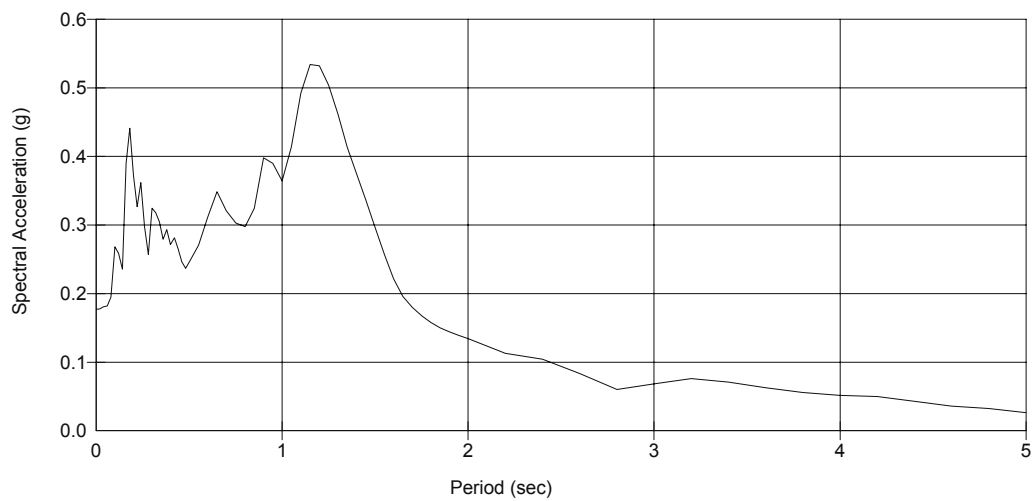
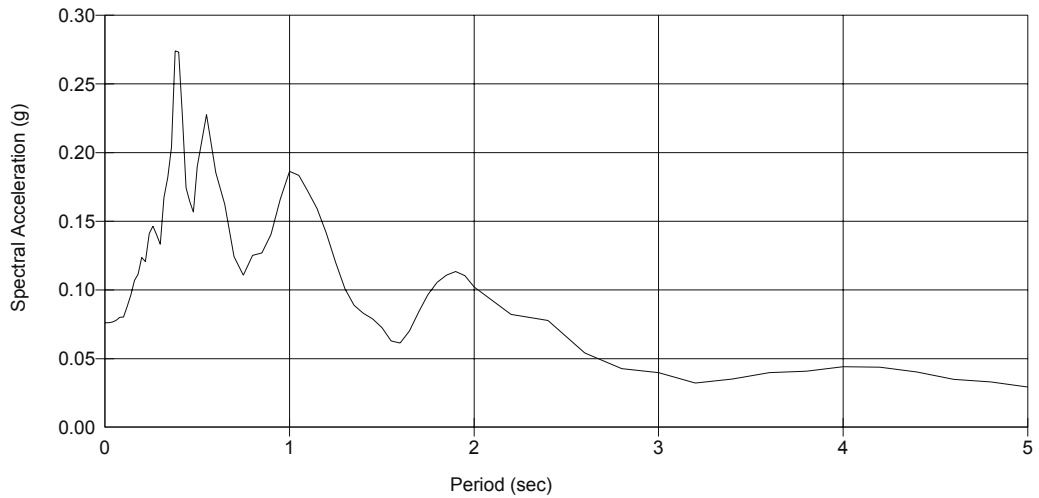


Figura 3: Spettri di risposta in accelerazione al 5% delle componenti orizzontali nelle stazioni di STU (a), CAL (b), BIS (c) utilizzate per le analisi 1D condotte nel sito di Sant'Angelo dei Lombardi.

Figure 3: Horizontal acceleration response spectra at STU(a), CAL(b), BIS(c) stations for 1D analyses at Sant'Angelo dei Lombardi site.

Tabella 2: Parametri caratteristici dell'input sismico di riferimento.
 Table 2: Characteristic values for the seismic input in numerical simulations.

Stazioni Accelerometriche	Distanza da Sant'Angelo dei Lombardi (km)	PHA (g)	Frequenza Principale (Hz)	Durata (s)
BIS	19.4	0.3316	0.566	12
CAL	11.5	0.3316	0.813	12
STU	22.2	0.3316	4.552	14

4. Caratterizzazione dinamica del sito dell'Ex tribunale

Per poter realizzare una efficiente simulazione del comportamento sismico locale dei depositi superficiali è stato necessario effettuare una campagna di indagini esplorative del sottosuolo finalizzata alla definizione dei parametri fisico-meccanici e delle potenze dei litotipi presenti.

In fase preliminare sono stati riordinati i dati provenienti da precedenti campagne esplorative condotte nell'area. La Tabella 3 riporta il quadro complessivo dei sondaggi (a carotaggio continuo) e delle prove eseguite nella nuova campagna d'indagine, con indicazione delle profondità massime raggiunte nelle verticali esplorate, il numero e le quote di estrazione dei campioni indisturbati, le prove in sito e di laboratorio effettuate.

Nonostante le operazioni di carotaggio siano risultate di difficile esecuzione per le assai frequenti variazioni di consistenza dei materiali, durante l'esecuzione dei fori S1 ed S2, sono state effettuate 4 prove penetrometriche dinamiche (SPT). In fase successiva i fori S1 ed S3 sono stati rivestiti e cementati, e predisposti per l'esecuzione di prove *down hole* (DH). Tali prove sono state finalizzate alla determinazione diretta del modulo di taglio G_0 , mediante la misura delle velocità delle onde di taglio (V_S) alle varie profondità.

Inoltre attraverso una prova di taglio torsionale ciclico (TTC), eseguita su campione indisturbato, è stato possibile caratterizzare dinamicamente il limo sabbioso (ricorrente nei sondaggi) mediante la curva di decadimento del modulo di taglio, G , e del fattore di

smorzamento, D , in funzione del livello di deformazione tangenziale, γ . In Tabella 4 sono riportati sinteticamente, insieme al valore dell'indice dei vuoti, e_0 , e della pressione efficace di confinamento, σ'_0 , le condizioni di prova in laboratorio ed i valori iniziali del modulo di rigidezza al taglio, G_0 , e del fattore di smorzamento, D_0 ottenuti. Nella medesima tabella sono anche riportati i valori della soglia lineare, γ_l , e della soglia volumetrica, γ_v , ricavati assumendo un valore di G/G_0 rispettivamente pari a 0.95 e 0.65. In Figura 4 sono riportati gli andamenti delle curve $G(\gamma/G_0)$ e $D(\gamma)$.

È stata determinata, inoltre, la rigidezza al taglio, G_0 , attraverso leggi empiriche che correlano la V_S ai dati ricavati dalle prove penetrometriche dinamiche mediante le due leggi di Otha and Goto (1978) e di Yoshida *et alii* (1988), anche con la finalità di verificare l'attendibilità delle correlazioni suddette, per i tipi di terreni indagati.

1 - Otha and Goto (1978):

$$V_S = 54.33 \cdot (N_{SPT})^{0.173} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \left(\frac{Z}{0.303} \right)^{0.193} \quad [1]$$

che lega V_S alla la profondità Z (m) e ai parametri α e β che tengono conto rispettivamente dell'età del deposito (Olocene = 1.00, Pleistocene = 1.303) e del litotipo (argille = 1.00, sabbie = 1.806).

2 - Yoshida *et alii* (1988):

$$V_S = \beta \cdot (N_{SPT})^{0.25} \cdot \sigma'_{v0}{}^{0.14} \quad [2]$$

che esprime V_S in funzione della pressione efficace

Tabella 3: Quadro complessivo delle indagini condotte sul terreno di fondazione.

Table 3: Synthesis of the investigation campaign of seismic characterization of soils around the Court building.

Sondaggi	Z_{max}^* [m]	Campioni prelevati	$Z_{prelievo}^*$ [m]	Prove in sito		Prove di laboratorio		
				SPT	DH	Class.	DST	TTC
S1	30.00	C1	6.50-7.00	Z_{SPT} : 11.00	x	x	x	-
				Z_{SPT} : 18.00				
S2	15.00	C2	2.50-3.00	Z_{SPT} : 6.00	-	x	x	-
		C3	2.00-2.50	Z_{SPT} : 12.00				
S3	15.00	-	-	-	x	-	-	-

*Le quote indicate sono riferite dal piano campagna.

SPT = Prove penetrometriche dinamiche SPT

DH = Prove sismiche in foro in onde P ed SH (indagini down-hole)

Class. = Prova di Classificazione

DST = Prova di Taglio Diretto

TTC = Prova di Taglio Torsionale Ciclico

Tabella 4: Condizioni di prova per il campione di limo sabbioso sottoposto al Taglio Torsionale Ciclico.
 Table 4: Boundary conditions for Cyclic Torsional Shear test.

H [cm]	σ'_{v0} [kPa]	e_0 [-]	G_0 [MPa]	D_0 [%]	γ_c [%]	γ_v [%]
9.90	300	0.630	46	2.618	0.0031	0.0025

*La prova non-drenata è stata effettuata su provino cilindrico pieno (R=25 mm; h=990 mm)

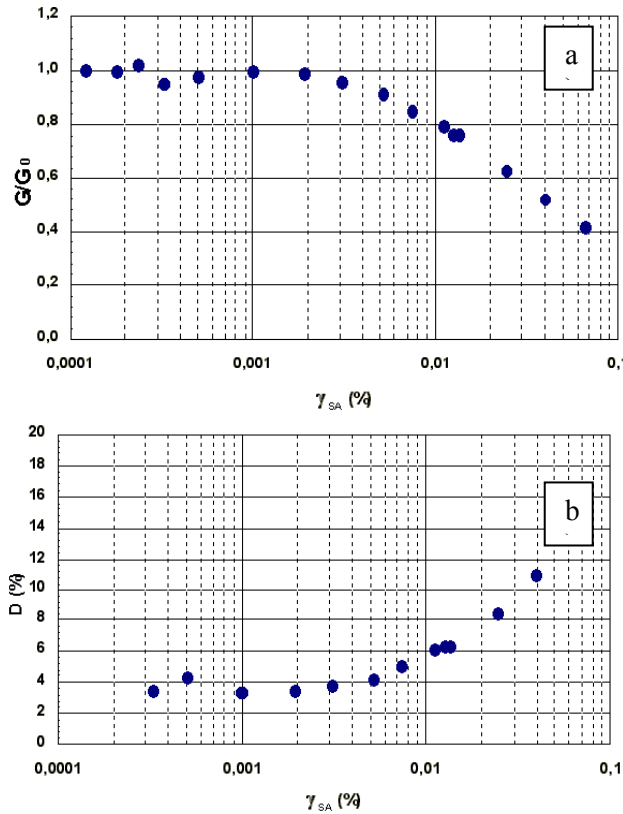


Figura 4: a): Andamento del rapporto $G(\gamma)/G_0$ con la deformazione tangenziale; b): variazione del rapporto di smorzamento, $D(\gamma)$.
 Figure 4: Shear modulus ratio $G(\gamma)/G_0$ and Damping ratio $D(\gamma)$ diagrams.

verticale, σ'_{v0} , e del fattore geologico β (che assume un valore pari a 0.55 per qualunque terreno oppure i seguenti valori: 0.49 per sabbie fini, 0.50 e 0.60 per terreni costituiti rispettivamente da almeno il 25% di ghiaia, nel primo caso e dal 50%, nel secondo).

Noti così i valori delle velocità delle onde di taglio si è

poi ricavato G_0 attraverso la legge:

$$G_0 = \rho \cdot V_S^2 \quad [3]$$

dove ρ è la densità.

In Tabella 5 sono riportati i valori di G_0 ottenuti mediante le espressioni empiriche a partire dai valori misurati in laboratorio con la prova TTC e dai valori ricavati dalle prove down hole. Come si può osservare il buon accordo fra i valori di G_0 ricavati dai dati misurati in-situ e quelli ottenuti mediante le correlazioni empiriche proposte, viene conservato solo in corrispondenza degli strati superficiali; man mano che si passa a profondità più elevate, le due Eq. [1] e [2] sembrano sottostimare i valori delle rigidzze al taglio massime.

Tali risultati sono compatibili con i valori di V_S calcolati da Jamiolkowski *et alii* (1988) mediante la Eq. [1] messi a confronto con i valori misurati di V_S per alcuni terreni italiani.

Per tutte le litologie diverse dai limi-sabbiosi, le leggi di variazione del modulo di taglio normalizzato, $G/G_0(\gamma)$, e del fattore di smorzamento, $D(\gamma)$ sono state ricavate da relazioni di letteratura. Tra queste, per i depositi non ghiaiosi, sono state utilizzate le leggi proposte da Yokota *et alii* (1981), definite mediante le seguenti espressioni:

3 - Legge di decadimento del modulo di taglio:

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha \gamma^\beta} \quad [4]$$

4 - Legge di variazione del rapporto di smorzamento:

$$D = D_{\max} e^{\left(\lambda \frac{G}{G_0}\right)} \quad [5]$$

con α , β , D_{\max} e λ parametri empirici di adattamento dei due modelli ai dati sperimentali.

Tabella 5 – Confronto tra i valori di G_0 ricavati da correlazioni empiriche, da misure in sito e da prova di laboratorio.
 Table 5 - Comparison between G_0 measured and calculated values.

Profondità (m)	G_0 correlazioni empiriche		G_0 sito ³ (MPa)	G_0 lab ⁴ (MPa)	G_0 corr ⁵ / G_0 lab (MPa)	G_0 sito/ G_0 lab (MPa)
	G_0 ¹ (MPa)	G_0 ² (MPa)				
0-1.00	33.427	16.703	75.841	-	-	-
1.00-11.00	110.837	62.397	128.669	46.2	2.28 ¹ 1.35 ²	2.78
11.00-18.00	155.467	75.145	201.044	-	-	-
18.00-30.00	305.976	156.869	644.47	-	-	-

¹da Otha and Goto, 1978

²da Yoshida et alii, 1988

³da V_S misurate con prove DH

⁴da prova TTC

⁵ G_0 corr = G_0 correlazioni empiriche

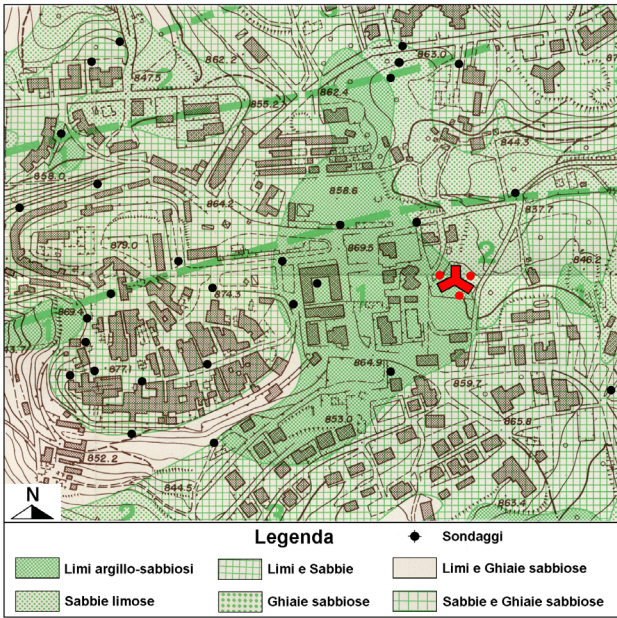


Figura 5: Stralcio della carta geo-litologica di superficie del sito di Sant'Angelo dei Lombardi (scala 1:5000) (Modificato da Carta Geologica 1:50000 (APAT 2004)). In rosso sono indicati l'edificio dell'ex tribunale e l'ubicazione delle verticali esplorate nella nuova campagna d'indagine. In nero sono indicati i sondaggi effettuati in campagne di indagine precedenti.

Figure 5: A piece of the ge-lithological map of Sant'Angelo dei Lombardi (scale 1: 5000). Red and Black circles correspond to new and old soil investigation surveys respectively. The red element is the Court building (After Geologic map 1:50000 (APAT 2004) modified).

Nel caso delle ghiaie con matrice limo-sabbiosa, si sono assunte soglie di deformazione elastica (γ_e) e volumetrica (γ_v) corrispondenti rispettivamente a G/G_0 pari a 0.95 e 0.4; si è utilizzata per $D(\gamma)$ la relazione di Yokota *et alii* (1981) (vedi Eq. [5]) e per G/G_0 (γ) la relazione di Rollins *et alii* (1998):

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + 16\gamma \cdot (1.2 + 10^{-20\gamma})} \quad [6]$$

Nella carta di Figura 5, insieme ad una rappresentazione schematica della geologia di superficie, è indicata l'ubicazione delle verticali esplorate nella nuova e nelle precedenti campagne d'indagine.

Data la particolare forma geometrica dell'edificio pubblico, ad Y, si è deciso di ubicare i 3 sondaggi lungo i tre lati esterni del corpo di fabbrica raggiungendo, come indicato in tabella, profondità variabili dai 15 a 30 m (Figura 5). In tal modo, nel rispetto delle prescrizioni della recente Ordinanza PCM n. 3274 del 20.03.2003, si è calcolata la categoria di suolo di appartenenza delle tre verticali indagate mediante la determinazione del V_{S30} . I tre sondaggi indicano che il sito ricade nella categoria C, con valore di V_{S30} intorno ai 350 m/s.

Le simulazioni numeriche sono state effettuate sulla base della caratterizzazione delle colonne di terreno e nell'ipotesi semplificata di propagazione

monodimensionale delle onde di taglio. Tale scelta è stata condizionata dalla caratterizzazione puntuale effettuata e dalla assenza di informazioni sulla morfologia sepolta dei depositi tali da consentire una affidabile ricostruzione di sezioni litologico-tecniche bidimensionali. Il terreno è stato modellato come un materiale monofase a comportamento lineare equivalente e le analisi sono state condotte in termini di tensioni totali. Si è assunto che le colonne indagate poggino su uno strato a giacitura orizzontale deformabile ed infinitamente esteso al quale vengono applicati, in termini di accelerazioni orizzontali e verticali, gli input sismici di riferimento.

4.1. Caratterizzazione dinamica dell'edificio dell'ex Tribunale

Le prove sperimentali sul tribunale di S. Angelo dei Lombardi, si sono tenute il 29/04/2004. Tali prove avevano lo scopo di caratterizzare dinamicamente, da un punto di vista sperimentale, la struttura, utilizzando come fonte di eccitazione una vibrodina e come sensori di acquisizione degli accelerometri. Tutta la strumentazione utilizzata è stata messa a disposizione dalla STRAGO s.r.l.

Per l'eccitazione della struttura è stata utilizzata una vibrodina a masse controrotanti. Le masse controrotanti sono messe in rotazione da un motore elettrico, controllato da una centralina elettronica, con cui è possibile variare la velocità di rotazione delle stesse, facendo quindi variare la frequenza. Per l'acquisizione della risposta dinamica della struttura, sono stati utilizzati 15 sensori accelerometrici. Le risposte dei sensori sono state acquisite in un *range* in frequenza (0-50 Hz) e per un tempo complessivo di 15 s per ogni singola acquisizione, più quattro secondi di *pre trigger*.

Sono inoltre state realizzate diverse prove, variando le masse calettate sui dischi e la velocità di rotazione dei dischi stessi, in modo da poter eccitare di volta in volta la struttura ad una frequenza diversa, in maniera da studiare tutto il *range* di interesse. Per ulteriori dettagli sulle prove effettuate si veda D'Esposito e Spatola (2004) mentre la Tabella 6 riporta i primi tre periodi propri e modi di vibrare della struttura.

Tabella 6: Periodi propri e modi di vibrare dell'Ex-tribunale di Sant'Angelo dei Lombardi.

Tabella 6: The first three eigenvalues and eigenvectors of the court building at Sant'Angelo dei Lombardi.

	PERIODO (s)	TIPOLOGIA
I	0.40	Torsionale
II	0.34	Flessionale
III	0.30	Flessionale

4.2. Analisi della risposta sismica

L'analisi della risposta sismica in condizioni *free-field* è stata condotta in corrispondenza delle tre verticali esplorate S1, S2 e S3 con l'ausilio del codice di calcolo ProShake (EduPro, 1996). Una sintesi dei litotipi e delle

potenze degli strati nelle tre verticali è presentata in Tabella 7.

I terremoti di progetto considerati sono stati 3, selezionati tra gli accelerogrammi registrati in stazioni limitrofe al sito di Sant'Angelo dei Lombardi in occasione dell'evento sismico Irpino del 23.XI.1980. Tali accelerogrammi sono stati deconvoluti al bedrock sismico mediante lo stesso codice ProShake.

I risultati sono stati valutati in termini di spettri di risposta in accelerazioni $Sa(T)$ ed in pseudo-velocità $Sv(T)$. È stata inoltre calcolata l'intensità spettrale (SI) sia nell'intervallo di periodi 0.1-2.5 s, come definito da Housner (1952), sia nell'intervallo 0.1-0.5 s, come suggerito da Pergalani *et alii* (1999; 2000):

$$SI[\xi] = \int_{0.1}^{2.5} PSV[T, \xi]dT \quad [7]$$

dove PSV è l'ordinata spettrale dello spettro di pseudo-velocità, T è il periodo e ξ è lo smorzamento.

Successivamente è stata valutata l'entità dell'amplificazione in termini di Fattore di amplificazione, Fa , come rapporto tra le intensità spettrali valutate alle interfacce dei diversi litotipi ed al *bedrock*.

Infine sono state stimate le frequenze/periodi per i quali si ha un effetto di amplificazione dovuta ai depositi superficiali.

La scelta di questo indicatore di amplificazione (Eq. 7) è stata operata in base all'esperienza maturata in altri siti (Vessia *et alii* 2007) ed in funzione della sua capacità di sintetizzare gli effetti di amplificazione dei terreni di fondazione in riferimento ad un intervallo di periodi in cui sono contenuti i primi tre periodi propri della struttura considerata (Tabella 7).

L'andamento degli spettri di risposta elastici in accelerazione con smorzamento al 5% (Figura 6) mostra due tipologie di amplificazioni: per la registrazione di

STU si osserva quasi un unico picco in corrispondenza di $T=0.1$ s mentre per le registrazioni di CAL e BIS i picchi sono multipli nell'intervallo 0.1÷1.0 s sebbene le amplificazioni più significative si registrino in corrispondenza di due periodi: $T=0.1$ s e $T=1.0$ s.

Tale risposta si ripete per tutte e tre le colonne analizzate ma risulta di massima entità in corrispondenza dell'input di STU per la colonna S2 pari a 2 volte l'input. Per la colonna S1, l'amplificazione sismica si manifesta già in corrispondenza dell'interfaccia Sabbia/Ghiaia e viene ulteriormente aumentata, conservandone la forma spettrale, fino all'interfaccia Limo argillo-sabbioso/Limo sabbioso.

Gli spettri in accelerazione relativi agli input di BIS e STU sono piuttosto simili sia dal punto di vista della durata che del contenuto in frequenza. Tuttavia per BIS la zona piatta degli spettri si verifica in corrispondenza di un ampio *range* di valori di periodo ($T=2.0-6.0$ s) con valori intermedi dell'ordinata spettrale, per STU, si assiste allo spostamento delle amplificazioni verso il campo dei bassi periodi ed un appiattimento repentino ($T=1.0-3.0$ s). Al crescere del periodo, gli spettri di risposta presentano poi un andamento generalmente decrescente e la trasmissione dell'eccitazione sismica può considerarsi ormai esaurita in corrispondenza di $T=3$ s per STU, di $T=5$ s per CAL, e di $T=6$ s per BIS.

Risulta interessante notare come tali elevate amplificazioni non arrivino in superficie, dove i fattori di amplificazione calcolati nell'intervallo di periodi 0.1÷0.5 s, per tutte e tre le colonne sono comprese tra 1.0 ed 1.3 come mostrano le Figure 6-8(d). Infatti il fattore di amplificazione ha l'unico compito di fornire un indicatore globale di amplificazione che ci suggerisca quale possa essere l'effetto globale di amplificazione del suolo

Tabella 7: Valori di sintesi delle caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi costituenti le tre verticali simulate numericamente con il ProShake.

Table 7: Synthesis of the physical and mechanical properties of soils made up of the three columns for 1D numerical simulations by ProShake.

Litotipi	S1 (m)	γ (kN/m ³)	V_s (m/s)
Limo sabbioso (plastico)	9.5	19.5	280
Limo argillo-sabbioso	2.5	16,0	320
Sabbia sottile	1.5	18.2	385
Ghiaia con matrice limo-sabbiosa	2.8	20.9	330
Limo sabbioso	1.7	17,0	395
Ghiaia con matrice limo-sabbiosa	Bedrock	21	535
	S2 (m)	γ (kN/m ³)	V_s (m/s)
Limo argillo-sabbioso (solido-plastico)	1.7	16,0	320
Limo sabbioso (plastico)	5.70	19.5	280
Limo saturo molle-plastico	1.0	18.8	240
Limo sabbioso (plastico)	3.0	19.5	280
Ghiaia con matrice limo-sabbiosa	Bedrock	21,0	540
	S3 (m)	γ (kN/m ³)	V_s (m/s)
Limo sabbioso (plastico)	4.2	19.5	385
Ghiaia con matrice limo-sabbiosa	3.7	21,0	430
Alternanza sabbiosa con ghiaia	1.0	18.5	450
Limo sabbioso (plastico)	Bedrock	19.5	560

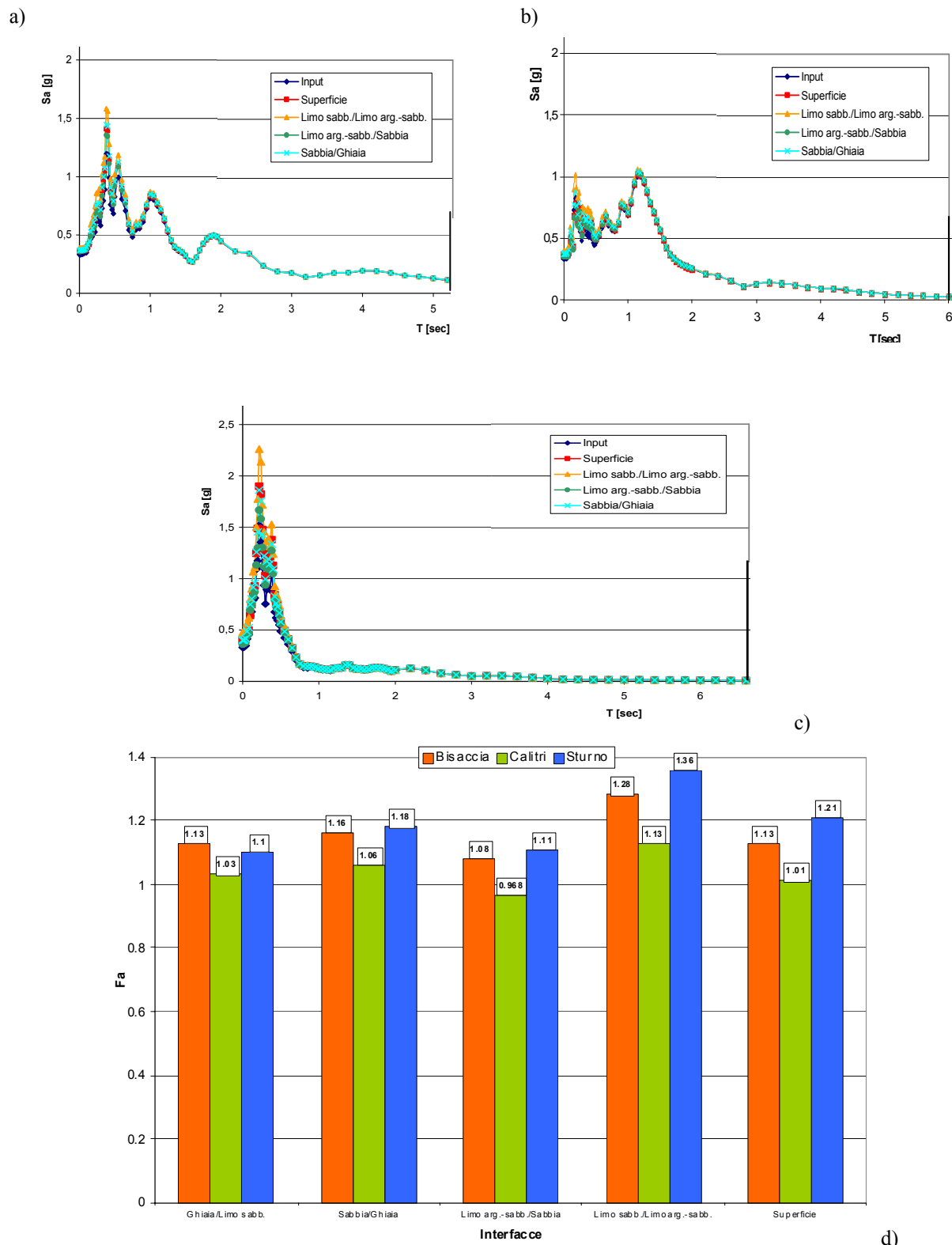


Figura 6: Spettri di risposta al 5% in accelerazione alle diverse interfacce per la colonna S1 in corrispondenza dei tre accelerogrammi di input: BIS(a), CAL(b) e STU(c); (d) valori del fattore di amplificazione, F_a , calcolati nell'intervallo 0.1-0.5 s per la colonna: S1.

Figura 6: Acceleration response spectra at 5% damping calculated at each soil boundary along S1 column corresponding to the three input accelerograms: BIS(a), CAL(b) e STU(c);(d) amplification factor F_a calculated along S1 column for periods varying between 0.1 s and 0.5 s.

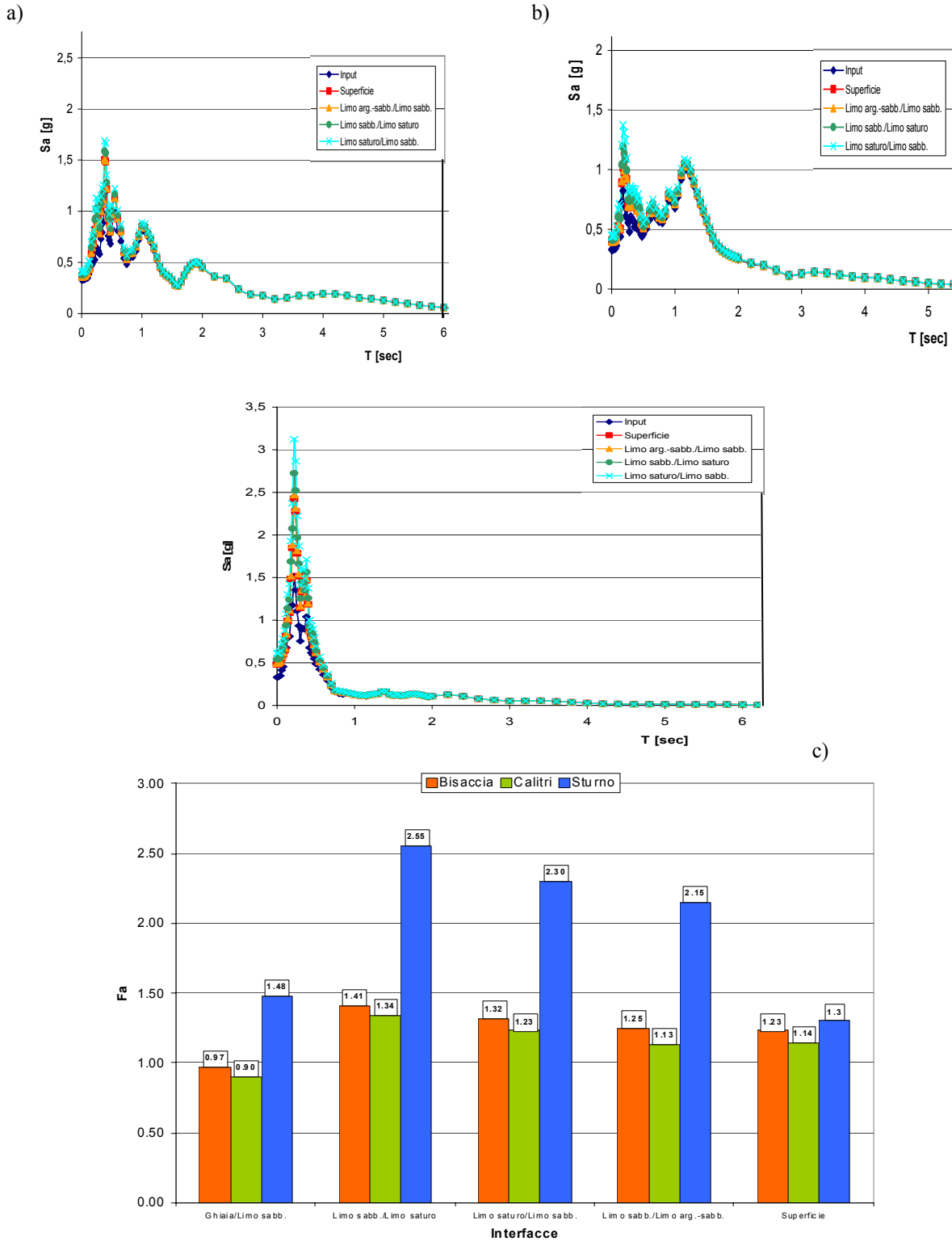


Figura 7: Spettri di risposta al 5% in accelerazione alle diverse interfacce per la colonna S2 in corrispondenza dei tre accelerogrammi di input: BIS(a), CAL(b) e STU(c); (d) valori del fattore di amplificazione, F_a , calcolati nell'intervallo 0.1-0.5 s per la colonna: S2.
 Figura 7: Acceleration response spectra at 5% damping calculated at each soil boundary along S2 column corresponding to the three input accelerograms: BIS(a), CAL(b) e STU(c); (d) amplification factor F_a calculated along S2 column for periods varying between 0.1 s and 0.5 s.

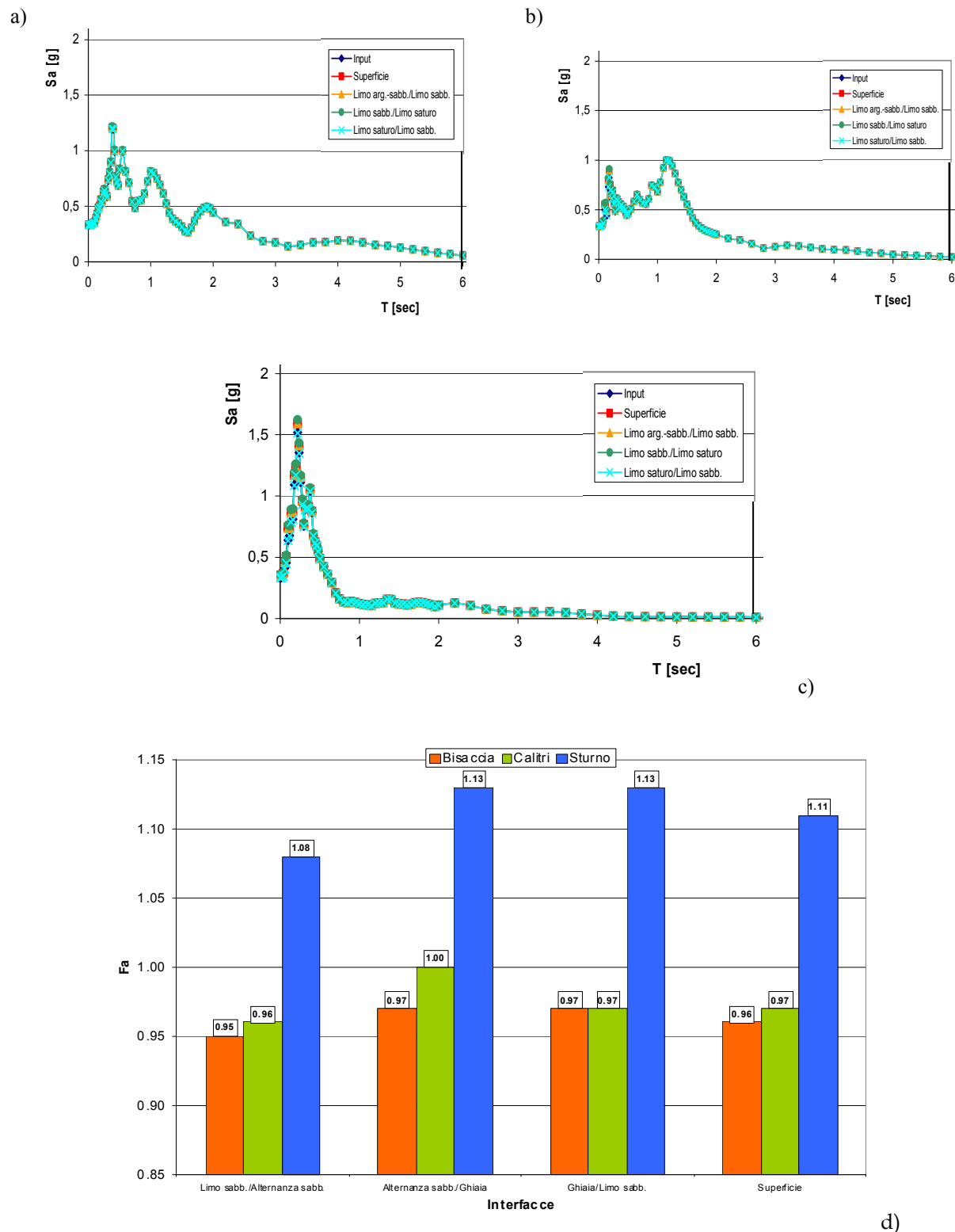


Figura 8: Spettri di risposta al 5% in accelerazione alle diverse interfacce per la colonna S3 in corrispondenza dei tre accelerogrammi di input: BIS(a), CAL(b) e STU(c); (d) valori del fattore di amplificazione, F_a , calcolati nell'intervallo 0.1-0.5 s per la colonna: S3.
 Figura 8: Acceleration response spectra at 5% damping calculated at each soil boundary along S3 column corresponding to the three input accelerograms: BIS(a), CAL(b) e STU(c); (d) amplification factor F_a calculated along S3 column for periods varying between 0.1 s and 0.5 s.

nell'intervallo di periodi che più influiscono sull'edificio. Dai grafici emergono lievi amplificazioni in superficie differenziate per le 3 registrazioni di input. Tuttavia lungo le colonne si nota che:

- per le colonne S1 ed S2, i valori massimi di F_a si registrano in corrispondenza dell'input sismico di STU e rispettivamente in corrispondenza delle interfacce Limo argillo-sabbioso/Limo sabbioso, per S1, e Limo saturo/Limo sabbioso, per S2, e questi sono dello stesso ordine di grandezza;

- per le tre colonne analizzate, i valori di F_a rilevati in superficie sono pressoché unitari e comunque i valori massimi (compresi tra 1.11 e 1.30) si registrano in corrispondenza dell'input sismico relativo a STU.

I fattori di amplificazione appaiono tanto più elevati in superficie quanto più si approfondiscono i depositi intermedi costituiti dal limo argillo-sabbioso e dalle alternanze limo-sabbiose. Per il sito in studio le maggiori amplificazioni si registrano in corrispondenza della zona orientale del sito stesso, in sinistra dell'edificio pubblico laddove sono presenti coltri di depositi eluvio-colluviali a struttura indifferenziata con livelli limo-sabbiosi intercalati a materiali argillo-sabbiosi e lenti ghiaiose, alterati e di natura variabile sia in senso verticale che orizzontale.

Il confronto tra i risultati ottenuti dall'analisi di risposta sismica locale e quelli ottenuti dalla determinazione sperimentale dei primi tre periodi propri della struttura (condotta nell'ambito del progetto RESIS) è stato condotto sulla base delle informazioni sinteticamente riportate in Tabella 7.

Il primo periodo proprio è legato ad una deformazione torsionale e quindi non è influenzato dalle sollecitazioni flessionali indotte dalle componenti orizzontali del moto sismico in superficie ottenute mediante lo studio di risposta sismica condotto. I periodi II e III, sono vicini al periodo di 0.3 s che risulta corrispondere al periodo predominante degli spettri in accelerazione ottenuti dallo studio di amplificazione condotto per tutte e tre le registrazioni considerate. Tuttavia l'ampiezza del fenomeno di doppia risonanza è molto limitata, come precedentemente illustrato, per le registrazioni accelerometriche considerate.

5. Conclusioni

Nell'ambito del Progetto di ricerca R.E.S.I.S. (Progetto di Ricerca e Sviluppo per la Sismologia e l'Ingegneria Sismica), finanziato in seguito da MIUR – INGV, sono stati condotti studi di caratterizzazione della risposta sismica strutturale dell'edificio che ospitava il vecchio tribunale presso Sant'Angelo dei Lombardi. L'edificio, a seguito del terremoto irpino del 1980 non ha riportato

danni, a differenza degli edifici limitrofi, sebbene la sua pianta irregolare ad Y potesse far prevedere una elevata vulnerabilità sismica. Per indagare le ragioni di un tale fenomeno è stato svolto uno studio di risposta sismica strutturale, mirata a misurare i primi tre periodi e modi di vibrare della struttura; è stato effettuato anche uno studio di risposta sismica locale del sito al fine di verificare la eventuale presenza di amplificazioni locali. Quest'ultimo studio si è articolato in diverse fasi. Sono state raccolte informazioni sia geologico-strutturali sia sismologiche per offrire un inquadramento preliminare del comune di Sant'Angelo dei Lombardi e per effettuare una scelta degli accelerogrammi di riferimento per il comune, compatibili con l'attività sismica risentita nell'area. In seguito sono state condotte prove in sito ed in laboratorio per individuare e caratterizzare meccanicamente i litotipi presenti in sito in corrispondenza di tre sondaggi di 30 m effettuati intorno alla sede dell'Ex tribunale.

In particolare ci si è avvalsi di prove in situ comprendenti prove penetrometriche dinamiche, indagini down-hole nonché di una prova di laboratorio di taglio torsionale ciclico. Infine simulazioni numeriche monodimensionali sono state condotte per determinare le accelerazioni spettrali ed i Fattori di amplificazione per le 3 verticali investigate.

Considerate le strutture geologiche presenti nell'area indagata si sono osservate modeste amplificazioni (di entità compresa tra il 10% ed il 30%). Tale fenomeno è attribuibile alla presenza dei depositi eluvio-colluviali con potenze medie di 6-8 m e di strati argillo-sabbiosi alterati, di potenze medie variabili tra i 4-6 m. Le amplificazioni, misurate in termini di Fattori di amplificazione, F_a , negli intervalli di periodi compresi tra 0.1-0.5 s si mantengono intorno all'unità. Tali risultati consentono di affermare che il sito su cui sorge l'edificio dell'ex Tribunale non ha registrato amplificazioni locali significative. Tuttavia dovrebbero essere condotte delle analisi di risposta sismica locale, sulla base di simulazioni bidimensionali e tridimensionali, per descrivere più compiutamente le caratteristiche geometriche locali dei depositi.

Inoltre gli autori ritengono importante sottolineare che i risultati ottenuti mediante simulazioni free field dovrebbero essere confrontati con i risultati di analisi di interazione terreno-struttura per poter apprezzare con maggiore rigore l'insorgere di eventuali fenomeni di doppia risonanza in presenza di variazioni al campo tenso-deformativo prodotte dalla struttura sul terreno.

Ringraziamenti

Si ringrazia l'INGV e il consorzio TRE che nell'ambito del progetto RESIS hanno reso possibile la realizzazione delle misure in situ.

Bibliografia

- Alessio G., Esposito E., Luongo G., Gorini A., Porfido S. (1993): Identification of seismogenic areas in the Southern Apennines, Italy. *Annali di Geofisica*, 36.
- APAT, Agenzia per la protezione dell'ambiente e dei servizi tecnici (2004) - Progetto CARTografia Geologica 1:50000.
- Berardi R., Berenzi A., Capozza F. (1981): Campania-Earthquake on 23 november 1980 accelerometric recordings of the main quake and relative processing. In: Contributo alla caratterizzazione della sismicità del territorio italiano, Udine, Commissione ENEA-ENEL per lo studio dei problemi sismici connessi agli impianti nucleari.
- Budetta P., Calcaterra D., De Riso R., Santo A. (1990): Geologia e fenomeni franosi dell'Alta valle del fiume Ofanto. *Mem. Soc. Geol. It.*, 45.
- Ciaranfi N., Ghisetti F. (1983a): Carta neotettonica dell'Italia meridionale. Progetto Finalizzato Geodinamica, Pubb. n. 115, CNR, Bari, 62 p.
- Ciaranfi N., Guida M., Iaccarino G., Pescatore T., Pieri P., Rapisardi L., Ricchetti G., Sgrosso I., Torre M., Tortorici L., Turco E., Scarpa R., Cuscito M., Guerra I., Iannaccone G., Panza G.F. & Scandone P. (1983b): Elementi sismotettonici dell'Appennino Meridionale. *Boll. Soc. Geol. It.*, 102, 201-222.
- CNR (1983): Indagini di microzonazione sismica. Intervento urgente in 39 centri abitati della Campania e Basilicata colpiti dal terremoto del 23 Novembre 1980. Progetto Finalizzato Geodinamica, Pubbl. n. 492.
- COMITGEO s.a.s. (1982): Indagine geologica e geotecnica effettuata nel comune di Sant'Angelo dei Lombardi. Vuillermin M. L. Ed., Trento, Rel. 868.
- COMITGEO s.a.s. (1984): Piano Regolatore Generale. Verifica di rischio sismico nel comune di Sant'Angelo dei Lombardi. Vuillermin M. L. Ed., Trento, Rel. 957.
- CPTI2 (2004): Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani. Versione 2004 (CPTI04). INGV, Bologna; (<http://emidius.mi.ingv.it/>).
- Cotecchia V., Del Prete M. (1977): Structurally Complex Formation their Behaviour in Relations to Landslide Phenomena. *Proc. Int. Symp. "The Geotechnics of Structurally Complex Formations"*, Capri, 2.
- Cotecchia V., Monterisi L., Salvemini A. (1986): Effects on the November 23, 1980 earthquake on the Conza della Campania dam and on its supplemental structures. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, XXI(IV), 363-393.
- D'Esposito F., Spatola O. (2004): "Relazione prova dinamica e modellazione numerica". Progetto RESIS – Ricerca e sviluppo per la sismologia e l'ingegneria sismica. Workpackage 3. Task F3. Attività F3.2.
- Di Nocera S., Fenelli G.B., Iaccarino G., Pellegrino A., Picarelli L., Urciuoli, G. (1995): An example on the geotechnical implications of geological history. *Proc. 11th ECSMFE*, Copenhagen, 8: 39-48.
- Fenelli G.B., Picarelli L., Silvestri F. (1992): Deformation process of a hill shaken by the Irpinia earthquake in 1980. *French-Italian Conf. on Slope Stability in Seismic Areas*, pp. 47-62. Nantes: Ouest.
- Gavarini C. (1986) : "Contribution to the panel: Irpinia-Basilicata earthquake, 1980", *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology problems in Seismic areas*, 6, 167-182, 13-19 April, Bari.
- Gruppo di Lavoro CPTI (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.
- Housner G.W. (1952): Spectrum Intensities of strong motion earthquakes. *Proceedings of the Symposium on Earthquakes and Blast Effects on Structures*. *Earth. Eng. Res. Inst.*
- Hutchinson J.N., Del Prete M. (1986): Landslides at Calitri, southern Apennines, reactivated by the earthquake of 23rd November 1980. *Geol. Appl. e Idrogeol.*, XX(I), pp. 9-38.
- Jamiolkowski M., Ghionna V.N., Lancellotta R., Pasqualini E. (1988): New correlations of penetration tests for design practice, *Proc. of ISOPT-1*, Orlando, USA.
- Lucantoni A., Bosi V., Brammerini F., De Marco R., Lo Presti T., Naso G., Sabetta F. (2001): Il rischio sismico in Italia. *Ingegneria Sismica*, XVIII, n. 1, 5-35.
- Luongo G., Cubellis E., Ferri M., Marturano A., Milano G., Obrizzo F. (1992): A seismotectonic model of Southern Apennines and Tyrrhenian Basin. *Poster Session 29th International Geological Congress, Kyoto, Japan*, 24 Aug.-3 Sept.
- Meletti C. Patacca E., Scandone P. (2000): Construction of a seismotectonic model: the case of Italy. *Pure & Applied Geophysics (PAGEOPH)*, 157, 11-35.
- Meletti C. e Valensise G. (2004): Zonazione sismogenetica ZS9 – Appendice 2 al Rapporto Conclusivo. In: Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM del 20.03.2003, n.3274. Rapporto Finale, INGV Milano-Roma, 30 pp.
- Montone P., Pondrelli S., Amato A., Mariucci M.T., Pierdominici S. (2003): An improved stress map of Italy and Central Mediterranean. In: EGS-AGU-EUG Joint Assembly 2003, *Geophysical Research Abstracts*, 5, 10362.
- Nostro C., Cocco M., Belardinelli M.E. (1996): Static stress change in extensional regime an application to southern Apennines. *Bull. Seism. Soc. Am.*
- Ogniben L. (1969): Schema introduttivo alla geologia del confine calabro-lucano. *Mem. Soc. Geol. It.*, Vol.8, 453-763, 183 Figura, 2 tav.
- Ogniben L. (1985): Relazione sul modello Geodinamico "conservativo" della regione italiana. ENEA, Roma, 357p.
- Ohta Y. e Goto N. (1978): Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristics soil indexes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 6, 167-187.
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri (OPCM) n. 3274 del 20.03.2003: Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica. Supplemento ordinario alla G.U. n. 105 del 08.05.2003.
- Patacca E., Sartori R., Scandone P. (1990): Tyrrhenian basin and appenninic arcs: kinematics relations since Late Tortonian times. *Mem. Soc. Geol. It.*, 45, pp. 425-451
- Pergalani F., Petrini V., Romeo R., Pugliese A. (2000): La Microzonazione Sismica Speditiva relativa ai terremoti del 1997-1998 in Umbria. Regione dell'Umbria.
- Pergalani F., Romeo R., Luzi L., Petrini V., Pugliese A. e Sanò T. (1999): Seismic microzonation of the area struck by Umbria-Marche (Central Italy) Ms 5.9 Earthquake of the 26 September 1997. *Soil Dynamic and Earth. Eng.*, Elsevier Science, 18, pp. 279-296.
- Edupro Civil System Inc. (1996). ProShake v. 1.1. Redmond, Washington.
- Rollins K.M., Evans M., Diehl N., Daily W. (1998): Shear Modulus and Damping Relationships for Gravels. *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 124, No. 5, pp. 396-405.
- Romeo R. & Pugliese A. (1997): La pericolosità sismica in Italia. Parte 1: analisi della scuotibilità. *Rapp. Tecnico SSN/RT/97/2*, Uff. Servizio Sismo Nazionale, Dip. Protezione Civile, Roma.
- Scirè E., Siro L., Stucchi M. e Gavazzi M. (1986): Geo-seismic investigations and urban planning after Irpinia-Basilicata 1980 earthquake: part 2, the case of Sant'Angelo dei Lombardi, *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology problems in Seismic areas*, 3, pp. 387-397, 13-19 April, Bari.
- Vai G.B. (2001): Anatomy of an Orogen. The Apennines and Adjacent Mediterranean Basins: Structure and stratigraphy: an overview. *Edito da Vai G.B. & Martini I.P.*, pp. 15-32.
- Vessia G., Cherubini C., Ferrini M. e Daprile V. (2007): Amplification factors to measure local seismic effects in urban areas. *Proceedings of 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, June 24-28, Thessaloniki, n. 1347.
- Yokota K., Imai T. & Konno M. (1981): Dynamic deformation characteristics of soils determined by laboratory tests. *OYO Technical Report*, n. 3.
- Yoshida Y., Ikemi M., Kokusho T. (1988): *Empirical formulas of SPT blow-counts for gravelly soils*. Penetration testing ISOPT-1, Orlando (Florida), Balkema, pp. 381-387.