

VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DI SITO NELLA CITTA' DI SALERNO: CONFRONTI CON LE INDICAZIONI DELLA NORMATIVA SISMICA NAZIONALE ED EUROPEA

Simonelli A. L., Sica S.

Dipartimento di Ingegneria, Università del Sannio

Santucci de Magistris F.

Dipartimento di Ingegneria Geotecnica, Università di Napoli Federico II

SOMMARIO

Lo studio si riferisce ad un'area orientale della città di Salerno, in cui deve essere realizzata la Nuova Cittadella Giudiziaria. I manufatti progettati sono costituiti da edifici di altezza variabile con due livelli interrati destinati al parcheggio delle auto ed alla viabilità. Il progetto delle opere, che risale agli anni 2000-2001, è stato redatto valutando le azioni sismiche in base alla normativa allora vigente (D.M. 16/01/1996). Dopo il sisma del Molise (31 Ottobre 2002) la Regione Campania ha aggiornato la classificazione sismica del suo territorio per cui molti siti, tra cui la città di Salerno, sono rientrati in una categoria sismica più gravosa. Ciò ha richiesto la rivalutazione delle sicurezza sismica delle opere della Nuova Cittadella Giudiziaria già progettate. A tal fine è stato effettuato, sulla base dei dati geotecnici acquisiti mediante una vasta campagna di indagini, un dettagliato studio di risposta sismica locale mediante analisi numeriche 1-D e 2-D. La risposta sismica locale è stata valutata a diverse profondità dal piano campagna ed in particolare alla quota del piano di posa delle fondazioni delle strutture da realizzare.

Parole chiave: effetti locali, zonazione sismica, normativa sismica nazionale, Eurocodici

1 INTRODUZIONE

Lo studio degli effetti locali in un sito, e quindi la valutazione delle modifiche che il moto sismico subisce nel trasferimento dalla formazione rigida di base (*bedrock*) verso la superficie libera, sono di estrema importanza per la corretta determinazione delle azioni sismiche che investono un manufatto ivi fondato.

Quando si affronta tale problema con riferimento a grandi aree (come per esempio alla scala di un territorio urbano), è possibile individuare zone a differente risposta sismica, che consentono di elaborare le cosiddette mappe di "microzonazione sismica". In tal caso la risposta sismica del sito viene tipicamente valutata in corrispondenza della superficie libera prescindendo dalle caratteristiche dei manufatti esistenti o in progetto. Questo tipo di zonazione sismica si può definire come microzonazione "*a priori*" (Simonelli e Santucci, 2003).

Talora invece accade che uno studio di effetti locali interessi un'area di dimensioni limitate con riferimento a specifici manufatti in progetto. In tal caso nella definizione della risposta sismica del sito non si può prescindere dalle peculiari caratteristiche delle strutture in elevazione e dalle possibili soluzioni progettuali per le

relative fondazioni. Lo studio degli effetti locali può quindi essere efficace nella determinazione delle scelte progettuali; potremmo definire tale operazione come microzonazione "*in itinere*". Un ulteriore caso di studio di effetto locale è quello relativo ad un ben definito manufatto, già progettato o addirittura realizzato, per il quale è possibile effettuare un'analisi dell'interazione "completa" tra moto sismico al *bedrock*, sottosuolo e struttura in elevazione; in tal caso potremmo parlare di studio "*a posteriori*".

Lo studio descritto in questo articolo rientra nel secondo dei casi su elencati.

2 DESCRIZIONE DELLA CASE-HISTORY

Nell'area orientale della città di Salerno deve essere realizzata la Nuova Cittadella Giudiziaria. I manufatti progettati sono costituiti da edifici di altezza variabile, fino ad un massimo di 15 piani. Tutti i corpi di fabbrica sono dotati di due livelli interrati, destinati al parcheggio delle auto ed alla viabilità. I piani di posa delle diverse strutture di fondazione sono previsti ad una profondità di circa 7 m dall'attuale piano campagna. La Nuova

Cittadella Giudiziaria si estende su un'area abbastanza vasta (Figura 1) il cui sottosuolo è stato investigato mediante l'esecuzione di numerosi sondaggi, prove penetrometriche SPT e CPT, prove sismiche di tipo Down Hole (DH) e prove di laboratorio.

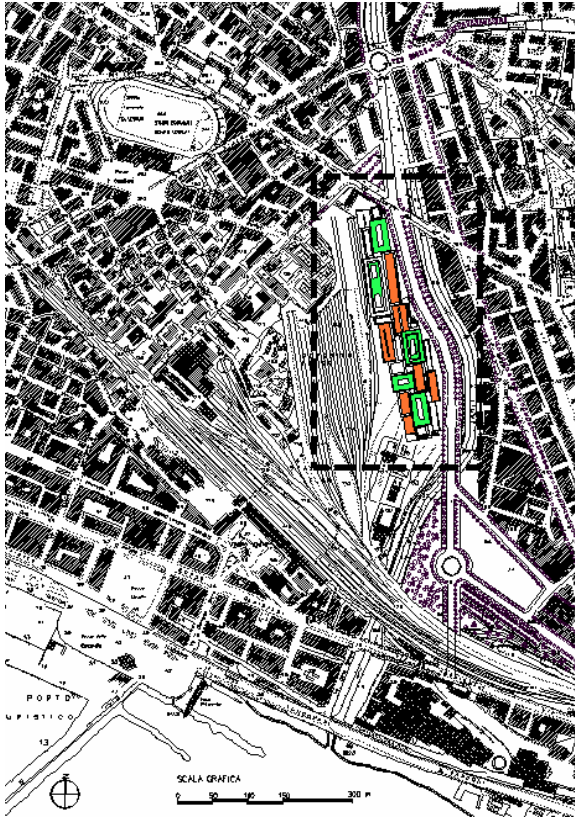


Figura 1. Ubicazione della Nuova Cittadella Giudiziaria di Salerno

Il progetto delle opere, che risale agli anni 2000-2001, è stato redatto valutando le azioni sismiche in base alla classificazione sismica ed alla normativa allora vigenti

(D.M. 16/01/1996). Dopo il sisma del Molise (31 Ottobre 2002) la Regione Campania ha aggiornato la classificazione sismica del suo territorio per cui molti siti sono ricaduti in una categoria sismica più gravosa. In particolare, la città di Salerno è passata dalla III categoria sismica ($C=0.04$) alla II ($C=0.07$) con il conseguente incremento delle azioni sismiche di progetto. Ciò avrebbe reso, di fatto, sottodimensionate le opere della Cittadella Giudiziaria il cui progetto era stato già ultimato quando è entrato in vigore il provvedimento della Regione Campania. Al fine di definire in modo più accurato le azioni sismiche trasmesse dal sottosuolo alle strutture, è stato richiesto pertanto uno studio più dettagliato di risposta sismica locale.

I risultati ottenuti da questo studio sono stati poi confrontati con le più recenti proposte normative a livello europeo (EC-8) e nazionale (OPCM 3274) in materia di effetti di sito ed azioni di progetto.

3 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEL SOTTOSUOLO

Il modello di sottosuolo cui si è pervenuti con le indagini sopra riportate è rappresentato in Figura 2 (sezione longitudinale N-S). La formazione di base è costituita da Argille Varicolori (AV), sulle quali poggiano materiali alluvionali di diversa natura: procedendo dal basso verso l'alto si ritrovano le alluvioni ghiaiose (Alg), più compatte e resistenti, che raggiungono anche i venti metri di spessore, poi le alluvioni sabbiose (Als) e limo-argillose (Ala) più deformabili. La successione stratigrafica si completa con uno strato superficiale di materiale di riporto (R), che ha spessore massimo intorno ai sette metri in corrispondenza della verticale SA (Figura 2).

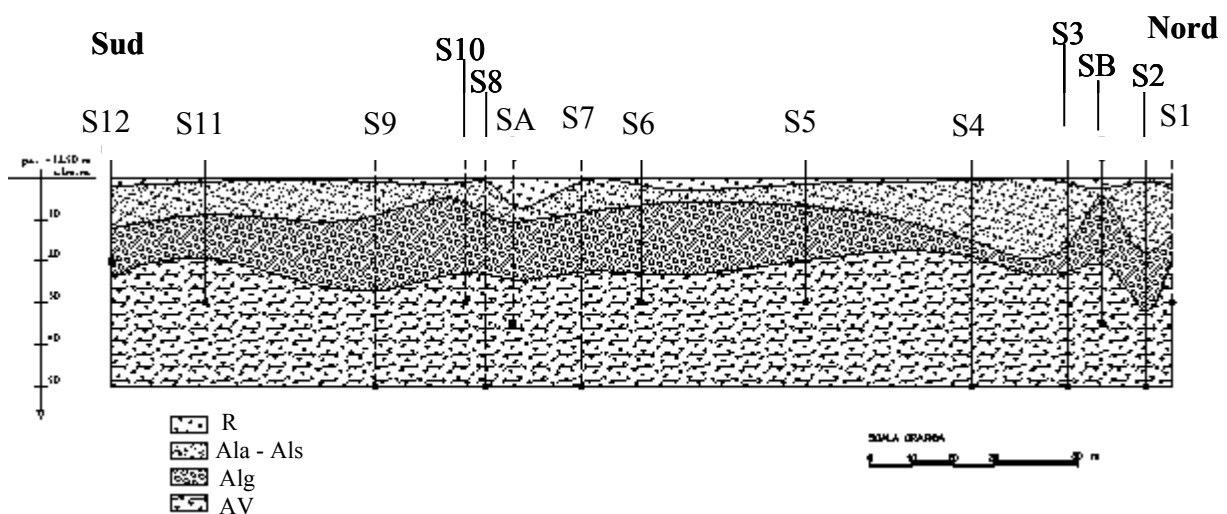


Figura 2 Sezione stratigrafica longitudinale con ubicazione dei sondaggi effettuati

L'interpretazione delle prove sismiche di tipo Down-hole ha consentito la caratterizzazione meccanica del sottosuolo in termini di velocità delle onde di taglio V_s , e quindi di rigidità iniziale (G_{max}). In particolare, nell'ambito delle profondità investigate, nelle argille varicolori AV si sono ottenute velocità delle onde di taglio intorno ai 600-700 m/s, mentre per i terreni alluvionali inferiori (Alg) e superiori (Als-Ala) rispettivamente valori intorno a 400 e 350 m/s. Il materiale di riporto (R) è infine caratterizzato da una V_s di 180 m/s.

4 ANALISI NUMERICHE

Lo studio di risposta sismica locale è stato effettuato modellando il terreno come un mezzo visco-elastico lineare. Per i materiali alluvionali sovrastanti la formazione delle Argille Varicolori e per il riporto sono state adottate le curve di variazione del modulo di taglio e del fattore di smorzamento con il livello di deformazione distorsionale riportate in Figura 3. Tali curve sono state dedotte da letteratura facendo riferimento a materiali con proprietà fisico-meccaniche simili (Santucci de Magistris et al., 2004). La formazione delle argille varicolori AV è stata assunta invece come formazione rigida di base (*bedrock*) a comportamento elastico lineare.

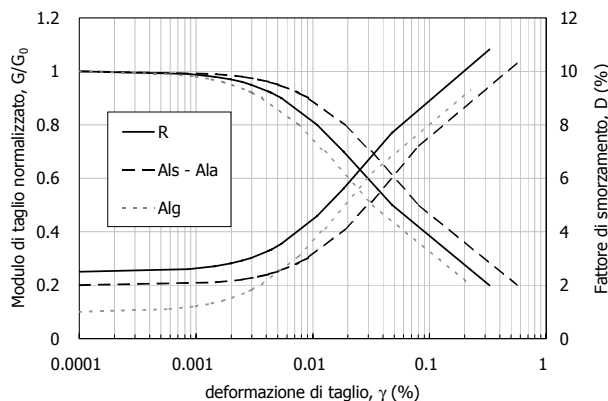


Figura 3. Curve di variazione del modulo di taglio normalizzato e del fattore di smorzamento con il livello di deformazione distorsionale

Come terremoto di riferimento si è adottato l'accelerogramma (componente NS) registrato a Mercato S. Severino (SA) in occasione del terremoto dell'Irpinia del 1980 e caratterizzato da una PGA (*peak ground acceleration*) pari a 0.145 g. Tale segnale è stato utilizzato scalato in ampiezza in modo da avere una PGA di 0.25 g, valore indicato dall'OPCM 3274 (D.M. 20/03/2003) come accelerazione di picco attesa su suolo rigido nella città di Salerno (Figura 4).

4.1 Analisi dinamiche 1-D

Inizialmente sono state effettuate delle analisi monodimensionali con il codice EERA (Bardet et al.,

2000) in corrispondenza delle verticali S11, SA, S5, S4 ed SB di Figura 2.

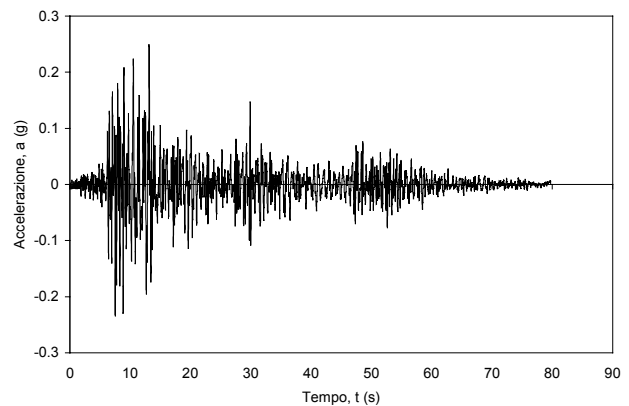


Figura 4. Accelerogramma registrato a Mercato S. Severino durante il terremoto del 1980, scalato a 0.25 g

Analizzando le funzioni di amplificazione del moto sismico tra le quote corrispondenti al tetto del bedrock ed al piano campagna (Figura 5-a), si evince che le massime amplificazioni si hanno in corrispondenza della verticale SA per frequenze comprese tra 2 e 4 Hz circa, e per la verticale SB per frequenze tra 8 e 9 Hz circa.

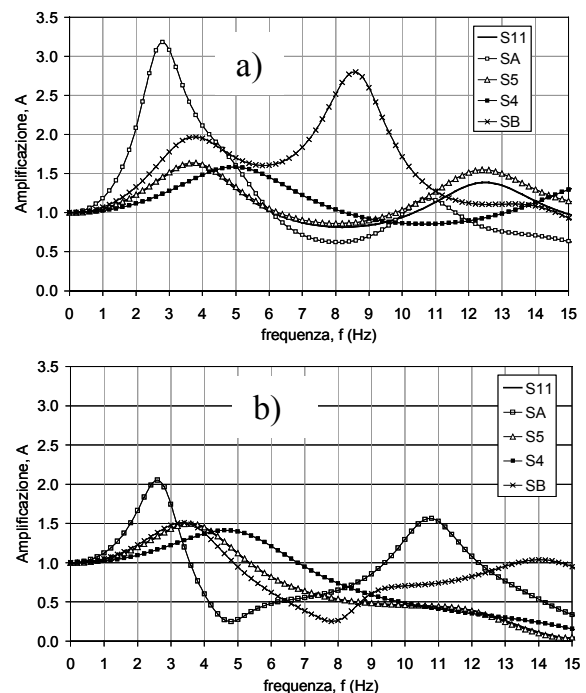


Figura 5 Funzioni di amplificazione per le 5 verticali esaminate: tra piano campagna e bedrock (a); tra piano di posa delle fondazioni e bedrock (b)

Dal punto di vista dell'interazione dinamica terreno-sovrastuttura, i risultati ottenuti nella verticale SB non destano particolare preoccupazione in quanto gli effetti di sito penalizzerebbero essenzialmente edifici molto bassi

(mentre in tale zona sono previsti edifici con numero di piani pari a 6). In corrispondenza della verticale SA, invece, le maggiori amplificazioni calcolate, dovute all'aumentato spessore del materiale di riporto R, sono relative ad un campo di frequenze alquanto prossimo alle frequenze naturali di vibrazione degli edifici in progetto, comprese tra 0.5÷1.5Hz.

E' doveroso sottolineare che proprio in corrispondenza della verticale SA è prevista la realizzazione dell'edificio più alto della Cittadella Giudiziaria, con un numero di piani pari a 15. Tale scelta progettuale, alla luce dei risultati ottenuti dalle analisi di risposta sismica locale, risulta conveniente in quanto la frequenza fondamentale dell'edificio, approssimativamente intorno a 0.7 Hz, ricade nel campo di frequenze (<1 Hz) in cui il moto sismico è poco amplificato dal sottosuolo.

Nell'ottica di una microzonazione "in itinere", si è quindi valutata la risposta sismica locale del sito in corrispondenza della quota delle fondazioni ($z = -7$ m) degli edifici in progetto, quota di reale interesse dal punto di vista ingegneristico.

Come si può constatare dalla Figura 5-b, in tutte le verticali esaminate la funzione di amplificazione valutata tra il piano di fondazione ed il tetto del bedrock risulta molto più bassa di quella calcolata tra il piano campagna ed il bedrock (Figura 5-a), specialmente per quei siti caratterizzati da un maggiore spessore di riporto (verticali SA ed SB). Le stesse osservazioni scaturiscono anche dall'analisi degli spettri di risposta (al 5% di smorzamento strutturale) in Figura 6 relativi rispettivamente ai segnali calcolati in superficie ($z = 0$ m) ed alla quota delle fondazioni ($z = -7$ m).

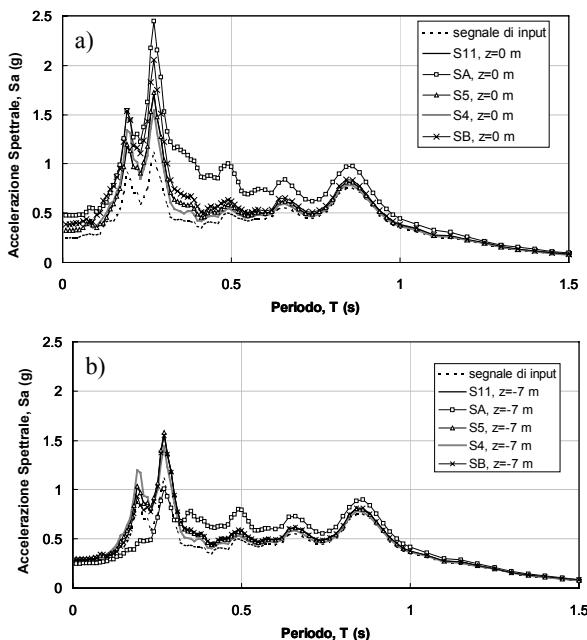


Figura 6. Spettri di risposta calcolati in superficie (a) ed in corrispondenza del piano di posa delle fondazioni (b)

Tali risultati indicano che quando uno studio di risposta sismica locale ha come obbiettivo la valutazione della sicurezza sismica di un edificio esistente (o già progettato come per il caso degli edifici della Cittadella Giudiziaria

di Salerno) diventa di fondamentale importanza la conoscenza della tipologia e della posizione delle fondazioni: infatti, valutando la risposta sismica del sito in esame alla quota delle fondazioni e non al piano campagna (come solitamente si fa negli studi di microzonazione "a priori"), si valutano in modo più realistico le azioni sismiche che sollecitano la struttura. La differenza fra le azioni sismiche calcolate è quantitativamente importantissima dal punto di vista ingegneristico, in tutti quei casi in cui i materiali più superficiali, già soggetti a stati tensionali modesti (in condizioni *free-field*), siano caratterizzati da proprietà meccaniche molto scadenti; in tali casi infatti sono proprio essi i responsabili delle maggiori amplificazioni del segnale sismico, e pertanto considerare il loro contributo nella risposta sismica locale può risultare estremamente penalizzante.

4.2 Analisi dinamiche 2-D

Al fine di valutare eventuali effetti della morfologia superficiale e profonda dei terreni, si è effettuato uno studio della risposta sismica locale bidimensionale, nel dominio del tempo, con il codice agli elementi finiti QUAD-4M. La sezione di Figura 2 è stata discretizzata mediante 1764 elementi quadrangolari piani. Per minimizzare la riflessione delle onde lungo le frontiere del modello FEM, la frontiera inferiore è stata modellata come completamente assorbente (*compliant base*) mentre le frontiere laterali verticali sono state allontanate dalla zona oggetto di studio, minimizzando così gli effetti di bordo (Figura 7).

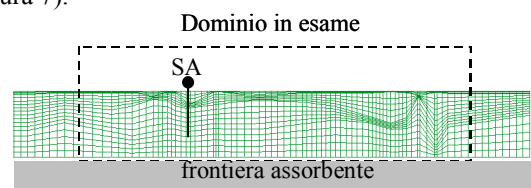


Figura 7. Mesh utilizzata per le analisi 2-D

Dall'esame dei risultati delle analisi 2-D emerge che gli effetti di geometria sono in generale poco rilevanti; l'unica eccezione si ha in corrispondenza della verticale SA, dove alla quota delle fondazioni l'analisi 2-D fornisce un'accelerazione di picco di 0.3g, mentre il valore ottenuto con l'analisi 1-D è pari a 0.24g (Figura 8).

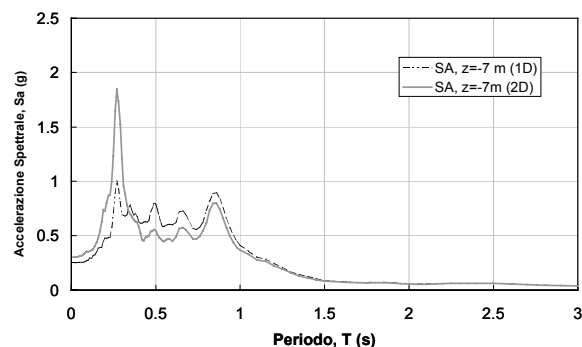


Figura 8. Confronto tra gli spettri di risposta calcolati mediante analisi 1-D e 2-D in corrispondenza del piano delle fondazioni per la verticale SA

Tale comportamento può essere attribuito alla particolare conformazione “valliva” del banco di materiale di riporto superficiale nella zona in esame. Come ben documentato in letteratura, infatti, tali condizioni geometriche favoriscono la generazione di onde di superficie per conversione delle onde S incidenti, che a loro volta possono indurre incrementi significativi nelle ampiezze del moto sismico (soprattutto alle basse frequenze) e nella durata complessiva (Bard e Gabriel, 1986); tali effetti possono essere importanti dal punto di vista ingegneristico, soprattutto in presenza di edifici alti caratterizzati da elevati periodi naturali di vibrazione.

5 CONFRONTI CON INDICAZIONI DI NORMATIVA

I risultati delle analisi numeriche descritte al punto 4 sono stati confrontati con quelli che si otterrebbero applicando le prescrizioni proposte nell’OPCM 3274 (D.M. 20/03/2003) e nell’Eurocodice 8 (EC8), al fine di tarare queste ultime su specifiche case-histories nazionali.

Sia l’Ordinanza 3274 che l’Eurocodice 8 suggeriscono di classificare il sottosuolo in base al parametro $v_{s,30}$, che rappresenta la velocità “equivalente” (Simonelli A.L., 2004) delle onde di taglio nei primi 30 m di sottosuolo, calcolata come :

$$v_{s,30} = 30 / \sum_{i=1,N} (h_i/v_i) \quad (1)$$

in cui h_i e v_i sono rispettivamente lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio (in m/s) a piccole deformazioni distorsionali ($\gamma \leq 10^{-5}$) dello i-esimo degli N strati del sottosuolo. Occorre sottolineare una leggera differenza tra le due normative, differenza che dal punto di vista concettuale è molto importante alla luce dei risultati delle analisi numeriche: l’EC8 suggerisce di valutare il parametro $v_{s,30}$ a partire dal piano campagna, l’OPCM 3274 fa invece riferimento alla quota delle fondazioni degli edifici. Se pertanto si applica l’EC8 per classificare il sottosuolo in esame, si ottiene che tutte le verticali investigate sono classificabili come sottosuoli di tipo B ($360 < V_s < 800$ m/s), fatta eccezione per le verticali SA ed SB che ricadono nella tipologia di sottosuolo C ($180 < V_s < 360$ m/s). Adoperando le indicazioni dell’OPCM 3274, ossia valutando $v_{s,30}$ a partire dal piano delle fondazioni, si deduce che tutto il sottosuolo “di fondazione” della Cittadella Giudiziaria è di tipo B.

I confronti tra gli spettri di risposta degli accelerogrammi calcolati con le analisi numeriche e gli spettri elastici suggeriti dall’Ordinanza 3274 (per sottosuolo rigido tipo A e per sottosuoli deformabili di tipo B, C, E e di tipo D) sono riportati nella Figura 9: in particolare nella parte superiore (Figura 9-a) è riportato il confronto con gli spettri degli accelerogrammi in superficie, nella parte inferiore (Figura 9-b) è riportato il confronto con gli spettri degli accelerogrammi alla quota delle fondazioni. Si osserva innanzitutto che il terremoto scelto come sollecitazione sismica di riferimento (scalato in modo da avere una accelerazione di picco su suolo rigido pari a

0.25 g, come suggerito dall’Ordinanza 3274), presenta ordinate spettrali al di sopra di quelle dello spettro elastico di tipo A per periodi compresi tra 0.15 e 0.3 s, nonché nel campo 0.6 - 1.2 s, in cui ricadono i periodi propri di vibrazione di molti degli edifici in cemento armato in progetto nella Cittadella Giudiziaria. Osservazioni analoghe scaturiscono dal confronto con lo spettro elastico di tipo B, assegnato al sito oggetto di studio in base al valore del parametro $v_{s,30}$. Ovviamente le differenze di valori delle ordinate spettrali sono inferiori passando dallo spettro tipo A allo spettro tipo B, e si riducono notevolmente se si passa dal confronto in superficie al confronto alla quota delle fondazioni (parti (a) e (b) di Figura 9).

In definitiva, si può concludere che se si adottassero in input gli spettri derivanti dall’accelerogramma di Mercato San Severino (Irpinia 1980), opportunamente scalato secondo quanto suggerito dall’OPCM3274, le azioni sugli edifici sarebbero ben più severe di quelle che si otterrebbero adottando gli spettri elastici proposti nell’Ordinanza 3274.

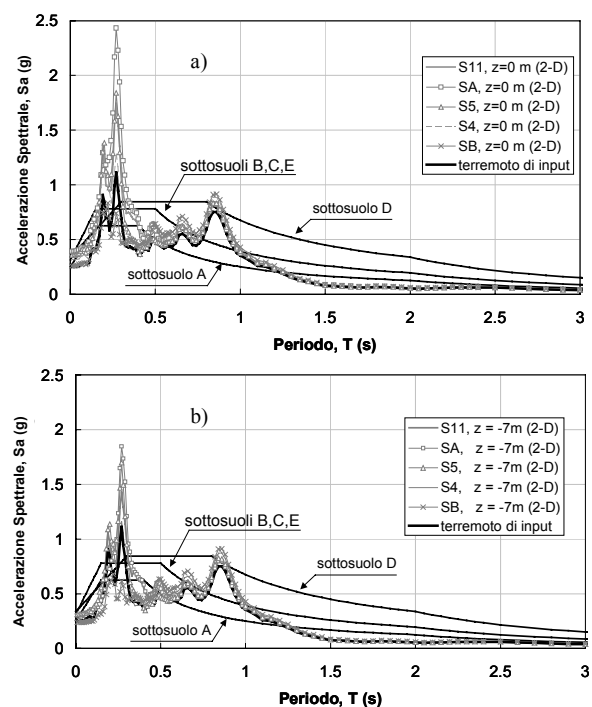


Figura 9. Confronto tra gli spettri elastici suggeriti dall’Ordinanza 3274 e gli spettri di risposta calcolati mediante analisi 2-D a piano campagna (a) ed alla quota delle fondazioni (b)

6 CONCLUSIONI

L’articolo descrive uno studio di risposta sismica locale condotto in un’area orientale della città di Salerno dove è in progetto la nuova Cittadella Giudiziaria. Considerate le dimensioni limitate dell’area in esame, la zonazione sismica che ne è derivata può essere definita come una microzonazione “in itinere”, nel senso che lo studio di risposta sismica locale è stato condotto tenendo conto

della posizione degli edifici, e delle caratteristiche geometriche delle strutture di fondazione ed in elevazione. Attraverso l'approccio dell'analisi lineare equivalente, ben consolidato nel mondo scientifico ma molto meno in quello professionale, si è valutata la risposta del sottosuolo per mezzo di analisi numeriche 1-D e 2-D. Come si può constatare dal confronto delle Figure 5 e 6, in tutte le verticali esaminate la funzione di amplificazione valutata tra il piano di fondazione ed il tetto del bedrock risulta molto più bassa di quella calcolata facendo riferimento al piano campagna, specialmente per quei siti caratterizzati da un maggiore spessore di riporto (verticali SA ed SB).

Tali osservazioni, pur essendo frutto di semplici considerazioni di dinamica dei terreni, possono risultare molto preziose nell'ottica di una rivalutazione a posteriori della sicurezza sismica di edifici esistenti di cui siano note la tipologia e la quota di posa delle fondazioni. Valutando infatti, la risposta sismica del sito in esame alla quota delle fondazioni e non al piano campagna (come solitamente si fa negli studi di microzonazione) si stimano in modo più realistico e meno severo le azioni sismiche che sollecitano la struttura, specialmente in quei casi, peraltro ricorrenti, in cui l'amplificazione del moto sismico si concentra drasticamente negli strati più superficiali.

7 BIBLIOGRAFIA

- Bard P.Y., Gabriel J.C. (1996) The seismic response of two-dimensional deposits with large vertical velocity gradients. Bull. Seism. Soc. of America, Vol. 76.
- Santucci de Magistris F., d'Onofrio A. & Sica S. (2004). A step into the definition of the seismic risk for the city of Benevento (Italy). Proc. of the Fifth Inter. Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering.
- Simonelli A.L. (2004). Eurocodice 8: valutazione delle azioni sismiche al suolo ed effetti sulla spinta dei terreni. Rivista Italiana di Geotecnica
- Simonelli A.L., Santucci de Magistris F. (2003) *Analisi degli effetti locali in un'area orientale della città di Salerno*. Incontro annuale dei ricercatori di Geotecnica (IARG), Potenza

ABSTRACT

AMPLIFICATION EFFECTS IN THE CITY OF SALERNO: COMPARISON WITH INDICATIONS OF NATIONAL AND EUROPEAN SEISMIC CODES

Keywords: site effects, seismic zonation, seismic codes

In the city of Salerno (Campania region, 50 Km South of Napoli) the New Law Court Buildings are going to be constructed. The project involves a large area, whose subsoil was thoroughly investigated by means of conventional tests, with the aim to characterise the mechanical properties of the soils and individuate the proper foundation typology. The design of the structures was then carried out, computing the seismic forces according to the indications of the national code, which takes into account the subsoil amplification role by means of an oversimplified approach. After the recent earthquake which struck Molise (Southern Italy, November 1st, 2002) the Regional Government has updated Campania seismic classification; hence many important works, already designed according to the previous classification, need to undergo a new structural design. In the case of Salerno, according to the new classification, seismic forces acting on the Law Court Buildings would seriously increment. Hence, a specific geotechnical study has been requested, with the aim to better investigate on the local seismic effects at the design site. In the whole area in-situ dynamic investigation has been performed to determine the shear modulus of soils at low strain levels from the surface down to a depth of about 30 m, inside a more rigid base formation of Argille Varicolori (varicoloured clay). Some dynamic analyses of the subsoil behaviour have been performed. The input motions at the base formation were defined on the basis of real accelerograms recorded during the Irpinia 1980 earthquake ($M_s=6.9$), which produced considerable effects in Salerno area. The wave propagation along depth has been investigated; in particular the seismic response has been studied at the different levels of the foundation structures.