



Influenza della risposta sismica locale sul non sincronismo del moto in superficie: validazione empirica delle indicazioni normative

Giuseppe Tropeano, Francesco Silvestri

Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale, Università di Napoli Federico II. Via Claudio 21, 80125 Napoli.

Camillo Nuti

Dipartimento di Strutture, Università degli Studi Roma Tre. Via Corrado Segre 4/6, 00146 Roma.

Ivo Vanzi

Dipartimento di Ingegneria, Università G. D'Annunzio di Chieti e Pescara. Viale Pindaro 42, 65127 Pescara.

Keywords: asincronismo, risposta sismica locale, spostamenti differenziali, infrastrutture.

ABSTRACT

Nella progettazione di opere con significativo sviluppo longitudinale delle fondazioni, il moto sismico può avere caratteristiche variabili lungo lo sviluppo della struttura. Le differenze possono essere causate dalla perdita di sincronismo nella propagazione delle onde, dalle disomogeneità e discontinuità del sottosuolo e dalla diversa risposta locale del terreno. Secondo le prescrizioni delle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/1/2008), la valutazione degli effetti del moto asincrono indotti sulle strutture può essere effettuata combinando gli effetti dinamici con quelli pseudo-statici causati dallo spostamento relativo massimo tra due punti della struttura. Questi ultimi si possono valutare attraverso una relazione che deriva dalla soluzione di un modello analitico di propagazione delle onde sismiche (Nuti & Vanzi, 2005). Obiettivo di questo studio è verificare le regole presenti nelle NTC attraverso il confronto con valori di spostamento relativo derivanti da registrazioni accelerometriche di eventi sismici reali. L'effetto combinato dei fattori sopra menzionati è stato valutato empiricamente attraverso l'analisi del moto sismico in superficie registrato da coppie di stazioni accelerometriche, ubicate a distanze dell'ordine delle centinaia di metri, su terreni con caratteristiche lito-stratigrafiche corrispondenti ad un sito di riferimento (classe A della Normativa) e un sito con amplificazione stratigrafica (classi B, C, D). Gli spostamenti relativi, calcolati secondo tre possibili approcci, mostrano che la formulazione analitica suggerita dalla Normativa è appropriata per descrivere la dipendenza degli spostamenti relativi dall'accelerazione di riferimento. Gli spostamenti calcolati secondo le prescrizioni di Normativa, inoltre, risultano mediamente maggiori di quelli misurati sperimentalmente.

1 INTRODUZIONE

Il non-sincronismo dell'azione sismica è di particolare rilevanza applicativa per le analisi di infrastrutture con sviluppo longitudinale significativo (ISO TC98/SC3 N 229, 2003), ed interagenti con il terreno in superficie (p.es. le dighe, cfr. Gazetas & Dakoulas, 1992) o in profondità (p.es. le gallerie, cfr. St. John & Zahrah, 1984). Per costruzioni in terra ed infrastrutture in sotterraneo, l'interazione è diffusa con continuità in direzione longitudinale; per i ponti a più campate, il fenomeno di interazione si sviluppa localmente, in corrispondenza delle pile e lungo un campo di profondità dipendente dal tipo e dalle dimensioni delle fondazioni.

Il fenomeno fisico è influenzato da due fattori principali:

- 1) variabilità del moto lungo lo sviluppo dell'infrastruttura, dovuta alla propagazione e all'incoerenza delle onde sismiche;
- 2) variabilità delle condizioni geomorfologiche e litologiche locali del sottosuolo.

Quest'ultimo fattore determina la 'risposta sismica locale', che comporta, nella maggior parte dei casi, un'esaltazione degli effetti di non-sincronismo del moto in superficie.

In particolare, nell'analisi sismica dei viadotti, è necessario tenere in conto gli effetti bi- o tri-dimensionali indotti dalla morfologia superficiale e sepolta dei depositi nella definizione degli input sismici alle singole pile. Nella fase di progettazione e verifica di tali strutture può risultare, per-

tanto, particolarmente oneroso tener conto in maniera rigorosa di entrambi i fattori. Da qui la necessità di definire procedure che tengano conto in maniera semplificata degli aspetti citati e che forniscano risultati in termini di spostamenti differenziali sufficientemente cautelativi.

Le Norme Tecniche per le Costruzioni, NTC 2008 (D.M. 14/1/2008), introducono la necessità di valutare tali effetti in termini di massimo spostamento relativo tra due punti, attraverso una relazione derivata dalla soluzione di un modello analitico di propagazione delle onde sismiche (Nuti & Vanzi, 2005).

Obiettivo di questo studio è verificare la procedura proposta dalle NTC 2008, attraverso il confronto con valori di spostamento relativo derivanti da registrazioni accelerometriche di eventi sismici che includono implicitamente gli effetti sopra citati.

2 SELEZIONE DELLE REGISTRAZIONI ‘EMPIRICAMENTE CORRELABILI’

Gli accelerogrammi utilizzati in questo studio sono stati selezionati dai database sismici nazionali SISMA (Scasserra et al., 2008) e ITACA (Working Group ITACA, 2010). Sono state ricercate le registrazioni acquisite in corrispondenza di stazioni situate su sottosuolo deformabile e rappresentative delle classi di sottosuolo indicate dalle NTC 2008, per le quali sia disponibile una contemporanea registrazione di riferimento su affioramento rigido, a distanza limitata nell'ordine di centinaia di metri.

Le sole coppie di stazioni accelerometriche italiane che rispondono ai requisiti indicati sono risultate (Landolfi et al., 2011):

- Classi A-B: San Rocco (rigido) / Forgaria-Cornino (deformabile);
- Classi A-C: San Giuliano di Puglia - sito A/Chiesa (rigido) / San Giuliano di Puglia - sito B/Scuola (deformabile);

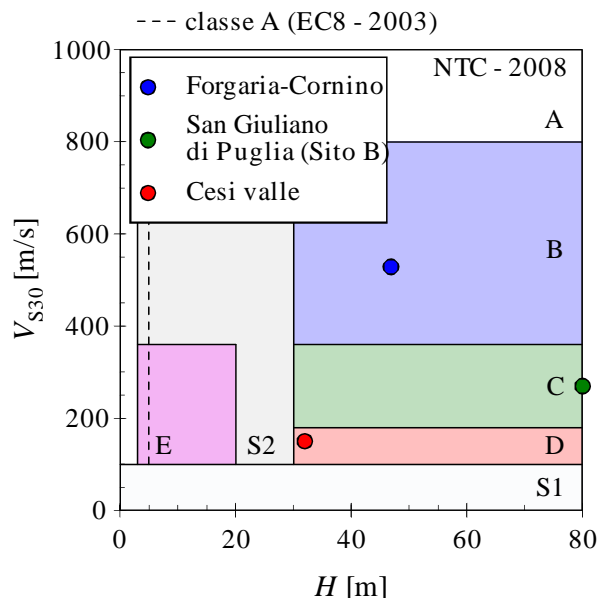


Figura 1. Identificazione delle classi di sottosuolo delle stazioni sismiche considerate in questo studio.

- Classi A-D: Cesi Monte (rigido) / Cesi Valle (deformabile).

Nella Figura 1 si evidenzia l'appartenenza delle stazioni dei siti deformabili alle classi di sottosuolo definite dalle NTC in relazione agli intervalli di variazione di $V_{S,30}$ e della profondità della formazione rigida di base, H .

Tali registrazioni possono essere definite 'empiricamente correlabili' poiché contemplano intrinsecamente gli effetti dell'incoerenza, della propagazione e della risposta sismica locale.

Per ciascuna coppia di stazioni, sono state considerate le registrazioni dello stesso evento corrette con procedura standard:

- 1) correzione della *baseline*;
- 2) filtro passa-banda di tipo Butterworth tra le frequenze 0.1 e 25Hz;
- 3) eliminazione del *drift* sugli spostamenti
- 4) sincronizzazione delle coppie di registrazioni rispetto all'orario UTM di arrivo del primo dato.

Nella Tabella 1 sono riportate, in sintesi, le principali informazioni sulle registrazioni selezionate in questo studio.

Tabella 1: Sintesi delle principali caratteristiche del set di dati accelerometrici utilizzato in queste analisi.

| Sito | Codice stazione (ITACA) | Classe di sottosuolo (NTC 2008) | Distanza relativa [m] | Azimut [°] | # Eventi | Periodo di registrazione | M_L | Distanza epicentrale [km] | a_{max} [g] |
|------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------|------------|----------|--------------------------|---------|---------------------------|---------------|
| Forgaria-Cornino | FRC | B | 603 | 17.5 | 8 | 1976-1977 | 4.1-6.1 | 28.8-51 | 0.058-0.352 |
| San Rocco | SRC | A | | | | | | | 0.026-0.246 |
| San Giuliano - B | SGIUB | C | 435 | 346 | 12 | 2002 | 3.5-4.3 | 8.0-15.0 | .0012-.0251 |
| San Giuliano - A | SGIUA | A | | | | | | | .0004-.0091 |
| Cesi Valle | CESV | D | 207 | 70.6 | 20 | 1997-1998 | 2.2-5.3 | 2.6-141.3 | 0.018-0.184 |
| Cesi Monte | CESM | A | | | | | | | 0.006-0.078 |

In totale sono state utilizzate:

- per la coppia di stazioni A-B, 8 registrazioni della sequenza sismica del Friuli (1976-1977);
- per la coppia di stazioni A-C, 12 registrazioni degli *aftershock* del terremoto di San Giuliano di Puglia del 2002 (rete mobile ITDPC);
- per la coppia A-D, 20 registrazioni della sequenza sismica Umbro-Marchigiana del 1997-1998 (rete mobile ITDPC).

In Figura 2 si riportano le distribuzioni campionarie della magnitudo locale, M_L , e dell'accelerazione di picco, a_{max} , delle registrazioni. La maggior parte degli eventi sismici disponibili ha una magnitudo minore di 4.5 e le registrazioni presentano a_{max} inferiore a 0.05g. La Figura 2b evidenzia, inoltre, qualitativamente gli effetti di amplificazione locale.

Gli spostamenti relativi sono stati valutati nella direzione congiungente le due stazioni (indicata come 'longitudinale') e in quella ad essa ortogonale (indicata come 'trasversale'). Le registrazioni selezionate per ciascuna coppia di stazioni sono state, pertanto, proiettate nelle due direzioni come mostrato nell'esempio riportato in Figura 3 per un evento registrato dalla coppia di stazioni SRC-FRC. Per ciascun evento si sono ottenute 2 coppie di registrazioni accelerometriche, indicate

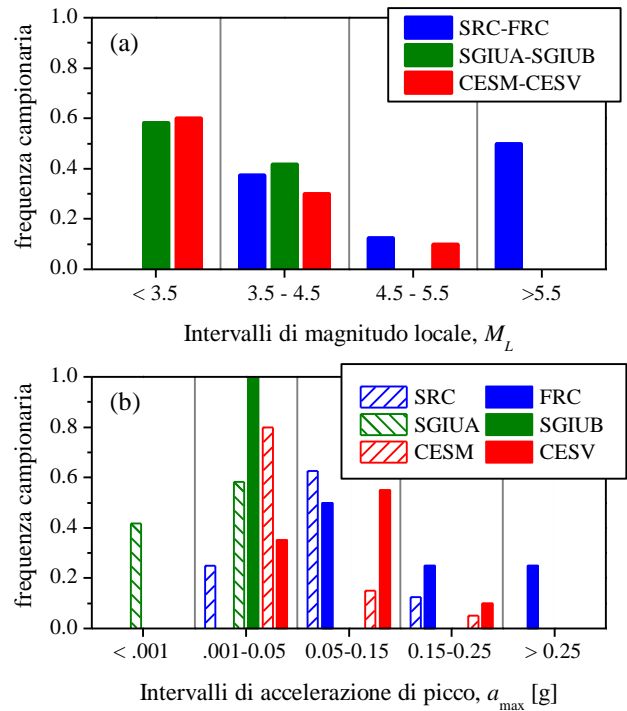


Figura 2. Distribuzioni campionarie della magnitudo degli eventi sismici (a) e dell'accelerazione di picco, a_{max} , (b) delle registrazioni delle stazioni accelerometriche selezionate.

con $a_R(t)$ e $a_S(t)$ rispettivamente per le registrazioni di riferimento su affioramento rigido e per quelle sul terreno deformabile. Di esse sono stati calcolati gli spettri di risposta e le storie temporali degli spostamenti, ottenute mediante doppia integrazione numerica degli accelerogrammi.

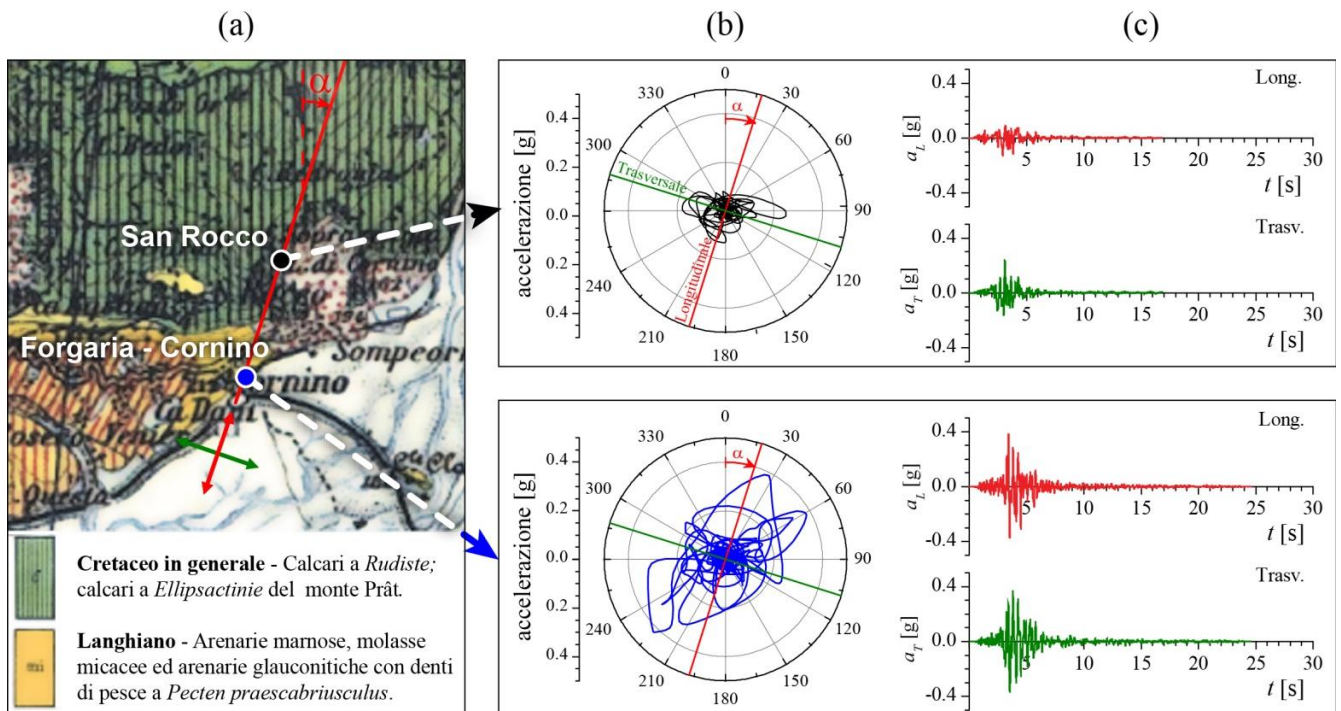


Figura 3. Proiezioni degli accelerogrammi nelle direzioni trasversale e longitudinale per le stazioni di San Rocco e Forgia-Cornino: (a) identificazione delle stazioni su carta geologica, (b) diagramma polare delle accelerazioni e (c) storie temporali dell'accelerazione.

3 EFFETTI DELLA PROPAGAZIONE E DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

3.1 Indicazioni Normative

La valutazione degli effetti dell'asincronismo del moto per opere con sviluppo longitudinale significativo è prescritta dalla Normativa nel caso in cui le condizioni di sottosuolo nei punti di contatto terreno-struttura risultino talmente variabili da richiedere l'uso di accelerogrammi o spettri di risposta differenti (§ 3.2.5). In particolare, se l'opera da analizzare è suddivisa in più parti, si può considerare un'azione sismica appropriata per ciascuna di esse. In questi casi, la Normativa suggerisce di valutare gli effetti dinamici in maniera indipendente per ciascuno dei punti di calcolo (ad esempio tramite lo spettro di risposta), e sovrapporvi gli effetti pseudo-statici indotti sulla struttura dagli spostamenti relativi.

Per il calcolo degli spostamenti relativi tra due punti generici i e j , d_{ij} , posti a distanza $> 20\text{m}$ e in assenza di importanti discontinuità orografiche, le NTC 2008 suggeriscono l'utilizzo della relazione:

$$d_{ij} = d_{ij0} + (d_{ij\max} - d_{ij0}) \cdot f(x_{ij}, V_S) \quad (1)$$

in cui d_{ij0} è lo spostamento relativo che i due punti avrebbero se fossero posti a piccola distanza ($\leq 20\text{m}$) dato da:

$$d_{ij0} = \alpha \cdot |d_i - d_j| \quad (2)$$

e $d_{ij\max}$ è lo spostamento massimo relativo tra due punti in cui il moto può considerarsi indipendente, espresso come:

$$d_{ij\max} = \beta \cdot \sqrt{d_i^2 + d_j^2} \quad (3)$$

Nelle eqq. (2) e (3), lo spostamento massimo nel generico sito, d_j , è definito dal tratto a spostamento costante dello spettro di risposta di Normativa per periodi maggiori di 10s:

$$d_j = 0.025 \cdot a_g \cdot S \cdot T_C \cdot T_D \quad (4)$$

in cui:

- a_g è l'accelerazione di picco di riferimento;
- S è il coefficiente di amplificazione pari al prodotto tra i coefficienti di amplificazione stratigrafico, S_S , e topografico, S_T ;
- T_C e T_D sono i periodi corrispondenti all'inizio del tratto a velocità e a spostamento costanti dello spettro di risposta, rispettivamente.

Il periodo T_D ed il coefficiente S_S dipendono linearmente da a_g , mentre T_C è funzione del parametro T_C^* variabile con la classe di sottosuolo.

La funzione $f(x_{ij}, V_S)$ è crescente con la distanza tra i due siti, x_{ij} [in m], e decresce con la velocità di propagazione delle onde di taglio, V_S [in m/s]:

$$f(x_{ij}, V_S) = 1 - \exp\left[-1.25 \left(x_{ij}/V_S\right)^{0.7}\right] \quad (5)$$

La relazione (5) di fatto definisce il fattore che descrive la variazione tra il valore dello spostamento a piccole distanze, d_{ij0} , e quello massimo, $d_{ij\max}$, in un intervallo di distanza in cui il moto tra i due siti risulta mutuamente influenzato; tale intervallo dipende dal valore della velocità di propagazione delle onde di taglio.

Va innanzitutto precisato che, nella formulazione di Normativa, l'eq. (1) deriva dallo studio pilota di Nuti & Vanzi (2005), basato sulla simulazione di campi di moto descritti in termini di spettri generati con un metodo stocastico. Il fattore α che compare nell'eq. (2) è compreso tra un minimo di 1.05, per coppie di sottosuolo simili (ad esempio AB), ed un massimo di 1.25 per coppie molto diverse (ad esempio AD). Nella Normativa, sia per semplicità che per maggior sicurezza nei confronti di un collasso fragile, si è posto $\alpha = 1.25$ per tutte le coppie di sottosuolo. Il fattore β nell'eq. (3) dipende a sua volta dai parametri della funzione di coerenza, che mostrano una forte dispersione sperimentale. Per ragioni analoghe al caso precedente, nella Normativa si è posto cautelativamente $\beta = 1.25$.

In Figura 4 è mostrato l'andamento degli spostamenti differenziali, d_{ij} , calcolato con l'eq. (1) in funzione della distanza, x_{ij} , a parità di accelerazione di picco ($a_{R,\max} = 0.25\text{g}$) al variare della classe di sottosuolo del sito deformabile (coppie AB, AC, AD). Sono altresì riportati con linee a tratti i valori calcolati per coppie di stazioni che presentano la medesima classificazione (coppie AA e BB). Si osservi che all'aumentare del contrasto di velocità non solo si incrementano gli spostamenti iniziale e massimo, calcolati con le eqq. (2) e (3), ma si riduce la distanza oltre il quale lo spostamento relativo può considerarsi indipendente.

I valori calcolati con le procedure proposte dalla Normativa sono stati confrontati con tre possibili approcci di calcolo dello spostamento relativo:

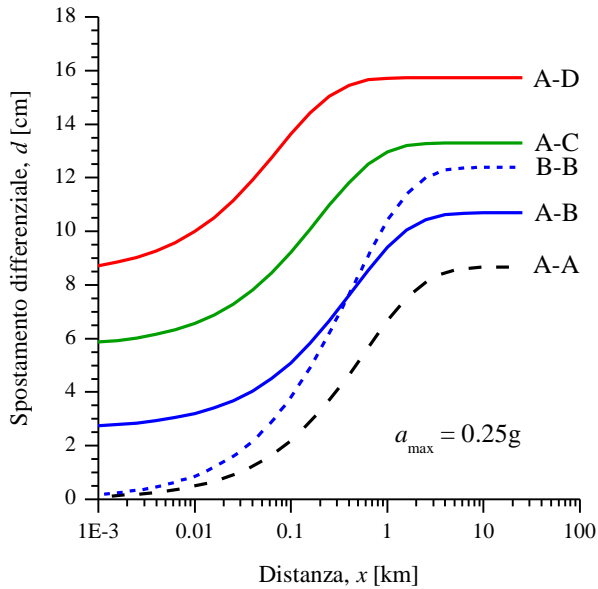


Figura 4. Andamento degli spostamenti differenziali in funzione della distanza tra i siti e delle classi di sottosuolo.

- I. valore massimo della differenza della storia temporale degli spostamenti registrati per i due siti;
- II. differenza tra i valori massimi dello spostamento spettrale;
- III. massimo dello spettro di risposta dello spostamento relativo, valutato a partire dalla storia temporale delle accelerazioni relative.

3.2 Approccio I: massimi spostamenti relativi

In condizioni di campo libero, il massimo spostamento relativo tra due punti può essere posto pari al valore di picco della differenza tra le storie temporali degli spostamenti, $d_S(t)$ e $d_R(t)$, rilevate ai siti, ovvero semplicemente:

$$\Delta d_{SR,max} = \max \{d_S(t) - d_R(t)\} \quad (6)$$

In Figura 5 sono mostrate, a titolo di esempio, le storie temporali degli spostamenti valutati nelle direzioni longitudinale e trasversale per l'evento più significativo registrato dalle stazioni di San Rocco (linea nera) e Forgaria-Cornino (linea blu). Negli stessi grafici è riportata la storia temporale degli spostamenti differenziali, Δd (linea rossa). In giallo è evidenziato lo sfasamento tra le due registrazioni dovuto all'asincronismo che comporta, in questo caso, un'esaltazione del picco dello spostamento differenziale.

In Figura 6 si riporta l'insieme dei valori dello spostamento relativo massimo, $\Delta d_{SR,max}$, in funzione di $a_{R,max}$ registrato al sito di riferimento per le tre coppie di stazioni considerate. I risultati ottenuti sono stati interpretati con una legge potenza (lineare in scala bi-logaritmica), i cui parametri

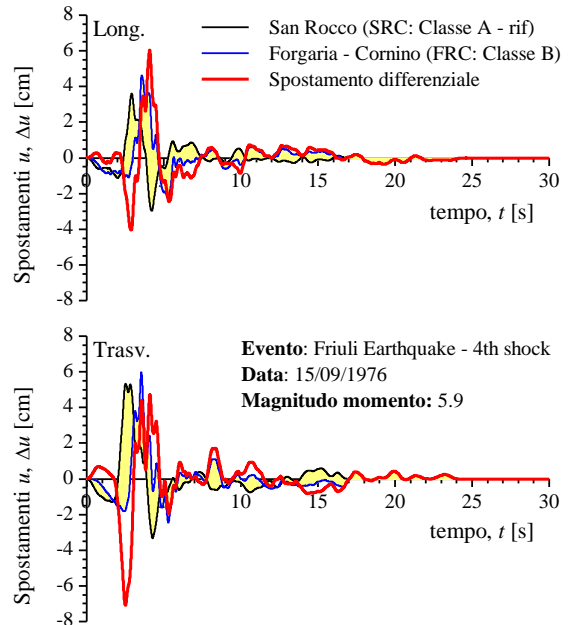


Figura 5. Storia temporale degli spostamenti dell'evento più significativo registrato dalle stazioni San Rocco (Classe A) e Forgaria-Cornino (Classe B).

sono riportati nei rispettivi grafici. I dati sperimentali sono confrontati con gli spostamenti calcolati con l'eq. (1) nella doppia ipotesi sui valori dei coefficienti α e β (indicati come: NTC-I $\alpha,\beta=1.25$; NTC-I $\alpha,\beta=1$).

I parametri degli spettri di risposta di Normativa sono stati desunti dall'allegato B delle NTC in relazione alle coordinate geografiche dei siti in analisi a parità di accelerazione di picco, $a_{R,max}$.

3.3 Approccio II: differenza tra i massimi spostamenti spettrali

La Normativa (cfr. § 3.2.5), come prima approssimazione, prevede di poter valutare lo spostamento relativo tra due siti anche come differenza tra gli spettri di spostamento. Tale approccio presenta il limite di non considerare l'effetto dell'asincronismo del moto tra i due siti. In linea di principio, lo spostamento relativo potrebbe essere calcolato supponendo, in modo estremamente cautelativo, che il moto tra i due punti sia in opposizione di fase, ovvero sommando gli spostamenti spettrali massimi; in questo studio, gli spostamenti relativi sono stati invece valutati ipotizzando un moto sincrono, ovvero come differenze tra i valori massimi degli spettri di risposta in spostamento.

In Figura 7 si riporta, a titolo di esempio, il confronto tra gli spettri di spostamento ottenuti per la registrazione dell'evento più significativo alla coppia stazioni delle classi A-B, e gli spettri di Normativa prescritti per i medesimi siti a parità

di accelerazione di picco. Si osserva che, per entrambe le componenti, gli spettri delle NTC su terreno deformabile sono a favore di sicurezza, se si eccettua la risposta per periodi inferiori a 2s in cui è possibile osservare un picco intorno a 0.5s, attribuibile all'amplificazione locale nel sito FRC

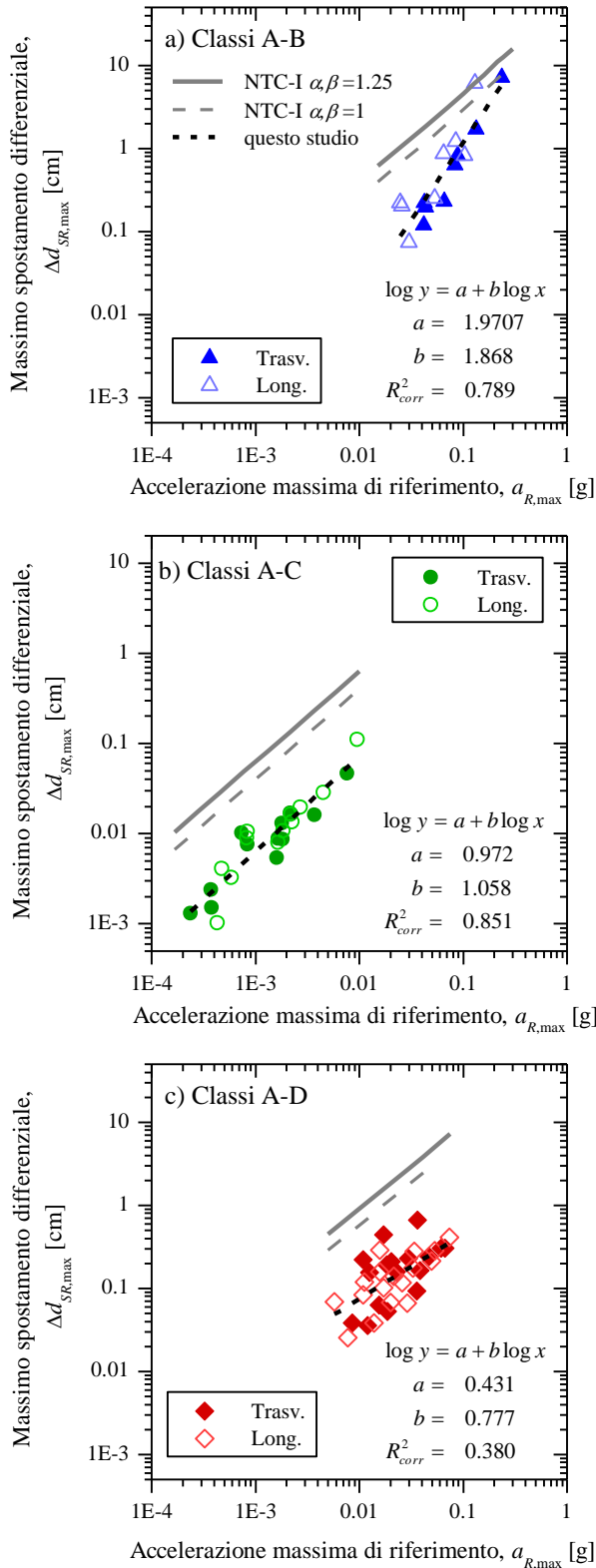


Figura 6. Confronto tra gli spostamenti differenziali massimi calcolati secondo le NTC 2008 e quelli ottenuti con l'approccio I per le tre coppie di stazioni accelerometriche (a: FRC-SRC; b: SGIUA-SGIUB; c: CESV-CESM).

(linea azzurra). Nel sito rigido SRC, invece, lo spettro NTC sottostima i valori registrati per la componente longitudinale.

Nei grafici in Figura 8 sono mostrati i valori della differenza tra gli spostamenti spettrali massimi per le registrazioni delle tre coppie di stazioni analizzate, in funzione di $a_{R,max}$.

I valori di Normativa (indicati come NTC-II, linea discontinua grigia) sono stati valutati come differenza tra gli spostamenti spettrali calcolati nell'intervallo di periodi T_D-T_E corrispondente al plateau dello spettro di Normativa (cfr. Figura 7). In maniera analoga a quanto riportato nella Figura 6, i dati ottenuti sono stati interpretati con una legge potenza. Rispetto al caso precedente, i valori campionari mostrano una maggiore dispersione, dovuta alla variabilità del periodo in cui può verificarsi il picco dello spettro di spostamento.

3.4 Approccio III: massimo spostamento spettrale relativo

In quest'approccio, per portare in conto gli effetti dell'asincronismo in termini di risposta spettrale, lo spostamento relativo è stato valutato come valore di picco dello spettro di risposta dello spostamento differenziale. Quest'ultimo è stato calcolato a partire dalla storia temporale delle accelerazioni relative tra i due siti di registrazione:

$$\Delta a_{SR}(t) = a_S(t) - a_R(t) \quad (7)$$

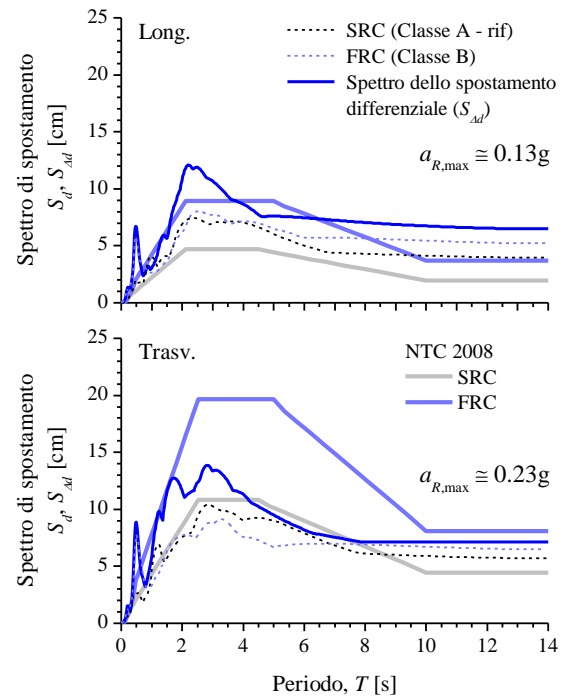


Figura 7. Confronto tra gli spettri di spostamento di normativa e quelli calcolati per la coppia di stazioni Forgaria - San Rocco per il IV shock del terremoto del Friuli, 15/19/76 ($M_w = 5.9$).

Nell'esempio mostrato in Figura 7, è quindi riportato anche lo spettro di spostamento differenziale, $S_{\Delta d}$ (linea continua blu). In questo caso, lo sfasamento tra le due registrazioni (cfr. Figura 5) comporta un aumento sensibile dello spettro di spostamento differenziale rispetto a quelli delle singole registrazioni.

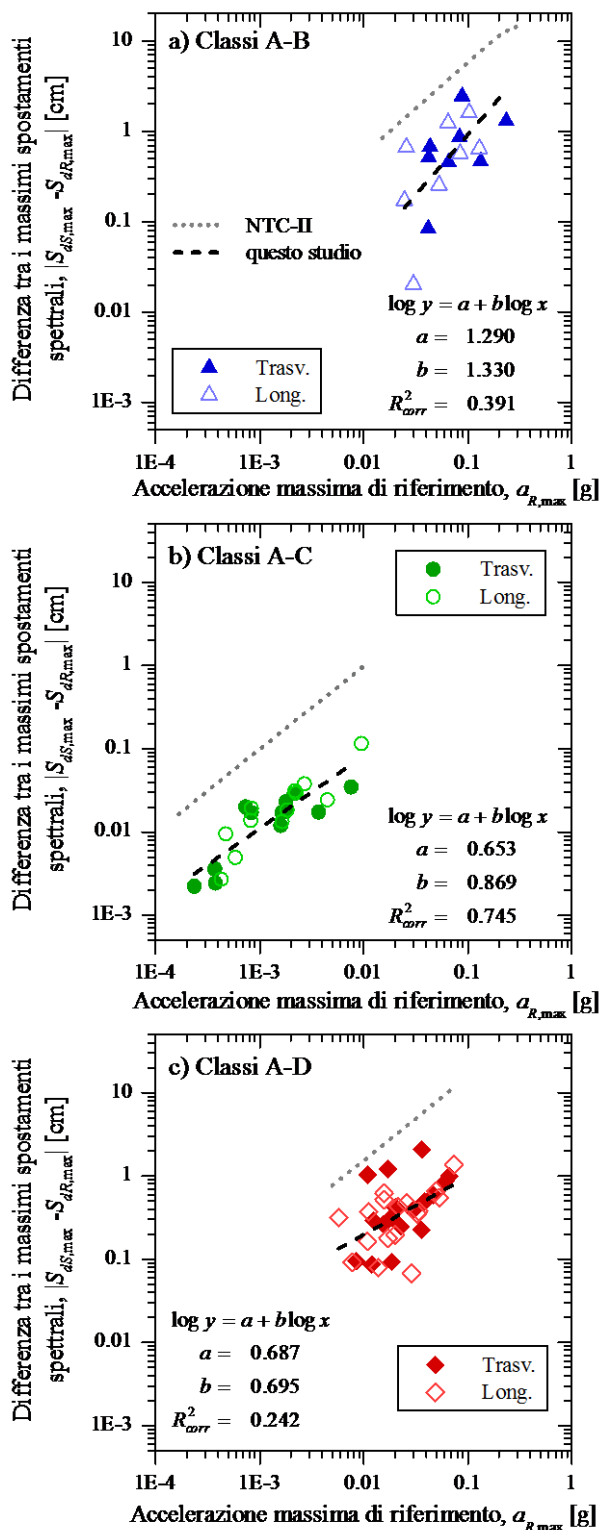


Figura 8. Confronto tra la differenza degli spostamenti spettrali massimi calcolati dagli spettri delle NTC 2008 e quelli valutati per le tre coppie di stazioni accelerometriche (Approccio II).

In Figura 9 si riporta l'insieme dei valori di $S_{\Delta d,max}$ calcolati con tale procedura dalle registrazioni, confrontati con le due possibili interpretazioni della Normativa, indicate come NTC-I, cioè i valori calcolati con l'eq. (1), e NTC-II, ossia la differenza tra i valori massimi degli spettri di risposta di progetto.

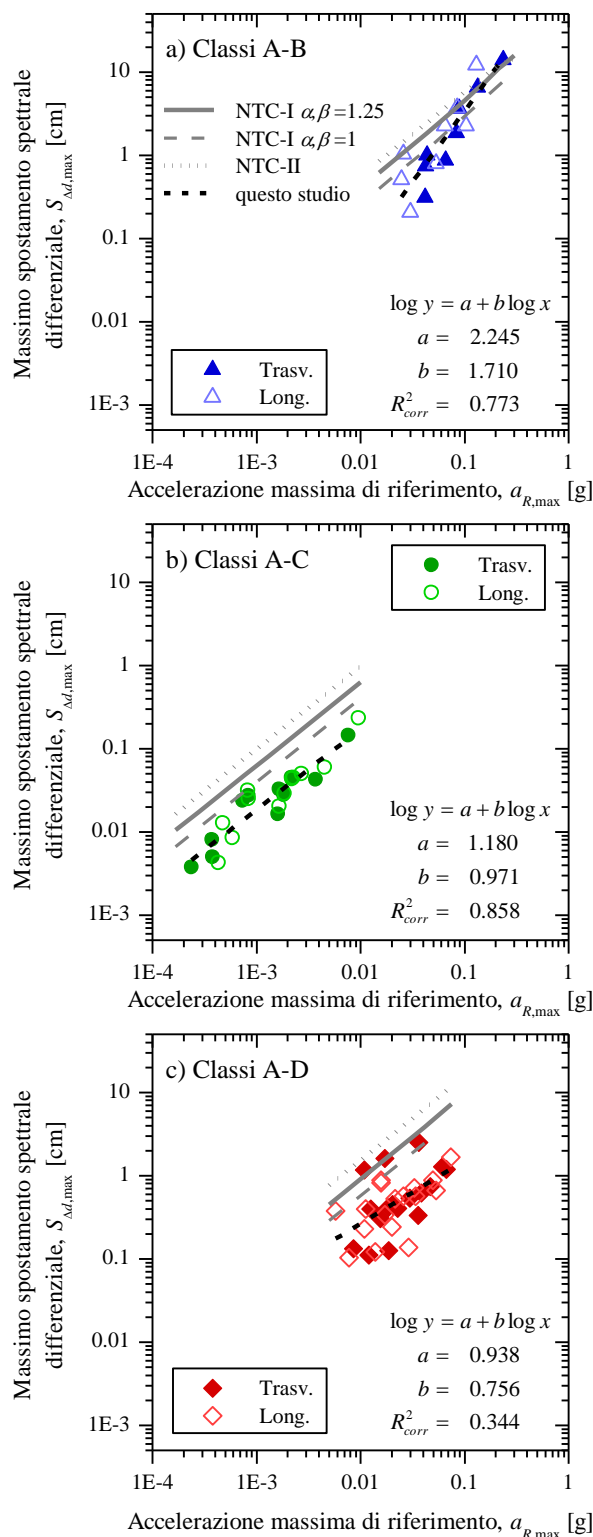


Figura 9. Confronto tra gli spostamenti differenziali calcolati secondo le NTC 2008 ed il valore massimo dello spettro di spostamento differenziale, valutati per le tre coppie di stazioni accelerometriche (Approccio III).

L'interpretazione dei dati sperimentali con quest'approccio si mostra nell'insieme più cautelativa rispetto a quelle riportate nelle Figg. 6 e 8; le funzioni di regressione risultano inoltre in accordo con quelle ottenute con l'approccio I, che di fatto ne rappresenta un caso particolare, essendo Δd_{SRmax} corrispondente proprio all'ordinata dello spettro $S_{\Delta d}$ per i periodi più elevati.

4 EFFETTO DELLA PROPAGAZIONE

Un ulteriore caso analizzato è relativo alle stazioni accelerometriche dell'array della rete ITDPC posizionato su una sezione trasversale della valle del fiume Aterno, a pochi km dalla città de L'Aquila. Tra le stazioni sono state scelte le due che presentano la più dettagliata caratterizzazione geotecnica (Chiarini et al., 2011) ed il maggior numero di eventi registrati, identificate con le sigle AQA (Aquila - valle Aterno - fiume Aterno) e AQV (Aquila - valle Aterno - centro valle).

In Tabella 2 sono sintetizzate le informazioni sugli eventi disponibili per entrambe le stazioni; in totale si tratta di 11 eventi, su 25 registrati dalla stazione AQA e 33 dalla AQV.

Le stazioni sono poste ad una distanza relativa di 431m e un azimut di 69.7° , e sono entrambe classificabili come siti di classe B, sebbene la stazione AQA sia caratterizzata da un profilo stratigrafico con rigidità maggiore. Essendo, tuttavia, evidente un maggiore effetto di amplificazione locale sulle registrazioni della stazione AQV (cfr. colonne di a_{max} nella Tabella 2), la stazione AQA è stata considerata come sito di riferimento per queste analisi.

Nelle Figg. 10 e 11 sono mostrate, rispettivamente, le storie temporali degli spostamenti

Tabella 2: Eventi registrati dalle stazioni AQA e AQV.

| Evento | | AQA ^(*) | | AQV | |
|------------------|-------|--------------------|---------------|----------------|---------------|
| Data | M_l | R_{epi} [km] | a_{max} [g] | R_{epi} [km] | a_{max} [g] |
| 14/10/1997 15:23 | 5.5 | 68.4 | 0.012 | 68.4 | 0.017 |
| 15/07/2001 10:48 | 2.2 | 17.0 | 0.002 | 17.4 | 0.002 |
| 30/06/2003 10:11 | 3.4 | 11.7 | 0.013 | 12.1 | 0.013 |
| 25/10/2003 17:33 | 2.7 | 7.9 | 0.007 | 8.2 | 0.008 |
| 21/11/2004 12:03 | 2.7 | 7.9 | 0.007 | 7.9 | 0.010 |
| 06/04/2009 01:32 | 5.8 | 4.6 | 0.444 | 4.9 | 0.657 |
| 08/04/2009 22:56 | 4.3 | 14.7 | 0.016 | 14.5 | 0.031 |
| 09/04/2009 00:52 | 5.1 | 12.1 | 0.058 | 11.9 | 0.155 |
| 09/04/2009 03:14 | 4.2 | 9.1 | 0.041 | 8.8 | 0.052 |
| 09/04/2009 04:32 | 4 | 10.2 | 0.021 | 9.8 | 0.032 |

(*) stazione di riferimento in questo studio.

(finestate nell'intervallo di tempo in cui si sviluppa la fase principale del moto) e gli spettri di risposta in spostamento, calcolati nella direzione longitudinale e trasversale rispetto alla congiungente le due stazioni per il *main shock* del terremoto dell'Aquila del 2009.

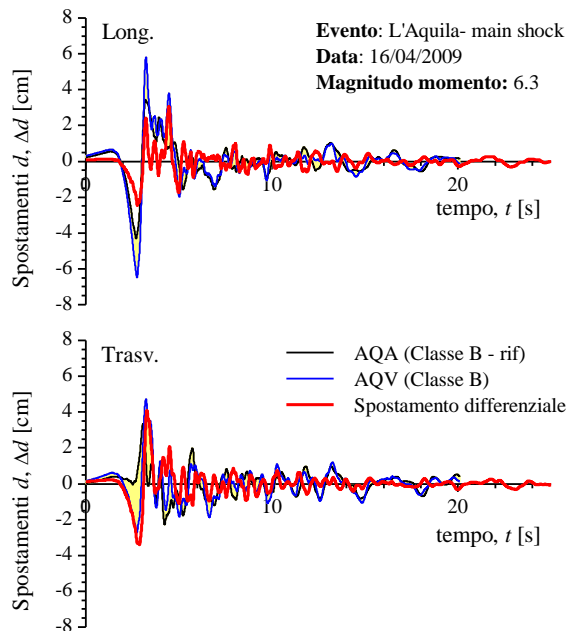


Figura 10. Storia temporale degli spostamenti dell'evento più significativo (*main shock* terremoto aquilano del 06/04/2009) registrato dalle stazioni AQA e AQV.

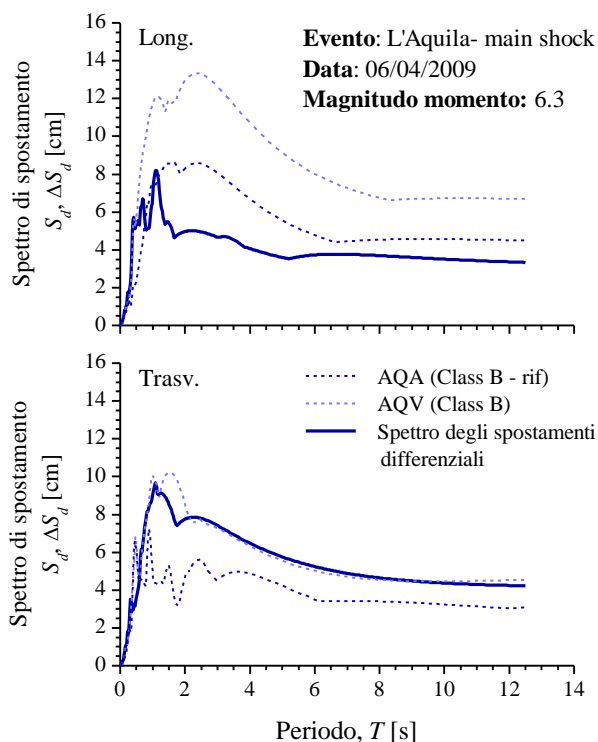


Figura 11. Spettri di risposta in spostamento per la coppia di stazioni AQA-AQV per l'evento più significativo registrato dai siti (*main shock* terremoto aquilano del 06/04/2009).

Nella direzione longitudinale, gli spostamenti sono in fase ed il segnale misurato nella stazione su sito più deformabile (AQV) risulta maggiormente amplificato in ampiezza. Ciò comporta un minor spostamento differenziale tra i due siti sia in termini di d_{\max} (cfr. Fig. 10) che di spettro relativo, $S_{\Delta d}$ (cfr. Fig. 11).

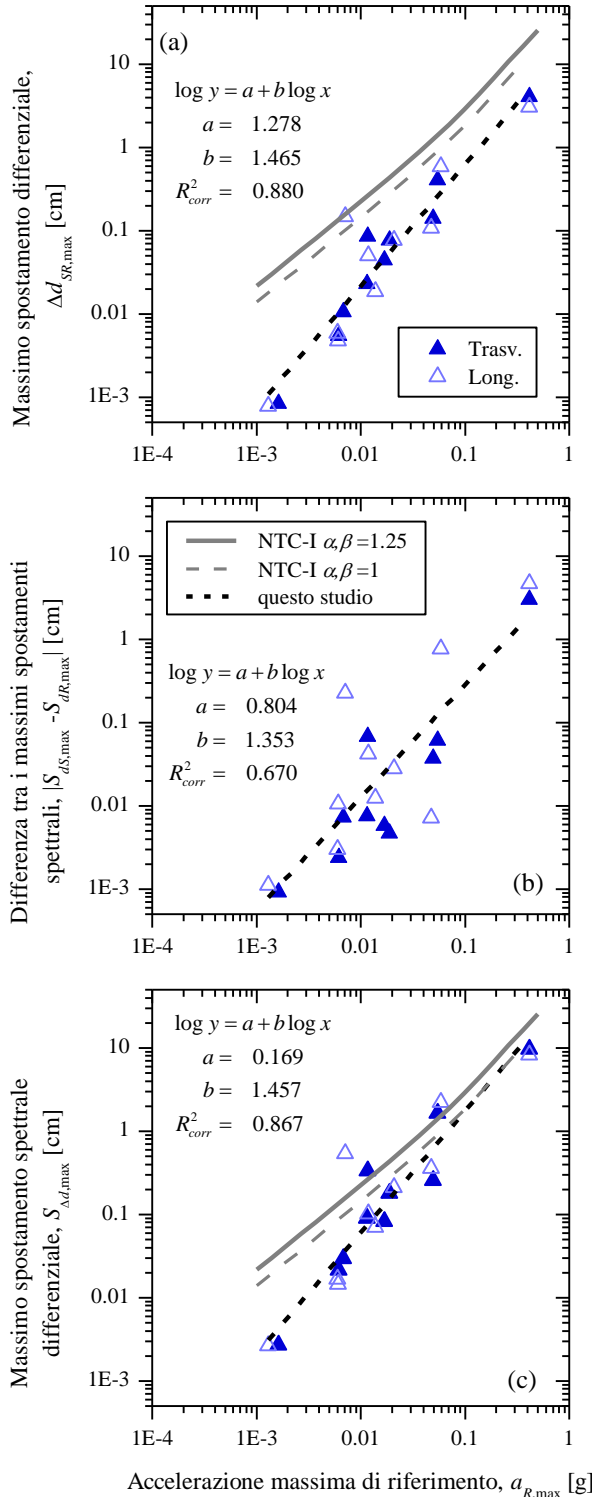


Figura 12. Confronto tra i valori di spostamento differenziale calcolati secondo le indicazioni di normativa (NTC-I) e (a) spostamenti differenziali massimi, (b) differenza degli spostamenti spettrali massimi e (c) valore massimo dello spettro dello spostamento differenziale, per la coppia di stazioni accelerometriche AQA – AQV.

In direzione trasversale, nell'intervallo di tempo corrispondente al maggior rilascio di energia del moto (0-5s), gli spostamenti risultano invece sfasati, con una netta prevalenza del moto registrato alla stazione AQV. Ciò si traduce in uno spostamento differenziale di picco e in un andamento dello spettro di spostamento differenziale prossimi a quelli relativi al sito più deformabile.

I risultati ottenuti per queste registrazioni sono da imputarsi alle condizioni *near fault* che contraddistinguono le registrazioni del transetto di valle Aterno per l'evento sismico del 06/04/2009 (Chioccarelli & Iervolino, 2010). In prossimità della zona epicentrale, infatti, ci si attende un effetto poco significativo dell'incoerenza della propagazione dell'onda sismica tra due siti; l'asincronismo può essere maggiormente influenzato dalla propagazione della rottura lungo il piano di faglia e di conseguenza dagli effetti di direttività, che, nel caso esaminato, dovrebbero essere colti principalmente nella direzione trasversale. Tali effetti, infatti, non si riscontrano per gli altri eventi registrati dalle due stazioni, caratterizzati da distanze epicentrali più significative.

In Figura 12 si riportano i dati campionari ottenuti per le registrazioni indicate in Tabella 2 secondo i tre approcci di calcolo descritti nei paragrafi precedenti. In questo caso il calcolo degli spostamenti secondo le indicazioni di Normativa può essere effettuato solamente mediante l'eq. (1) (cfr. curva B-B in Figura 4) in quanto gli spettri di risposta di progetto per i due siti risultano coincidenti.

5 CONCLUSIONI

In questo lavoro, le procedure indicate dalle NTC 2008 per il calcolo degli spostamenti relativi tra due punti sulla superficie topografica sono state confrontate con i valori ricavati da dati accelerometrici di registrazioni 'empiricamente correlabili' sul territorio nazionale. Queste ultime sono state selezionate tra le stazioni sismiche delle reti nazionali, poste a distanza minore di un km, che presentano variabilità litostratigrafica e geomorfologica i cui effetti sono chiaramente riconoscibili dal confronto tra le registrazioni del medesimo evento. Il calcolo degli spostamenti relativi è stato effettuato con tre approcci differenti.

Il primo approccio consiste nella valutazione del valore di picco della differenza tra le storie temporali degli spostamenti misurati dalle due stazioni accelerometriche. Questo criterio inter-

preta nella forma più rigorosa il fenomeno reale; applicando in tal senso le indicazioni della procedura suggerita dalla Normativa, si ottengono stime superiori anche per un ordine di grandezza dei dati sperimentali. La sovrastima appare decrescente con l'intensità del moto per le coppie di siti A-B (cfr. Fig. 6) e B-B (cfr. Fig. 12a).

Il secondo approccio prevede il calcolo della differenza tra i valori massimi degli spettri di risposta in spostamento, valutati per i due siti. Tale approccio presenta il vantaggio di non richiedere un'analisi dinamica di risposta locale; d'altro canto, poiché non tiene conto dell'asincronismo del moto, conduce a valutazioni necessariamente semplificate degli effetti dello sfasamento del segnale. Di fatto, i valori di spostamento spettrale si possono considerare solamente contemporanei, in fase o in opposizione di fase, corrispondenti in quest'ultimo caso a previsioni eccessivamente prudenziali del massimo spostamento relativo. Il confronto, in questo caso, è stato effettuato con gli spettri di spostamento di progetto forniti dalla Normativa. Anche nell'ipotesi più ottimistica sull'effetto dello sfasamento, l'interpretazione delle indicazioni normative in tal senso appare comunque eccessivamente cautelativa rispetto ai valori sperimentali (cfr. Fig. 8).

Infine si è proposto il calcolo in termini di valore di picco dello spettro di spostamento differenziale definito a partire dal moto relativo tra i due punti. In questo caso, un'analisi dinamica di risposta locale è imprescindibile per applicare le indicazioni della Normativa. Le previsioni ottenute applicando gli altri due approcci alle indicazioni normative non risultano però sempre cautelative rispetto ai dati sperimentali, interpretati in tal senso (cfr. Fig. 9).

Per tutti e tre gli approcci, i risultati confermano che le indicazioni di Normativa riescono comunque a cogliere la relazione funzionale tra gli spostamenti relativi e l'accelerazione di picco di riferimento, mantenendo quasi sempre un sufficiente margine di sicurezza. I limiti della validazione empirica presentata in questo studio rimangono, tuttavia, condizionati dal numero esiguo di stazioni su sottosuolo deformabile di cui sia disponibile anche la registrazione di riferimento su sottosuolo rigido. Le registrazioni delle poche stazioni individuate, inoltre, si riferiscono ad eventi di poche sequenze sismiche, spesso con magnitudo e accelerazioni di picco modeste. Per un'analisi finalizzata alla messa a punto di relazioni più generali di carattere affidabilistico, sa-

rebbe, in linea di principio, necessario ampliare il campione di dati, introducendo le registrazioni di altri eventi sismici, anche non italiani, oppure utilizzando i risultati di analisi numeriche.

Un ultimo aspetto da approfondire è quale sia lo spostamento differenziale sperimentale: nei confronti mostrati, sono stati riportati separatamente quello lungo la congiungente i due siti (*Long.*) e quello nella direzione perpendicolare (*Trasv.*). Nel prosieguo di questo studio, le due componenti andranno combinate tenendo conto della direzione di propagazione del moto.

RINGRAZIAMENTI

La ricerca è condotta con il co-finanziamento del MIUR PRIN 2008: "Effetto del non sincronismo incluso la risposta sismica locale sulla sicurezza dei ponti" (coord. C. Nuti), prot. 20083FFYWP.

BIBLIOGRAFIA

- DM 14/1/2008. Norme Tecniche per le Costruzioni. S.O. n. 30 - *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 20-4/2/2008.
- Landolfi L., Caccavale M., d'Onofrio A., Silvestri F., Tropeano G., 2011. Preliminary assesment of site stratigraphic amplification for shakemap processing. *V International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. Santiago (Chile), 10-13 January 2011.
- Chiarini M., d'Onofrio A., Evangelista L., Penna A. 2011. The role of site effects and near-source seismic actions on ground and buildings response across the Aterno river valley. (Italy). *V International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. Santiago (Chile), 10-13 January 2011.
- Chioccarelli E., Iervolino I., 2010. Near-Source Seismic Demand and Pulse-Like Records: a Discussion for L'Aquila Earthquake. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **39**(9):1039-1062.
- Gazetas G., Dakoulas P., 1992. Seismic analysis and design of rockfill dams: state of-the-art. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **11**(1), 27-61.
- ISO TC98/SC3 N 229, 2003. Bases for design of structures - Seismic actions for designing geotechnical works. *ISO TC 98/SC3 WG10* (1st draft 2003).
- Nuti C., Vanzi I., 2005. Influence of earthquake spatial variability on differential soil displacements and SDF system response. *Earthquake Engineering And Structural Dynamics*, **34**, 133-1374.
- Scasserra G., Lanzo G., Stewart J.P., D'Elia B. 2008. SISMA (Site of Italian Strong Motion Accelerograms): a web-database of ground motion recordings for engineering applications. *Proc. of MERCEA'08*, July 8-11, Reggio Calabria, Italy, **2**, 1649-1656.
- St. John C. M., Zahrah T. F., 1984. Seismic design considerations for underground structures. *Advances in Tunneling Technology and Subsurface Use*, **4**(3), 105-112.
- Working Group ITACA, 2010. Data Base of the Italian strong motion records: <http://itaca.mi.ingv.it>.