L'AMPLIFICAZIONE DEL MOTO SISMICO NEGLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA E NELLE NORME TECNICHE DELLE COSTRUZIONI

F. Pergalani[1], M. Compagnoni[1], T. Sanò[2], G. Naso[3]
[1] *Politecnico di Milano*
[2] *Libero Professionista*
[3] *Dipartimento della Protezione Civile, Roma*

Introduzione. I risultati dei livelli 1 e 3 della Microzonazione Sismica (MS1 e MS3 in ICMS, 2008), per i fenomeni di amplificazione del moto sismico, hanno evidenti ricadute in ambito di pianificazione.

Gli studi di MS3 possono però anche fornire un supporto in fase di progettazione dei manufatti, in quanto presentano evidenti analogie con le analisi di Risposta Sismica Locale (RSL) previste dalle Norme Tecniche delle Costruzioni (NTC, 2008).

Le analogie riguardano l'elevato livello di approfondimento delle indagini di caratterizzazione dei siti e dei materiali, le procedure di analisi (approccio numerico e sperimentale) e la tipologia dei risultati prodotti (spettri elastici).

La differenza sostanziale tra le due analisi quantitative (MS3 e RSL) risulta essere l'estensione dell'area investigata: "microzona" nel caso degli studi di MS e "area interessata dalle fondazioni dell'edificio" nel caso di studi di RSL. Una ulteriore differenza riguarda il momento di esecuzione dello studio rispetto alla progettazione dell'opera: gli studi di MS3 sono generalmente svincolati dall'opera in progetto, mentre nel caso degli studi di RSL sono note le caratteristiche dell'opera ed esse sono un dato di input strettamente necessario.

E' utile ricordare inoltre che le NTC prevedono, in alternativa all'analisi RSL (analisi specifiche in cap. 7.11.3), l'utilizzo, in determinate condizioni non complesse, di un approccio semplificato (cap. 3.2.2) con una definizione sintetica delle amplificazioni litostratigrafiche e topografiche (coefficiente $S = S_s*S_t$) attraverso l'identificazione di categorie di sottosuolo e della categoria topografica.

In considerazione di quanto esposto e del fatto che gli ICMS prevedono 3 livelli di approfondimento degli studi di MS, l'obiettivo di questo contributo è definire le possibili correlazioni tra i risultati di MS e quanto previsto per le amplificazioni dalle NTC.

Utilizzo dei risultati degli studi di MS. *Possibile utilizzo dei risultati degli studi di MS1.* Le informazioni degli studi di livello MS1 non sono evidentemente confrontabili con i risultati attesi da uno studio di RSL, rappresentando solo uno strumento propedeutico per studi di maggior dettaglio.

Tali studi però permettono di individuare situazioni geologiche, geomorfologiche e geofisiche complesse, che richiedono necessariamente approfondimenti con metodologie di indagini ed elaborazioni specifiche e per le quali non è applicabile l'approccio semplificato proposto dalle NTC.

Le situazioni complesse più comuni, identificabili già con studi di livello MS1, possono essere così schematizzate:

- substrato rigido sepolto con geometria articolata (substrato rigido disarticolato da faglie, andamento del substrato a *Horst* e *Graben*);
- zona di raccordo tra rilievo e pianura (zona di "unghia" con substrato rigido sepolto in approfondimento sotto la pianura, in maniera continua o discontinua e con angoli di immersioni variabili);
- geometria del substrato rigido che crea una valle stretta colmata da sedimenti soffici;
- successione litostratigrafica che prevede terreni rigidi su terreni soffici (profilo di V_s con inversioni di velocità);
- paleoalvei riempiti di terreni molto soffici, in affioramento o sepolti;
- substrato rigido profondo alcune centinaia di metri;
- presenza, nel profilo di velocità delle V_s, di marcati contrasti di impedenza sismica;

- geometrie di corpi caratteristici di aree vulcaniche (colate laviche, spessori di ignimbriti molto variabili, ecc.)
- aree soggette a instabilità permanenti (frane, liquefazioni, faglie attive e capaci, cavità sepolte, ecc. nelle quali sono possibili aggravi delle amplificazioni).

In sintesi quindi se a seguito di studi di livello MS1, si evince che il sottosuolo di un manufatto presenta uno degli aspetti sopra elencati, le indagini e le elaborazioni numeriche per le amplificazioni non dovrebbero assolutamente riferirsi all'approccio semplificato di NTC, e quindi necessitano di studi di MS3 o di RSL. L'utilizzo degli studi di MS1 diventa quindi indispensabile e dirimente rispetto alla complessità del sottosuolo.

Possibile utilizzo dei risultati degli studi di MS3

I risultati forniti dagli studi di livello MS3 sono generalmente spettri di risposta elastici in accelerazione al 5% dello smorzamento critico, calcolati in *free field* e riferiti ad un determinato livello di pericolosità sismica (ovvero ad un determinato tempo di ritorno, che normalmente è riferito a 475 anni).

Gli spettri elastici di MS3 possono essere confrontati con il corrispondente spettro di risposta elastico dell'approccio semplificato o con quello degli studi di RSL dell'approccio specifico.

Il confronto con lo spettro elastico calcolato con l'approccio semplificato di NTC potrà avvenire dopo un semplice processo di standardizzazione (modifica della forma in ICMS cap.2.5.3.3).

Il confronto tra spettro di MS3 e spettro di RSL potrà invece avvenire direttamente senza nessun intervento di modificazioni sulla forma.

Gli spettri elastici di MS3 possono essere utilizzati in fase di progettazione secondo le limitazioni e tenendo presente le criticità illustrate di seguito.

Definizione di alcuni limiti e criticità dei risultati della MS3 e della RSL. L'immediato utilizzo degli spettri di risposta di MS3 per la progettazione, senza sviluppare una RSL *ad hoc* nell'area di fondazione del manufatto, è possibile e si descriverà una proposta operativa più avanti, ma è indispensabile preliminarmente chiarire alcuni limiti e criticità dei risultati di MS3 e della RSL.

Ambiti di applicabilità e livelli prestazionali. Per diretta derivazione della definizione e degli ambiti di applicabilità della MS (ICMS, 2008), gli studi di MS3 possono fornire utili indicazioni in fase di progettazione, limitatamente all'area di estrapolabilità dei risultati, solo per edifici di importanza ordinaria (classi d'uso 1 e 2 ovvero per il periodo di riferimento $Vr \geq 50$) e per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita, SLV.

Per gli edifici di classe d'uso 3 e 4 sono necessari studi di RSL.

Nei casi in cui gli effetti di non linearità possono essere considerati limitati e comunque trascurabili, dovuti sia a basso livello energetico atteso, sia a alta rigidezza dei materiali, i risultati degli studi di MS3, condotti con pericolosità riferita a tempi di ritorno di 475 anni, possono essere opportunamente scalati in ampiezza, riferendosi a tempi di ritorno diversi. La scalatura in termini di forma spettrale, può essere trascurata, in quanto nel caso di assenza di non linearità, le variazioni di forma possono essere considerate irrilevanti.

Si ritiene comunque che i risultati degli studi di MS3 debbano essere di supporto agli studi di RSL, anche per edifici di classe 3 e 4, per valutazioni su eventuali amplificazioni su aree più estese rispetto a quelle del volume significativo interessato dalle fondazioni. Si ritiene inoltre che anche per tali edifici i risultati degli studi di MS3 possano essere di supporto agli studi di RSL sotto la diretta responsabilità del progettista che li assume autonomamente.

La scala di indagine e di elaborazione dei dati. Gli studi di MS3 hanno come obiettivo la caratterizzazione sismica, mediante parametri quantitativi, di aree omogenee dal punto di vista geologico, geotecnico e geofisico (microzone).

Le NTC richiedono che nella progettazione siano affrontati aspetti e conseguiti obiettivi simili agli studi di MS alla scala dell'opera o del sistema geotecnico.

Una criticità potrebbe essere riscontrata nelle incertezze e nei possibili errori legati alla

localizzazione delle indagini. Le valutazioni andranno fatte sull'opportunità di espletare indagini concentrate solo nell'intorno del manufatto, e quindi sicuramente significative per l'area di fondazione, o indagini estese a dintorni più ampi e più rappresentativi della complessità del sottosuolo rispetto ai problemi di amplificazione del moto sismico (ad esempio, gli effetti amplificativi di una zona di raccordo tra rilievo e pianura, con il substrato sismico del rilievo che si immerge con un alto angolo sotto le coperture di terreni soffici della pianura, non sarà esplorata da indagini limitate all'area di fondazione).

Infatti, nelle NTC la progettazione è riferita ad uno specifico manufatto (o sistema geotecnico) e quindi riguarda siti di limitata estensione in pianta (scala del manufatto, generalmente dell'ordine delle centinaia di m^2). Il volume significativo di terreno (Cap. 6.2.2) è definito come la parte di sottosuolo influenzata, direttamente o indirettamente, dalla costruzione dell'opera e che influenza l'opera stessa. Il volume significativo ha forma ed estensione diverse, a seconda del problema in esame e deve essere individuato caso per caso, in base alle caratteristiche dell'opera e alla natura e caratteristiche dei terreni.

La MS opera su scala territoriale, e le stesse microzone possono avere estensioni variabili, in dipendenza delle condizioni di complessità del sottosuolo (Tab. 1).

Come si evince dalla tabella 1, ricavata con i dati di circa 400 studi di MS (art. 11 del D.L. 39/2009) le dimensioni delle microzone non si discostano in grandezza dall'area di indagine consigliata per una RSL (es. per una microzona stabile suscettibile di amplificazione nel caso di popolazione inferiore ai 5000 abitanti la dimensione media 0,10 kmq, è un quadrato di circa 300x300 m).

Tab. 1 - Dimensione media delle microzone negli studi di Microzonazione Sismica (art. 11 del D.L. 39/2009).

Popolazione	Zone stabili		Zone stabili con amplificazione		Zone instabili	
	#Zone	dimensione media (kmq)	#zone	dimensione media (kmq)	#zone	dimensione media (kmq)
Pop<=5000	176	0,12	1224	0,10	2048	0,01
50000<Pop<=10000	26	0,11	296	0,20	368	0,02
Pop>10000	36	0,36	605	0,74	1111	0,05

In generale, quindi, le indagini e lo studio a supporto della progettazione di un manufatto forniscono informazioni più puntuali e specifiche sulle caratteristiche geotecniche e geofisiche dei terreni di fondazione.

I risultati di MS3, basati sulla sintesi di dati relativi ad aree leggermente più estese, offrono una conoscenza più diffusa dell'area e, dal punto di vista del comportamento delle onde sismiche vicino alla superficie, offrono un quadro più esaustivo.

Il programma di indagini. Le NTC (cap. 6.1) definiscono in maniera dettagliata le indagini per la caratterizzazione del modello geotecnico del sottosuolo che interessa l'opera. Il modello deve tener conto di:

- condizioni stratigrafiche
- regime delle pressioni interstiziali
- caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni e delle rocce comprese nel volume significativo.

La scelta delle indagini è anche condizionata dalla tipologia strutturale dell'opera e dallo stato prestazionale da esaminare.

Sono anche previste indagini integrative per studi di RSL (Cap. 7.11.3.1.1), in particolare si danno indicazioni su indagini geofisiche (CH, DH, MASW, rumore ambientale ecc.) e indagini geotecniche (colonna risonante, ecc.)

Le tipologie delle prove descritte sono le stesse che si utilizzano comunemente per gli studi di MS3 (Fig.1). E' probabile però che il numero di prove a disposizione degli studi di MS3 potrebbero permettere di controllare meglio le incertezze epistemiche intrinseche della metodologia.

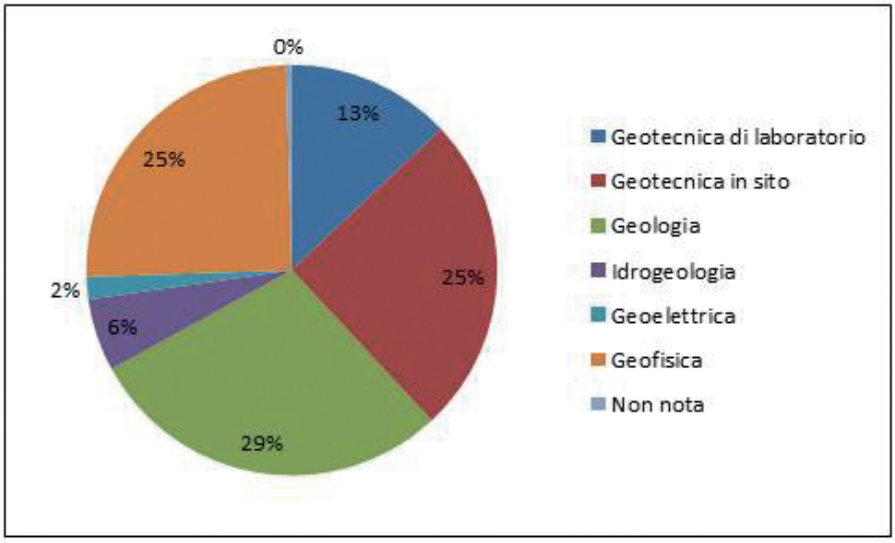

Fig. 1 – Indagini espletate per gli studi di MS. Come si vede il tipo di indagini sono quelle indicate dal cap.6.1 e 7.11.3.1.1 di NTC08 (vedi testo), ovvero i metodi di analisi del sottosuolo non differiscono affatto tra uno studio di MS3 e uno studi di RSL. (Dati riferiti agli studi di MS art. 11 del D.L. 39/2009, maggio 2014).

Definizione delle azioni sismiche di ingresso per le simulazioni numeriche. Sia per gli studi di MS3 che per gli studi di RSL, il moto sismico è fornito in ogni punto della superficie in termini di:

- accelerazione massima
- spettro di risposta elastico
- accelerogramma.

Sia per MS3 che per RSL, lo studio viene effettuato per valutare le modifiche che il segnale sismico subisce, a causa dei fattori locali, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (categoria di sottosuolo A).

In NTC (Cap. 3.2.3.6 "Azione sismica - Valutazione dell'azione sismica – Impiego di accelerogrammi") è riportato: "*l'uso di accelerogrammi artificiali non è ammesso nelle analisi dinamiche di opere e sistemi geotecnici*"…, sono ammessi invece accelerogrammi ricavati mediante simulazioni del meccanismo di sorgente o accelerogrammi registrati (con alcune raccomandazioni sulle caratteristiche sismogenetiche della sorgente, sulle condizioni del sito di registrazione, sulla coppia magnitudo-distanza e sulla massima accelerazione orizzontale attesa al sito). Non viene invece riportato nessuna indicazione in merito all'utilizzo dei risultati della RSL.

La Circolare esplicativa di NTC, al Cap. C7.11.3.1.2.2, invece cita la RSL e specifica perché non si possono utilizzare accelerogrammi di ingresso artificiali:

"*Gli accelerogrammi artificiali spettro-compatibili sono caratterizzati da contenuti in frequenza irrealistici… sono caratterizzati da una banda di frequenza irrealisticamente ampia. L'uso di accelerogrammi artificiali in un'analisi di risposta sismica locale può produrre un'amplificazione contemporanea, e perciò poco realistica, dei diversi modi di vibrazione del sistema, mentre un'azione sismica reale, caratterizzata da una larghezza di banda modesta,*

amplifica un numero limitati di modi, o al limite un unico modo. Inoltre, dal momento che la risposta dei terreni a una sollecitazione ciclica è non lineare, la rigidezza e la capacità di dissipare energia dipendono dall'ampiezza del livello deformativo…Se l'azione sismica è poco realistica, la rigidezza e lo smorzamento operativi prodotti dalla non-linearità del comportamento del terreno sono molto distanti dal vero e la conseguente risposta sismica risulta falsata."

La spiegazione data, pur corretta teoricamente, non definisce l'errore introdotto dall'uso di accelerogrammi artificiali rispetto a quello dei naturali. Sanò e Pugliese (2012) calcolano che l'errore dei risultati, spesso in condizioni di sicurezza, è di qualche percento decisamente inferiore dell'incertezza insita nelle analisi (sia nella definizione del moto di riferimento, sia nella scelta delle caratteristiche geometriche e meccanica dei terreni).

In ICMS (cap. 3.1.8.3.2 "Calcolo del moto di input con analisi di pericolosità di base") si definisce un metodo per cui si calcola con approcci probabilistico-statistici uno spettro elastico a pericolosità uniforme (Tr = 475) e da questo vengono generati accelerogrammi artificiali attraverso una generazione sintetica, non stazionaria, fissata la magnitudo, la distanza e la PGA.

Lo svantaggio di questo approccio è quello definito da NTC e sopra riportato, i vantaggi risiedono nel poter associare una stima probabilistica alle azioni attese, cumulando il contributo di tutte le sorgenti significative ai fini della determinazione della scuotibilità globale del sito investigato.

Il piano di riferimento. Una criticità spesso evidenziata nei rapporti tra i due tipi di studio è quella del piano di riferimento rispetto al quale si calcola il moto sismico.

I risultati degli studi di MS3 sono riferiti al piano campagna in condizioni di *free field*.

In NTC non c'è nessun riferimento diretto per i risultati degli studi di RSL e bisogna far riferimento ad altri parti del testo e interpretare le indicazioni che vengono date per altre tematiche.

Un riferimento in NTC è al punto 3.2.2 "Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche" dove, per la definizione dell'azione sismica con il metodo semplificato, si precisa a quale profondità calcolare il $Vs,_{30}$: "Per le fondazioni superficiali, tale profondità è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali".

Al punto C3.2.3 della Circolare esplicativa (sempre in riferimento alle Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche e quindi su come calcolare Vs,30) poi si spiega che: "*Si denomina risposta sismica locale" l'azione sismica quale emerge in superficie a seguito delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza subite trasmettendosi dal substrato rigido*." Per individuare in modo univoco la risposta sismica si assume come "superficie" il "piano di riferimento" quale definito, per le diverse tipologie strutturali, al § 3.2.2 delle NTC. Ovvero: "*Per fondazioni superficiali ci si riferisce al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione*".

C'è a questo proposito da osservare che se ci si riferisce al piano di riferimento dell'opera, le fondazioni (meglio ancora se sono profonde) "migliorano" le condizioni di rigidezza del terreno, quindi calcolare lo spettro in superficie *free field* (studi di MS3) è una condizione generalmente cautelativa.

Infine, gli studi di RSL, dai quali si determina l'azione sismica di progetto per il manufatto, devono essere effettuati relativamente a quote di riferimento generalmente diverse dal piano campagna, e che sono funzione intrinseca dell'opera in esame (piano di posa per le fondazioni superficiali, testa dei pali per le fondazioni profonde, e così via); peraltro le azioni sul manufatto dovrebbero, a rigore, tenere conto anche dell'interazione tra il terreno e la struttura.

Proposta di utilizzo dei dati e dei risultati della MS3 in fase di progettazione. Sulla base di quanto scritto si propone una modalità di utilizzo dei dati e dei risultati degli studi di MS3 in

fase di progettazione.

Dati di base. La definizione del modello di sottosuolo (da intendersi come integrazione del "modello geologico", del "modello geotecnico" e del "modello geofisico") per l'esecuzione di studi di MS3 e di RSL richiede l'uso di metodi di indagine convenzionali e/o propri della dinamica dei terreni quali (AGI, 1977, 2005):

- sondaggi litostratigrafici;
- prove *in situ* (CPT, SPT, DMT, ecc.);
- installazione di piezometri e misura delle pressioni interstiziali;
- prove geofisiche *in situ* (DH, CH, cono sismico, SDMT, SASW, MASW, ecc.)
- prove geotecniche di laboratorio (determinazione di proprietà indice e di stato, prove edometriche, triassiali, colonna risonante, ecc.).

La quantità e la tipologia delle indagini geotecniche, in accordo con le NTC, sono definite dal progettista, che se ne assume la responsabilità, in funzione del tipo di intervento e tenendo conto del modello geologico riportato nella relazione geologica. Le indagini devono permettere la definizione dei modelli di sottosuolo necessari alla progettazione e sono legate alla classe di prestazione richiesta dall'opera e quindi alla metodologia di analisi da adottare.

Le indagini devono, quindi, essere programmate non solo per lo studio della RSL ma, in generale, anche per la caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni al fine delle verifiche di stabilità e di esercizio delle opere che interagiscono con essi e questo è anche un obiettivo degli studi di MS3.

Quale che sia la metodologia impiegata, la caratterizzazione dei terreni deve essere estesa a un volume significativo legato alla natura delle sollecitazioni e al problema oggetto di studio.

Riepilogando, la caratterizzazione del sottosuolo nell'ambito del volume significativo deve avere come obiettivi minimi:

- la definizione della litostratigrafica
- le definizione delle geometrie dei corpi litologici
- la conoscenza del regime delle pressioni interstiziali (superficie libera della falda, condizioni di quiete o di moto dell'acqua)
- la conoscenza delle proprietà fisiche e meccaniche dei diversi terreni.

Sulla base di questi dati è possibile effettuare sia studi di RSL che di MS3.

Elaborazioni e risultati partendo da uno studio di MS3. Partendo dalle elaborazioni di MS3 (carte e spettri di risposta elastici) è possibile definire una procedura operativa per il sito del manufatto in oggetto.

La procedura proposta prevede che il progettista, responsabile del manufatto:

1) verifichi in quale microzona della carta di MS3 si trova il sito del manufatto di interesse;
2) valuti, per la microzona identificata:
   - mappa con localizzazione delle indagini eseguite
   - carta geologico tecnica e sezioni geologico tecniche rappresentative della microzona
   - mappa delle misure strumentali della risposta in frequenza del sottosuolo
   - risultati delle indagini geotecniche e geofisiche
   - gli spettri di risposta elastici in superficie, calcolati con simulazioni numeriche;
3) valuti, con il supporto di un tecnico specialista competente, se i risultati riferiti alla microzona sono affidabili anche per il sito del manufatto di interesse, sulla base di:
   - esperienze e conoscenze pregresse del sito del manufatto
   - vicinanza al sito del manufatto delle indagini e delle elaborazioni numeriche degli studi di MS3
   - affidabilità delle indagini e delle modellazioni numeriche eseguite
   - rappresentatività degli studi di MS3, sia per la caratterizzazione dei terreni di fondazione del manufatto, sia per l'assetto del sottosuolo dell'area;

4) verifichi se il requisito di affidabilità e rappresentatività richiesto al punto 3) è soddisfatto o meno:
   a. se è soddisfatto, utilizzerà direttamente lo spettro di risposta elastico definito nella MS3
   b. se il requisito non è soddisfatto, dovrà effettuare ulteriori indagini nel sottosuolo, rispettando le indicazioni di NTC ed effettuare uno studio di RSL.

La procedura delineata deve essere calibrata (es. numero e tipo di indagini) sul manufatto da progettare.

E' importante ribadire che nel caso di due o più manufatti piccoli, ubicati in adiacenza in uno stesso sito, le indagini devono intendersi come riferite all'unico sito "geotecnico" (vedi anche Circolare del Vicecommissario delegato per il soccorso delle popolazioni colpite dal terremoto dell'Aquila del 2009 - n. 484 del 05/01/2010).

Ovviamente la procedura esposta è valida anche per la verifica di manufatti esistenti, con le integrazioni previste in NTC (Cap. 8 e Circolare esplicativa C8.7.1.2).

Infine, i risultati forniti dagli studi di MS3, in termini di spettri di risposta elastici in accelerazione, al 5% dello smorzamento critico, calcolati in *free field* e riferiti ad un determinato livello di pericolosità sismica (ovvero ad un determinato tempo di ritorno riferito a 475 anni), possono essere confrontati direttamente con il corrispondente spettro di risposta elastico assegnato dall'approccio semplificato di NTC.

Lo spettro di risposta elastico calcolato dovrà essere standardizzato riportandolo nella forma usata da NTC ovvero delimitando i tratti ad accelerazione, velocità e spostamento costante (una procedura possibile è illustrata negli ICMS).

Il confronto dovrebbe essere eseguito in termini di valori spettrali in corrispondenza dell'intervallo di periodo di vibrazione compreso tra 0.15-2.0 s.

Bibliografia

Associazione Geotecnica Italiana, AGI; 1977: *Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche*.

Associazione Geotecnica Italiana, AGI; 2005: *Associazione Geotecnica Italiana - Linea guida. Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica*. Patron Editore, Bologna.

Circolare 05/01/2010, n. 484 - *Soccorso delle popolazioni colpite dal terremoto dell'Aquila del 2009*.

Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica, ICMS; 2008: *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*. Dipartimento della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e Province autonome; 3 vol. e 1 DVD.

Norme Tecniche per le Costruzioni, NTC; 2008: *Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008*. Gazzetta Ufficiale, n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30, www.cslp.it, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma (ultimo accesso settembre 2014) e relativa circolare esplicativa.

Sanò T., Pugliese A.; 2012: *Accelerogrammi artificiali nelle analisi di amplificazione sismica locale*, IJEGE,2,2012.