

Studi di Microzonazione Sismica: storia, attuazione e applicazioni in Italia

AUTORE: Alessandro Pagliaroli, Professore Associato Università degli Studi 'G. d'Annunzio' Chieti - Pescara.

ABSTRACT

Gli studi di Microzonazione Sismica rappresentano uno strumento imprescindibile per la riduzione del rischio sismico. Nell'articolo è riportata una breve storia della MS in Italia, lo stato di attuazione degli studi di MS previsti dall' art. 11 della legge 77/2009, le principali fasi tipicamente multidisciplinari che costituiscono uno studio di MS. Sono infine discusse le principali applicazioni della MS e i rapporti con le Norme Tecniche per le Costruzioni.

Introduzione

Gli effetti del moto sismico in superficie, sia sull'ambiente naturale che su edifici e infrastrutture, dipendono da molteplici fenomeni fisici raggruppabili in alcune categorie fondamentali: liberazione di energia alla sorgente, propagazione delle onde sismiche dalla sorgente al sito, effetti di sito (o locali) e interazione dinamica terreno-struttura. In questo articolo ci concentriamo sulle condizioni geologiche, morfologiche e geotecniche locali (condizioni locali) che, interagendo con il moto sismico in ingresso al sito risultante dal meccanismo di sorgente e dalla propagazione sorgente-sito, possono alterare in maniera fondamentale lo scuotimento e produrre importati effetti di sito.

Generalmente l'espressione effetti di sito è associata ai terreni a comportamento sismico stabile, cioè quei terreni che, sotto le sollecitazioni prodotte da un terremoto sono soggetti a limitate deformazioni permanenti mantenendosi lontani dalla rottura. In questo caso si parla di Risposta Sismica Locale (RSL) per indicare l'insieme delle modifiche che il moto sismico in ingresso subisce, in termini di ampiezza, contenuto in frequenza e durata, per effetto delle condizioni locali. Con il termine effetti locali di instabilità si indicano invece i fenomeni che comportano deformazioni permanenti importanti ovvero un comportamento sismico instabile (frane, densificazione o liquefazione di depositi sabbiosi, collassi di cavità, fagliazione superficiale). In Figura 1 sono mostrati i principali effetti di sito che possono manifestarsi a seguito di un evento sismico. Per quanto riguarda la RSL si possono distinguere (Fig. 1): 1) effetti stratigrafici, che hanno luogo in corrispondenza di depositi soffici poggianti su un basamento rigido in condizioni essenzialmente di strati piani e paralleli (1D); 2) effetti di valle o di bordo che hanno luogo allorché la morfologia del contatto tra basamento e terreni soffici di copertura assume andamenti complessi caratterizzati da geometrie marcatamente 2D/3D; 3) effetti topografici che hanno luogo in prossimità delle strutture morfologiche superficiali (es. alla cresta di un rilievo roccioso).

L'analisi della RSL, eseguita alla scala delle opere di ingegneria consente di quantificare le modifiche esercitate sul moto sismico dalle condizioni locali permettendo una stima più accurata delle sollecitazioni sismiche sulle strutture. L'analisi degli effetti locali a scala urbana, ovvero la perimetrazione di aree a comportamento sismico omogeneo (in termini di risposta sismica locale e di instabilità permanenti),

costituisce l'oggetto degli studi di Microzonazione Sismica (MS) che trovano applicazione nella pianificazione territoriale e dell'emergenza, nella ricostruzione post-sisma e nel supporto alla progettazione antisismica.

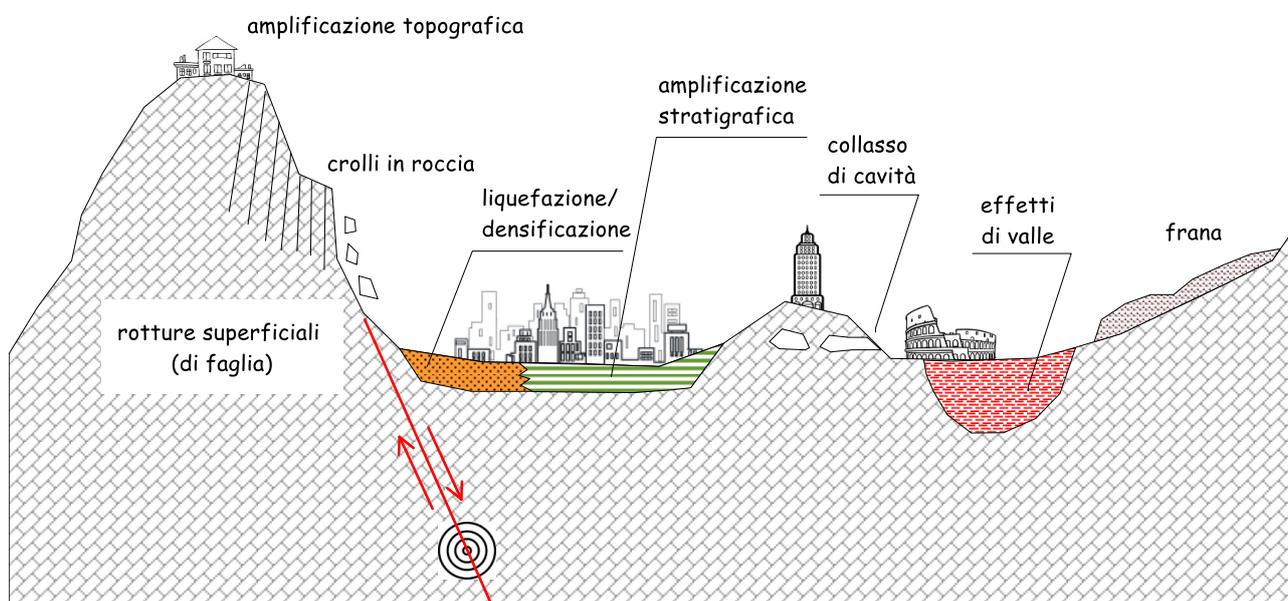


Figura 1 - Scenari di pericolosità sismica locale.

Breve storia della Microzonazione Sismica in Italia e stato di attuazione degli studi

L'inizio di questa storia possiamo fissarlo con l'intuizione dei fenomeni di RSL, cioè che i danneggiamenti osservati siano in qualche modo legati alle condizioni locali. Scrive Leopoldo Pilla nel 1846: *...la esperienza ha dimostrato in Italia che i paesi sono flagellati dal tremuoto principalmente in ragione della natura e forma del suolo in cui sono situati [...] si può ad essi assegnare l'ordine crescente che segue di esposizione al pericolo: paesi situati sopra monti di rocce sode; paesi in pianura; paesi giacenti sopra poggi di rocce friabili.* ("Istoria del tremuoto che ha devastato i paesi della costa toscana il 14 agosto 1846"). Nel Regio Decreto n. 193 de 18.04.1909, emanato dopo il terremoto Messina-Reggio Calabria del 1908, si vietano nuove costruzioni e ricostruzioni *su terreni posti sopra e presso fratture, franosi o atti comunque a scoscendere, od a comunicare ai fabbricati vibrazioni e sollecitazioni tumultuose per differente costituzione geologica o diversa resistenza delle singole parti di essi.* Queste intuizioni sono state ampiamente confermate dai successivi terremoti e negli ultimi 40-50 anni, anche in seguito allo sviluppo di nuove discipline come l'Ingegneria Geotecnica Sismica, si è tentato di definire procedure per la corretta valutazione degli effetti locali anche in fase previsionale. Seguendo il lavoro di Crespellani (2014) possiamo individuare tre generazioni di studi di MS in Italia (Figura 2). La prima generazione inizia con gli studi di MS post terremoto come quelli ben noti di Tarcento e dei comuni dell'Irpinia, accompagnati in questi anni da alcuni progetti pilota come quello della MS di Napoli. Questa esperienza sfocia nella produzione di prime linee guida per la MS nel 1986 a cura del Gruppo di Lavoro "Microzonazione Sismica" del Progetto Finalizzato Geodinamica del CNR. L'inizio della Seconda generazione possiamo fissarlo con terremoto Umbria-Marche del 1997: accanto a studi post terremoto (es. i comuni dell'Umbria, San Giuliano di Puglia), si assiste ad un notevole impulso dato dalle Regioni agli studi di MS con molteplici progetti pilota: MS di Fabriano e Senigallia (Regione Marche), progetto VEL (Regione Toscana) per citare gli esempi più rilevati; aumenta inoltre il contributo dell'Ingegneria Geotecnica: le indagini in sito e in laboratorio vengono sistematicamente incluse nel processo di costruzione del modello di sottosuolo finalizzato alle valutazioni degli effetti di sito. Il punto di arrivo di queste esperienze sono gli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (ICMS) del 2008 a cura del Dipartimento della

Protezione Civile e della Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome (Gruppo di Lavoro, 2008). In accordo agli ICMS, gli studi di MS sono eseguiti secondo tre livelli di approfondimento crescente: livello 1, qualitativo e basato essenzialmente sulle condizioni geologiche e morfologiche, raccolta di dati pregressi ed esecuzione di indagini geofisiche speditive (es. microtremori); livello 2, semiquantitativo basato su indagini di approfondimento e sull'applicazione di abachi per la valutazione dell'amplificazione del moto sismico e metodi empirici/analitici per verifiche di liquefazione/stabilità dei pendii; livello 3, quantitativo e di dettaglio, basato su indagini geologiche, geotecniche e geofisiche di dettaglio e su modellazioni numeriche della risposta sismica. Gli ICMS sono subito stati applicati negli studi di MS per la ricostruzione della conca aquilana a seguito del sisma del 2009; questa esperienza ha portato ad un aggiornamento degli stessi (Gruppo di Lavoro, 2011). La terza generazione inizia a seguito della legge 77/2009 che con l'art. 11 (Piano nazionale per la prevenzione del rischio sismico) stanziava fondi per la prevenzione del rischio sismico destinati, tra l'altro, all'esecuzione di studi di MS nei comuni italiani. È un passaggio importante perché gli studi di MS diventano da esercizio pressoché accademico uno strumento ordinario di riduzione del rischio sismico sull'intero territorio nazionale. È inoltre abbandonata la "rincorsa" dei terremoti e si passa pienamente alla cultura della prevenzione del rischio sismico. La legge 77/2009 prevede che possono essere finanziati per la MS quei comuni caratterizzati da una pericolosità sismica maggiore di una certa soglia espressa in termini di accelerazione di picco su suolo rigido (classe A delle Norme Tecniche) con tempo di ritorno 475 anni ($a_g \geq 0.125g$); i comuni aventi diritto sono circa 3900 di cui il 96% risultano finanziati a Marzo 2020 (Moscatelli et al., 2020). A marzo 2021 risultano eseguiti e validati oltre 2000 studi di MS di cui circa 1500 (il 73%) di livello 1 mentre il restante 27% ha già raggiunto il livello 2/3 (fonte: <https://www.webms.it/servizi/stats.php>).

Un'altra tappa importante della storia della MS è la costituzione del Centro per la Microzonazione Sismica e le sue Applicazioni (CentroMS, <https://www.centromicrozonazioneisismica.it/it/>) avvenuta nel 2015 su iniziativa del Dipartimento Terra e Ambiente del CNR. L'eterogeneità della composizione del centro, formato da molteplici dipartimenti universitari ed enti di ricerca, riflette l'aspetto multidisciplinare degli studi di MS. Gli obiettivi del Centro sono: i) promuovere e coordinare le attività di ricerca applicata nel campo della MS, ii) definire protocolli e procedure sperimentali efficaci ed interdisciplinari, iii) curare la formazione dei professionisti e dei tecnici che operano sul territorio; iv) assistere dal punto di vista tecnico le istituzioni locali nell'implementazione delle conoscenze sulla pericolosità sismica locale nelle azioni di governo del territorio. Il CentroMS è stato coinvolto nelle attività di MS successive alla sequenza sismica dell'Italia Centrale del 2016-2017 realizzando studi «propedeutici alla microzonazione sismica» di livello 3 nei comuni Amatrice, Arquata del Tronto, Accumoli, Montegalbo per conto del Dipartimento della Protezione Civile (DPC). Successivamente, per conto del Commissario Straordinario per la ricostruzione, il CentroMS ha formato, supportato e coordinato i professionisti incaricati degli studi di MS di livello 1 (106 località) e di livello 3 (342 località) nei comuni delle quattro regioni colpite dal sisma: Lazio, Marche, Umbria e Abruzzo (Moscatelli et al., 2020, Pergalani et al., 2020). Questi studi di MS sono consultabili e scaricabili sul sito gestito dalla Struttura del Commissario (<https://sisma2016data.it/microzonazione/>).

Fasi di uno studio quantitativo di MS

La MS è un'operazione scientifica altamente complessa e multidisciplinare. Le principali fasi di uno studio quantitativo degli effetti locali per finalità di MS (livello 2/3) sono mostrati nella Figura 3 che evidenzia anche le principali discipline coinvolte. Uno degli aspetti fondamentali è la scelta dell'input sismico definito sulla base di studi probabilistici (PSHA) o deterministici (DSHA) o più semplicemente adottando uno spettro di normativa (su suolo rigido); a questa scelta concorrono studi di geologia strutturale e di sismicità storica, e tipicamente l'azione sismica di riferimento è poi specificata mediante parametri sintetici del moto sismico o

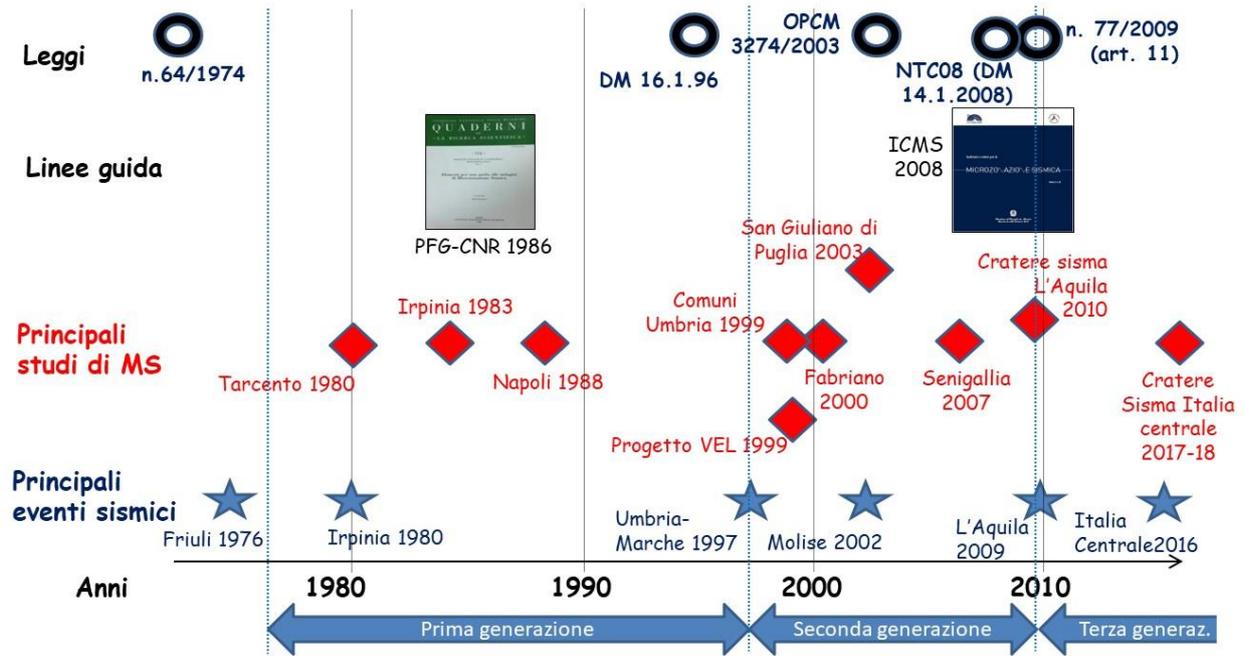
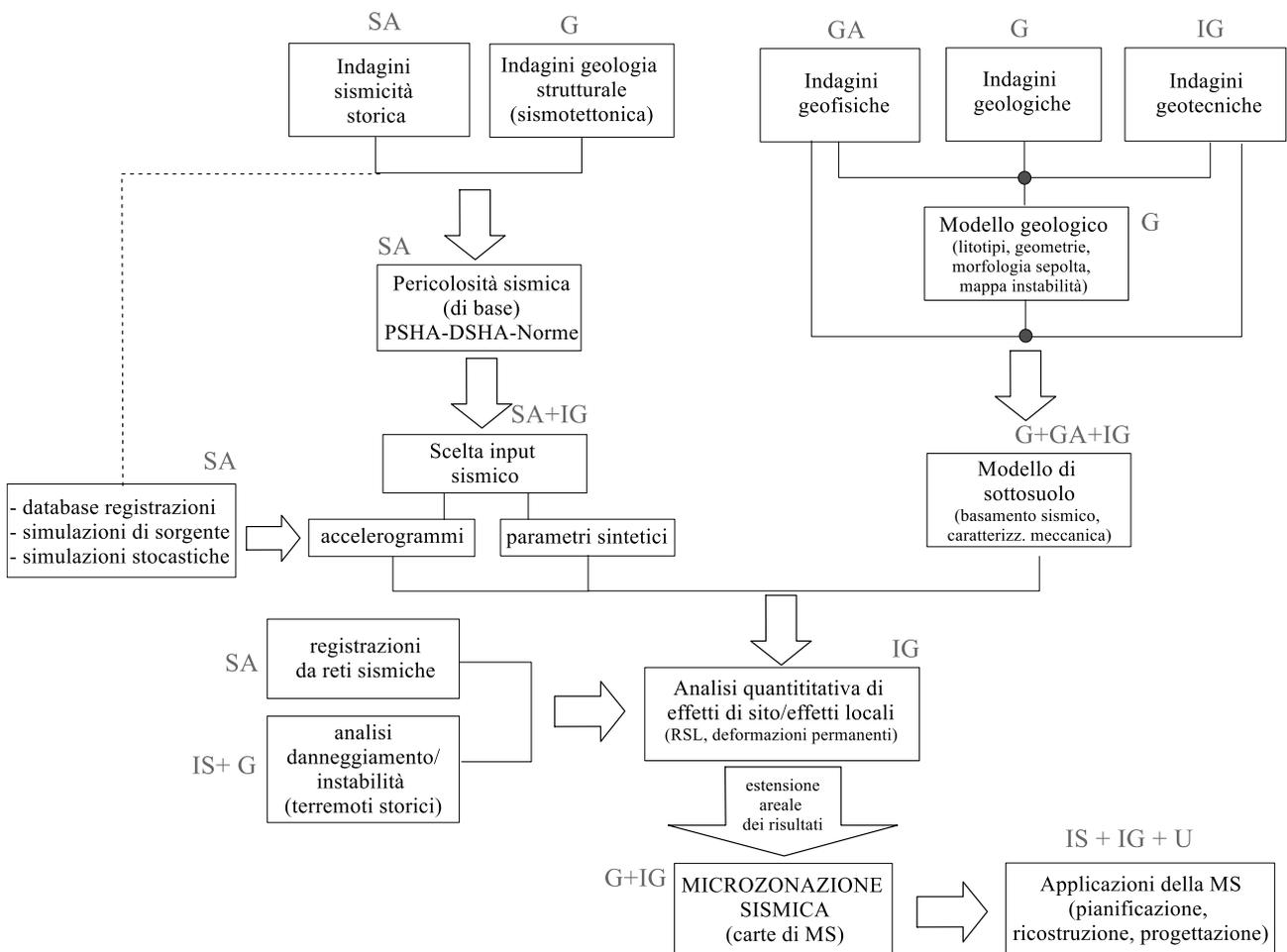


Figura 2 – Storia della MS in Italia



SA=Sismologia Applicata; GA=Geofisica Applicata; G=Geologia; IG=Ingegneria Geotecnica; IS=Ingegneria Strutturale; U=Urbanistica

Figura 3 – Fasi di uno studio di MS di livello 2/3 (quantitativo) e discipline coinvolte

accelerogrammi, estratti da database di registrazioni di terremoti, simulati (modelli di sorgente e propagazione sorgente-sito) o generati da simulazioni stocastiche (accelerogrammi artificiali). Un altro aspetto critico è la definizione del modello di sottosuolo frutto di indagini geologiche, geofisiche e geotecniche; si parte tipicamente da un modello geologico in cui si definiscono i litotipi, i rapporti geometrici tra di essi, la morfologia sepolta; la caratterizzazione meccanica di questi litotipi e la definizione del basamento sismico conduce quindi al modello di sottosuolo per l'analisi quantitativa degli effetti locali o della RSL che avviene applicando al modello l'input definito in precedenza. La definizione del modello di sottosuolo è un'operazione multidisciplinare che richiede la stretta collaborazione tra Geologo e Ingegnere Geotecnico. Tale collaborazione è cruciale anche per l'estensione areale dei risultati delle analisi quantitative (tipicamente 1D e 2D) che conduce alla carta di MS; in questa fase occorre anche tenere conto di eventuali registrazioni del moto sismico disponibili o della distribuzione del danneggiamento e dei fenomeni di instabilità osservati durante eventi sismici storici. I risultati degli studi di MS possono poi essere applicati in diversi ambiti: tipicamente nella pianificazione urbanistica e dell'emergenza, nella ricostruzione nel caso di MS post terremoto, e nel supporto alla progettazione.

Un esame delle principali criticità scientifiche che caratterizzano ciascuna delle fasi precedenti è riportato in Pagliaroli (2018) con riferimento a casi di studio paradigmatici al quale si rimanda avendo questo lavoro un taglio volutamente divulgativo.

Applicazioni degli studi di Microzonazione Sismica e rapporti con le Norme Tecniche

Pianificazione

La MS è riconosciuta come uno strumento di riduzione del rischio sismico attraverso l'implementazione dei suoi prodotti nelle azioni di pianificazione territoriale e gestione del territorio. Le ricadute sulla pianificazione sono evidenti; la MS, infatti, fornendo una gerarchia tra le varie aree di un centro urbano in termini di amplificazione del moto sismico e la localizzazione delle possibili aree di instabilità consente di: i) collocare le aree verdi nelle zone più critiche, ii) ubicare gli edifici strategici nelle zone più sicure, iii) definire priorità per gli interventi di miglioramento sismico nelle zone abitate, iv) evitare fenomeni di doppia risonanza nelle nuove progettazioni, v) identificare i punti più critici per le infrastrutture e le reti di servizio a sviluppo lineare. Gli studi di MS sono inoltre importantissimi nella pianificazione dell'emergenza consentendo ad esempio di individuare le aree dove collocare le zone di raccolta, le aree di accoglienza/ricovero, le strade di collegamento in fase di emergenza (Aversa e Crespellani, 2016). Un interessante contributo all'utilizzo dei risultati degli studi di MS è fornito dalla recente ordinanza n. 55 del 24 Aprile 2018 che nell'Allegato 1 definisce i "Criteri generali per l'utilizzo dei risultati degli studi di Microzonazione Sismica di livello 3 per la ricostruzione dei territori colpiti dagli eventi sismici a far data dal 24 agosto 2016". Al punto 2 si disciplina l'uso della MS nella pianificazione; in particolare per le aree stabili (non soggette a deformazioni permanenti) ma suscettibili di amplificazione del moto sismico: *"i fattori di amplificazione definiti per ogni singola microzona consentiranno valutazioni sul contesto nel quale si colloca il territorio interessato dalle attività di ricostruzione (vie di accesso all'abitato, con particolare attenzione ai centri storici, collegamenti tra gli edifici principali, in particolare le scuole, edifici prospicienti le vie di comunicazione principali), nonché indicazioni al pianificatore per definire il regolamento edilizio e la scelta della tipologia dell'edificato. In particolare, gli strumenti di pianificazione urbanistica comunale, attraverso l'analisi dei fattori di amplificazione:*

- a) individuano il grado relativo di pericolosità locale di ciascuna parte del territorio urbanizzato e urbanizzabile;*
- b) definiscono prescrizioni per la riduzione del rischio sismico, fissando, per le diverse parti del territorio, i limiti e le condizioni per realizzare gli interventi di trasformazione urbanistica ed edilizia".*

Per quanto riguarda le zone caratterizzate da terreni a comportamento instabile (sviluppo di deformazioni permanenti), l'ordinanza rimanda alle linee guida specifiche che riportano la disciplina d'uso per i vari fenomeni di instabilità (faglie attive e capaci, liquefazione e instabilità di versante). Le linee guida sono disponibili sul sito del CentroMS (<https://www.centromicrozonazioneismica.it/it/download/category/24-linee-guida>, ultimo accesso marzo 2021).

Supporto alla progettazione

Riguardo al possibile utilizzo dei risultati degli studi di MS nella progettazione, occorre premettere alcune considerazioni sui rapporti tra i due principali strumenti tecnici per la riduzione del rischio sismico cioè MS e Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018). La condivisione tra i due strumenti di alcune attività, in particolare la valutazione quantitativa della risposta sismica locale (prevista sia dalle NTC che dagli studi di MS di livello 3), ha portato infatti ad alcune ambiguità. Una riflessione ancora utile sui rapporti tra MS e NTC è quella di Crespellani e Martelli (2008) che hanno evidenziato come i due strumenti di prevenzione del rischio operano in aree nettamente separate e distinte. Sono infatti diverse le finalità (la zonazione di un territorio nella MS, la valutazione delle azioni sismiche nelle NTC), la scala a cui operano i due strumenti (scala urbana per la MS, scala del manufatto per le NTC), l'estensione delle indagini necessarie agli studi (su aree estese in siti rappresentativi delle varie condizioni di sottosuolo per MS, nel sito del manufatto per NTC). Tuttavia, gli stessi Autori hanno sottolineato che, pur non essendo direttamente utilizzabili per la progettazione, gli studi di MS di livello più approfondito (Livelli 2 e 3 secondo ICMS) sono un importante riferimento per orientare il progettista sulla natura dei rischi del sito in cui ricade il manufatto. Gli studi di MS possono sicuramente supportare la progettazione in quanto (Pagliaroli, 2018):

- La disponibilità dei dati di base (geologici, geofisici, geotecnici) utilizzati negli studi di MS e riportate secondo gli standard ICMS in apposite carte delle indagini, consente una programmazione più mirata e consapevole delle indagini alla scala del manufatto; la MS consente inoltre di accedere a indagini areali di costo generalmente non sostenibile nella progettazione ordinaria e volte ad esempio all'identificazione di morfologie sepolte a scala maggiore del manufatto o all'identificazione del basamento sismico a profondità rilevanti;
- le mappe di MS indicano se il manufatto ricade in un'area caratterizzata da comportamento instabile del terreno in occasione di sisma; in tal caso il progettista deve valutare se procedere a indagini integrative ed analisi quantitative rapportate alla fase di progettazione e al tipo di instabilità (liquefazione, instabilità dei pendii, collasso cavità, ...).

Gli spettri di risposta prodotti nell'ambito degli studi di MS di livello 3 (generalmente associati alle varie microzone insieme ai fattori di amplificazione) non sono direttamente utilizzabili nella progettazione in quanto:

- il livello di affidabilità del modello di sottosuolo usato nella MS è generalmente basso nel sito del manufatto dove potrebbero non essere state eseguite indagini nel corso della MS;
- gli spettri MS sono restituiti solo per un valore del tempo di ritorno (generalmente 475 anni) non necessariamente coincidente con quelli degli Stati Limite adottati per la progettazione;
- gli spettri MS sono calcolati al piano campagna in condizioni di *free-field* mentre la progettazione richiede la definizione delle azioni al piano di fondazione e, a rigore, tenendo conto dell'interazione struttura-fondazione-terreno.

L'utilizzo di spettri già pronti può comportare inoltre un altro rischio concreto: ridurre l'entità delle indagini da eseguire nel sito del manufatto in fase di progettazione, fondamentali non solo per la definizione delle azioni sismiche ma per una corretta analisi delle problematiche di tipo geotecnico.

Tuttavia, gli spettri di MS di livello 3, anche se non direttamente impiegabili nella progettazione, possono costituire uno strumento utile per consentire al progettista di scegliere in maniera oggettiva se utilizzare l'approccio semplificato di norma basato sulle categorie di sottosuolo o eseguire analisi di RSL *ad hoc* per calcolare le azioni sismiche. In tal senso, la citata ordinanza n. 55 del 24 Aprile 2018 – Allegato 1 stabilisce che il progettista delle strutture dovrà confrontare tra loro:

- lo spettro di risposta medio ottenuto dallo studio di MS3 e relativo alla microzona in cui ricade in manufatto (tale spettro va opportunamente regolarizzato in forma tipo norma secondo il metodo riportato nell'Appendice 1 alla stessa Ordinanza);
- lo spettro di risposta ottenuto con l'approccio semplificato della normativa sismica per la categoria di sottosuolo in corrispondenza del manufatto e per il tempo di ritorno di 475 anni.

Il confronto va eseguito nell'intervallo T_{min} e $2T_{max}$ dove T_{min} e T_{max} sono il minore e il maggiore dei tre periodi di vibrazione dell'edificio (inteso come struttura tridimensionale) con massa partecipante più elevata, mentre il fattore 2 tiene conto dell'allungamento dei periodi a causa della non linearità

Il confronto tra i due spettri in tale intervallo è fatto in termini puntuali ed integrali (Figura 4). Il progettista deve accertare se:

- lo spettro di MS3 supera puntualmente più del 30% lo spettro semplificato di norma NTC18;
- l'integrale dello spettro di MS3 è superiore del 20% rispetto al corrispondente integrale dello spettro semplificato di norma.

Se nessuna delle due condizioni è verificata, è possibile utilizzare l'approccio semplificato della normativa sismica. Se almeno una delle condizioni di cui sopra è verificata, lo spettro previsto dall'approccio semplificato della normativa può ritenersi significativamente meno conservativo di quello di MS3. In questo caso il progettista dovrà procedere ad indagini di approfondimento nel sito del manufatto a seguito delle quali rivalutare l'applicabilità dell'approccio semplificato. In caso questo non fosse applicabile (ad esempio per la presenza di importanti effetti 2D) dovrà procedere ad analisi specifiche di RSL.

Quanto detto vale per sia per le costruzioni di classe II che per quelle di classe III-IV; per queste ultime il confronto sarà comunque effettuato per un tempo di ritorno di 475 anni e nel caso in cui lo spettro di norma risulti conservativo questo sarà utilizzato per determinare gli spettri di risposta per tutti i tempi di ritorno necessari.

Riferimenti bibliografici

- Aversa S., Crespellani T. (2016). Seismic Microzonation: an essential tool for urban planning in seismic areas. UPLanD – Journal of Urban Planning, Landscape & environmental Design, 1(1), 121-152.
- Crespellani T., Martelli L. (2008). Microzonazione sismica e Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008). Ingegneria sismica, n. 2, pp. 51-54
- Crespellani T. (2014). Seismic Microzoning in Italy: a brief history and recent experiences. Ingegneria Sismica, anno XXXI, n.2, pp. 3-31.
- Gruppo di Lavoro ICMS (2008). Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica. Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome-Dipartimento della Protezione Civile, http://www.protezionecivile.gov.it/media-comunicazione/pubblicazioni/dettaglio/-/asset_publisher/default/content/indirizzi-e-criteri-per-la-microzonazione-sismica.
- Gruppo di Lavoro ICMS (2011). Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica. Ingegneria Sismica, anno XXVIII, n.2, 2001, 68 pp.
- Moscattelli M., Albarello D., Scarascia Mugnozza G. (2020). The Italian approach to seismic microzonation. Bulletin of Earthquake Engineering (2020) 18:5425–5440.

Pagliaroli A. (2018). Key issues in Seismic Microzonation studies: lessons from recent experiences in Italy. *Rivista Italiana di Geotecnica - Italian Geotechnical Journal*, n. 1/2018, pp. 5-48.

Pergalani F., Pagliaroli A., Bourdeau C., Compagnoni M., Lenti L., Lualdi M., Madaia C., Martino S., Razzano R., Varone C., Verrubbi V. (2020). Seismic microzoning map: approaches, results and applications after the 2016–2017 Central Italy seismic sequence. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18: 5595–5629.

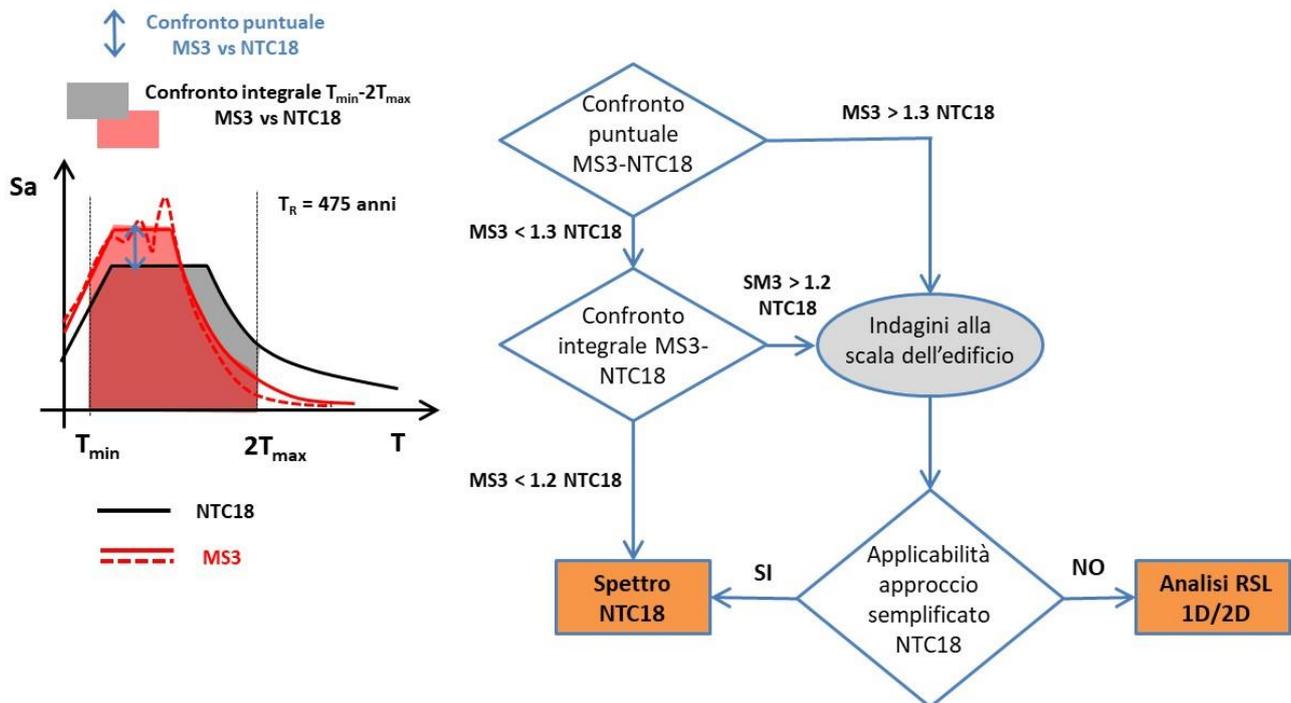


Figura 4 – Procedura di confronto tra lo spettro di risposta medio regolarizzato ottenuto dalla MS di livello 3 (spettro MS3) e quello semplificato di norma (NTC18) secondo Allegato 1 Ordinanza n.55/2018