

## STATO DI AVANZAMENTO DEGLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA DELLA REGIONE TOSCANA: ESPERIENZE E CRITICITÀ

M. Baglione, P. Fabbroni, V. D'Intinosante

Ufficio Prevenzione Sismica, Regione Toscana, Firenze

**Premessa.** L'Ufficio Prevenzione Sismica della Regione Toscana è impegnato, come è noto, ormai da diversi anni nella mappatura sismica del territorio regionale e nello specifico nella programmazione, realizzazione e validazione di indagini e studi di Microzonazione Sismica (di seguito MS).

Tale attività va ad integrarsi a tutti gli studi che già da diversi anni sono stati portati avanti dalla Regione Toscana attraverso il Programma di Valutazione degli Effetti Locali (VEL), nell'ambito del quale sono state migliorate e/o sviluppate metodologie di valutazione degli effetti locali basate su misure sistematiche delle velocità delle onde sismiche trasversali effettuate con varie tecniche (sismica a rifrazione con onde di taglio, prove down-hole, ecc.).

Queste modalità operative hanno consentito di poter fornire un quadro della pericolosità sismica del territorio regionale, la cui attendibilità è direttamente connessa con il grado di approfondimento e di dettaglio dello studio in questione.

Gli studi di MS, avviati obbligatoriamente in Toscana mediante il regolamento regionale 53R/2011 ed incentivati mediante finanziamenti regionali (L.R.58/2009) e nazionali (L. 77/2009 art.11) rivolti ai Comuni, costituiscono ormai un valido, consolidato e riconosciuto strumento per analizzare la pericolosità sismica locale applicabile sia in fase di pianificazione urbanistica, sia in fase di progettazione che in fase emergenziale.

Ad oggi infatti circa il 50% del territorio regionale dispone di studi e indagini di microzonazione sismica di livello 1 già certificati o in fase di realizzazione. Inoltre per n.14 Comuni, la Regione Toscana dispone di studi di microzonazione sismica anche di livello 3; quindi è opportuno effettuare una sintesi delle conoscenze acquisite in modo da evidenziare gli aspetti rilevanti e le eventuali criticità.

**Criteri e metodologie di lavoro.** Gli studi di MS effettuati dalla Regione Toscana, sono stati realizzati nel rispetto delle "Linee Guida Nazionali per la Microzonazione Sismica e degli Standard di rappresentazione e di archiviazione informatica" (ICMS, 2008) prodotti dalla Commissione tecnica nazionale per la Microzonazione Sismica e recepiti nell'ambito della normativa regionale dalla Regione Toscana con Deliberazioni di Giunta Regionale (n.261/2011; n.741/2012; n.971/2013).

Particolare importanza, in questa prima fase di predisposizione degli studi di MS, è stata data alla redazione degli studi di primo livello. Infatti anche se il primo livello assume una valenza qualitativa senza fornire alcuna indicazione in merito alla quantificazione degli effetti amplificativi attesi, questo tuttavia riveste un ruolo determinante e cruciale nell'indirizzare correttamente i livelli di approfondimento successivi. Lo studio di microzonazione di primo livello deve essere quindi inteso come una vera e propria ricostruzione tridimensionale del contesto geologico di un'area, definendo non solo le geometrie e gli spessori dei corpi sedimentari (e conseguentemente la profondità del substrato geologico), ma anche molti altri aspetti come ad esempio granulometria ed addensamento dei depositi, superficie della falda, morfologia, dissesti gravitativi dei versanti ed altri ancora che possono a vario titolo condizionare la risposta sismica locale di una determinata area e per la definizione dei quali è necessario un approccio multidisciplinare ed integrato del territorio. Pertanto per raggiungere tali obiettivi si è puntato su alcuni aspetti che si ritengono di prioritaria importanza.

1) *Definizione dell'area di studio.* Gli studi di MS in Toscana, non vengono realizzati sull'intero territorio comunale, ma in corrispondenza delle aree significative che il Comune individua secondo le specifiche tecniche definite all'interno del Programma di Valutazione Effetti Locali, denominato Programma VEL (Ferrini *et al.*, 2007); in altre parole, vengono selezionati gli elementi più significativi quali ad esempio i principali centri abitati, gli edifici

strategici e/o le aree di espansione, con una copertura del territorio da definire in funzione delle peculiarità di ciascun territorio, delle problematiche sismiche, della sensibilità politica e non ultimo delle risorse economiche.

Una volta individuate le aree, la delimitazione delle stesse viene effettuata secondo i criteri definiti al par. 3.4.2 degli ICMS e sostanzialmente viene realizzata estendendone il perimetro ad un “congruo intorno”, scelto in considerazione non solo degli aspetti urbanistici, ma anche sulla base degli aspetti geomorfologici, geologici e geometrico-strutturali che possono produrre fenomeni di amplificazione sismica locale.

In altre parole, se per esempio l’area oggetto di studio è ubicata su un fondovalle piuttosto stretto, è buona norma estendere l’area considerando tutti gli elementi geomorfologici presenti, inserendo quindi anche i versanti della valle stessa. Una perimetrazione di un’area costituita esclusivamente da sedimenti alluvionali trova giustificazione in bacini ampi e caratterizzati da un substrato geologico posto in profondità, mentre rischia di essere fuorviante in contesti come quelli delle valli appenniniche, dove al contrario, l’inserimento delle spalle rocciose della valle, fornisce utili ed immediate indicazioni in merito alla presenza di un substrato geologico superficiale.

Nello stesso modo verranno evidenziati anche gli aspetti geologici e geomorfologici delle aree poste su versante, dove in caso di rilievi di modesta entità è consigliabile estendere l’area dalla base alla sommità del versante, mentre per versanti con elevato sviluppo planoaltimetrico non potendo ovviamente estendere l’area all’intero versante si ritiene sufficiente estenderla sino a comprendere interamente (dove possibile) i corpi di frana o le placche di detrito/colluvio che interessano ad esempio il centro abitato oggetto di studio.

Ne risulta che nella quasi totalità dei casi l’area su cui avviare le indagini è più estesa rispetto a quella occupata dai centri abitati oggetto di studio. Questo aspetto è basilare e presenza immediate ricadute pratiche anche in termini di controllo di qualità della cartografie prodotte.

2) *Reperimento cartografie ed indagini esistenti.* Una volta definita l’area di studio il primo importantissimo passo riguarda il reperimento di tutti dati esistenti cominciando con l’analisi delle cartografie geologiche e geomorfologiche disponibili. In tale fase è molto importante eseguire una valutazione del materiale presente in quanto ai fini della microzonazione sismica necessitano cartografie a scala di dettaglio (saranno pertanto da prediligere cartografie in scala 1:2.000 o 1:10.000) di recente realizzazione, che saranno comunque oggetto di una revisione critica da parte del soggetto realizzatore dello studio, anche e soprattutto, in funzione delle evidenze di appositi sopralluoghi eseguiti in campagna e non ultimo, delle risultanze delle indagini esistenti che in molti casi possono fornire utili informazioni ai fini di una accurata rappresentazione delle coperture e dei limiti tra queste ed il substrato geologico dell’area. In altri termini, partendo dalle cartografie geologiche esistenti si deve pervenire ad una cartografia geologica di sintesi che vada a sviscerare le reali problematiche riguardanti la microzonazione dei centri abitati, con particolare riferimento alle coperture che solitamente caratterizzano le aree antropizzate. Se infatti è vero che in una carta geologica classica molto spesso le aree urbanizzate e talvolta anche le coperture detritiche e colluviali vengono trattate sommariamente, privilegiando la rappresentazione dell’assetto strutturale dell’area, ai fini della microzonazione invece tali aree e certi aspetti divengono invece importantissimi e molto spesso determinanti per definire il passaggio tra zone stabili e zone stabili suscettibili di amplificazione locale.

3) *Dal modello geologico preliminare al modello geologico definitivo.* Una volta definita la cartografia geologica di sintesi è buona norma realizzare un congruo numero di sezioni geologiche “preliminari” allo scopo di definire sin dalle prime fasi del lavoro il modello geologico dell’area alla luce delle conoscenze esistenti.

Questa operazione è di fondamentale importanza per focalizzare sin da subito eventuali zone che per complessità geologico-stratigrafiche o scarsità di dati sismo-stratigrafici necessitano di approfondimenti di indagini e quindi pianificare una adeguata e appropriata campagna di misure HVSR che oltre a chiarire tali aspetti avrà il compito di validare o eventualmente correggere il modello geologico “preliminare”.

Proprio per l'importanza che riveste una corretta definizione del modello geologico, in Toscana si è optato per indirizzare le attività verso studi di livello 1 che potessero avvalersi non solo dei dati pregressi ma anche di indagini di nuova realizzazione che sono appunto richieste obbligatoriamente, pervenendo così alla realizzazione di studi di microzonazione di buona qualità che vengono indicati con il nome di livello 1 "pesante".

Le indagini aggiuntive ovviamente varieranno per tipologia e consistenza numerica in funzione del contesto geologico-stratigrafico dell'area, delle indagini esistenti e ovviamente delle risorse disponibili.

In Toscana si è scelto di richiedere obbligatoriamente, nell'ambito degli studi di MS di livello 1, la realizzazione di misure HVSR in quanto tale tipologia di indagine oltre ad avere dei costi piuttosto contenuti, ben si adatta allo scopo di estrapolare ed estendere arealmente dati di natura sismo-stratigrafica derivanti da precedenti campagne di indagine che forniscono informazioni dettagliatissime ma di carattere puntuale.

Inoltre per alcuni siti è stata fatta la scelta di associare alle misure del rumore sismico a singola stazione (HVSR) anche ulteriori misurazioni, effettuate con la collaborazione del Dip.to di Scienze della Terra dell'Università di Firenze, effettuate tramite l'utilizzo di stazioni sismiche, costituite da digitalizzatori Guralp CMG-DM24 a 24 bits equipaggiate di GPS e sismometri triassiali Lennartz 3D/5sec con frequenza di oscillazione propria di 0.2 Hz. In questo modo il confronto tra le registrazioni di terremoti in stazioni installate sui terreni di copertura rispetto alla stazione di riferimento posizionata su substrato sismico (Standard Spectral Ratio SSR, Borchardt, 1970) privo di effetti di amplificazione significativi, integrate poi anche con le misure di rumore a stazione singola, consente di raggiungere al contempo due importanti obiettivi:

- verificare, validare o correggere le frequenze fondamentali dei terreni ottenute da indagini HVSR basate sul solo rumore sismico;
- fornire una valutazione qualitativa dell'ampiezza dei possibili effetti di amplificazione sismica mediante il rapporto con la stazione di riferimento (Standard Spectral Ratio, SSR).

Questo aspetto è utilissimo per la selezione e perimetrazione delle zone stabili suscettibili di amplificazione in ragione della variabilità del contrasto di impedenza tra substrato e copertura.

Il ricorso a campagne di misure HVSR, meglio se integrate anche con registrazioni di terremoti, fornisce pertanto un utilissimo strumento per la comprensione del modello geologico e solitamente, in contesti piuttosto semplici contraddistinti da una generale omogeneità dei terreni di copertura, la migrazione delle frequenze fondamentali dei depositi è strettamente correlabile con l'approfondimento del substrato geologico mentre l'entità del picco H/V fornisce indicazioni in merito al contrasto di velocità tra i vari corpi sismostratigrafici con particolare riferimento al passaggio substrato sismico-coperture.

L'esempio riportato in Fig. 1 è relativo all'abitato di Vicchio (FI) nell'area del Mugello. Tale sito presenta valori di frequenze fondamentali piuttosto variabili, che vanno da valori elevati (intorno a 5-8 Hz) localizzati prevalentemente in corrispondenza dell'abitato e sul margine meridionale del bacino, a valori mediamente più contenuti (inferiori a 3 Hz) concentrati nella porzione occidentale e settentrionale dell'area di indagine, dove lo spessore della copertura sedimentaria è maggiore. Inoltre i rapporti spettrali HVSR ed SSR mostrano chiari picchi di risonanza: per una serie di stazioni (V08, V09, V10 e V13) è presente un singolo picco di amplificazione a bassa frequenza (0.55-1.67 Hz) per le quali si suggerisce la presenza di un singolo contrasto di impedenza attribuibile al passaggio al bedrock sismico; per le altre stazioni (stazioni V03 e V11) sono invece presenti due picchi di amplificazione, uno a frequenza più bassa (0.7-1.7 Hz), compatibile con il picco spettrale precedente, e uno a frequenza più elevata (3-9 Hz). Tali indagini hanno consentito infine di stimare la profondità dell'interfaccia risonante fondamentale variabile tra 0 e 113 m p.c.

**Modello geologico-tecnico.** Ai fini della realizzazione di uno studio di microzonazione sismica una volta stabilito in maniera univoca il modello geologico, è necessario pervenire

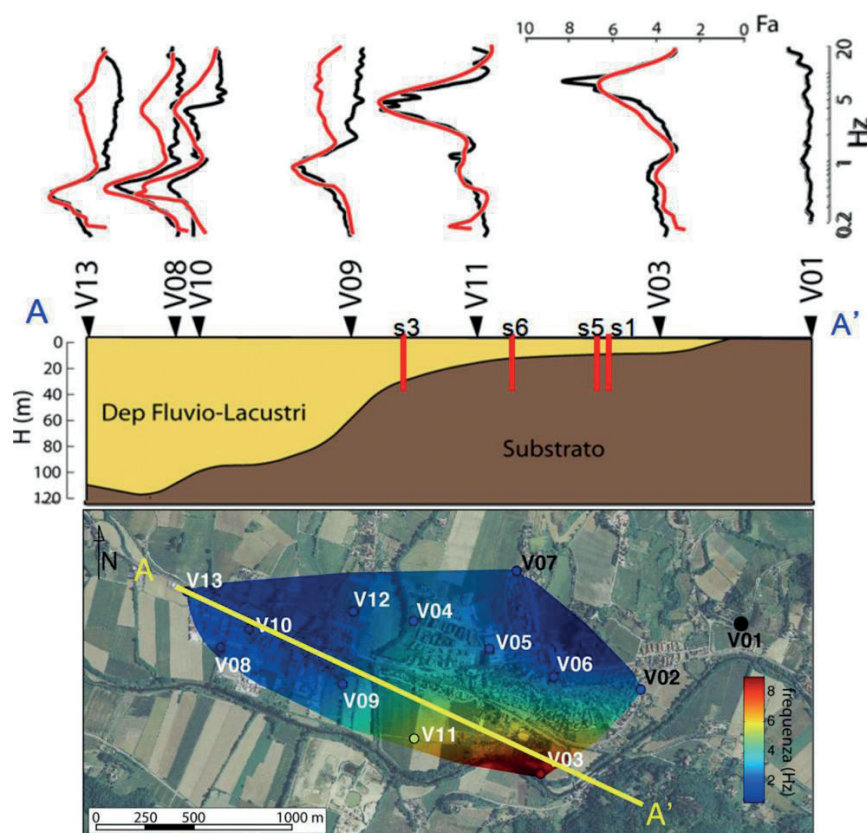


Fig. 1 – Ricostruzione della profondità del substrato sismico eseguito nel comune di Vicchio attraverso l'integrazione delle analisi spettrali (HVSR in nero,  $HVSR_T$  in rosso) e dei sondaggi sismo-stratigrafici disponibili. In questo caso la profondità del substrato è stata stimata applicando l'equazione  $f = v_s / 4H$  dove  $f$  è la frequenza,  $v_s$  la velocità media delle onde di taglio del pacco sedimentario ricavata dai sondaggi disponibili, ed  $H$  la profondità dell'orizzonte risonante.

alla realizzazione del modello geologico-tecnico di sintesi nel quale oltre alle caratteristiche litostratigrafiche saranno evidenziate anche tutte le altre caratteristiche in grado di interagire con lo scuotimento sismico come ad esempio geomorfologia, assetto strutturale, caratteri geotecnici e geofisici e non ultime le caratteristiche idrogeologiche.

A supporto degli studi di microzonazione viene pertanto richiesta la realizzazione della carta geologico-tecnica, dove oltre alla totalità di informazioni derivanti dalla sovrapposizione dei tematismi sopra citati, l'aspetto sostanziale riguarda la rivisitazione del modello geologico stratigrafico definitivo mediante l'individuazione e la perimetrazione di unità geologico tecniche suddivise in base a caratteristiche litotecniche omogenee.

In pratica in questa fase viene richiesta una semplificazione del modello geologico (talvolta estremamente dettagliato) accorpando quei terreni e quei substrati geologici che presentano caratteristiche tra loro simili, ponendo particolare attenzione alla ricostruzione dei rapporti geometrici tra le varie unità (Fig. 2).

Tale fase di accorpamento si rende necessaria per poter passare dalla cartografia geologica all'elaborato finale degli studi di microzonazione sismica di primo livello, ovvero la cartografia delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS).

Le unità geologico-tecniche individuate in questa fase, sia sulla carta, che sulle sezioni geologico-tecniche, di fatto rappresentano gli elementi stratigrafici caratterizzanti le varie microzone omogenee.

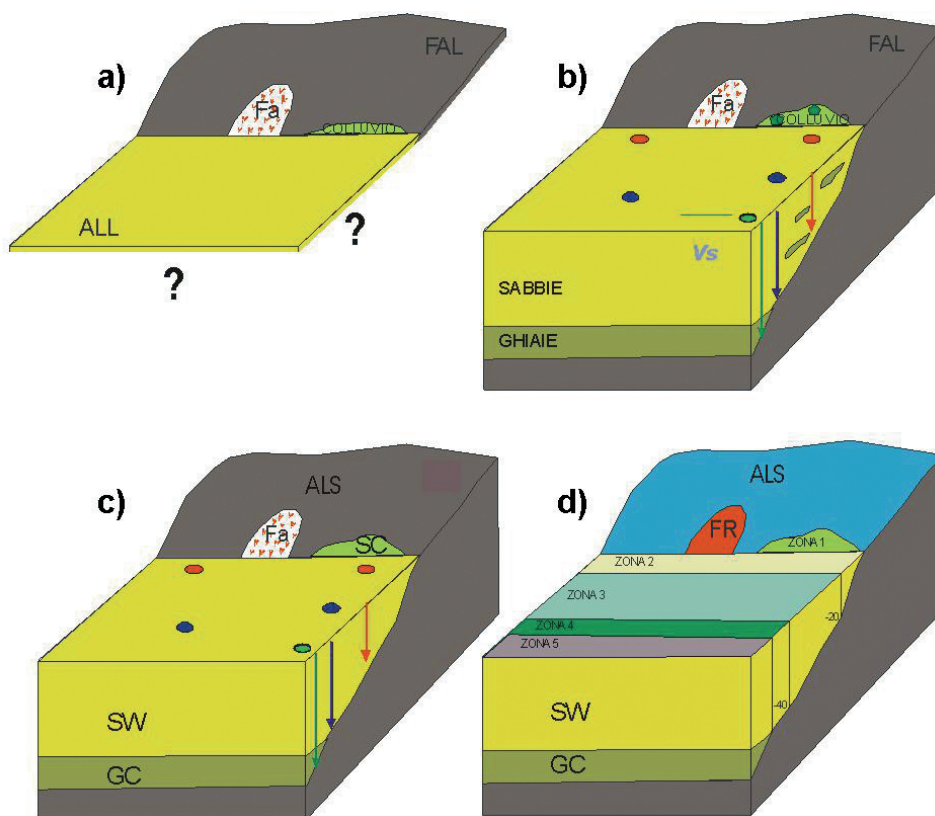


Fig. 2 – Fasi di elaborazione di uno studio di livello 1: a) recupero cartografie esistenti; b) creazione modello geologico definitivo alla luce delle indagini esistenti e di nuova realizzazione (si noti la diversa perimetrazione della copertura colluviale a seguito del reperimento di nuove indagini); c) definizione del modello geologico-tecnico ( si noti la scelta di accoppiare i corpi lenticolari di ghiaie con limitata estensione areale e stratigrafica alle sabbie); d) Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica.

Nell'operazione di definizione delle unità geologico-tecniche è consigliabile non utilizzare un grado di dettaglio eccessivo, ma piuttosto cercare di accoppiare quanto più possibile terreni con caratteristiche sismostratigrafiche e litotecniche tutto sommato comparabili e limitare la definizione di ulteriori unità geologico-tecniche a quei contesti in cui le caratteristiche del substrato geologico o dei depositi variano in maniera significativa.

**Dal modello geologico tecnico alla cartografia MOPS.** Una volta definito il modello geologico-tecnico dell'area oggetto di studio, la cartografia MOPS altro non sarà che un elaborato di sintesi delle conoscenze nel quale viene di fatto rappresentato il modello geologico-tecnico tridimensionale dell'area suddividendo le varie microzone omogenee in tre grandi gruppi:

- zone stabili,
- zone stabili suscettibili di amplificazione,
- zone instabili.

Ovviamente trattandosi di una rappresentazione del modello geologico-tecnico, la perimetrazione delle microzone dovrà essere congruente con quanto riportato dalla carta e dalle sezioni geologico tecniche. A tal proposito ed allo scopo di evitare banali errori, si consiglia di procedere all'individuazione delle microzone omogenee riferendosi alle sezioni geologico tecniche. Solo successivamente è opportuno riportare tali suddivisioni in carta lungo le tracce delle stesse sezioni, unendo poi tratti corrispondenti alla medesima microzona ed avendo cura di compiere tale raccordo valutando l'eventuale presenza di indagini puntuali o

lineari che ovviamente devono anch'esse risultare congruenti con la successione stratigrafica della microzona entro la quale ricadono. L'accortezza di individuare i limiti delle microzone direttamente sulle sezioni geologico tecniche permette anzitutto di eseguire una suddivisione ragionata degli spessori associati a ciascuna microzona ed inoltre pone al riparo da errori dovuti ad incongruenze tra gli spessori associati a microzone confinanti.

Questa procedura ci pare essere la metodologia migliore possibile che garantisca al tempo stesso un elevato dettaglio, una correttezza del modello e un controllo migliore sulla qualità della cartografia finale.

**Conclusioni.** E' utile sottolineare come gli studi di MS siano ormai diventati un elaborato indispensabile per la stima della pericolosità sismica ed utile per la successiva fase di pianificazione territoriale. Infatti la Regione Toscana ha incentivato questo percorso, rendendo tali studi obbligatori nell'ambito della revisione degli strumenti urbanistici comunali (Piano Strutturale e/o Regolamento Urbanistico). Tale scelta ha permesso, tra l'altro, di poter raccogliere e/o acquisire in maniera graduale ed omogenea sul territorio una mole notevole di informazioni sui terreni caratterizzata prevalentemente da indagini geotecniche e geofisiche.

Le procedure, i criteri, gli standard (almeno quelli per il livello 1) sono ormai sufficientemente consolidati anche se permangono alcuni elementi di criticità che sono stati illustrati nel presente articolo.

Un ulteriore aspetto da sottolineare è stato quello della notevole crescita professionale della figura del "geologo", che ha acquisito esperienza e capacità (anche grazie ai numerosi corsi di formazione che l'Ordine dei Geologi della Toscana e la Regione Toscana hanno organizzato) nella redazione di studi di microzonazione sismica indispensabili come strumento di pianificazione territoriale e di supporto per la progettazione edilizia.

## Bibliografia

- Borcherdt R. D.; 1970: *Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay*. **Bull. Seismol. Soc. Am.** 60, 29–61.
- Ferrini M., Baglione M., Calderini F., D'Intinosante V., Danese S., Di Lillo R., Fabbroni P., Iacomelli S., Rossi M., Stano S., Calosi E.; 2007: *Istruzioni Tecniche per le indagini geologico – tecniche, le indagini geofisiche e geotecniche, statiche e dinamiche, finalizzate alla valutazione degli effetti locali nei comuni classificati sismici*. "Progetto Terremoto" in Garfagnana e Lunigiana. Dip.to delle Politiche Territoriali e Ambientali, U.O.C. Rischio Sismico, pp. 279.
- ICMS, Gruppo di lavoro MS; 2008: *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*. 3 vol. e DVD.