ABACHI REGIONALI PER AMPLIFICAZIONI LITOSTRATIGRAFICHE FINALIZZATI ALLA REDAZIONE DI CARTE DI MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 2

G. Peruzzi[1], D. Albarello[1], M. Baglione[2], V. D'Intinosante[2], P. Fabbroni[2], D. Pileggi[1]
[1] Dip. di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente, Università degli Studi, Siena, Italia
[2] Settore Sismica, Regione Toscana, Firenze, Italia

Introduzione. Nell'ambito degli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (DPC-CRPA, 2008) viene suggerito agli enti preposti di dotarsi di abachi per la caratterizzazione quantitativa dei fenomeni di amplificazione attesa nella zone "stabili suscettibili di amplificazione" per le quali un approccio semplificato possa avere significato (situazioni litostratigrafiche caratterizzate

da alternanza di formazioni lungo superfici di discontinuità con buona approssimazione piane e orizzontali). In pratica si tratta di realizzare delle tabelle nelle quali ad un insieme di valori assunti da parametri considerati diagnostici e ad un particolare livello di pericolosità sismica siano associati univocamente valori attesi dell'amplificazione del moto sismico (FA ovvero "Fattore di Amplificazione") rispetto ad un terreno di riferimento. Obiettivo di questi abachi è fornire indicazioni utili alla realizzazione di carte di micro zonazione sismica (MZS) di livello 2 per le aree per le quali gli approcci di tipo semplificato abbiano senso.

Alcune Regioni (Emilia-Romagna, Lombardia, Lazio) hanno già provveduto a dotarsi di questo strumento a partire da metodologie differenti ma comunque congruenti per quanto riguarda il tipo di risultati attesi e le modalità di impiego. Lo studio qui descritto ha avuto lo scopo di dotare anche la Regione Toscana di questo tipo di strumento a supporto delle attività di MZS pianificate dall'Autorità Regionale. La procedura adottata allo scopo si discosta in maniera significativa da quelle adottate per le Regioni Lombardia e Lazio ed è affine (anche se non identica) a quella a suo tempo utilizzata dalla Regione Emilia-Romagna. La procedura ha avuto come scopo quello di valorizzare il grande patrimonio informativo messo a disposizione dalla Regione Toscana come esito di passate attività di indagine e caratterizzazione della risposta sismica locale (progetti VEL e DOCUP fra il 1996 al 2006) ed allo stesso tempo fornire agli operatori presenti sul territorio uno strumento versatile e specificamente applicabile nelle diverse situazioni lito-stratigrafiche presenti nella Regione Toscana.

La procedura adottata nella regione Toscana. L'obiettivo fondamentale è quello di fornire stime statisticamente valide e ragionevolmente conservative del fattore di amplificazione atteso nelle diverse situazioni litostratigrafiche presenti nella Regione Toscana ed in particolare nelle aree a maggiore pericolosità sismica. Inoltre, queste stime devono poter essere fornite a partire da un numero ristretto di osservabili, relativamente agevoli da determinare sperimentalmente e comunque rappresentativi delle diverse possibili situazioni presenti.

A partire da questi vincoli, è stata definita la procedura sinteticamente rappresentata e caratterizzata dalle quattro fasi operative descritte di seguito.

Prima fase: parametrizzazione. La prima prevede l'individuazione delle diverse tipologie lito-stratigrafiche (TLS) presenti nelle zone di interesse. Si tratta della fase più importante ed impegnativa dell'intera procedura ed è stata sviluppata dal personale dell'Ufficio Prevenzione Sismica del Settore Ufficio Tecnico del Genio civile di area vasta Firenze, Arezzo, Prato, Pistoia della Regione Toscana (di seguito indicato come UPS) a partire dalle informazioni disponibili presso la stessa struttura riguardo alla situazione stratigrafica (in prospettiva sismica) delle diverse aree geologiche della Regione. In pratica si è trattato di identificare delle successioni deposizionali "tipo", del tutto analoghe a quelle definite nella MZS di primo livello, nelle quali venissero individuate formazioni (Unità Lito-Stratigrafiche o ULS) caratterizzate da specifiche caratteristiche sismiche (per esempio "coperture superficiali", "alluvioni", "lacustre fine" o "lacustre grossolano", "substrato alterato", "substrato"). Per ciascuna di queste e a partire dai profili di velocità delle onde S (VS) sperimentali disponibili nella banca dati a disposizione dell'UPS, sono stati forniti valori rappresentativi della VS, dello spessore e della densità (per tutte il valore medio, la mediana, la deviazione standard, il massimo ed il minimo). Laddove possibile è stato anche fornito un profilo di velocità in funzione della profondità.

Quando disponibili presso l'UPS, sono state anche fornite le curve di degrado relative alla diverse ULS. In assenza di queste ultime, alla specifica ULS sono state attribuite curve di degrado e smorzamento dedotte dalla letteratura.

A partire da queste indicazioni iniziali si è poi provveduto ad identificare le diverse TLS (qui intese come successioni di ULS) presenti nella specifica area geografica considerata.

Di particolare importanza in questa fase è stata la definizione del substrato sismico di riferimento (basamento sismico) in corrispondenza del quale lo scuotimento sismico è assunto come noto. Quest'ultimo è stato dedotto a partire dalla stima della pericolosità sismica identificando gruppi di accelerogrammi sperimentali (moto di riferimento o "di input")

rappresentativi della sismicità attesa nelle diverse zone di interesse. A questo scopo si è fatto riferimento alla carta di pericolosità sismica della Regione Toscana relativa ad un periodo di ritorno di 475 anni.

Per ognuna delle aree geografiche sono stati quindi individuati i gruppi di 7 accelerogrammi naturali forniti dal programma SCALCONA 2.0 disponibile nel sito WEB della Regione Toscana (http://www.rete.toscana.it/sett/pta/sismica/01informazione/banchedati/input_sismici/progettazione/index.htm).

Ad ognuno degli accelerogrammi è stata anche associata una magnitudo rappresentativa del relativo evento sismico.

Seconda Fase: calcolo. Nella seconda fase, per ciascuna TLS e tenendo conto della variabilità dei parametri sismici definita nella prima fase, viene generato un campione di profili sismo-stratigrafici ciascuno costituito mediamente da un centinaio di profili. A questo scopo è stata utilizzata la procedura implementata nel codice "STRATA" (Rathje and Kottke, 2013) che permette di generare profili sismici connotati da specifiche proprietà statistiche e rappresentativi delle situazioni compatibili con i vincoli posti dall'operatore sulla base delle conoscenze disponibili.

Per quanto riguarda la variazione delle curve di degrado è stato scelto di utilizzare i parametri di default forniti dal codice di calcolo (Darendeli, 2001) che si sono dimostrati rappresentativi della effettiva variabilità osservata nei valori forniti dall'UPS. I parametri che controllano la variazione degli spessori delle ULS e le correlazioni interstrato (vedi Kottke e Rathje, 2013) sono stati invece modificati in modo opportuno (non sempre utilizzando i medesimi valori per le diverse TLS e aree geografiche), cercando di ottenere profili compatibili con i dati forniti e che non presentassero troppi strati a diversa velocità (quindi poco correlati fra loro); per la profondità del substrato sismico si è invece operato sulla base dei dati forniti dall'UPS per determinare massima e minima profondità del tetto del basamento sismico ovvero l'interfaccia alla quale applicare il moto di riferimento. Si tenga presente che quest'ultimo è stato definito su base geologica (ovvero tramite giudizio esperto) in corrispondenza della formazione identificata come "substrato" di riferimento ed indipendentemente dalla velocità delle onde S che lo caratterizzava. Soltanto nei casi in cui i bacini deposizionali presentassero notevoli profondità (anche nell'ordine delle migliaia di metri) si è considerata come profondità massima del basamento sismico quella alla quale sono raggiunti valori di VS di 800 m/s a prescindere dall'eventuale connotato geologico della formazione considerata.

Ciascuno dei profili sismo-stratigrafici ottenuti è stato quindi esaminato in dettaglio e confrontato con i profili sperimentali disponibili e con i limiti di variabilità forniti dall'UPS (specialmente in rapporto ai gradienti di velocità forniti per la specifica ULS). Sono stati quindi selezionati per la modellazione i soli profili compatibili con le osservazioni, scartando quelli che, per vari motivi (come velocità troppo alte in superficie o troppo basse a grandi profondità), possono essere considerati irrealistici.

Per ciascuna TLS sono stati così ottenuti fra 50 e 100 profili sismo-stratigrafici. Per ciascuno dei quali e considerando i diversi accelerogrammi rappresentativi della pericolosità locale, sono state definite le curve di risposta sismica locale (RSL) attese. In questo modo, per ogni TLS, è stato possibile generare una popolazione di curve RSL ciascuna rappresentata in termini di ordinate spettrali dello spettro di risposta in accelerazione (PSA).

A partire dagli spettri di risposta in accelerazione, sono stati quindi definiti i fattori di amplificazione (FA) per ciascun profilo sismo-stratigrafico e moto di riferimento. Questo è stato ottenuto rapporto fra gli integrali I dello spettro di risposta in amplificazione relativi al moto di riferimento e a quello risultante alla superficie della singola stratigrafia. In particolare sono stati calcolati due valori di FA per ogni profilo sismo-stratigrafico: uno considerando i corti periodi (0.1-0.5 s) ed uno i lunghi periodi (0.5-1.0 s).

Terza Fase: analisi statistica. Nella terza fase si è quindi proceduto all'analisi statistica delle popolazioni dei fattori di amplificazione ottenuti per le diverse TLS ed alla loro aggregazione

su base geografica e, soprattutto, in funzione della specifica situazione sperimentale. Con quest'ultimo termine viene definita una peculiare combinazione di valori relativi a parametri diagnostici determinabili sperimentalmente e rappresentativi di configurazioni del sottosuolo capaci di produrre specifici livelli di amplificazione del moto sismico. A differenza delle TLS, che sono dedotte dalla conoscenza della specifica situazione lito-stratigrafica, queste combinazioni di valori devono essere attribuiti sperimentalmente mediante misure di campagna condotte con costi contenuti e procedure di campagna già utilizzate nella pratica professionale. Inoltre, questi parametri, da un lato devono essere rappresentativi delle possibili situazioni capaci di generare fenomeni di amplificazione.

Sono stati quindi identificati quattro parametri utili allo scopo:

1. l'area geografica di appartenenza;
2. la classe di pericolosità;
3. il periodo fondamentale di vibrazione del sito (T0) o la corrispondente frequenza fondamentale (f_0);
4. il valore della velocità media delle onde S nei primi 30 m di sottosuolo (Vs30) o, se il basamento sismico si trova a meno di 30 m dalla superficie, il valore della velocità media delle onde S fino al basamento sismico (VSH).

Per ogni profilo sismo-stratigrafico generato da STRATA nelle diverse aree, per i diversi livelli di pericolosità e per le differenti TLS sono stati quindi calcolati:

- un valore di VS30 o VSH (a partire dal profilo sismo-stratigrafico corrispondente alla singola situazione sismostratigrafica utilizzata per la simulazione e distinguendo le situazioni nelle quali la profondità del fosse maggiore o minore di 30 m);
- un valore di f_0 (da simulazioni numeriche specifiche per il singolo profilo sismostratigrafico);
- due valori di FA dedotti dalla simulazione e relativi ai due diversi intervalli di periodo.

I diversi valori di FA ottenuti per le differenti aree geografiche e classi di pericolosità sono stati quindi aggregati in funzione dei valori di f_0 e Vs30 secondo la Tab. 1.

Tab. 1 - Classi relative ai valori dei due parametri rappresentativi dalla situazione sismo-stratigrafica locale: la frequenza di risonanza (f_0) e la velocità media delle onde S vicino alla superfice (VS_{30}/VS_H).

Classi		
frequenza (Hz)	f0<1	
	1.5	1≤f0<2
	2.5	2≤f0<3
	3.5	3≤f0<4
	4.5	4≤f0<5
	5.5	5≤f0<6
	6.5	6≤f0<7
	7.5	7≤f0<8
	≥ 8	
velocità (m/s)	Vs<200	
	300	200≤Vs<400
	500	400≤Vs<600
	700	600≤Vs<800
	Vs≥800	

Come valore rappresentativo della singola popolazione di valori di FA è stato quindi scelto il valore di FA relativo al 75° percentile della popolazione corrispondente. Questo valore è stato considerato come una stima sufficientemente conservativa del valore di amplificazione atteso per la singola situazione sperimentale. Allo scopo di permettere una stima del valore di FA anche quando la curva HVSR non mostrasse massimi attendibili (e quindi non permettesse una stima corretta del valore di f_0) è stata anche considerata la popolazione dei valori di FA relativi alla sola caratterizzazione in termini di VS30/VSH. Un esempio relativo ai valori del percentile ottenuto nelle diverse classi per una specifica zona (il Monte Amiata) è mostrata in Tab. 2.

Quarta Fase: costruzione degli abachi. Con la procedura descritta nei paragrafi precedenti sono stati costruiti gli abachi relativi alle diverse aree geografiche. Nel complesso si tratta di 13 aree per ciascuna delle quali sono definiti almeno due abachi (per alti e bassi periodi). Inoltre, laddove le aree insistessero su zone a pericolosità sismica diversa, son stati costruiti più abachi, considerando come moto di riferimento i gruppi di accelerogrammi relativi alla specifica classe di pericolosità. In particolare, i gruppi 1 e 2 sono stati accorpati, così come i gruppi 4, 5 e 6. Sono stati tenuti distinti i gruppi 3 e 4. Infine sono stati costruiti abachi distinti per le due configurazioni relative alle situazioni con un substrato posto a profondità maggiori o minori

Tab. 2 - Esempio di abaco relativo alle zone del Monte Amiata: in neretto le combinazioni f_0/VSH con più di 50 valori, in grigio chiaro quelle con meno di 10 valori. Le due tabelle più in alto sono relative ai valori di FA ottenuti per le due classi di periodi. In basso ci sono i valori relativi al numero di simulazioni per ciascuna combinazione dei parametri.

FA (0.1 < T < 0.5 s)											
		f0 (Hz)									
		<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	≥ 8	75° perc.
Vs30 (m/s)	<200	1.3	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6
	300	1.5	1.6	2.1	2.6	2.4	2.2	2.1	2.4	2.6	1.9
	500	1.3	1.6	2.0	2.1	2.0	1.9	2.4	2.2	2.1	2.0
	700	0.0	0.0	2.1	1.8	1.7	1.6	0.0	0.0	1.9	1.8
	≥800										
FA (0.5 < T < 1 s)											
		f0 (Hz)									
		<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	≥ 8	75° perc.
Vs30 (m/s)	<200	1.5	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5
	300	1.8	2.5	2.2	2.0	2.5	2.8	2.3	1.9	2.3	2.3
	500	1.5	2.3	1.8	1.5	1.4	1.2	1.9	1.9	1.5	1.7
	700	0.0	0.0	1.7	1.4	1.2	1.2	0.0	0.0	1.2	1.4
	≥800										
Popolazione delle celle											
		f0 (Hz)									
		<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	≥ 8	
Vs30 (m/s)	<200	7	14								
	300	267	883	551	133	28	24	34	10	30	
	500	131	132	370	294	95	15	15	14	243	
	700			7	42	21	7			7	
	≥800										

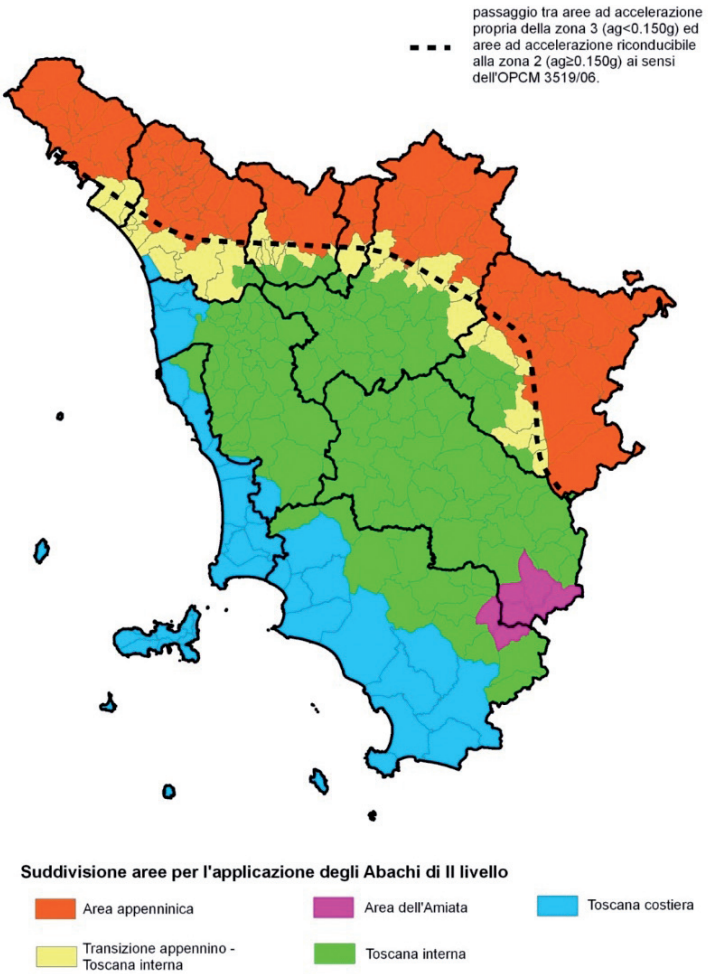

Fig. 1 – Macro aree della Regione Toscana considerate per l'applicazione degli abachi.

di 30 m. Come si vede, questo ha portato alla definizione di diverse decine di abachi di scarsa utilità pratica. Inoltre, a causa delle diverse caratteristiche delle TLS, molte delle combinazioni dei parametri f_0 e Vs30/VsH, risultavano assenti con un conseguente sotto-campionamento delle diverse combinazioni.

Si è allora provveduto ad una analisi comparata volta a valutare la significatività delle differenze fra gli abachi ottenuti nelle diverse aree (a parità di pericolosità). A questo scopo sono stati confrontati a due a due gli abachi ottenuti per zone geologicamente simili e geograficamente contigue. Il confronto è avvenuto valutando le differenze fra i valori di FA ottenuti nelle celle corrispondenti dei due abachi (analoghi per campo di periodi, classe di pericolosità e classe di profondità del substrato sismico), considerando significative le sole differenze superiori a 0.2.

Le valutazioni effettuate hanno messo in evidenza la possibilità di raggruppare le aree in macro-aree all'interno delle quali il livello di eterogeneità osservato è assai minore di quello relativo alle altre macro-aree. Le macro-aree identificate inoltre sono ben connotate geograficamente e hanno senso sul piano geologico (in rapporto alle diverse storie evolutive ed alle configurazioni stratigrafiche). In particolare, sono identificati quattro domini geografici (Fig. 1):

1. Toscana Appenninica, caratterizzata anche dai bacini intermontani (Garfagnana, Lunigiana, Mugello e val di Sieve, Casentino, val Tiberina, più due comuni della provincia di Arezzo);

2. Toscana centrale (Arezzo e val di Chiana, val d'Arno superiore, piana di Firenze, Prato, Pistoia e Empolese, Senese e Grossetano, Lucchesia);
3. Toscana costiera (Versilia e Livornese, oltre alle zone in zona 4 nella classificazione regionale della pericolosità sismica);
4. Monte Amiata.

Una volta ottenuta questa nuova ripartizione, le popolazioni di valori di FA ottenuti nelle aree incluse nelle macro-aree individuate sono stati ricombinati per formulare nuovi abachi (costruiti considerando gli stessi criteri statistici adottai per la costruzione degli abachi delle sotto-aree) su una più estesa base territoriale. Si tratta ovviamente di abachi più "robusti" sul piano statistico grazie alla maggiore "copertura" assicurata dalla combinazione delle diverse simulazioni.

Infine sono stati quindi costruiti:

A) 8 abachi per la Toscana Appenninica: 2 gruppi di accelerogrammi (1+2, 3), due campi di periodo (1.0-0.5 e 0.5-0.1), due classi di profondità del basamento sismico (>30m e <30 m);
B) 8 abachi per la Toscana Centrale: 2 gruppi di accelerogrammi (3,4), due campi di periodo (1.0-0.5 e 0.5-0.1), due classi di profondità del basamento sismico (>30 m e <30 m);
C) 2 abachi per la Toscana Costiera: 1 gruppo di accelerogrammi (4+5+6), due campi di periodo (1.0-0.5 e 0.5-0.1), una classe di profondità del basamento (>30 m);
D) 8 abachi per la zona del Monte Amiata: 2 gruppi di accelerogrammi (3,4), due campi di periodo (1.0-0.5 e 0.5-0.1), due classi di profondità del basamento sismico (>30 m e <30 m).

Dall'osservazione degli abachi nel loro complesso, specialmente quelli con la maggior parte delle celle popolate da almeno 50 simulazioni, emerge un andamento ben definito dei valori di FA. Questi, in senso verticale (ovvero in rapporto alle classi di velocità del Vs30/VsH), hanno il loro massimo per bassi valori delle velocità medie, mentre in rapporto ai valori di f0 hanno il loro massimo per classi frequenze intermedie. Tutto ciò è compatibile con l'ipotesi che le maggiori amplificazioni si abbiano per alti contrasti di velocità (e quindi tanto più è bassa la velocità delle coperture) e per profondità dell'interfaccia risonante nell'ordine delle decine di metri. Da notare poi che i valori di FA, per le celle con popolazione di almeno 50 elementi, sono tutti compresi tra circa 1 e 2.5.

Limiti di applicabilità e validazione. Gli abachi costruiti secondo la procedura descritta sopra devono essere considerati rappresentativi di situazioni stratigrafiche caratterizzate da variazioni solo verticali delle proprietà meccaniche del sottosuolo. Questo implica che l'applicabilità degli abachi vada riservata alle sole situazioni dove le variazioni laterali delle proprietà meccaniche non siano tali da indurre importanti effetti bi-tridimensionali. Si pone però il problema di definire di volta in volta la rilevanza di questi effetti nella specifica situazione applicativa. Al momento, gli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (DPC-CRPA, 2008) prevedono un solo criterio di inapplicabilità (Bard e Bouchon, 1985) relativamente alla presenza di effetti di risonanza complessiva dei bacini. In realtà effetti potenzialmente altrettanto importanti potrebbero essere legati alla generazione di nuove fasi sismiche (onde superficiali) ai bordi di un bacino e fenomeni di focalizzazione indotti dalle geometrie delle superfici sepolte e caratterizzate da significativi contrasti di impedenza sismica relativa elle fasi S.

Per valutare la possibile entità di questi effetti sui valori di FA in rapporto a quanto si può dedurre dall'uso degli abachi, sono state condotte analisi numeriche utilizzando il codice di calcolo BESOIL (Sanò, 1996). In queste modellazioni sono state considerate diverse situazioni potenzialmente responsabili di effetti 2D. Tutti i modelli hanno riguardato un bacino simmetrico di larghezza pari a 750 m ed un fattore di amplificazione calcolato rispetto ad un punto di affioramento del substrato posto a 350 m dal bordo del bacino. Sono stati valutate diverse combinazione del rapporto di impedenza alla base del bacino (da 2 a 4), della velocità delle onde S e dello smorzamento del riempimento (rispettivamente da 200 a 400 m/s e dal 2% al

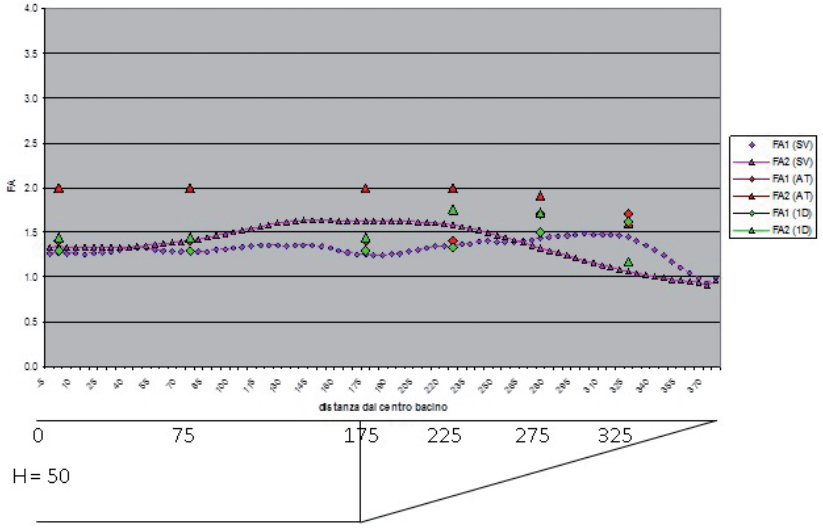

Fig. 2 – Confronto fra i valori del Fattore di Amplificazione per i corti periodi (0.1-0.5 s FA1) e i lunghi periodi (0.5-1.0 s, FA2), considerando la modellazione numerica 2D (SV), la modellazione numerica 1D effettuata con il codice STRATA (1D) e la stima dedotta per i due intervalli di periodo dagli abachi (AT). Nel caso specifico, gli abachi utilizzati sono quelli relativi all'area Appenninica dove più diffusa sono situazioni del tipo di quella qui indagata. La geometria del bacino è riportata in basso e la figura si riferisce ad un bacino simmetrico largo 750 m (in figura viene riportata solo una metà del bacino) con un riempimento caratterizzato da valori di Vs e smorzamento pari rispettivamente a 200 m/s e 2%. Il substrato ha velocità delle onde S pari a 800 m/s e uno smorzamento dell'1%.

5%), dello spessore del bacino (da 25 a 150 m) e dell'angolo di inclinazione del bordo (da 5 a 60°). Un esempio dei risultati ottenuti è riportato nella Fig. 2. In generale viene dimostrata gli abachi forniscono sempre valori analoghi o più conservativi di quelli prodotto sia dalle analisi 1D che 2D per tutte le situazioni caratterizzate da rapporti di impedenza fra substrato e coperture inferiori a 4, indipendentemente dalla distanza dal bordo. Al netto di situazioni relativamente 'estreme', questo risultato sembra suggerire una generale applicabilità degli abachi proposti anche in situazioni caratterizzate da significative variazioni laterali delle morfologie sepolte.

Oltre alle valutazioni descritte sopra, sono state anche analizzati alcuni casi 'reali' ben laddove la configurazione geometrica e sismica del sottosuolo era bel vincolata dai dati disponibili. In particolare sono state analizzate situazioni relative a tre bacini dell'area appenninica (Scaperia e Palazzuolo sul Senio in provincia di Firenze, Poppi in provincia di Arezzo. In questi contesti sono state eseguite modellazioni numeriche 2D (utilizzando il codice QUAKE/W (GEO SLOPE, 2012) e modellazioni 1D (codice STRATA). Gli esiti di entrambe le modellazioni indicano che gli abachi sono in accordo con quanto prodotto dalle modellazioni 1D nonostante il fatto che queste ultime fossero state ben caratterizzate dal punto di vista sismostratigrafico locale. Anche rispetto alla modellazione 2D i risultati forniti dagli abachi sono sembrati soddisfacenti nella maggior parte dei casi salvo laddove i contrasti di impedenza alla base delle coperture erano dell'ordine di 4 o superiori.

Conclusioni. Sono stati definiti gli abachi per la determinazione dei valori del fattore di amplificazione (FA) attesi nelle diverse macro-aree della Toscana da utilizzare nell'ambito di studi di microzonazione sismica di Livello II secondo gli Indirizzi e Criteri della Microzonazione Sismica (DPC-CRPA, 2008). In particolare, questi abachi hanno lo scopo di definire con un approccio speditivo i fattori di amplificazione attesi nelle zone stabili suscettibili di amplificazione come effetto della sola configurazione lito-stratigrafica locale e per la quale sono attesi solo fenomeni di risonanza sismica dovuti alla presenza di variazioni verticali delle proprietà sismiche dei terreni (risonanza 1D).

Il lavoro svolto ha consentito lo sviluppo di una procedura di lavoro basata sull'uso intensivo dei dati sismici e geotecnici disponibili riguardo alle successioni lito-stratigrafiche presenti nelle diverse parti del territorio toscano. In particolare, inizialmente sono state identificate e caratterizzate le Unità Lito-Stratigrafiche (ULS) più rappresentative della regione che sono poi state associate nella forma di specifiche configurazioni stratigrafiche (le Tipologie Lito-Stratigrafiche o TLS). Le diverse TLS identificate sono state considerate per l'esecuzione di simulazioni numeriche condotte con un metodo non-lineare equivalente che hanno tenuto conto della variabilità osservata nella geometria e nelle caratteristiche dinamiche delle ULS di volta in volta analizzate. In queste simulazioni si è tenuto conto dei differenti livelli di pericolosità sismica nelle diverse aree della Toscana, utilizzando specifici gruppi di accelerogrammi messi a disposizione da studi precedenti. Le popolazioni di valori di FA ottenuti da queste simulazioni per le diverse aree geografiche della Regione, sono stati analizzati dal punto di vista statistico e raggruppati in funzione dell'area geografica di riferimento, del livello di pericolosità e di due parametri rappresentativi della specifica situazione locale: la frequenza di risonanza delle coperture e del valore medio della velocità delle onde S nel primo sottosuolo. Questi due parametri sembrano sufficienti a discriminare le diverse situazioni (uni dimensionali) e sono effettivamente determinabili localmente sulla base delle informazioni rese disponibili già dagli studi di microzonazione sismica di primo livello (f_0 e profondità del basamento sismico) e da ulteriori analisi relativamente a basso costo (Vs30/VsH).

In linea di principio, gli abachi proposti non presentano limitazioni legate alle specifiche situazioni locali (p.es. inversioni nel profilo di velocità del onde S o particolari configurazioni litologiche). La possibile presenza di queste situazioni dovrebbe essere stata compresa nelle simulazioni condotte e quindi incluse nei valori di FA proposti. Questi ultimi vanno infatti considerati come un limite superiore "ragionevole" (ovvero caratterizzato da una probabilità di eccedenza del 25%) ai valori di FA effettivamente possibili. Si noti infine che gli abachi non coprono tutte le possibili combinazioni di parametri. Questo è il risultato dei limiti imposti alle simulazioni sulla base delle osservazioni. Accanto a queste situazioni, ne esistono altre per quali i valori di FA indicati sono ricavati da un numero di simulazioni inferiori a 10. Si tratta quindi di configurazioni piuttosto rare che non dovrebbero a loro volta verificarsi. Queste configurazioni, quindi, non dovrebbero essere presenti nella pratica applicativa. Nel caso in cui si verificassero sarebbe opportuno ricorrere a modellazioni della risposta sismica locale condotte con strumenti di calcolo appropriati e non utilizzare l'abaco corrispondente.

Riguardo all'effettiva applicabilità degli abachi, le analisi condotte mostrano che, almeno nei casi analizzati per la validazione, i valori di FA forniti dagli abachi sono compatibili o più conservativi di quelli prodotti dalla modellazione 1D condotta utilizzando le informazioni disponibili localmente. Inoltre gli abachi sembrano applicabili anche in presenza di variazioni laterali nelle morfologie sepolte, laddove queste corrispondano a superfici di separazione corrispondenti a contrasti di impedenza sismica inferiori a 4.

Bibliografia

Bard P. Y., Bouchon M. (1985): *The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys*, Bull. Seis. Soc. Am, 75, N. 2, 519-541.

Darendeli M. B. (2001), *"Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves"*. Austin, Texas: The University of Texas.

Dipartimento della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome (2008) *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (ICMS)*, Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 515 pp., disponibile sul sito WEB http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB1137

GEO-SLOPE International (2012), *QUAKE/W 2012*, www.geo-slope.com/products/quakew

Lai C. G. & Zuccolo E. (2012), *Rapporto scientifico "Definizione di input sismici sismo-compatibili e spettro-compatibili per i comuni della regione Toscana"*.

Rathje E. M. & Kottke A. (2013), *"Strata"*, http://nees.org/resources/strata.

Sanò T., 1996: *BESOIL: un programma per il calcolo della propagazione delle onde sismiche*. Rapporto tecnico SSN/RT/96/9.