

07

MODELLAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE IN CONFIGURAZIONE 2D

Gruppo di lavoro **Analisi Numeriche**

COORDINATORE

Floriana PERGALANI

POLIMI-DICA

MEMBRI

Dario ALBARELLO

UNISI-DSFTA

Lucia LUZI

INGV

Marco AMANTI

ISPRA

Claudia MADIAI

UNIFI-DICeA

Vittorio CHIESSI

ISPRA

Giuliano MILANA

INGV

Massimo COMPAGNONI

POLIMI-DICA

Guido MARTINI

ENEA

Roberto DE FRANCO

CNR IGAG

Salvatore MARTINO

UNIROMA1-DST

Anna D'ONOFRIO

UNINA-DICEA

Alessandro PAGLIAROLI

UNICH-PE-INGEO

Sebastiano FOTI

POLITO-DISEG

Francesco SILVESTRI

UNINA-DICEA

Iolanda GAUDIOSI

CNR IGAG

Marco TALLINI

UNIVAQ-DICEAA

Giuseppe LANZO

UNIROMA1-DISG

Chiara VARONE

CNR IGAG

7.1 Premessa

Le **analisi numeriche** che conducono alla Microzonazione Sismica di livello 3 (MS3) devono essere in primo luogo basate sulla preventiva definizione delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS) incluse le zone caratterizzate da instabilità (ZA_{FR}) con l'esclusione delle ZA_{FR} qualora il corpo di frana abbia spessori inferiori ai 10 m, di quelle ZA_{FR} già corrispondenti alla categoria R3-R4 secondo la classificazione PAI o già acquisite come vincolo territoriale a valle di precedenti studi di MS1 e dei buffer associati a ZA_{FAC} o ZA_{FPAC} .

Si ricorda che per la definizione delle microzone si deve tener conto anche delle zone di "pinch out", ovvero di quelle aree in cui, lungo la sezione geologico-tecnica, una o più unità si assottigliano lateralmente fino a scomparire secondo il diagramma di flusso sintetizzato in **Figura 7.1**, che prevede:

- preliminare suddivisione in microzone omogenee basata sui limiti della carta geologico-tecnica;
- in presenza di "pinch-out", ulteriore suddivisione della microzona;
- controllo delle frequenze di risonanza evidenziate dalle indagini puntuali di misure di rumore ambientale ed eventuale ulteriore suddivisione della microzona omogenea, sulla base delle frequenze di risonanza.

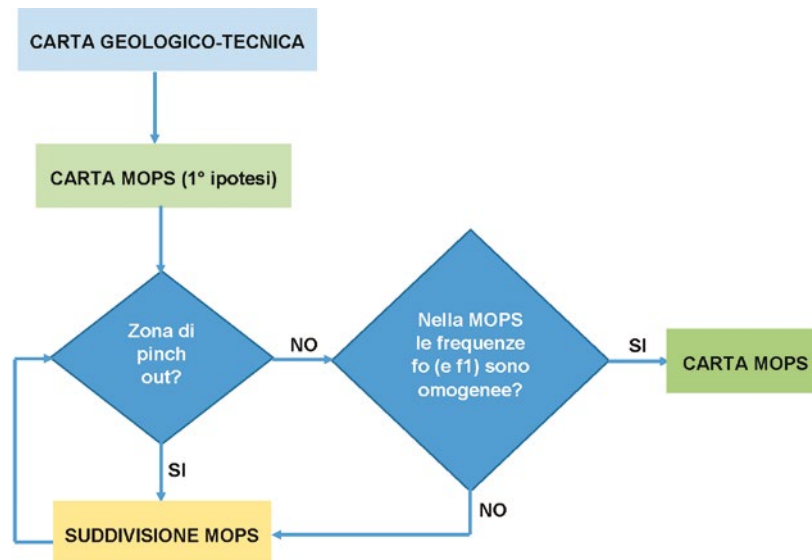


FIGURA 7.1
Diagramma di flusso
per la definizione delle
MOPS.

Ciò premesso, di seguito si descrivono gli elementi essenziali per le analisi numeriche di risposta sismica locale, schematizzati in **Figura 7.2**.

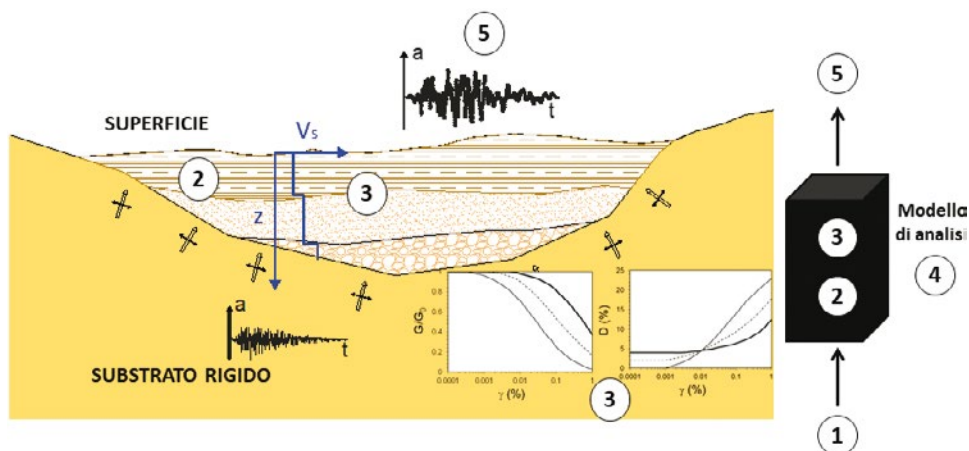


FIGURA 7.2
Elementi essenziali per
le analisi numeriche.

- ① definizione del **moto sismico di riferimento** (accelerogramma)
- ② **modello geometrico di sottosuolo** (stratigrafia, morfologia superficiale e sepolta)
- ③ determinazione sperimentale e modellazione **proprietà meccaniche non lineari**
- ④ **analisi numerica non lineare** della risposta sismica di profili e sezioni
- ⑤ rappresentazione **moto in superficie** mediante accelerogrammi, spettri di risposta etc.

7.2 Scelta del modello di analisi e del codice di calcolo

La prima scelta che deve essere effettuata riguarda l'utilizzo di modelli mono-dimensionali (1D) o bi-dimensionali (2D).

Tale scelta è strettamente legata alle condizioni geologiche, geomorfologiche e litostratigrafiche del sito in analisi. In linea di principio, i codici 1D possono essere utilizzati solo per condizioni che prevedano morfologia superficiale, unità litotecniche e tetto del substrato sismico sub-orizzontali. Il fattore di forma della morfologia superficiale o sepolta influenza la scelta della schematizzazione geometrica (1D, 2D, 3D) per l'analisi dell'amplificazione stratigrafica e/o topografica di bacini e creste (Figura 7.3).

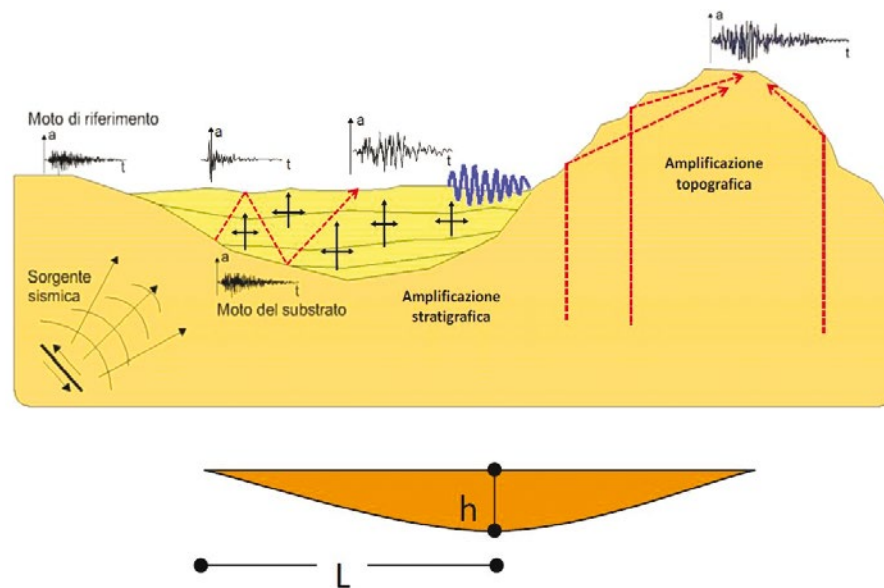
La presenza di bacini sepolti dà origine a specifiche fenomenologie che possono essere modellate solo facendo ricorso a modelli 2D. La prima fenomenologia riguarda la presenza di fenomeni di risonanza complessiva del bacino sepolto. L'eventuale occorrenza di questo fenomeno può essere diagnosticata utilizzando come elemento discriminante il rapporto tra la profondità della valle (massimo spessore del deposito) h , e la sua semiampiezza l , prevede una distinzione in:

- valli superficiali ($h/l < 0.25$): la risposta in frequenza a centro valle non è influenzata dal rapporto di forma ($f_{1D} \approx f_{2D}$);
- valli profonde ($h/l > 0.25$): le frequenze che caratterizzano la risposta bidimensionale sono maggiori di quelle valutate su profili 1D ($f_{2D} > f_{1D}$).

Un criterio non solo geometrico prevede che i modelli 1D possono essere utilizzati se è verificata la condizione nella quale:

$$\frac{h}{l} \leq 0.65 / \sqrt{C_v - 1}$$

dove C_v è il rapporto tra la velocità delle onde S, V_s , nel substrato sismico e quella media nei terreni di riempimento della valle. I codici di calcolo 1D possono essere utilizzati per la zona centrale della valle e solo nel caso in cui sia soddisfatto il più restrittivo dei due criteri precedenti. Un secondo fenomeno è legato alla generazione di onde superficiali in corrispondenza del raccordo fra le coperture del bacino ed i materiali incassanti. Laddove in questa zona si realizzino marcati contrasti di impedenza sismica (>3) le

**FIGURA 7.3**

Fattori morfologici influenti sull'amplificazione.

onde superficiali possono generare significativi aumenti del livello di scuotimento alla superficie delle coperture del bacino. L'estensione delle zone interessate da questo fenomeno dipende largamente dalle caratteristiche dei materiali di riempimento (essenzialmente lo smorzamento materiale). Quindi, in presenza di marcati contrasti laterali di impedenza sismica in prossimità delle superficie, risulta necessaria la modellazione 2D della risposta sismica locale

In linea di principio, sia nel caso di valli che di creste gli effetti geometrici sono condizionati dal rapporto tra lunghezza d'onda dominante del campo di moto e dimensione caratteristica dell'irregolarità morfologica.

Quando sussistono condizioni predisponenti a significativi effetti geometrici, cadono i presupposti per interpretare rapporti spettrali a stazione singola mediante inversioni monodimensionali, e quindi l'uso di tali dati per la validazione del modello è possibile solo per via diretta. È pertanto opportuno conoscere le condizioni morfologiche (oltre che stratigrafiche) dei siti di installazione delle stazioni per utilizzarne efficacemente le informazioni.

In presenza di creste, cocuzzoli, dorsali (amplificazioni topografiche) è necessario utilizzare codici di calcolo 2D se la pendenza del fianco è maggiore di 15° (in accordo con quanto indicato nelle NTC, per le categorie topografiche).

Per le analisi 2D si consiglia di utilizzare programmi che prevedono almeno l'analisi lineare equivalente con frontiera assorbente nel caso di effetti di valle e programmi con elementi al contorno nel caso di effetti morfologici in roccia.

7.3 Scelta delle sezioni e delle verticali da analizzare

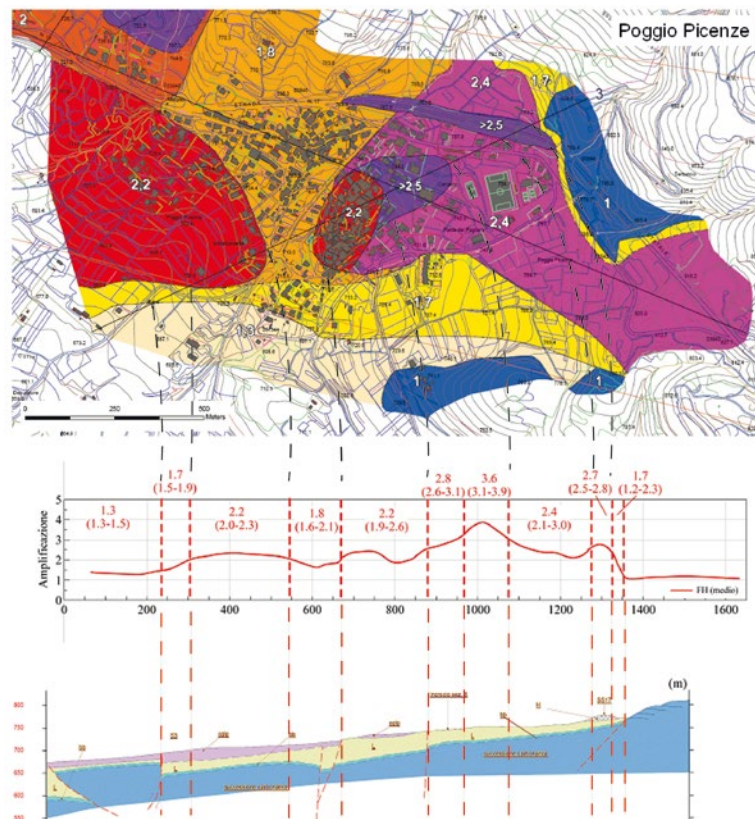
A partire dalle microzone omogenee, identificate tramite la procedura di **Figura 7.1**, si procederà a definire la giacitura delle sezioni e la localizzazione delle verticali, relative alle analisi condotte rispettivamente con modelli 2D e 1D.

In linea di principio, dato che i risultati devono condurre alla costruzione di una mappa di MS3, è necessario che la distribuzione delle sezioni e delle verticali permetta di

FIGURA 7.4

Poggio Pienze:
(dal basso) sezione
stratigrafica,
profilo del fattore
di amplificazione
dell'intensità di
Housner calcolato con
analisi 2D.

Figura modificata da
Lanzo et al., 2011 e da
*Microzonazione sismica
per la ricostruzione
dell'area aquilana - Parte III
La microzonazione sismica
delle Macroaree 1-6.*

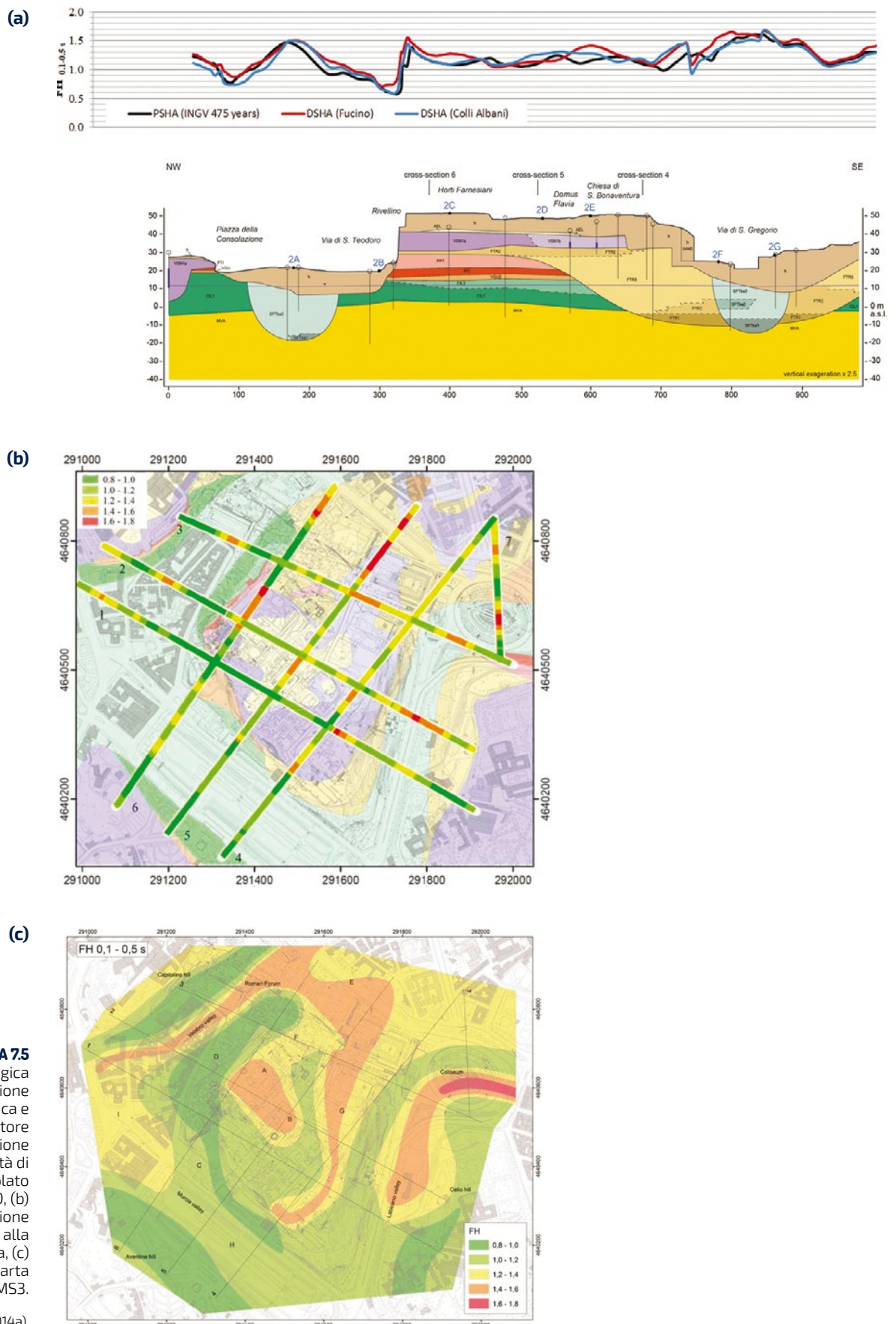


includere tutti gli ambiti caratterizzabili in modo omogeneo sotto gli aspetti geologici, geomorfologici, geotecnici e geofisici influenti sull'amplificazione locale. Compatibilmente con considerazioni di carattere logistico ed urbanistico, le modellazioni numeriche vanno preferibilmente condotte lungo sezioni topo-stratigrafiche 'maestre', tracciate lungo direzioni ortogonali o parallele rispetto ai lineamenti morfologici principali superficiali ed il più possibile ortogonali rispetto ai lineamenti morfologici sepolti. In entrambi i casi le sezioni dovranno contenere gli elementi stratigrafici e litologici fondamentali, in modo da consentire l'estrapolazione dei risultati dell'analisi ad una mappa di MS. Si riportano di seguito alcuni esempi significativi.

La **Figura 7.4** mostra una sezione tracciata attraverso l'abitato di Poggio Pienze, caratterizzata da significative variazioni morfologiche sepolti (ribassamenti, scarpate di faglia) che ha richiesto un'analisi 2D. Il risultato dell'analisi espresso in termini di fattore di amplificazione, riferito all'intensità di Housner, $FA(H)$, è stato sovrapposto alla carta geologica al fine di identificare microzone caratterizzate da condizioni stratigrafiche e morfologiche omogenee.

La **Figura 7.5** riporta la carta di MS3 dell'area archeologica di Roma, costruita a partire dai risultati di analisi 2D eseguite su 7 sezioni rappresentative, tracciate perpendicolarmente ai principali elementi morfologici superficiali e sepolti (incisioni vallive, scarpate di faglia, ecc.).

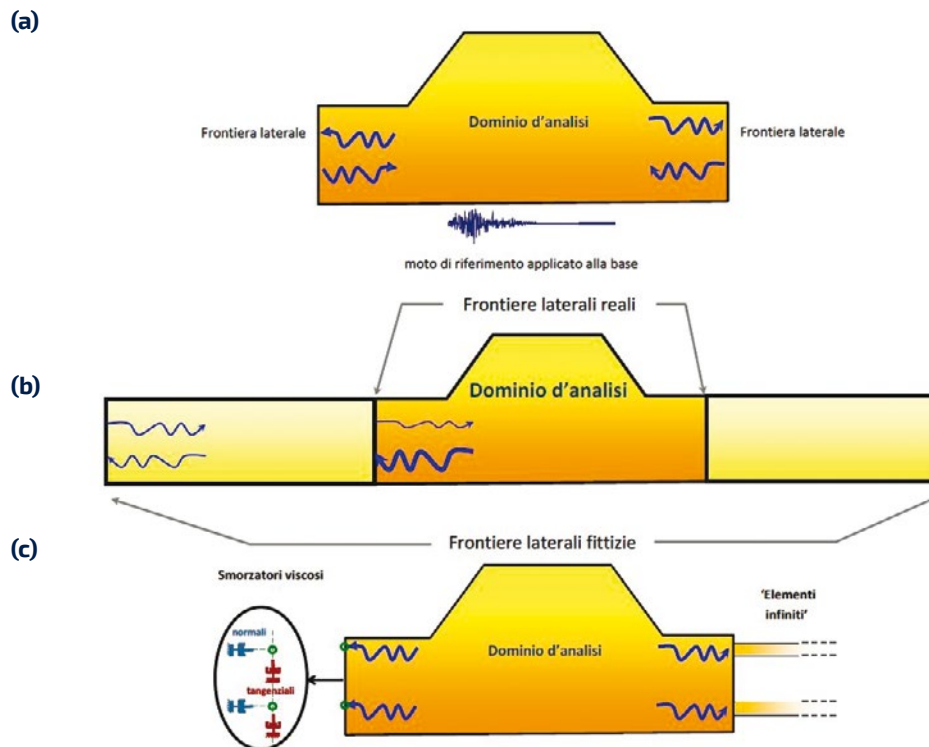
In **Figura 7.5a** i risultati delle analisi (in termini di fattore di amplificazione, calcolato a partire dall'intensità di Housner, nell'intervallo 0.1-0.5s) sono rappresentati lungo una delle sezioni stratigrafiche. Nella mappa di **Figura 7.5b** i valori di $FA(H)$ sono rappresentati attraverso diversi colori lungo le tracce delle sette sezioni, mantenendo la carta geologica (riferita alla base dei riporti e dello strato archeologico). La mappa di MS3 (**Figura 7.5c**) è stata creata estrapolando i risultati ottenuti lungo le sezioni mediante un processo di *contouring* manuale basato su giudizio esperto, tenendo conto delle caratteristiche morfologiche superficiali e sepolti rappresentate nelle sezioni stratigrafiche.



7.4 Estensione laterale delle sezioni per la modellazione numerica 2D

Come è noto, in una sezione d'analisi 2D (o in un dominio 3D) con un modello agli elementi finiti o alle differenze finite, la frontiera inferiore dev'essere approfondita all'interno del substrato sismico per una profondità tale da poter applicare il moto di riferimento ai nodi di base in maniera sincrona. Analogamente a quella inferiore, le frontiere laterali devono essere tali da riprodurre la trasmissione di energia delle onde sismiche dal volume di sottosuolo d'interesse. In caso contrario, si generano onde riflesse che vengono artificialmente introdotte nella regione stessa, causando una sovrastima dell'amplificazione (Figura 7.6a).

FIGURA 7.6
(a) Modello 2D con frontiere laterali riflettenti prossime (a) o lontane (b) rispetto all'irregolarità morfologica, e frontiere laterali assorbenti (c).



Se si adotta uno schema con nodi laterali vincolati sugli spostamenti (p. es. QUAD4M o QUAKE) che corrisponde ad una frontiera riflettente, un primo accorgimento è quello di estendere i confini laterali del deposito fino ad una distanza dal dominio d'analisi confrontabile con la sua larghezza (Figura 7.6b) o comunque pari ad almeno 400-500 m. In tal modo si minimizzano gli effetti delle riflessioni totali delle onde che incidono sulle frontiere laterali. La soluzione migliore consiste nell'adottare frontiere assorbenti (*absorbing o transmitting boundaries*) costituite da (Figura 7.6c):

- smorzatori viscosi ai nodi sia di base che laterali (soluzione adottata p.es. da PLAXIS);
- come sopra, aggiungendo condizioni *free-field*, cioè di moto monodimensionale lungo la colonna di terreno che definisce la frontiera laterale (soluzione adottata da FLAC);
- elementi infiniti (soluzione adottata da ABAQUS).

I suddetti accorgimenti non sono necessari se si opera con metodi agli elementi al contorno (p.es. BESOIL), tuttavia questi ultimi hanno difficoltà a trattare i casi in cui il comportamento non lineare del terreno può essere significativo.

7.5 Definizione del substrato sismico per le simulazioni numeriche

Per ogni modello stratigrafico, il substrato sismico sarà posizionato in corrispondenza del tetto del primo strato dell'Unità stratigrafica che presenta valori di velocità delle onde S maggiori di 750-800m/s con uno spessore ritenuto sufficientemente significativo in relazione al modello geologico del sito. Di norma, per il substrato viene assunto un comportamento elastico o visco-elastico lineare.

7.6 Discretizzazione dei modelli

Nelle analisi numeriche 2D si deve tenere in conto il problema legato alla discretizzazione dei modelli stessi. L'altezza degli elementi, nel caso di modelli 2D a maglie quadrangolari, ovvero la dimensione del lato minore, nel caso di modelli 2D a maglie triangolari, sono funzione della lunghezza d'onda relativa alla massima frequenza.

Una regola pratica per la discretizzazione degli elementi per i modelli 2D, può essere:

$$h_{max} = \frac{\lambda_{min}}{K} = \frac{\lambda_{min}}{6 \div 8} = \frac{V_s}{(6 \div 8) f_{max}}$$

dove h_{max} è l'altezza degli elementi, nel caso di modelli 2D a maglie quadrangolari, o la dimensione del lato minore, nel caso di modelli 2D a maglie triangolari), λ_{min} è la lunghezza d'onda, K è il coefficiente di stabilità, V_s è la velocità delle onde di taglio, f_{max} è la massima frequenza significativa del segnale di ingresso e di conseguenza, la massima frequenza che dovrà essere risolta nel modello numerico (valore consigliato: 20 Hz).

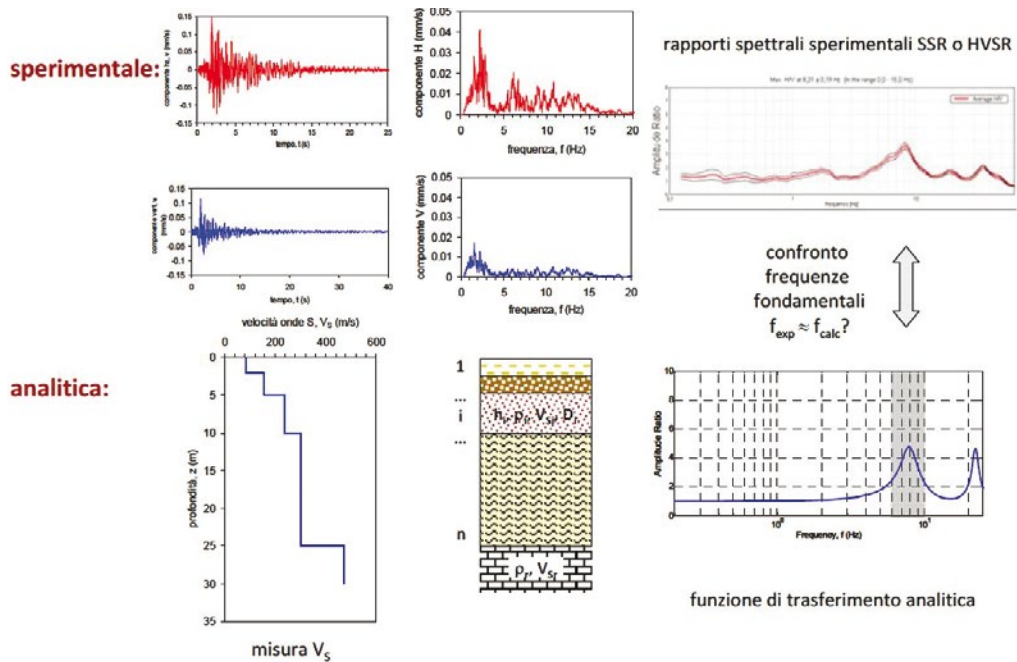
Nel caso di modelli 2D a maglie quadrangolari è opportuno che la larghezza media dell'elemento sia inferiore a $3 h_{max}$ vicino alla frontiera laterale e $5 h_{max}$ al centro della sezione. Nel caso di modelli 2D a maglie triangolari è opportuno che nella discretizzazione siano seguiti i criteri adottati dai comuni algoritmi di ottimizzazione per analisi ad elementi finiti (dimensioni tra i lati del singolo elemento confrontabili tra loro e differenza tra i lati di elementi adiacenti non superiore al 30-40%).

7.7 Validazione modello di sottosuolo in base ai rapporti spettrali

Le misure di rumore ambientale o le registrazioni di eventi deboli possono essere utilizzate nella validazione dei modelli di sottosuolo 1D/2D/3D. Il buon accordo tra la frequenza fondamentale (e le successive armoniche) evidenziata dai rapporti HVSR o HVRS (rapporti spettrali a stazione singola basati rispettivamente su spettri di Fourier o risposta) o SSR (rapporti spettrali rispetto ad un sito di riferimento), e quella determinata numericamente, permette infatti di confermare la correttezza del modello di sottosuolo adottato per le modellazioni numeriche (Figura 7.7). Per il confronto delle armoniche superiori tra i risultati numerici e quelli sperimentali, si predilige l'uso dei SSR.

É stato già ricordato che il confronto tra la funzione di trasferimento sperimentale e quella numerica deve essere effettuato tenendo conto delle condizioni morfologiche del sito ove sono state installate le postazioni sismiche. In altre parole, se la misura

FIGURA 7.7
 Schema logico per il confronto tra rapporti spettrali sperimentali e funzioni di trasferimento analitiche ai fini della validazione del modello di sottosuolo.



sperimentale è stata eseguita in un sito a morfologia marcatamente 2D o 3D, anche le analisi numeriche dovranno riprodurre tale complessità morfologica.

In **Figura 7.8** è mostrato l'esempio, dove un sondaggio stratigrafico e una prova down-hole (DH), spinti fino a 40m, non avevano individuato il substrato sismico. Il profilo di VS ottenuto da una prova MASW, mediante inversione congiunta di acquisizioni in modalità attiva e passiva, restituiva invece un substrato sismico a circa 45m di profondità (**Figura 7.8a**). Seppur ben confrontabili, i due profili di velocità avrebbero potuto generare qualche incertezza su localizzazione e profondità del substrato, rilevate solo dalla MASW; questo dubbio è stato dissipato integrando i risultati delle indagini geofisiche con quelli delle misure HVSR disponibili nello stesso sito. Infatti, il buon accordo tra la frequenza fondamentale (nonché quella del secondo picco) del rapporto H/V e quella determinata numericamente utilizzando il profilo di VS desunto dalla prova MASW (**Figura 7.8b**), ha permesso di confermarne la correttezza, in termini sia di profilo di velocità delle onde di taglio sia di profondità del substrato.

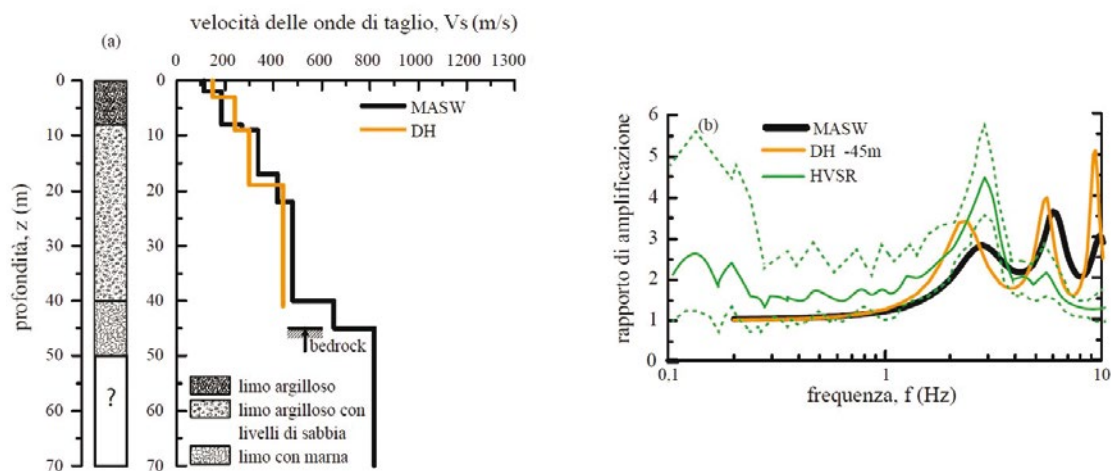
7.8 Definizione degli accelerogrammi e delle caratteristiche di non linearità dei terreni

Gli accelerogrammi da utilizzare in input per le simulazioni numeriche saranno i 7 accelerogrammi forniti dall'Unità Tematica trasversale "Input sismico" (UTIS, definita a seguito dell'Ordinanza n.24 del 12 Maggio 2017) e per i comuni della Regione Lazio i 5 accelerogrammi forniti dalla Regione Lazio (previa ulteriore comunicazione e/o indirizzo da parte del CentroMS).

Le curve di variazione del modulo di rigidezza al taglio normalizzata e del rapporto di smorzamento in funzione della deformazione di taglio da assumere per ogni unità litotecnica saranno fornite dal CentroMS attraverso le UOTR.

FIGURA 7.8

(a) stratigrafia e profili di velocità da prove DH e MASW;
 (b) confronto tra rapporti spettrali H/V e funzioni di amplificazione analitiche basate sui profili di velocità DH e MASW.



7.9 Risultati

Ai fini della restituzione finale nelle carte di MS3, i risultati, per ciascuna microzona, sono espressi sia in termini di spettro di risposta elastico in accelerazione al 5% dello smorzamento critico, sia in termini di Fattore di Amplificazione. In particolare, la procedura di elaborazione dei risultati delle analisi 1D e 2D, prevede i seguenti passi:

1. Definizione dello spettro di risposta in accelerazione (SPRE). Per ciascun set di input sismici (forniti da UTIS ed eventualmente dalla Regione) è calcolata la media degli spettri di risposta elastici in accelerazione, nell'intervallo di periodi 0.0-1.1s. Gli spettri in superficie e quelli di input andranno riferiti al 5% dello smorzamento critico e calcolati per una sequenza di periodi che verrà definita dal CentroMS. Lo spettro medio così ottenuto può essere poi confrontato con quello dell'approccio semplificato delle NTC, laddove applicabile.
2. Definizione del Fattore di Amplificazione (FA). Per ogni input sismico, FA è ottenuto come rapporto tra l'integrale dello spettro elastico in accelerazione di output e l'integrale dello spettro elastico in accelerazione di input, nei tre intervalli di periodo 0.1-0.5, 0.4-0.8, 0.7-1.1s. Per ciascun set di input sismici (forniti da UTIS ed eventualmente dalla Regione) è calcolato poi separatamente il fattore di amplificazione medio relativo alla microzona.

Nel caso in cui siano disponibili input sismici forniti dalla Regione, si riporteranno sulle carte di MS3 i valori di FA e i relativi SPRE medi riferiti ai soli input sismici forniti da UTIS. Nelle relazioni di consegna saranno riportati anche i valori dei fattori di amplificazione e degli spettri di risposta elastici ottenuti con l'uso degli input sismici forniti dalla Regione.

Si ricorda che, in accordo con IUO, ad ogni microzona ricadente nelle aree perimetrare, eventualmente suddivisa in più microzone in funzione delle caratteristiche geologiche-morfologiche e dei risultati delle analisi numeriche (vedi premessa), dovrà avere associato un FA e relativo spettro medio ottenuto in accordo con la soprariportata procedura.

7.10 Bibliografia di riferimento

Bard P., Y., Bouchon M. (1985)

The two dimensional resonance of sediment filled valleys. Bull. Seism. Soc. Am. 75: 519–541.

Cividini A., Pergalani F., Compagnoni M., Parisi A. (2017).

On the evaluation of Local Response Spectra according to the Italian Design Code, 15th International Conference of the International Association for Computer Method and Advances in Geomechanics IACMAG, 19–23 October, Wuhan, China.

Di Capua G., Compagnoni M., Di Giulio G., Marchetti M., Milana G., Peppoloni S., Pergalani F., Sapia V. (2014).

The seismic microzonation of level 3 of Sant'Agata Fossili (northern Italy) based on a multidisciplinary approach. Annals of Geophysics, 57, 1, S0189; DOI:10.4401/ag-6363.

Evangelista L., Landolfi L., d'Onofrio A., Silvestri F. (2016).

The influence of the 3D morphology and cavity network on the seismic response of Castelnuovo hill to the 2009 Abruzzo earthquake. Bull Earthquake Eng, 14, pp. 3363- 3387.

Landolfi L. (2013).

Analisi della risposta sismica locale in condizioni complesse di sottosuolo: il caso di Castelnuovo (AQ). Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Geotecnica XXV ciclo, Università di Napoli Federico II.

Lanzo G., Silvestri F., Costanzo A., d'Onofrio A., Martelli L., Pagliaroli A., Sica S., Simonelli A. (2011).

Site response studies and seismic microzonation in the Middle Aterno valley (L'Aquila, Central Italy). Bull Earthquake Eng, n. 9, pp. 1417-1442.

Pagliaroli A., Lanzo G., Sanò T. (2007).

Confronto fra tre codici di calcolo 2D della risposta sismica locale. Atti del XII Congresso Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", ANIDIS, Pisa, 10-14 giugno 2007, Edizioni Plus – Pisa University Press, Pisa, DVD articolo #45. ISBN: 978-88-8492-458-2, 12 pp.

Pagliaroli A., Quadrio B., Lanzo G., Sanò T. (2014a).

Numerical modelling of site effects in the Palatine hill, Roman Forum and Coliseum archaeological area. Bulletin of Earthquake Engineering, 12, pp. 1383–1403.

Pagliaroli A., Moscatelli M., Raspa G., Naso G. (2014b).

Seismic microzonation of the Central Archeological Area of Rome: results and uncertainties. Bulletin of Earthquake Engineering, 12, 1405–1428.

Santucci de Magistris F., d'Onofrio A., Evangelista L., Foti S., Maraschini M., Monaco P., Amoroso S., Totani G., Lanzo G., Pagliaroli A., Madaï C., Simoni G., Silvestri F. (2013).

Geotechnical characterization of the Aterno valley for site response analyses. Rivista Italiana di Geotecnica, 47 (3), 65-86.

Silvestri F., d'Onofrio A. (2014).

Risposta sismica e stabilità di centri abitati e infrastrutture. In: La Geotecnica nella difesa del territorio e delle infrastrutture dalle calamità naturali, Vol. 1, pp. 5-60, AGI, ISB.

