

Regione Abruzzo

Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

# MICROZONAZIONE SISMICA PER LA RICOSTRUZIONE DELL'AREA AQUILANA

Part e iii

Gruppo di Lavoro  
**“Microzonazione sismica area aquilana”**

A cura di S. Castenetto & G. Naso

**MICROZONAZIONE SISMICA  
PER LA RICOSTRUZIONE  
DELL'AREA AQUILANA**

Coordinamento editoriale e cura dei volumi  
Sergio Castenetto e Giuseppe Naso

*Grafica e impaginazione*  
Claudia Illuzzi

Copyright  
Luglio 2010



Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

so e citazione  
È vietato lo sfruttamento commerciale.  
L'uso è consentito a condizione che venga  
citata correttamente la fonte.

Si raccomanda di utilizzare la seguente  
dicitura:  
Gruppo di Lavoro MS–AQ (2010)  
Microzonazione sismica per la ricostruzione  
dell'area aquilana.  
Regione Abruzzo –  
Dipartimento della Protezione Civile,  
L'Aquila, 3 vol. e Cd-rom.

## VOLUME 1

• Presentazioni		IX
• Introduzione		XIII
• Gruppo di lavoro		XIX
<b>Parte I</b>	<b>• GEOLOGIA E PERICOLOSITÀ SISMICA DELL'AREA AQUILANA</b>	<b>2</b>
<b>1.</b>	<b>IL TERREMOTO DEL 6 APRILE 2009</b> (Galli, Giaccio, Messina, Naso, Peronace, Piscitelli)	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOLOGICO</b> (Boncio, Tallini)	<b>9</b>
2.1	Stratigrafia del substrato pre-Quaternario	11
2.2	Assetto strutturale	14
<b>3.</b>	<b>DEPOSITI QUATERNARI DEL BACINO DI L'AQUILA</b> (Cavinato, Galli, Giaccio, Messina)	<b>22</b>
<b>4.</b>	<b>LA GEOMORFOLOGIA DELLA CONCA AQUILANA</b> (Miccadei, Piacentini)	<b>26</b>
<b>5.</b>	<b>CARATTERI GRAVIMETRICI DELLA MEDIA VALLE DEL FIUME ATERNO</b> (Cesi, Di Filippo, Di Nezza, Ferri)	<b>31</b>
5.1	Introduzione	31
5.2	Anomalie di Bouguer e Residue di ordine n-1	33
5.3	Considerazioni	36
<b>6.</b>	<b>LE CAVITÀ DI ORIGINE ANTROPICA NEL SOTTOSUOLO AQUILANO</b> (Marsan)	<b>38</b>
6.1	La storia	38
6.2	Crolli delle cavità a seguito del terremoto del 6 aprile	39
6.3	Conclusioni	46
<b>7.</b>	<b>ASSETTO SISMOTETTONICO F SISMICITÀ</b> (Galli, Molin, Messina)	<b>47</b>
7.1	Il sistema di faglie Paganica-San Demetrio	49
7.2	Sismicità della valle dell'Aterno	51
7.3	Considerazioni conclusive	55

<b>8.</b>	<b>ATTIVITÀ GEODETICHE SATELLITARI (GPS) E LIVELLAZIONE DI ALTA PRECISIONE PER LA DEFINIZIONE DELLA DEFORMAZIONE COSISMICA ASSOCIATA AL TERREMOTO DELL'AQUILA DEL 6.04.2009 (Giuliani, Mattone)</b>	<b>62</b>
8.1	Rilievi con il GPS	62
8.2	Livellazione di alta precisione	65
8.3	Discussione dei risultati geodetici	66
<b>9.</b>	<b>EFFETTI DI CAMPO VICINO NEL TERREMOTO DI L'AQUILA (Iervolino)</b>	<b>68</b>
9.1	Direttività e azione sismica strutturale	68
9.2	Identificazione dei segnali impulsivi	70
9.3	Effetti sulla risposta strutturale	72
9.4	Considerazioni conclusive	73
<b>10.</b>	<b>DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO (Albarello, Boncio, Galli, Messina, Pace, Peruzza, Sabetta, Sano', Visini)</b>	<b>75</b>
10.1	Probabilismo sismo tettonico con sorgenti individuali e dipendenza temporale	75
10.2	Analisi statistico – probabilistica delle storie sismiche al sito da dati macrosismici	81
10.3	Registrazioni della scossa principale del 6 aprile e definizione di un moto sismico compatibile	82
10.4	Selezione del moto input da utilizzare nelle simulazioni numeriche per la micro zonazione sismica	83
<b>Parte II</b>	<b>• GLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA</b>	<b>87</b>
<b>1.</b>	<b>GENERALITÀ (Naso)</b>	<b>89</b>
1.1	Il modello del sottosuolo	89
1.2	Eventi di riferimento	92
1.3	Simulazioni numeriche	92
<b>2.</b>	<b>INDAGINI GEOFISICHE: METODOLOGIE UTILIZZATE NELL'AREA AQUILANA</b>	<b>93</b>
2.1	Accelerometria e velocimetria (Milana)	93
2.2	Microtremori (Mucciarelli)	95
2.3	Prove ESAC (Albarello)	97
2.4	Prove Down Hole (Gruppo di lavoro ICMS)	101

2.5	Prove mediante dilatometro sismico SDMT (Marchetti, Marchetti, Monaco, Totani)	108
2.6	Prove MASW (Foti)	109
2.7	Indagini REMI (Franceschini)	112
2.8	Tomografia di resistività elettrica (ERT) (Piscitelli)	115
<b>3.</b>	<b>PROVE DI LABORATORIO</b> (Silvestri)	120
3.1	Programma sperimentale	120
3.2	Apparecchiature e procedure sperimentali	121
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIE E CODICI PER LE ANALISI NUMERICHE</b> (Sano', Pergalani, Pugliese, Lanzo, Martino)	126
4.1	Introduzione	126
4.2	Codici di calcolo monodimensionali	127
4.3	Codici di calcolo bidimensionali	128
4.4	Risultati	131

## VOLUME 2

<b>Parte III</b>	<b>• LA MICROZONAZIONE SISMICA DELLE MACROAREE</b>	<b>1</b>
<b>1.</b>	MACROAREA 1 (L'Aquila centro)	3
<b>2.</b>	MACROAREA 2 (L'Aquila Ovest, Cansatessa, Pettino, Coppito)	63
<b>3.</b>	MACROAREA 3 (L'Aquila Est, Paganica, Bazzano, S. Gregorio)	87
<b>4.</b>	MACROAREA 4 (Barisciano, Castelnuovo, Poggio Picenze, S. Pio delle Camere)	147
<b>5.</b>	MACROAREA 5 (Onna)	199
<b>6.</b>	MACROAREA 6 (Mila S. Angelo, Tussillo, S. Eusanio F., Casentino, Fossa)	221
<b>7.</b>	MACROAREA 7 (S. Demetrio, Stiffe, Vallecupa, Pedicciano, Arischia)	279
<b>8.</b>	MACROAREA 8 (Poggio Roio, Colle Roio, Roio Piano, S. Rufina Contrada Cavalli)	337
<b>9.</b>	MACROAREA 9 (Bagno grande, Bagno piccolo, Civita di Bagno, Pianola, S. Benedetto, S. Felice d'Ocre, Valle-Cavalletto)	387
<b>10.</b>	MACROAREA10 (Goriano Sicoli, Castelvecchio Subequo)	445
<b>11.</b>	MACROAREA11 (Camarda, Collebrincioni)	457
<b>12.</b>	MACROAREA 12 (Navelli, Civitaretenga, Prata d'Ansidonia, Tussio, S. Nicandro)	469

**VOLUME 3**

Parte I	<b>• MICROZONAZIONE SISMICA E PIANIFICAZIONE TERRITORIALE</b>	<b>1</b>
1.	INTRODUZIONE (Bramerini)	5
2.	COMUNE DI BARISCIANO (Manicardi, Romani)	13
3.	COMUNE DI FAGNANO ALTO (Molinari)	35
4.	COMUNE DI FOSSA (Faraone)	45
5.	COMUNE DI GORIANO SICOLI (Giovannelli)	57
6.	COMUNE DI L'AQUILA (Bramerini)	63
7.	COMUNE DI NAVFLLI (Giovannelli)	97
8.	COMUNE DI OCRE (Molinari)	107
9.	COMUNE DI POGGIO PICENZE (Manicardi, Romani)	119
10.	COMUNE DI PRATA D'ANSIDONIA (Molinari)	127
11.	COMUNE DI DEMETRIO NE' VESTINI (Mercuri)	137
12.	COMUNE DI SAN PIO ALLE CAMERE (Manicardi, Romani)	143
13.	COMUNE DI SANT'EUSANIO FORCONESE (Molinari)	157
14.	COMUNE DI VILLA SANT'ANGELO (Faraone)	165

Allegati • **DVD**

Per ciascuna macroarea: testi, cartografie, relazioni, indagini, analisi di laboratorio

# La microzonazione sismica delle macroaree

## MACROAREA

# 2

## L'AQUILA OVEST: CANSATESSA-PETTINO-COPPITO

### GRUPPO DI LAVORO

<sup>1</sup> Università di L'Aquila

<sup>2</sup> CNR-IGAG

<sup>3</sup> Società Geo, L'Aquila

<sup>4</sup> Dipartimento  
della Protezione Civile

<sup>5</sup> Università di Roma  
La Sapienza

<sup>6</sup> CNR-IAMC

<sup>7</sup> Università di Napoli  
Federico II - C. RI

<sup>8</sup> ING

<sup>9</sup> IRPC de Nce,  
CE EMediteranee

#### Reperimento e archiviazione dati pregressi:

- Amoroso S.<sup>1</sup> • Cavinato G.P.<sup>2</sup> • De Caterini G.<sup>1</sup> • Del Monaco .<sup>1</sup> • Di Eusebio .<sup>1</sup> • Monaco P.<sup>1</sup>
- addei .<sup>3</sup> • otani G.<sup>1</sup> • Zaffiro P.<sup>1</sup>

#### Rilievi geologici:

- allini M.<sup>1</sup> • De Caterini G.<sup>1</sup> • Del Monaco .<sup>1</sup> • Di Eusebio .<sup>1</sup> • Zaffiro P.<sup>1</sup> • Cavinato G.P.<sup>2</sup> • Marsan P.<sup>4</sup>

#### Indagini geofisiche:

- Angelino A.<sup>4</sup> • Cavuoto G.<sup>2-4</sup> • De Caterini G.<sup>1</sup> • Di Filippo M.<sup>5</sup> • Di Iorio .<sup>6</sup> • Di Nezza M.<sup>6</sup>
- Iavarone M.<sup>4</sup> • Rapolla A.<sup>7</sup> • Scotto di Vettimo P.<sup>4</sup> • Sarallo D.<sup>5</sup> • Zaffiro P.<sup>1</sup>

#### Indagini geotecniche:

- Amoroso S.<sup>1</sup> • Monaco P.<sup>1</sup> • otani G.<sup>1</sup>

#### Misure strumentali:

- Milana G.<sup>8</sup> • Azzara R.M.<sup>7</sup> • Bergamaschi .<sup>7</sup> • Biondini P.<sup>7</sup> • Cara .<sup>7</sup> • Cogliano R.<sup>7</sup> • Cultrera G.<sup>7</sup>
- Di Giulio G.<sup>7</sup> • Godarella A.<sup>7</sup> • Pucillo S.<sup>7</sup> • Riccio G.<sup>7</sup> • Tertrand E.<sup>9</sup> • Duval A.<sup>8</sup> • Rognier .<sup>8</sup> • Marcucci S.<sup>3</sup>

#### Simulazioni numeriche:

- San .<sup>3</sup>

#### Carte di microzonazione:

- allini M.<sup>1</sup> • De Caterini G.<sup>1</sup> • Del Monaco .<sup>1</sup> • Zaffiro P.<sup>1</sup> • Leoni G.<sup>1</sup>

#### Coordinamento:

- allini M.<sup>1</sup>





## 2.1 INTRODUZIONE

Le Macroaree 1 (L'Aquila centro) e 2 (L'Aquila Ovest: Cansatessa-Pettino-Coppito) hanno caratteristiche geologiche confrontabili. Il limite fra le due è stato posto per convenzione con l'ampia curva dell'autostrada, mentre per la descrizione geologica si deve fare riferimento a quella della macroarea 1. La macroarea 2 si estende per circa 20 km<sup>2</sup>, da W a E dalla Scuola della Guardia di Finanza di Coppito a S. Antonio-Pile e, da N a S, dai contrafforti del M. Pettino a quelli di Roio comprendendo trasversalmente per intero la valle del F. Aterno e del suo affluente Raio (fig. 2.1): corrisponde al bacino in tramontano plio-quadernario dell'Aquila Ovest.



Fig. 2.1 → Ubicazione della Macroarea 2.

## 2.2 DATI DI BASE ED ELABORAZIONI

### 2.2.1 Carta delle indagini

Al fine di caratterizzare dal punto di vista geotecnico i terreni relativi alla Macroarea 2, tutti i dati sono stati raccolti in un database. Si tratta sia di dati di indagini effettuate dopo il terremoto del 6 aprile 2009 per conto del DPC, nell'ambito del progetto MS e del progetto C.A.S.E., sia di dati di indagini, eseguite prima o dopo il sisma, messe a disposizione da enti pubblici e da privati.

I siti ricadenti nella Macroarea 2 per i quali sono disponibili dati di indagini sono 29, per un totale di circa 250 sondaggi geotecnici o stratigrafici di profondità variabile (profondità massima raggiunta 202 m in località Coppito). Sono inoltre disponibili numerosi dati di prove geotecniche in sito, principalmente di prove *Standard Penetration Test* (SPT) eseguite nei fori di sondaggio, oltre ad un limitato numero di prove dilatometriche (DMT) e prove con penetrometro pesante (DPSH). In alcuni siti sono disponibili dati di misure piezometriche e prove di permeabilità in sito.

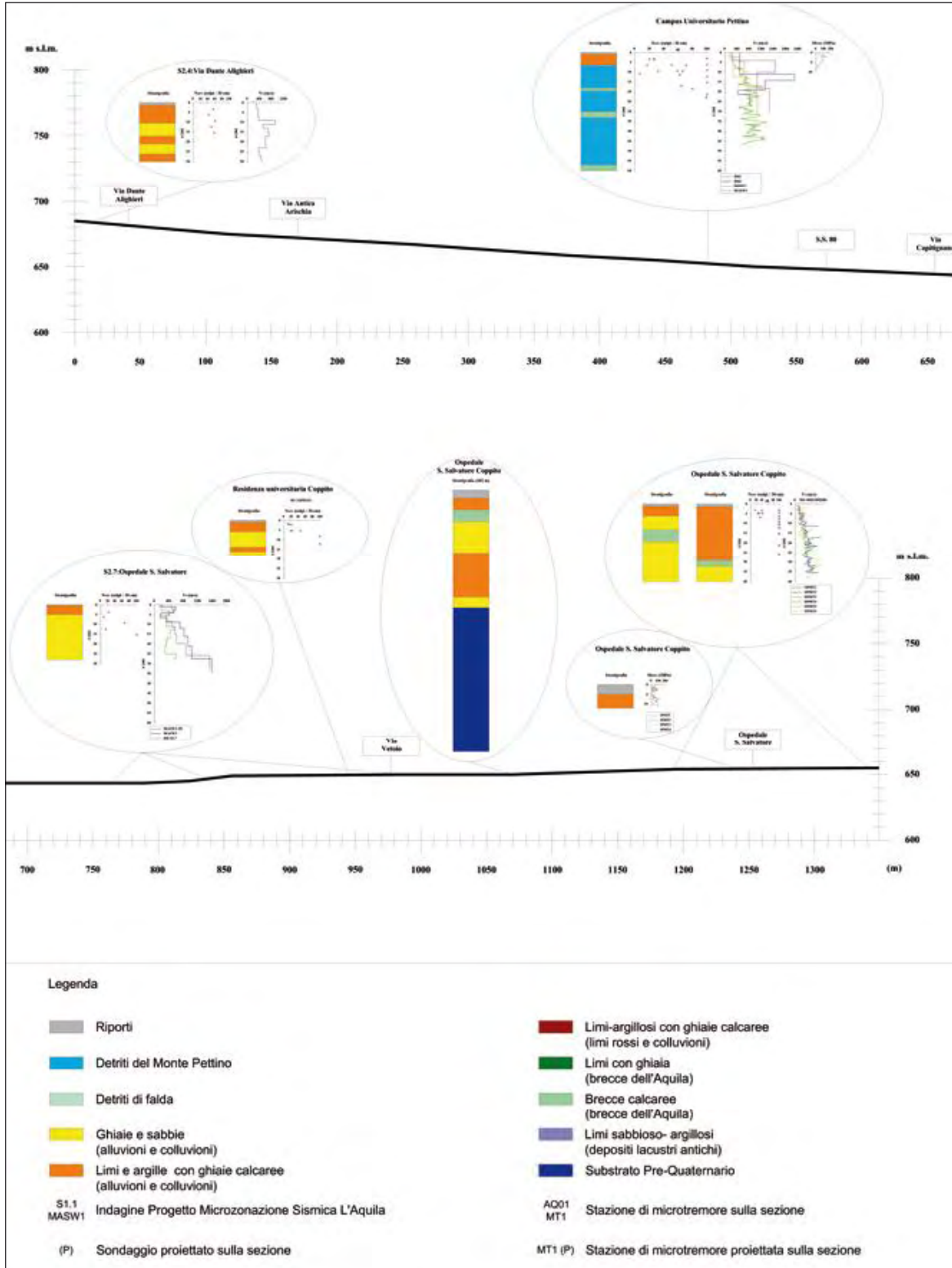
Su un ridotto numero (4) dei campioni indisturbati prelevati nei sondaggi eseguiti nell'ambito del progetto MS (siti S2.1 – L'Aquilone e S2.2 – Reiss Romoli) sono state eseguite in laboratorio prove di colonna risonante. Esiste, inoltre, un limitato archivio di dati di prove geotecniche di laboratorio (prove di classificazione, prove di taglio diretto, prove triassiali, prove edometriche) eseguite su campioni indisturbati in campagne di indagine antecedenti al sisma.

Le informazioni derivanti dalle indagini geotecniche sono state integrate con i dati ottenuti da prove geofisiche, principalmente prove Down Hole e MASW effettuate nell'ambito del progetto MS, e da numerose stazioni di misura di microtremiti (rapporti spettrali da analisi di microrumore e rapporti spettrali su sito di riferimento). Sono inoltre disponibili dati da sismica a rifrazione e misure della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) mediante dilatometro sismico (SDMT).

Per riassumere e schematizzare in forma sintetica la gran quantità di dati disponibili sono state costruite 7 sezioni, riportate nella Carta delle sezioni con i dati geologici, geotecnici e geofisici, allegata insieme alla relativa Carta di ubicazione delle sezioni. A titolo di esempio, nella figura 2.2 seguente è riportata la sezione Q-Q' (da Pettino – Via Dante Alighieri a Coppito – Ospedale San Salvatore).

In ciascuna sezione sono riportati, in forma sintetica, i risultati delle indagini eseguite nell'ambito del progetto MS e del Progetto C.A.S.E., oltre a dati messi a disposizione da enti pubblici e privati.

Fig. 2.2 → Sezione Q-Q' con i dati di base geologici, geofisici e geotecnici.



La legenda delle sezioni riporta una descrizione semplificata relativa alle principali unità litostratigrafiche individuate nella Carta Geologica del progetto MS.

Per ogni sito indagato è riportato uno schema stratigrafico semplificato ricavato dai sondaggi. Dove disponibili, allo schema stratigrafico sono affiancati il profilo della velocità delle onde di taglio ricavato da prove Down Hole, MASW e/o SDMT, il profilo del numero di colpi NSPT misurati mediante *Standard Penetration Test*, il profilo del modulo edometrico MDMT ricavato dalla prova DMT, le curve normalizzate di decadimento del modulo di taglio con la deformazione ( $G/G_c-\gamma$ ) ottenute da prove di colonna risonante.

Sulle stesse sezioni sono inoltre riportati, dove disponibili, i rapporti spettrali da analisi di microrumore e rapporti spettrali su sito di riferimento ottenuti dalle stazioni di microrumore. Infine sono riportate le ubicazioni indicative delle principali cavità individuate.

Da citare fra le indagini eseguite per la macroarea 2:

- 7 sondaggi geognostici a carotaggio continuo (profondità 30 m) con esecuzione di prove SPT in foro (35) e raccolta di campioni indisturbati (ditta Sondedile S.r.l.),
- 6 prove Down Hole e di 11 MASW (gruppo coordinato da V. Di Fiore, IAMC-CNR),
- prove di laboratorio di colonna risonante (ditta C.G.G. Geotechnical Analysis S.r.l.),
- 130 stazioni di misura tromografiche con strumento Tromino (Autori: Geomineco S.r.l., F. Capaldi, G. De Caterini, M. Manetta, B. Quadrio e P. Zaffiro).

Per riassumere e schematizzare la cospicua quantità di dati, sono state costruite 11 sezioni geotecniche riportate nel DvD e nelle tavole allegati.

## 2.2.2 Principali caratteristiche geotecniche dei terreni

Le caratteristiche geotecniche dei terreni sono state determinate sulla base dell'insieme dei dati disponibili, in particolare dai nuovi dati acquisiti mediante le indagini appositamente eseguite per il presente studio di MS, opportunamente integrati dai dati pregressi.

I terreni presenti in affioramento nelle varie zone nella Macroarea 2 appaiono fortemente eterogenei, in relazione alle diverse condizioni geologiche incontrate in questa macroarea, di notevole estensione. Sono presenti tutte le frazioni granulometriche, dalle argille alle ghiaie, con prevalenza dei termini a composizione più grossolana. In generale i terreni a grana grossa (ghiaie e sabbie) incontrati in buona parte dei siti indagati presentano buone caratteristiche meccaniche (resistenza al taglio e rigidità). I valori della resistenza alla penetrazione rilevati nelle prove SPT ( $N_{SPT}$ ) sono generalmente elevati, frequentemente a rifiuto, anche a causa della presenza diffusa di frammenti calcarei di grosse dimensioni. I valori dell'angolo di resistenza al taglio di picco  $\phi'$  ricavati dall'interpretazione dei risultati SPT (stima largamente approssimata, in relazione alle caratteristiche di questi terreni) sono in genere pari o superiori a  $35^\circ$ . La velocità delle onde di taglio  $V_s$  determinata mediante prove Down Hole, MASW e SDMT, tendenzialmente crescente con la profondità, è generalmente compresa tra circa 300-400 m/s e 600 m/s. I valori del modulo di taglio a piccole deformazioni  $G_c$  ricavati da  $V_s$  variano generalmente tra circa 100-200 MPa e 400-500 MPa.

In molti dei siti indagati agli strati di terreni a grana grossa (ghiaie e sabbie) sono frequentemente intercalati livelli, più o meno spessi, di materiali a grana più fine (limi e argille) aventi caratteristiche meccaniche meno buone ma, in generale, discrete.

In alcune zone della Macroarea 2 i materiali a grana fine sono predominanti. In particolare, nel sondaggio S2.6 – Via Milonia (Pettino) sono stati rinvenuti argille e limi di caratteristiche meccaniche "medie" ( $V_s$  circa 300-400 m/s) fino a 30 m di profondità.

Strati superficiali di terreni di riporto con caratteristiche meccaniche più scadenti, di spessore massimo qualche metro e di estensione areale molto limitata, possono localmente incontrarsi più o meno in tutta l'area urbana, in conseguenza delle modifiche morfologiche indotte nel corso dei secoli dall'attività edificatoria.

Nell'area dell'Aquila Ovest è disponibile una certa quantità di dati di prove di laboratorio eseguite su campioni indisturbati prelevati all'interno dei livelli limoso-argillosi, sia nelle nuove indagini finalizzate alla microzonazione sismica che nelle indagini pregresse. Nel corso delle indagini per la MS nella Macroarea 2 sono stati prelevati campioni indisturbati in 5 dei 7 sondaggi eseguiti, ma solo per 2 dei siti indagati (L'Aquilone e Reiss Romoli) sono ad oggi disponibili risultati di prove di laboratorio (colonna risonante).

Alla frequente presenza di strati di ghiaia, spesso incontrati anche laddove predominano frazioni granulometriche più fini, è dovuta anche la scarsità di dati da prove in sito tipo CPT o DMT, non fattibili in terreni non penetrabili. Sono invece disponibili numerosi dati di prove SPT.

I risultati più significativi, in termini di caratteristiche geotecniche, ottenuti dai sondaggi (S2.1-S2.7) e dalle misure di  $V_s$  mediante prove Down Hole e MASW eseguite nella Macroarea 2 nell'ambito del progetto MS sono riassunti nelle schede riportate qui di seguito. Tali schede mostrano, per ciascuna postazione di indagine, i seguenti profili affiancati:

- schema stratigrafico semplificato ottenuto dal sondaggio;
- profilo della velocità delle onde di taglio  $V_s$  ottenuto da prove Down Hole eseguite nello stesso foro di sondaggio, sovrapposto, dove disponibile, ad uno o più profili di  $V_s$  ottenuto da MASW o SDMT vicine;
- profilo del modulo di taglio a piccole deformazioni  $G_r$  ricavato da  $V_s$ ;
- profilo del numero di colpi NSPT ottenuto da misure SPT nel foro di sondaggio;
- profili della densità relativa  $D_r$  e dell'angolo di resistenza al taglio di picco  $\Phi'$  ricavati dalle prove SPT negli strati di terreni a grana grossa (stima approssimata secondo le correlazioni indicate nel DvD allegato).

Nelle figure 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9 si riportano le schede geotecniche relative ai sondaggi del progetto MS.

Fig. 2.3 → Scheda del sondaggio S2.1.

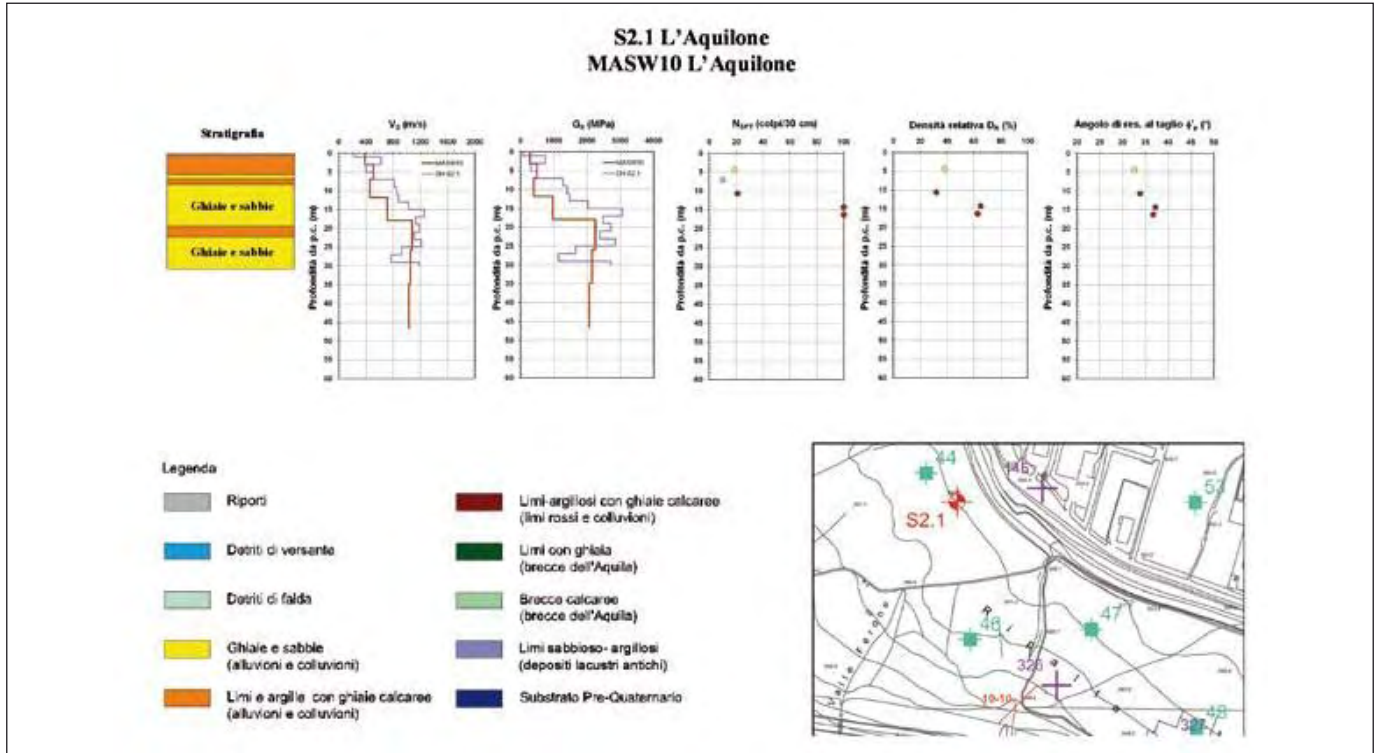


Fig. 2.4 → Scheda del sondaggio S2.2.

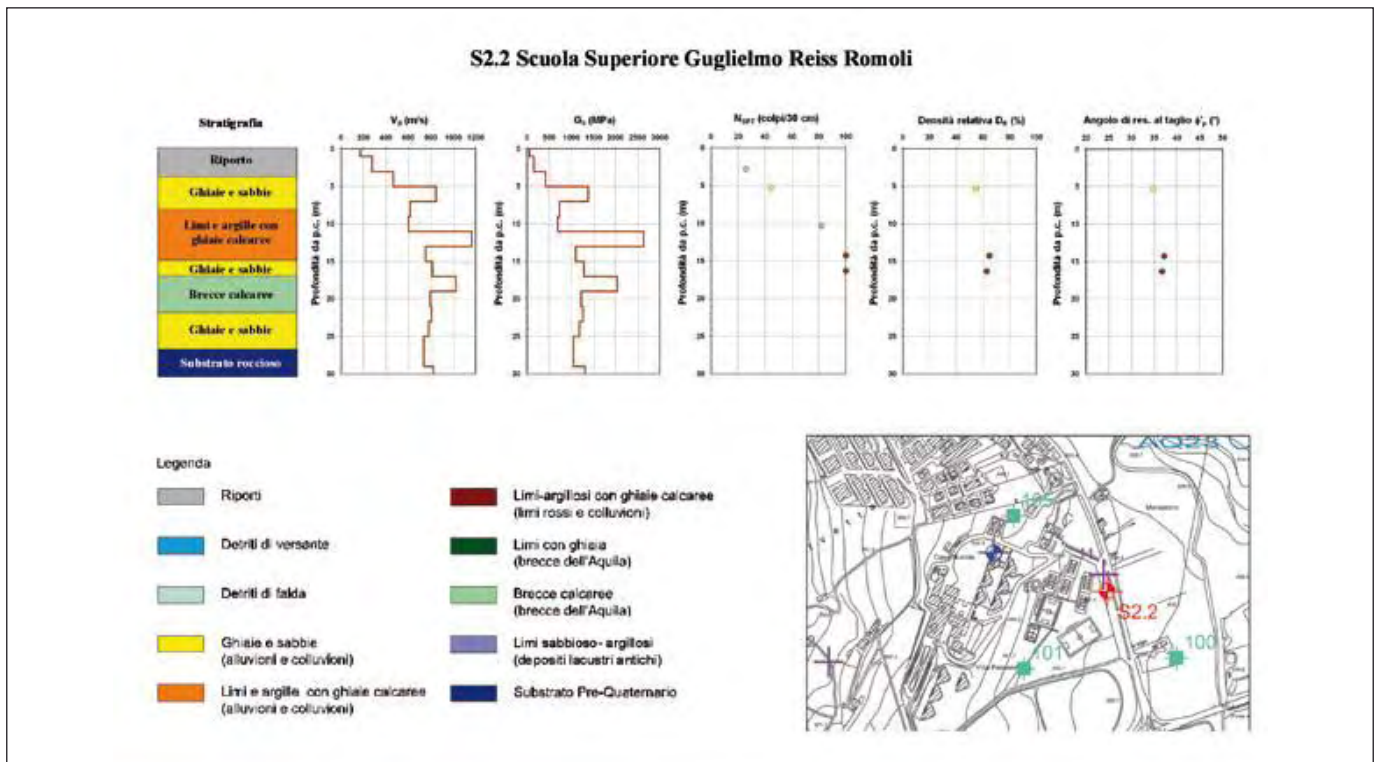




Fig. 2.5 → Scheda del sondaggio S2.3.

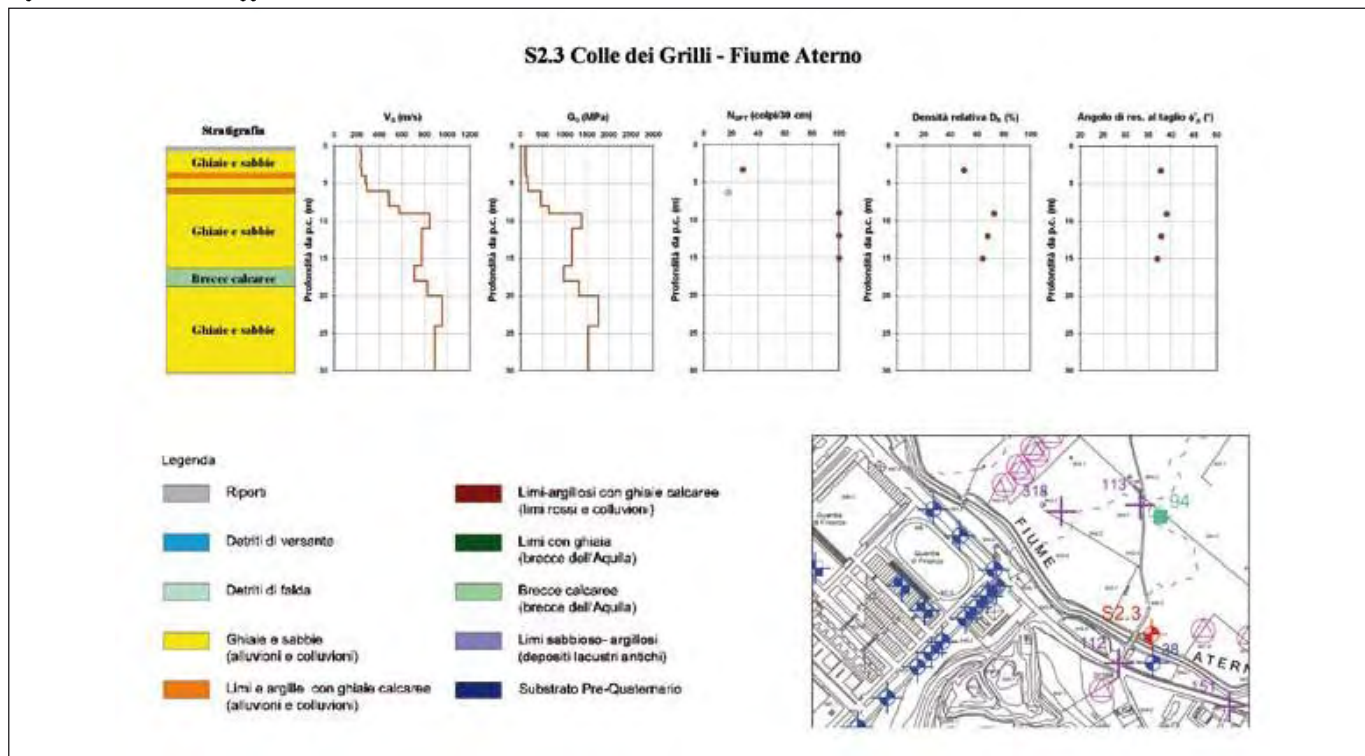


Fig. 2.6 → Scheda del sondaggio S2.4.

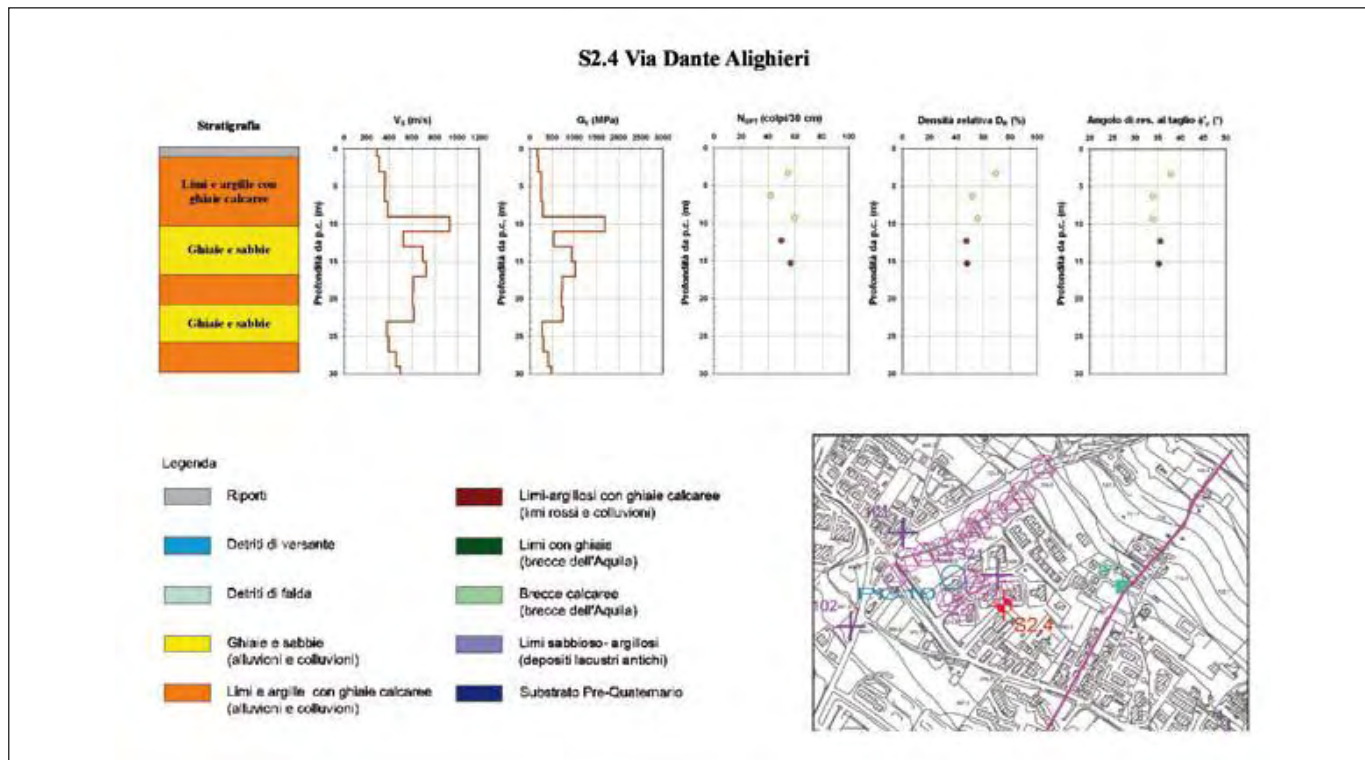


Fig. 2.7 → Scheda del sondaggio S2.5.

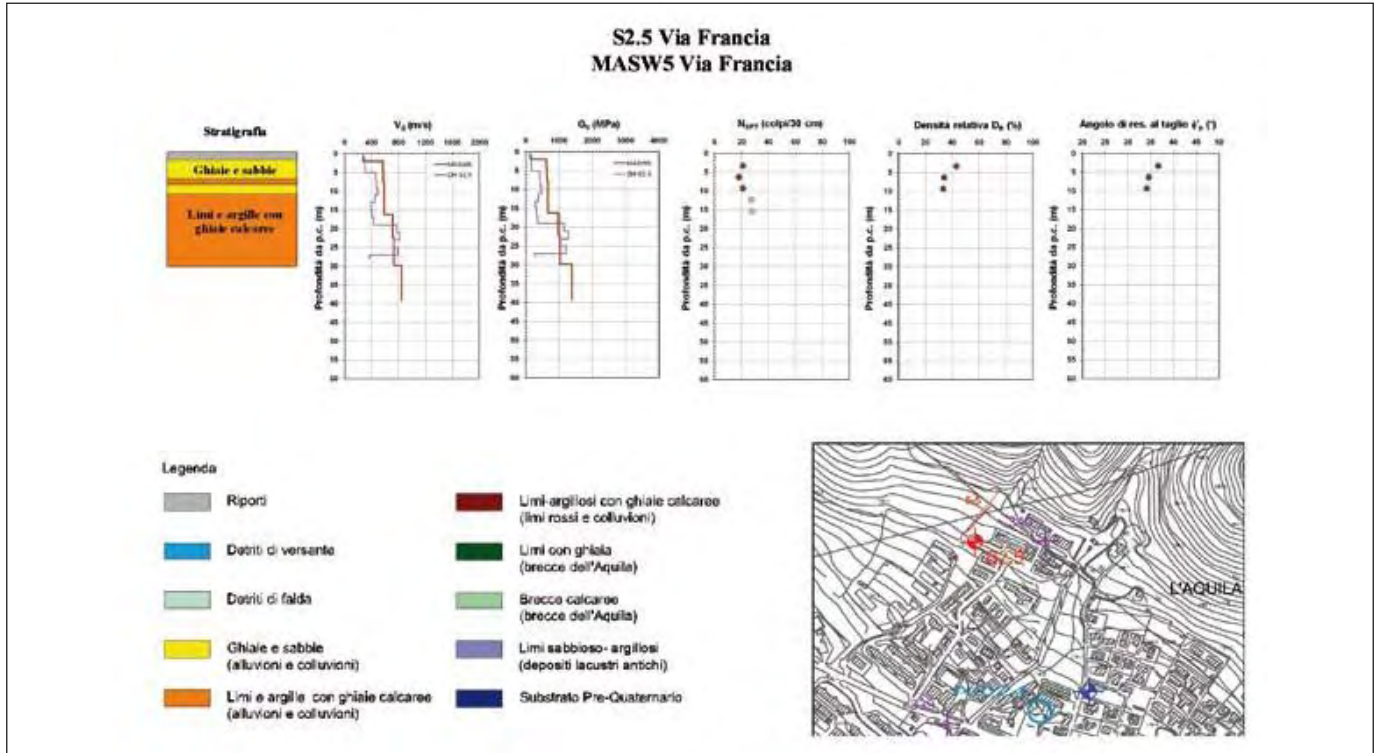


Fig. 2.8 → Scheda del sondaggio S2.6.

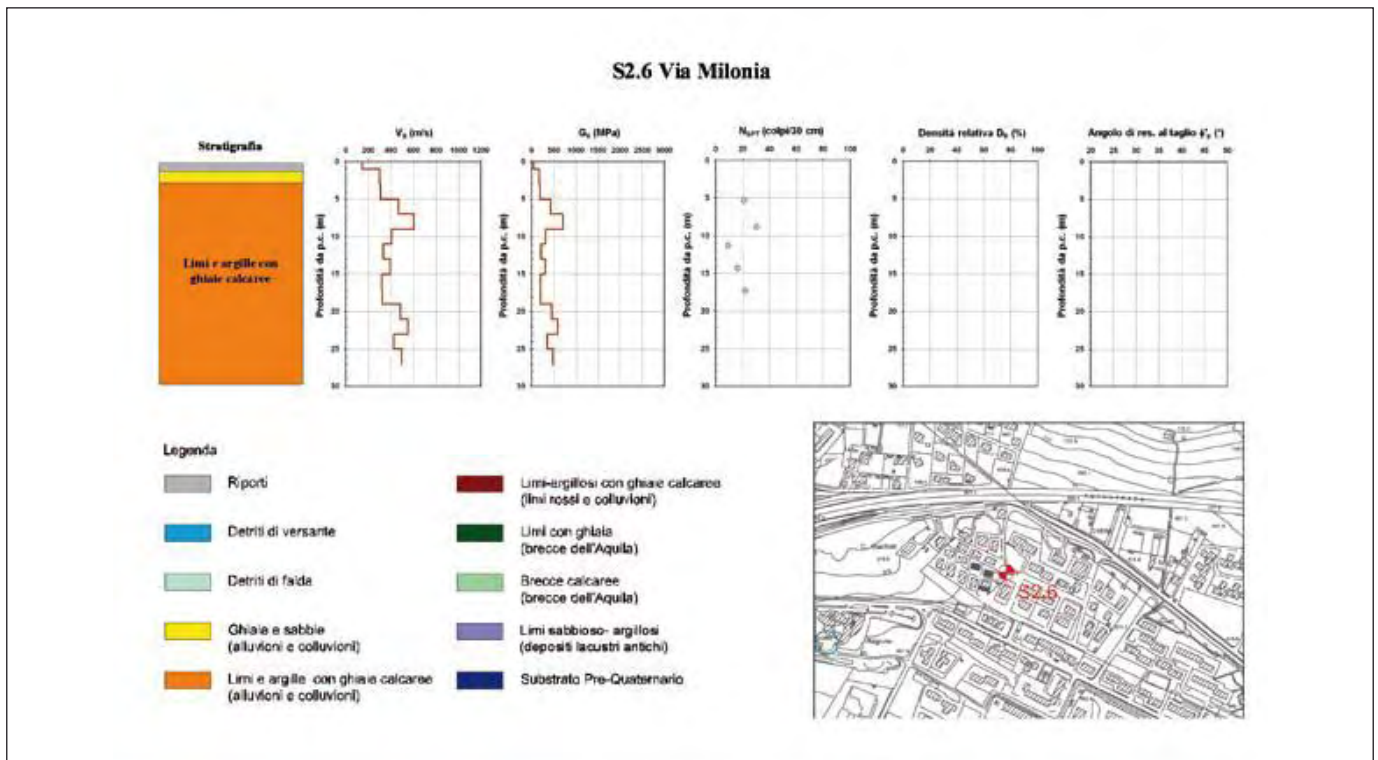
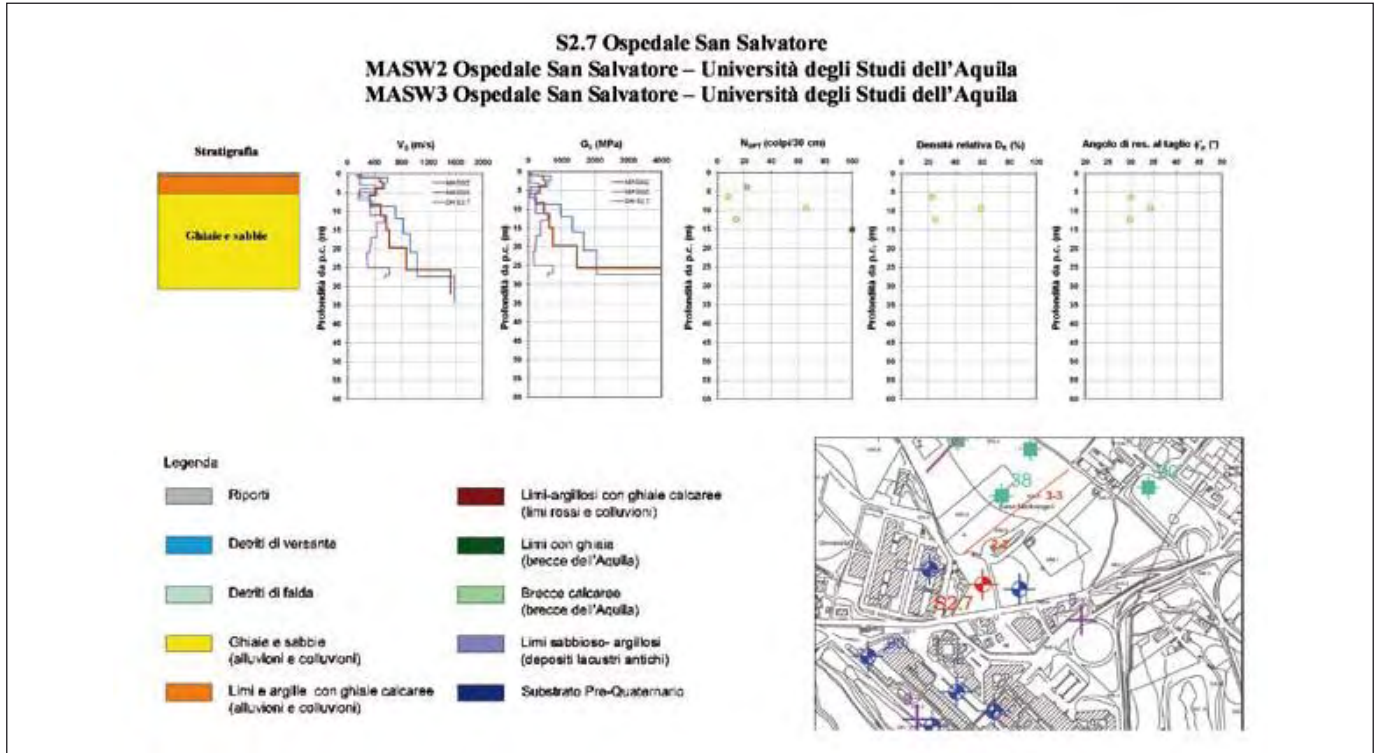


Fig. 2.9 → Scheda del sondaggio S2.7.



### 2.2.3 Prospezione gravimetrica

Nella Macroarea 2 è stato eseguito un rilievo gravimetrico di dettaglio che ha consentito di ottenere una carta delle Anomalie di Bouguer. Mediante diversi filtraggi, le mappe di gravità ottenute hanno permesso di osservare l'estrema variabilità di densità nel sottosuolo a differenti profondità. Dall'inversione gravimetrica 3D si sono potute stimare le profondità ed osservare l'andamento articolato del substrato geologico di età meso-cenozoica. Da tale modello interpretativo 3D si sono ricavati modelli 2D, che hanno determinato le profondità e l'andamento del substrato lungo le sezioni geologiche utilizzate successivamente per la modellazione numerica della risposta sismica locale.

#### Il rilievo gravimetrico

Sono state analizzate 90 nuove stazioni gravimetriche, quanto più omogeneamente distribuite nel territorio, utilizzando un gravimetro LaCoste & Romberg mod. D.60, strumento che consente un campo di misura di 200 mGal e con una sensibilità di 0.001 mGal. Per la localizzazione e la determinazione delle quote delle rispettive stazioni gravimetriche, è stato utilizzato un ricevitore GPS ASHTECH X-TREME a doppia frequenza in configurazione differenziale. La mappa delle anomalie di Bouguer è stata ottenuta applicando le correzioni classiche (Faye, Bouguer e topografica, calcolata fino a 29 km) con una densità media di 2,6 g/cm<sup>3</sup>, desunta con i soli dati gravimetrici (Di Filippo *et al.*, 1983) e, successivamente, confrontando i valori di densità media con quelle delle rocce carbonati affioranti ai margini dell'area e di quelli incontrati negli affioramenti.



## Le anomalie di gravità

I valori delle Anomalie Residue, tracciati con un intervallo di 0.2 mGal, coprono un campo di variazione da un minimo di -2 mGal ad un massimo di +2 mGal (Fig.2.10).

Si può identificare una zona di minimo, che si dirama da L'Aquila e può essere seguito fino a Cansatessa, ai piedi del Monte Pettino. La direzione di tale minimo è prevalentemente NNW-SSE nel tratto iniziale, fino a Colle Macchione, per poi avere un andamento N-S nei pressi dell'abitato di Pettino. Ai piedi dell'abitato di Preturo, in corrispondenza dell'aeroporto di L'Aquila, si identifica un minimo gravimetrico e i valori delle isoanomale assumono un andamento ellittico.

Nel settore orientale della Valle dell'Aterno, il gradiente orizzontale della gravità è molto pronunciato, e ricalca un andamento Appenninico, mentre nel settore occidentale i valori delle isoanomale passano gradualmente verso termini positivi raggiungendo i massimi valori relativi presso Colle Macchione e Colle dei Grilli. Dall'andamento delle isoanomale, queste due zone di massimo relativo non sono in continuità, ma le indicazioni geologiche di superficie mostrano che sono circondate da sedimenti Quaternari, terrigeni e il substrato geologico affiorante presenta delle strutture molto complesse e tettonizzate. Risulta evidente che la zona compresa tra Palombara - Colle dei Grilli - Colle Macchione, presenta un massimo relativo; nel caso di Colle dei Grilli si osserva che i sedimenti affioranti sono identificabili dalla Maiolica detritica e Calciruditi a Fuocidi (Cenomaniano p.p. - Titonico superiore) appartenente alle Unità del Gran Sasso, molto tettonizzata, mentre a Colle Macchione, al di sotto delle breccie dell'Aquila, si osserva il flysch (Messiniano) riferito all'Unità Terrigena arenacea dell'Unità di Monte D'Ocre. Ed infine a Palombara, si hanno in affioramento le Unità Calcarea (Miocene inferiore) e le Unità Terrigene Marnose (Miocene medio) dell'Unità di Monte D'Ocre.

A N di Colle Macchione, il minimo relativo che si osserva in corrispondenza dell'aeroporto presenta, con un andamento ellittico con direzione NW-SE, presente nel settore meridionale il gradiente orizzontale della gravità molto pronunciato, ricalcando un andamento antiappenninico; mentre nel settore settentrionale è meno marcato e con un andamento costante.

## Il modello gravimetrico tridimensionale interpretativo

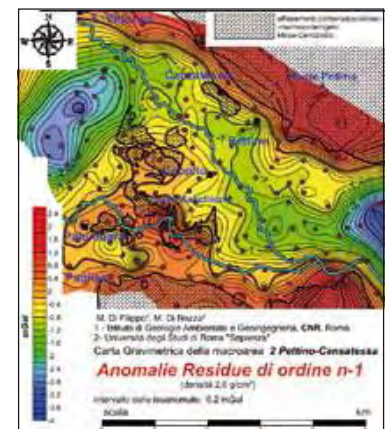
È stato ottenuto un modello interpretativo geologico-strutturale del sottosuolo dell'intera macroarea partendo dall'elaborazione di un modello gravimetrico tridimensionale. Sono state da principio identificate delle unità geogravimetriche e successivamente sono state verificati i reciproci rapporti tra di esse, ottenendo così una stima delle profondità del substrato geologico.

Le ipotesi avanzate, dove possibile, sono state verificate con i dati dei sondaggi presenti (Bertini *et al.*, 1992; Carta dei sondaggi) o con altre informazioni, dirette o indirette, disponibili (Carta Geologica Macroarea 2; Ge.Mi.Na., 1963).

Per l'elaborazione del modello gravimetrico tridimensionale è stato utilizzato un programma di calcolo 3dGRTV, sviluppato ed eseguito dal Dipartimento di Scienze della Terra, Università "Sapienza" di Roma (Di Filippo & Di Nezza), che permette di ottenere l'anomalia gravimetrica prodotta da una serie di corpi tridimensionali limitati da una data geometria e densità media, utilizzando l'algoritmo di Coggon (1976). Per l'elaborazione del modello tridimensionale ottenuto, l'inversione è stata effettuata considerando l'anomalia residua della figura 2.10.

L'andamento delle anomalie di gravità osservate sono state definite da quattro unità geo-gravimetriche. Il corpo principale, che rappresenta il substrato geologico, è definito da due unità geogravimetriche: il primo

Fig. 2.10 → Carta delle anomalie residue di ordine n-1, intervallo delle isoanomale 0.2 mGal.



raggruppa i calcari meso-cenozoici, non facendo alcuna distinzione tra la Corniola e Calcari Diasprini Detritici (Lias medio), Maiolica Detritica e Calciruditi a Fucoidi (Cenomaniano p.p.-Titonico superiore), Scaglia Detritica (Eocene p.p.- Cenomaniano p.p.) appartenenti alle Unità del Gran Sasso e Unità Calcarea del Miocene ascrivibili all'Unità dei Monti d'Ocre (si veda la Carta Geologica della macroarea); a tale unità è stata attribuita una densità media di  $2.6 \text{ g/cm}^3$ . La seconda unità geogravimetrica, attribuita sempre al substrato geologico, è riferita all'Unità Terrigena arenacea, flysch (Messiniano inferiore-superiore) a cui è stata data una densità media di  $2.4 \text{ g/cm}^3$ .

La terza unità geogravimetrica comprende quasi tutte le Unità Quaternarie (Carta Geologica della macroarea) dai termini che vanno dalle Depositi lacustri antiche (Pleistocene inferiore) ai Riporti; a questa unità è stata attribuita una densità media di  $1.9 \text{ g/cm}^3$ . Infine, l'ultima unità geogravimetrica è ascrivibile alle Brecce de L'Aquila, che si differenziano in affioramento da quelle osservate nella città de L'Aquila, a cui è stata attribuita una densità media di  $2.4 \text{ g/cm}^3$ .

I valori delle anomalie residue, tracciati con un intervallo di  $0.2 \text{ mGal}$ , coprono un campo di variazione da un minimo di  $-3 \text{ mGal}$  ad un massimo di  $+2 \text{ mGal}$ .

Le zone dove le isoanomalie hanno valori negativi sono due: una prima zona è localizzata in corrispondenza dell'area industriale de L'Aquila, tra la Motorizzazione Civile e la sede della ITALTEL, dove è presente l'area industriale; l'altra tra l'abitato di Cansatessa e Colle dei Grilli verso la città de L'Aquila ai piedi dei rilievi di Monte Pettino. Quest'ultima zona è contornata ad E ed W dai sedimenti dell'unità del Gran Sasso affioranti. Sul versante orientale della Valle dell'Aterno, il gradiente orizzontale della gravità è molto pronunciato, e ricalca un andamento Appenninico, ma non si osserva in corrispondenza degli affioramenti delle unità costituenti il substrato geologico.

I valori delle isoanomalie assumono un andamento ellittico con direzione NE-SW in un'area ai piedi dell'abitato di Preturo, in coincidenza dell'area dell'aeroporto de L'Aquila; qui si raggiungono i valori più bassi dell'intera area. È da notare il marcato andamento antiappenninico dell'anomalia chiusa.

È da notare inoltre una zona di massimo relativo le cui anomalie assumono un andamento molto tortuoso e non omogeneo, senza assumere nessuna direzione preferenziale, e raggiungendo il massimo valore di  $+2 \text{ mGal}$  in corrispondenza di Colle Macchione dove si osservano rocce riconducibili al substrato geologico fortemente tettonizzate. Dal modello gravimetrico interpretativo ottenuto si è ricavato l'andamento e la profondità del substrato geologico, definite le geometrie delle diverse unità geogravimetriche (**All. Tavola Sezioni Geogravimetriche**) lungo le 7 sezioni geologiche (**All. Tavola Sezioni Geologiche**) su cui è stata eseguita la modellazione numerica della risposta sismica locale.

## 2.2.4 Variazioni della velocità delle onde S con la profondità

Un'analisi dei risultati delle prove Down Hole e delle MASW nella Macroarea 2 è stata condotta al fine di evidenziare le variazioni della velocità delle onde S ( $V_s$ ) con la profondità. L'analisi prende come riferimento di variabilità solo la profondità e quindi i grafici ottenuti non vanno considerati come abachi da utilizzare ai fini progettuali. I dati delle  $V_s$  ottenute dalle 6 prove Down Hole eseguite e dagli 11 profili sismici per l'esecuzione delle MASW sono stati raggruppati e formattati per essere trattati mediante statistica descrittiva.

## La microzonazione sismica delle macroaree

Il grafico riportato in **figura 2.11**, riporta i risultati di tali analisi. Per ogni profondità nel grafico, è riportato il valore del minimo, del massimo, della media e la relativa deviazione standard della  $V_s$ .

Il diagramma mostra che i minimi della  $V_s$  riferiti alle varie profondità presentano lievi variazioni mentre i massimi subiscono forti fluttuazioni di valori di  $V_s$ .

I valori minimi e massimi di  $V_s$  discostano di molto anche a basse profondità; la deviazione standard (SD) assume valore massimo alla profondità di 9 m dal p.c. pari a 426 m/s.

I risultati dell'analisi eseguita mostrano ancor di più rispetto alla macroarea 1, un'evidente eterogeneità delle caratteristiche geo-sismiche dei terreni superficiali nei siti analizzati. In questo caso trovandoci in diversi punti della Valle dell'Aterno è del tutto legittimo aspettarsi queste variazioni.

### 2.2.5 Il rumore strumentale: Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR) – Standard Spectral Ratio (SSR)

Per il calcolo dei rapporti spettrali H/V da rumore sismico nella Macroarea 2 si è utilizzato sia lo strumento Grilla- Tromino (strumento di Tipo1) che le stazioni sismiche Reftek130 e Quanterra Q330, basate su convertitori A/D a 24 bits, collegate a velocimetri triassiali Lennartz LE5s-3d con banda di registrazione estesa a bassa frequenza fino a 0.2 Hz (strumenti di Tipo2). Quest'ultimo tipo di strumentazione è stato utilizzato anche per le analisi HVSR ed SSR da eventi sismici. Le misure di Tipo1 sono basate su registrazioni della durata di 20 minuti, mentre quelle di Tipo2 provengono da registrazioni continue da cui sono state estratte finestre di rumore notturne prive di forti disturbi di natura antropica. Tale precauzione è stata particolarmente utile nei centri abitati dove le attività di messa in sicurezza degli edifici, molto intense durante le ore diurne, rendevano difficile l'individuazione di finestre di rumore prive di disturbi. Gli strumenti di Tipo2 sono stati anche utilizzati per effettuate misure integrative di rumore al fine di infittire la maglia dei punti investigati. In questi casi si sono acquisite finestre di segnale di durata compresa tra 30 minuti e 2, ore cercando di operare in orari in cui il rumore antropico risultasse abbastanza ridotto. Tutti i dati sono stati elaborati secondo i criteri standard comunemente accettati per questo tipo di indagine e presentati nel capitolo introduttivo del presente volume.

In totale sono stati monitorati 82 siti con strumenti di Tipo1 e 23 siti con strumenti di Tipo2. Per le analisi di terremoti si sono utilizzati 10 siti, includendo anche quelli monitorati nell'ambito del progetto C.A.S.E. Per il periodo 27 maggio 3 luglio è stato possibile selezionare, sulla base del rapporto segnale rumore, un totale di più di 300 eventi. I terremoti selezionati sono associati sia ai segmenti della sorgente sismogenetica attiva durante la sequenza, sia al cluster localizzato nei Monti Reatini, a NW de L'Aquila. Per le stazioni del progetto C.A.S.E., operative dal 29 aprile al 8 maggio, i rapporti spettrali sono stati calcolati su circa 40 eventi. Le registrazioni degli eventi sono state tagliate per una durata di due minuti a partire da alcuni secondi prima del tempo origine. Ad ognuna di esse è stato associato è stato quindi associato un *marker* temporale che anticipa di pochi decimi di secondo l'arrivo delle onde

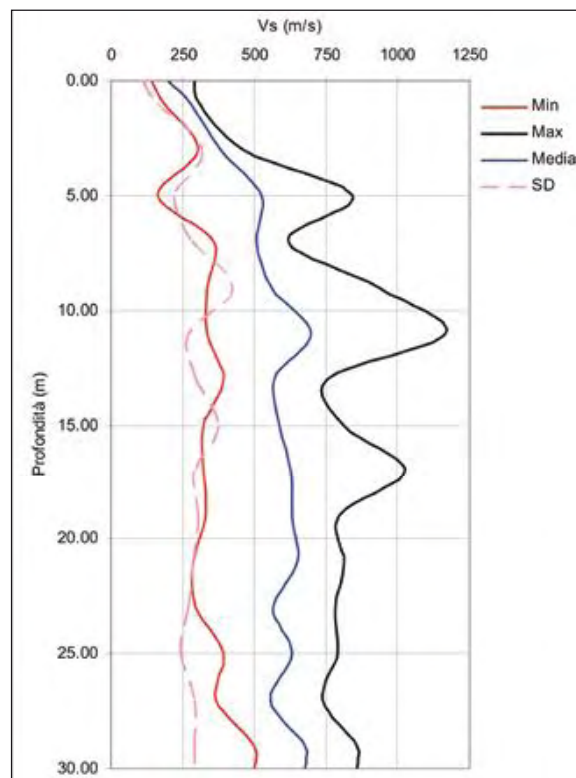


Fig. 2.11 → Diagramma della  $V_s$  rispetto alla profondità nella Macroarea 2.

P. Gli spettri di Fourier sono stati calcolati su una finestra di 10 s a partire dal sopra descritto *marker*. Le finestre selezionate comprendono quindi sia le onde P che le onde S. Tale scelta è stata motivata dal fatto che per gli eventi vicini l'intervallo S-P era di meno di un secondo e quindi un taglio che includesse la finestra S portava di fatto ad includere anche parte se non tutte le onde P.

I rapporti spettrali HVSR sono stati calcolati separatamente per le due componenti orizzontali.

Gli eventi selezionati per l'analisi HVSR sono stati anche utilizzati per il calcolo dei rapporti spettrali standard (SSR). In questo caso si è resa necessaria la scelta di un sito di riferimento su roccia affiorante rispetto al quale valutare i rapporti spettrali sia per le componenti orizzontali che per la componente verticale. Tenendo conto della geologia locale, di studi in letteratura e delle numerose misure che sono state effettuate per la valutazione degli effetti di sito nell'area aquilana e successivamente per la selezione dei siti per il progetto C.A.S.E., sono stati individuati due possibili siti di riferimento. Il primo è stato posizionato su rocce carbonatiche detritiche cretatiche nel centro abitato di Cansatessa, ubicato nella parte più settentrionale della macroarea (stazione AQ27). Il secondo è stato ubicato su roccia carbonatica paleogenica (scaglia detritica) affiorante in località Poggio di Roio, a Sud-Ovest de L'Aquila (stazione AQ12). Tale sito è lo stesso utilizzato come riferimento per la Macroarea 1. Per le stazioni installate per il progetto C.A.S.E. si è scelto come riferimento il sito su cui è ubicata la postazione accelerometrica AQM (stazione PC07) della Rete Accelerometrica Nazionale (R.A.N) ubicato in prossimità di Cansatessa sulla stessa unità geologica della stazione AQ27.

I dati sono stati analizzati con l'obiettivo di individuare, nei rapporti spettrali, la frequenza ( $f_c$ ) che corrisponde alla frequenza in cui il rapporto H/V presenta il primo picco di amplificazione statisticamente significativo. Anche l'ampiezza dei rapporti H/V in corrispondenza della  $f_c$  può essere utile per confrontare la risposta di siti differenti. Per tutti i gruppi di misure si è riscontrato un ottimo accordo tra i valori di  $f_c$  ricavati dalla tecnica HVNSR ed i massimi di amplificazione ricavati dall'analisi HVSR ed SSR. In aggiunta ai valori di  $f_c$  la tecnica SSR consente la valutazione della funzione di trasferimento media dei siti analizzati una volta accertata la mancanza di effetti di amplificazione/deamplificazione al sito di riferimento. I siti selezionati per le indagini sismologiche sono distribuiti sulle differenti unità geologiche affioranti nell'area al fine di verificare e valutare l'influenza di tali litotipi, e delle loro geometrie, sulla risposta sismica locale.

Si possono dividere i punti di misura in quattro gruppi principali: il primo comprende le stazioni ubicate sui Depositi del Monte Pettino e sui Limi di Via Milonia che interessano la fascia orientata in direzione Nordovest – Sudest che delimita a Nord la macroarea; il secondo include i siti ubicati nella parte NW della valle del Fiume Aterno, alla base dei detriti di versante del Monte Pettino, ed è delimitata verso Sudest dall'area dove è edificato l'Ospedale San Salvatore (stazione AQ23); il terzo gruppo di siti è ancora ubicato lungo la Valle dell'Aterno nella zona a S-SE dell'Ospedale San Salvatore e si allunga fino a raccordarsi con la Macroarea 1 in prossimità dell'autostrada A24; il quarto gruppo include alcuni punti di misura nella zona Sud della macroarea in corrispondenza della zona di Campo di Pile.

I risultati delle analisi svolte sono riportati nella carta di **figura 1.53 (parte III, cap. 1)** che rappresenta i valori di  $f_c$  ricavati dalle analisi sopra descritte unitamente ai valori di ampiezza dei rapporti H/V. I valori di  $f_c$  ottenuti sono stati divisi in 6 classi rappresentate con cerchi di colore diverso. Il diametro dei simboli utilizzati è proporzionale all'ampiezza del picco. Per alcuni siti sono stati individuati in modo chiaro 2 picchi separati nei rapporti spettrali H/V. Tale circostanza può verificarsi nel caso in cui siano presenti 2 orizzonti con forte contrasto di impedenza nei terreni di copertura. In questi casi si è rappresentata la

## La microzonazione sismica delle macroaree

seconda frequenza, indicata con  $f_1$  (assumendo  $f_1 > f_c$ ), con un simbolo triangolare. Anche in questo caso  $f_1$  è stata suddivisa in classi rappresentate da colori diversi; la grandezza dei simboli è proporzionale all'ampiezza dei picchi centrati al suo valore.

Per il primo gruppo risulta molto evidente e diffuso un picco di  $f_c$  compreso tra 2 e 5 Hz, con ampiezze sostenute e frequenze che vanno progressivamente aumentando spostandosi da NW verso SE. Tale effetto è compatibile con un contrasto di impedenza tra le coltri detritiche più superficiali ed orizzonti più rigidi posti a profondità che possono variare tra i 20 m e i 50 m.

Le stazioni del secondo gruppo mostrano la presenza frequente di un doppio picco di amplificazione. Il primo di questi picchi cade ad una frequenza  $f_c$  centrata intorno ai 3-4 Hz ed è compatibile con un contrasto di impedenza tra i 30 m ed i 50 m, peraltro evidenziato da sondaggi effettuati in corrispondenza della stazione accelerometrica AQV della R.A.N. Il secondo picco di amplificazione è centrato a frequenze più alte ( $f_1=8-10$ Hz) ed è legato probabilmente alla presenza di livelli ghiaiosi posti a pochi metri di profondità al di sotto di terreni meno rigidi. Il terzo gruppo di stazioni presenta picchi di amplificazione non sempre molto evidenti a frequenze più basse ( $f_c < 2$ Hz) che indicano un approfondimento del bedrock presumibilmente calcareo procedendo lungo la valle in direzione NW-SE, tali picchi possono a volte non essere evidenziati dalle misure di Tipo1 a causa della minore sensibilità a bassa frequenza degli strumenti di misura utilizzati. Anche in questo caso si incontrano a volte picchi di amplificazione secondari ( $f_1$ ) a frequenza più alta associabili alla presenza di lenti ghiaiose a piccola profondità. Il quarto gruppo di stazioni presenta effetti di amplificazione a frequenze comprese tra 2 e 7 Hz associabili al contrasto di impedenza tra i Depositi alluvionali dei fiumi Aterno e Raio ed il bedrock calcareo. Muovendosi in direzione NS si osserva uno spostamento in frequenza associato all'assottigliamento degli strati superficiali di sedimenti man mano che ci si avvicina al versante roccioso che chiude a S la macroarea.

Per la maggior parte dei siti analizzati le analisi HVSR ed SSR confermano i risultati ottenuti dai dati di microtremore, anche se forniscono funzioni di amplificazioni più complesse. La tecnica SSR evidenzia anche importanti effetti di amplificazione nelle componenti verticali a frequenze superiori a quelle ricavate per le componenti orizzontali. Il rapporto tra le  $f_c$  ricavate nei due casi è direttamente correlabile al rapporto  $V_p/V_s$  che si può ipotizzare per i terreni di copertura.

Un ulteriore contributo fornito dalla tecnica SSR consiste nel calcolo del fattore di amplificazione FA inteso come il rapporto tra l'integrale dello spettro di risposta in pseudo velocità registrato ad un sito e l'analogo integrale calcolato per un sito di riferimento su roccia. La banda di integrazione è generalmente fissata tra i periodi di 0.1 s e 0.5 s che corrispondono alle frequenze di maggiore interesse ingegneristico. Tale valore è stato calcolato come valore medio dei singoli FA ottenuti per i 20 *after-shock* più significativi verificatisi nel periodo di registrazione. I risultati ottenuti non sono direttamente confrontabili con quelli ricavati dalla modellazione e successivamente presentati, ma danno comunque un'indicazione ulteriore sulle differenze relative di amplificazione osservate nell'area.

Vista comunque la modesta entità degli eventi registrati i risultati non tengono minimamente conto di possibili comportamenti non lineari dei terreni che sono invece inclusi nelle modellazioni numeriche. La distribuzione dei valori di FA ottenuti viene presentata in **figura 1.53 del capitolo 1 (macroarea 1)** e nel DvD allegato al presente volume unitamente con i risultati delle analisi HVNSR ed SSR svolte sui singoli siti investigati.

## 2.3 CARTE DI MICROZONAZIONE SISMICA

---

### 2.3.1 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (livello 1)

La Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (livello 1) è un elaborato di sintesi, ottenuto dalla sovrapposizione dei dati geologici, geomorfologici, idrogeologici, geotecnici, geofisici (vedi carta geologica e carta delle indagini), che ha lo scopo di suddividere il territorio in unità che presentano medesime caratteristiche sotto il profilo geomorfologico, geologico e geotecnico-geomeccanico; ciascuna di queste unità presenta, in sostanza, una porzione di territorio con la stessa acclività, stratigrafia (tipologia dei litotipi e spessori), stesse caratteristiche geotecniche e geomeccaniche (l'approssimazione è funzione della scala del lavoro) e quindi la potenziale suscettibilità a fenomeni di amplificazione locale indotte dal sisma: amplificazione del moto, induzione di frane e altri dissesti, modificazioni permanenti del suolo, liquefazione dei terreni, cedimenti differenziali etc. La legenda della Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica pertanto suddivide il suolo in tre classi differenti:

- a) zone stabili: non si ipotizzano effetti locali di rilievo di alcuna natura; il substrato geologico è in affioramento con morfologia pianeggiante o poco inclinata (pendii con inclinazione inferiore a circa 15°);
- b) zone stabili suscettibili di amplificazioni locali; sono caratterizzate dall'affioramento del substrato geologico o da materiali con buone e discrete caratteristiche geotecniche e geomeccaniche nelle quali sono attese locali amplificazioni del moto sismico condizionate dall'assetto litostratigrafico e dalla morfologia;
- c) zone suscettibili di instabilità: affiorano materiali con caratteristiche geotecniche scadenti o mediocri e gli effetti sismici attesi e predominanti possono condurre a deformazioni permanenti del territorio, indurre instabilità di versante, liquefazioni, faglie attive e capaci, cedimenti differenziali e ovviamente a fenomeni di amplificazione del moto.

La discretizzazione delle microzone è stata effettuata per sovrapposizione in ambiente GIS dei tematismi geologici, geomorfologici successivamente modificata sulla base delle osservazioni geologiche effettuate sul terreno. Lo spessore al quale sono state ricostruite le microzone è funzione della qualità dei dati e della profondità dei sondaggi; nella legenda della carta sono indicate le stratigrafie tecniche di riferimento con le indicazioni relative alla litologia, allo stato di consistenza e dei terreni sciolti espresso in Densità relativa (D) e Indice di fratturazione (Jv).

Sono state considerate stabili le aree dove affiorano rocce e rocce tenere (o terreni con  $V_s > 800$  m/s) e con inclinazione minore di 15°.

La stratigrafia di riferimento di ogni singola microarea è stata definita sovrapponendo i dati ricavati dal rilevamento geologico, dalle indagini eseguite e dai dati di letteratura. Sono state considerate come volumi stratigrafici significativi i corpi con uno spessore uguale o superiore a 5 m. Ogni microarea è stata quindi caratterizzata indicando il valore della densità relativa delle formazioni granulari e lo stato di fratturazione degli ammassi rocciosi per quanto riguarda il substrato (Jv). L'accorpamento delle formazioni geologico-stratigrafiche in microzone è stato operato considerando la potenziale predisposizione alla pericolosità geologica intrinseca dell'area connessa alla possibilità di liquefazione dei terreni e di cedimenti differenziali etc.

Nella Macroarea 1 sono state individuate le seguenti microzone (Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica nel DvD allegato):

## La microzonazione sismica delle macroaree

### Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

Sono state suddivise in funzione delle caratteristiche litostratigrafiche e morfologiche le seguenti microzone:

- **Zona K3:** caratterizzata dalla presenza in affioramento di calcari stratificati con un parametro di fratturazione  $J_v$  compreso tra 5 e 8 e con una pendenza morfologica superiore ai 15°. La microzona K3 è presente nel settore pedemontano di Monte Luco.
- **Zona K4:** caratterizzata dalla presenza in affioramento di calcari stratificati intensamente fratturati con un parametro di fratturazione  $J_v$  compreso tra 15 e 30 e con una pendenza morfologica superiore ai 15°. La microzona K4 è presente nel settore pedemontano del Monte Castelvechio (La Rocchetta – Colle Nocette – Colle S. Onofrio).
- **Zona K5:** caratterizzata dalla presenza in affioramento di ghiaie calcaree con densità relativa compresa tra 90 e 100%. La microzona K5 è presente nel settore pedemontano del Monte Pettino in località Sfrizzoli.
- **Zona K6:** caratterizzata dalla presenza in affioramento di ghiaie calcaree a spigoli vivi e debolmente cementate per uno spessore di circa 20 m e geometricamente sovrapposte ad un'alternanza di ghiaie in matrice limosa e limi sabbiosi marroni con densità relativa compresa tra 50 e 60%. Dal punto di vista geologico-geomorfologico rappresentano i depositi di conoide alluvionale e detritico del Monte Pettino. La microzona K6 è presente nel settore pedemontano del Monte Pettino nelle località comprese tra Case Grilli e Colle Gualtieri.
- **Zona K7:** caratterizzata dalla presenza in affioramento di un'alternanza di ghiaie in matrice limosa e limi sabbiosi marroni con densità relativa compresa tra 50 e 60% con consistenza da media a dura per uno spessore di circa 30 m e geometricamente sovrapposte a ghiaie calcaree a spigoli vivi debolmente cementate con densità relativa compresa tra 60 e 70%. La microzona K7 è presente nel settore pedemontano compreso tra il Monte Pettino e il Monte Castelvechio tra la sede dell'autostrada Roma - L'Aquila e località C.na Cappelli.
- **Zona K8:** caratterizzata dalla presenza in affioramento di brecce cementate a luoghi in matrice limosa di colore bianco per uno spessore di circa 40 m. La microzona K8 rappresenta il substrato di gran parte della città dell'Aquila tra le località S. Anza – Madonna del Soccorso e le pendici del Monte S. Onofrio. Affioramenti sono presenti in riva destra del Fiume Aterno nei pressi della Pineta di Roio, in località Pile e nella fascia pedemontana di La Rocchetta a Nord della sede dell'autostrada Roma - L'Aquila.
- **Zona K9:** caratterizzata dalla presenza di una alternanza di limi, sabbie e ghiaie rosse con densità relativa compresa tra 80 e 90% per uno spessore di circa 15 m e geometricamente sovrapposte a brecce cementate. La microzona K9 è presente nel settore S del centro dell'Aquila tra le località Basilica Collemaggio e Fontana 99 cannelle.
- **Zona K11:** caratterizzata dalla presenza di argille e limi duri alternati a sabbie con densità relativa compresa tra 80 e 90% per uno spessore di almeno 30 m. La microzona K11 è presente in alcune aree del fondo valle del Fiume Aterno (Casa Palitti, Tribunale, Ripalta).
- **Zona K12:** caratterizzata dalla presenza di limi e argille con consistenza media e densità relativa compresa tra 70 e 90% per uno spessore di circa 15 m e geometricamente sovrapposte a calcari stratificati con un parametro di fratturazione  $J_v$  compreso tra 5 e 10. La microzona K12 è presente nel settore pedemontano di Colle di Roio tra le località Genzano e Case Aquillio.

- **Zona K14:** caratterizzata dalla presenza di ghiaie da sciolte a cementate sabbie e limi teneri con densità relativa compresa tra 30 e 50% per uno spessore di almeno 30 m. La microzona K14 è presente tra le località Case Marinangeli e Fonte Burri - S. Antonio e rappresentano i depositi alluvionali terrazzati del Fosso Vetoio.
- **Zona K15:** caratterizzata dalla presenza in affioramento da ghiaie sciolte, limi teneri e sabbie con densità relativa compresa tra 50 e 70% per uno spessore di circa 15 m e geometricamente sovrapposte a ghiaie da sciolte a cementate, limi duri e sabbie con densità relativa compresa tra 80 e 90%. La microzona K15 è caratteristica del fondo valle del Fiume Aterno, del Torrente Raio e del Fosso Vetoio.
- **Zona K16:** caratterizzata dalla presenza in affioramento di limi teneri, ghiaie e sabbie con densità relativa compresa tra 30 e 50% per uno spessore superiore a 5 m e geometricamente sovrapposte a ghiaie cementate. La microzona K16 è caratteristica dei depositi pluvio-colluviali delle vallecole presenti nel settore del centro città.
- **Zona K17:** caratterizzata dalla presenza terreni di sottofondo con densità relativa compresa tra 70 e 90% per uno spessore superiore a 5 m e geometricamente sovrapposti a ghiaie da sciolte a cementate, limi duri e sabbie con densità relativa compresa tra 80 e 90%. La microzona K17 è caratteristica dei depositi presenti nel settore del casello autostradale L'Aquila Ovest.
- **Zona K18:** caratterizzata dalla presenza di terreni con densità relativa compresa tra 70 e 90% per uno spessore superiore a 5 m e geometricamente sovrapposti a brecce cementate a luoghi con matrice limosa di colore bianco. La microzona K18 è caratteristica dei depositi presenti in località Valle Pretara.

### Zone suscettibili di instabilità nelle quali sono possibili deformazioni permanenti del territorio:

La zona denominata I1 è caratterizzata dalla presenza della faglia attiva e capace del Monte Pettino che interessa la porzione pedemontana di territorio ubicata tra il convento di San Giuliano e Sfrizzoli.

La zona denominata I2 rappresenta le aree in frana in terra rilevate nella zona della Basilica di Collemaggio e nei pressi della Fontana 99 cannelle.

Inoltre nella carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica della Macroarea 1 sono indicate le principali forme morfologiche (orlo di terrazzi e scarpate, frane sismoindotte non cartografabili, cavità e grotte), i fenomeni di liquefazione rinvenuti tra Via Ponte Rasarolo, S.S.17 e la ferrovia, le isobate del *bedrock* ricostruite sulla base dei dati geogravimetrici e dei sondaggi che lo intercettano.

## 2.3.2 Carta di microzonazione sismica (livello 3)

### 2.3.2.1 Analisi numerica della risposta sismica locale

L'analisi numerica ha richiesto la conoscenza di alcuni dati:

- l'input sismico cioè il moto vibratorio su una ipotetica roccia affiorante piana al sito in esame;
- le carte geologiche indicanti anche le zone omogenee in prospettiva sismica;
- le sezioni geologiche;
- i dati geotecnici in situ ed in laboratorio;
- i dati geofisici e sismologici.



Sulla base dei dati reperiti sono state individuate le unità geologiche-geofisiche omogenee e le relative colonne stratigrafiche che sono poi state oggetto dell'analisi numerica.

Sono stati presi in considerazione tre moti di input su roccia affiorante corrispondenti ad un periodo di ritorno di 475 anni rispettivamente:

- lo spettro della Normativa Sismica recente (Norm),
- lo spettro probabilistico Lade1 SP96. Goriano Sicolì(Prob),
- lo spettro deterministico da macrosismica SP96 M=6.7 Repi 10 km (Det).

Gli spettri sono stati convertiti in accelerogrammi prima di essere utilizzati nelle analisi di amplificazione locale.

I risultati sono stati espressi in termini di fattori di amplificazione quali:

- FA e FV, così come definiti dal Gruppo di lavoro MS(2008);
- $FA_{0.1-0.5}$  definito come rapporto tra gli integrali di Housner, considerando l'intervallo di periodo 0.1-0.5s;

La suddivisione in microaree è stata effettuata sulla base dei fattori FA e FV, il fattore  $FA_{0.1-0.5}$  è servito come controllo dei risultati numerici.

### L'Aquila Ovest

In figura 2.12 è riportata una divisione in diverse zone; Z1: area dei detriti calcarei del Pettino; Z2: area dei limi e sabbie del Pleistocene inferiore e medio; Z3 e Z4: alluvioni dell'Aterno; Z7: area delle brecce del Campo di Pile; Z9: area dei limi di Via Milonia; in blu le aree della roccia affiorante.

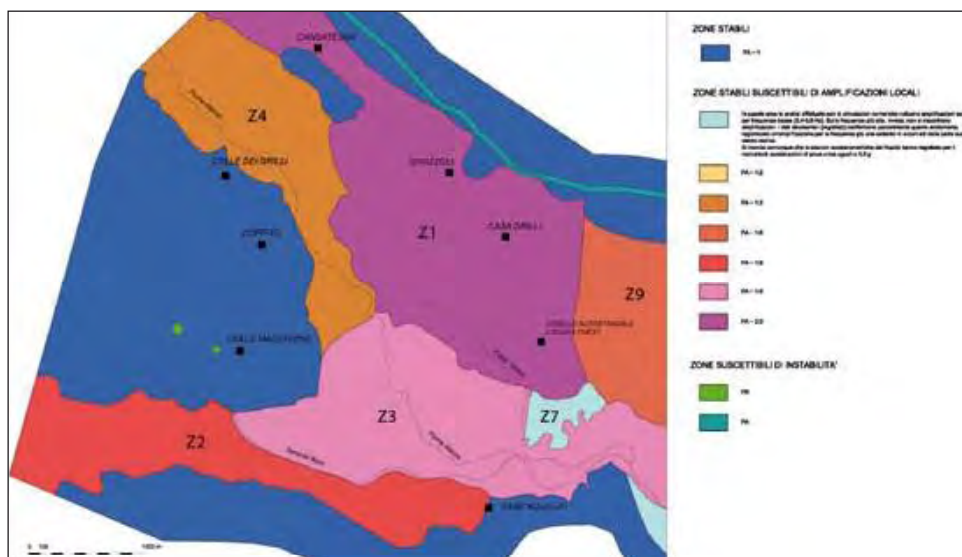


Fig. 2.12 → Carta di livello 3 della Macroarea 2.

Le proprietà geotecniche dei terreni della zona del Pettino (Z1) provengono dall'interpretazione dalle prove ivi effettuate da uno studio del dott. Leonardis (Campus relazione geologica) che hanno mostrato uno strato di circa 6 m di limi argillosi e successivamente ghiaie cementate fino a 18 m di profondità le cui proprietà di decadimento in funzione della deformazione a taglio, sono state desunte da letteratura (Rollins *et al.* 1998).

Le proprietà geotecniche dei depositi alluvionali sono state desunte dal sondaggio nell'area della Reiss-Romoli (S2.2, relazione dei Down Hole del IAMC-CNR: DH03) e dal Cross Hole nel sito della stazione accelerometrica R.A.N. (AQV Centro Valle). Le alluvioni sono state distinte in due aree: quelle più grossolane (Z4) appoggiate al substrato carbonatico e quelle tendenzialmente più fini appoggiate ai limi e le sabbie fluvio-lacustri (Z3). Nella zona sud, a Campo di Pile, si sono utilizzati i risultati delle indagini del sondaggio presso il Bar Venti (S2.1, relazione dei DH del IAMC-CNR: DH01).

A HLA2.1						
	s-m(m s)	$\gamma$ (t m <sup>3</sup> )	(m)	s-m(m s)	$\gamma$ (t m <sup>3</sup> )	(m)
Ghiaie	00	1.0	26	00	1.0	0
	s-m(m s)	g (t m <sup>3</sup> )	(m)	s-m(m s)	g (t m <sup>3</sup> )	(m)
recce	00	1.0	1			
Limo argilloso				0	1.0	13

Tab. 2.1 → Le microzone omogenee con indicazione delle relative profondità (H, m), le velocità media delle onde S ( $V_s$ , m/s) ed il peso di volume ( $\gamma$ , t/m<sup>3</sup>).

Il codice di calcolo utilizzato è di tipo monodimensionale (SHAKE91) in quanto la stratigrafia presenta un andamento dei litotipi sufficientemente piano-paralleli. Sono state effettuate anche delle analisi 2D con il software BESOIIL allo scopo di determinare gli effetti delle discontinuità orizzontali se esistenti.

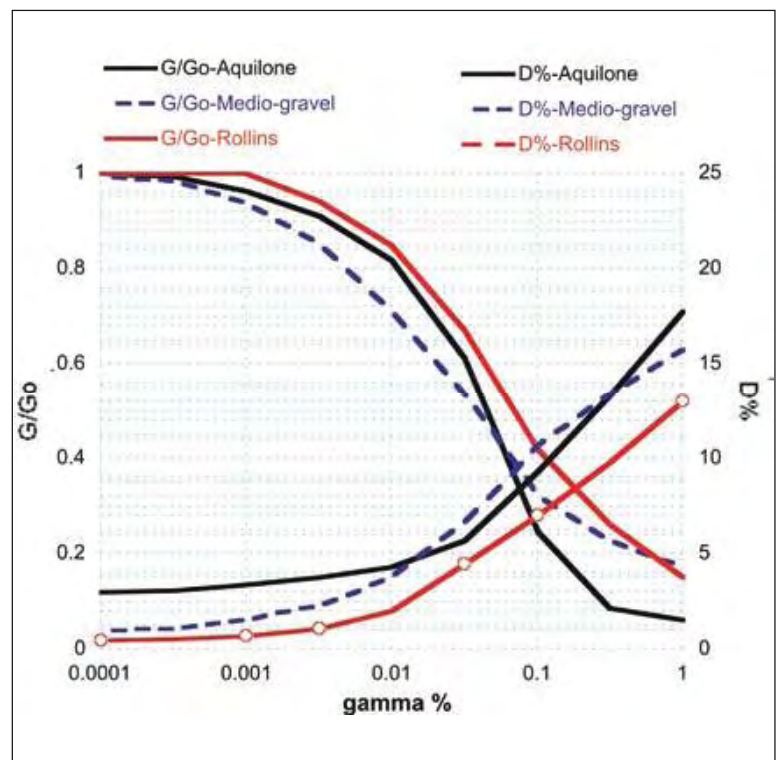
In **tabella 2.1** sono rappresentate le microzone con indicazione delle relative profondità (H in m), le velocità media delle onde S ( $V_s$  in m/s) ed il peso di volume ( $\gamma$  in t/m<sup>3</sup>).

Le curve di andamento del modulo di taglio ( $G/G_0$ ) e del rapporto di smorzamento (D) con la deformazione utilizzate, riportate in **figura 2.13**, sono state scelte sulla base sia delle caratteristiche geotecniche e litologiche del campione rispetto alle microzone omogenee considerate, sia della vicinanza del sondaggio con la sezione analizzata. In particolare per:

- i depositi alluvionali, Z3 e Z4, sono state scelte le curve delle ghiaie usate per le analisi di deconvoluzione della registrazione della scossa principale nella stazione R.A.N. (AQV Centro Valle), che sono state determinate dalla media delle curve raccolte in letteratura sulle ghiaie. Tali curve sono molto simili a quelle proposte per le sabbie alluvionali dall'AGI (Boiero *et al.*, 2009);
- le breccie e le ghiaie del Pettino sono state assunte le curve di Rollins *et al.* (1998);
- i limi argillosi di Campo di Pile si sono usate le indagini di laboratorio all'Aquilone sui provini MA2\_S2.1\_C1/2/3.

I risultati, in termini di FA, FV e  $FA_{0.1-0.5}$  sono riportati nella **tabella 2.2** per le microzone omogenee analizzate e per i tre accelerogrammi applicati.

Fig. 2.13 → Le curve di decadimento utilizzate.



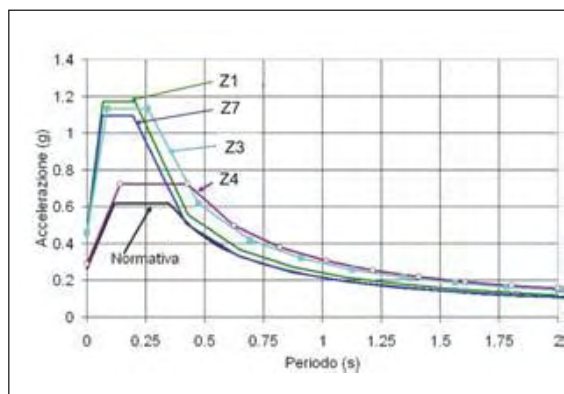
In figura 2.14 vengono mostrati gli spettri di risposta in accelerazione ottenuti dall'analisi per le microzone considerate e lo spettro di normativa (Nor). Tali spettri (linearizzati) sono stati calcolati in accordo con quanto previsto dal Gruppo di lavoro MS (2008).

I risultati mostrano un'amplificazione diffusa su tutta la parte ovest della città, solo nella parte alluvionale nella parte NE si ha una minore amplificazione dovuta al maggiore spessore delle ghiaie che hanno comportato anche un aumento del periodo proprio e quindi un aumento del plateau ad accelerazione costante.

Tab. 2.2 → I valori delle FA, FV e  $FA_{0,1-0,5}$  per le zone omogenee della Macroarea 2.

Fig. 2.14 → Spettri di risposta in accelerazione relativi alle microzone analizzate confrontati con gli spettri NTC (2008) per i sottosuoli di tipo A (Z1, Z2, Z3, Z4).

A HLA22					
		1	2	3	
	A	0,10 03	0,1	0,10 6	1,22
NRMAIA		1,2	1,1	1	1,3
	$A_{0,1-0,5}$	1	1,2	1	1,03
		1	2	3	
	A	0,0 2	1,1	0,0 2	1,22
PR .		1,0	1,0	1,0	1,30
	$A_{0,1-0,5}$	1,3	1,22	1	1,2
		1	2	3	
	A	0,10 6	0,0 02	0,10 3	1,2
DEHM		1,06	1,03	1,10	1,30
	$A_{0,1-0,5}$	1,3	1,22	1	1,03



### 2.3.2.2 La carta di MS di livello 3

La carta di microzonazione sismica di livello 3 della Macroarea 2 è stata ottenuta tenendo conto delle indicazioni della carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (livello 1) e dei risultati della simulazione numerica, le quali hanno consentito di suddividere il territorio in zone omogenee con uguale fattore di amplificazione FA.

Le zone stabili, rappresentate in carta con il colore blu, sono quelle zone in cui il fattore di amplificazione è pari ad 1 e nell'area in esame sono le zone di affioramento del substrato carbonatico e flyschoidi. Le zone stabili sono presenti lungo l'area pedemontana del Monte Pettino, lungo il versante del Colle di Roio e nel settore di territorio compreso tra le località Palombaia di Sassa, Colle Macchione e Coppito.

Le zone stabili suscettibili di amplificazioni locali sono state suddivise e denominate in funzione del valore di amplificazione sismica FA:

- **FA = 1,2:** caratterizza il settore di fondo valle del Fiume Aterno ed i relativi depositi alluvionali compresi tra le località Le Colatore e l'abitato di Coppito.
- **FA = 1,8:** caratterizza il settore compreso tra Colle Gualtieri, il Convento di San Giuliano e Piazza d'Armi.
- **FA = 1,8:** caratterizza il settore vallivo del Colle di Roio, lungo una fascia che si estende dall'abitato di Genzano e la località Case Aquillio. Tale zona si differenzia dalla precedente per un diverso valore di FV.
- **FA = 1,9:** caratterizza i depositi alluvionali del Fiume Aterno lungo il tratto che va dall'abitato di Coppito al settore S del Colle dell'Aquila.

- **FA = 2,0:** caratterizza il settore pedemontano del Monte Pettino tra le località Cansatessa Sfrizzoli e il casello autostradale L'Aquila Ovest.

Nella Carta di microzonazione sismica di livello 3 della Macroarea 2 è stata introdotta, per il settore pedemontano di Monte Luco e per la località Pile, una zona stabile suscettibile di amplificazioni locali senza valore di FA. Infatti, in queste aree le analisi effettuate con le simulazioni numeriche indicano amplificazioni solo per frequenze basse (0,4-0,6 Hz). Sulle frequenze più alte, invece, non si riscontrano amplificazioni. I dati strumentali (registrati) confermano parzialmente questo andamento, registrando un'amplificazione per le frequenze più alte soltanto in alcuni siti della parte sud del centro storico dell'Aquila. Tale zona è indicata in carta con un colore azzurro.

Le zone suscettibili di instabilità presenti nella Macroarea 2 sono rappresentate dalle zone suscettibili di instabilità di versante (identificate con il colore verde e la sigla FRT) e zone suscettibili di instabilità per faglie attive e capaci (identificate con il colore verde-scuro e la sigla FA). La zona denominata FRT rappresenta le aree in frana in terra rilevate nel versante S di Colle Macchione. La zona denominata FA è caratterizzata dalla presenza della faglia attiva e capace del Monte Pettino che interessa la porzione pedemontana di territorio ubicata tra il convento di San Giuliano, Sfrizzoli e a N dell'abitato di Cansatessa.

## Bibliografia

edi Macroarea 1