# AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DELL'AQUILA

**SETTORE VIABILITA'**

Lavori di risanamento ed adeguamento funzionale del "Ponte Rasarolo" lungo la S.R. n.615 di "Monteluco" nel comune dell'Aquila.
Servizi Professionali per l'aggiornamento della Progettazione di Fattibilità Tecnico Economica

# PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA


PROGETTAZIONE:

its Engineering Company

Ing. MICHELE TITTON
Ing. GIOVANNI TECCHIO
Ing. TINDARO MASCALI
Ing. MARIO NICOTRA
Ing. SANTI CERRITO


ELABORATO:

# GEOLOGIA E GEOTECNICA

## RELAZIONE SISMICA


IL PROGETTISTA:
Ing. Michele Titton

ORDINE INGEGNERI PROVINCIA DI TREVISO
3082
Dott. Ing. MICHELE TITTON

RESP. UNICO DEL PROGETTO:
Arch. Wanda Ilinca Paolini


| CODICE PROGETTO | NOME FILE | REVISIONE | SCALA |
|---|---|---|---|
| ID PPM: F17H20004100004 | 260003-PFTE-GEO-RE-02_0_Relazione sismica<br>CODICE ELAB.: 260003-PFTE-GEO-RE-02 | 0 | |

| REV. | DESCRIZIONE | REDATTO | VERIFICATO | APPROVATO | DATA |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| 0 | PRIMA EMISSIONE | MGS | GTC | MTT | 12.06.2024 |


Il presente disegno è di proprietà esclusiva e non può essere riprodotto né consegnato a terzi senza autorizzazione scritta, ex art. 99 Legge 22-4-1941 n.633

## Indice

1 PREMESSA ..... 1

2 RIFERIMENTI NORMATIVI ..... 1

3 BIBLIOGRAFIA ..... 2

4 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO ..... 3

5 INQUADRAMENTO SISMICO ..... 5

5.1 INQUADRAMENTO STRUTTURALE E SISMICO ..... 5

5.1.1 Il terremoto dell'Aquila 2009 ..... 8

5.2 DATABASE MACROSISMICO ITALIANO DBMI15 V4.0 ..... 11

5.3 ZONAZIONE SISMOGENETICA ZS9 ..... 12

5.4 SORGENTI SISMOGENETICHE E FAGLIE CAPACI ..... 14

5.4.1 DISS ..... 14

5.4.2 ITHACA ..... 16

6 INDAGINI SISMICHE ..... 18

6.1 INDAGINE SISMICA DOWNHOLE ..... 18

6.2 MICROZONAZIONE SISMICA ..... 20

7 PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE ..... 23

8 PERICOLOSITA' SISMICA DI PROGETTO ..... 27

8.1 EFFETTI STRATIGRAFICI ..... 27

8.2 EFFETTI TOPOGRAFICI ..... 28

8.3 COEFFICIENTI SISMICI DI PROGETTO ..... 28

8.4 VERIFICA DELLA SUSCETTIBILITÀ A LIQUEFAZIONE ..... 29

8.4.1 Studio di microzonazione sismica ..... 30

8.4.2 Prove SDMT (Dilatometro sismico) ..... 32

8.4.3 Ponte Rasarolo ..... 36

9 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE ..... 39

# 1 PREMESSA

La presente relazione sismica ha per oggetto il Progetto di Fattibilità Tecnico Economica relativo ai lavori di risanamento ed adeguamento funzionale del "Ponte Rasarolo" lungo la SR n°615 "di Monteluco" nel Comune dell'Aquila, CUP: F17H20004100004 CIG: B9AD8DCDAC.

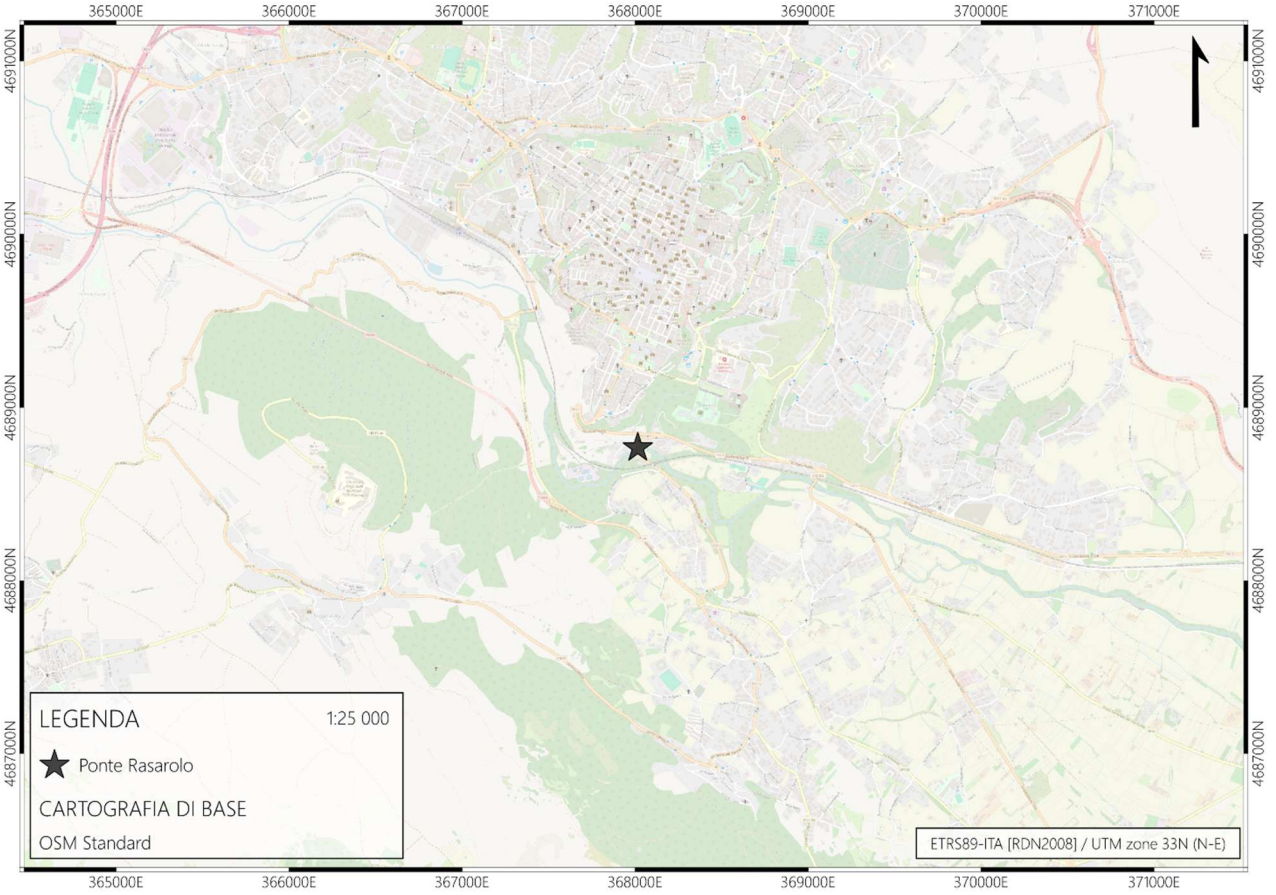



*Figura 1-1 – Inquadramento generale dell'area di studio*

# 2 RIFERIMENTI NORMATIVI

- DM 17 gennaio 2018: Aggiornamento delle 'Norme tecniche per le costruzioni' (nel seguito indicate come NTC18).
- Circolare 21 gennaio 2019 n. 7, Istruzioni per l'applicazione dello "Aggiornamento delle
- «Norme tecniche per le costruzioni»" di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018, supplemento ordinario n° 27 alla G. U. n° 42 del 20/2/2018 (nel seguito indicate come CNTC18).
- UNI EN 1997-1:2005 Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 1: Regole generali.
- UNI EN 1997-2:2007 Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 2: Indagini e prove nel sottosuolo.
- Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche. 1977 AGI – Associazione Geotecnica Italiana.
- Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica - Linee guida 2005 AGI – Associazione Geotecnica Italiana.

# 3 BIBLIOGRAFIA

APAT, Dipartimento della difesa del suolo

Bozzoni F., Cantoni A., De Marco M.C., Lai C.G. (2021). ECLiq: European interactive Catalogue of earthquake-induced soil Liquefaction phenomena. Bulletin of Earthquake Engineering.

Catalogo ISPRA – ITHACA: https://sgi.isprambiente.it/ithaca/viewer/;

Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2015" CPTI15-DBMI15;

Database of Individual Seismogenetic Sorces versione 3.2.1 (INGV) https://diss.ingv.it/mapper/;

DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA REGIONALE 29 APRILE 2019, N. 630 Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017);

Dott. Geol. Romano Rosoni. Relazione geologica e tecnica relativa ai lavori di risanamento e adeguamento funzionale del ponte Rasarolo lungo la SR 615 di Monteluco in L'Aquila (2012).

GEOPORTALE REGIONE ABRUZZO

Geotest S.r.l. – Studio di Microzonazione Sismica per il Comune di Gazzola

Gestione Parametri Sismici - Geostru - Geostru Geoapp (https://geoapp.eu/parametrisismici2018/);

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.

https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/geologia/geologia-emilia-romagna/geologia-dellappennino-emiliano-romagnolo

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia Gruppo di Lavoro MPS, 2004. "Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003";

Progetto DCP-INGV – S1; http://esse1-gis.mi.ingv.it;

SDMT-based Analysis of the Liquefaction Phenomena Induced by the April 6, 2009 Earthquake at Ponte Rasarolo, L'Aquila (Italy). P. Monaco, G. Totani e S. Amoroso"

Università degli Studi dell'Aquila – Progetto Microzonazione Sismica L'Aquila

# 4 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il Ponte Rasarolo collega attraverso la SR 615 l'abitato di Pianola e la Via Mausonia alla zona Sud ed Est dell'abitato di L'Aquila. Il ponte si sviuluppa per una lunghezza complessiva di circa 130 m e attraversa il Fiume Di seguito si riporta l'inquadramento cartografico dell'opera su base ortofoto e CTR.

| | **Quota** | **Sistema di coordinate UTM 33N (EPSG 6708)** | |
|---|---|---|---|
| | **m s.l.m.** | **Latitudine N** | **Longitudine E** |
| Ponte Rasarolo | 611 m s.l.m. | 4688769.58 | 368013.50 |

*Tabella 1 - Inquadramento geografico del sito d'indagine. Le coordinate fanno riferimento al baricentro dell'opera*




*Figura 4-1 – Sovrapposizione ortofoto 2009 Agea con ubicazione dell'opera. Coordinate del reticolo RDN/UTM 33 N*

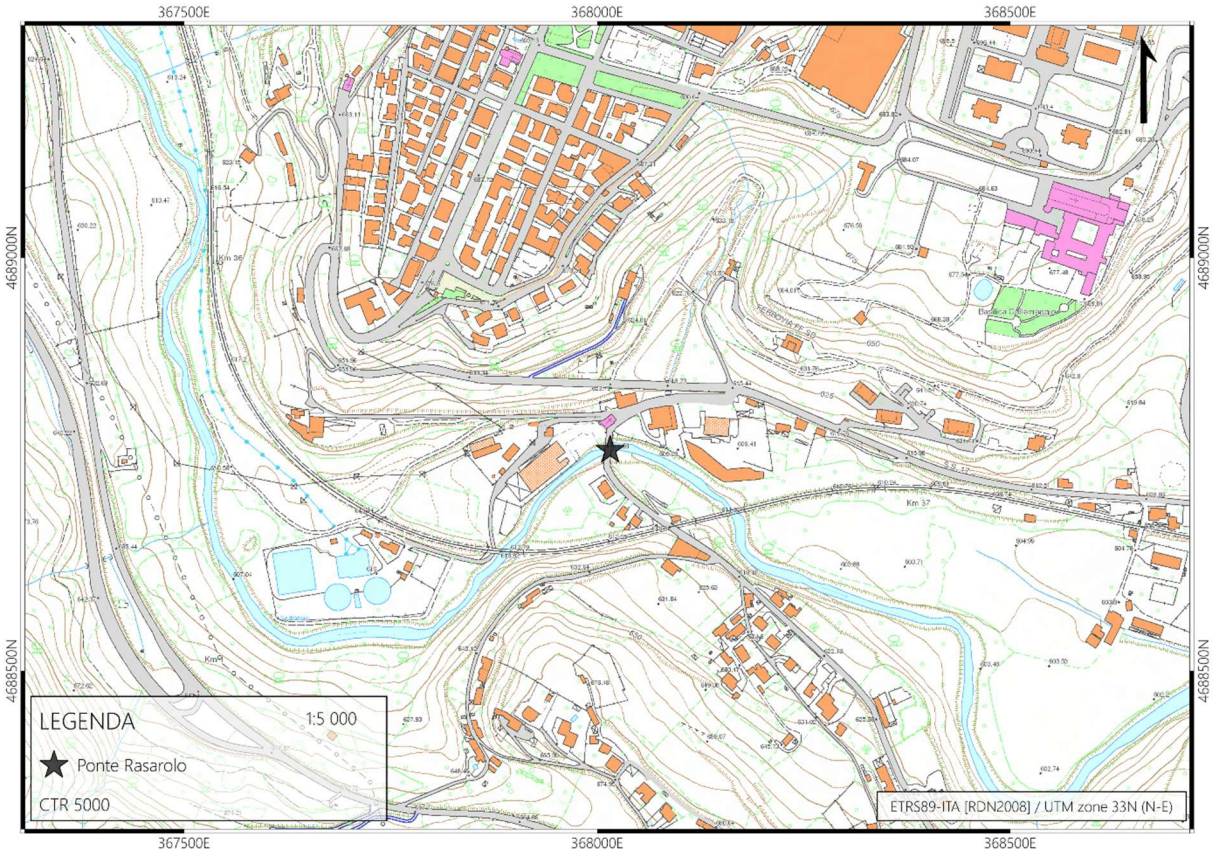



*Figura 4-2 – Inquadramento CTR 1:5000*

# 5 INQUADRAMENTO SISMICO

## 5.1 *INQUADRAMENTO STRUTTURALE E SISMICO*

Il territorio dell'Aquila si colloca nel settore assiale dell'Appennino centrale, all'interno di una complessa conca intramontana originatasi a partire dal Pliocene superiore a causa di una tettonica distensiva che ha generato ampie depressioni strutturali. Questo bacino, noto come conca aquilana, si estende longitudinalmente per oltre 40 chilometri con direzione NW-SE ed è delimitato da imponenti dorsali carbonatiche: a nord-est si trovano le unità del Gran Sasso d'Italia, mentre a sud-ovest il margine è definito dai Monti d'Ocre e dal Monte Sirente.
Dal punto di vista strutturale, l'area urbana si inserisce in un Graben asimmetrico il cui depocentro è condizionato dall'attività della faglia del Monte Pettino, una struttura sismogenetica che ribassa il substrato pre-quaternario di almeno 1000 metri verso la piana.

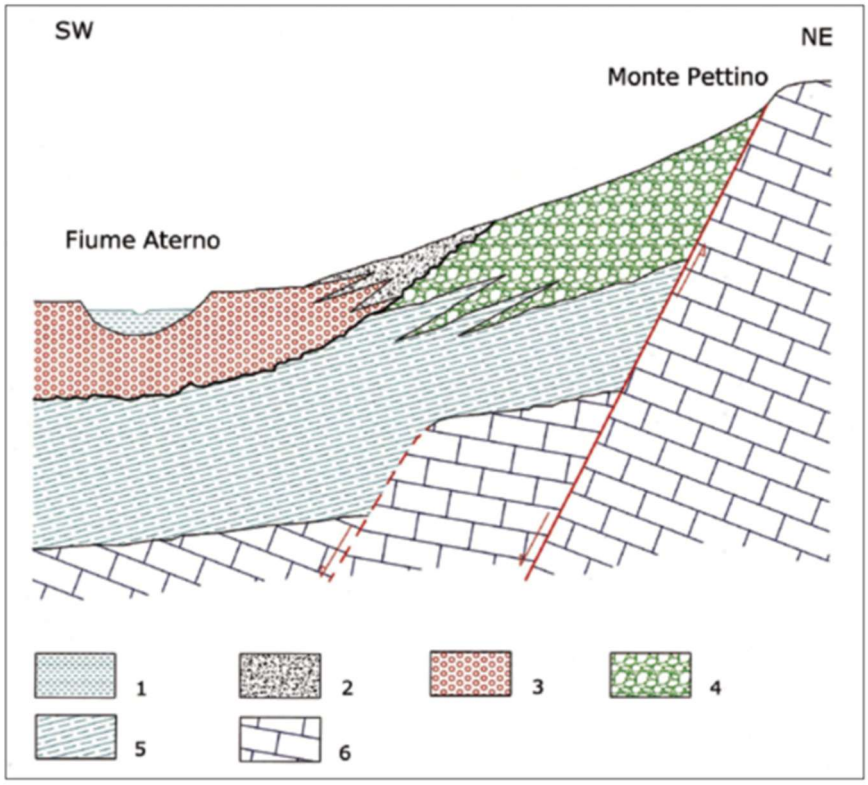



*Figura 5-1 – Schema dei rapporti stratigrafici 1- Alluvioni attuali dell'Aterno; 2- detriti delle conoidi del M. Pettino (Olocene – Pleistocene superiore); 3- Alluvioni terrazzate del Vetoio (Pleistocene medio-superiore); 4- Brecce dell'Aquila (Pleistocene medio); 5- Limi e sabbie fluvio-lacustre (Pleistocene inferiore); 6- substrato carbonatico meso-cenozoico.*

Il substrato pre-Quaternario affiora sporadicamente lungo i margini ed è costituito da unità meso-cenozoiche riconducibili a due domini paleogeografici principali: le successioni di scarpata e bacino dell'area del Gran Sasso e le successioni di piattaforma carbonatica dei Monti d'Ocre. Al di sopra di queste unità si rinvengono i depositi terrigeni sin-orogenici dell'avanfossa messiniana, rappresentati da arenarie torbiditiche e peliti che costituiscono il basamento immediato su cui poggiano i sedimenti quaternari in ampi settori della città. La caratterizzazione dei depositi quaternari rivela una storia sedimentaria articolata che inizia nel Pleistocene inferiore con una fase prevalentemente lacustre, testimoniata dai cosiddetti Limi di San Nicandro o unità di Pianola. Questi sedimenti sono formati da limi e argille sovraconsolidati di colore grigiastro, contenenti frammenti di lignite e caratterizzati da una polarità magnetica inversa che ne conferma l'età superiore a 0.78 milioni di anni.

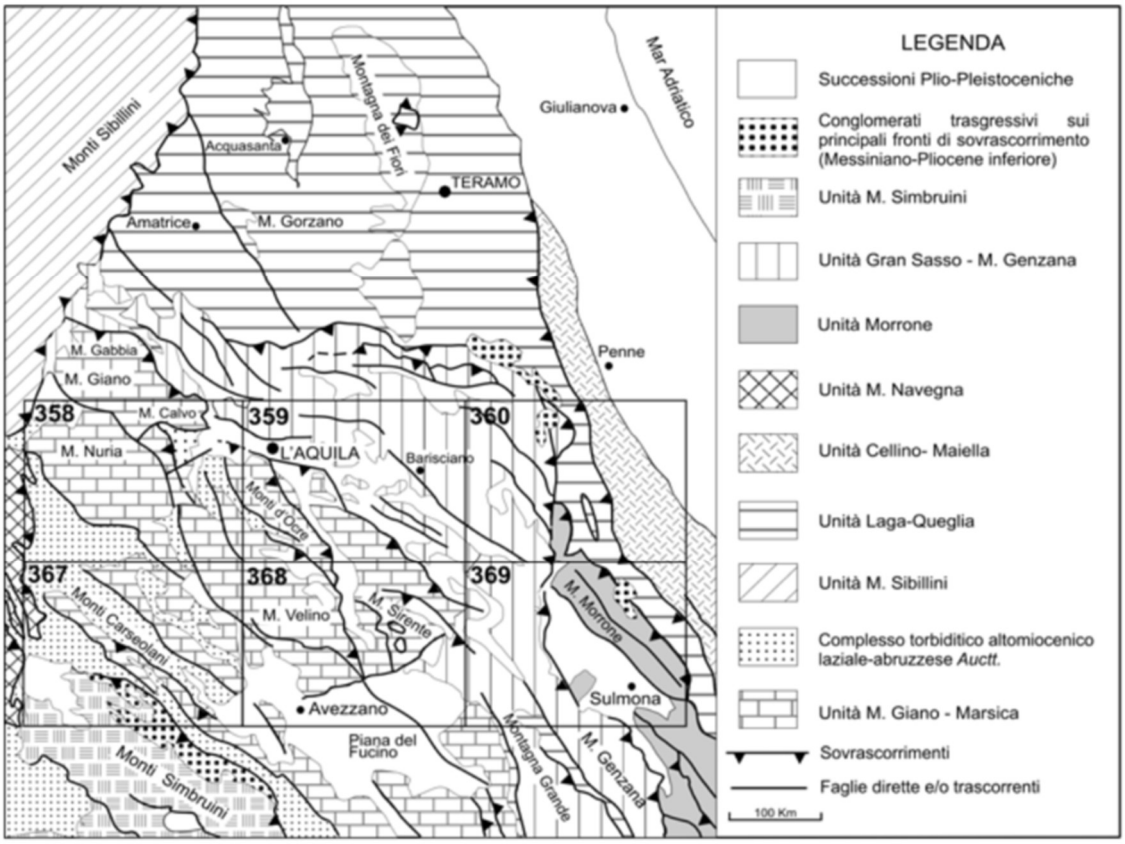



*Figura 5-2 – Schema delle Unità strutturali dell'Appennino Centrale (Accordi et alii, 1986)*

All'inizio del Pleistocene medio si osserva un netto cambio del regime sedimentario da lacustre a fluviale, legato all'erosione della soglia del bacino e all'instaurarsi di un paleo-bacino idrografico molto esteso. In questo periodo si colloca la messa in posto delle celebri Brecce dell'Aquila (o Megabrecce), che formano il corpo tabulare del colle su cui sorge il centro storico. Si tratta di ammassi caotici di brecce calcaree cementate, con spessori fino a 50 metri, originatisi da grandi colate di detrito (debris-flow) provenienti dai rilievi del Gran Sasso a nord in particolari condizioni morfotettoniche e climatiche. Queste brecce mostrano un'elevata variabilità latero-verticale: sono massive e cementate nei settori settentrionali, mentre verso sud tendono a interdigitarsi con i limi lacustri, come evidenziato dalla presenza di storiche sorgenti lungo il loro limite di contatto.

L'evoluzione successiva, tra il Pleistocene medio-superiore e l'Olocene, è segnata dall'attività della faglia del Monte Pettino, che ha guidato la formazione di alluvioni terrazzate, come quelle del Fosso Vetoio, e lo sviluppo di ampie conoidi alluvionali pedemontane. Sulla sommità del Colle dell'Aquila sono presenti i Limi rossi, depositi eluvio-colluviali derivanti dall'alterazione delle brecce sottostanti in condizioni di paleosuolo, con spessori che possono raggiungere i 20 metri. Infine, i depositi olocenici più recenti comprendono le alluvioni attuali del fiume Aterno e del torrente Raio, costituite da alternanze di ghiaie, sabbie e limi, oltre a diffuse coltri di detrito di falda e riporti antropici che modificano la morfologia superficiale del tessuto urbano.

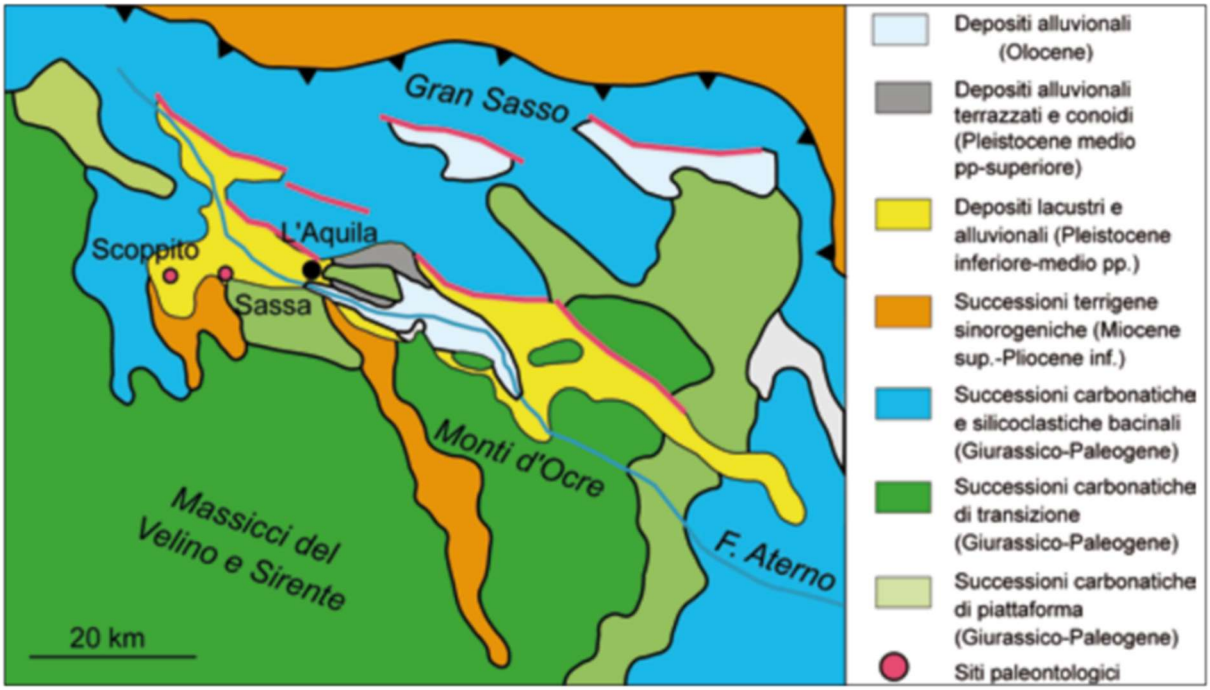



*Figura 5-3 – Schema geologico del bacino del L'Aquila*

L'area aquilana si colloca nel settore assiale dell'Appennino centrale, strutturatasi come un edificio a thrust su crosta continentale del blocco adriatico. L'attuale assetto sismotettonico è dominato da un regime distensivo attivo dal Pliocene superiore che ha generato una serie di bacini intramontani, come quello aquilano, delimitati da imponenti scarpate di faglia. La distensione crostale avviene con direzione NE-SW ed è valutata in circa 3 mm/anno, venendo accomodata principalmente da sistemi di faglie normali o oblique con direzione appenninica (NW-SE) e immersione verso i quadranti sud-occidentali.

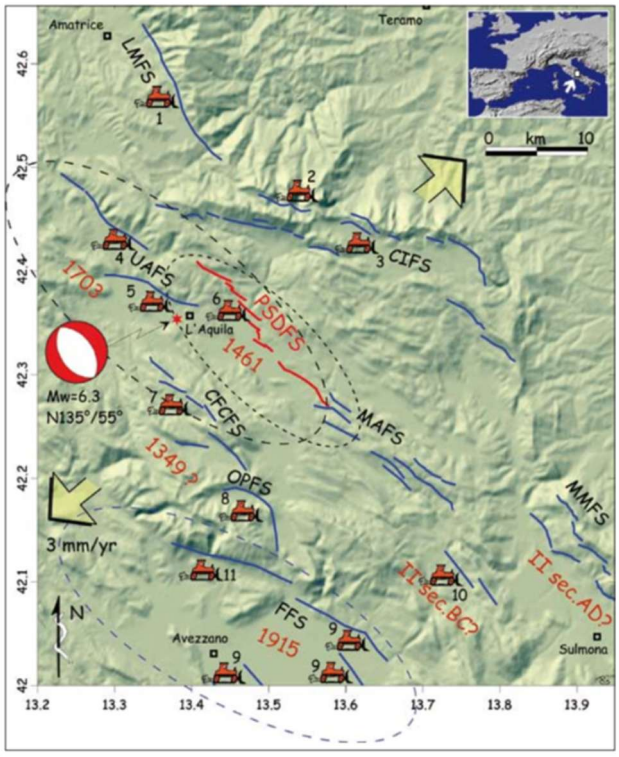



*Figura 5-4 – Schema delle faglie attive primarie dell'Appennino aquilano. Le faglie sono tutte a cinematica prevalente normale ed immergono a SW*

Il paesaggio tettonico è caratterizzato da tre principali allineamenti di faglie dirette attive e sismogenetiche. L'allineamento intermedio comprende le strutture di Pizzoli, del Monte Pettino e il sistema Paganica-San Demetrio. La faglia del Monte Pettino funge da "master fault" del graben asimmetrico della piana dell'Aquila Ovest, ribassando il substrato meso-cenozoico di oltre 1000 metri e condizionando pesantemente la sedimentazione quaternaria. Ad essa si associano faglie antitetiche lungo il bordo meridionale della piana, come quella di Campo di Pile, che contribuiscono alla complessità strutturale del settore urbano.
La sismicità della valle dell'Aterno è tra le più vivaci della penisola, con una storia documentata nell'ultimo millennio da numerosi eventi distruttivi. Il catalogo storico evidenzia terremoti di elevata energia come quelli del 1349, 1461, 1703, 1762 e 1958. In particolare, il terremoto del 1461 è considerato un "gemello" dell'evento del 2009, essendo stati entrambi generati dalla riattivazione della stessa sorgente sismogenetica: il sistema di faglie Paganica-San Demetrio. L'evento del 1703, caratterizzato da una magnitudo momento (Mw) superiore di 6.7, è invece attribuito all'attivazione del sistema dell'alta valle dell'Aterno, che include le faglie di Monte Marine e Monte Pettino.
Le indagini sismotettoniche più recenti hanno identificato il sistema Paganica-San Demetrio come una struttura complessa lunga circa 15-20 chilometri, composta da diversi segmenti in rapporto en-échelon. Durante il sisma del 2009, questa struttura ha prodotto rotture di superficie per circa 13-19 chilometri con rigetti centimetrici. Un elemento di forte preoccupazione per la pericolosità regionale rimane l'esistenza di sistemi di faglie storicamente "silenti", come quelli dei Monti della Laga, di Campo Imperatore e del Monte Morrone, che sono potenzialmente in grado di generare terremoti di energia sensibilmente superiore a quella dell'evento del 6 aprile 2009

### 5.1.1 *IL TERREMOTO DELL'AQUILA 2009*

Il terremoto del 6 aprile 2009 rappresenta la prima catastrofe sismica dal 1908 ad aver colpito direttamente una città capoluogo densamente abitata, devastando il centro storico dell'Aquila e numerosi paesi della valle dell'Aterno alle ore 3:32 locali.

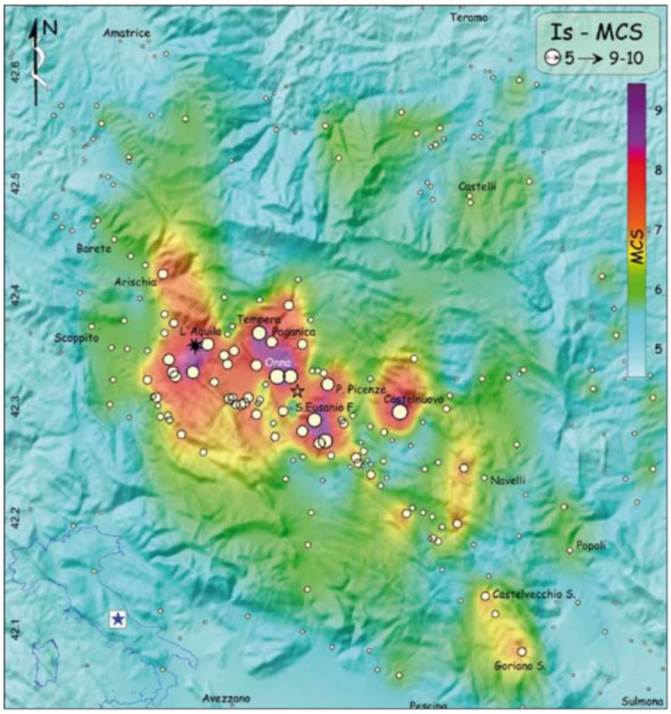



*Figura 5-5 – Distribuzione dei punti di intensità MCS valutati in Galli et al. (2009). La stella nera è l'ipocentro strumentale, quella vuota l'epicentro macrosismico. A colori la distribuzione areale delle intensità calcolata mediante l'interpolazione dei dati analitici*

L'evento principale ha raggiunto una magnitudo locale Ml di 5.8 e una magnitudo momento Mw di 6.3. La scossa è stata il culmine di una sequenza sismica iniziata a dicembre 2008, con eventi precedenti molto avvertiti la sera del 5 aprile che indussero parte della popolazione a dormire fuori dalle abitazioni, limitando potenzialmente il numero delle vittime. Il bilancio finale è stato di 308 vittime, concentrate soprattutto all'Aquila, a Onna e a Villa Sant'Angelo. La sorgente sismica è stata identificata nella riattivazione del sistema di faglie Paganica-San Demetrio, una struttura normale con direzione appenninica che si è estesa in profondità per circa 20 chilometri.

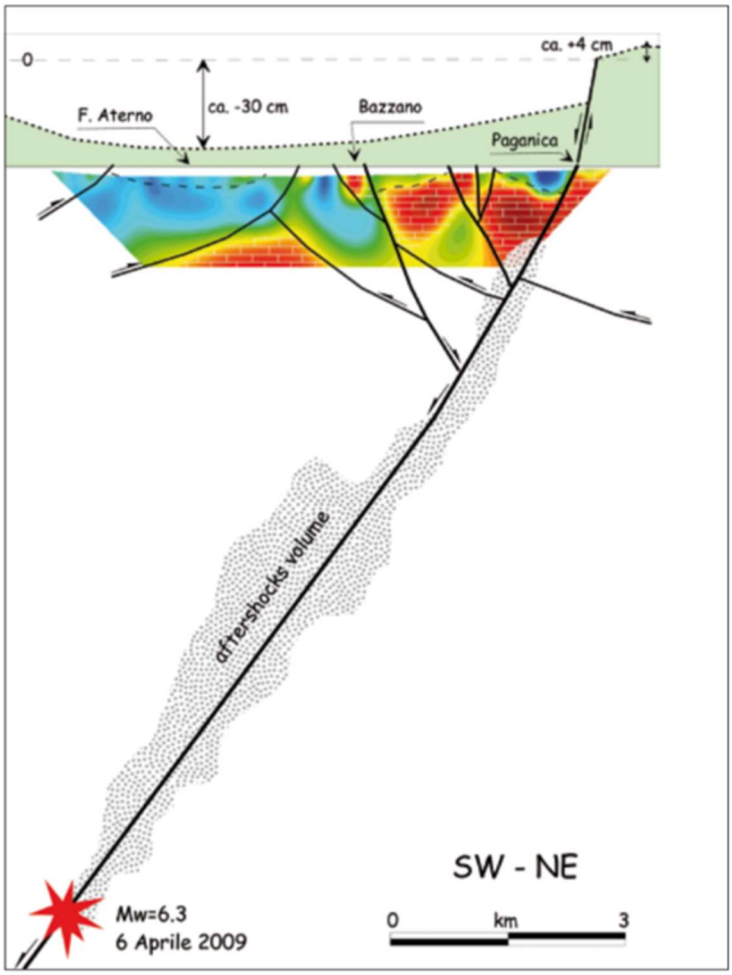



*Figura 5-6 – Sezione sismo-geologica interpretativa normale alla faglia di Paganica*

La rottura si è originata a circa 9 chilometri di profondità su un piano inclinato di 55° verso sud-ovest, con uno slip massimo di circa 1 metro localizzato sotto la conca aquilana. La fagliazione ha prodotto rotture di superficie per una lunghezza di 19 chilometri, attraversando terreni e manufatti antropici (Figura 5-6). I rilievi geodetici hanno documentato una deformazione permanente del suolo con un abbassamento massimo di circa 30 centimetri tra L'Aquila e Fossa e un sollevamento di 4 centimetri a nord-est della faglia di Paganica. Durante il mainshock è stato osservato un forte effetto di direttività verso sud-est, che ha contribuito alla distribuzione asimmetrica dei danni più gravi in quella direzione. Centri come Onna e Castelnuovo hanno riportato le distruzioni maggiori, con intensità macrosismiche stimate tra il IX e il X grado della scala MCS (Figura 5-5). La variabilità del danno tra centri abitati vicini è stata determinata non solo dalla qualità delle costruzioni, ma anche da significativi effetti di amplificazione locale legati alla litostratigrafia e alla geomorfologia del territorio. Per supportare la ricostruzione in sicurezza, le autorità hanno promosso uno studio di microzonazione sismica di elevata qualità che ha coinvolto circa 150 ricercatori. Tale attività ha permesso di caratterizzare il suolo e identificare le zone stabili, quelle suscettibili di amplificazione e quelle soggette a instabilità come frane o crolli

di cavità antropiche. Le analisi di terzo livello hanno infine fornito parametri numerici quantitativi fondamentali per una corretta pianificazione territoriale e per la progettazione antisismica nelle aree colpite.

Nei paragrafi successivi viene presentata una raccolta di informazioni geologico-strutturali e sismiche contenute all'interno di database nazionali resi disponibili tramite i seguenti portali ed articoli, creati da Enti quali l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA):

- Catalogo Parametrico dei terremoti italiani dell'INGV;
- Catalogo Italy Hazards From Capable Faults di ISPRA;
- Database of Individual Seismogenic Sources dell'INGV a cura di DISS Working Group (2021);
- Zonazione sismogenetica ZS9 dell'INGV a cura di Meletti et al. (2004).

## 5.2 *DATABASE MACROSISMICO ITALIANO DBMI15 V4.0*

Per valutare la sismicità storica dell'area è stato consultato il Database Macrosismico Italiano 2015 (DBMI15), il quale viene utilizzato per compilare il Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI). Il DBMI15 fornisce un set omogeneo d'intensità macrosismiche provenienti da diverse fonti relativo ai terremoti con intensità massima ≥ 5 e d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2014.

Per l'area dell'Aquila (AQ) vengono riportati numerosi eventi sismici per un totale di 140 sismi di riferimento dal 1315 al 2017 (Figura 5-7). Di seguito si riporta l'ultimo evento, per importanza, relativo al sisma del 2009 di magnitudo momento Mw=6.29.

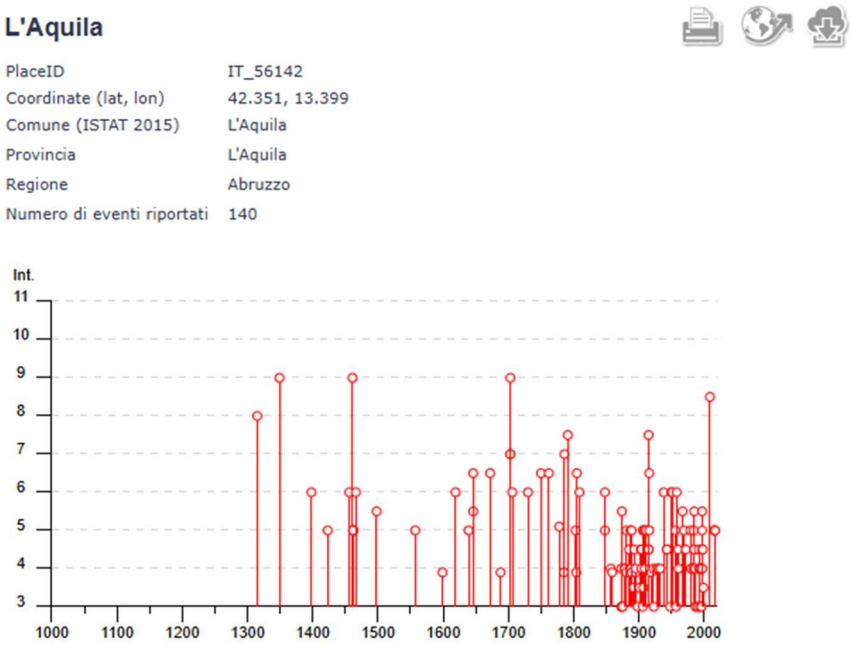



*Figura 5-7 – Eventi riportati nel Database Macrosismico Italiano per il Comune dell'Aquila*

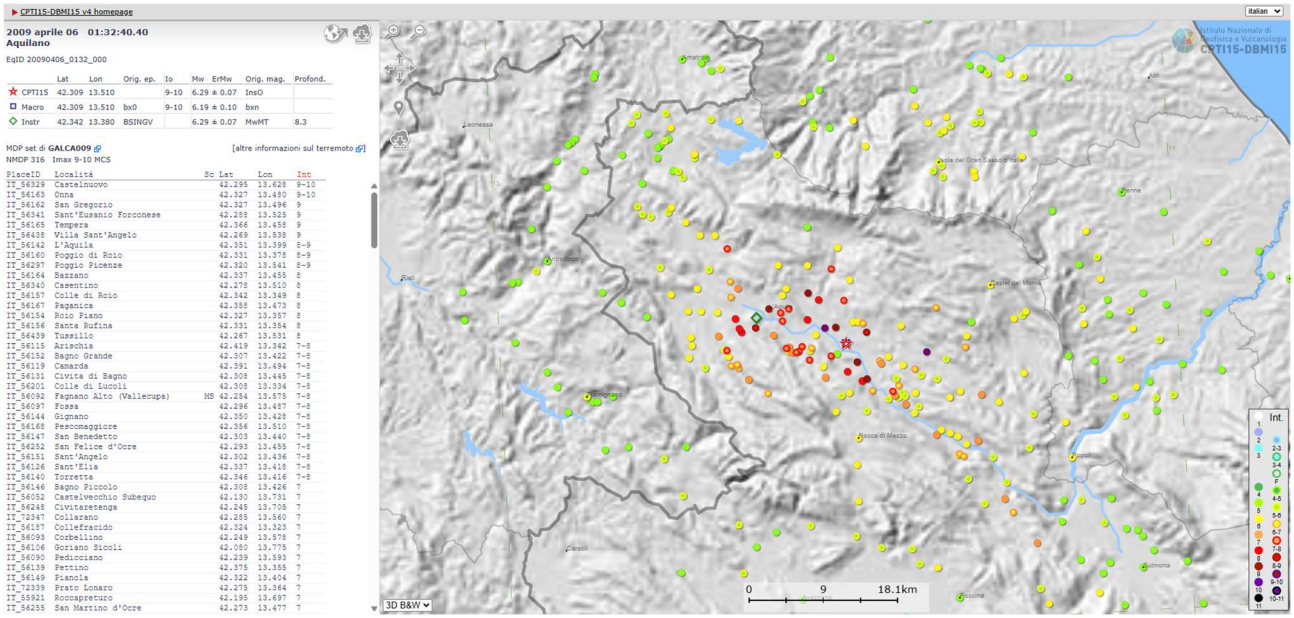



*Figura 5-8 – Terremoto Aquilano del 6 Aprile 2009*

## 5.3 *ZONAZIONE SISMOGENETICA ZS9*

Secondo la zonazione sismogenetica del territorio italiano (ZS9), utilizzata per compilare la mappa della pericolosità sismica in riferimento all' OPCM 3519/2006, il territorio nazionale è suddiviso in 36 zone-sorgente individuate mediante l'osservazione delle caratteristiche della sismicità storica/attuale (massima magnitudo, frequenza degli eventi in catalogo, distribuzione nelle classi di magnitudo) e dallo studio delle geometrie delle sorgenti sismotettoniche.

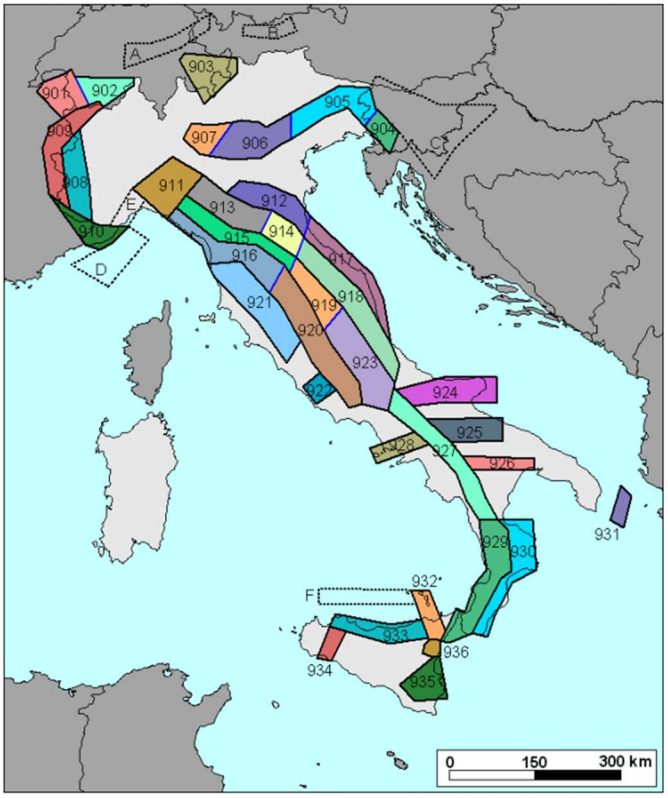



*Figura 5-9 – Zonazione sismica ZS9*

Le aree sorgenti sono separate da limiti di colore diverso: limiti di colore nero separano aree con differenti caratteristiche tettoniche o geologico strutturali, mentre i limiti di colore blu dividono zone con uno stesso stile deformativo, ma con differenti caratteristiche di sismicità (quali: distribuzione spaziale, frequenza degli eventi, massima magnitudo rilasciata, etc.).

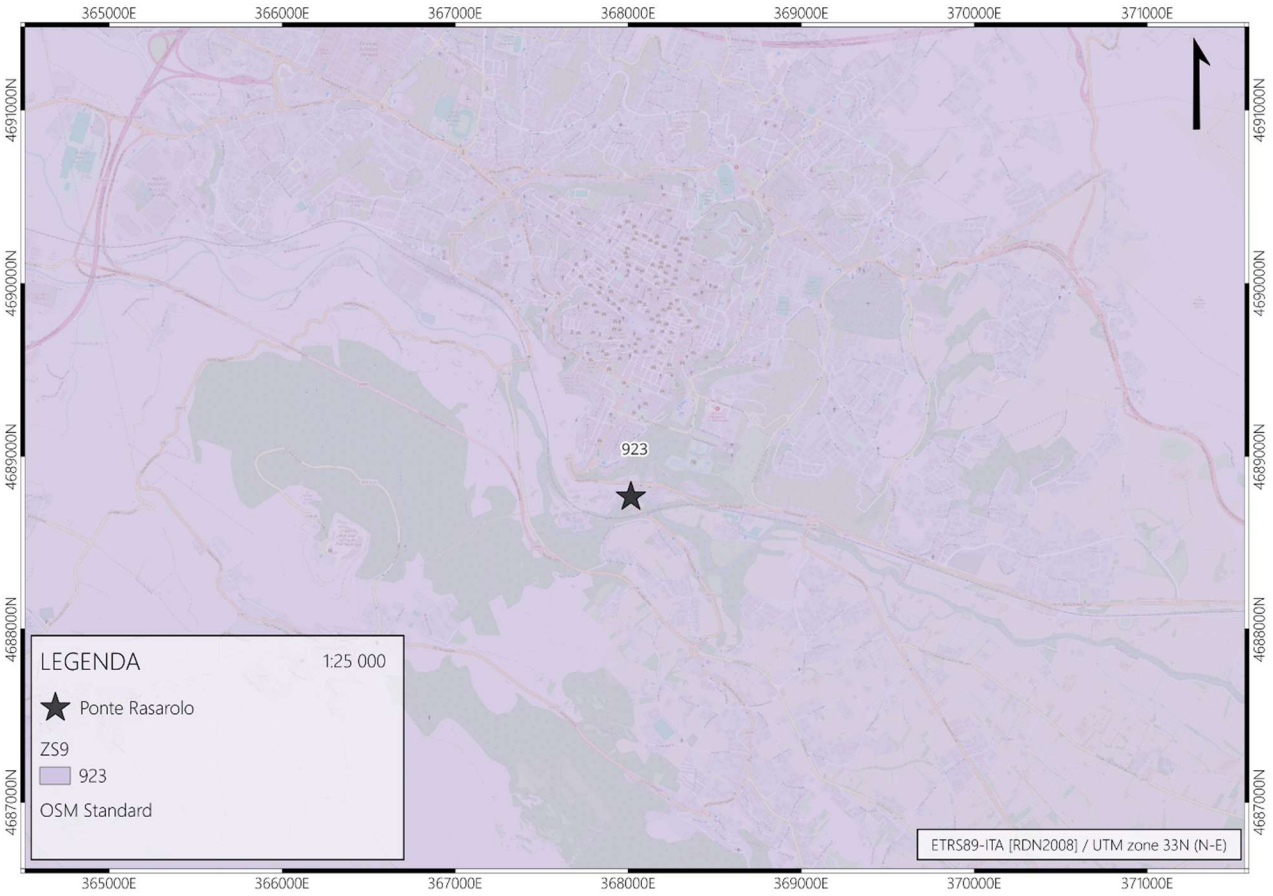


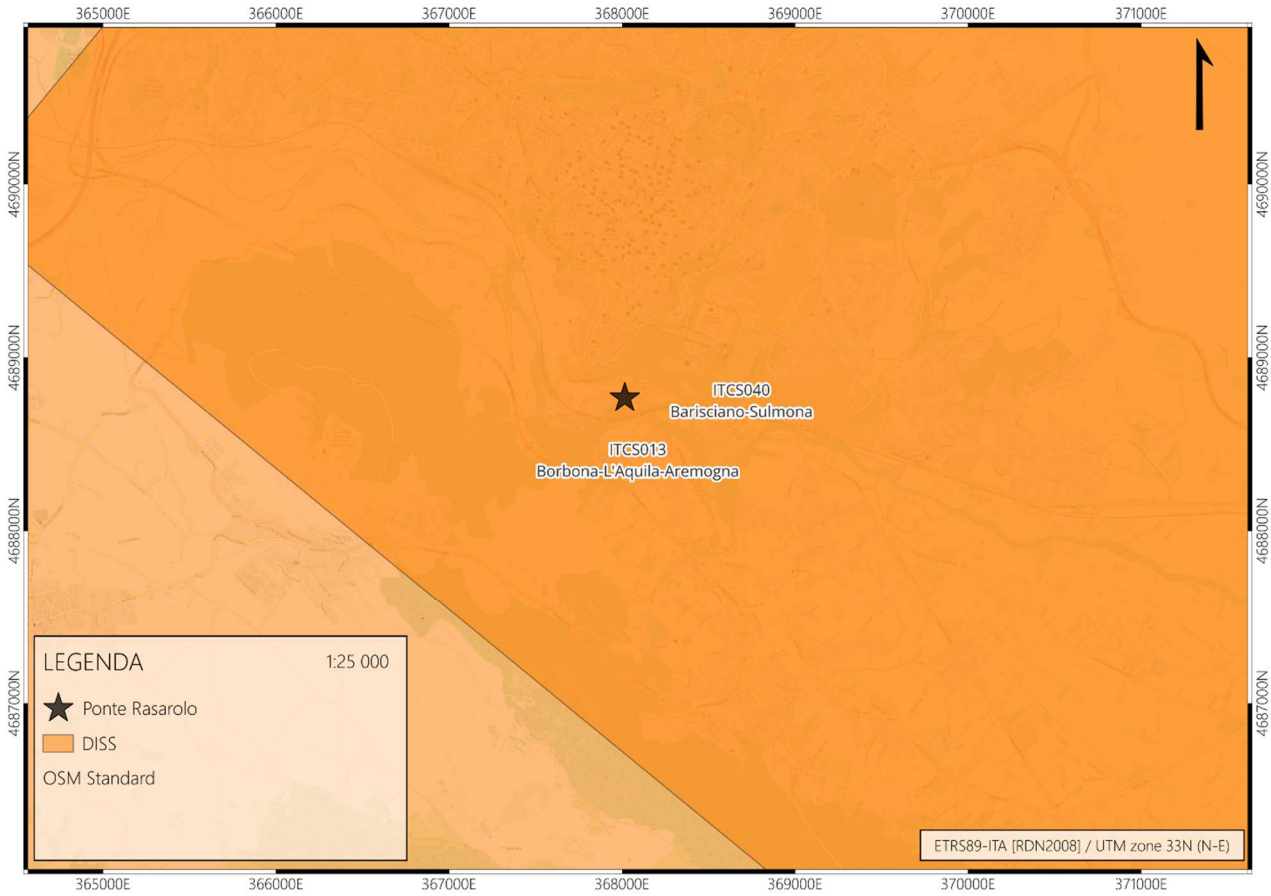

*Figura 5-10 – Inquadramento ZS9 per l'area di studio*

La zona oggetto di intervento ricade all'interno della zona sismogenetica 923-Appennino Abruzzese (Figura 5-10). Per questa zona sismogenetica la profondità dello strato sismogenetico indicata è a circa 9 km, il meccanismo di fagliazione prevalente è di tipo normale. La valutazione della magnitudo massima (Mwmax) per la zona 923 fornisce un valore Mw= 7.06.

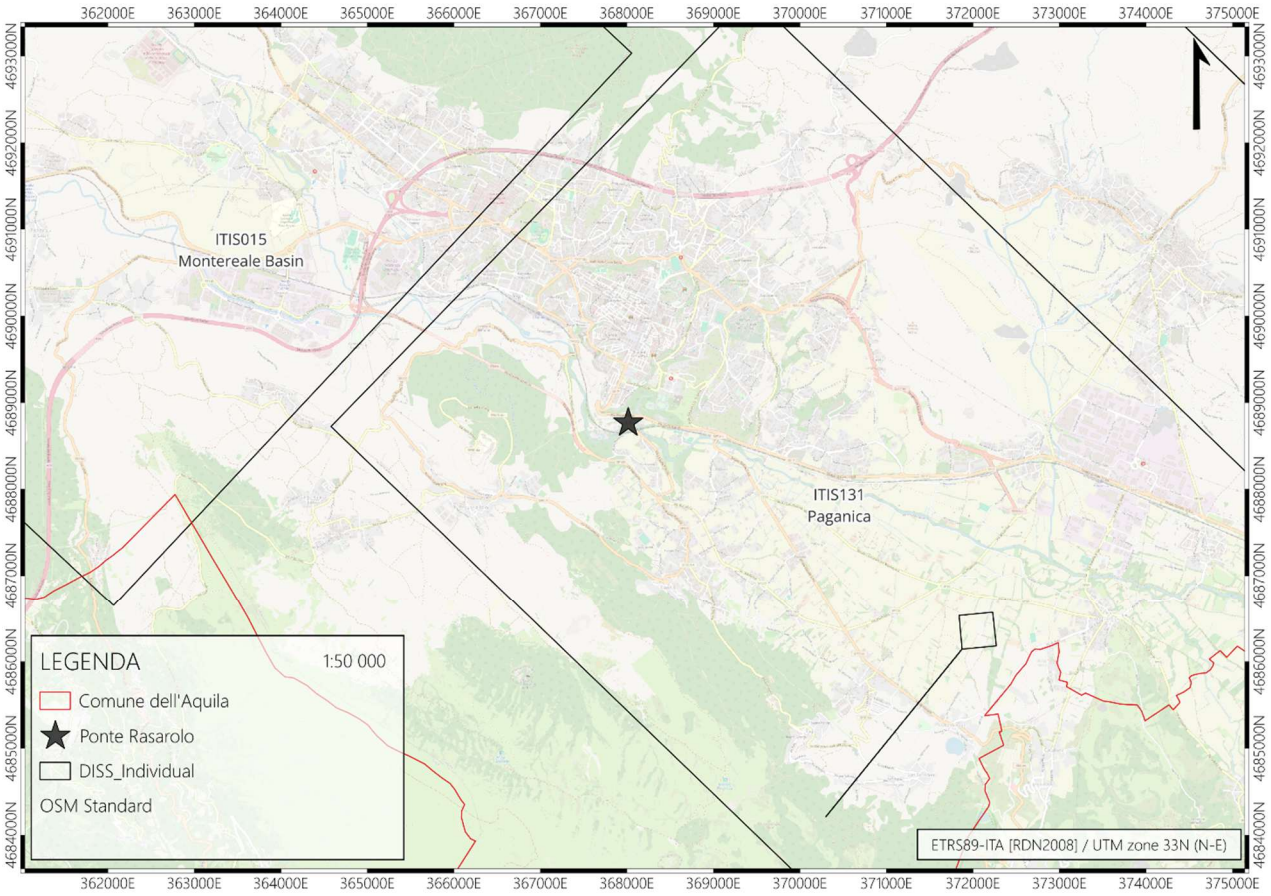
## 5.4 *SORGENTI SISMOGENETICHE E FAGLIE CAPACI*

### 5.4.1 *DISS*

Per quanto concerne l'individuazione delle sorgenti sismogeniche, dalla consultazione del DISS (Database of Individual Seismogenic Sources) risulta che l'area in esame non è posta tra due sorgenti sismogenetiche, la sorgente ITCS040 Barisciano-Sulmona e la sorgente ITCS013 Borbona-L'Aquila-Aremogna.




| fid | idsource | sourcename | mindepth | maxdepth | strikemin | strikemax | dipmin | dipmax | rakemin | rakemax | srmin | srmax | maxmag |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 83 | ITCS013 | Borbona-L'Aquila-Aremogna | 2 | 14 | 130 | 150 | 40 | 60 | 260 | 280 | 0.1 | 1 | 6.5 |
| 104 | ITCS040 | Barisciano-Sulmona | 1 | 14 | 120 | 140 | 40 | 65 | 260 | 280 | 0.1 | 1 | 6.4 |




| fid | idsource | sourcename | length | width | mindepth | maxdepth | strike | dip | rake | avgdispl | srmin | srmax | recintmin | recintmax | latesteq | maxmag |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 119 | ITIS131 | Paganica | 14 | 9.5 | 3 | 9.5 | 133 | 43 | 275 | 0.6 | 0.2 | 0.5 | 1200 | 3000 | 06 Apr 2009 | 6.3 |

*Figura 5-11 – Estratto della mappa del DISS (da DISS Working Group, 2010 - http://diss.rm.ingv.it/dissmap)*

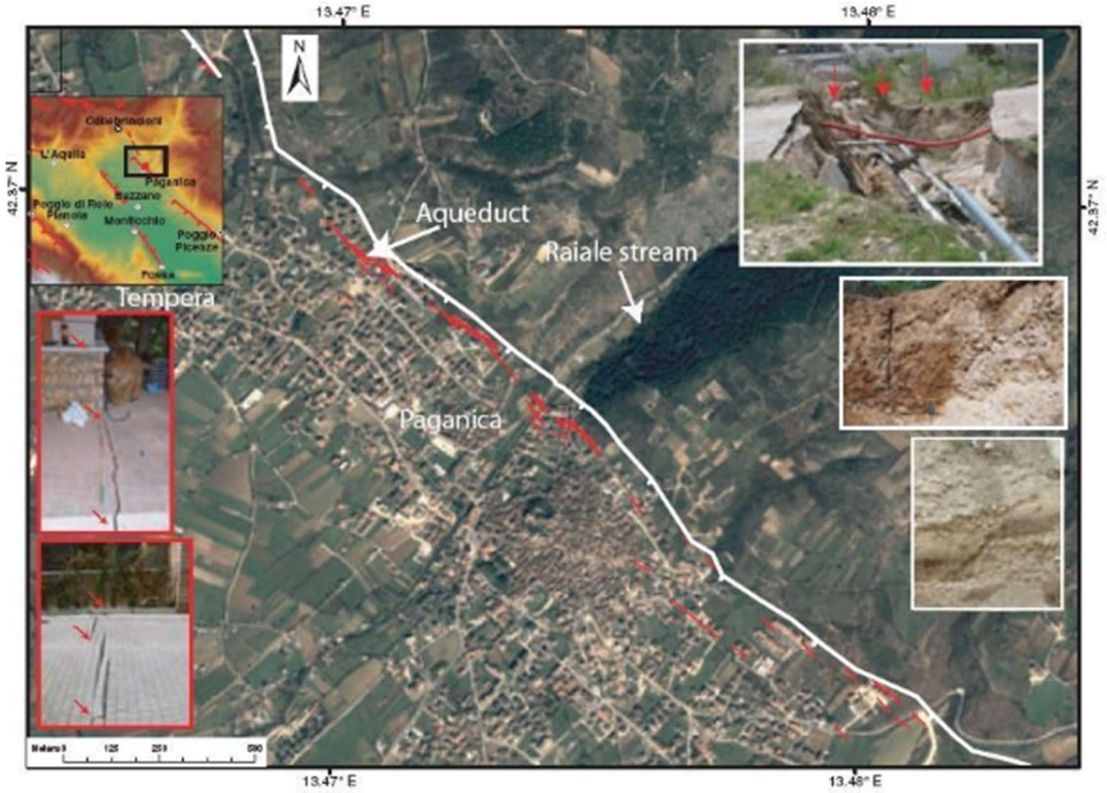



*Figura 5-12 – Dettaglio della superficie di faglia di Paganica*

### 5.4.2 *ITHACA*

La stima della pericolosità legata ai terremoti ed alla fagliazione superficiale è un tema molto importante, specialmente in aree densamente popolate ed industrializzate come il territorio italiano. Di conseguenza la conoscenza approfondita e la corretta collocazione delle faglie capaci assume un ruolo chiave per la mitigazione del rischio. A questo scopo, il Servizio Geologico d'Italia - ISPRA ha sviluppato il progetto ITHACA (ITaly HAzard from CApable faults), un database creato per la raccolta e la facile consultazione di tutte le informazioni disponibili riguardo le strutture tettoniche attive in Italia, con particolare attenzione ai processi tettonici che potrebbero generare rischi naturali.

Una faglia è definita capace quando ritenuta in grado di produrre, entro un intervallo di tempo di interesse per la società, una deformazione/dislocazione della superficie del terreno, e/o in prossimità di essa. La deformazione attesa può essere sia una dislocazione ben definita lungo un piano di rottura (fault displacement/offset) che una deformazione distribuita (warping).

*Il catalogo è in continuo aggiornamento e non può considerarsi completo o definitivo, non rappresenta la totalità delle faglie capaci presenti sul territorio nazionale, ma solo quelle per le quali esiste uno studio e quindi un riferimento bibliografico; il dettaglio è funzione della qualità delle indagini che sono state effettuate e della scala alla quale è stato pubblicato il dato.*

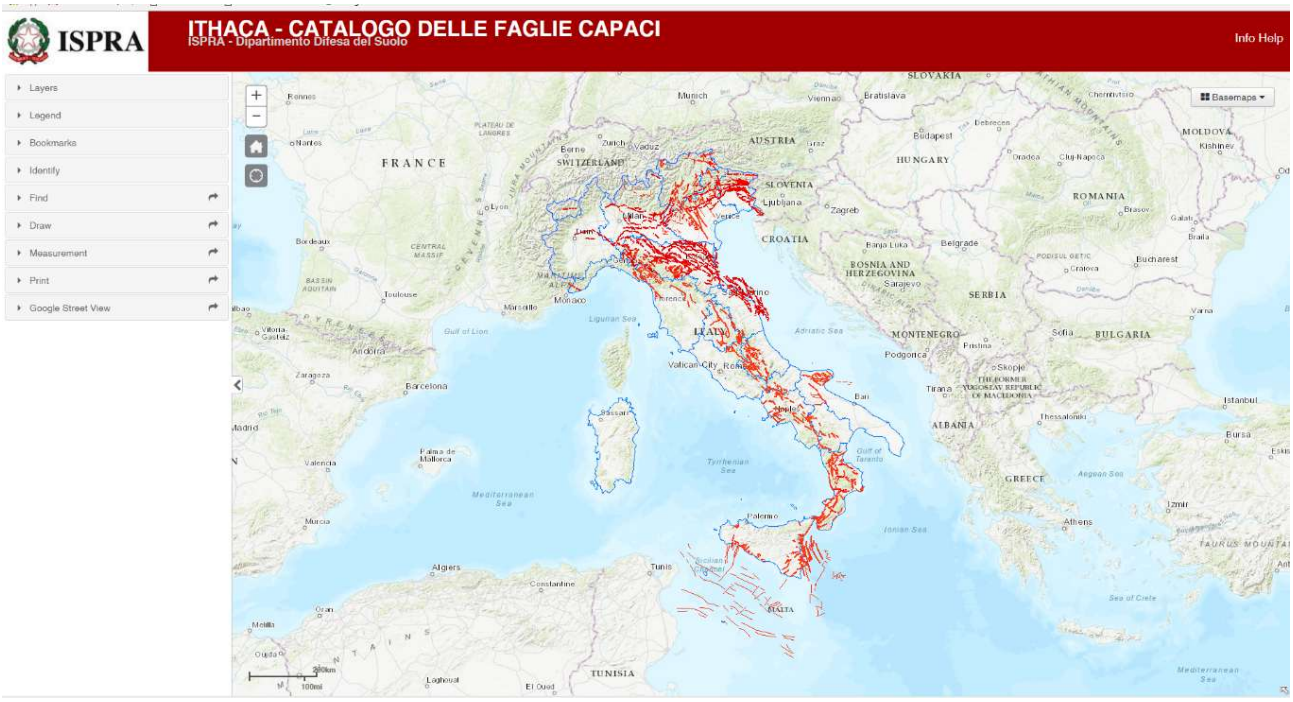



*Figura 5-13 – Inquadramento nazionale ITHACA catalogo delle faglie capaci*

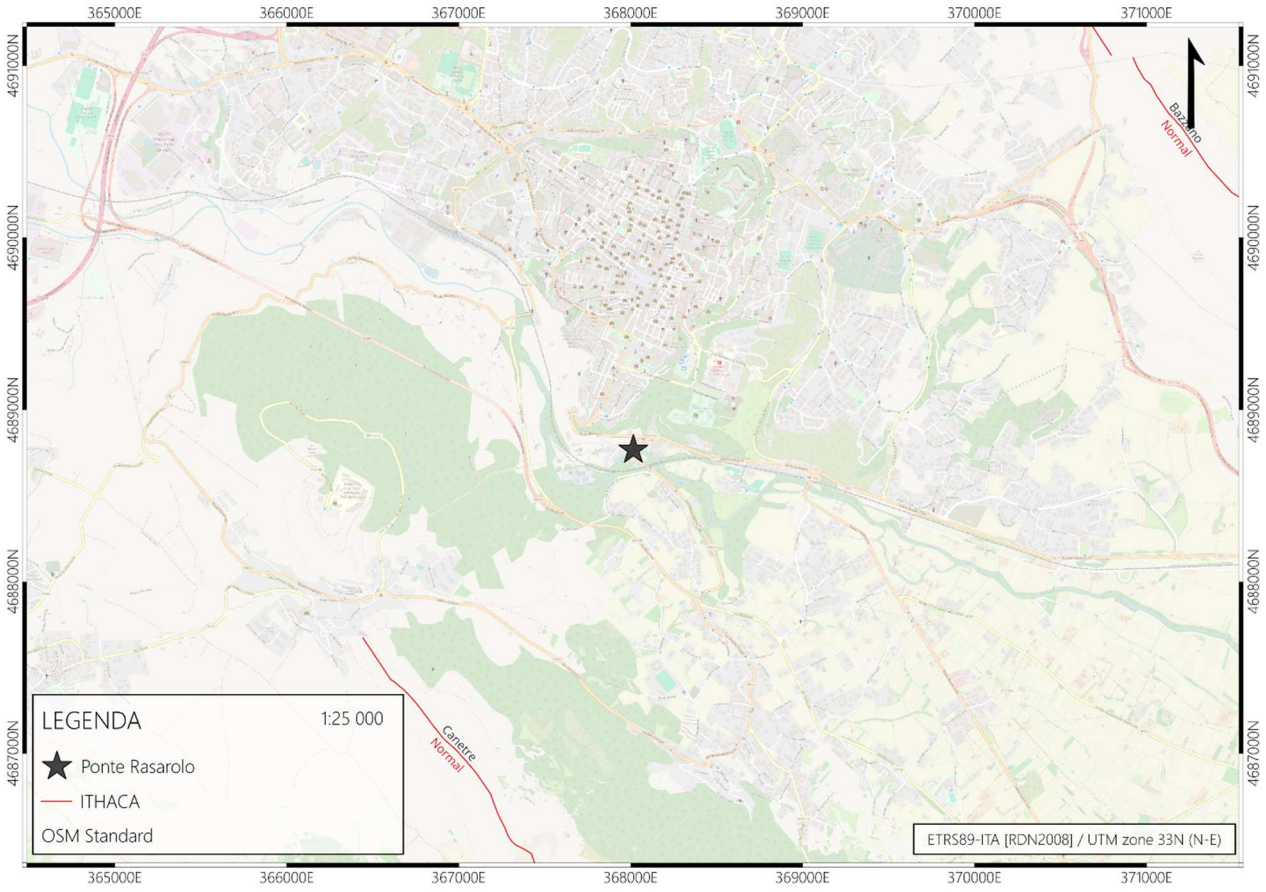



*Figura 5-14 – Estratto dal catologo ITHACA delle Faglie Capaci*

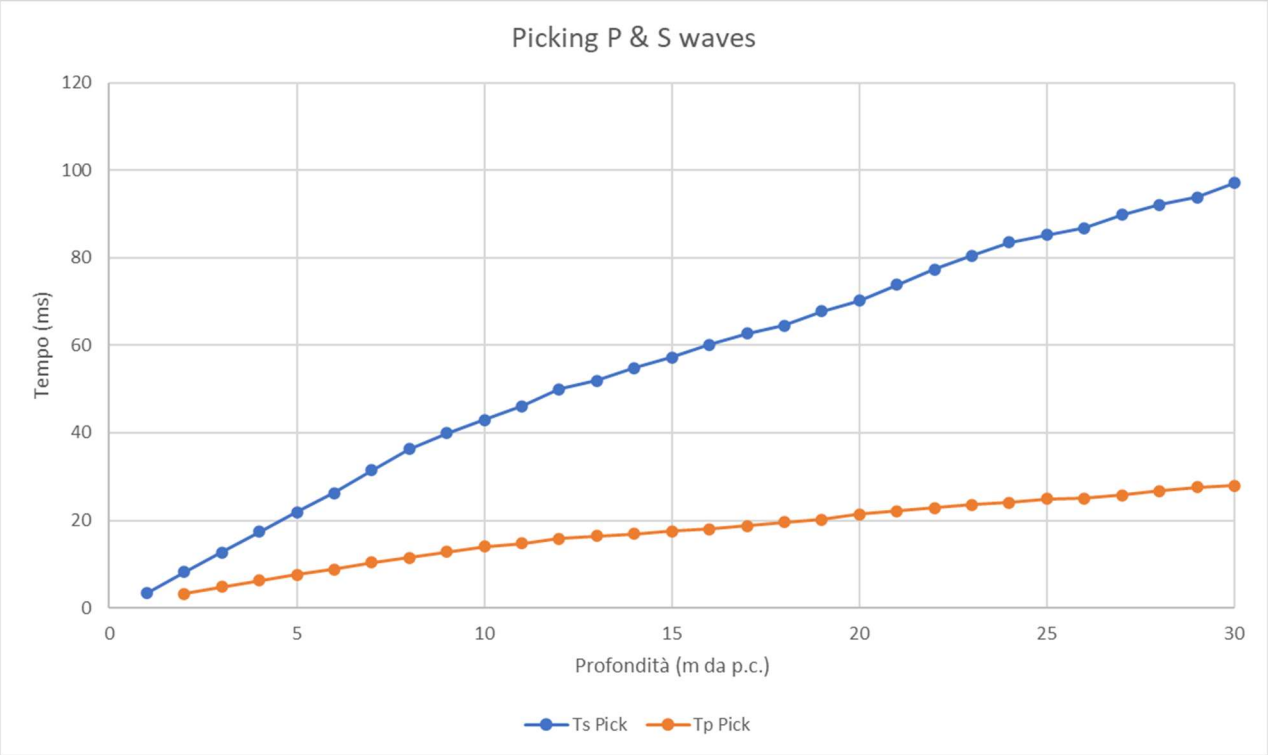
Il sito oggetto di studio, come evidenziato dalle cartografie di seguito riportate, non è interessato direttamente dal passaggio di lineamenti tettonici attivi.

# 6 INDAGINI SISMICHE

Nel seguente paragrafo vengono riassunti i risultati relativi alle indagini eseguite nell'ambito dei "*Lavori di risanamento e adeguamento funzionale del Ponte Rasarolo lungo la SR 615 di Monteluco in L'Aquila*" è stato condotto uno studio geologico, a firma del Dott. Geol. Romano Rosoni risalente all'Agosto del 2012, che dal punto di vista sismico ha previsto l'esecuzione sul terreno di un'indagine sismica downhole. Inoltre, vengono riportati i dati salienti dello studio di Microzonazione Sismica per il Comune dell'Aquila.

## 6.1 *INDAGINE SISMICA DOWNHOLE*

La prova è stata eseguita mediante l'utilizzo di un sismografo Ambrogeo ECHO 24/2002 Seismic Unit a 24 canali. Al sismografo è stato connesso un geogono tridimensionale da foro con frequenza propria pari a 10 Hz. Le energizzazioni al suolo sono state eseguite mediante energizzazioni eseguite mediante mazza battente su piastra verticale (onde P) e su traversiona di legno (onde S).
L'indagine down-hole è stata eseguita all'interno del foro di sondaggio S2, opportunamente predisposto per l'esecuzione della prova.
L'indagine DH ha permesso di ottenere il profilo di Vs e di Vp fino a 30 m dal p.c. e di stimare i parametri meccanici degli strati:



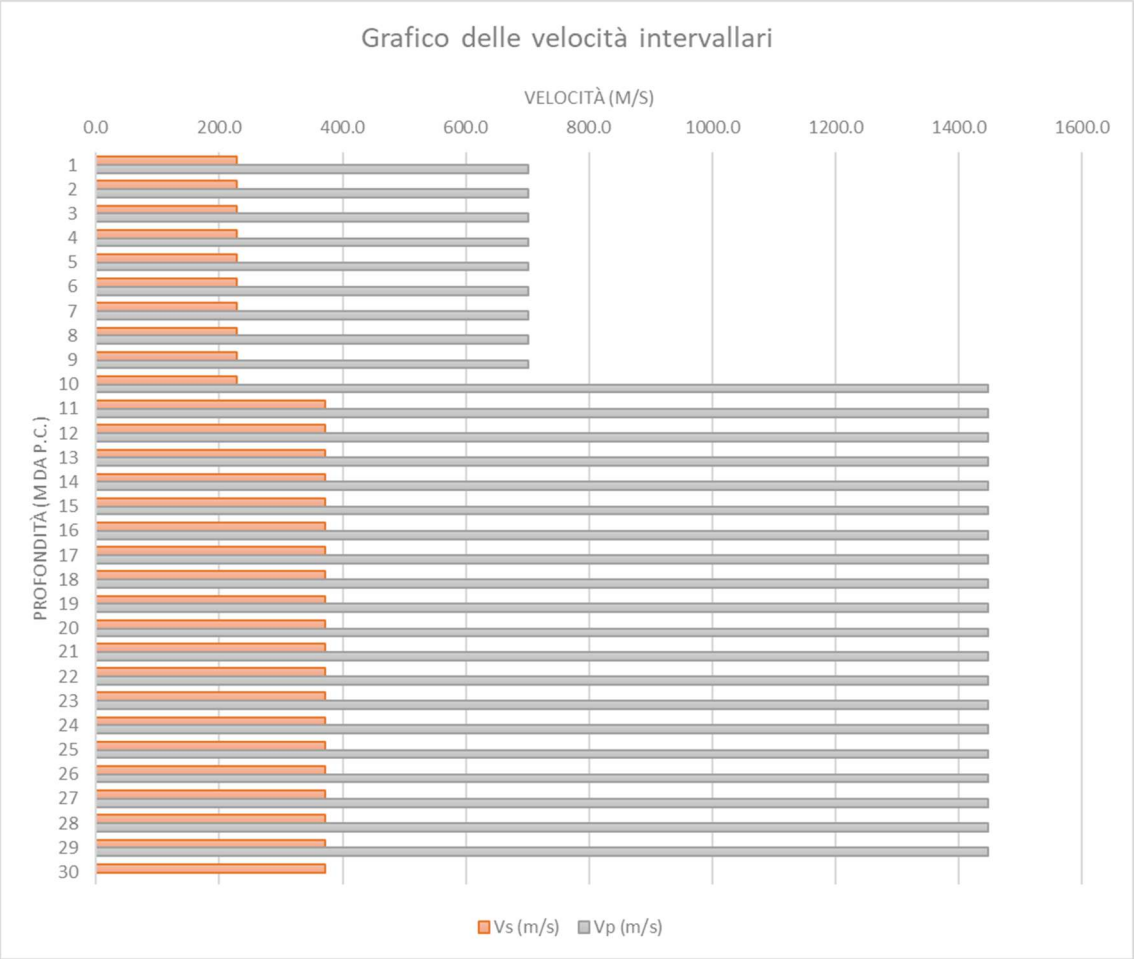



*Figura 6-1 – Picking dei primi arrivi Vp e Vs e velocità intervallari Vp e Vs e. Grafici ottenuti dalle informazioni presenti all'interno della realzione delle indagini*

La prova ha permesso di determinare il valore del parametro $VS_{30}$ calcolato a partire dalla quota del piano campagna. Il valore ottenuto è pari a 306.8 m/s permettendo di classificare i terreni secondo la categoria C delle NTC2018.

## 6.2 *MICROZONAZIONE SISMICA*

Lo studio di microzonazione sismica del Comune dell'Aquila approfondisce l'analisi del rumore strumentale attraverso le tecniche dei rapporti spettrali HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral ratio) e SSR (Standard Spectral ratio) applicate alla Macroarea 1. Per queste indagini sono state impiegate stazioni equipaggiate con acquisitori ad alta risoluzione (21 o 24 bit) e velocimetri triassiali con banda estesa a bassa frequenza, operanti in registrazione continua per consentire una selezione accurata delle finestre di segnale sia da rumore ambientale (hvNSR) che da eventi sismici (hvSR). Il monitoraggio ha interessato complessivamente 29 stazioni per periodi variabili da 10 a 35 giorni, integrate da ulteriori 18 siti di misura del microtremore, permettendo di selezionare oltre 300 terremoti registrati tra maggio e luglio 2009, inclusi eventi della sequenza principale e del cluster dei Monti Reatini. La metodologia SSR ha richiesto l'individuazione di siti di riferimento su roccia affiorante privi di effetti di amplificazione, identificati nella formazione della Scaglia detritica a Poggio di Roio e nel calcare massiccio del Convento di San Giuliano.
L'obiettivo primario di queste analisi è stato l'individuazione della frequenza fondamentale di risonanza ($F_0$) e dei relativi picchi di amplificazione, riscontrando un ottimo accordo tra i diversi metodi utilizzati. I risultati ottenuti permettono di suddividere i siti in tre gruppi principali in base alla risposta dei litotipi affioranti: il primo gruppo, relativo alle Brecce dell'Aquila nel centro storico, evidenzia picchi di risonanza particolarmente chiari nella zona meridionale, dove le brecce sono ricoperte da uno strato di Limi rossi con proprietà geotecniche scadenti che amplificano il segnale nella banda 2-10 Hz. Il secondo gruppo comprende i depositi di versante del settore nord-occidentale, mentre il terzo riguarda le alluvioni recenti dell'Aterno, dove i valori di tendono a diminuire procedendo verso sud-est lungo la valle a causa dell'approfondimento del bedrock. È stato inoltre osservato che la tecnica SSR evidenzia amplificazioni significative anche nella componente verticale del moto a frequenze elevate, indicando un comportamento complesso del sottosuolo non sempre riconducibile a modelli monodimensionali.
Oltre ai rapporti spettrali, il quadro delle indagini sismiche è completato da estese campagne di prospezione geofisica che includono prove Down Hole, MASW e tecniche Cross Hole effettuate in numerosi siti della città. In particolare, le 7 prove Down Hole eseguite nel centro storico hanno mostrato una marcata eterogeneità dei terreni superficiali, influenzata sia dalle diverse facies deposizionali sia dall'attività antropica plurisecolare che ha rimescolato i materiali attraverso riporti e scavi. Un contributo fondamentale alla definizione del modello del sottosuolo è derivato dalla prospezione gravimetrica, con 237 stazioni che hanno permesso di mappare le anomalie di Bouguer e ricostruire in 3D l'andamento del substrato meso-cenozoico, confermando spessori costanti delle brecce intorno ai 30 metri e l'esistenza di profondi bacini lacustri oltre i 200 metri.
Le simulazioni numeriche, condotte con codici 1D e 2D, hanno integrato questi dati per fornire i fattori di amplificazione (FA) necessari alla zonazione di terzo livello, evidenziando fenomeni di deamplificazione su gran parte del centro storico rigido e amplificazioni localizzate nelle aree con coperture fini superficiali. Un caso specifico di rilievo riguarda le indagini effettuate presso il sito di Ponte Rasarolo, dove l'uso del dilatometro sismico (SDMT) ha permesso di caratterizzare dettagliatamente i fenomeni di liquefazione sismoindotta. Tali indagini hanno dimostrato che lo strato di sabbie oloceniche dell'Aterno, situato tra 3 e 4,5 metri di profondità, presentava fattori di sicurezza inferiori all'unità, validando così i parametri di resistenza derivati sia dalla velocità delle onde di taglio ($V_S$) che dall'indice di tensione orizzontale ($K_D$) ottenuti *in situ*. L'insieme di queste indagini sismiche e geofisiche costituisce la base scientifica per la cartografia di microzonazione, identificando le zone stabili suscettibili di amplificazione locale, come i settori pedemontani del Monte Pettino o le aree del bacino con inversioni di velocità Vs in profondità.

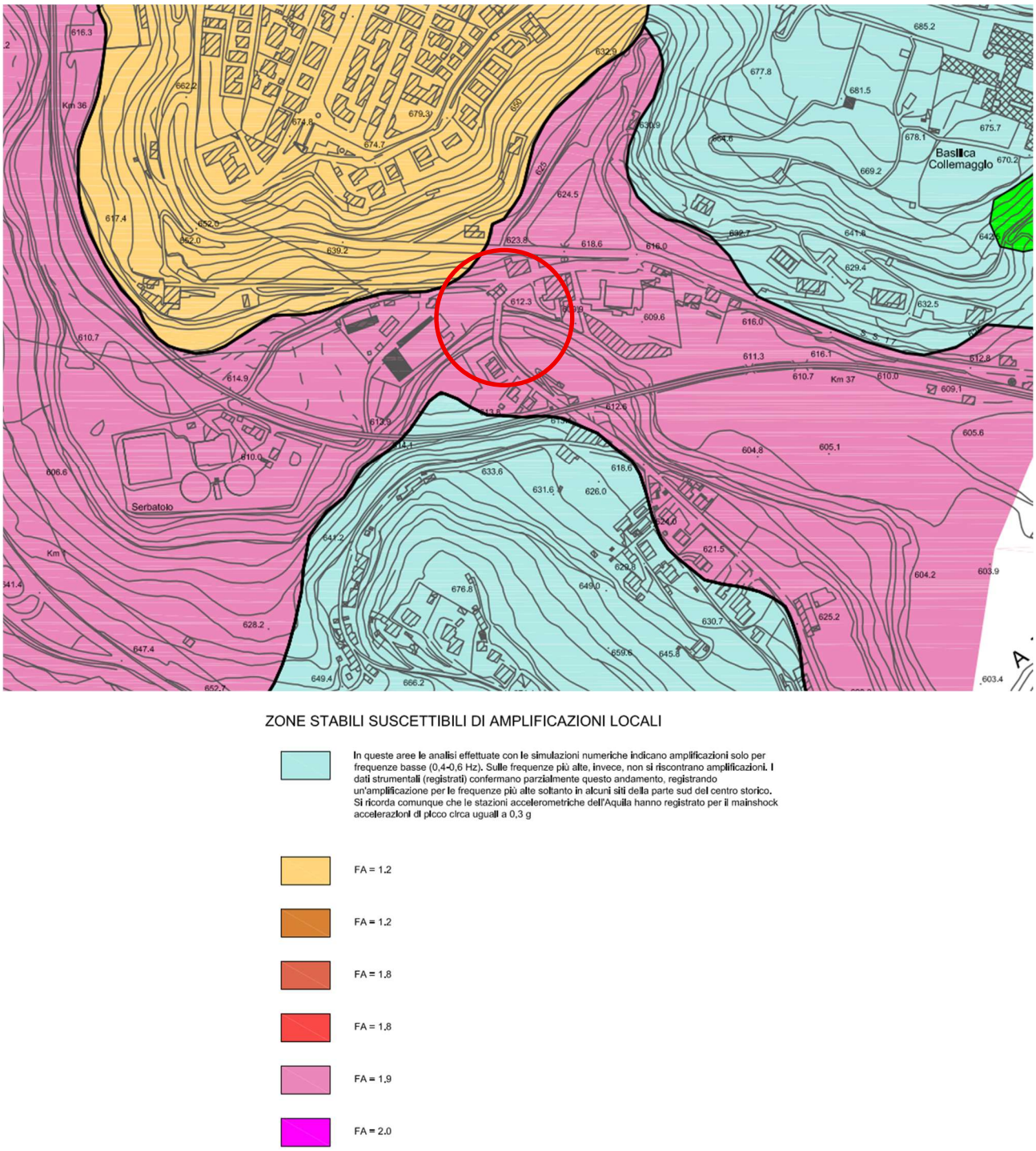



*Figura 6-2 – Estratto dalla Carta di Microzonazione Sismica di III Livello per il Comune dell'Aquila. L'area del Ponte Rasarolo è caratterizzata da un FA pari a 1.9*

**TABELLA 1.7**

| | Vs-m (m/s) | Z5 $\gamma$ (t/m³) | H (m) | Vs-m (m/s) | Z6 $\gamma$ (t/m³) | H (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Brecce | 800 | 2:00 | 50 | 800 | 2:00 | 50 or 20 |
| Limi profondi | 600 | 1.09 | 180-200 | 600 | 2.00 | 100 or 200 |
| Bedrock | 800 | | | 800 | | |
| | **Vs-m (m/s)** | **Z7 $\gamma$ (t/m³)** | **H (m)** | **Vs-m (m/s)** | **Z8 $\gamma$ (t/m³)** | **H (m)** |
| Limi rossi | | | | 300-500 | 1:08 | 20 |
| Brecce | 800 | 2:00 | 50 | 800 | 2:00 | 50 |
| Limi profondi | 600 | 1:09 | <100 | 600 | 2:00 | 100-180 |
| Bedrock | 800 | | | 800 | | |
| | **Vs-m (m/s)** | **Z9 $\gamma$ (t/m³)** | **H (m)** | **Vs-m (m/s)** | **Z3 $\gamma$ (t/m³)** | **H (m)** |
| Limi | 400 | 1:09 | 30 | 550 | 1:09 | 18 |
| Bedrock | 800 | | | 800 | | |

*Figura 6-3 – Indicazione delle relative profondità (H, m), le velocità media delle onde S ed il peso di volume. L'area del Ponte Rasarolo si trova in zona Z3*

# 7 PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE

Con Deliberazione n. 425 del 15 luglio 2024, la Giunta Regionale ha preso atto e adottato la nuova classificazione sismica della Regione Abruzzo, elaborata dal Servizio Prevenzione dei rischi di protezione civile dell'Agenzia regionale di PC e approvata con Decreto del Presidente della Giunta regionale n. 4 ed entrata in vigore dal 1 agosto 2024 (BURAT Ord. N. 30 del 31.07.2024). Il Comune dell'Aquila rientra all'interno zona sismica 1 con 0.25 < ag ≤ 0.35 (Figura 7-1).

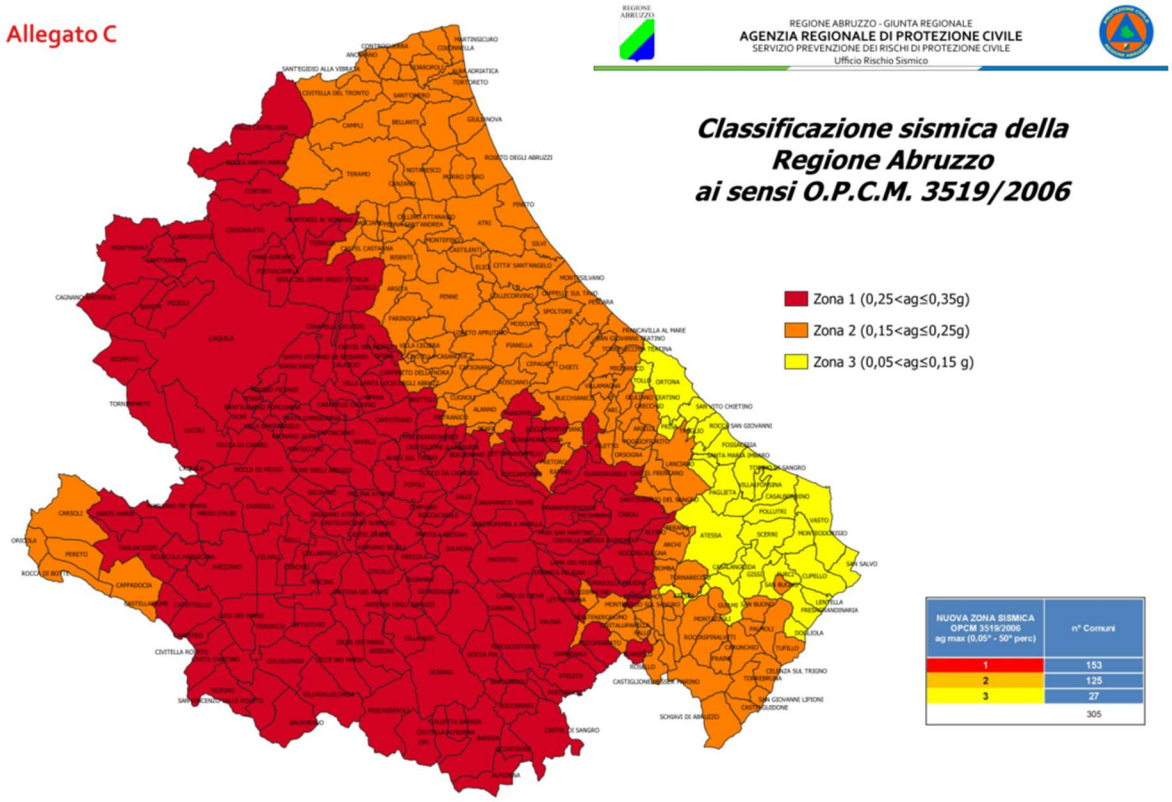



*Figura 7-1 - Classificazione sismica della Regione Abruzzo*

L'azione sismica viene valutata a partire dalla cosiddetta "pericolosità sismica di base" riferita a un sito con suolo rigido (categoria A) e superficie topografica orizzontale. Allo stato attuale la pericolosità sismica di base sul territorio Italiano è fornita dai dati pubblicati sul sito dell'Istituto Nazionale di Geofisica; in particolare, per il sito in oggetto, la mappa Interattiva di Pericolosità Sismica dell'INGV indica un'accelerazione di picco al suolo di tipo A con una probabilità di superamento del 10% in 50 anni pari a PGA=0.250-0.275 g (Figura 7-2). Il grafico di disaggregazione mostra come la pericolosità di base sia imputabile soprattutto a terremoti con magnitudo comprese tra 4.0 e 6.5 con distanze epicentrali tra 0 e 10 km (Figura 7-3): il contributo percentuale maggiore è dato dalla coppia M-D 5.0-5.5/0-10 km.

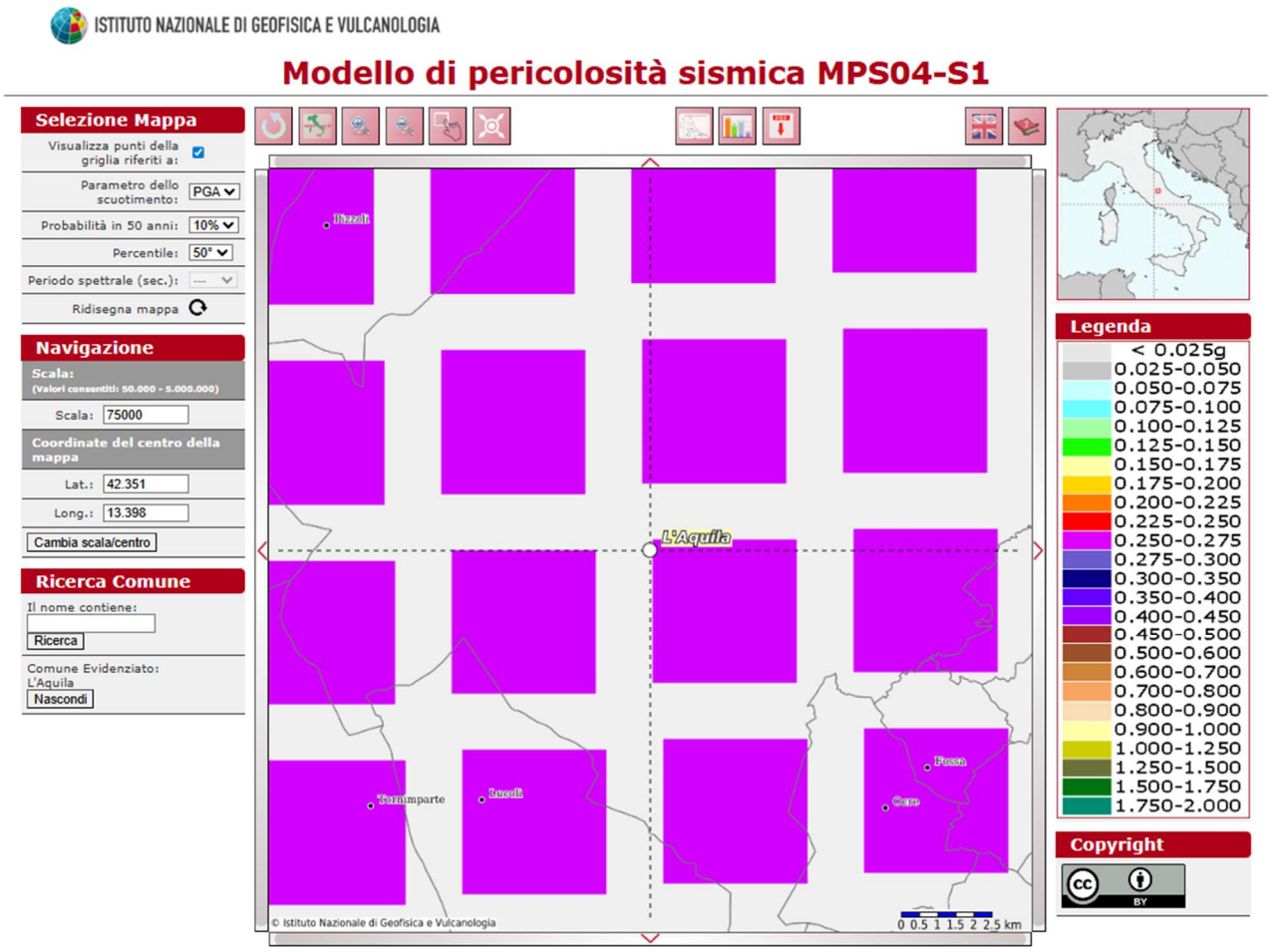
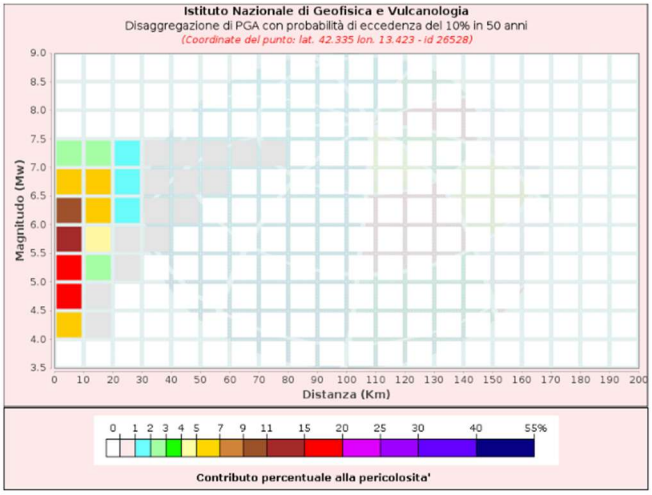



*Figura 7-2 – Mappa di pericolosità sismica per l'area in esame (da mappe interattive di pericolosità sismica: http://esse1-gis.mi.ingv.it).*




Disaggregazione di PGA con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni
(Coordinate del punto: lat. 42.335 lon. 13.423 - id 26528)

| Distanza (Km) | Magnitudo (Mw) 3.5-4.0 | 4.0-4.5 | 4.5-5.0 | 5.0-5.5 | 5.5-6.0 | 6.0-6.5 | 6.5-7.0 | 7.0-7.5 | 7.5-8.0 | 8.0-8.5 | 8.5-9.0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0-10 | 0.0000 | 5.8400 | 16.9000 | 17.2000 | 14.4000 | 10.2000 | 6.1900 | 2.5200 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 10-20 | 0.0000 | 0.0119 | 0.6220 | 2.3400 | 4.2500 | 5.3000 | 5.1600 | 2.9900 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 20-30 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0113 | 0.4050 | 1.2100 | 1.8300 | 1.4400 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 30-40 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0030 | 0.1350 | 0.3790 | 0.3980 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 40-50 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0040 | 0.0771 | 0.1280 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 50-60 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0084 | 0.0415 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 60-70 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0001 | 0.0095 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 70-80 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0006 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 80-90 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 90-100 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 100-110 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 110-120 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 120-130 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 130-140 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 140-150 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 150-160 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 160-170 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 170-180 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 180-190 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 190-200 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

Valori Medi

| Magnitudo | Distanza | Epsilon |
|---|---|---|
| 5.72 | 7.97 | 0.981 |

*Figura 7-3 – Grafico di disaggregazione*

Come riportato nelle NTC2018, la pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa $a_g$ in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza $P_{VR}$ nel periodo di riferimento $V_R$. Per un qualunque punto del territorio non ricadente nei nodi del reticolo di riferimento, i valori dei parametri possono essere calcolati come media pesata dei valori assunti da tali parametri nei quattro vertici della maglia

elementare del reticolo di riferimento contenente il punto in esame. Si ritiene necessario determinare il periodo di riferimento della struttura $V_R$ così come segue:

$V_R = V_N \cdot C_U$

Con $V_N$, vita nominale di un'opera, intesa come numero di anni nel quale deve poter essere utilizzata per lo scopo al quale è destinata, definita secondo la seguente tabella:

| | TIPI DI COSTRUZIONI | Valori minimi di $V_N$ (anni) |
|---|---|---|
| 1 | Costruzioni temporanee e provvisorie | 10 |
| 2 | Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari | 50 |
| 3 | Costruzioni con livelli di prestazioni elevati | 100 |

$C_U$, coefficiente d'uso, dipende dalla classe d'uso:

Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.

Classe II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolo-se per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza.

Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.

Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.

Classe IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al DM 5/11/2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

A seconda della classe d'uso vengono definiti i seguenti valori di coefficiente d'uso:

| CLASSE D'USO | I | II | III | IV |
|---|---|---|---|---|
| COEFFICIENTE $C_U$ | 0,7 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |

Per l'intervento in oggetto è stato assunto **$V_N$=50 anni** e **Classe d'uso III**, da cui deriva una vita di riferimento pari a 75 anni:

$$V_R = V_N \cdot C_U = 50 \text{ anni} \cdot 1{,}5 = 75 \text{ anni}$$

L'azione sismica va valutata con riferimento alle seguenti probabilità di eccedenza PVR nel periodo di riferimento $V_R$:

| Stati Limite | | $P_{V_R}$: Probabilità di superamento nel periodo di riferimento $V_R$ |
|---|---|---|
| Stati limite di esercizio | SLO | 81% |
| | SLD | 63% |
| Stati limite ultimi | SLV | 10% |
| | SLC | 5% |

Per ciascuno stato limite e relativa probabilità di eccedenza $P_{VR}$ nel periodo di riferimento $V_R$ si ricava il periodo di ritorno $T_R$ del sisma utilizzando la relazione:

$T_R = - V_R / \ln (1- P_{VR}) = - C_U V_N / \ln (1- P_{VR})$

| STATO LIMITE | $P_{VR}$ [%] | $T_R$ [anni] |
|---|---|---|
| SLO | 81 | 45 |
| SLD | 63 | 75 |
| SLV | 10 | 712 |
| SLC | 5 | 1462 |

In seguito si riportano i valori di $a_g$ (accelerazione massima al sito), $F_o$ (valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale) e $T_c^*$ (periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale), per i periodi di ritorno $T_R$ corrispondenti a ciascuno stato limite in condizioni di campo libero su suolo di riferimento rigido e superficie topografica orizzontale.

| **STATO LIMITE** | **$T_r$ (anni)** | **$a_g$ (g)** | **$F_0$ (-)** | **$T_c^*$ (s)** |
|---|---|---|---|---|
| SLO | 45 | 0.098 | 2.346 | 0.279 |
| SLD | 75 | 0.125 | 2.316 | 0.290 |
| SLV | 712 | 0.300 | 2.384 | 0.356 |
| SLC | 1462 | 0.381 | 2.425 | 0.373 |

*Tabella 2 - Valori di $a_g$, $F_0$ e $T_c$ associati agli stati limite da verificare*

# 8 PERICOLOSITA' SISMICA DI PROGETTO

Per la definizione dell'azione sismica di progetto è necessario valutare l'amplificazione dell'azione sismica indotta dalle condizioni stratigrafiche e topografiche del sito. Entrambi questi fattori, infatti, concorrono a modificare l'azione sismica in superficie rispetto a quella attesa su suolo rigido con superficie orizzontale, sia dal punto di vista dell'ampiezza del segnale, sia nel contenuto in frequenza.

## 8.1 *EFFETTI STRATIGRAFICI*

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi, come indicato nel par. 7.11.3 delle NTC18. In assenza di tali analisi, per la definizione dell'azione sismica si può fare riferimento a un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento. Secondo il punto 3.2.2 delle NTC 2018, l'identificazione della categoria di sottosuolo si effettua calcolando il valore della velocità equivalente $V_{s,eq}$ di propagazione delle onde di taglio a partire dal piano di imposta delle fondazioni superficiali o della testa dei pali nel caso di fondazioni profonde fino alla profondità del substrato sismico (H= substrato caratterizzato da velocità Vs maggiori di 800 m/s); per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$ ottenuto ponendo H=30.

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^{N} \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

con:

$h_i$ →spessore dell'i-esimo strato;

$V_{S,i}$ → velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;

N → numero di strati;

H → profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da VS non inferiore a 800 m/s.

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite dalla seguente tabella:

| Categoria | Caratteristiche della superficie topografica |
|---|---|
| A | *Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m. |
| B | *Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti,* caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s. |
| C | *Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s. |
| D | *Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti,* con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s. |
| E | *Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D,* con profondità del substrato non superiore a 30 m. |

*Tabella 3 - Categorie di sottosuolo Categorie di sottosuolo. Tratta da Tab 3.2.II delle NTC 2018*

Per la ricostruzione sismo-stratigrafica del sito si utilizzano le indagini eseguite nel 2012 (v. Capitolo 6). Sulla base delle risultanze delle indagini sismiche eseguite nel 2012 presso il sito di studio è possibile attribuire, secondo le NTC18, la categoria di sottosuolo C.

## 8.2 *EFFETTI TOPOGRAFICI*

Per condizioni topografiche complesse è necessario predisporre specifiche analisi di risposta sismica locale. Per configurazioni superficiali semplici si può adottare la seguente classificazione:

| Categoria | Caratteristiche della superficie topografica |
|---|---|
| T1 | Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media i ≤ 15° |
| T2 | Pendii con inclinazione media i > 15° |
| T3 | Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media 15° ≤ i ≤ 30° |
| T4 | Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media i > 30° |

*Tabella 4 - Tabella 3.2.III delle NTC 2018 – Categorie topografiche*

Il ponte si trova in una zona di fondovalle caratterizzata da morfologia gerneralmente pianeggiante, pertanto è possibile assumere una categoria topografica T1: "*Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media i<15°*"

## 8.3 *COEFFICIENTI SISMICI DI PROGETTO*

In seguito, si riportano coefficienti sismici di progetto:

- Amplificazione stratigrafica (Ss)
- Coefficiente Funzione della categoria suolo (Cc)
- Amplificazione topografica (St)
- Accelerazione massima attesa al sito ($a_{max}$)

| | |
|---|---|
| Coordinate sito (Lat, Long) | 4688769.58N, 368013.50E |
| Vita nominale | $V_N$ = 50 |
| Coefficiente d'uso | $C_U$ = 1.5 |
| Categoria topografica | T1 |
| Categoria stratigrafica | C |

| STATO LIMITE | SLO | SLD | SLV | SLC |
|---|---|---|---|---|
| Ss | 1.50 | 1.50 | 1.27 | 1.15 |
| Cc | 1.60 | 1.58 | 1.48 | 1.45 |
| St | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| $a_{max}$ [m/s$^2$] | 1.443 | 1.834 | 3.734 | 4.299 |
| $a_{max}$ [g] | 0.146 | 0.186 | 0.380 | 0.438 |

*Tabella 5 – Valori $S_S$,$C_C$, $S_t$, $A_{max}$ per i diversi stati limite*

## 8.4 *VERIFICA DELLA SUSCETTIBILITÀ A LIQUEFAZIONE*

L'analisi della suscettibilità a liquefazione dei sedimenti, se sottoposti a sollecitazioni cicliche indotte da terremoti, è di fondamentale importanza per gli aspetti di progettazione geotecnica antisismica. In particolare occorre valutare, nel modo più adeguato possibile, le effettive condizioni di suscettibilità, le condizioni di innesco e il rischio sito specifico di tale fenomeno.
Con il termine "liquefazione" si indicano vari fenomeni fisici (mobilita ciclica, liquefazione ciclica, fluidificazione) osservati durante terremoti significativi (generalmente, M > 5,5) nei depositi e nei pendii sabbiosi saturi; in questi sedimenti, le condizioni "non drenate" durante il sisma possono indurre un incremento e un accumulo delle pressioni interstiziali, che a loro volta possono provocare una drastica caduta della resistenza al taglio e quindi una perdita di capacità portante del terreno. Il meccanismo di liquefazione dei sedimenti e governato da molti fattori che si possono ricondurre principalmente:
alle caratteristiche dell'impulso sismico (forma; durata dello scuotimento; ecc.) e la sua energia (magnitudo; accelerazioni; ecc.);
alle caratteristiche tessiturali e meccaniche dei sedimenti (fuso granulometrico; densità relativa; coesione; limiti di Atterberg; ecc.);
alla presenza di falda superficiale e alle condizioni di confinamento dello strato liquefacibile (non sono riportati casi in letteratura di liquefazione in strati granulari profondi oltre 15-20 metri).
La differenza fra i diversi fenomeni dipende dalle tensioni di taglio mobilitate per l'equilibrio in condizioni statiche e dalla resistenza al taglio residua dopo il terremoto. In condizioni di sisma, vi possono anche essere effetti di "riordino" dei sedimenti, con possibilità di cedimenti significativi che possono coinvolgere sia i depositi granulari, sia i sedimenti fini poco coesivi.
Nell'ultimo decennio, sono state elaborate procedure di stima delle potenziali deformazioni post-sisma, provocate da perdite di resistenza, anche nei sedimenti fini di bassa coesione (limi e argille a comportamento "non drenato"). Quest'ultimo fenomeno è noto con il termine "cyclic softening" (Idriss & Boulanger, 2004 e 2008).

Al paragrafo 7.11.3.4.2 delle NTC18 sono riportate le situazioni nelle quali può essere omessa la verifica a liquefazione dei terreni, ovvero:

1. *accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;*
2. *profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;*
3. *depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata (N1)60 > 30 oppure qc1N > 180 dove (N1)60 è il valore della resistenza determinata in prove penetro-metriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e qc1N è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;*
4. *distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura* 8-1 *(a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità Uc < 3,5 e in Figura* 8-1 *(b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità Uc > 3,5.*

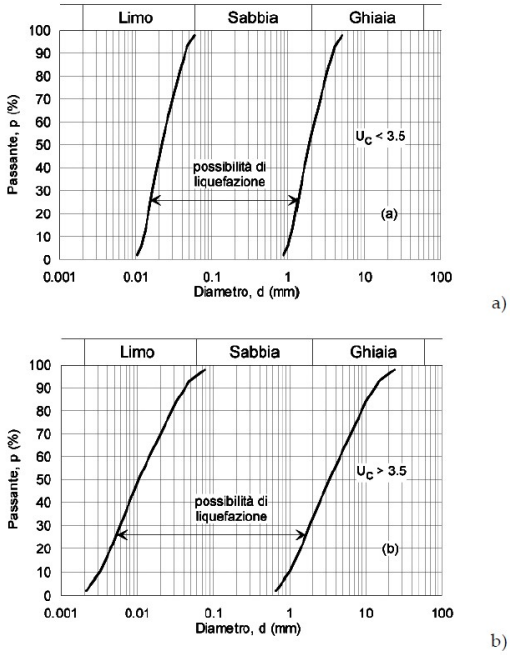



*Figura 8-1 – Fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione*

### 8.4.1 *STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA*

Particolare attenzione merita la trattazione della valuazione del potenziale liquefacibile poiché in seguito al sisma del 6 Aprile 2009, a circa 150 m dal Ponte Rasarolo, in corrispondenza del piazzale commerciale della rivendita di materiale edilizio, si sono verificati fenomeni di liquefazione (Figura 8-2).



*Figura 8-2 – Evidenza dei fenomeni di liquefazioni avvenuti presso il piazzale della rivendita di materiale edilizio nei pressi del Ponte Rasarolo*

La liquefazione ha interessato i depositi sabbiosi facenti parte delle alluvioni terrazzate oloceniche del Fiume Aterno che presentano una facies prevalentemente sabbioso-limosa. Tale caratteristica ha favorito l'innesco del fenomeno durante il sisma. I fenomeni sono stati rinvenuti con precisione nel settore compreso tra via Ponte Rasarolo, la S.S. 17 e la linea ferroviaria. Le alluvioni in questa zona hanno uno spessore di circa dieci metri e poggiano direttamente sui depositi lacustri del Pleistocene inferiore, come confermato dai sondaggi effettuati nella campagna di indagini del 2012 e da altri sondaggi effettuati nella zona.
Dal punto di vista geomorfologico, questi depositi rappresentano le alluvioni oloceniche più recenti che il fiume Aterno ha continuato a incidere e terrazzare nel tempo.
Le indagini di microzonazione hanno cartografato questi episodi di liquefazione come "sismoindotti", inserendoli tra le forme morfologiche rilevanti per la valutazione della pericolosità sismica locale.

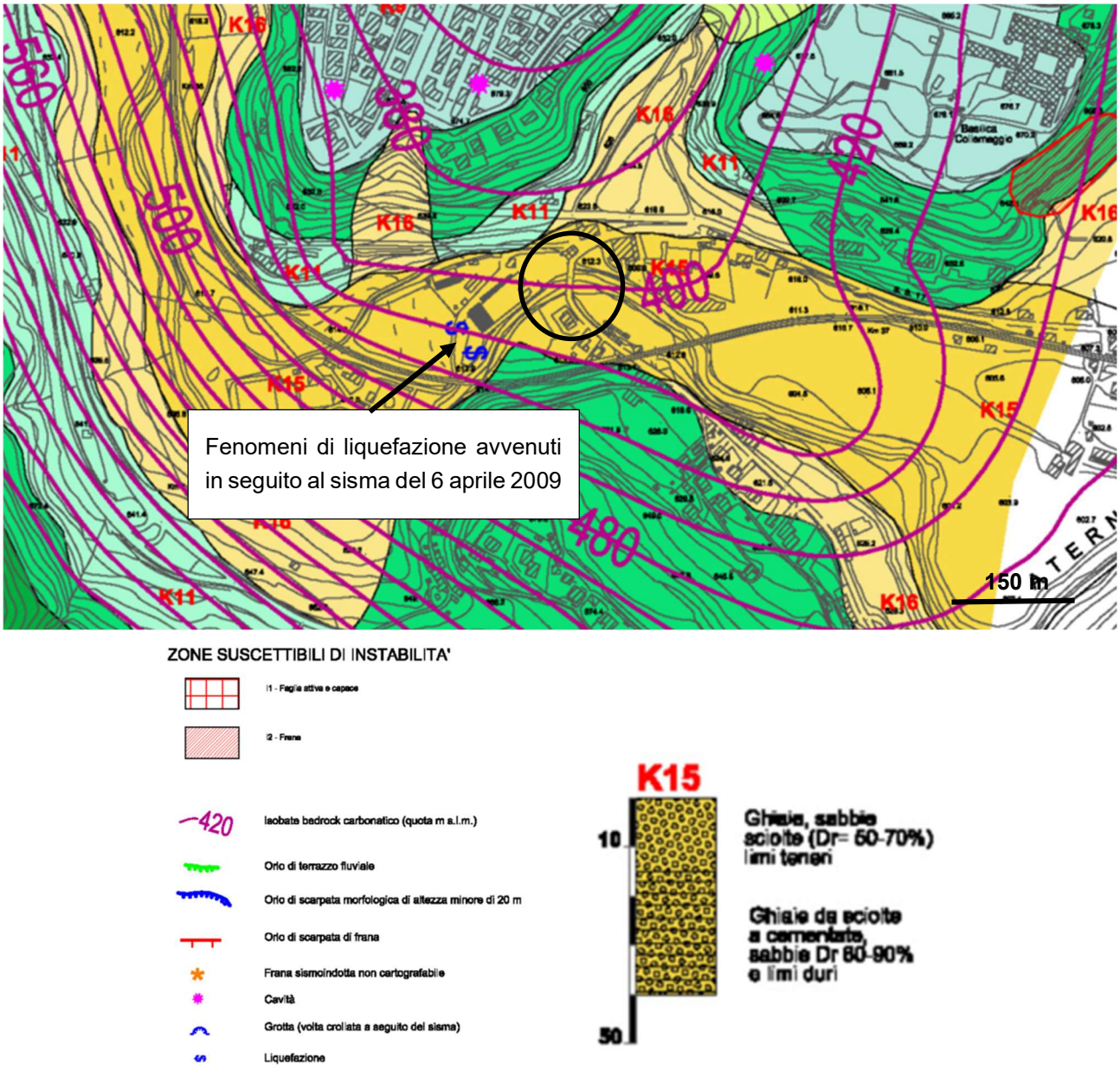



*Figura 8-3 – Estratto carta delle microzonee omogenee in prospettiva sismica (Livello 1). Cerchiato di nero l'area di indagine. La cartografia riporta anche l'area in cui è avvenuto il fenomeno di liquefazione*

La microzona K15 viene descritta come una zona 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.

### 8.4.2 *PROVE SDMT (DILATOMETRO SISMICO)*

In seguito al sisma è stata condotta una campagna di indagini mediante uso di dilatometro sismico Marchetti i cui risultati vengono riportati all'interno dell'articolo "*SDMT-based Analysis of the Liquefaction Phenomena Induced by the April 6, 2009 Earthquake at Ponte Rasarolo, L'Aquila (Italy). P. Monaco, G. Totani e S. Amoroso*" https://www.marchetti-dmt.it/conference/dmt15/papers%20DMT%202015%20(pdf)/123.pdf
L'articolo analizza in dettaglio i fenomeni di liquefazione verificatisi presso il sito di Ponte Rasarolo, situato a circa 1,5 km dall'epicentro del terremoto dell'Aquila del 6 aprile 2009, basandosi su indagini condotte con il dilatometro sismico (SDMT). Durante i sopralluoghi effettuati subito dopo l'evento sismico, l'area ha mostrato evidenti segni di liquefazione e lateral spreading, con la presenza di numerosi vulcanetti di sabbia alti fino a 15 centimetri e fratture parallele alle sponde del fiume Aterno. Le analisi granulometriche sui campioni prelevati hanno confermato che il materiale apparteneva alle categorie dei terreni facilmente liquefacibili (Figura 8-4).

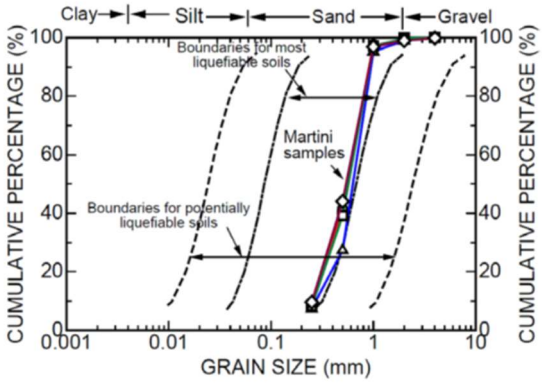



*Figura 8-4 – Distribuzione granulometrica dei campioni di terreno prelevati in sito*

Come detto in precedenza, dal punto di vista geologico, il sito è caratterizzato da depositi alluvionali olocenici ghiaioso-sabbiosi con spessori variabili, che poggiano su una potente successione di limi lacustri pleistocenici, con una falda acquifera rinvenuta a circa 3 metri di profondità.
Per studiare il fenomeno, i ricercatori hanno eseguito nel gennaio 2010 quattro prove SDMT, di cui tre posizionate esattamente in corrispondenza dei vulcanetti di sabbia (SDMT1-SDMT3) e una a breve distanza, in una zona dove non erano emersi effetti superficiali evidenti (SDMT4).




*Figura 8-5 – Ubicazione delle prove SMDT. Cerchiato di rosso il Ponte Rasarolo*

La teoria alla base dello studio si fonda sull'utilizzo di una procedura semplificata, che valuta la suscettibilità alla liquefazione confrontando la domanda sismica, espressa dal rapporto di sforzo ciclico (CSR), con la capacità di resistenza del terreno, definita dal rapporto di resistenza ciclica (CRR). Il fattore di sicurezza locale viene calcolato come rapporto tra CRR e CSR, introducendo un fattore di scala (MSF) per rapportare la magnitudo del sisma del 2009 ($M_w$ 6.3) a quella di riferimento ($M_w$ 7.5). Oltre alla valutazione puntuale, è stato calcolato l'indice di potenziale di liquefazione (IL) per ottenere una stima integrata della suscettibilità lungo l'intera verticale.
La stima del parametro CSR è stata effettuata analizzando le registrazioni accelerometriche delle stazioni della Rete Accelerometrica Nazionale vicine all'epicentro, stimando un'accelerazione massima al suolo (PGA) di circa 0,465 g per il sito in esame, tenendo conto degli effetti di amplificazione locale. Per quanto riguarda la capacità di resistenza CRR, l'SDMT ha permesso di ottenere due stime indipendenti: una basata sulla velocità delle onde di taglio ($V_S$) e l'altra basata sull'indice di tensione orizzontale ($K_D$) derivato dalla prova dilatometrica. L'uso del parametro è considerato particolarmente significativo poiché questo indice è molto sensibile a fattori che influenzano la resistenza alla liquefazione, come lo stato di sforzo, la storia tensionale e la struttura del terreno.

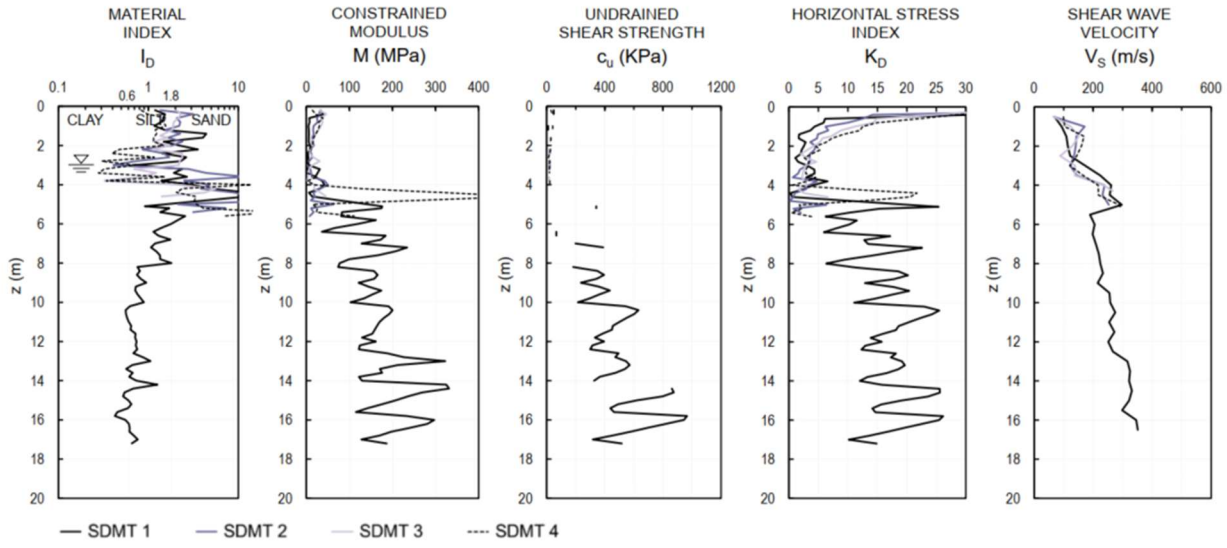



*Figura 8-6 – Risultati delle prove SDMT eseguite*

I risultati ottenuti tramite entrambi i metodi di analisi hanno confermato in modo coerente l'avvenuta liquefazione in uno strato di sabbia sciolta situato a una profondità compresa tra 3 e 4,5 metri (da Figura 8-7 a Figura 8-10).

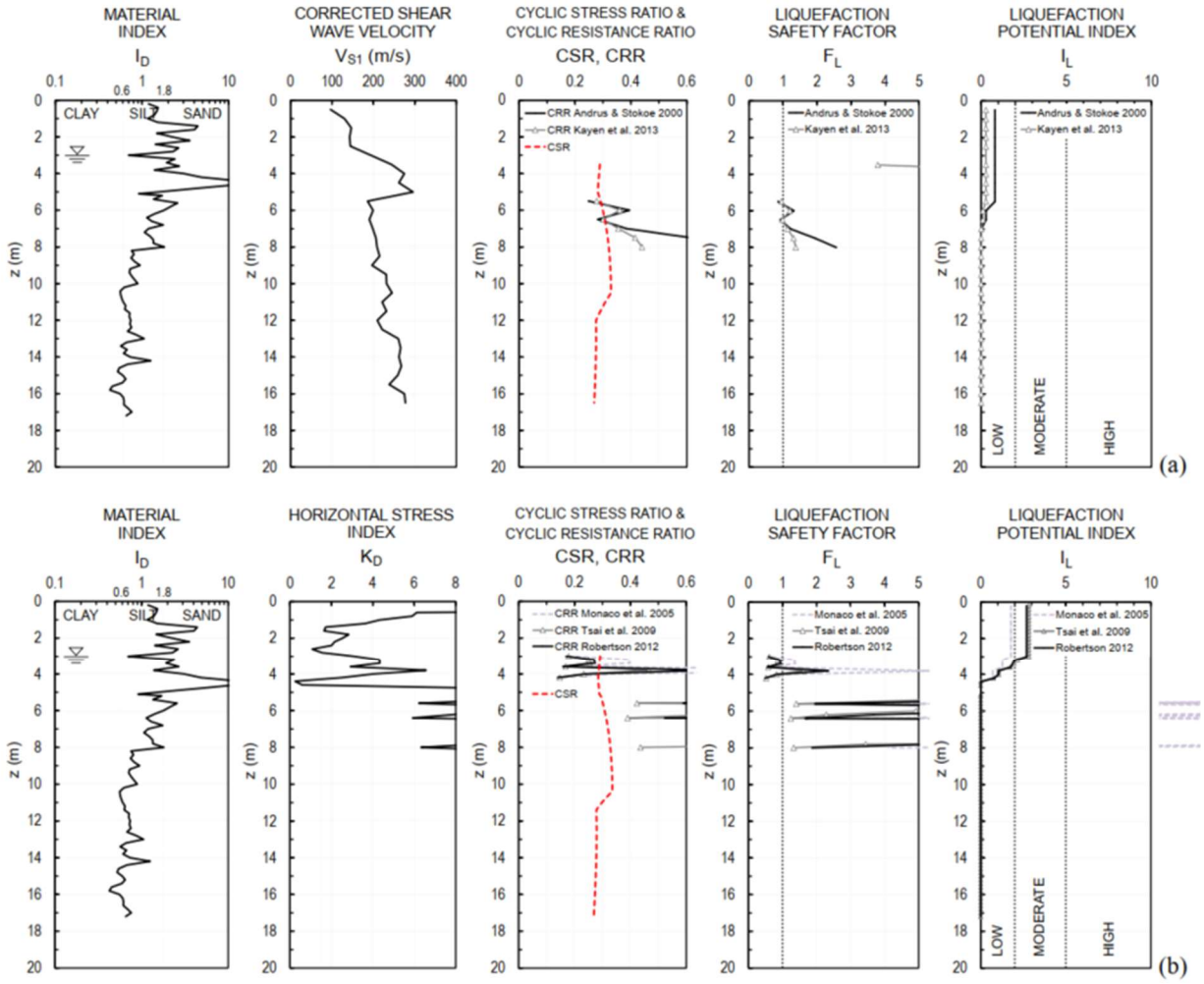



*Figura 8-7 – Risultati analisi di liquefazione SDMT1. Pannello superiore metodo velocità onde S; Pannello inferiore metodo dell'indice di tensione orizzontale KD*

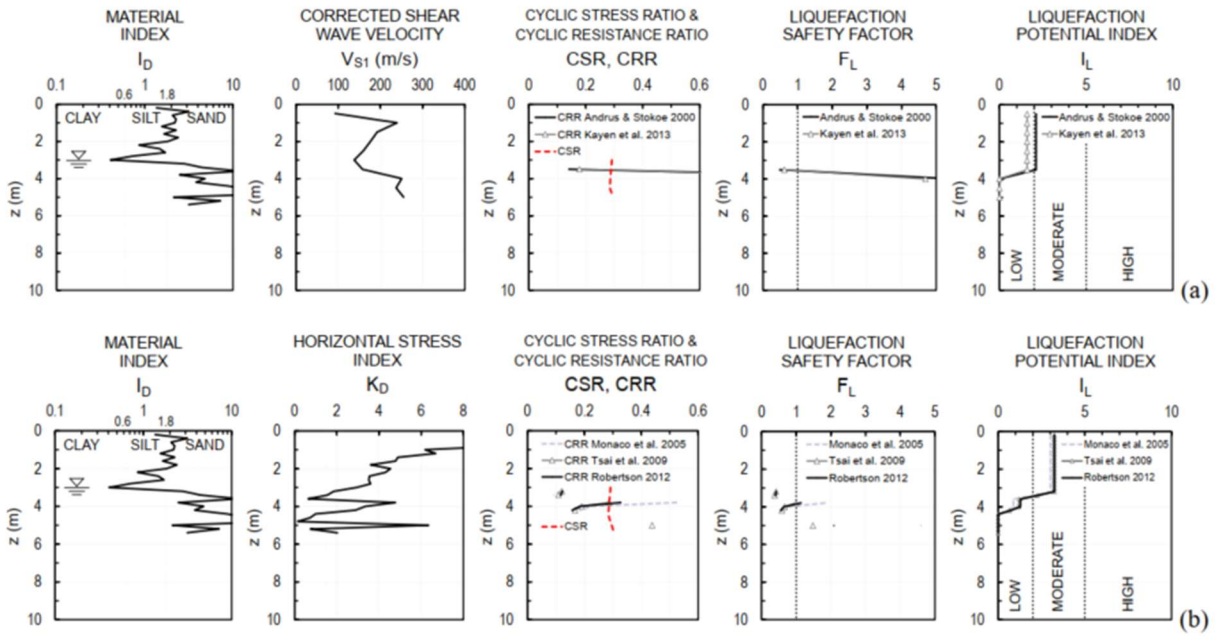



*Figura 8-8 – Risultati analisi di liquefazione SDMT2. Pannello superiore metodo velocità onde S; Pannello inferiore metodo dell'indice di tensione orizzontale KD*

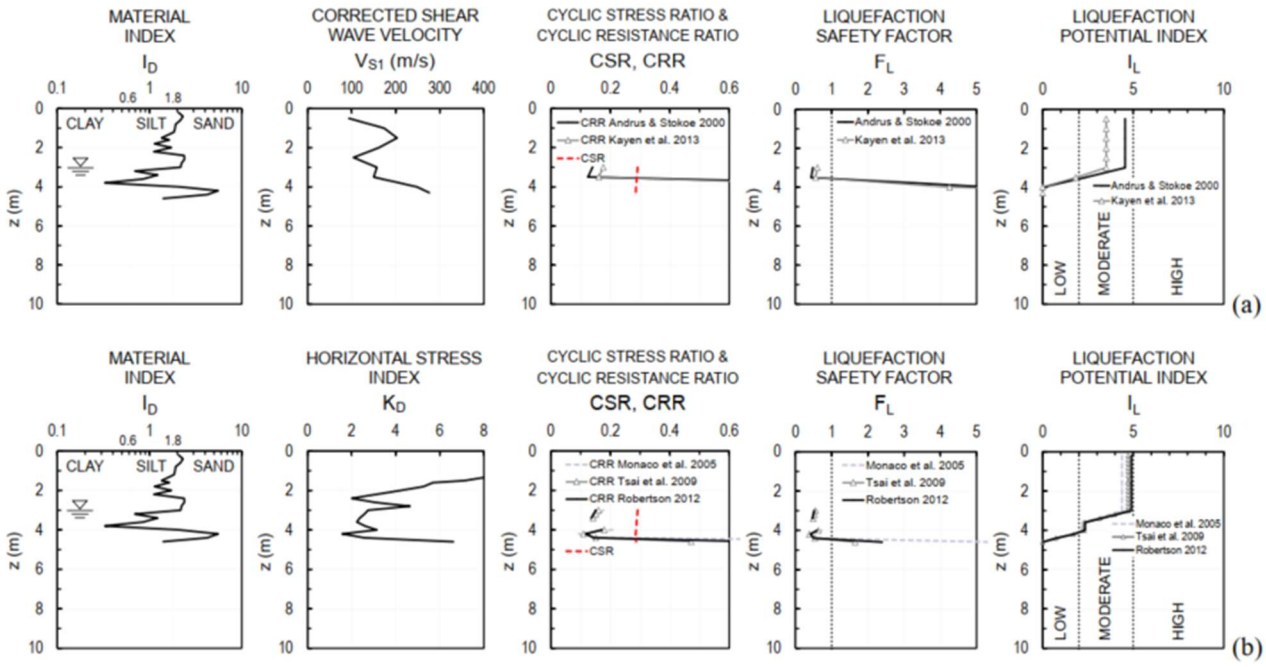



*Figura 8-9 – Risultati analisi di liquefazione SDMT3. Pannello superiore metodo velocità onde S; Pannello inferiore metodo dell'indice di tensione orizzontale KD*

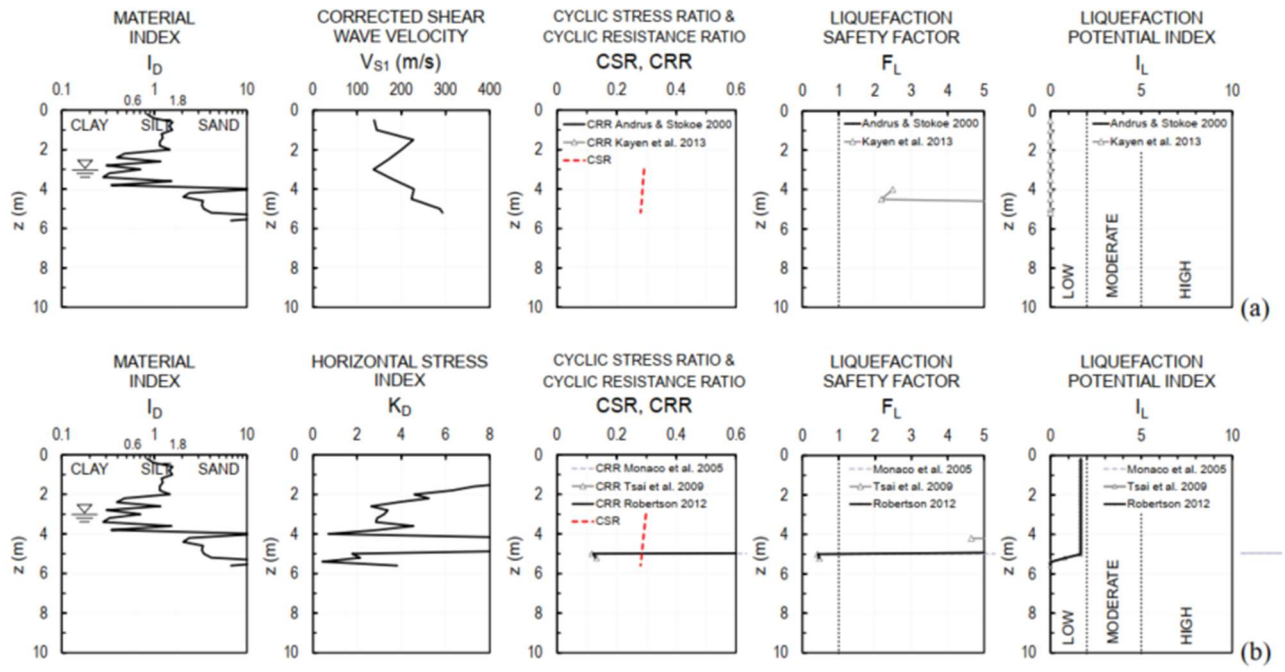



*Figura 8-10 – Risultati analisi di liquefazione SDMT4. Pannello superiore metodo velocità onde S; Pannello inferiore metodo dell'indice di tensione orizzontale KD*

Nelle verticali investigate in corrispondenza dei vulcanetti di sabbia, il fattore di sicurezza è risultato inferiore all'unità, confermando uno spessore dello strato liquefatto di circa 1,5 metri. L'indice di potenziale di liquefazione è stato classificato come da basso a moderato. Interessante è il risultato della prova SDMT 4, eseguita dove non c'erano evidenze superficiali: qui i metodi hanno indicato una liquefazione marginale in uno strato molto sottile o troppo profondo per produrre effetti visibili in superficie.

In conclusione, il caso di Ponte Rasarolo ha dimostrato l'efficacia della prova SDMT nel fornire stime affidabili della resistenza alla liquefazione, mostrando una convergenza dei risultati tra i metodi basati su $V_S$ e $K_D$ che valida le osservazioni effettuate sul campo.

### 8.4.3 *PONTE RASAROLO*

Dal Capitolo 8.4.2 emerge come, a seguito del sisma dell'Aprile 2009, si siano verificati fenomeni di liquefazione nelle vicinanze del ponte, a profondità comprese tra 3 e 4.5 m dal p.c., all'interno dei depositi alluvionali a prevalente componente sabbiosa.
In corrispondenza del Ponte Rasarolo, tuttavia, non sono stati segnalati fenomeni di liquefazione dei depositi superficiali. Tale circostanza è verosimilmente riconducibile alla differente natura litologica dei depositi alluvionali superficiali del Fiume Aterno in questo settore, costituiti prevalentemente da ghiaie immerse in una matrice sabbiosa a contenuto variabile, come evidenziato dai due sondaggi geognostici eseguiti nel 2012 (Figura 8-12 e Figura 8-13). Tenori di sabbia maggiore sono stati osservati sul sondaggio geognostico S1 da 7.20 m a 12.10 m, dove sono state rinvenute ghiaie minute miste a sabbia grossolana.

In via cautelativa, ai fini della progettazione, si assume comunque che l'intero spessore dei depositi alluvionali presenti in corrispondenza del ponte sia suscettibile di liquefazione.

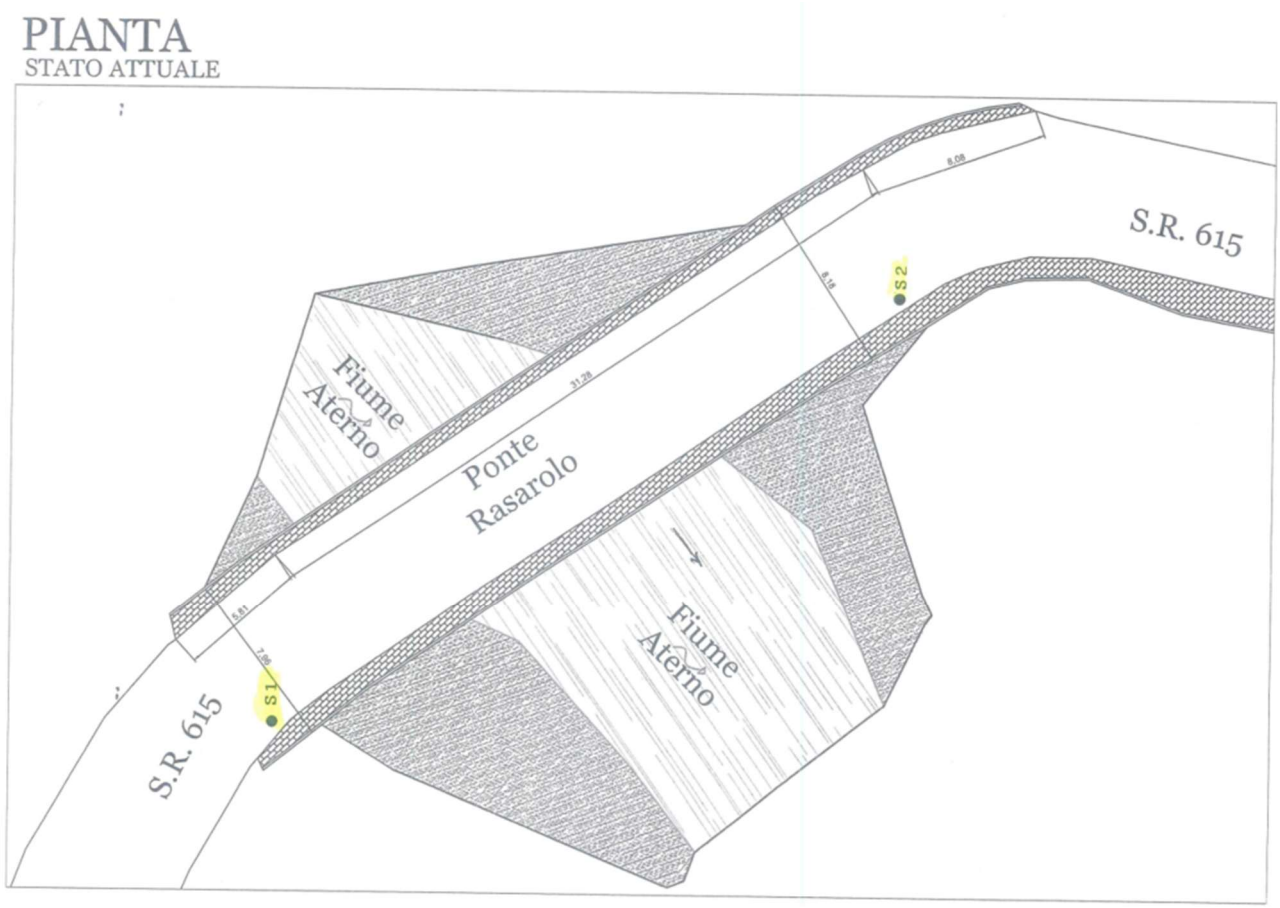



*Figura 8-11 – Ubicazione indagini*

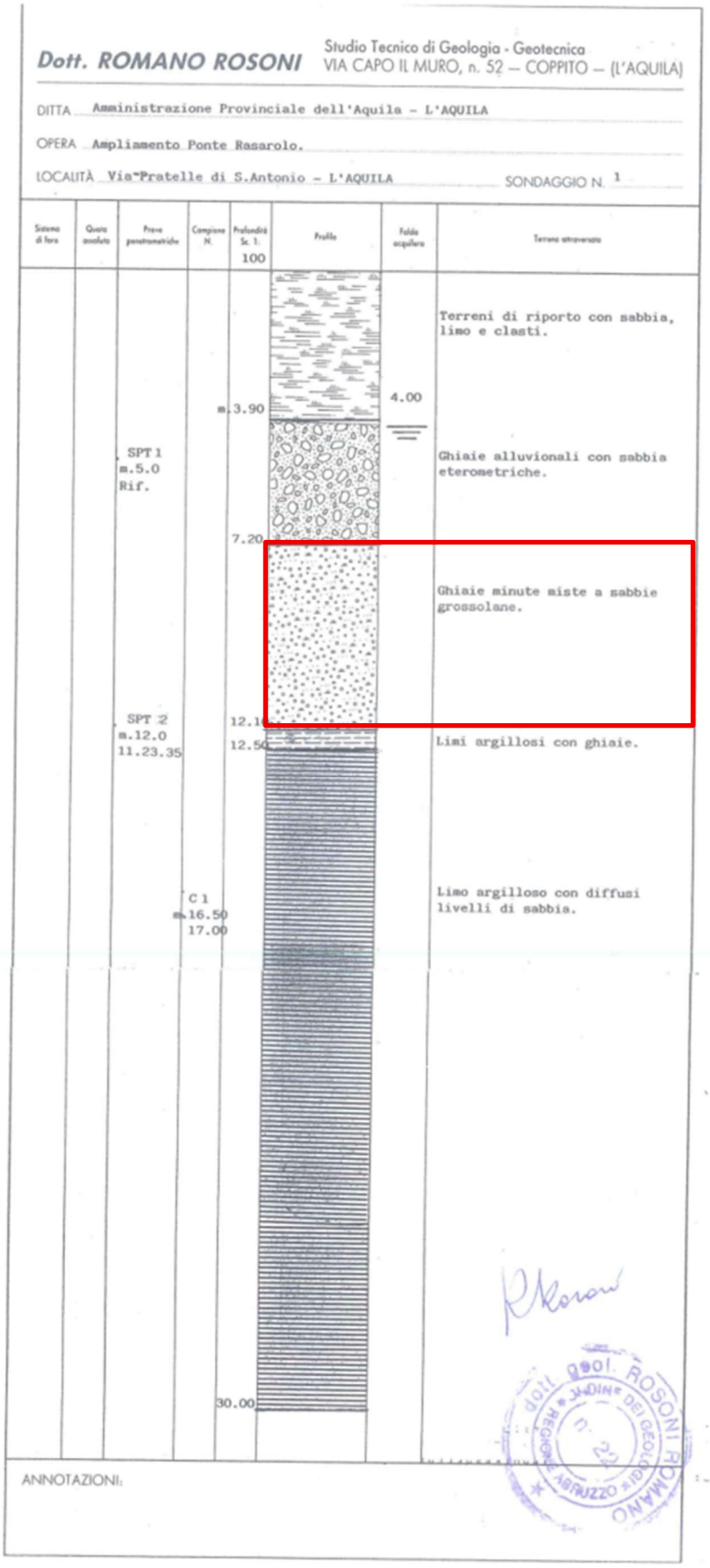



*Figura 8-12 – Stratigrafia sondaggio geognostico S1 con indicazione dello strato potenzialmente suscettibile di liquefazione*

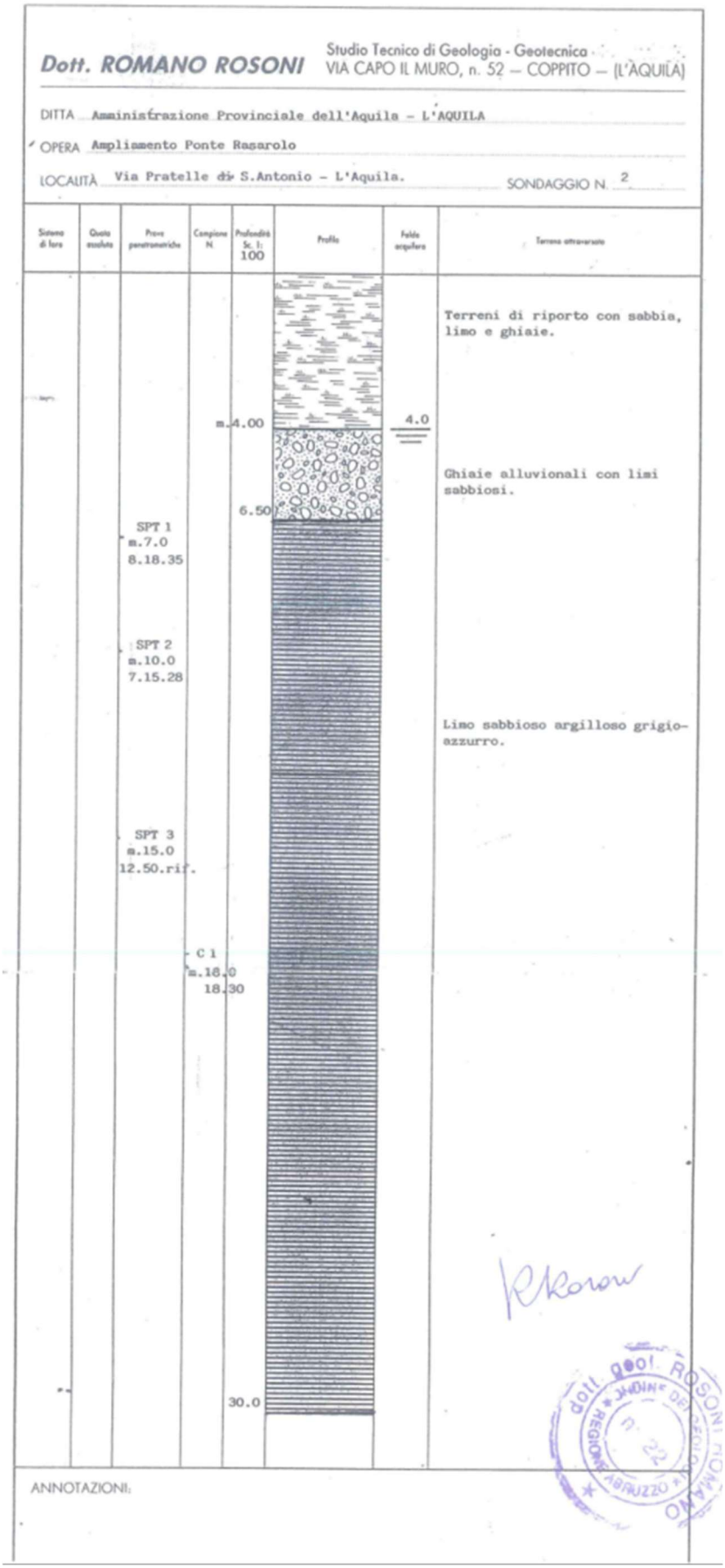



*Figura 8-13 – Stratigrafia sondaggio geognostico S2*

# 9 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La presente relazione tratta gli aspetti sismici relativi alle informazioni reperite dai siti istituzionali, dalla letteratura scientifica e dai dati relativi alle indagini geognostiche eseguite nel 2012 in relazione ai "*Lavori di risanamento e adeguamento funzionale del Ponte Rasarolo lungo la SR 615 di Monteluco in L'Aquila*" è stato condotto uno studio geologico, a firma del Dott. Geol. Romano Rosoni.
Sulla base delle informazioni reperite si ritiene di affermare quanto segue:

- In base ai risultati delle indagini geofisiche eseguite, secondo le NTC 2018, la categoria di sottosuolo C;
- Secondo la nuova classificazione sismica della Regione Abruzzo, elaborata dal Servizio Prevenzione dei rischi di protezione civile dell'Agenzia regionale di PC e approvata con Decreto del Presidente della Giunta regionale n. 4 ed entrata in vigore dal 1 agosto 2024 (BURAT Ord. N. 30 del 31.07.2024) il Comune dell'Aquila rientra all'interno zona sismica 1 con $0.25 < ag \leq 0.35$ (Figura 7-1);
- Il catalogo ITHACA (ITaly HAzard from CApable faults) non riporta la presenza di faglie capaci nei pressi del ponte;
- Il territorio aquilano presenta un elevato rischio sismico. Per l'area dell'Aquila il Database Macrosismico Italiano 2015 (DBMI15) riporta numerosi eventi sismici per un totale di 140 sismi di riferimento dal 1315 al 2017. L'ultimo evento, per importanza, è quello relativo al sisma del 2009 di magnitudo momento Mw=6.29;
- Utilizzando il metodo semplificato per la stima della risposta sismica locale, ovvero considerando la Categoria stratigrafica C e la Categoria Topografica T1, il valore dell'accelerazione massima di sito è risultato pari a 0,380 g (per Classe III di edificio e Stato Limite di Salvaguardia della Vita). Per tutti gli ulteriori parametri si rimanda al Capitolo 8.3;
  Il metodo semplificato di Risposta Sismica Locale è ritenuto valido in quanto si ritiene che l'assetto geologico sia assimilabile ad un modello fisico monodimensionale con condizioni stratigrafiche e proprietà dei terreni chiaramente riconducibili ad una delle categorie di sottosuolo definite dalla normativa e, in particolare, alla categoria C (v. Capitolo 8.4.1);
- Nei pressi del Ponte Rasarolo, in corrispondenza del piazzale commerciale della rivendita di materiale edilizio si sono verificati fenomeni di liquefazione avvenuti all'interno dei depositi alluvionali terrazzati del Fiume Aterno. All'interno di quest'area sono state effettuate indagini dirette tipo SDMT (Capitolo 8.4.2) i quali risultati hanno confermato in modo coerente l'avvenuta liquefazione in uno strato di sabbia sciolta situato a una profondità compresa tra 3 e 4,5 metri.
  Alla luce di tali evidenze, l'Unità Geologica 2 deve essere considerata suscettibile di liquefazione e sarà pertanto oggetto di specifici interventi di mitigazione del rischio liquefazione.

Pieve di Soligo, 12/06/2026

**IL PROGETTISTA**

Ing. Michele Titton

