



Progetto S3 – Scenari di scuotimento in aree di interesse prioritario e/o strategico

Responsabili: Francesca Pacor (INGV-MI) e Marco Mucciarelli (Unibas)

TASK 3 – MOLISE - DELIVERABLE D8

MODELLI GEOTECNICI 1D e/o 2D PER I COMUNI DI SAN GIULIANO DI PUGLIA, BONEFRO, RIPABOTTONI, COLLETORTO E SANTA CROCE DI MAGLIANO

A cura di

UR4 – *Sabatino Piscitelli, Enzo Rizzo*

UR7 – *Francesco Silvestri, Anna d'Onofrio, Alessandro Guerricchio, Giuseppe Lanzo, Alessandro Pagliaroli, Rodolfo Puglia, Filippo Santucci de Magistris, Stefania Sica*

UR9 – *Claudio Eva, Gabriele Ferretti, Giuseppe Di Capua*

INDICE

INTRODUZIONE.....	3
1. SAN GIULIANO DI PUGLIA.....	4
1.1 Caratteri geomorfologici e litologici	4
1.2 Modelli geologici proposti	7
1.3 Analisi delle stratigrafie dei sondaggi.....	10
1.4 Prospezioni geoelettriche	14
1.5 Caratteri geotecnici della formazione argillosa	18
1.6 Modelli di sottosuolo per la risposta sismica locale.....	21
1.7 Interpretazioni <i>aftershocks</i>	23
1.8 Simulazioni <i>aftershocks</i>	26
2. Bonefro	31
3. Ripabottoni.....	33
3.1 ASPETTI GEOLOGICI, GEOMORFOLOGICI E GEOTECNICI	33
3.2 RACCOLTA DEI DATI PREESISTENTI	33
3.2.1 Inquadramento geologico generale	34
3.2.2 Caratteristiche geologiche e strutturali del centro abitato	34
3.2.3 Geomorfologia del centro abitato	35
3.3 Indagini geognostiche RECENTI	35
3.3.1 SONDAGGI.....	35
3.3.2 PROVE DOWN-HOLE	37
3.3.4 PROVE GEOTECNICHE.....	39
3.4 SONDAGGI PRE-ESISTENTI E RETE SISMICA TEMPORANEA	40
5. Santa Croce di Magliano	46
7. BIBLIOGRAFIA	47

INTRODUZIONE

Il Task 3 del progetto S3 si prefigge di generare “Scenari di scuotimento al bedrock e al sito nei Comuni di Bonefro, San Giuliano di Puglia, Colletorto, Santa Croce di Magliano e Ripabottoni”, che sono stati tra i più danneggiati dalla sequenza sismica iniziata il 31 Ottobre del 2002. Per questi comuni esiste una notevole messe di dati sulla distribuzione del danno e sulla vulnerabilità degli edifici, ma non registrazioni delle scosse principali in area epicentrale (escluso un dato all'interno di un edificio di Bonefro). Molti dati di tipo geofisico geognostico e geologico sono stati raccolti a seguito del terremoto per studi di microzonazione (Regione Molise e DPC). Altri dati si stanno raccogliendo nell'ambito di questo Progetto

Per quanto il comune di San Giuliano di Puglia nella prima fase del Progetto sono stati approfonditi gli aspetti relativi alle indagini geologiche (§1.1, 1.2 e 1.3), geognostiche (§1.4), geofisiche (§1.5) e geotecniche (§1.6) sul sottosuolo di San Giuliano di Puglia, ma la ricostruzione del modello di sottosuolo è ancora limitata dalle incertezze su profondità e andamento del substrato.

Per il comune di Ripabottoni, come riportato nel paragrafo 3, sono disponibili sia le mappe geologiche e geomorfologiche aggiornate sia 3 nuovi sondaggi downholes sia le funzioni di trasferimento calcolate per diversi punti ubicati all'interno del centro storico utilizzando metodi numerici di simulazione 1D e metodologie spettrali basate sui dati raccolti dalla rete sismica temporanea installata dal Dip.Te.Ris. presso Ripabottoni sia la distribuzione di dettaglio del livello di danno.

Per quanto riguarda i Comuni di Bonefro, Santa Croce di Magliano e Colletorto è attualmente in corso di pubblicazione una relazione riguardante l'analisi di microzonazione effettuata presso i sopracitati comuni e redatta dalla Regione Molise sotto il coordinamento della Commissione per la Microzonazione del Molise e con la collaborazione del Dip.Te.Ris. I dati analizzati durante tali studi sono di proprietà della Regione Molise e raccolgono tutte le informazioni geologiche, geomorfologiche, geotecniche e geofisiche ottenute, per ciascun Comune, attraverso l'attività svolta da professionisti, dall'Università del Molise, dagli uffici tecnici Comunali, dal Comitato per la microzonazione sismica della Regione Molise e dal Dip.Te.Ris. Il materiale, che potrà essere disponibile, può essere così catalogato:

- mappe geologiche e geomorfologiche aggiornate
- raccolta di tutti i sondaggi effettuati sul territorio comunale e definizione di profili geologici
- raccolta ed analisi di tutti i sondaggi, test downholes e prove geotecniche di laboratorio su campioni estratti
- definizione di un input sismico di tipo probabilistico
- calcolo delle funzioni di trasferimento e del fattore di amplificazione sismica (rapporto fra intensità spettrali) tramite metodi di simulazione numerica 1D per tutti i downhole catalogati

Nei paragrafi seguenti viene riportato per i Comuni di Bonefro, Colletorto e Santa Croce di Magliano lo schema di dettaglio relativo ai dati raccolti nell'ambito dello studio commissionato dalla Regione Molise.

1. SAN GIULIANO DI PUGLIA

Le analisi di scenari di scuotimento del centro urbano di San Giuliano di Puglia prevedono il coinvolgimento di numerose competenze: dalla sismologia, per la definizione dello scenario di pericolosità¹, alla geologia, geofisica e geotecnica, queste ultime in stretta interazione per la costruzione del modello di sottosuolo.

Le analisi di Risposta Sismica Locale (RSL) permetteranno la simulazione degli effetti in superficie dello scenario di pericolosità al bedrock mediante modelli numerici 1D, 2D e 3D. Il diagramma di flusso mostrato in **Figura 1.1** sintetizza il metodo che ci si propone di adottare per eseguire le analisi di scenario.

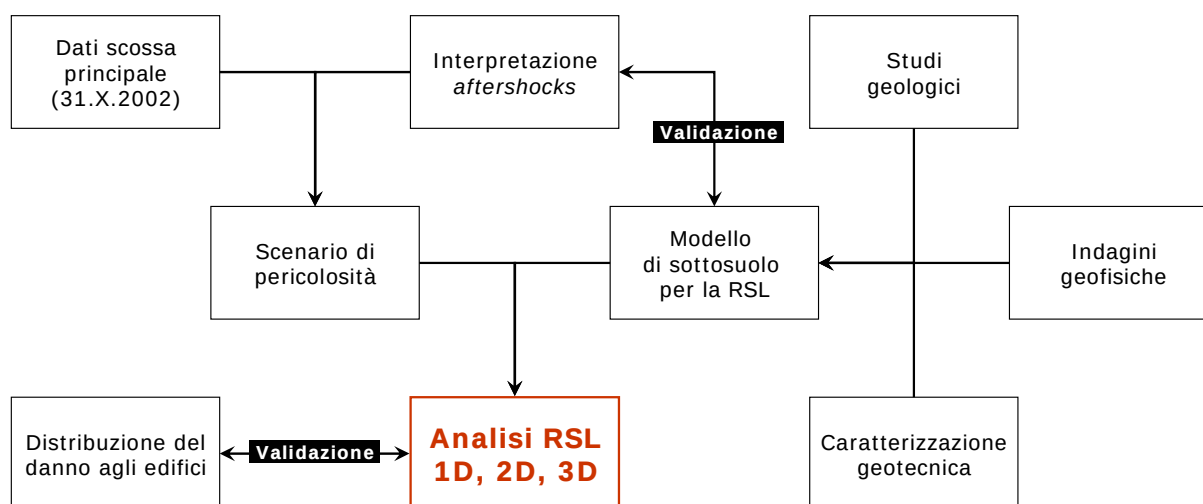


Fig. 1.1 - Diagramma di flusso per le analisi di scenario di S. Giuliano di Puglia.

Nella prima fase del Progetto sono stati approfonditi gli aspetti relativi alle indagini geologiche (§1.1, 1.2 e 1.3), geognostiche (§1.4), geofisiche (§1.5) e geotecniche (§1.6) sul sottosuolo di San Giuliano di Puglia, ma la ricostruzione del modello di sottosuolo è ancora limitata dalle incertezze su profondità e andamento del substrato, fattori notoriamente critici per le analisi di RSL. E' stato pertanto affrontato il problema dell'interpretazione e dell'analisi degli *aftershocks* (§1.7 e 1.8) registrati durante la sequenza sismica nel centro urbano per verificare diversi modelli di sottosuolo in campo lineare.

La disponibilità di accurati studi sul danneggiamento permetterà nella seconda fase del progetto di confrontare gli scenari simulati con quanto realmente accaduto (cfr. Figura 1.1), e di valutare l'attendibilità delle analisi della RSL anche in campo non lineare.

1.1 Caratteri geomorfologici e litologici

Il centro urbano di San Giuliano di Puglia è edificato su una stretta dorsale orientata in direzione NNW-SSE, alla quota media di 450 metri s.l.m.. Il centro storico, situato

¹ Presumibilmente, sarà proprio l'evento principale della sequenza Molise, occorso in data 31.X.2002 e con magnitudo calcolata sulle onde di superficie, M_s , pari a 5.6.

nella zona meridionale, sorge su una formazione flyschoidale caratterizzata da elevata acclività; l'area di recente espansione, che ha subito i maggiori danni a causa dell'evento sismico, sorge nella parte centro-settentrionale, ha una morfologia superficiale che mostra pendenze più dolci per la presenza di terreni a prevalente componente argillosa. In tali terreni sono localizzati fenomeni di dissesto (**Figura 1.2**), riferibili essenzialmente a fenomeni gravitativi di versante di tipo superficiale (alcuni peraltro acuiti dagli eventi sismici del 2002), ed a processi di dilavamento.

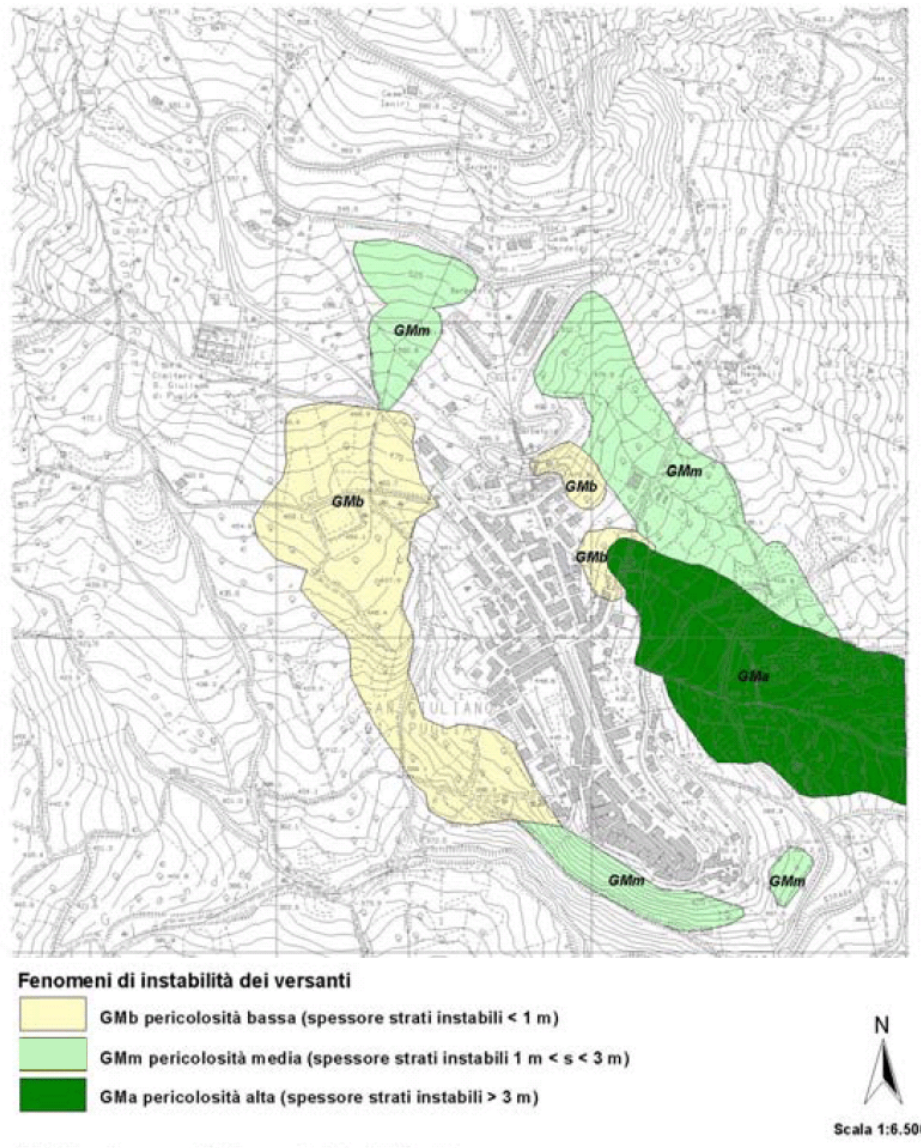


Fig. 1.2 – Mappa di pericolosità dovuta ad instabilità dei versanti (da Baranello et al., 2003).

Il sottosuolo del territorio urbano è caratterizzato dalla presenza di due unità principali, che si estendono in profondità per diverse centinaia di metri: il flysch di Faeto, affiorante nel centro storico, e le marne argillose di Toppo Capuana, nella zona di più recente sviluppo urbano.

Il flysch di Faeto è una formazione litoide del Miocene inferiore, costituita da un'alternanza di calcari detritici, calcari marnosi, marne bianche ed argille verdi, affiora sia nell'estremità meridionale della dorsale, in un'unità relativamente scompaginata (**Figura 1.3**), che nel settore settentrionale, a monte dell'abitato, dove si

presenta molto tettonizzata e smembrata.



Fig. 1.3 - Affioramento del flysch di Faeto nella zona Sud del centro abitato (foto eseguita durante i lavori di ricostruzione).

L'unità di Toppo Capuana (Miocene superiore) è costituita prevalentemente da argille marnose grigio azzurre e da marne argillose. La parte sommitale di tale formazione, di spessore limitato (generalmente inferiore a 10 metri), è caratterizzata da un grado di fessurazione da medio ad intenso, e si presenta alterata assumendo una colorazione avana o grigio avana con tonalità verdognole (**Figura 1.4a**). Le argille avana sfumano nelle sottostanti argille marnose e marne argillose grigie (**Figura 1.4b**), che talora presentano anch'esse tonalità verdognole, sono meno intensamente fratturate e sono costituite da livelli più argillosi ai quali sono intercalati strati di marne argillose dure.

Il contatto tra il flysch e la formazione argillosa nella zona S del centro abitato si presenta con immersione piuttosto ripida in direzione NE.

Il deposito di marne argillose è ovunque ricoperto da una coltre detritica, con spessore variabile, costituita da materiali eterogenei (riporti, rimaneggiamenti, accumuli di frana e terreni colluviali).



Fig. 1.4 - Le differenti mesostrutture di argilla avana (a) e argilla grigia (b) (da Silvestri et al., 2006).

1.2 Modelli geologici proposti

Nel periodo compreso tra novembre 2002 e marzo 2003, docenti e ricercatori dell'Università del Molise, in collaborazione con l'Ufficio Servizio Sismico Nazionale del DPC e la Geoservizi (CB)², hanno effettuato ricerche e rilievi geologico-strutturali nell'area in cui ricade il centro abitato di S. Giuliano di Puglia.

L'assetto geologico elaborato a partire da tali rilievi consiste in una carta geologica e relative sezioni in scala 1:5000 (**Figura 1.4**), contenute nel *Rapporto finale sulla Microzonazione Sismica del centro abitato di San Giuliano di Puglia* (Baranello et al., 2003).

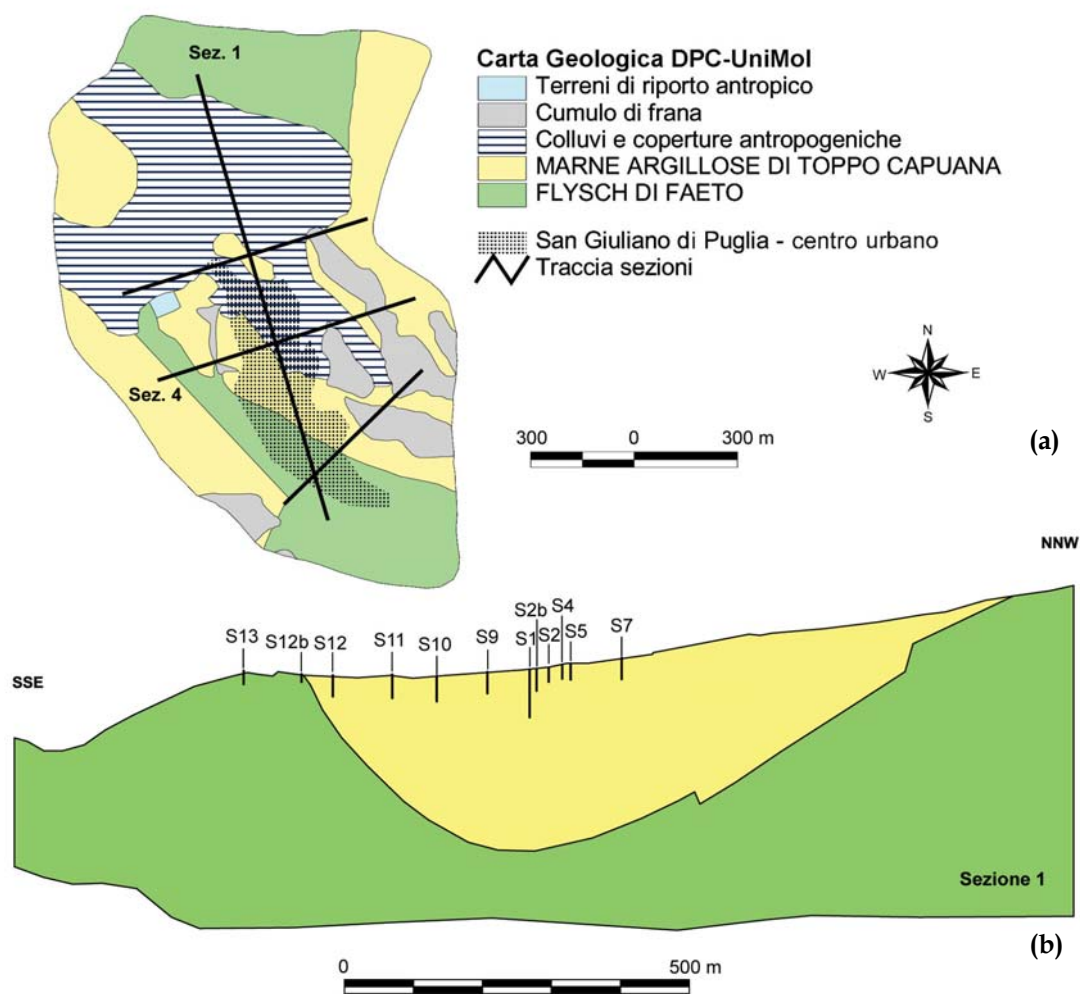


Fig. 1.5 - Carta (a) e sezione (b) geologica DPC-UniMol (Baranello et al., 2003, modificato).

Il modello geologico corrispondente (che sarà nel seguito identificato con l'acronimo DPC-UniMol) è caratterizzato da una struttura a doppia sinclinale del flysch di Faeto. In particolare, si ipotizza che il substrato delle argille sia costituito dalla formazione flyschoidale, deformata da un sistema di pieghe con assi orientati all'incirca NW-SE, e caratterizzata da strutture di tipo asimmetrico verso i quadranti

² In qualità di *general contractor* per la campagna di indagini geognostiche, commissionate congiuntamente dal DPC e dalla Procura della Repubblica presso il Tribunale di Larino.

Nord-orientali. L'area risulta inoltre attraversata da faglie subverticali con cinematica prevalentemente estensionale e con orientazioni variabili da circa N-S a NW-SE. Nella sezione 1 in Figura 1.4 sono evidenziati i sondaggi della campagna di indagini congiunta DPC-Procure effettuati lungo la dorsale. Come si può notare, la profondità cui sono state spinte le perforazioni è troppo limitata per poter confermare le ipotesi avanzate sull'andamento del substrato.

Successive indagini geologiche, condotte da Melidoro (2004) e Guerricchio (2005) per conto della Procura, hanno avanzato dubbi sulla geometria a catino del modello DPC-UniMol. Infatti, le analisi micropaleontologiche su 8 campioni estratti da 4 sondaggi eseguiti nelle marne argillose di Toppo Capuana hanno evidenziato che l'età di tale formazione va sostanzialmente dal Tortoniano superiore (sondaggio S1) al Messiniano inferiore (sondaggi S10 e S12), e che quindi nella zona meridionale del centro abitato le argille più recenti sono a contatto con l'unità flyschoidale. Questa datazione è incompatibile con una struttura a sinclinale.

Nella **Figura 1.5** sono riportate la carta geologica (a) e la relativa sezione Nord-Sud (b) redatte dai due Autori, che nel seguito per brevità di notazione saranno identificate come UniCal-PoliBa. Come si può notare, non viene formulata nessuna ipotesi particolare sull'andamento geometrico del substrato.

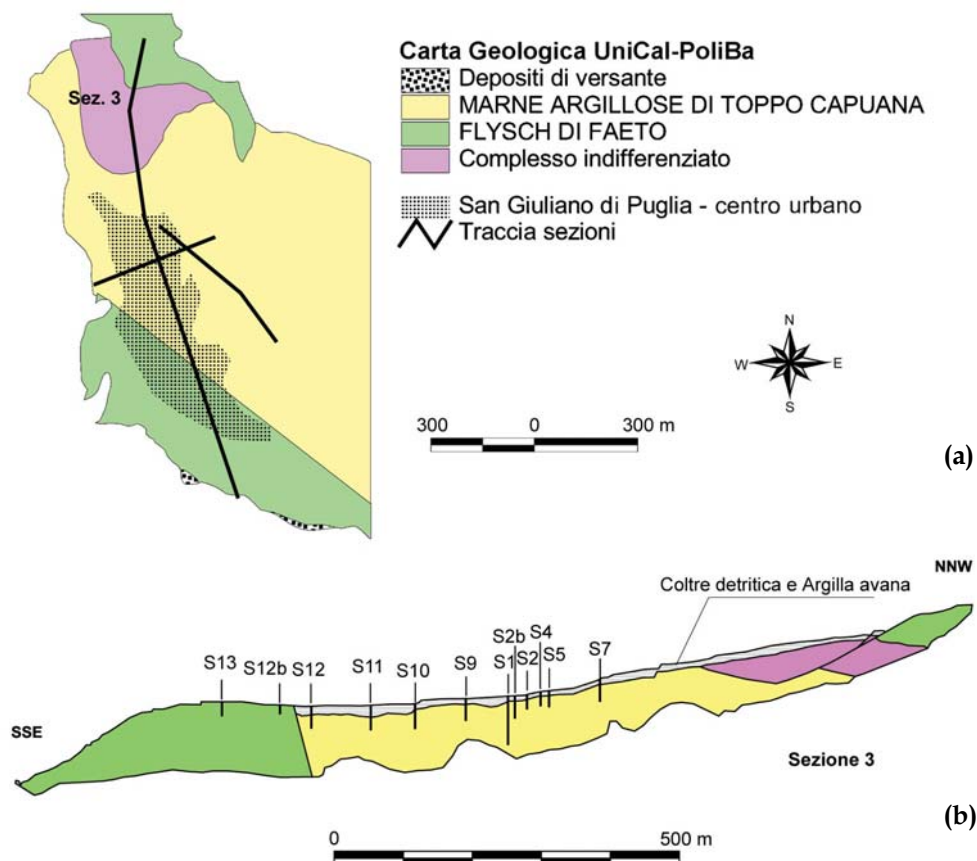


Fig. 1.6 - Carta (a) e sezione (b) geologica UniCal-PoliBa (da Melidoro, 2004, e Guerricchio, 2005).

Da un'accurata analisi dei sondaggi eseguiti nel centro abitato, è stato rilevato che gli spessori della coltre detritica variano tra 2.5-4 metri circa nei sondaggi da S1 a S4, nella zona di recente espansione, fino a 7.5 metri in S6, eseguito più ad Est, dove sono

localizzati i fenomeni franosi più intensi (cfr. Figura 1.1).

Nella sezione Nord-Sud in Figura 1.5b, è indicato per motivi di scala lo spessore complessivo (massimo 12 m circa) della coltre detritica e dell'argilla avana; come si può osservare, il limite stratigrafico tra questa e l'argilla grigia sembra approfondirsi verso S della dorsale.

Ulteriori studi geologici, pubblicati tra l'altro a cura di ricercatori del CNR e dell'INGV (Giaccio et al., 2004), forniscono un'ulteriore interpretazione dei rapporti stratigrafici tra le due formazioni principali, ipotizzando un meccanismo di sovrascorrimento del flysch sul deposito delle marne argillose, come mostrano la carta geologica e la sezione Nord-Sud riprodotte in **Figura 1.6**. Questo modello geologico (identificabile con "CNR-INGV") sembra compatibile con la datazione eseguita da Melidoro (2004) e Guerricchio (2005), ed appare geometricamente ancora più complesso rispetto all'ipotesi DPC-UniMol.

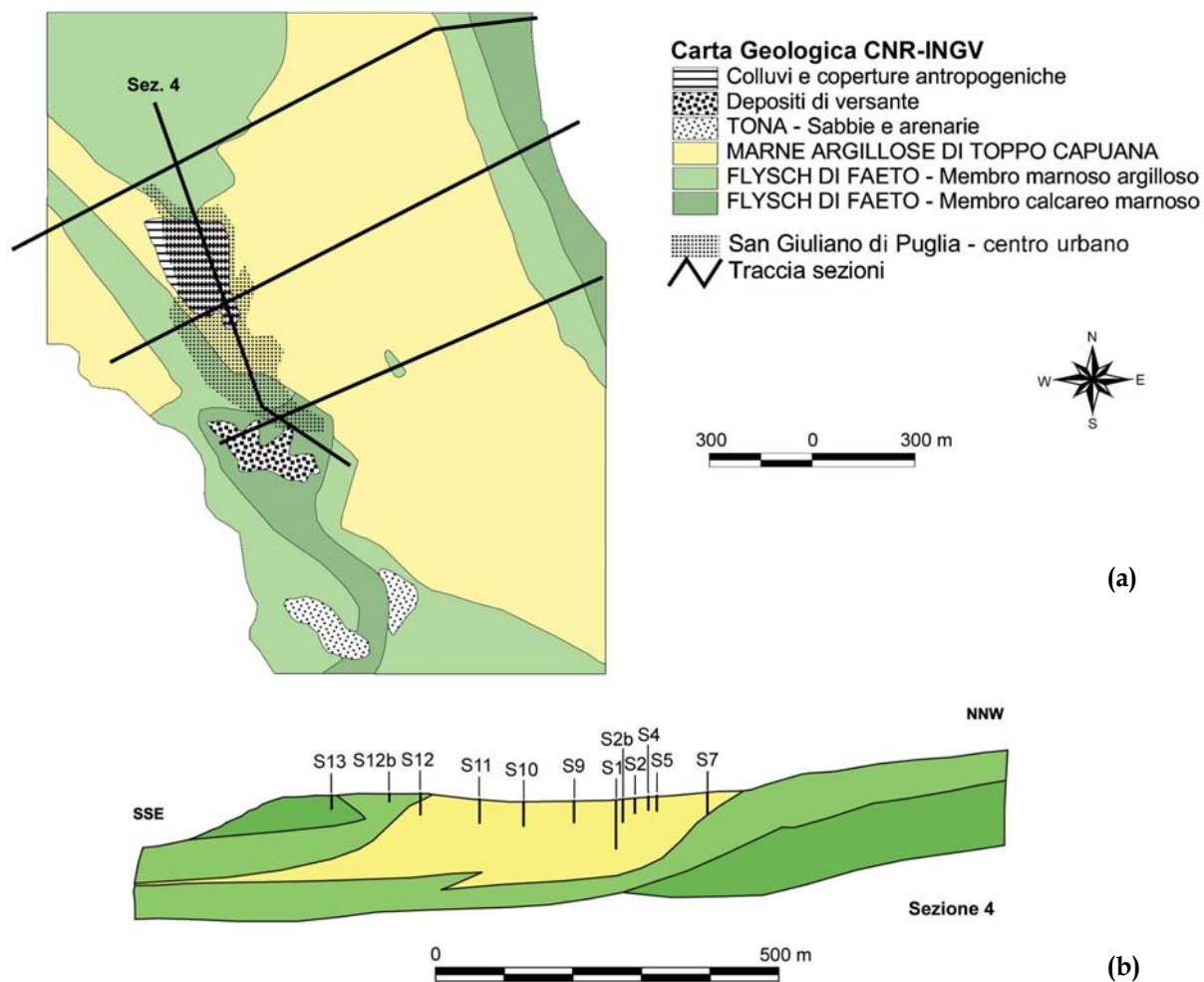


Fig. 1.7 - Carta (a) e sezione (b) geologica CNR-INGV (Giaccio et al., 2004, modificata).

1.3 Analisi delle stratigrafie dei sondaggi

Le campagne di sondaggi geognostici che in diverse fasi hanno interessato il territorio in esame, sono suddivise in tre gruppi cronologici:

- prima della crisi sismica: indagini del Comune di San Giuliano di Puglia per il P.R.G. (1992) e della Regione Molise (1996), localizzate prevalentemente nelle zone di potenziale espansione a N-NW del centro urbano;
- subito dopo la crisi sismica: programma congiunto DPC-Procura (gennaio-marzo 2003), finalizzato alla Microzonazione Sismica ed alle indagini giudiziarie sul crollo della "Scuola F. Jovine"³, con l'obiettivo principale di caratterizzare una sezione longitudinale ed una trasversale alla dorsale del centro abitato;
- indagini per la ricostruzione del centro urbano (2004-5), eseguite intensivamente nell'intero abitato.

In **Figura 1.8** sono rappresentate le ubicazioni di tutte le 129 indagini effettuate rispetto alla carta geologica UniCal, mentre la **Figura 1.9** riporta le stratigrafie dei 69 sondaggi riconducibili alla terminologia litologica introdotta nel § 1.1.

Le campagne del 1992 e del 1996 (siglate con l'iniziale 'V') hanno fornito 20 stratigrafie di profondità variabile tra 15 e 30m; 12 di queste non sono state riportate in Figura 1.9, perchè di interpretazione controversa, oppure non omogenea con i litotipi proposti al §1.1.

Durante la campagna DPC-Procura sono state condotte le seguenti indagini (contraddistinte con 'S'):

- rilievo topografico mediante strumentazione GPS;
- 15 sondaggi a rotazione, di cui uno (S1) spinto fino a 70 m;
- 8 sondaggi a distruzione di nucleo;
- installazione di 2 piezometri di Casagrande e di 4 piezometri a tubo aperto;
- 3 prove penetrometriche statiche (CPT), eseguite a pochi metri dai sondaggi S1, S4 ed S5;
- 8 prove down-hole (S2, S3, S5, S7, S8, S9, S10, S11) nelle argille, e 2 nel flysch (SD1, SD2);
- 2 prove cross-hole (S1, S4) nelle argille, e 1 nel flysch (S13);
- 2 pozzetti esplorativi.

Le indagini per la ricostruzione (sigla 'P'), distribuite in maniera più uniforme ed intensiva delle precedenti rispetto all'area urbana edificata, permettono un ulteriore ampliamento delle conoscenze sulle caratteristiche stratigrafiche entro i primi 20-25 m di profondità. Si tratta complessivamente di 86 verticali, delle quali:

- 53 sondaggi (sigle 'PP-S' e 'PE-S'), con stratigrafie reinterpretate coerentemente con la terminologia litologica introdotta in §1.1; di questi in Figura 1.9 ne sono riportati 46, perchè gli altri sono distanti dal centro urbano⁴;
- 32 prove penetrometriche dinamiche non *standard* (sigle 'PP-DP' e 'PE-DP'),

³ Si ringrazia in proposito la Procura della Repubblica di Larino per aver rilasciato autorizzazione all'uso dei dati sul sottosuolo per finalità di ricerca scientifica.

⁴ Si tratta delle indagini relative alla strada che da San Giuliano di Puglia porta fino al nuovo insediamento costruito dal DPC per l'emergenza.

senza stratigrafia e non particolarmente utili per la caratterizzazione geotecnica ai fini della risposta sismica locale;

- una sola prova penetrometrica statica (PP-CPT1), a Nord del centro abitato.

A queste si aggiungono altri 6 sondaggi in prossimità della chiesa, eseguiti nella formazione flyschoidale insieme a prospezioni *georadar*, per verificare geometria ed integrità delle fondazioni del monumento. Le stratigrafie, pressoché identiche, presentano un sottile strato di coltre detritica e poi flysch di Faeto fino alle massime profondità indagate (40 metri). Di notevole interesse potrebbe risultare acquisire i risultati di una prova down-hole eseguita in uno di tali sondaggi ('PAS2+DH').

Dall'esame complessivo delle 69 colonne stratigrafiche sintetizzate in Figura 1.9, si rileva che 57 si sviluppano interamente nella formazione marno-argillosa, 11 nel flysch, e solo in un caso (PE-S1) viene attraversato il contatto tra le argille grigie e la formazione litoide.

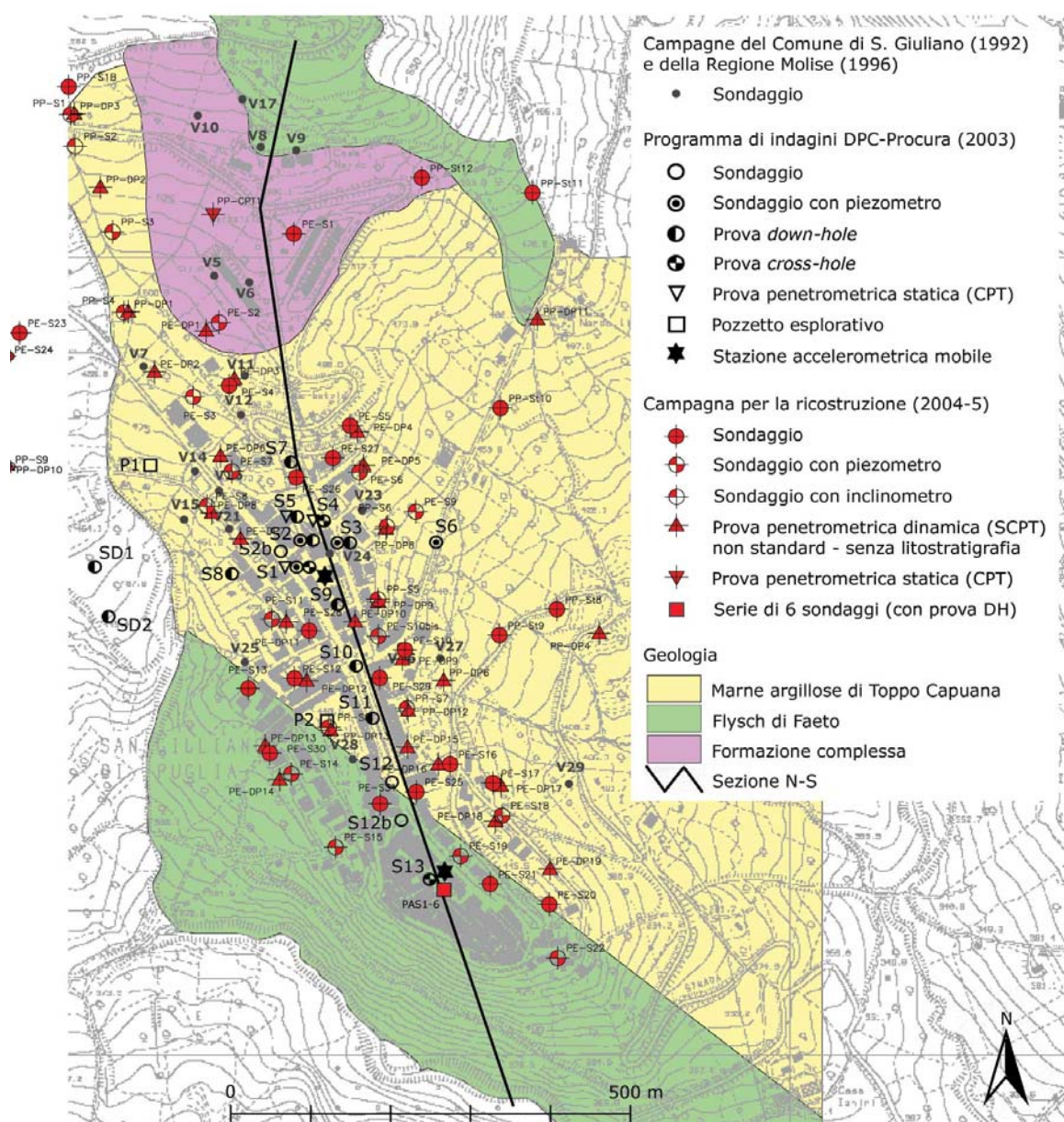


Fig. 1.8 - Ubicazioni delle indagini geognostiche disponibili sovrapposte alla carta geologica di Fig. 1.6a.

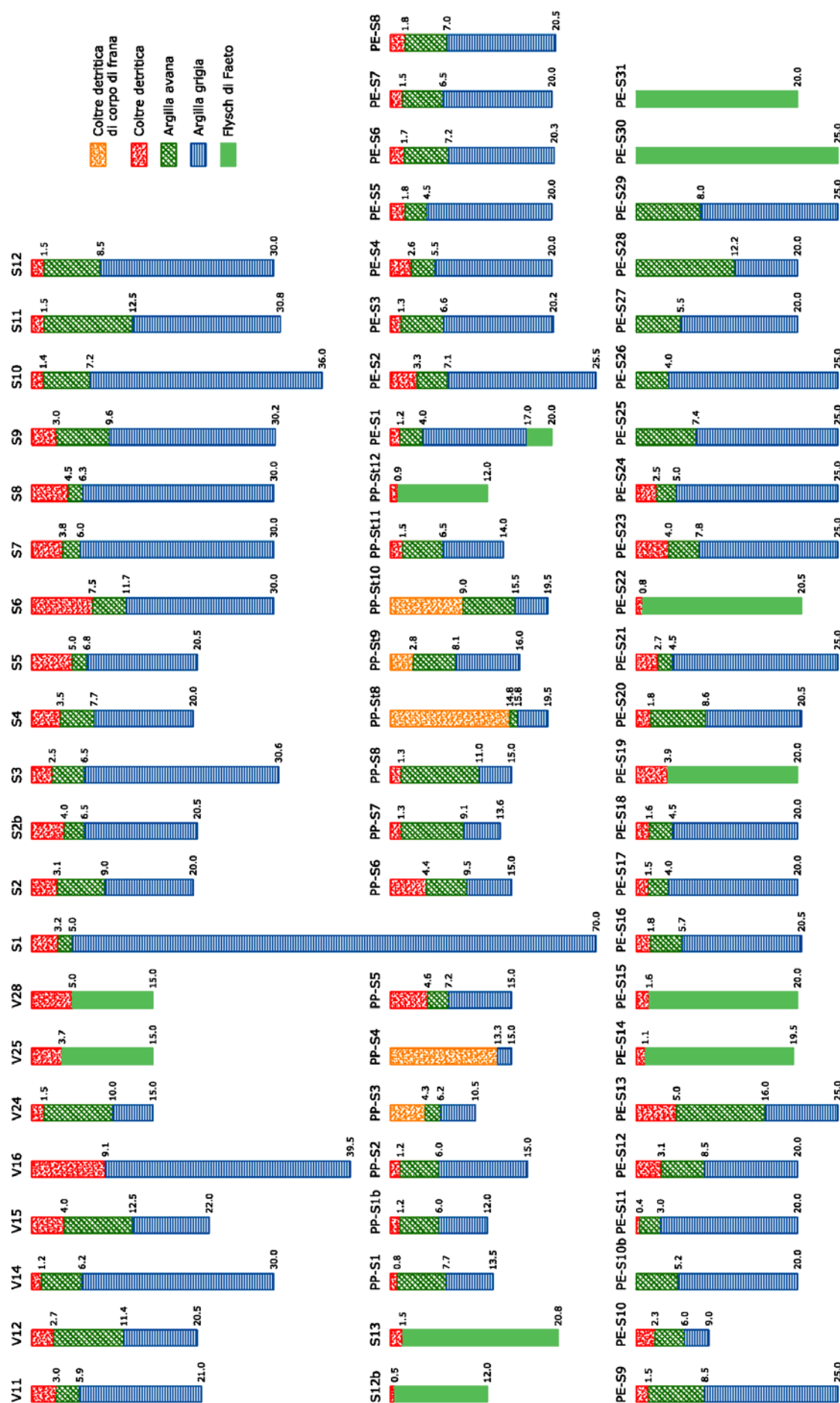


Fig. 1.9 – Stratigrafie sintetiche dei sondaggi eseguiti nelle diverse campagne di indagine.

La diffusione areale ed il gran numero di stratigrafie complessivamente disponibili sono quindi ampiamente sufficienti per ricostruire con notevole dettaglio la variabilità dei caratteri superficiali delle marne argillose di Toppo Capuana, e potrà essere di notevole interesse esaminarne l'influenza sulle previsioni delle analisi dinamiche di scenario.

Per quanto riguarda invece il flysch di Faeto, i soli sondaggi geognostici non forniscono indicazioni altrettanto esaurienti sui caratteri geometrici di rilievo ai fini dell'analisi della RSL; di tale formazione interessa infatti, più che il dettaglio stratigrafico, soprattutto la morfologia sepolta su scala più ampia.

In parallelo ai necessari approfondimenti sui rapporti morfo-stratigrafici tra le due principali formazioni (mediante indagini geofisiche, cfr. § 1.4), nei prossimi mesi saranno impostati diversi modelli per la caratterizzazione geometrica del deposito argilloso:

- un 'modello deterministico', in cui le sezioni 2D da analizzare saranno definite mediante la consueta tecnica di proiezione ed interpolazione lineare delle stratigrafie;
- un 'modello IDW' (*Inverse Distance Weight*), sviluppato in 3D, che in ogni verticale definisce gli spessori dei diversi litotipi in base alle indicazioni di tutti i sondaggi disponibili (effettuandone, appunto, una media pesata in base alla distanza); da esso verranno poi 'tagliate' le sezioni di interesse per le analisi 2D;
- un 'modello geostatistico' (cfr. Isaaks, 1989 e Clark, 2001), anch'esso da sviluppare inizialmente in 3D, seguendo un approccio definito '*indicator kriging*', basato su una distribuzione probabilistica delle stratigrafie dei sondaggi⁵.

Si è intanto proceduto alla stima di una stratigrafia rappresentativa dei caratteri tipici del sottosuolo nell'area del centro abitato edificata sulle marne argillose di Toppo Capuana. A tale scopo sono stati selezionati i 33 sondaggi stratigrafici ricadenti in quest'area (**Figura 1.10a**), ed individuati gli spessori medi dei terreni più superficiali (coltre detritica ed argilla avana). Dal computo sono stati esclusi 6 sondaggi (PE-S 25, 26, 27, 28, 29, e V16), le cui descrizioni non permettono l'individuazione del limite stratigrafico tra coltre detritica e argilla avana. La stratigrafia tipica per le marne argillose nel centro urbano, ottenuta eseguendo la media delle profondità alla quale è individuato il passaggio di strato coltre detritica - argilla avana - argilla grigia, è mostrata in **Figura 1.10b**.

⁵ Le verticali sono contenute in un dominio di forma sferica (o meglio di un ellissoide), con dimensioni variabili da zero fino a considerare tutti i dati. I parametri della distribuzione probabilistica (nella maggior parte dei casi di tipo normale o log-normale) si calcolano in funzione di una dimensione caratteristica del dominio, in modo tale da ottenere il 'semi-variogramma sperimentale' della serie di dati; il metodo fornisce anche una misura della probabilità di errore commesso nella stima (cfr. Penna, 2004).

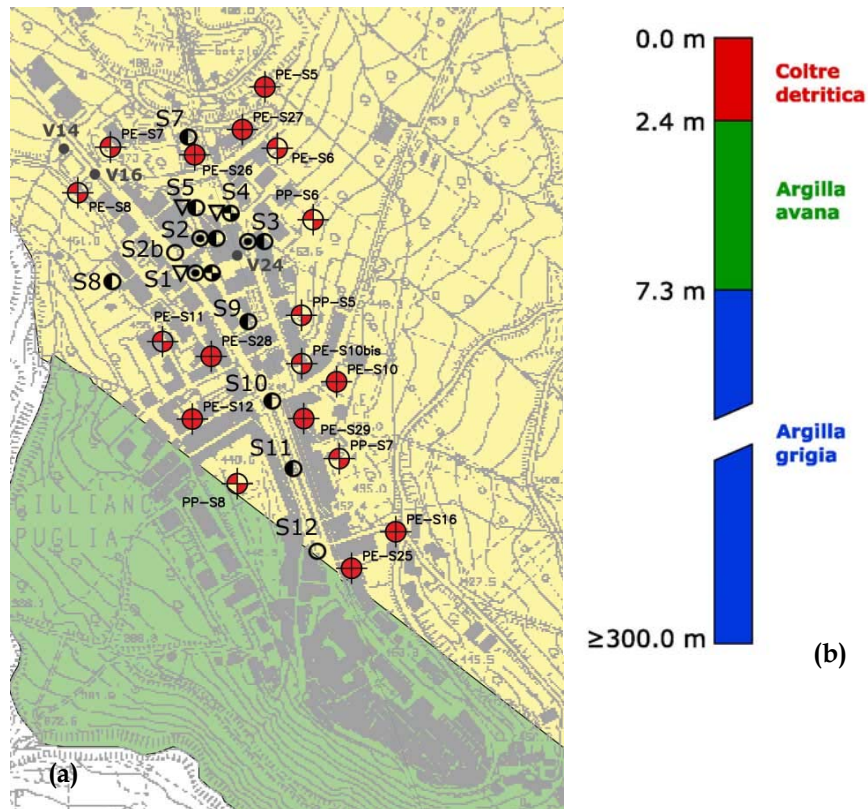


Fig. 1.10 - Sondaggi utilizzati (a) per la stima della stratigrafia tipica della formazione argillosa (b).

1.4 Prospezioni geoelettriche

La prospezione geoelettrica consiste, com'è ben noto, nella determinazione sperimentale del parametro della resistività apparente, attraverso misure congiunte di intensità di corrente elettrica, inviata nel sottosuolo mediante una coppia di elettrodi infissi nel terreno, e di tensione ai capi di una seconda coppia di elettrodi, anch'essi in contatto diretto col suolo.

L'analisi del comportamento della resistività apparente, al mutare della dimensione e posizione del dispositivo elettrodico di misura, nell'ambito dei volumi investigati, fornisce un contributo significativo al disegno dell'assetto geologico-strutturale locale, nonché alla soluzione di eventuali problematiche applicative ad esso connesse.

Nel tempo, sono state usate varie modalità operative per l'acquisizione dei dati di resistività: Sondaggi Elettrici Verticali (SEV), per la determinazione della variazione verticale della resistività escludendo variazioni laterali, e Sondaggi Elettrici Orizzontali (SEO) o Profili di resistività, per la determinazione delle variazioni laterali della resistività estesa fino ad una profondità d'indagine prefissata. In entrambi i casi, si ottengono informazioni 1D sulla stratificazione del sottosuolo.

Recentemente, è stata sviluppata una tecnica di sondaggio, la tomografia di resistività elettrica, per l'investigazione di aree a geologia complessa, che contempla ambedue le modalità operative.

In particolare, la tecnica della tomografia di resistività elettrica di superficie lungo un profilo, allo stato attuale decisamente meno usuale del convenzionale sondaggio geoelettrico verticale, consiste nella realizzazione di un'immagine 2D di estremo dettaglio del comportamento areale della resistività elettrica lungo il piano della sezione verticale passante per il profilo scelto.

La notevole risoluzione ottenuta mediante tale tecnica permette di discriminare molto più efficacemente i contrasti di resistività esistenti nel sottosuolo, fornendo così informazioni più attendibili sulle condizioni fisiche delle rocce, sulla presenza di superfici di discontinuità litologico-stratigrafiche e/o strutturali (limiti, faglie, superfici di scorrimento etc.), sulla presenza ed andamento nel sottosuolo delle falde acquifere e/o di fluidi di varia origine.

Negli ultimi anni, l'avvento di nuovi sistemi di acquisizione multicanale (sistemi multielettrodi), che hanno ridotto notevolmente i tempi di acquisizione dati, e lo sviluppo di nuovi e più sofisticati algoritmi di inversione dei dati sperimentali ha incrementato considerevolmente l'utilizzo delle tomografie di resistività elettriche in molteplici campi di indagine.

L'indagine geoelettrica eseguita nel Comune di San Giuliano di Puglia è consistita nella realizzazione di tre tomografie di resistività elettrica (ERT), ubicate lungo i profili riportati in **Figura 1.11**. La scelta degli allineamenti dei profili è scaturita in base a considerazioni di tipo geologico-strutturale e logistico.

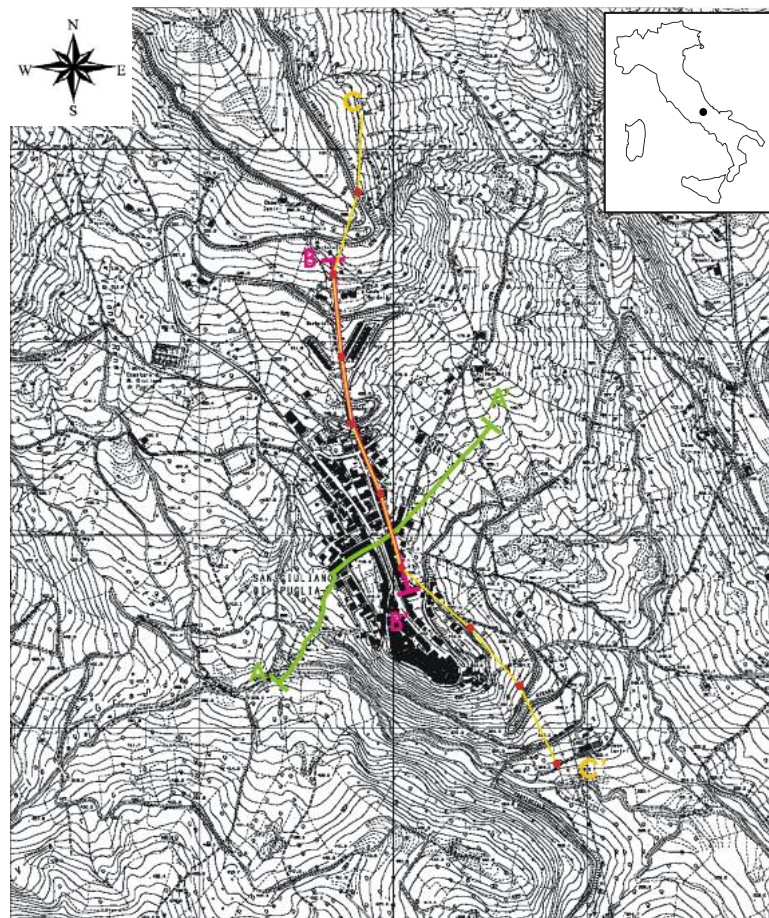


Fig. 1.11 - Pianta del Comune di San Giuliano di Puglia (CB) con ubicazione dei profili delle tomografie di resistività elettrica ERT AA', BB' e CC'.

Le tomografie ERT AA' e ERT BB', in particolare, sono state eseguite mediante un sistema multielettrodo a 48 canali con spaziatura elettrodoica di 20m, mentre la tomografia ERT CC' è stata effettuata mediante un sistema manuale disaccoppiato con spaziatura interelettrodoica pari a 200 m.

La lunghezza complessiva delle tomografie ERT AA' e ERT BB' è risultata essere pari a 940 m e con una profondità media di esplorazione pari a circa 200 m, mentre la tomografia ERT CC' ha raggiunto una lunghezza di 1800 m ed una profondità di circa 340 m (Figura 1.12).

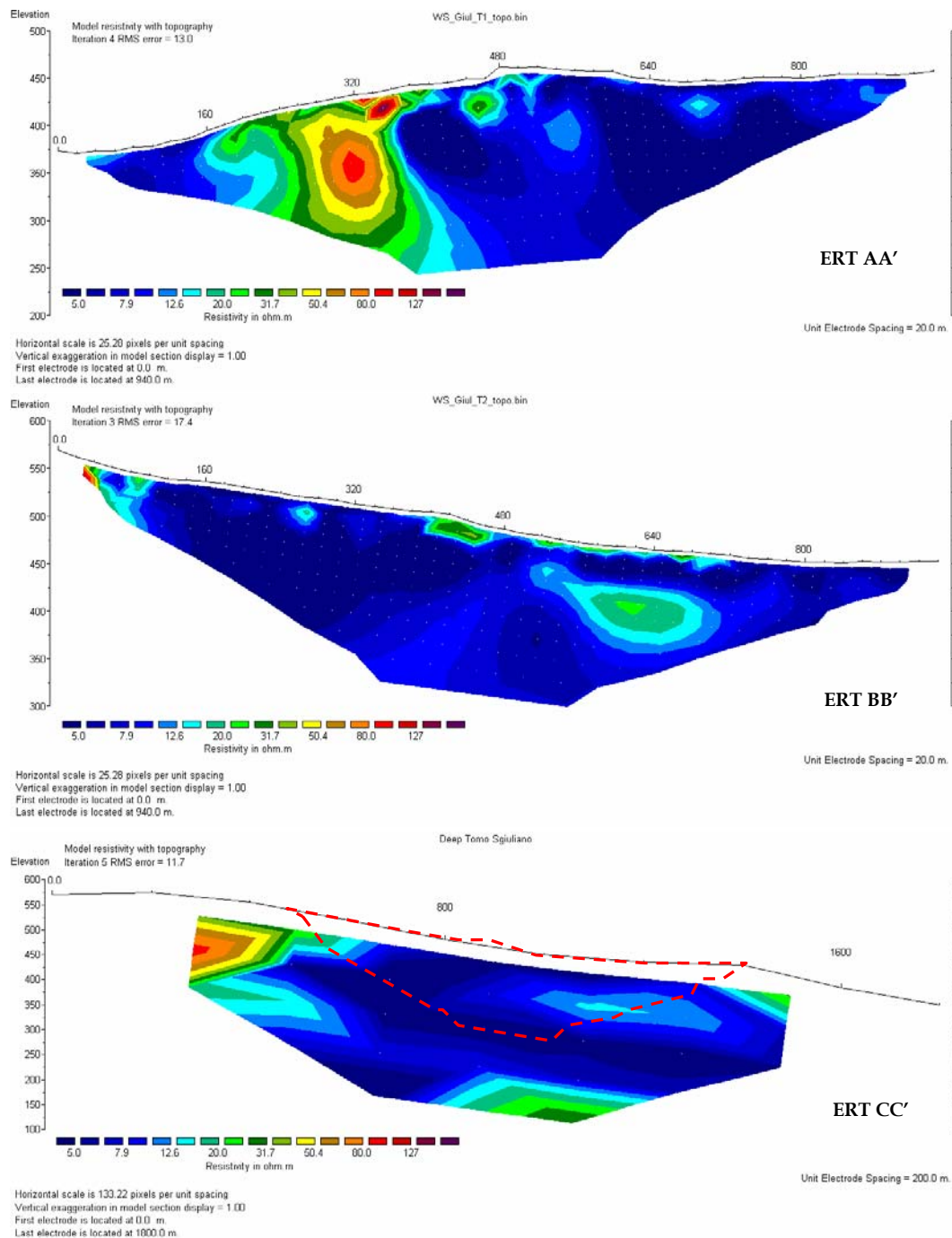


Fig. 1.12 - Tomografie di resistività elettrica ERT AA', BB' e CC' eseguite nel Comune di San Giuliano di Puglia (CB). Il poligono tratteggiato in rosso rappresenta l'area di sovrapposizione tra la ERT BB' e la CC'.

I dati di resistività elettrica sono stati acquisiti mediante il georesistivimetro “SYSCAL R2” della Iris Instruments, utilizzando i dispositivi elettrodi Dipolo-Dipolo e Wenner-Schlumberger per investigare sia la presenza di strutture verticali (per esempio faglie) che orizzontali (per esempio piani di stratificazione).

L’inversione dei dati di resistività apparente è stata effettuata utilizzando il software RES2DINV. Tale software utilizza una routine d’inversione ai minimi quadrati smoothness-constrained implementata da una tecnica di ottimizzazione quasi-Newton, che permette di determinare automaticamente un modello bidimensionale di resistività per il sottosuolo, partendo dai dati misurati in superficie mediante varie tecniche geoelettriche. Il metodo d’ottimizzazione modifica il modello 2D di resistività reali tentando di ridurre iterativamente la differenza tra i valori di resistività apparenti misurati e quelli calcolati dal modello. Lo scarto quadratico medio (RMS) dà una misura di tale differenza. In questo lavoro, il numero di iterazioni per il raggiungimento del best fit è risultato essere variabile (comunque inferiore a 5), ottenendo un errore del RMS relativamente basso, inferiore nel complesso a 17.4.

Le tomografie mostrano nel complesso un basso range di resistività ($5 < \rho < 160 \Omega\text{m}$), indice di terreni a forte componente argillosa e/o con notevole contenuto d’acqua. Si notano, inoltre, bruschi passaggi sia laterali che verticali dei valori di resistività (soprattutto nella ERT AA’ e CC’), dovuti a probabili discontinuità verticali e/o orizzontali.

In seguito, le tomografie di resistività elettrica saranno confrontate e tarate con dati derivanti da indagini geologiche, eventuali altre indagini geofisiche e con dati di pozzi geognostici presenti nell’area.

1.5 Caratteri geotecnici della formazione argillosa

Come è noto, le proprietà fisico-meccaniche di principale interesse per la modellazione numerica della risposta sismica locale (cfr. Lanzo & Silvestri, 1999) consistono in:

- peso dell'unità di volume dei terreni e del substrato ($\gamma=\rho g$);
- velocità delle onde di taglio (V_s) e di compressione (V_p) nei terreni e nel substrato;
- leggi di variazione di rigidezza a taglio (G)⁶ e smorzamento (D) dei terreni con la deformazione tangenziale γ .

In **Figura 1.13** sono mostrate i profili di velocità V_s dedotti dalle prove *cross-hole* (CH) e *down-hole* (DH), confrontati con i valori misurati in prove di colonna risonante (RC) su provini di laboratorio riconsolidati a tensioni prossime a quelle geostatiche. I dati sono diagrammati separatamente, con riferimento a ciascuna delle tre unità litologiche caratterizzanti la formazione argillosa.

I valori delle velocità delle onde di taglio delle prove DH sono rappresentati con linee continue o tratteggiate, rispettivamente per le verticali presso la stazione accelerometrica mobile Nord e per tutte le altre verticali; i profili sono costanti a tratti, poiché sono stati ottenuti da una procedura di inversione dei tempi d'arrivo delle onde S (Mancuso, 1996).

Nelle prove CH eseguite nella campagna DPC-Procura è stata utilizzata una sorgente di impulsi di tipo esplosivo, non polarizzata e quindi poco idonea per la registrazione di tempi d'arrivo delle onde S. Pertanto i profili di V_s relativi alle prove *cross-hole* S1-S1bis, S4-S4bis (nella formazione argillosa), S13-S13bis (nella formazione flyschoida) non sono attendibili, mentre risultano più credibili i valori di velocità delle onde P.

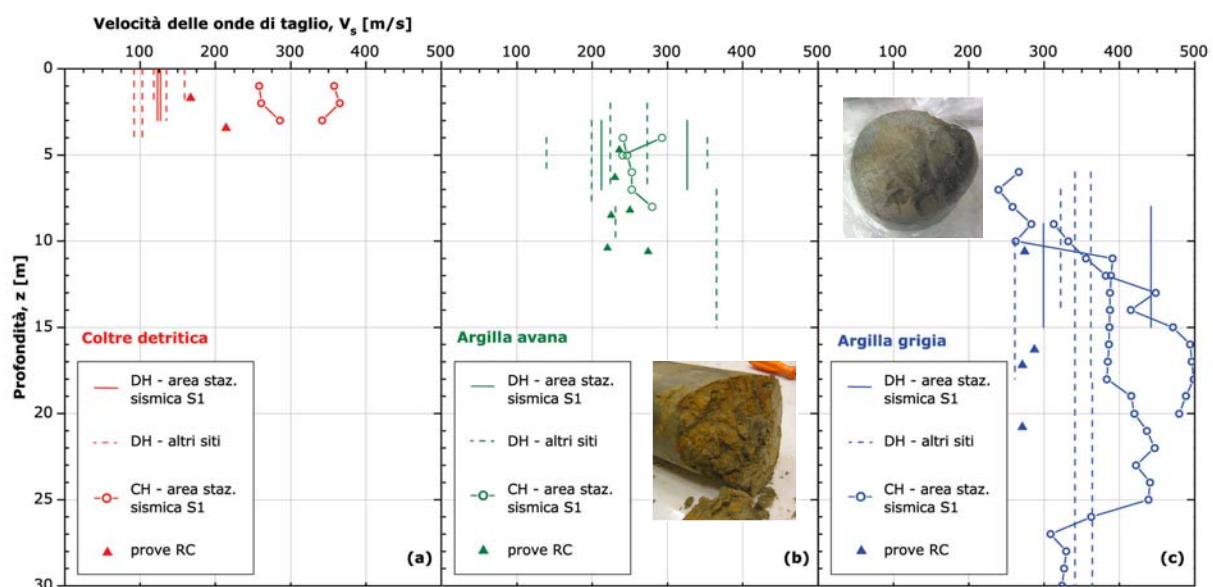


Fig. 1.13 – Profili verticali di velocità delle onde di taglio nelle formazioni della coltre detritica (a), dell'argilla avana (b) e dell'argilla grigia (c) (Silvestri et al., 2006, modificata).

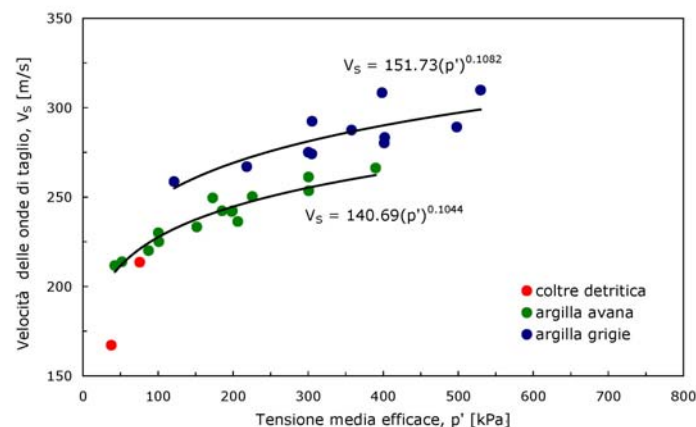
⁶ Si ricorda che alle deformazioni minime (in campo lineare) $G=G_0=\rho V_s^2$.

In **Figura 1.14a** sono riportati i risultati delle prove di colonna risonante eseguite presso l'Università di Napoli, che hanno permesso di definire per ciascun terreno le relazioni tra velocità delle onde di taglio (V_S) e tensione efficace media (p') nella forma:

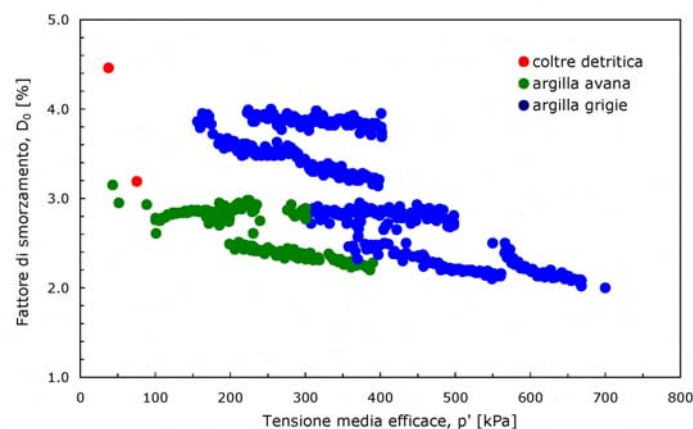
$$V_S = a \cdot (p')^n \quad (1.1)$$

Nel grafico sono mostrate i valori di V_S misurati al termine di ciascuna fase di consolidazione, e le funzioni (1.1) ricavate dalla regressione dei dati sperimentali; si osservi che le espressioni dedotte per le argille avana e grigie sono caratterizzate da esponenti n simili, cioè presentano la stessa tendenza alla variazione con la profondità. I valori di riferimento sono superiori di circa il 20% per l'unità sottostante, caratterizzata da un coefficiente a maggiore. La circostanza è giustificabile attraverso l'analisi della relazione tra la storia tensionale di questi terreni e la mesostruttura, associata alle diverse vicissitudini di alterazione e fessurazione (cfr. Silvestri et al., 2006).

La **Figura 1.14b** rappresenta la variazione del fattore di smorzamento iniziale, D_0 , con la tensione efficace, p' , durante le fasi di consolidazione nelle prove RC. Si può notare che i valori di D_0 nell'argilla grigia sono superiori a quelli dell'argilla avana per p' inferiori a 400 kPa, mentre oltre tale valore sembrano approssimare la tendenza del materiale più intensamente fessurato.



(a)



(b)

Fig. 1.14 - Risultati di prove di colonna risonante a basse deformazioni a tensione media efficace crescente, in termini di velocità delle onde di taglio (a) e di fattore di smorzamento iniziale (b) (Silvestri et al., 2006, modificata).

Per completare la definizione del modello fisico-meccanico di sottosuolo, le determinazioni dei parametri di rigidità e smorzamento alle basse deformazioni, G_0 e D_0 , sono state integrate dai risultati ottenuti dalle prove di colonna risonante eseguite a deformazioni medio-elevate presso l'Università di Napoli. In **Figura 1.15** sono rappresentati i risultati in termini di leggi di variazione del modulo di taglio G (normalizzato rispetto al suo valore a basse deformazioni, G_0) e del fattore di smorzamento D , in funzione del livello di deformazione tangenziale γ .

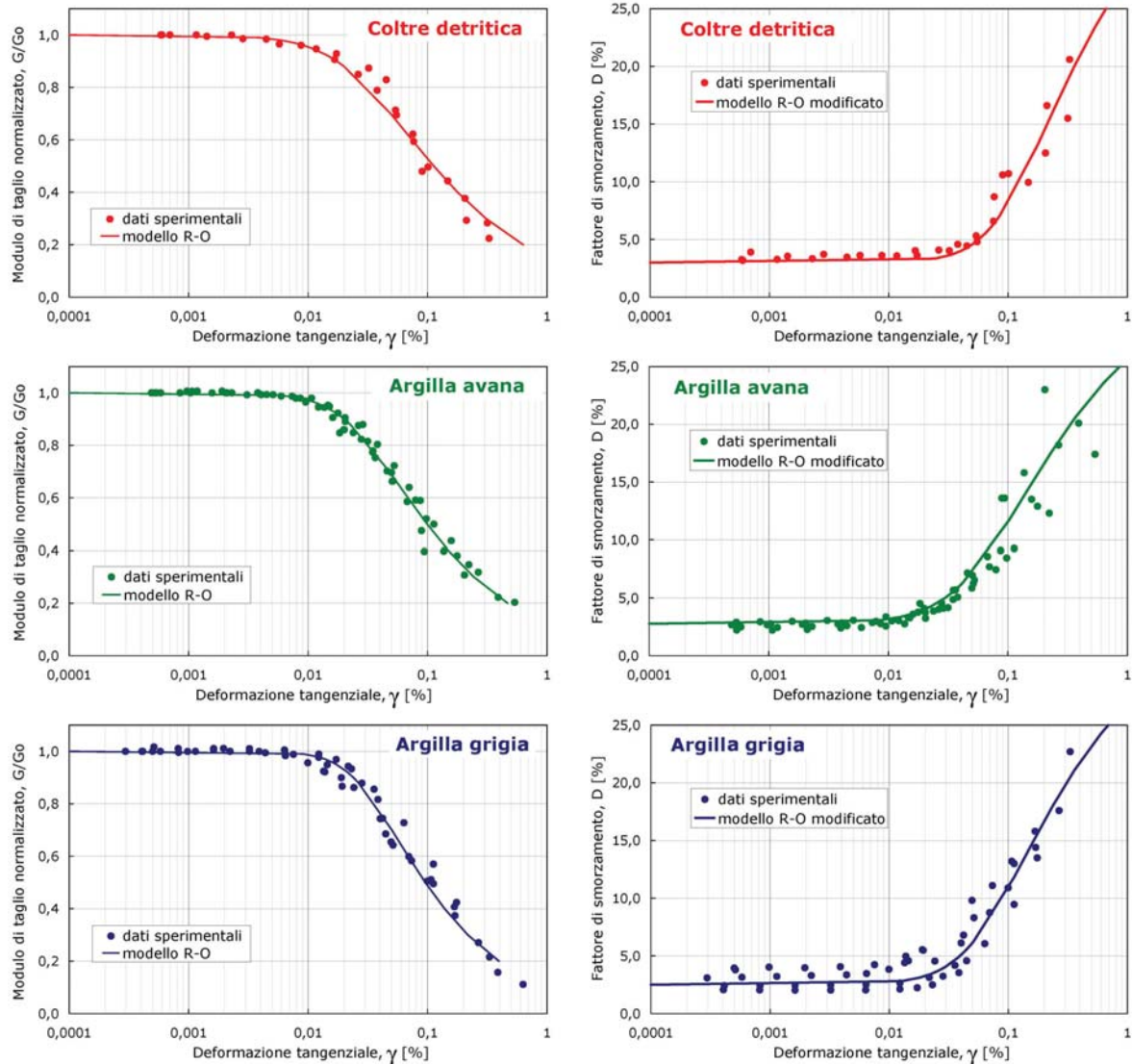


Fig. 1.15 - Variazioni di rigidità a taglio normalizzata e smorzamento dei terreni con la deformazione tangenziale, misurate in prove RC (Silvestri et al., 2006, modificata).

Ogni serie di prove per ciascun materiale è risultata ben interpretabile con un'unica coppia di curve medie $G/G_0:\gamma$ e $D:\gamma$, ottenute analiticamente mediante l'applicazione del modello di Ramberg-Osgood (cfr. Vinale et al., 1996):

$$\gamma(\bar{G}) = \left(\frac{1 - \bar{G}}{C \bar{G}^R} \right)^{\frac{1}{R-1}}, \quad \gamma(\bar{D}) = \left[\frac{\bar{D}}{C' (1 - \bar{D})^{R'}} \right]^{\frac{1}{R'-1}} \quad (1.2)$$

dove $\bar{G} = G(\gamma) / G_0$, $\bar{D} = D(\gamma) - D_0$.

I parametri C , R , C' , R' , che descrivono il comportamento non lineare del terreno (cfr. **Tabella 1.1**), sono legati ai valori delle deformazioni di soglia di linearità, γ_l (Vinale et al., 1996). Come si evince sia dalla Figura 1.15 che dalla Tabella 1.1, tali valori, e quindi l'estensione del campo di linearità per le tre formazioni, sono piuttosto simili.

Tab. 1.1 – Parametri di Ramberg-Osgood e deformazioni di soglia lineare per i terreni argillosi.

	C	R	γ_l (%)	C'	R'
Coltre detritica	365627	2.71	0.011	1950798	3.29
Argilla avana	14903068	3.17	0.014	3910	2.28
Argilla grigia	$1.31 \cdot 10^9$	3.75	0.017	1000000	3.05

1.6 Modelli di sottosuolo per la risposta sismica locale

I valori delle velocità delle onde di taglio ricavati dalle prove di laboratorio hanno affidabilità notoriamente condizionata dal disturbo e da altri fattori sperimentali inevitabili, come le modalità di riconsolidazione e le frequenze di sollecitazione. Le leggi di dipendenza dalla tensione media efficace possono però ritenersi rappresentative della variazione di V_s con la profondità in un deposito naturale.

Le curve $V_s:p'$ in Figura 1.14a sono state quindi applicate alla caratterizzazione dei profili $V_s(z)$ caratteristici del deposito argilloso (**Figura 1.16**), imponendone la corrispondenza con i valori medi di V_s misurati nelle prove *down-hole*, ma senza variarne la legge di tendenza con la profondità. A tale scopo, si è fatto ricorso alle espressioni (1.1) riportate in Figura 1.14, modificandone i coefficienti a , ma non gli esponenti n .

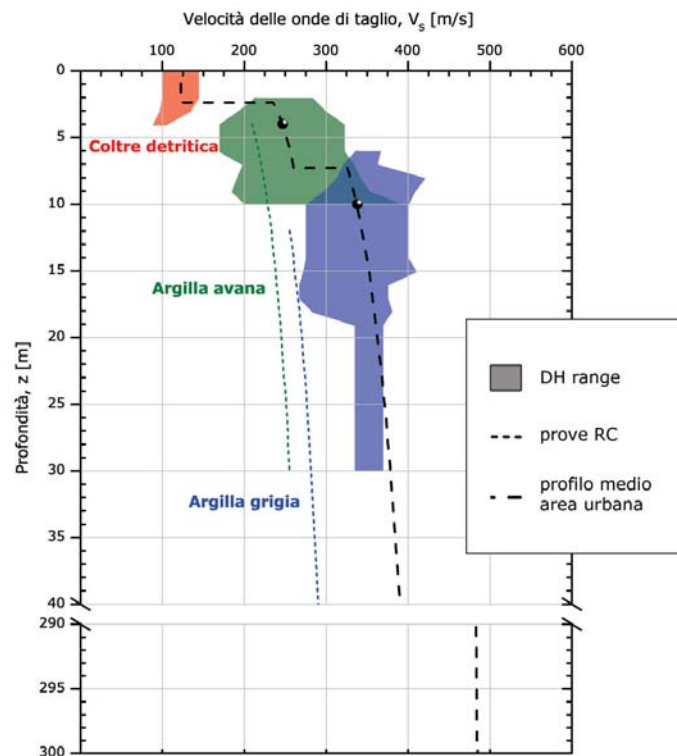


Fig. 1.16 – Confronti tra profili $V_s(z)$ in sito ed in laboratorio e profilo medio per il centro urbano.

Per le argille avana, il valore medio di V_s misurato alla profondità media di indagine (4 m) dalle prove DH è risultato circa 245 m/s, mentre nelle argille grigie, alla profondità media di 10 m, si è ottenuto 340 m/s circa (circoli neri in Figura 1.16); le curve delle prove di laboratorio (rappresentate con il tratteggio fine) sono state quindi trasformate nelle curve medie caratteristiche del deposito nell'intera area urbana (tratteggio lungo). In Figura 1.16 è riportato il confronto tra questi profili medi di V_s , elaborati con riferimento alla stratigrafia tipica del sottosuolo del centro urbano (cfr. Figura 1.10b), ed i campi di variazione risultanti dalle prove *down-hole* (in termini di valori medi più o meno deviazione standard).

Nella coltre detritica, vista la limitata profondità del banco, non avrebbe senso esprimere una legge di variazione delle velocità delle onde di taglio con la profondità; per essa è stato quindi assunto un valore di V_s costante, effettuando semplicemente la media delle prove DH.

I coefficienti di Poisson della formazione argillosa, trattandosi di terreni fini saturi, sono stati assunti prossimi al valore di 0.5 e leggermente decrescenti con la profondità. Alla combinazione di tali valori con quelli delle V_s corrispondono velocità delle onde P confrontabili con quelle misurate nelle prove sismiche.

Il fattore di smorzamento a basse deformazioni è stato ridotto rispetto ai valori mediamente misurati nelle prove RC, per tener conto dell'effetto delle maggiori frequenze di sollecitazione in queste prove, rispetto a quelle caratteristiche degli eventi sismici considerati.

I parametri del flysch in Tabella 1.2 sono stati stimati a partire dalle velocità delle onde P misurate nella prova CH S13 (che risulta l'unica indagine geofisica eseguita in tale formazione) e dalle V_s misurate nelle prove DH SD1 e SD2, che hanno fornito valori dell'ordine di 1000 m/s. Il coefficiente di Poisson ed il fattore di smorzamento per questo materiale sono stati assunti rispettivamente pari a 0.3 e 0.5%, valori tipici per formazioni litoidi di questo genere.

La **Tabella 1.2** riporta le caratteristiche medie alle basse deformazioni dei diversi materiali, riferite alla stratigrafia tipica per un modello a strati omogenei adatto ad analisi lineari 3D, come quelle che dovrà sviluppare l'UR3.

Tab. 1.2 – Caratteristiche medie del modello di sottosuolo a strati omogenei nell'area urbana.

	Prof. [m]	γ [kN/m ³]	V_s [m/s]	ν	V_P [m/s]	D_0 [%]
Coltre detritica	0 - 2.4	19.65	122	0.49	1010	3.0
Argilla avana	2.4 - 7.3	21.09	250	0.49	1780	2.3
Argilla grigia	>7.3	21.23	450	0.47	1890	2.5
Flysch di Faeto		22.00	1300	0.30	2400	0.5

Nella **Tabella 1.3** sono invece riassunte le proprietà fisico-meccaniche di interesse per l'analisi numerica della risposta sismica locale con un modello eterogeneo di sottosuolo di tipo 'deterministico' (cfr. § 1.3), per analisi 1D o 2D lineari e non lineari. In questo caso, le velocità V_s e V_P nelle argille sono assunte variabili con la profondità, in modo tale che ne risulti costante il rapporto α e quindi il coefficiente di

Poisson ν^7 . Le caratteristiche del flysch di Faeto sono state considerate lineari (indipendenti dalla deformazione tangenziale γ), e differenziate, a seconda se relative alla formazione affiorante e ad un primo strato sottostante l'argilla, oppure ad un substrato che si estenda ad elevate profondità.

Tab. 1.3 – Caratteristiche fisico-meccaniche del modello eterogeneo di sottosuolo.

	γ [kN/m ³]	V_s [m/s]	ν	V_p [m/s]	D_0 [%]	$G(\gamma)/G_0$	$D(\gamma)$
Coltre detritica	19.60	122.4	0.49	1010	3.0	curve R-O in Figura 1.15	
Argilla avana	21.15	$162 \cdot (p')^{0.1044}$	0.49	$f(V_s, \nu)$	2.3		
Argilla grigia	21.20	$202 \cdot (p')^{0.1082}$	0.485-0.475	$f(V_s, \nu)$	2.5		
Flysch di Faeto (sup.)	22.00	1050	0.37	2300	0.5	lineare	
Flysch di Faeto (prof.)	22.00	1300	0.30	2400	0.5	lineare	

Per esprimere le leggi di variazione delle argille avana e grigie in funzione della profondità (z) dal piano campagna, si è fatto riferimento all'espressione delle tensioni efficaci litostatiche medie, p'_0 :

$$p'_0 = \frac{1+2k_0}{3} \sigma'_{v0} \quad (1.3)$$

in cui k_0 rappresenta il coefficiente di spinta a riposo, pari a 0.8 in questi terreni, e σ'_{v0} la tensione efficace litostatica verticale. Assumendo una profondità media della falda pari a 2 m, si è ottenuto per le argille avana:

$$V_s = 162 \cdot (17 + 9.83z)^{0.1044} \quad (1.4)$$

e per le argille grigie:

$$V_s = 202 \cdot (17 + 9.87z)^{0.1082} \quad (1.5)$$

1.7 Interpretazioni *aftershocks*

Le ipotesi sull'estensione in profondità della formazione argillosa sono state sottoposte a verifica mediante analisi delle registrazioni degli *aftershocks* effettuate dalle stazioni sismiche mobili installate dal DPC nella zona Nord (presso il sondaggio S1 sull'affioramento delle argille), e Sud (sull'affioramento flyschoidale, nei pressi del sondaggio S13) del centro abitato (cfr. Figura 1.8).

In **Tabella 1.4** sono riportate le caratteristiche fisico-meccaniche medie attribuite da Petillo (2004) al modello di sottosuolo in corrispondenza della stazione sismica Nord. Esse non differiscono nella sostanza rispetto a quelle medie riportate nella Tabella 1.3, a parte i valori di V_s assunti nella formazione argillosa, ed i limiti stratigrafici tra coltre detritica e argilla avana (qui a 3.2 m), e tra argilla avana e grigia (a 5 m).

⁷ Dalle relazioni tra costanti elastiche e velocità di propagazione delle onde, risulta che il coefficiente di Poisson ν è esprimibile in funzione del rapporto $\alpha = V_p/V_s$; si ha infatti $\nu = \frac{0.5\alpha^2 - 1}{\alpha^2 - 1}$.

Tab. 1.4 – Caratteristiche fisico-meccaniche del sottosuolo della stazione S1 (Petillo, 2004).

	Prof. [m]	γ [kN/m ³]	V _S [m/s]	ν	V _P [m/s]	D ₀ [%]	G(γ)/G ₀	D(γ)
Coltre	0 – 3.2	19.60	126	0.492	1010	3.0	curve R-O in Figura 1.15	
Argilla avana	3.2 – 5	21.15	265	0.488	1700	2.3		
Argilla grigia	5 – 15	21.20	372	0.482	1971	2.5		
	15 – 40		417	0.479	2075			
	40 – 94		490	0.471	2100			
	94 – 174		565	0.463	2150			
	174 – 300		618	0.457	2200			
Flysch di Faeto (sup.)		22.00	1050	0.368	2300	0.5	Lineare	
Flysch di Faeto (prof.)		22.00	1300	0.296	2400	0.5	Lineare	

Queste proprietà sono state introdotte in un'analisi parametrica 1D della risposta in frequenza del sottosuolo. Assegnando spessori crescenti al banco di argilla grigia, in modo da riprodurre profondità del *bedrock* variabili tra 75 m e 500 m, sono state generate, con il codice di calcolo EERA (Bardet et al., 2000), le funzioni di amplificazione corrispondenti ad un modello monodimensionale di sottosuolo stratificato. La serie di tali funzioni è riportata in **Figura 1.17**; come si può osservare, la risposta alle alte frequenze aumenta al diminuire dello spessore.

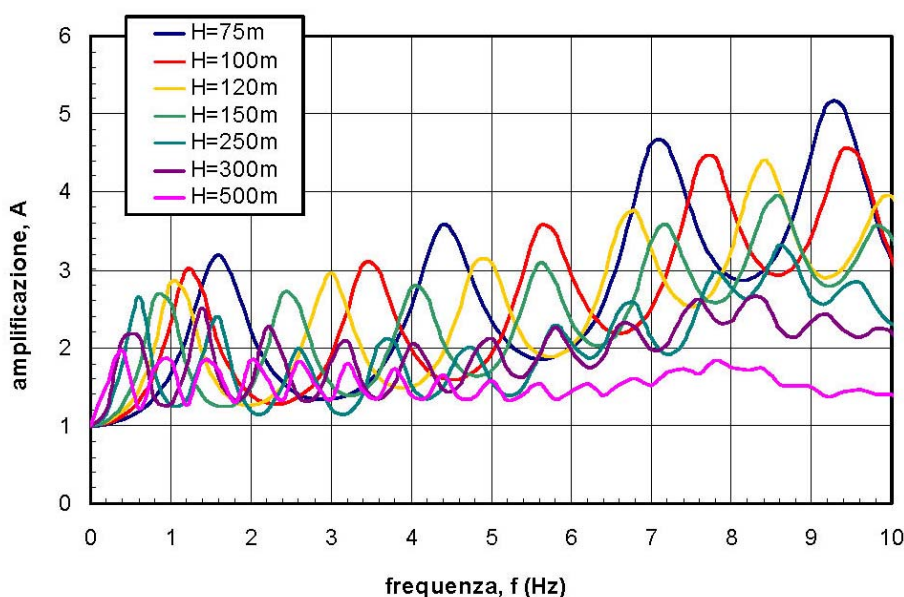


Fig. 1.17 – Variabilità della risposta in frequenza con lo spessore nell'analisi 1D (verticale S1) in campo lineare.

Le frequenze dominanti, riportate in **Tabella 1.5**, dedotte dagli spettri di risposta delle due componenti EW e NS dell'*aftershock* principale (12 novembre am, M=4.2), sono risultate prossime tra loro. Pertanto i relativi valori medi sono stati assunti come 'frequenze sperimentali' del sottosuolo in corrispondenza della verticale dove è ubicata la stazione accelerometrica Nord.

Tab. 1.5 – Frequenze dominanti dell'aftershock del 12 novembre am (M=4.2)

	N-S	E-W	Media
f_0 [Hz]	-	0.76	0.76
f_1 [Hz]	1	1	1
f_2 [Hz]	1.54	1.54	1.54
f_3 [Hz]	2.6	2.78	2.69
f_4 [Hz]	4.2	4.2	4.2
f_5 [Hz]	-	5.6	5.6
f_6 [Hz]	7.7	7.14	7.42

Confrontando, per ogni valore assegnato alla profondità del substrato (H), le prime 7 frequenze naturali calcolate (f_{calc}) dalle funzioni di Figura 1.17, con quelle sperimentali (f_{exp}) di Tabella 1.5, è stato possibile effettuare una sorta di analisi a ritroso (*back-analysis*) sul valore più credibile della profondità, incognita, del *bedrock*.

I risultati sono riportati nel diagramma di **Figura 1.18**, in termini di variazione di ciascun rapporto $f_{\text{calc}}/f_{\text{exp}}$ con l'aumento di H. Come doveva attendersi, il rapporto tra le frequenze diminuisce con H; si può notare che il valore di profondità che conduce al migliore accordo tra la risposta in frequenza del modello e quella osservata sperimentalmente è quello di 300 m, in corrispondenza del quale il rapporto $f_{\text{calc}}/f_{\text{exp}}$ mediamente approssima l'unità. Questo risultato sembra confermare le indicazioni della tomografia geoelettrica profonda (cfr. § 1.4) sulla possibile individuazione di un *bedrock* a partire da circa 300 metri di profondità.

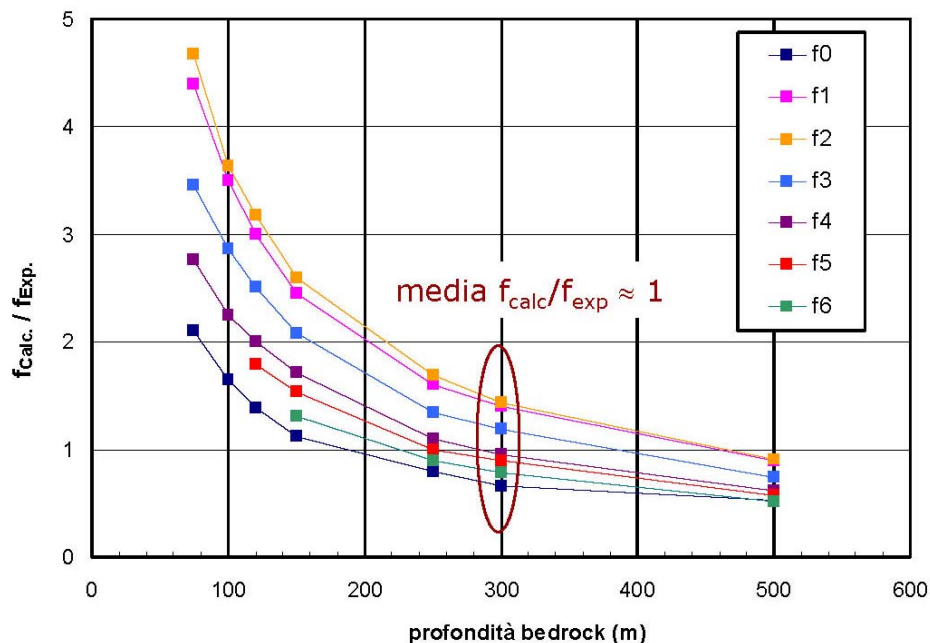


Fig. 1.19 – Rapporti tra frequenze dominanti reali e calcolate al variare dello spessore delle marne argillose.

1.8 Simulazioni *aftershocks*

Alcune analisi preliminari di Risposta Sismica Locale sono state condotte a cura delle Università collaboranti all'UR7, allo scopo di calibrare diversi possibili modelli di sottosuolo ipotizzati. In entrambe le serie di analisi di calibrazione sono state eseguite simulazioni 1D della risposta nella verticale S1 nel dominio delle frequenze con codici tipo SHAKE o EERA, e analisi 2D nel dominio del tempo, con il codice QUAD4M (Hudson et al., 1996), della risposta di diverse sezioni NS e EW ipotizzate. I moti sismici di riferimento applicati alle frontiere dei domini d'analisi sono le registrazioni delle componenti degli *aftershocks* parallele alle sezioni, effettuate dalla stazione sismica mobile Sud, ubicata sull'affioramento flyschoidale. L'Università di Roma ha introdotto la sola componente orizzontale degli *aftershocks* mentre il gruppo UniCal-UniNa-UniSannio ha preferito applicare ai contorni delle *mesh* anche le componenti verticali, in modo tale da riprodurre anche gli effetti delle onde di compressione.

Presso l'Università di Roma sono state assunte come schemi geometrici di riferimento le sezioni 1 (NS) e 4 (EW) proposte dal DPC (cfr. Figura 1.5), in cui la profondità massima del substrato è circa 250 metri.

Sono stati assunti due modelli di sottosuolo, denominati A e B, differenti unicamente per la distribuzione della velocità delle onde di taglio nella formazione delle marne argillose di Toppo Capuana intatte, cioè nell'argilla grigia (**Figure 1.20a-b**). In **Tabella 1.6** sono riportate le caratteristiche fisico-meccaniche adottate da UniRoma.

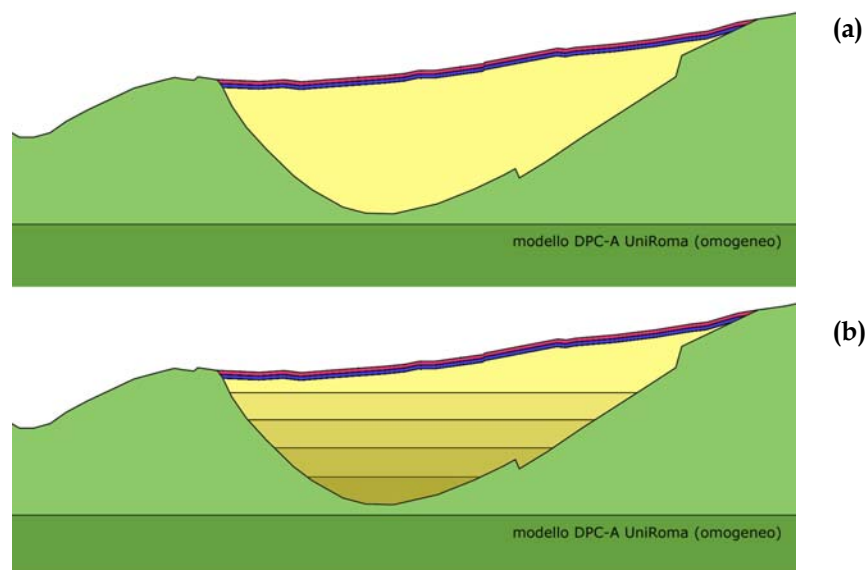


Fig. 1.20 – Modelli di sottosuolo in direzione NS adottati da UniRoma.

Si può notare che in entrambi i modelli, alla coltre detritica è attribuita una $V_s=200\text{m/s}$, all'argilla avana una $V_s=350\text{m/s}$, al materiale flyschoidale di transizione una $V_s=1200\text{m/s}$, ed al flysch ad elevate profondità una $V_s=1500\text{m/s}$. Nel modello A (Figura 1.20a) le caratteristiche meccaniche assunte per l'argilla grigia sono costanti ($V_s=700\text{m/s}$) mentre nel modello B la formazione argillosa è stata suddivisa in 5 strati, di spessore medio pari a 50 metri, in cui la velocità delle onde di taglio varia da 500 fino a 900m/s (Figura 1.20b).

Tab. 1.6 – Caratteristiche fisico-meccaniche del sottosuolo assunte da UniRoma.

	Prof. [m]	γ [kN/m ³]	V _s [m/s]	ν	D ₀ [%]
Coltre detritica	0 – 3.5	20.5	200	0.48	2.7
Argilla avana	3.5 – 10	21.0	350		2.4
Argilla grigia (mod. A)	10 – 270		700	0.43	2.2
Argilla grigia (mod. B)	strati con spessore medio 50 m		500	0.46	
Argilla grigia (mod. B)			600	0.44	
Argilla grigia (mod. B)			700	0.42	
Argilla grigia (mod. B)		800	0.40		
Argilla grigia (mod. B)		900	0.37		
Flysch di Faeto (sup.)		23.0	1200	0.25	0.4
Flysch di Faeto (prof.)		24.0	1500		

Le analisi di calibrazione condotte in collaborazione tra UniCal, UniNa e UniSannio (Petillo, 2004) hanno invece sistematicamente assunto un modello di sottosuolo assimilato a quello della stazione S1 (cfr. Tabella 1.4) per l'intero centro abitato. E' stata analizzata la sezione proposta dal DPC estesa, in entrambe le direzioni NS e EW, fino alla profondità di 300m (**Figura 1.21a**). In alternativa, sono state considerate altre due ipotesi geometriche, di tipo *box* (modello A) e a gradoni (modello B), mostrate nelle **Figure 1.21b-c**, anche queste con profondità massima del *bedrock* pari a 300m.

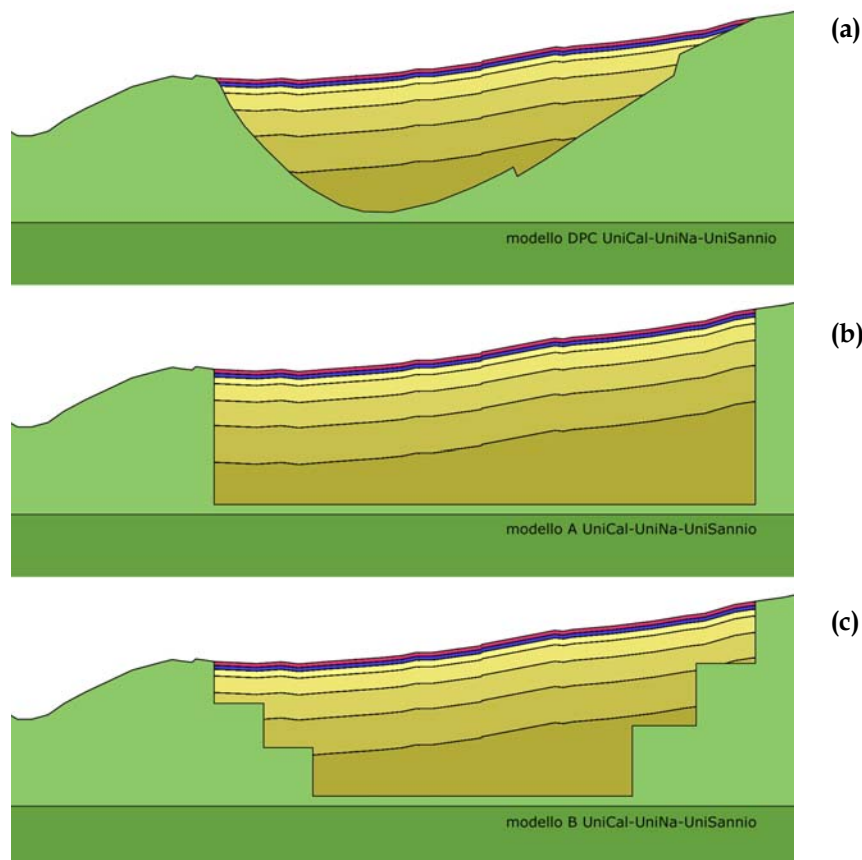


Fig. 1.21 – Modelli geotecnici di sottosuolo in direzione NS adottati da UniCal-UniNa-UniSannio.

A titolo di esempio, in **Figura 1.22** sono riportati i confronti, in termini di spettri di risposta, tra registrazioni e simulazioni numeriche del principale *aftershock* di riferimento (12.XI.2002 am, M=4.2).

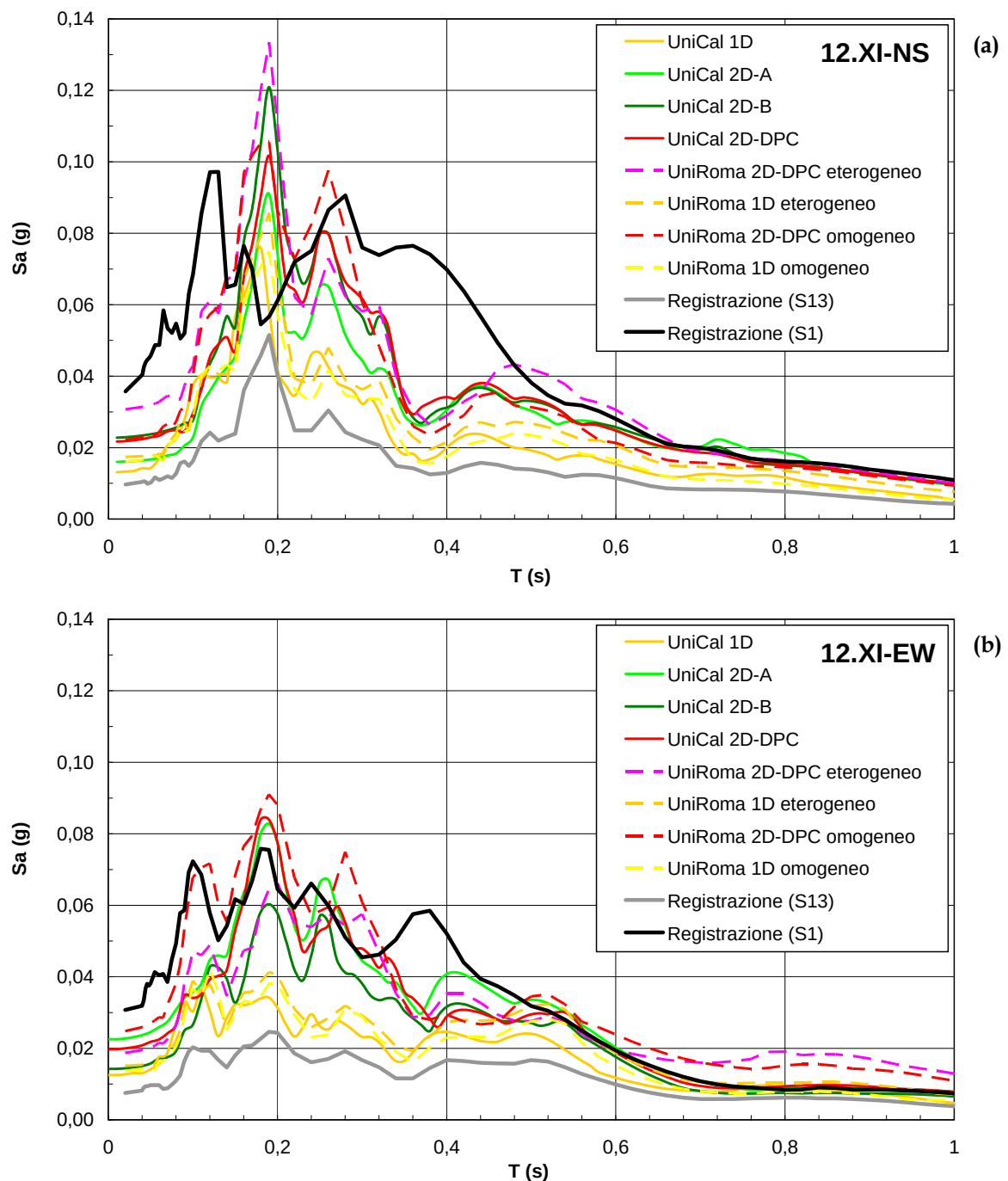


Fig. 1.22 - Confronto spettri registrati e simulati (evento del 12.XI:2002 am) presso la stazione accelerometrica Nord per i diversi modelli di sottosuolo considerati, in direzione NS (a) ed EW (b).

Dai confronti tra valori massimi e forme spettrali, si possono trarre alcune considerazioni:

- la risposta dei modelli adottati, in termini di componenti orizzontali, è complessivamente conforme al contenuto di frequenze registrato lungo la sezione EW; lo è invece molto meno in direzione NS; va però sottolineato che,

- in direzione NS, lo spettro registrato nel sito S1 (curva nera in figura 1.22a) presenta un'anomala ridotta amplificazione in corrispondenza delle frequenze dominanti ($T \approx 0.2$ s) dei segnali registrati su affioramento rigido (curva grigia);
- le analisi 1D (curve gialle), limitate alle sole componenti orizzontali, sottostimano notevolmente in ogni caso i valori spettrali registrati nel campo delle frequenze di interesse per gli edifici di San Giuliano di Puglia;
 - i modelli 2D forniscono accelerazioni orizzontali massime e ampiezze spettrali in ogni caso più elevate e meglio confrontabili con quelle registrate, rispetto a quelle riprodotte dalle analisi 1D; sottostimano però sia il valore di accelerazione di picco, che le ordinate spettrali alle alte frequenze ($T < 0.1$ s);
 - sugli spettri registrati si può osservare un particolare fenomeno di amplificazione per periodi compresi tra 0.35 e 0.45 s; su tale aspetto, non ben riprodotto dalle simulazioni, occorre dedicare ulteriori approfondimenti;
 - in entrambe le serie di analisi, i modelli di sottosuolo 2D che forniscono spettri complessivamente più prossimi a quelli registrati sono quelli relativi all'ipotesi DPC-A omogeneo (per UniRoma) e DPC (per UniCal-UniNa-UniSannio).

Con riferimento a queste ultime analisi, la **Figura 1.23** rappresenta i profili orizzontali delle accelerazioni massime (a_{max}) e dei fattori di amplificazione (F_a) calcolati in superficie, in direzione Est-Ovest, per l'evento del 12.XI.2002, confrontati con i valori sperimentali in corrispondenza della verticale S1.

La **Figura 1.24** mostra un confronto analogo, sovrapposto con la carta dei fattori di amplificazione stimati dall'analisi del danno risentito dopo gli eventi principali del 31 ottobre e del 1 novembre 2002 (Baranello et al., 2003).

Si noti che entrambi i modelli, simili per la geometria attribuita alla formazione del flysch di Faeto, pur adottando una diversa caratterizzazione geotecnica del sottosuolo, forniscono in prossimità della stazione S1 valori di accelerazioni massime ed amplificazioni prossimi tra loro, ma comunque inferiori a quelli registrati.

Le analisi numeriche sembrano riprodurre sia le maggiori amplificazioni osservate dall'analisi del danno alla sommità del crinale in direzione EW (Figura 1.23), sia le oscillazioni di F_a pure osservabili lungo la dorsale NS (Figura 1.24).

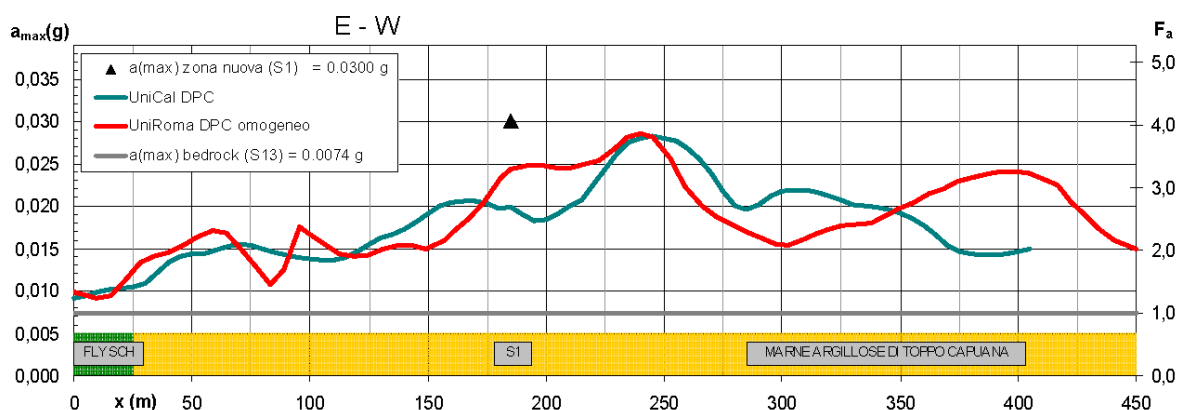


Fig. 1.23 - Profili orizzontali delle accelerazioni massime e del fattore di amplificazione, in direzione EW, a seguito della simulazione dell'aftershake principale del 12 novembre am.

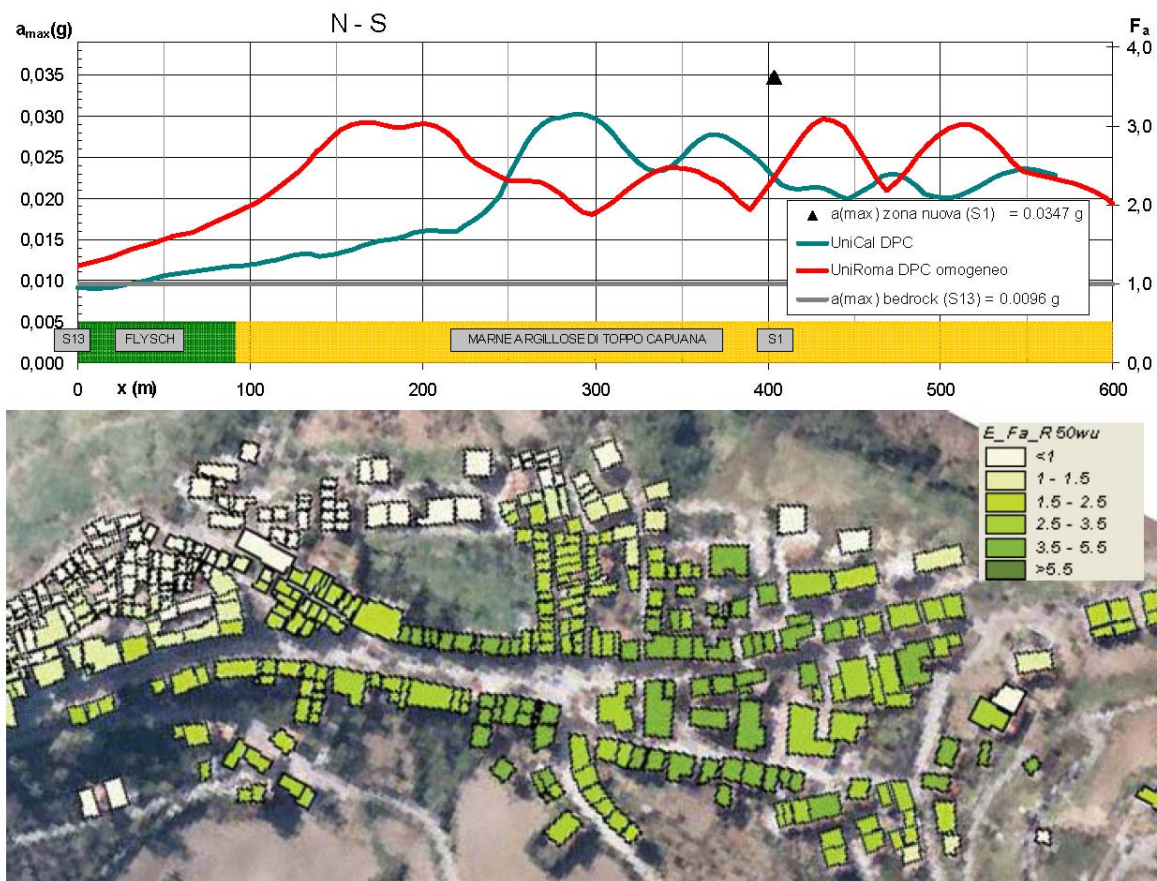


Fig. 1.24 - Profili orizzontali delle accelerazioni massime e del fattore di amplificazione, in direzione NS, a seguito della simulazione dell'aftershock principale del 12.XI.2002 am, confrontati con la carta dei fattori di amplificazione dedotti dall'analisi dei danni di Baranello et al. (2003).

2. BONEFRO

- mappa geologica e geomorfologia aggiornata
- n. 5 sezioni geologiche
- relazione geologica e geotecnica e caratterizzazione dei terreni
- n. 5 sondaggi corredati da test downhole e da prove geotecniche su campioni estratti
- definizione dell'input sismico attraverso analisi di Hazard e deaggregazione
- calcolo della funzione di trasferimento 1D relativa ai 5 downhole e definizione del coefficiente di amplificazione locale

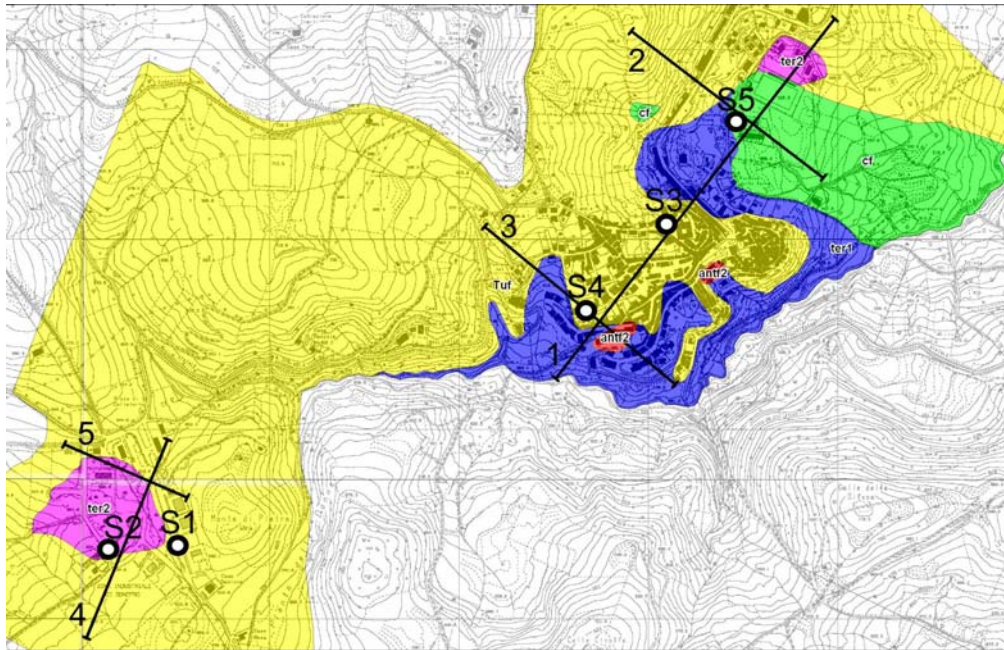


Fig. 2.1 – Carta geologica del centro abitato di Bonefro (scala 1:20000) con ubicazione dei sondaggi geognostici adibiti a Down-Hole (di proprietà della Regione Molise)

(tratto dalla relazione di proprietà della Regione Molise e attualmente in corso di pubblicazione)

“Nella zona dell’abitato del Comune di Bonefro affiorano le seguenti formazioni:

- *Formazione di Tufillo – Miocene medio* - terreni di questa formazione geologica affiorano estesamente sul territorio, spesso con una copertura di coltri detritiche di disfacimento. La Formazione di Tufillo è rappresentata da risedimenti carbonatici costituiti da calcareniti, calciruditi con liste di selce e da calcilutiti chiare con intercalazioni di marne verdi e grigie. A diverse altezze stratigrafiche sono presenti livelli di arenarie sottili di colore giallo-ocra
- *Formazioni continentali detritiche – Olocene* - diffusamente esse si rinvencono lungo i versanti dalle alte alle medie e basse pendici a copertura dei terreni in substrato e più spesso quelli della formazione geologica Tufillo. Trattasi di terreni di genesi secondaria, eluvio-colluviali derivanti dalla disgregazione ed alterazione dei litotipi della formazione miocenica. Generalmente sono costituiti da elementi granulari eterometrici frammisti a materiale terrigeno; spesso tali coltri si rinvencono sciolte ma anche debolmente cementate e cementate.

La ricostruzione delle sezioni geologiche ha evidenziato la presenza di morfostrutture indici della tettonizzazione subita dalle formazioni presenti nell'area: in particolare nel settore nord-occidentale del paese è individuabile una faglia sub-verticale con direzione SW-NE che disloca l'andamento regolare delle stratificazioni. Nel settore sud-orientale, in corrispondenza dell'area P.I.P., il substrato presenta strutture plicative a scala dell'affioramento, che rappresentano pieghe secondarie di strutture a vergenza adriatica."

(esempio di analisi dei dati raccolti per un sondaggio e relativo test dowhole tratto dalla relazione di proprietà della Regione Molise per il comune di Bonefro)

"- Sondaggio S1

L'analisi proposta per questo punto di misura prevede una situazione a 3 strati con un netto incremento del valor medio della velocità V_s a profondità di 8 m, tale per cui la funzione di trasferimento presenta un picco di amplificazione a circa 6.5 Hz. Le misure di microtremore acquisite in corrispondenza della bocca-pozzo del sondaggio, mostrano un picco di amplificazione alla frequenza di 4.0 Hz, inferiore rispetto a quella riscontrata mediante l'analisi numerica monodimensionale. Lo spessore dello strato, calcolato in modo approssimativo con la relazione $T_0 = 4H/V_s$ (dove T_0 è il periodo dell'armonica fondamentale e V_s la velocità delle onde di taglio sotto tabulate) risulterebbe compreso tra 12 e 16 m, superiore rispetto ai valori determinati mediante prove Down-hole.

MATERIALE	SPESSORE (m)	V_s (m/s)	Gmax (Mpa)	ρ g/cm ³
Riporto	0.0 - 4.0	142	37	1.8
Argilla limoso-marnosa	4.0 - 8.0	370	279	2.0
Formazione di Tufillo	8.0 - 30	1050	2248	2.0

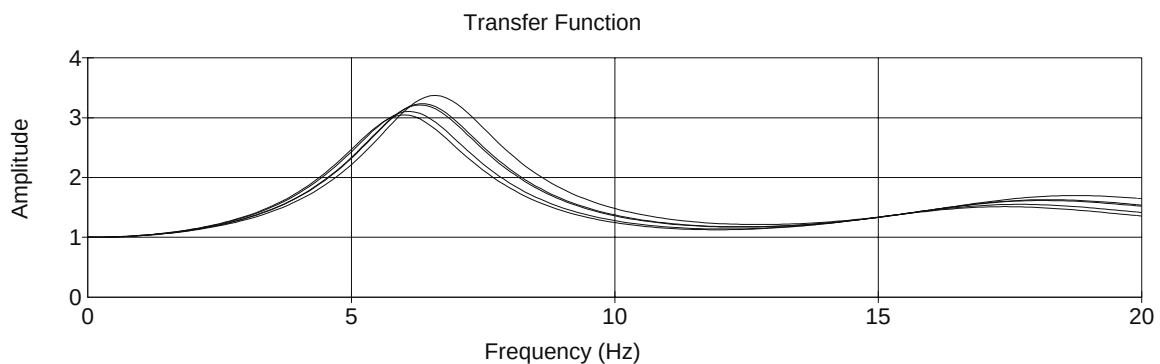


Fig. 2.2 Funzione di trasferimento relativa allo schema stratigrafico adottato per il sondaggio S1. Le diverse curve sono relative ai cinque accelerogrammi naturali scelti per l'input al bedrock."

3. RIPABOTTONI

3.1 ASPETTI GEOLOGICI, GEOMORFOLOGICI E GEOTECNICI

L'area in esame è rappresentata dal centro abitato del comune di Ripabottoni (CB)

Lo studio è partito dall'acquisizione di tutti i dati già disponibili per l'area, depositati presso la Regione Molise e presso l'Ufficio Tecnico del Comune di Ripabottoni. E' stata successivamente effettuata una ricerca bibliografica: la letteratura scientifica acquisita ha permesso di inquadrare a livello regionale l'area studiata.

Ad integrazione delle indagini esistenti e per la caratterizzazione geologica, geotecnica e geofisica dei terreni affioranti nel centro abitato sono stati eseguiti, per conto del Comune, tre sondaggi geognostici a carotaggio continuo e tre prove down-hole. I siti di ubicazione sono stati scelti cercando, in primo luogo, di indagare aree del centro abitato dove le informazioni risultavano più carenti.

3.2 RACCOLTA DEI DATI PREESISTENTI

In questa fase del lavoro si è provveduto a ricercare tutte le informazioni di carattere tecnico e scientifico già disponibili, con particolare attenzione ai sondaggi geognostici.

I dati acquisiti sono stati i seguenti:

- a) cartografia Tecnica Regionale (1:5.000);
- b) carta Geologica d'Italia (Foglio n. 154 - Larino);
- c) foto aeree (volo 1992);
- d) bibliografia Scientifica;
- e) n. 38 sondaggi geognostici allegati a Relazioni Tecniche per costruzioni e/o opere di consolidamento, eseguiti a profondità variabile tra i 10 e i 25 metri

Immediatamente è emersa l'assoluta inadeguatezza del Foglio Geologico n. 154 - Larino che indica la presenza a Ripabottoni e nelle immediate vicinanze delle Argille Plioceniche e di un flysch calcarenitico correlabile alla Formazione della Daunia. Nessuna delle due formazioni è stata riscontrata in sito, né viene segnalata dai documenti bibliografici più recenti disponibili sull'area.



Fig. 3.1 stralcio del foglio geologico in cui ricade il Comune di Ripabottoni.

Tutte le informazioni di cui ai punti a), c) ed e) sono state reperite presso la Regione Molise, il Comune di Ripabottoni o sono state gentilmente fornite dal Dott. Fazioli della Geotech S.p.A., società che ha eseguito i tre nuovi sondaggi geognostici. Ad integrazione dei dati bibliografici è stato eseguito anche un rilievo geologico speditivo.

3.2.1 Inquadramento geologico generale

Il centro abitato di Ripabottoni sorge su terreni appartenenti ad unità stratigrafico-strutturali dell'Appennino sannita-molisano, in particolare al *Complesso Sicilide* e alle *Unità Irpine*. Con il termine *Complesso Sicilide* si intende l'insieme di sedimenti depositi durante l'orogenesi appenninica nelle parti più interne del sistema catena-avanfossa e successivamente traslati verso l'avampaese adriatico e sovrapposti sui sedimenti flyschoidi via via più esterni. Nell'area questi terreni sono rappresentati dalla Formazione delle Argille Varicolori (Auct.), di età compresa tra il Cretaceo superiore e l'Oligocene.

Il termine *Unità Irpine* invece raggruppa tutti i sedimenti depositi nella fossa creatasi nel Langhiano, dopo l'arrivo delle coltri sicilidi e liguridi nel Bacino di Lagonegro. Nell'area studiata questi depositi hanno una natura tipicamente flyschoidi e appartengono al Flysch di S. Bartolomeo, di età elveziana.

Piuttosto complessi risultano i rapporti tra il Flysch di S. Bartolomeo e la Formazione delle Argille Varicolori. La letteratura scientifica spiega come i movimenti orogenetici abbiano portato le coltri sicilidi alloctone a ricoprire le Unità molisane, ma evidenziano anche il ritrovamento di condizioni geometriche opposte, in cui le coltri sicilidi sono ricoperte tettonicamente dalle altre unità stratigrafiche. Addirittura sono state messe in luce in sondaggi molto profondi, eseguiti per la ricerca di idrocarburi, situazioni complesse con sovrapposizioni multiple delle varie unità.

3.2.2 Caratteristiche geologiche e strutturali del centro abitato

Il centro abitato di Ripabottoni è quasi interamente edificato su un rilievo costituito dal Flysch di San Bartolomeo, che qui affiora con il suo membro arenaceo; si tratta di un'alternanza di strati arenacei e sabbiosi, con intercalazioni pelitiche. Tale rilievo è completamente circondato da terreni afferenti alla Formazione delle Argille Varicolori. I termini che qui si rinvencono sono quelli prettamente pelitici, rappresentati da argille, argille marnose e argille scagliose di vario colore.

Anche nella parte centrale del paese, in corrispondenza dei due edifici scolastici, si rinvencono le Argille Varicolori, in assetto caotico e con intercalazioni di pezzame lapideo. In quest'area esse sono interessate da fenomeni franosi.

Vanno segnalati inoltre non trascurabili spessori di materiale di riporto, specialmente in corrispondenza del settore di cresta che si affaccia sul Torrente Tocca.

Tra gli allegati vengono riportate la Carta geologica ed alcune sezioni geologiche significative.

I rapporti strutturali tra i terreni affioranti non sono di facile interpretazione. Infatti una coltre di materiale di riporto ricopre per alcuni metri di spessore le due formazioni presenti; inoltre la fitta e articolata urbanizzazione dell'abitato ha cancellato l'originaria morfologia del sito; è infine presente materiale mobilizzato per effetto di fenomeni franosi e una fitta vegetazione che ricopre interi tratti di territorio.

Strutturalmente il rilievo su cui sorge Ripabottoni è costituito dalla sovrapposizione di due scaglie tettoniche di Flysch di S. Bartolomeo, tra le quali è presente una lente di Argille Varicolori, probabilmente rimasta intrappolata durante il movimento relativo delle due

scaglie.

Questa configurazione tettonica, in linea con l'assetto strutturale regionale, trova riscontro sia nelle evidenze morfologiche osservate in foto aerea, sia nelle differenze giaciture misurate con il rilevamento geologico nei due differenti settori del paese, sia infine negli indizi di disturbo tettonico rinvenuti in alcuni sondaggi effettuati (fratturazione, ricristallizzazione delle fratture con calcite, strie). Inoltre, la presenza di gradini di calcite in sondaggio (fig. 6) non permette di escludere la possibilità di una riattivazione in senso diretto degli elementi tettonici compressivi, come di frequente si osserva nell'Appennino meridionale. E' infatti presumibile che la tettonica post-pliocenica sia intervenuta su questa situazione strutturale, riattivando in senso distensivo i piani di accavallamento tra le due scaglie di flysch arenaceo, ribassando così il settore SW del paese rispetto a quello NE.

Questa interpretazione dell'area ben si accorda dunque con quanto riportato nella bibliografia scientifica per l'assetto geologico di questa parte del Molise. Numerosi autori mettono in luce il frequente rinvenimento all'interno delle coltri alloctone, di scaglie costituite dai terreni delle formazioni stratigraficamente soprastanti (tra cui il Flysch di S. Bartolomeo), oltre che di inclusi di varie dimensioni.

Inoltre la presenza di un notevole spessore di argilla nella zona degli edifici scolastici non sarebbe giustificabile chiamando in causa vecchi fenomeni morfologici, che avrebbero mobilitato e trasportato qui questo materiale da una zona più rilevata, poiché più a monte, dove affiorano le Argille Varicolori, non si riscontrano "paleoniche" da cui esso potrebbe provenire.

D'altro canto è da escludere che questo materiale argilloso costituisca un Klippe, ovvero un residuo di coltre alloctona, a causa della sua particolare geometria e della sua posizione, incassata tra le due scaglie.

3.2.3 Geomorfologia del centro abitato

Il paese di Ripabottoni sorge su un rilievo che si sviluppa tra i 600m e i 660m s.l.m. In direzione NO esso è delimitato da una scarpata piuttosto acclive che lo raccorda al sottostante Torrente Tocca.

I processi morfogenetici e i morfotipi rilevati risultano fortemente condizionati dal litotipo sul quale si vanno ad impostare: dove affiorano le Argille Varicolori il paesaggio presenta morfologie più blande, interessate da fenomeni di soliflusso e da colate, evidenti nella zona del campo sportivo ed in tutta l'area a Nord del centro abitato. Viceversa dove affiorano i terreni sabbioso-arenacei la morfologia si fa più aspra e i processi più diffusi sono i fenomeni di crollo e gli scorrimenti rotazionali. Le notevoli pendenze dei versanti favoriscono l'azione di incisione verticale in alveo, operata dai corsi d'acqua.

L'area settentrionale del centro abitato è interessata da tre vistosi fenomeni franosi, che hanno determinato nel tempo notevoli dissesti alle strade e agli edifici coinvolti (rottture di pendio e rotazioni).

I fenomeni morfogenetici più recenti riscontrati nell'area si sono sviluppati lungo la scarpata ad andamento SO-NE che borda il paese: si tratta di crolli abbastanza superficiali della coltre di alterazione del flysch arenaceo, probabilmente detensionata dagli episodi sismici di ottobre e novembre u.s. e successivamente imbibita dalle abbondanti piogge invernali.

3.3 INDAGINI GEOGNOSTICHE RECENTI

3.3.1 SONDAGGI

L'interpretazione dei sondaggi recuperati da precedenti lavori effettuati nel Comune di Ripabottoni ha richiesto preliminarmente la ricostruzione delle isoipse nel centro abitato, non riportate nella cartografia utilizzata. Ciò ha permesso di attribuire la quota di imbocco per ogni sondaggio realizzato e di conseguenza una correlazione tra le stratigrafie.

In un secondo momento, ai fini delle ricostruzioni geometriche dei litotipi e/o dei loro rapporti strutturali, è stato necessario uniformare la terminologia utilizzata nei sondaggi per descrivere terreni analoghi e sintetizzare le definizioni di ogni orizzonte sondato.

Successivamente si è scelta un'ideale collocazione per tre nuovi sondaggi, effettuati dalla GEOTECH S.p.A. per conto del Comune. La loro ubicazione ha tenuto conto dei seguenti fattori:

- mancanza di informazioni sul sottosuolo della zona dell'edificio maggiormente danneggiata;
- necessità di comprendere meglio il sottosuolo della Chiesa di S. Maria Assunta (interessata da un elevato danneggiamento);
- ubicazione nei pressi degli accelerometri;
- ubicazione nei pressi di almeno un vecchio sondaggio, per effettuare confronti nella "lettura" della stratigrafia.

Nella fig. 3.2 sono indicate le stratigrafie riscontrate e l'ubicazione in planimetria dei tre sondaggi.

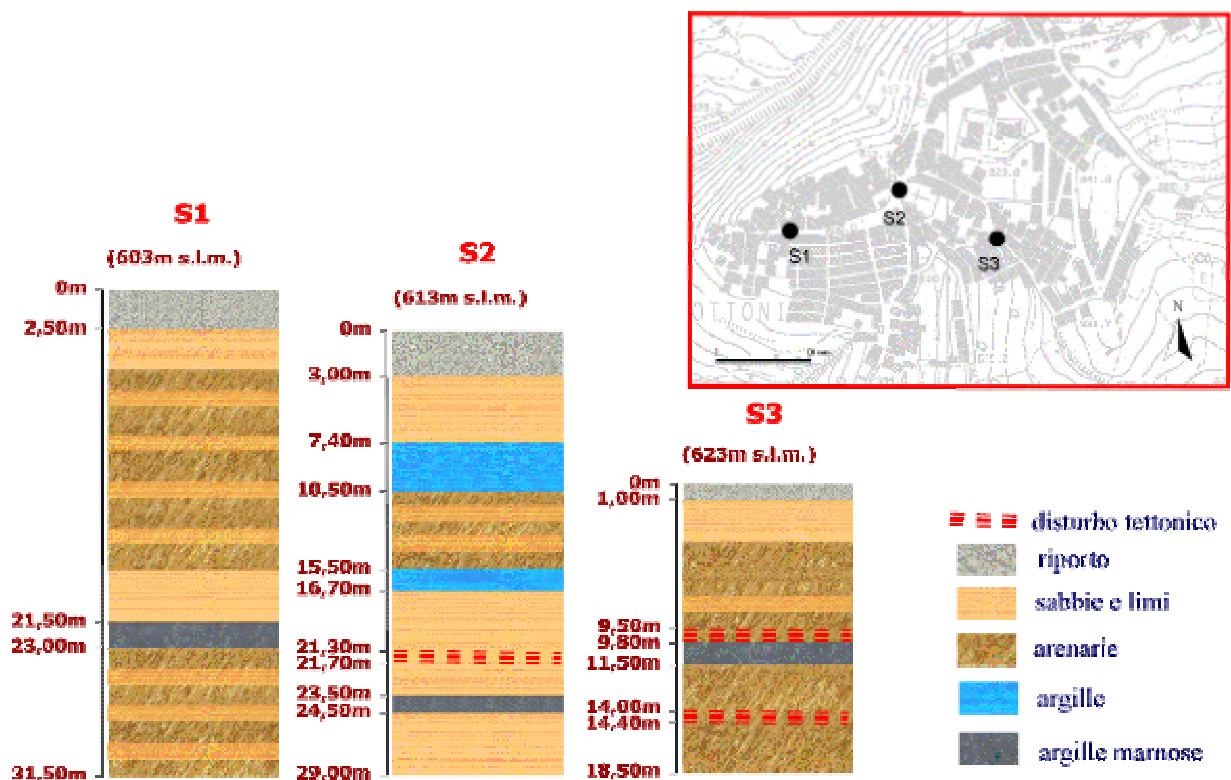


Fig. 3.2: Stratigrafie dei sondaggi e loro ubicazione in planimetria.

La lettura dei sondaggi mette in evidenza una certa differenza nella stratigrafia al di qua e al di là dei contatti tettonici ipotizzati: nelle sequenze deposizionali del settore occidentale sono più frequenti i livelli di sabbia sciolta o i livelli argillosi rispetto al materiale arenaceo più competente. Ciò costituisce un'ulteriore conferma all'ipotesi che il centro

abitato sorga su scaglie diverse dello stesso flysch, non immediatamente correlabili in senso laterale.

Pertanto i disturbi tettonici ipotizzati sarebbero responsabili di aver affiancato porzioni dello stesso flysch che in condizioni indisturbate non sarebbero contigue, perché deposte in momenti diversi e/o in parti differenti del bacino.

3.3.2 PROVE DOWN-HOLE

Successivamente all'esecuzione dei tre nuovi sondaggi geognostici sono state eseguite n. 3 prove down-hole i cui risultati sono riportati in allegato.

La strumentazione utilizzata per le prove è riportata di seguito:

- Sismografo PS a 16 canali e registrazione degli eventi su supporto magnetico;
- Tripletta geofonica costituita da un geofono verticale e due orizzontali da 4.5 Hz;
- Mazza in acciaio da kg 10;
- Trave in ferro di dimensioni cm 10 X 10 X 75 incastrata per 25 cm nel terreno;
- Geofono starter con caratteristiche compatibili con la tripletta.

L'energizzazione è stata effettuata colpendo la trave in ferro con la mazza.

Tale indagine ha messo in luce la presenza di n. 3 sismostrati, indicati in fig. 3.3.

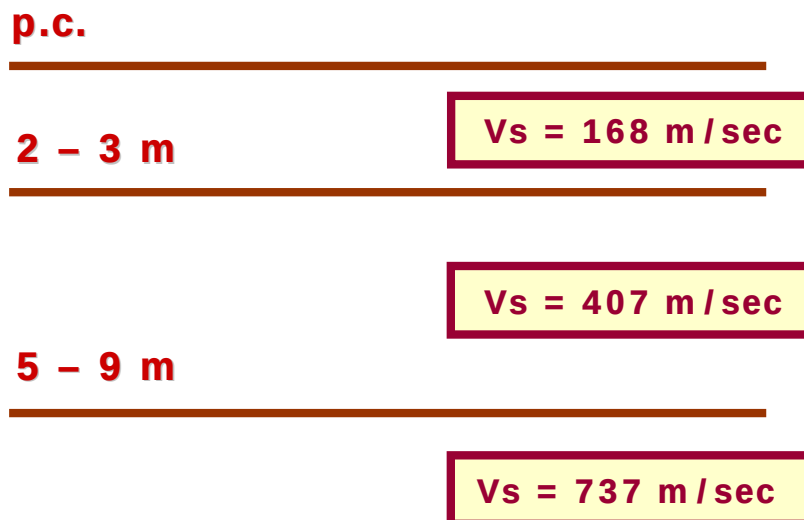


Fig. 3.3: Suddivisione del sottosuolo di Ripabottoni in tre sismostrati a velocità delle onde di taglio crescenti.

Il primo strato è riferibile al terreno di riporto, il secondo ed il terzo strato al Flysch di San Bartolomeo: in particolare il secondo strato rappresenterebbe la parte alterata del flysch, mentre il terzo la parte integra, quindi più compatta.

I valori delle velocità delle onde di taglio, al di sotto degli 800-1000 m/sec, evidenziano che non è stato trovato un vero e proprio bedrock.

E' stato possibile confrontare questi valori con quelli relativi Argille Varicolori, riportati in

alcune prove down-hole effettuate in un'area adiacente a Campobasso. Le velocità delle onde di taglio misurate oltre i 20m di profondità sono di circa 800 m/sec. Nonostante questo valore non sia elevato, ci permette di considerare questi terreni come il bedrock di quest'area del Molise.

Di seguito, nella tabella 3.1, si riportano le costanti elastiche medie per ciascun sismostrato.

Tabella 3.1: Costanti elastiche dei tre sismostrati.

	Peso di volume (kN/m ³)	Rapporto di Poisson	Modulo di taglio (N/m ²)	Modulo Young (N/m ²)
Sismostrato 1	17.00	0.31	4.85E5	1.27E6
Sismostrato 2	18.50	0.33	3.07E6	8.23E6
Sismostrato 3	20.00	0.37	1.09E7	2.98E7

3.3.4 PROVE GEOTECNICHE

Durante l'esecuzione dei tre nuovi sondaggi sono stati prelevati n. 3 campioni indisturbati a differenti profondità, sui quali sono state effettuate prove di laboratorio. I risultati ottenuti sono riportati nella tabella 3.2.

Tabella 3.2: parametri geotecnici dei campioni prelevati.

	Sondaggio 1 Campione 1 (prof. 10.30m - 10.80m)	Sondaggio 2 Campione 1 (prof. 4.50m - 5.00m)	Sondaggio 2 Campione 2 (prof. 25.60m - 26.10m)
Contenuto in acqua (%)	19.15	20.80	16.95
Peso di volume (gr/cm³)	2.02	2.00	2.08
Densità secca (gr/cm³)	1.70	1.66	1.78
Densità satura (gr/cm³)	2.06	2.03	2.11
Peso specifico (gr/cm³)	2.67	2.66	2.65
Indice dei vuoti	0.575	0.607	0.490
Porosità (%)	36.51	37.77	32.89
Grado di saturazione (%)	88.92	91.15	91.67
Ghiaia (%)	-	-	-
Sabbia (%)	32.40	41.70	38.20
Limo (%)	60.60	49.30	58.80
Argilla (%)	7.00	9.00	3.00
Descrizione	Limo con sabbia	Limo con sabbia	Limo con sabbia
Angolo di attrito (gradi)	28.30	22.30	32.30
Coesione (kg/cm³)	0.30	0.50	0.40

3.4 SONDAGGI PRE-ESISTENTI E RETE SISMICA TEMPORANEA

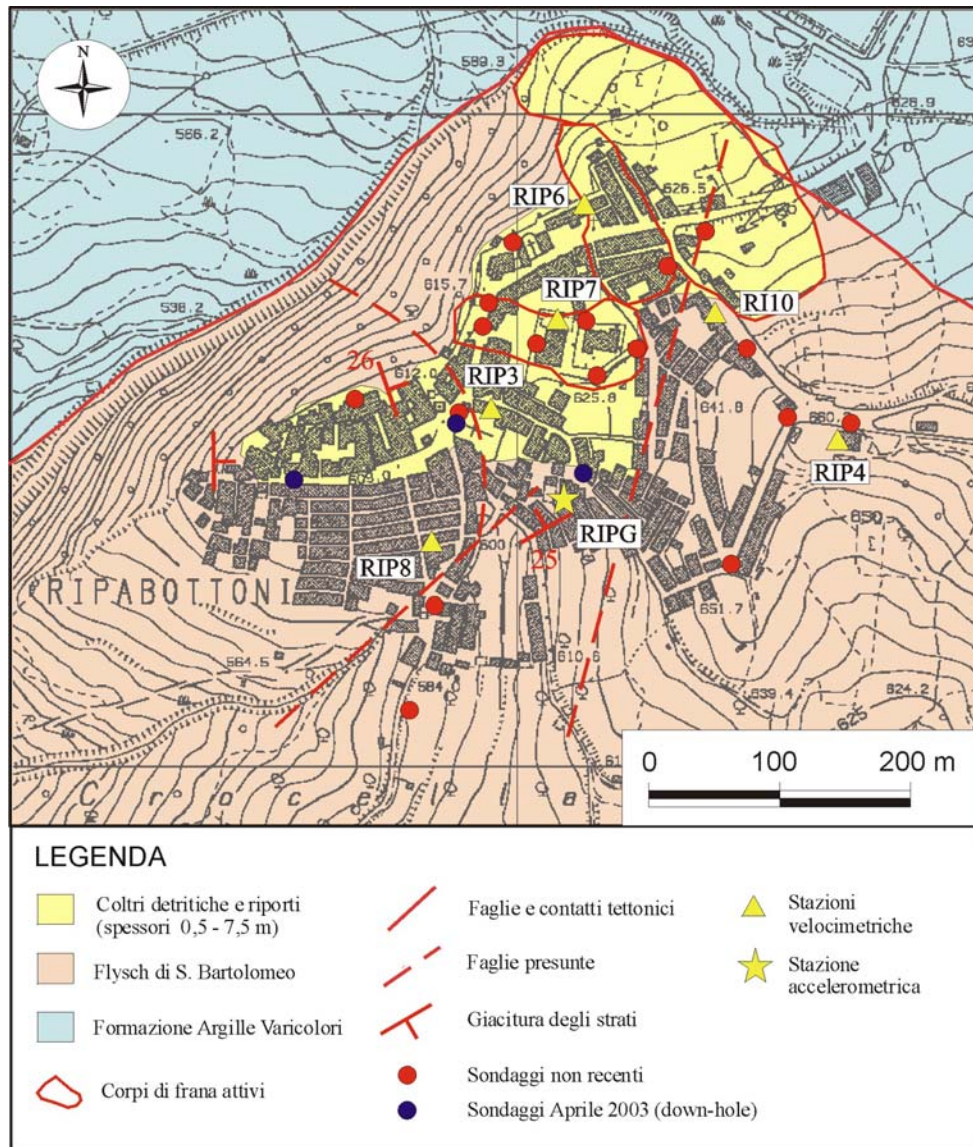


Fig 3.4. Schema geologico-strutturale e geomorfologico dell'area in studio. In figura è riportata la posizione delle stazioni velocimetriche ed accelerometrica utilizzate e l'ubicazione dei sondaggi disponibili. Le prove di sismica down-hole sono state effettuate in corrispondenza dei fori di sondaggio realizzati nell'aprile 2003 (cerchi blu). (Base topografica utilizzata C.T.R. scala 1:5000, elemento n° 394101 Ripabottoni. Assessorato all'urbanistica, Regione Molise 1994).

Tabella 3.3. Parametri geofisico-geotecnici utilizzati durante le fasi di modellazione numerica monodimensionale in corrispondenza di ogni stazione velocimetrica utilizzata.

		RIP3	RIP7	RIP4	RIP8	RIP6	RIP10
Strato 1 (Coltri detritiche sciolte)	Spessore (ft)	13	22	3	1	6	2
	Peso di Volume (pcf)	120	120	120	120	120	120
	Velocità onde taglio Vs (ft/sec)	450	450	450	450	450	450
	Smorzamento	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Strato 2 (Cappellaccio argilloso Alterato)	Spessore (ft)	30					
	Peso di Volume (pcf)	135					
	Velocità onde taglio Vs (ft/sec)	1200					
	Smorzamento	0.05					
Strato 3 (Cappellaccio arenaceo Alterato)	Spessore (ft)	10	60	60	60	40	55
	Peso di Volume (pcf)	125	120	135	135	120	120
	Velocità onde taglio Vs (ft/sec)	850	1000	1450	1550	650	700
	Smorzamento	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Strato 4 (Substarto flyschoidale)	Spessore (ft)	inf.	inf.	inf.	inf.	inf.	inf.
	Peso di Volume (pcf)	140	140	140	140	140	140
	Velocità onde taglio Vs (ft/sec)	2200	2200	2200	2200	2200	2200
	Smorzamento	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10

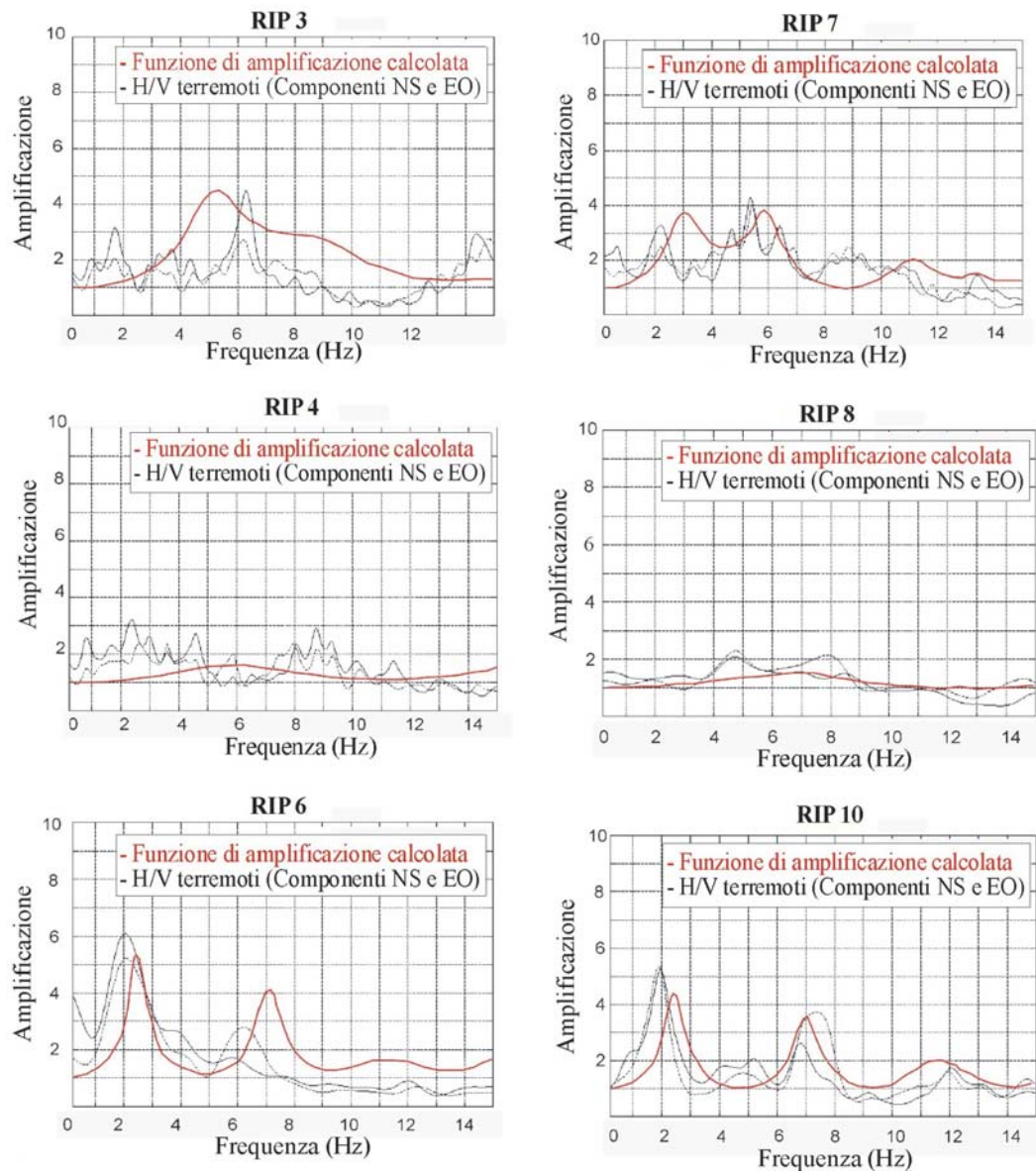


Fig 3.5. Funzioni di amplificazione ottenute tramite rapporti spettrali H/V calcolati utilizzando gli eventi sismici registrati (le linee nere a tratto continuo e tratteggiato rappresentano rispettivamente i rapporti NS/Z e EO/Z ottenuti mediando tutte le registrazioni disponibili) e le 'funzioni di amplificazioni calcolate' tramite analisi numerica monodimensionale (linee rosse) per ogni stazione sismica utilizzata.

All'interno del centro urbano di Ripabottoni sono state individuate tre differenti tipologie di effetti di amplificazione sismica locale, riassunti nella seguente tabella:

Tabella 3.4. Frequenze fondamentali e relativi valori dei fattori di amplificazione riscontrati in corrispondenza di ciascuna stazione velocimetrica utilizzata nel presente lavoro.

Nome stazione	Frequenza (Hz)	Fattore di amplificazione assoluto
RIP3	3 – 5	3 – 4
	6 – 7	4 – 5
RIP4	Piatta	Assenza di fenomeni di amplificazione
RIP6	2	5 – 6
RIP7	5 – 6	4 – 5
	2 – 3	3 – 4
RIP8	Piatta	Assenza di fenomeni di amplificazione
RIP10	2 – 3	5 – 6

1) le zone meridionali ed orientali dell’abitato, direttamente impostate sul Flysch di San Bartolomeo, non sembrano presentare fenomeni di amplificazione locale.

2) la zona centrale è caratterizzata da un basso livello di amplificazione (inferiore a 5) in corrispondenza delle frequenze comprese fra 4 e 6 Hz. Tale effetto potrebbe essere dovuto alla presenza di coltri eluvio-colluviali e di materiali di riporto che possono raggiungere in questa zona lo spessore di 7,5 m ed alla concomitante presenza di potenti livelli di natura argillosa.

3) la zona nord-orientale dell’abitato è, infine, caratterizzata da un effetto di amplificazione locale piuttosto evidente in corrispondenza di frequenze comprese fra 2 e 3 Hz. In questo settore lo spessore dei depositi superficiali è assai minore rispetto al caso precedente ed un effetto con tali caratteristiche potrebbe essere giustificato solo ipotizzando uno spessore rilevante (20 m circa) di materiale con caratteristiche geotecniche assai scadenti. Se, come nel caso della stazione RIP10, la vicinanza ad una faglia potrebbe confermare la summenzionata ipotesi, non è possibile invocare un’analoga condizione relativamente alla stazione RIP6. Riteniamo, quindi, che in tal caso l’effetto ottenuto possa almeno in parte essere legato a cause topografiche trovandosi, la stazione di misura stessa, alla sommità del ripido pendio che delimita l’abitato di Ripabottoni verso NW.

E’ necessario sottolineare che lo studio effettuato prescinde dalla distribuzione dei danni all’interno del centro abitato in esame. Sotto tale profilo alcuni studi effettuati recentemente (Cevasco, 2003) hanno messo in evidenza che la parte maggiormente danneggiata dell’abitato è quella occidentale, in corrispondenza della quale non sembrano esistere legami fra danneggiamenti e condizioni geologiche superficiali eventualmente responsabili di rilevanti fenomeni di amplificazione sismica locale.

3.5 ANALISI DEL DANNO

A seguito delle due scosse di terremoto (31 ottobre 2002: $M_I = 5.4$; 1 novembre 2002: $M_I = 5.0$), al comune di Ripabottoni è assegnata un’Intensità Macrosismica pari a 7. Un primo sopralluogo dei tecnici e ricercatori del CNR-DAST-L’Aquila aveva evidenziato una distribuzione anomala del danno (fig. 3.6), tenuto conto di un patrimonio edilizio che, ad una prima valutazione, sembrava avere caratteristiche strutturali abbastanza omogenee.

La distribuzione del danno, concentrato soprattutto nella zona ROSSA, e la tipologia del danno (fenomeni di schiacciamento, fratture verticali) sono correlabili sia alle caratteristiche degli edifici colpiti sia alle caratteristiche morfologiche presso cui le abitazioni fondano (effetto topografico o effetto cresta nella parte nord-occidentale del paese) sia alla presenza di fasi sismiche secondarie di notevole energia ad alta frequenza (> 8 Hz) legate alle caratteristiche della sorgente e/o della propagazione.

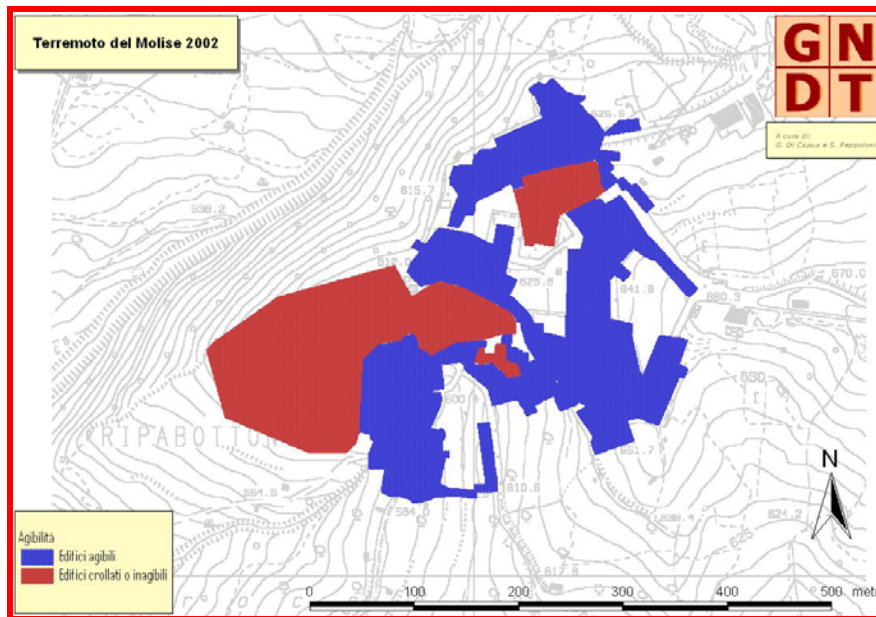


Fig. 3.6: Terremoto del Molise 2002 – Rielaborazione semplificata dalla mappa di agibilità redatta dai tecnici della Regione Lombardia: in rosso l'area in cui la percentuale di inagibilità è superiore a quella di agibilità, in blu l'inverso.

In figura 3.7 viene riportata la carta della Carta della distribuzione del danno, a cura dell'Arch. Carlo Melfi.

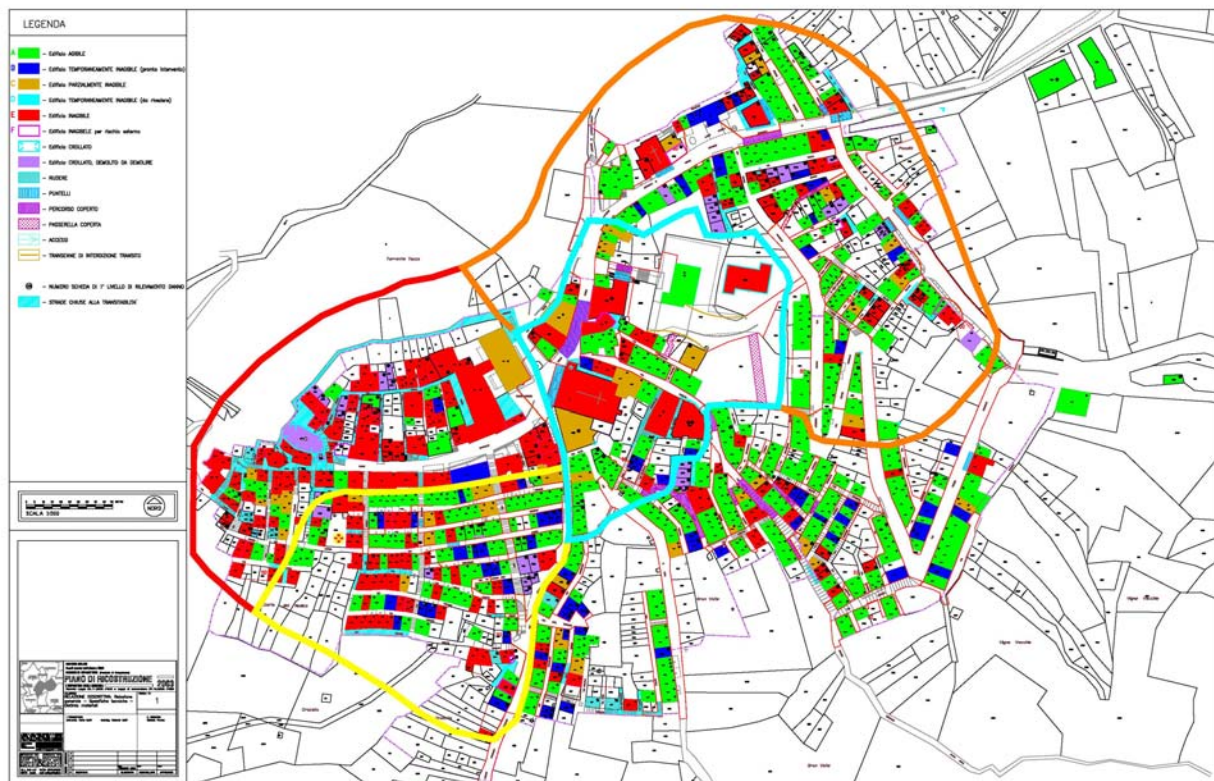


Fig 3.7: carta della distribuzione del danno

4. COLLETORTO

- mappa geologica e geomorfologia aggiornata
- n. 2 sezioni geologiche
- relazione geologica e geotecnica e caratterizzazione dei terreni
- n. 5 sondaggi corredati da test downhole e da prove geotecniche su campioni estratti
- definizione dell'input sismico attraverso analisi di Hazard e deaggregazione
- calcolo della funzione di trasferimento 1D relativa ai 5 downhole e definizione del coefficiente di amplificazione locale

5. SANTA CROCE DI MAGLIANO

- mappa geologica e geomorfologia aggiornata
- n. 3 sezioni geologiche
- relazione geologica e geotecnica e caratterizzazione dei terreni
- n. 4 sondaggi corredati da test downhole e da prove geotecniche su campioni estratti
- definizione dell'input sismico attraverso analisi di Hazard e deaggregazione
- calcolo della funzione di trasferimento 1D relativa ai 4 downhole e definizione del coefficiente di amplificazione locale

7. BIBLIOGRAFIA

- Baranello S., Bernabini M., Dolce M., Pappone G., Roskopf C., Sanò T., Cara P.L., De Nardis R., Di Pasquale G., Goretti A., Gorini A., Lembo P., Marcucci S., Marsan P., Martini M.G., Naso G. (2003). *Rapporto finale sulla Microzonazione Sismica del centro abitato di San Giuliano di Puglia*. Dipartimento di Protezione Civile, Roma.
- Bardet J. P., Ichii K., Lin C.H. (2000). *EERA - A computer Program for Equivalent-linear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits*. University of Southern California, Department of Civil Engineering.
- Clark I. (2001). *Practical geostatistics*. <http://uk.geocities.com/drisobelclark/practica.html>
- Giaccio B., Ciancia S., Messina P., Pizzi A., Saroli M., Sposato A., Cittadini A., Di Donato V., Esposito P., Galadini F. (2004). *Caratteristiche geologico-geomorfologiche ed effetti di sito a San Giuliano di Puglia (CB) e in altri abitati colpiti dalla sequenza sismica dell'ottobre-novembre 2002*, *Il Quaternario (Italian Journal of Quaternary Sciences)*, 17(1), Ed. Aiqua, pagg. 83-99
- Guerricchio A. (2005). *Comunicazione personale*.
- Hudson M., Idriss I. M., Beikae M. (1994). *Quad4M-A computer program to evaluate the seismic re-sponse of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base*. University of California, Davis.
- Isaaks E. H., Srivastava R. M. (1989). *Applied geostatistics*, New York, Oxford University Press (OUP).
- Lanzo G. & Silvestri F. (1999). *Risposta sismica locale: teorie ed esperienze*, *Argomenti di Ingegneria Geotecnica*, Hevelius Edizioni, Benevento.
- Mancuso C. (1996). *Misure dinamiche in sito – Applicazioni geotecniche*, *Argomenti di Ingegneria Geotecnica*, Hevelius Edizioni, Benevento.
- Melidoro G. (2004). *Comunicazione personale*.
- Penna A. (2004). *Applicazione della geostatistica allo studio della risposta sismica locale: la microzonazione sismica della città di Benevento*, *Tesi di Dottorato in Rischio Sismico*, Università di Napoli Federico II.
- Petillo C. (2004). *Risposta sismica del centro abitato di San Giuliano di Puglia*, *Tesi di Laurea in Ingegneria Geotecnica*, Università degli Studi di Napoli.
- Silvestri F., Vitone C., d'Onofrio A., Cotecchia F., Puglia R., Santucci de Magistris F. (2006). *The influence of meso-structure on the mechanical behaviour of a marly clay from low to high strains*, *Symposium to celebrate Prof. Tatsuoka's 60th birthday*, Roma.
- Vinale F., Mancuso C., Silvestri F. (1996). *Dinamica dei terreni*, *Manuale di Ingegneria Civile Ed. Scientifiche A. Cremonese - Zanichelli*.