

COMMITTENTE:



DIREZIONE LAVORI:



APPALTATORE:

CONSORZIO:



SOCI:



PROGETTAZIONE:

MANDATARIA:



MANDANTI:



PROGETTO ESECUTIVO

ITINERARIO NAPOLI - BARI RADDOPPIO TRATTA APICE - ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA

GEOTECNICA

TRATTE IN SOTTERRANEO

Relazione di caratterizzazione geotecnica / geomeccanica del Flysch Rosso interagente con le Gallerie Grottaminarda e Melito

APPALTATORE	DIRETTORE DELLA PROGETTAZIONE	PROGETTISTA
Consorzio HIRPINIA AV Il Direttore Tecnico Ing. Vincenzo Moriello 10/06/2019	Il Responsabile integrazione fra le varie prestazioni specialistiche Ing. G. Cassani	 Ing. G. Cassani

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV. SCALA:

I	F	2	8	0	1	E	Z	Z	R	B	O	C	0	2	0	1	0	0	2	B	-
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione per consegna	Terre Leggere	21/02/2020	B. Spigarelli	21/02/2020	M. Gatti	21/02/2020	Ing. G. Cassani 10/06/2020
B	Revisione per istruttoria	Terre Leggere	10/06/2020	B. Spigarelli	10/06/2020	M. Gatti	10/06/2020	

File: n. Elab.: -

**“Progettazione Esecutiva ed Esecuzione dei lavori della linea ferroviaria
Napoli-Bari raddoppio tratta Apice-Orsara – 1° Lotto funzionale Apice-Hirpinia
tra le Pk 0+310 e Pk 18+715.205”**

**STUDIO GEOTECNICO PER LA CARATTERIZZAZIONE DEL
FLYSCH ROSSO**

**Relazione
“Analisi ed interpretazione dei risultati delle indagini”**

I Consulenti scientifici

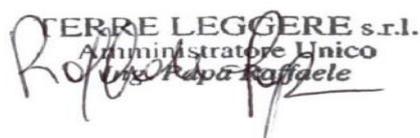
Prof. Ing. Gianfranco Urciuoli



Prof. Geologo Antonio Santo



TERRE LEGGERE s.r.l.
Amministratore Unico
Ing. Papa Raffaele



**Il direttore Tecnico
Ing. Domenico De Santo**



INDICE

1. Descrizione delle Facies Litologiche del FLYSCH ROSSO interessate dallo scavo delle gallerie “GROTTAMINARDA” E “MELITO” tra le progressive km 2 +705 e km 7 +145	6
1.1. Premessa.....	6
1.2. Breve sintesi della letteratura sulla geologia dell’area e sul Flysch Rosso	10
1.3. Descrizione delle diverse facies litologiche del Flysch Rosso	15
2. Descrizione delle Facies Litologiche del FLYSCH ROSSO interessate dallo scavo delle gallerie “GROTTAMINARDA” E “MELITO” tra le progressive km 2 +705 e km 7 +145	61
2.1. Premessa.....	61
2.1. Cumulo di frana – cf.....	62
2.2. Argille Grigie Marnose Scagliose del Flysch Rosso - FYRagms.....	69
2.3. Formazione di Anzano	74
2.4. Argille Policrome del Flysch Rosso - FYRavc	81
2.5. Matrice argillosa dei conglomerati del Flysch Rosso - FYRcgp.....	86
3. Caratteristiche Fisiche del Flysch Rosso.....	93
3.1. Caratterizzazione Fisica	93
4. Caratteristiche Meccaniche del Flysch Rosso	104
4.1. Generalità.....	104
4.2. Aspetti generali del comportamento meccanico del Flysch Rosso.....	105
4.3. Caratterizzazione meccanica del Flysch Rosso	110
4.4. Prove di Laboratorio.....	113
4.5. Caratterizzazione meccanica della matrice argillosa.....	123
4.6. Caratterizzazione meccanica della componente lapidea.....	136
4.7. Considerazioni sulla pressione di rigonfiamento.....	140
4.8. Considerazioni sugli effetti del creep	141
4.9. Riepilogo e conclusioni.....	143
5. Appendice 1	150
5.1. Prove CROSS_HOLE	150
5.2. Prove DOWN-HOLE.....	154



Introduzione

La caratterizzazione dei terreni a struttura complessa, dopo decenni di studi e ricerche, rimane una sfida aperta per l'ingegneria geotecnica.

La presenza all'interno dell'ammasso di una componente lapidea variamente disposta (in strati o elementi isolati) e di una matrice argillosa che si alterna alla roccia, oppure in talune circostanze è continua e ingloba gli elementi lapidei, rende molto complessa la caratterizzazione alla scala dell'ammasso. Inoltre, queste formazioni presentano una forte variabilità interna: cambia la natura della componente lapidea, il suo grado di fratturazione, la sua disposizione strutturale, cambia altresì la natura mineralogica della componente pelitica per cui ogni formazione si presenta con varie facies che dal punto di vista geotecnico possono avere comportamenti diversi.

Fra i terreni a struttura complessa dell'Appennino meridionale, il Flysch Rosso è quello che merita la maggiore attenzione sotto il profilo ingegneristico, per l'elevata tettonizzazione a cui è stato sottoposto nella sua storia geologica e per l'elevata plasticità della matrice pelitica che quindi presenta resistenza e rigidità ridotte e spiccata suscettibilità al rigonfiamento.

Date queste premesse, lo studio geologico-tecnico e geotecnico condotto ha dovuto affrontare i problemi di cui si è scritto.

La presente relazione rispetta le tappe logiche e cronologiche dello studio geologico-tecnico e geotecnico. In primo luogo, è stato condotto un attento esame in sito delle cassette dei sondaggi per individuare le componenti litologiche delle formazioni, l'orditura degli strati di roccia, la natura della componente pelitica. Inoltre, dalle risultanze delle perforazioni teleguidate è stato possibile individuare i contatti fra le formazioni e fra le facies.

Le principali facies del Flysch Rosso sono state distinte in base alla litologia prevalente (argille, marne, arenarie, conglomerati e calcari) e dall'alto stratigrafico sono state riconosciute: FYRagms (argille marnose grigie scagliose); FRYavc (argille policrome); FYRmar (Flysch Rosso marnoso argilloso); FYRar (Flysch Rosso arenaceo-marnoso); FYRcg (brecce e conglomerati poligenici); FYRac (alternanze di argille, marne e calcari); FYR2C (calcari brecce e argille).

Sono state inoltre riconosciute la formazione di Anzano (ANZ2) e le argille plioceniche della Baronia (BNA2g).



Quindi per ogni facies individuata nella prima parte della relazione sono stati descritti la natura della componente lapidea e di quella pelitica e il rapporto volumetrico dell'una e dell'altra rispetto all'ammasso.

Queste informazioni sono propedeutiche alla caratterizzazione meccanica dell'ammasso.

Nella seconda parte di questa relazione è stata dettagliatamente descritta la sperimentazione eseguita presso il laboratorio geotecnico dell'Università degli Studi di Napoli Federico (campagna 1) sui campioni argillosi delle matrici pelitiche individuate: ANZ2ar (membro arenaceo argilloso di Anzano), ANZ2mar (marne di Anzano), FYRagms (argille marnose scagliose del Flysch Rosso), FYRavc (argille policrome del Flysch Rosso), FYRar (argille del Flysch Rosso), FYRcgp (matrice argillosa dei conglomerati del Flysch Rosso). Questo capitolo ha una valenza esemplificativa, nel senso che è servito a descrivere le prove effettuate e la procedura di elaborazione dei risultati. Questi dati, ovviamente, sono parziali in quanto non tengono conto dei risultati della sperimentazione eseguita nel laboratorio geotecnico dell'Università degli Studi di Potenza (campagna 2), della campagna sperimentale del progetto definitivo (campagna 3) ed infine delle prove eseguite dai laboratori commerciali (campagna 4) a corredo del progetto esecutivo. Lo scrivente, che ha potuto osservare direttamente i campioni soggetti a prova presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II e ha potuto assegnarli alle varie formazioni e alle varie facies, ha preferito avere un proprio riferimento rispetto al quale confrontare i risultati delle campagne 2, 3 e 4, soprattutto per poter assegnare anche questi ultimi campioni alla loro formazione e alla loro facies, anche sulla base delle caratteristiche fisiche e del comportamento esibito, oltre che della loro posizione nei sondaggi.

Nella terza parte della relazione sono stati aggregati tutti i dati sperimentali disponibili (campagne 1, 2, 3 e 4), procedendo alla caratterizzazione dei vari tipi di matrice pelitica e poi dell'ammasso.

La resistenza meccanica è stata determinata rappresentando nello stesso piano di Mohr i risultati delle prove di taglio diretto e delle prove di compressione triassiale, per ogni tipo di matrice individuata. Per ogni gruppo omogeneo di dati, è stata tracciata un'unica retta di regressione; sono stati così determinati la coesione intercetta e l'angolo di attrito. Il modulo di deformabilità è stato determinato a partire dalle prove di torsione che hanno consentito di determinare prima il modulo di taglio iniziale G_0 e poi quello operativo, ad un livello di deformazione $\gamma = 0.1\%$; da tale modulo si è passati alla stima di E attraverso le relazioni elastiche che legano i due parametri. Questi risultati sono stati poi confrontati con quelli desumibili dalle prove dilatometriche eseguite in foro, quando



c'era chiara evidenza che queste erano state eseguite sulla matrice pelitica, ritrovando un ottimo accordo.

Successivamente è stata caratterizzata la componente lapidea alla scala dell'ammasso, sulla base della natura della roccia e del suo grado di fratturazione espresso attraverso l'indice RMR di Beniaowski. Non avrebbe avuto senso in questo caso assumere come significativi i moduli di deformabilità della matrice rocciosa determinati in laboratorio in prove di compressione uniassiale, in quanto la rigidità alla scala dell'ammasso è regolata dal reticolo di fratture, dalla loro apertura e soprattutto dall'eventuale riempimento delle fratture stesse con materiale fine. Per questo motivo la stima del modulo di deformabilità della roccia è stata cautelativa, soprattutto per il calcare e per le marne, in cui le fratture sono spesso aperte o beanti. Questa condizione è meno evidente nelle arenarie, per le quali la stima del modulo di deformabilità è stata meno penalizzante. In ogni caso le determinazioni di laboratorio, quando disponibili, sono state opportunamente considerate ed hanno costituito un limite superiore utile al raffronto.

Per quanto riguarda l'ammasso, si è fatto riferimento alla resistenza della matrice, il cui angolo di attrito è stato incrementato per tenere conto della presenza della componente lapidea, quando questa in volume supera l'aliquota del 25%. Precisamente, nel modello utilizzato l'angolo di attrito interno aumenta all'aumentare della proporzione volumetrica dei blocchi a causa dell'aumento della tortuosità della superficie di rottura; in particolare l'angolo di attrito interno dell'ammasso assume lo stesso valore della matrice fino a quando il volume dei blocchi è minore o uguale del 25% del volume totale; esso subisce incrementi fino a 15° laddove la porzione lapidea raggiunge il 75% del volume totale; al di sopra della percentuale volumetrica del 75% non sono stati considerati ulteriori incrementi di resistenza.

Per il modulo di deformabilità dell'ammasso si è fatto riferimento ad un modello di composizione dei litotipi. La formulazione proposta per la determinazione del modulo elastico equivalente in direzione degli strati (E_h) ed in direzione ortogonale ad essi (E_v) è funzione delle caratteristiche elastiche della matrice pelitica e della roccia, nonché della percentuale volumetrica della porzione lapidea. Si tratterebbe in questo caso di un modello elastico anisotropo che avrebbe validità se gli strati rocciosi fossero continui. In mancanza di continuità è lecito far riferimento al mezzo elastico lineare omogeneo ed isotropo, il cui modulo di deformabilità è il minore dei due, cioè E_v .



Parte I

Esame delle indagini: interpretazione dei sondaggi e delle prove in sito, delle video ispezioni, ricostruzione della configurazione strutturale lungo le gallerie

1. Descrizione delle Facies Litologiche del FLYSCH ROSSO interessate dallo scavo delle gallerie “GROTTAMINARDA” E “MELITO” tra le progressive km 2 +705 e km 7 +145

1.1.Premessa

Nella tratta della nuova linea ferroviaria dell’Alta Velocità 1° lotto funzionale dell’asse ferroviario Napoli-Bari di circa 10 km, compresa tra le stazioni “Hirpinia” e “ Apice”, è prevista la realizzazione di tre gallerie: Grottaminarda, Melito e Rocchetta, rispettivamente di circa 2, 4 e 6 km. Le prime due interessano complessi calcareo-argillosi, meglio noti in letteratura come “Unità del Flysch Rosso”, le formazioni arenaceo-argillose mioceniche di “Anzano” e quelle essenzialmente argillose plioceniche della “Baronia”. La galleria Rocchetta interessa quasi esclusivamente le argille, le marne e i conglomerati pliocenici (da Figura 1.1 a Figura 1.4).



Figura 1.1. Vista dell’area interessata dalla galleria “Grottaminarda” con ubicazione approssimativa dei sondaggi.

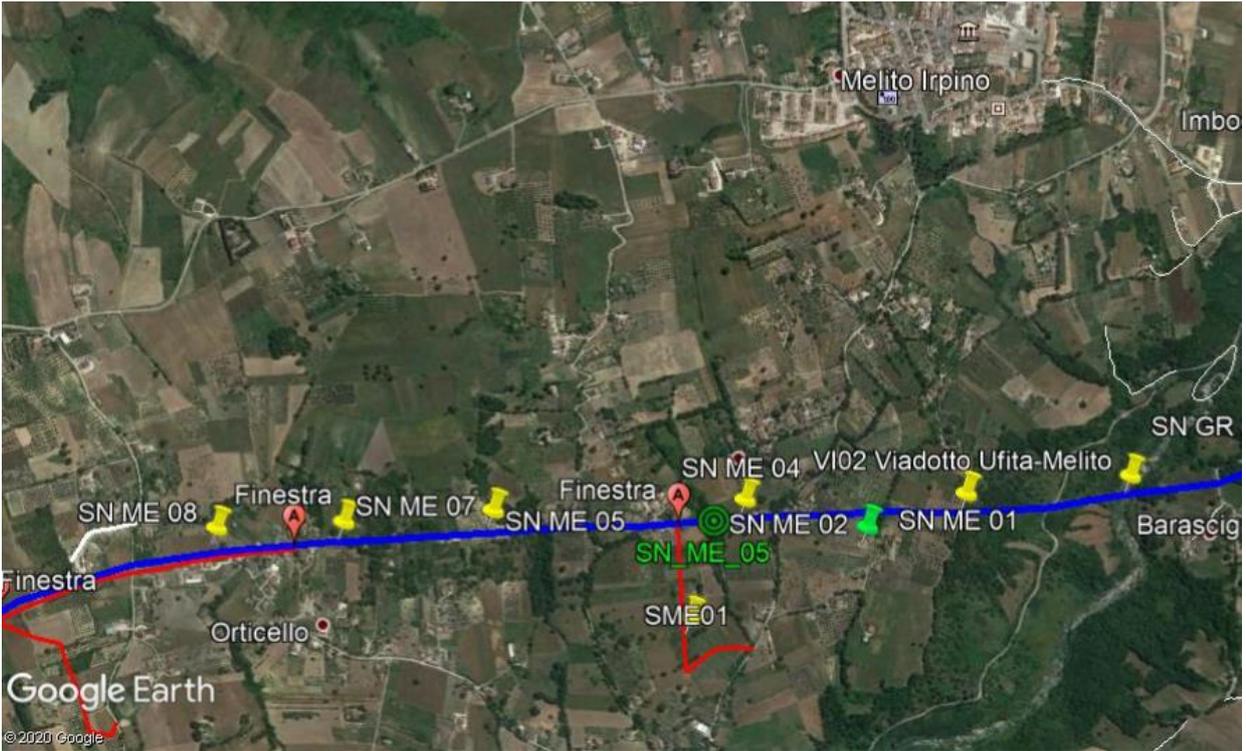


Figura 1.2. Vista dell'area interessata dalla galleria "Melito" con ubicazione approssimativa dei sondaggi.

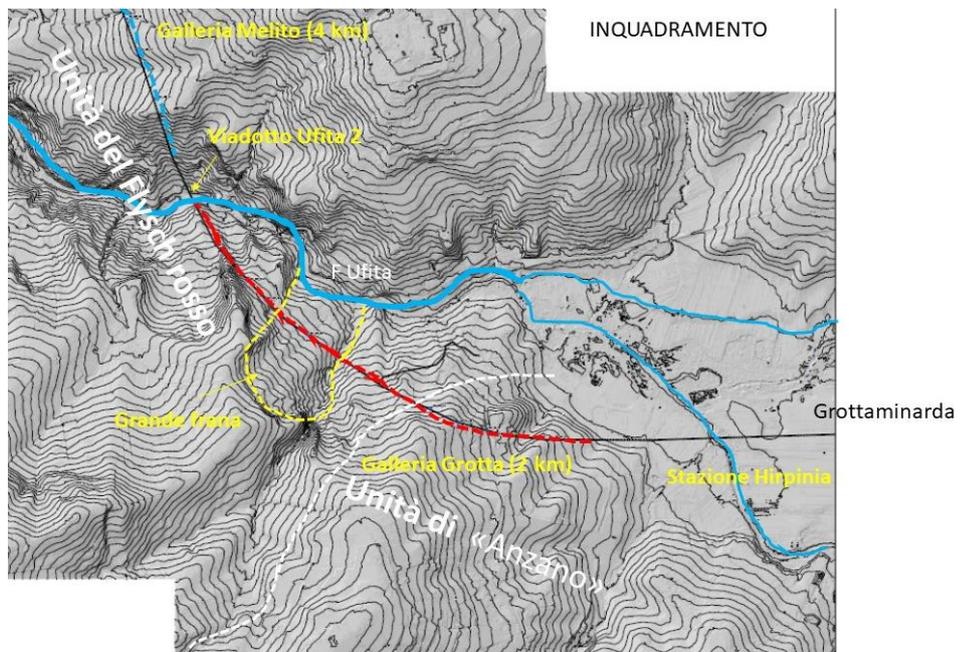


Figura 1.3. Inquadramento su base topografica della galleria Grottaminarda (linea rossa).

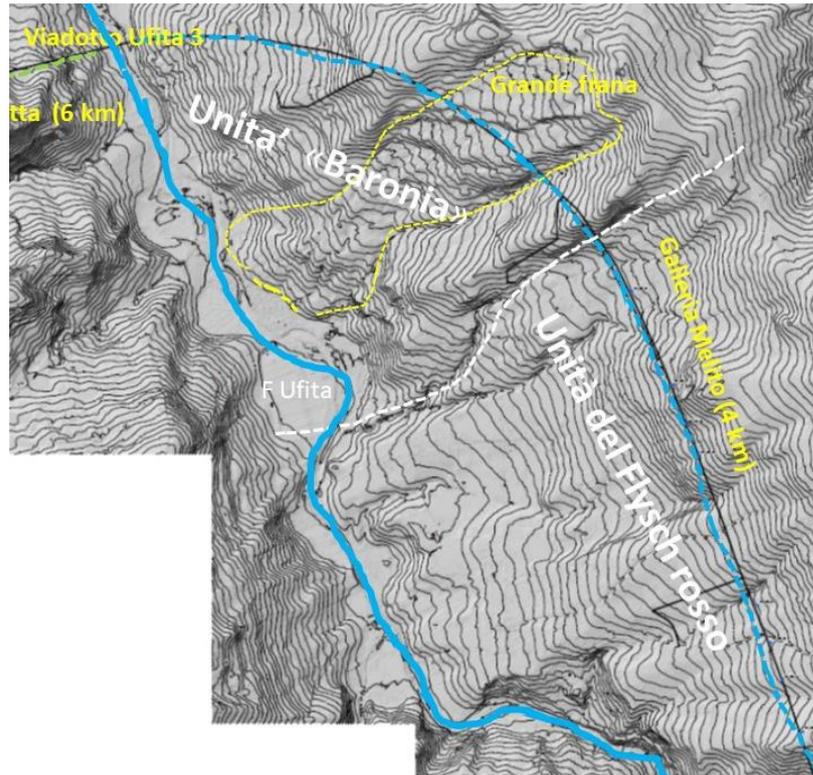


Figura 1.4. Inquadramento su base topografica della galleria Melito (linea azzurra).

Nella presente relazione vengono descritte le caratteristiche litostratigrafiche delle diverse facies del Flysch Rosso sulla base di uno studio che ha tenuto conto di: i) osservazioni dirette sul campo, ii) precedenti campagne di indagini geognostiche, iii) osservazione di 25 nuove perforazioni a carotaggio continuo eseguite nell'autunno e nell'inverno 2019. I rapporti geometrici tra i diversi terreni, soprattutto alla quota dello scavo della galleria, sono stati definiti grazie anche alla realizzazione di indagini geofisiche (geoelettriche e simiche) e di alcune perforazioni orizzontali teleguidate.

Il tratto interessato dallo scavo delle gallerie, cui si farà riferimento in questa relazione, presenta una lunghezza lineare di circa 6 km (*Figura 1.1 e Figura 1.2*) ed è localizzato nell'alta valle del F. Ufita, nei comuni di Grottoaminarda e Melito. Esso più precisamente si sviluppa dall'ingresso della galleria Grottoaminarda (lato Bari, progr.km 2 + 705) sino al tratto in cui la galleria Melito intercetta i terreni pliocenici dell'Unità della Baronia (progr. Km 7 + 145). Morfologicamente l'area è caratterizzata da un paesaggio collinare, generalmente a debole pendenza, interessato in più punti da grandi corpi di frana attivi. Pendenze maggiori caratterizzano il fondovalle del F. Ufita dove l'incisione fluviale ha generato dei tratti in forra.

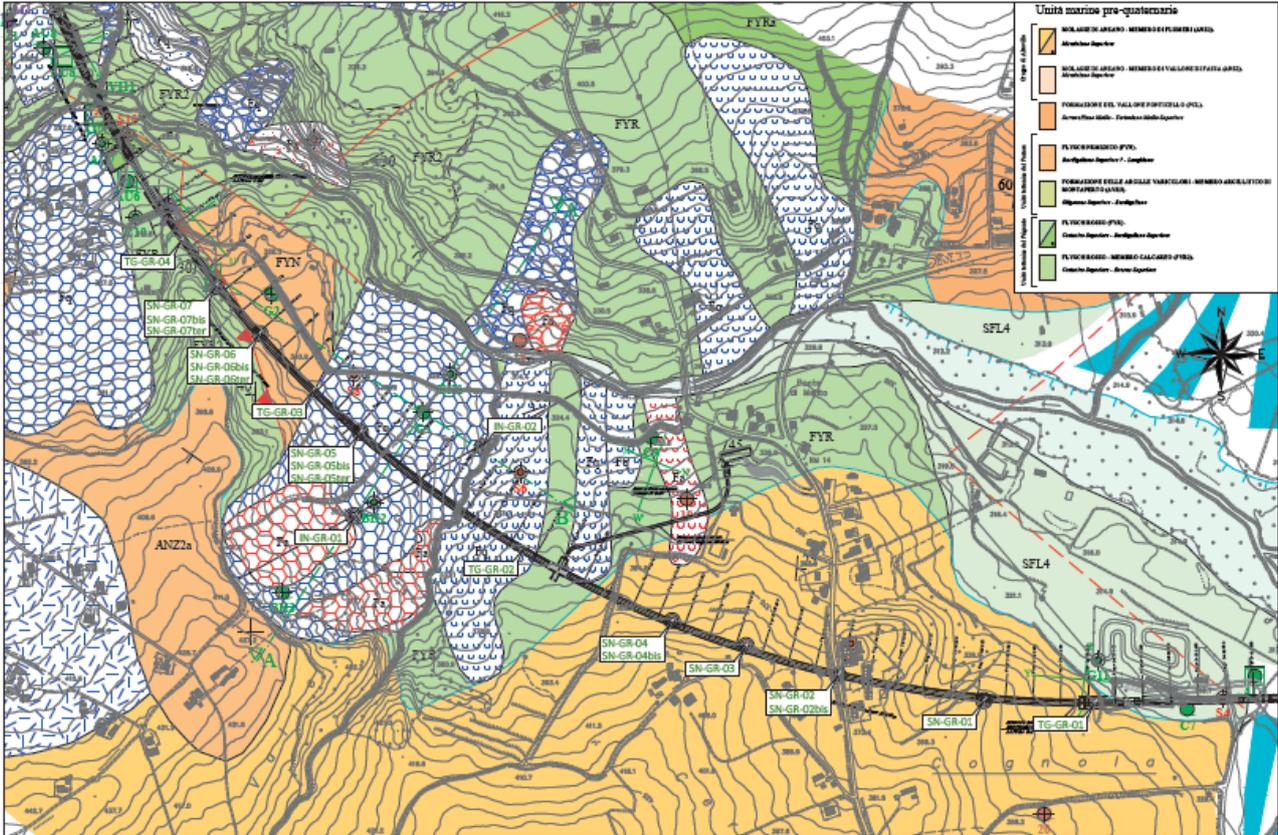


Figura 1.5. Carta geologica della galleria Grotta Minarda (dal Progetto definitivo).

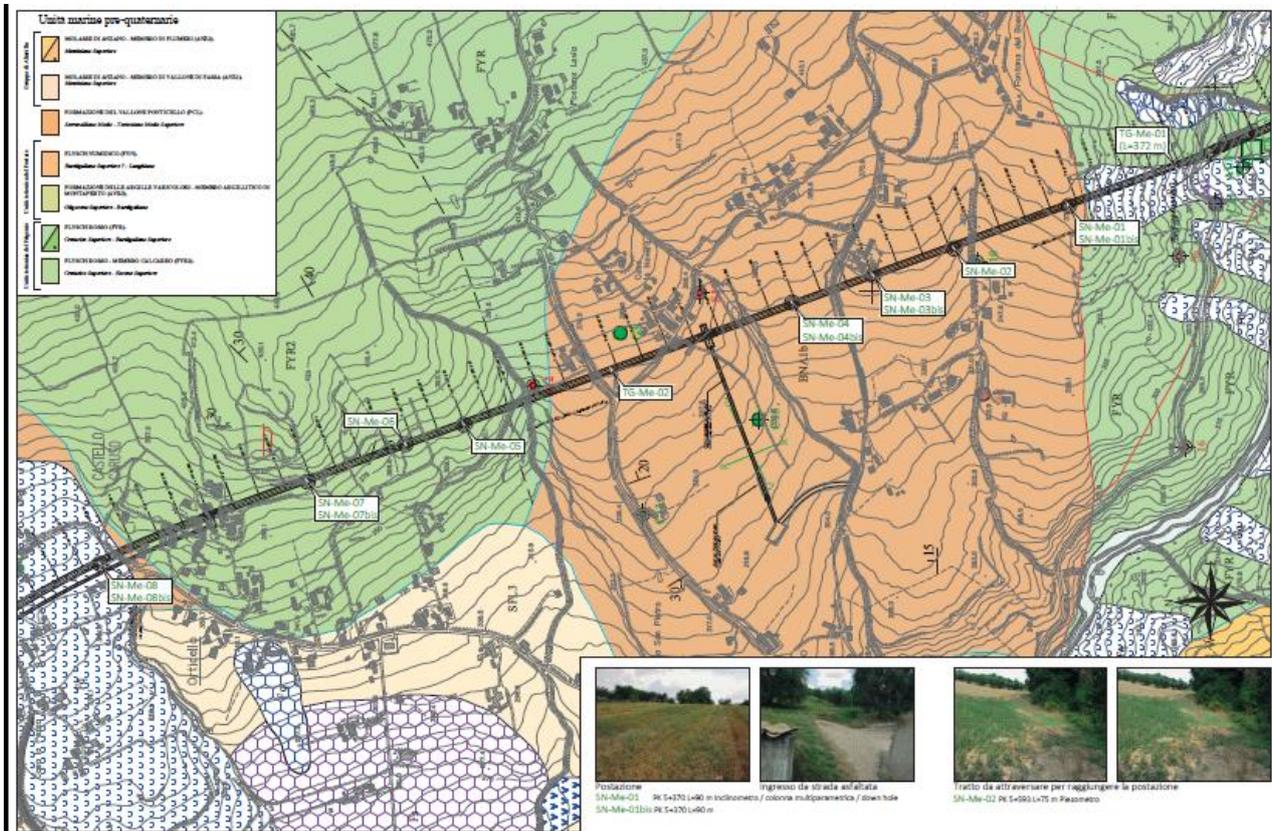


Figura 1.6. Carta geologica della galleria Melito (dal Progetto definitivo).

In sintesi, si può affermare che le due gallerie (Grottaminarda e Melito) interessano tre diverse unità litostratigrafiche con caratteri geologici (sedimentologici e tettonici) molto diversi tra loro. Dall'imbocco est della galleria Grottaminarda, sino alla progressiva km 3+270 si attraversano molasse alto mioceniche dell'Unità argilloso arenacea di Anzano, poco deformate (*Figura 1.3* e *Figura 1.5*). Da questo punto sino alla progr. km 7 +145, è presente l'unità mesozoico-terziaria del Flysch Rosso, che comprende diverse facies litologiche, spesso molto deformate. Nell'ultimo tratto la galleria prosegue attraversando terreni prevalentemente argillosi e molto ben stratificati, appartenenti alle Unità plioceniche della Baronìa (*Figura 1.4* e *Figura 1.6*). Le coperture in asse galleria hanno spessore di poche decine di metri in prossimità degli imbocchi ed in gran parte della galleria Grottaminarda, mentre superano spesso i 100 m nella galleria Melito.

I numerosi sopralluoghi e l'osservazione diretta di numerose carote di sondaggio hanno permesso di differenziare le diverse facies litologiche del Flysch Rosso. Sono stati investigati gli spessori dei diversi livelli ed è stato possibile definire con buona precisione il modello geologico alla profondità della galleria che, in assenza di indagini, sarebbe stato impossibile interpretare, vista la scarsa presenza di affioramenti in superficie.

1.2. Breve sintesi della letteratura sulla geologia dell'area e sul Flysch Rosso

La formazione del Flysch Rosso, introdotta in letteratura da SCANDONE nel 1967, è composta da successioni calcareo-clastiche e pelitiche di età cretacico-mioceniche poggianti sui termini mesozoici della successione calcareo-silico-marnosa, con spessori che variano da un minimo di 100 ad un massimo 800 m.

Il bacino paleogeografico di appartenenza è il Bacino Lagonegrese-Molisano mentre l'ambiente deposizionale è di scarpata-bacino pelagico, interessato da eventi torbiditici.

Il contenuto fossilifero della formazione è costituito da frammenti di Rudiste, di Briozoi, Alveoline, Nummuliti, Orbitoidi, Radiolari, Alghe rosse, Alghe corallinacee, Echinodermi, Spugne, e Foraminiferi planctonici che hanno consentito l'attribuzione dell'unità all'intervallo Cretacico inferiore *p.p.*- Miocene *p.p.* (Valanginiano?-Aquitano).

La formazione poggia in continuità di sedimentazione sul Flysch Galestrino e passa stratigraficamente verso l'alto al Flysch Numidico.

Il contatto con il Flysch Galestrino è ben osservabile in diversi affioramenti; i principali riportati in letteratura si riferiscono a quelli rinvenuti a nord di Tito, a sud di Pergola, a Costa del Ragazzo ad est di Abriola, a Toppo Camposanto e nell' area di Vallone Ontrato.

Dal punto di vista litostratigrafico il Flysch Rosso può essere sinteticamente descritto come una successione costituita nella parte bassa da argilliti e radiolariti con sottili intercalazioni di livelli bituminosi (*black shales*), cui segue un'alternanza di argille, marne e calcilutiti rosse. Sono presenti, inoltre, calcareniti e calcilutiti torbiditiche, di colore biancastro, con subordinate intercalazioni di marne argillose ed argilliti rosse e verdi, ed infine calciruditi a matrice biolitoclastica.

Proseguendo verso l'alto, nella successione, si possono individuare alternanze di strati molto spessi con brecciole gradate e calcareniti laminate a Nummuliti ed Alveoline.

Nella parte più alta la formazione evolve verso termini decisamente più pelitici, presentando alternanze di argilliti marnose di vario colore, con subordinati livelli di risedimenti carbonatici ad Alveoline, Nummuliti e vari bioclasti.

Ripetutamente e a più altezze stratigrafiche sono osservabili intercalazioni di lenti calcareo-clastiche decametriche.

La sequenza è ben descritta in un approfondito lavoro che ricostruisce anche i rapporti con le altre formazioni di bacino, di COCCO E., CRAVERO E., ORTOLANI F., PESCATORE T., RUSSO M., TORRE M. & COPPOLA L. (1974) - *Le unità Iripine nell' area a Nord di Monte Marzano, Appennino meridionale (Figura 1.7).*

TOPPA GURLANDO E M. PETRELLA

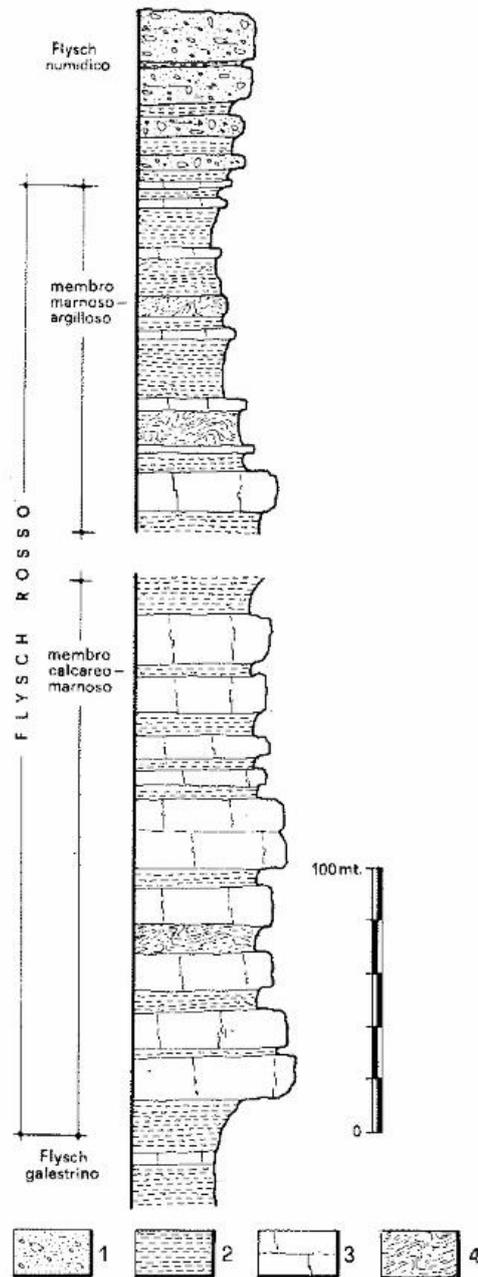


fig. 38 — Località Toppa Gurlando e Monte Petrella: colonna stratigrafica.
 1) quarzareniti; 2) marne ed argille; 3) calciruditi e calcareniti; 4) intervalli caotici.

Figura 1.7. Colonna stratigrafica del Flysch Rosso (da Cocco et alii, 1974).

Nel tempo alla formazione sono state attribuite differenti denominazioni locali entrate successivamente in uso nella letteratura geologica; le principali sono:

- formazione/flysch di Pescopagano,
- formazione/unità di Toppo Camposanto,
- alternanza di Bosco S. Michele,

- formazione calcarea di Gesualdo,
- calcareniti e marne rosse di Campomaggiore,
- alternanza argilloso-calcarea di Monte Malomo,
- formazione di Monte Malomo,
- calcareniti ed argilliti rosse di Fontana Valloneto,
- argilliti, marne e diaspri varicolori di Calanche,
- formazione di S. Croce.

Tra i lavori che descrivono il F. Rosso si ricorda quello di PESCATORE & ORTOLANI (1973) che nello “*Schema tettonico dell’Appennino campano-lucano*” individuarono una componente di *Flysch Rosso interno* (formazione di Toppo Camposanto) ed un *Flysch Rosso esterno*, distinguendo le successioni calcareo-marnoso-argillose alimentate rispettivamente dalla piattaforma campano-lucana e dalla piattaforma apula.

Il *Flysch Rosso interno* viene descritto come una successione di calcareniti e calciruditi torbiditiche, con intercalazioni di marne ed argille rosse, con livelli selciferi e diasprigni depositi in un ambiente di base di scarpata o margine di bacino, prossimo alla piattaforma campanolucana.

Il *Flysch Rosso esterno*, costituito da calcareniti e calcilutiti torbiditiche, marne, argille marnose e argille rosse e verdi, è stato interpretato come una facies marginale esterna del Bacino Lagonegrese-Molisano, alimentata dalla piattaforma carbonatica apula.

Recentemente dai rilevamenti effettuati per i fogli CARG 1:50.000 sono emersi nuovi dati (*Figura 1.8 e Figura 1.9*), sulla base dei quali si è deciso di suddividere la formazione in due membri ed una litofacies, riportati nei fogli geologici con sigle differenti:

- membro diasprigno (FYR1),
- membro calcareo (FYR2),
- litofacies calcareo-clastica (FYRa).



Figura 1.8. Stralcio del foglio geologico CARG del settore interessato dalle gallerie Grottaminarda e Melito.



FLYSCH ROSSO

Alternanza di calcareniti fini grigio-verdastre laminare (sequenze T₁₋₃) con miogiosine ed anfigestine e di marne calcaree, marne, argille marnose, argilliti rosso-brune e subordinatamente, grigio-verdognole; le marne calcaree sono caratterizzate da laminazione piano-parallela o ondulata legata a correnti torbiditiche di bassa densità. L'ambiente di deposizione è di tipo pelagico, legato ad un margine carbonatico che fornisce apporti torbiditici. Spessore di circa 600 m. Si distingue un membro nella parte bassa: **membro diasprigno** (FYR₁), che passa verso l'alto al **membro calcareo** (FYR₂); quest'ultimo è in rapporto latero-verticale con FYR₃ a diverse altezze si intercala una litofacies calcareo-clastica (FYR₃). Limite inferiore tettonico con TUT, AV, CPA, FMS e ALV; limite superiore erosivo con discordanza angolare con SAD, RVM, UPB e con diversi termini di CVT, tettonico con FMS. La base di FYR₂ è riferibile al Cretacico inferiore p.p. (da letteratura), microfauna nella parte media sono riferibili all'Oligocene superiore (zona CP19b), nella parte alta al Burdigaliano superiore.
CRETACICO INFERIORE p.p. - MIOCENE INFERIORE p.p.

membro calcareo (FYR₂)

Calcareniti grigio-verdastre con alveoline, nummuliti e orbitoidi in strati medi, associate a calciruditi bianco-grigiasstre, saccharidi in strati da medi a spessi e breccie calcaree con clasti (di diametro fino a decimetrico) di ambiente nerficio; si rinvengono torbiditi calcarenitiche in banchi gradati (intervallo T₁₋₃) con alla base degli strati mud chips; la stratificazione è irregolare, con base talora erosive. Si intercalano talora dolorenti grigie stratificate con base piana, laminare e gradate in strati molto spessi. Nella parte alta si rinvengono alternanze ritmiche di calcareniti grigio-chiare in strati spessi (fino a 40 cm), gradati e laminati (T₁₋₃) e di marne calcaree bianche e argille marnose di colore rosso e verde in strati sottili e spessi. Si evidenzia la presenza di un joint sistemato. L'ambiente di deposizione è riferibile ad una scarpata carbonatica raccordata al bacino pelagico. Spessore di circa 300 m. Limite inferiore stratigrafico con FYR₃, tettonico con AV, TUT, CPA, ALV, FAE. Limite superiore erosivo con discordanza angolare con CVT₁, CVT₂, SAD, RVM, RVM, tettonico con ALV.
CAMPANIANO - MIOCENE INFERIORE p.p.

membro diasprigno (FYR₁)

Intercalazioni di argilliti rosso-brune e marne calcaree silicifere laminare (intervalli T₁₋₃), argille silicifere nerastre, diaspri rosso-bruno e nerastro, calcari marnosi diasprigni giallastri in strati sottili con base piana o poco ondulata. L'ambiente deposizionale è di bacino profondo in prossimità di una scarpata di piattaforma carbonatica. Spessore di circa 40 m. Limite inferiore tettonico con AV, TUT, CPA. Limite superiore stratigrafico con FYR₂, erosivo con discordanza angolare con CVT₁, SAD, e RVM.
CRETACICO INFERIORE p.p. - SUPERIORE p.p.

litofacies calcareo-clastica (FYR₃)

Calcari grigio-biancastri e breccie calcaree in strati e banchi (di spessore metrico) massivi con geometria irregolare; si intercalano: rudstone biotoclastici a molluschi, con stratificazione ondulata lenticolare tipo faser; calcari cristallini saccharoidi biancastri e grigio avana con vene spatite; subordinatamente calciruditi a frammenti di rudiste in strati irregolari, packstone grainstone grigio-avana ad intraclasti e peloidi con frammenti di calcari di scogliera, talora con orbitoidi; calcareniti fini grigio-azzurre e calcari marnosi grigio-scuro compatti. Nella parte alta sono presenti intercalazioni di marne argillose ed argilliti rossastre e calcareniti con macroforaminiferi (alveoline e nummuliti). Il limite inferiore è tettonico con AV, CPA, il limite superiore è stratigrafico con FYR₂; erosivo con discordanza angolare con UPB, SAD, tettonico con FMS.
CRETACICO SUPERIORE p.p. - MIOCENE INFERIORE p.p.

Figura 1.9. Descrizioni litologiche del F. Rosso da dati CARG.

Il *membro diasprigno* (argilliti e radiolariti di Campomaggiore, membro calcareo di Gesualdo) è formato da argilliti grigio, verdi e rosse a cui si intercalano sottili strati calcarei con liste e noduli di selce scura, straterelli di diaspri di colore variabile dal grigio al giallastro, lamine di *black shales* e livelli di marne silicizzate. Le marne calcaree selcifere presentano una marcata laminazione da piano-parallela a ondulata. Verso l'alto le argilliti tendono ad assumere un colore rossastro.

Il *membro calcareo* è costituito da calcari grigiastri e biancastri, in strati e banchi massivi, con stratificazione irregolare. Si individuano, inoltre, calcari cristallini saccaroidi biancastri e grigio avana con vene spatiche. Subordinatamente si osservano strati calciruditici a frammenti di rudiste con stratificazione irregolare, *packstone-grainstone* grigio-avana ad intraclasti e peloidi, a luoghi con macroforaminiferi tipo Orbitoidi, frammenti di calcari di scogliera, intercalazioni calcarenitiche fini grigio-azzurrognole ed in minor misura calcari marnosi grigiocuri molto compatti. Nella parte alta della successione sono state osservate calcareniti con Alveoline e Nummuliti.

La *litofacies calcareo-clastica* è rappresentata da livelli lenticolari decametrici di calcareniti e calciruditi con elementi di piattaforma carbonatica e di depositi relativi a frane sinsedimentarie, presenti a più altezze stratigrafiche. I corpi lenticolari, con base marcatamente erosiva, presentano elementi costituiti prevalentemente da calcari neritici a macroforaminiferi (Nummuliti, Discocycline, Orbitoline), frammenti rimaneggiati di Rudiste, Briozoi, Litotamni, Spugne.

1.3. Descrizione delle diverse facies litologiche del Flysch Rosso

Il rilevamento di campo ed i numerosi sondaggi eseguiti nell'ultima campagna di indagini dell'autunno 2019, hanno permesso di riconoscere le diverse facies del F. Rosso presenti lungo tutto il tratto interessato dagli scavi delle gallerie "Grottaminarda" e "Melito". Sono stati chiariti i rapporti stratigrafici tra i diversi litotipi, nonostante le notevoli deformazioni degli ammassi legate alle fasi tettoniche compressive mio-plioceniche, rese ancora più pervasive dalla costante presenza di argille nelle diverse formazioni geologiche.

Nell'insieme la successione stratigrafica del F. Rosso mostra caratteri riconducibili alla sedimentazione in un bacino profondo, prossimo ad un margine di scarpata, come suggerito dalla notevole variabilità granulometrica dei depositi, sia verticale sia laterale, e da frequenti episodi di trasporto in massa, di alta energia (facies calciruditiche e conglomeratiche).

La colonna stratigrafica di sintesi di *Figura 1.10* mostra, dal basso all'alto stratigrafico, un generale approfondimento dell'antico bacino di deposizione, come evidenziato dal graduale passaggio da successioni calcaree, a membri marnosi ed in fine a successioni prevalentemente argillose.

Come mostrato in *Figura 1.10* e nella tavola dei sondaggi allegata, se pur diverse tra loro, tutte le facies del Flysch Rosso hanno come elemento in comune la costante presenza e/o intercalazione di argille policrome a varie altezze stratigrafiche. Anche i termini più profondi, e più francamente calcarei, contengono intervalli di pochi metri essenzialmente argillosi.

Ai fini delle possibili interazioni con lo scavo della galleria, le principali facies del Flysch Rosso sono state distinte in base alla litologia prevalente: argille, marne, arenarie, conglomerati e calcari e dall'alto stratigrafico sono state riconosciute le seguenti facies: FYRagms; FRYagv; FYRmar; FYRar; FYRcg; FYRac; FYR2C.

FORMAZIONI GEOLOGICHE delle gallerie Grottaminarda e Melito

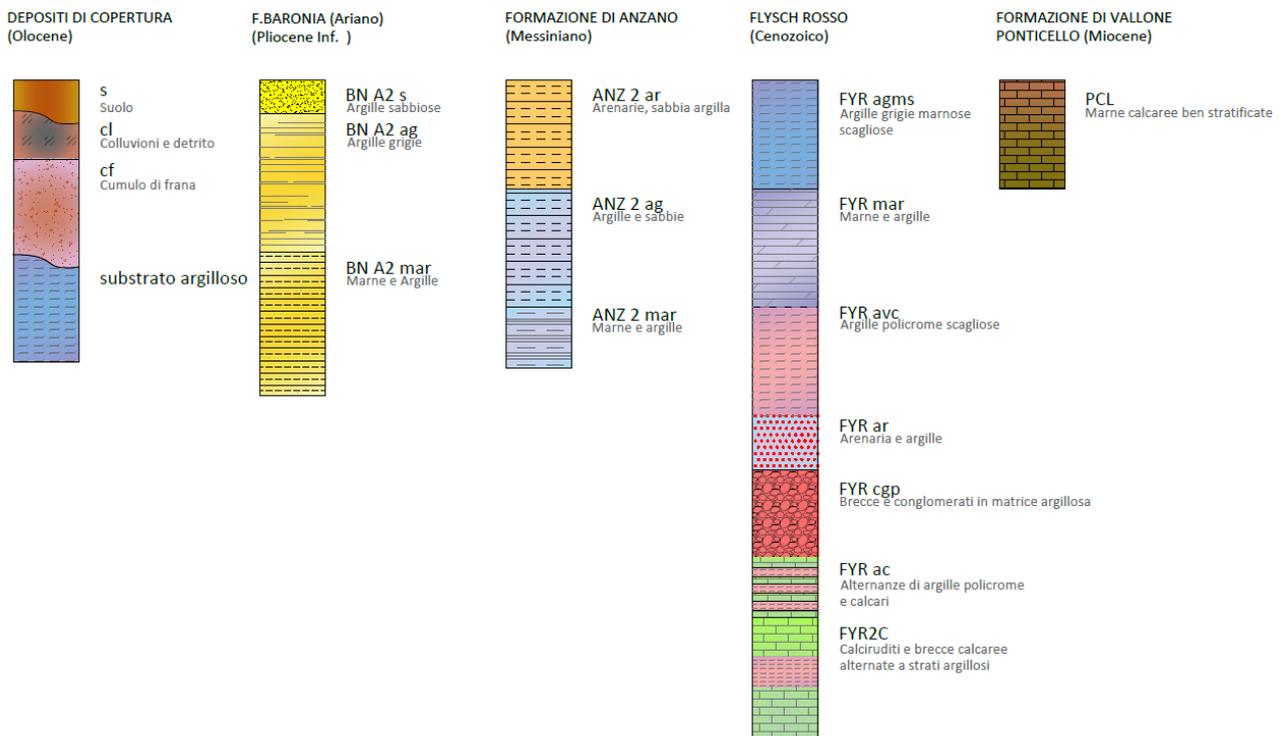


Figura 1.10. Colonne stratigrafiche schematiche delle facies litologiche che interessano le gallerie "Grottaminarda" e "Melito".

Facies delle argille marnose grigie scagliose (FYRagms).

Le argille marnose grigie sono presenti per un lungo tratto dello scavo della galleria Grottaminarda, precisamente tra le progressive km 3 + 750 e km 4 + 305 (*Tabella Riepilogativa galleria Grottaminarda*) e sono caratterizzate da un colore grigio scuro e da struttura a scaglie e contengono sottili strati di calcilutiti biancastre. In profondità passano ad intervalli con maggiore presenza di marne e con un maggior rapporto lapideo/pelite.

Alla scala del campione queste argille presentano evidenti piani di clivaggio, con superfici traslucide per la comparsa di fillosilicati (*Figura 1.11*).

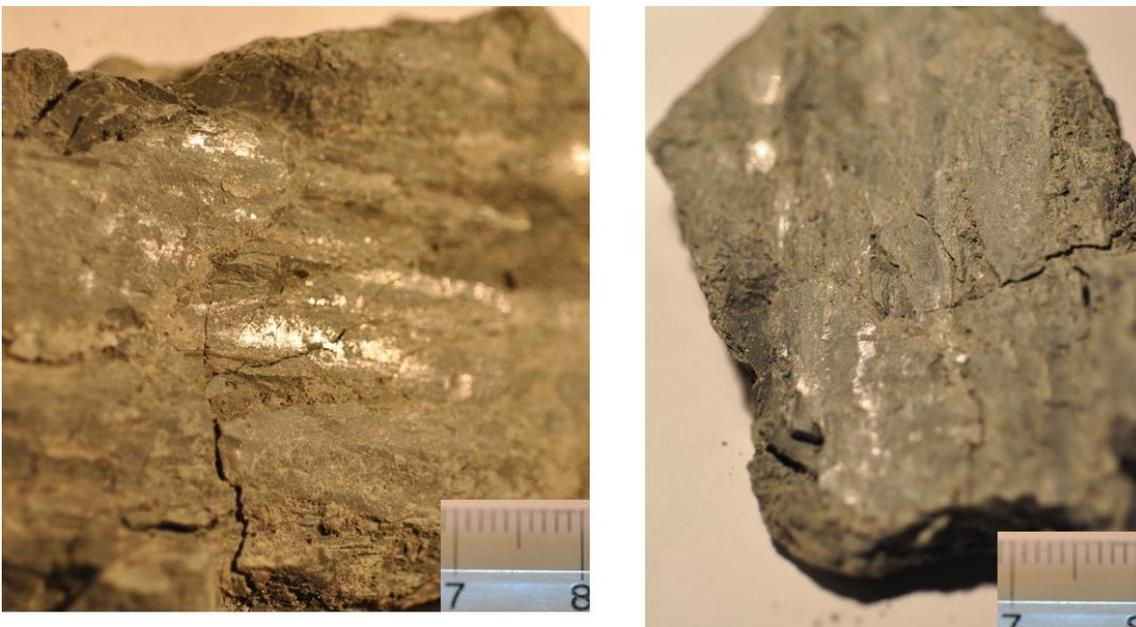


Figura 1.11. Argille marnoso-scagliose (FYRagms) del F. Rosso. Sono evidenti le ondulazioni da clivaggio e la scagliosità evidenziata dalle superfici traslucide.

Queste argille sono state carotate in ben 13 sondaggi (CH2, CH6, CH7, SN1, SN2, SN3, SN4, SNGR05, S1 Trivel; BH1; G1, S8); per i primi 10, eseguiti nell'ultima campagna di indagini, è stato possibile fare osservazioni dirette sulle carote prelevate.

In quasi tutti i sondaggi la frazione lapidea è scarsamente presente (tra il 10 e il 20%) ed è costituita da strati di calcilutiti biancastre dello spessore variabile da 5 a 20 cm. Osservando nel dettaglio i contatti tra le argille e le calcilutiti, è possibile osservare che nella stragrande maggioranza dei casi il passaggio è netto, regolare, spesso inclinato per la deformazione dell'ammasso. La costante presenza di passaggi litologici netti tra argille e calcari, indica la presenza di strati lapidei intercalati nella successione prevalentemente pelitica.

L'assetto generale delle argille FYRagms è tipico di peliti molto deformate e scagliose ma che comunque a diverse altezze stratigrafiche presentano strati calcilutitici che si ripetono con frequenze e spessori alquanto regolari (da *Figura 1.12* a *Figura 1.20*). Le caratteristiche sedimentologiche sono quindi quelle tipiche di un bacino di sedimentazione profondo di bassa energia nel quale solo localmente si risente di apporti grossolani lungo canalizzazioni (facies conglomeratiche di *Figura 1.16*).

Per i primi 60/70m di spessore le argille non contengono corpi geologici caotici, tipici di facies da trasporto in massa o di canalizzazioni detritiche sottomarine. Nella facies FYRagms anche le parti più francamente marnose e conglomeratiche, che si rinvengono a profondità maggiori (sondaggio SN03), presentano comunque evidenze di stratificazione (*Figura 1.18*).

Gli strati calcilutitici di questa facies mostrano una certa regolarità per quanto riguarda lo spessore (pochi dm) e la distanza (ogni 1-2 m), tipici di successioni cicliche bacinali di bassa energia. I clasti lapidei di forma irregolare ritrovati nella perforazione sono spiegabili con l'attraversamento di settori molto deformati della successione o con il disturbo operato dalla perforazione.

Per quanto detto si ritiene che la facies FYRagms, che sarà attraversata dalla galleria Grottaminarda per circa 550 m, sia caratterizzata da una successione argilloso-marnosa molto consistente, con struttura a scaglie molto deformata ma che allo stesso tempo conserva ancora un assetto "strutturato" con strati dello spessore di pochi dm di calcilutiti lapidee. Nel complesso prevalgono i termini argillosi con una presenza di pelite pari circa all'80% e di lapideo al 20%.

Di seguito si riportano le caratteristiche stratigrafiche osservate nei diversi sondaggi.

Evidenze di stratificazione e di fratture tettoniche nella facies FYRagms (PROGR. Km 3+750 e Km 4+305).

Sondaggio **SN GR 05**. Argille prevalenti con presenza di passaggi stratigrafici con livelli lapidei alla profondità di 21.0 m: 5°; 21.50 m: 5°; 22.50 m: 5°; fratturazione 30 m: 60°.



Figura 1.12. Stratificazione nel sondaggio SNGR05. Da notare che gli intervalli lapidei hanno spessore di 5/10 cm e che si ripetono con intervalli regolari (circa ogni metro).

Sondaggio SN01. Strat. = 39.60 m: 5°; 42.20 m e 48.5 m: 5°; 51 m e 59 m: 5°; fratture: 48.5 m: 70°; 62 m: 50°.



Figura 1.13. Stratificazione nel sondaggio SN01. Da notare che gli intervalli lapidei hanno spessore di 10/20 cm e si ripetono ad intervalli regolari (circa ogni metro). In giallo piani di taglio ad alto angolo.

Sondaggio SN02. Strat. = 34 m: 5°; 37 m: 5°; 42 m: 10°; 56 m: 10°; 59 m: 10°; 63 m: 25°; 66 m: 25°; 68 m: 20°; 77 m: 5°; 80 m: 5°; 82 m: 5°; 86 m: 30°; 89 m: 10°; fratturazione = 66 m: 45°; 68 m: 75°; 71 m: 70°; 73 m: 70°; 84 m: 45°.

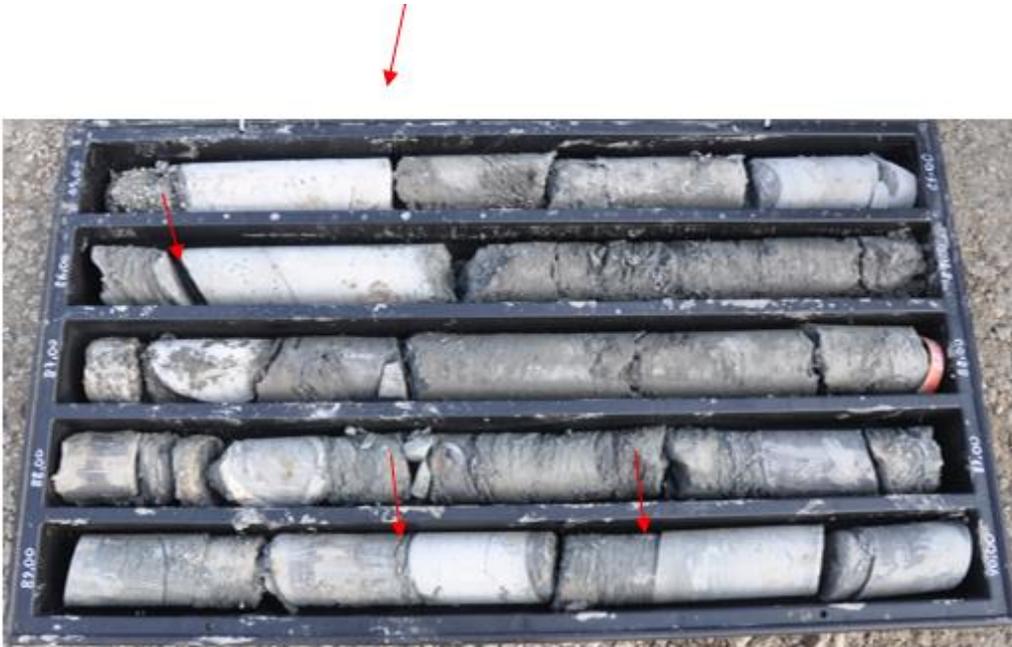


Figura 1.14. Stratificazione nel sondaggio SN02. Da notare che gli intervalli lapidei hanno spessore di 10/20 cm e si ripetono con intervalli regolari (circa ogni metro).



Figura 1.15. Stratificazione nel sondaggio SN02. Da notare un locale strato marnoso-conglomeratico "caotico" da collegare a canalizzazioni di apporti grossolani all'interno del bacino di sedimentazione.

Sondaggio SN03. Stratificazione = 36 m: 5°; 37 m: 5°, 39 m: 5°, 51 m e 54 m: 10° 75 m, 77 m e 80 m: 15°; fratture = 35 m, 59 m, 60 m.



Figura 1.16. Stratificazione nel sondaggio SN03. Da notare che gli intervalli lapidei hanno spessore di 10/20 cm e si ripetono con intervalli regolari (circa ogni metro).



Figura 1.17. Le argille grigie marnoso-scagliose passano in profondità a facies più francamente marnose e conglomeratiche nella quali comunque è possibile riconoscere le stratificazioni (sondaggio SN03).

Il sondaggio **SN04** presenta la sola facies argilloso scagliosa grigia; un livello calcareo è rilevabile a 23 m.

Nel sondaggio **TRIVEL SN1** è stata rilevata la facies argilloso scagliosa grigia, i livelli calcarei sono rilevabili a 33, 36 e 37 m. Stratificazione a 36 m: 20°.

Sondaggio **CH2**. Strat. = 19 m: 5°; 52 m: 15°; 24 m: 10°; 37 m: 5°.



Figura 1.18. Stratificazione del sondaggio CH2. Da notare che gli intervalli lapidei hanno spessore di 10/20 cm e si ripetono con intervalli regolari (circa ogni metro).

Sondaggio **CH6**. Stratificazione a 15 m: 40°; 36 m: 40°.

Sondaggio **CH7**. Stratificazione a 36 m: 25°; 38 m: 25°.



Figura 1.19. Stratificazione nel sondaggio CH7. Da notare la presenza di sottili strati lapidei.



Figura 1.20. Dettagli della facies FYRagms a quota cavo galleria. È possibile osservare l'aspetto caotico delle argille e la loro struttura a scaglie.

Indagine di perforazione teleguidata nei calcari del F. Rosso FYRagms

Nei giorni dal 12 al 18 febbraio 2020 è stata effettuata una perforazione teleguita, e relativa video ispezione, nella formazione del FYRagms (Figura 1.21). La perforazione è stata spinta per circa 300 m raggiungendo i 25 m di profondità e, quindi, un tratto a pochi metri dalla calotta della galleria tra le progressive km 4 + 300 e km 3 + 900. La perforazione ha mostrato la presenza costante di argille marnose molto consistenti, con un avanzamento a velocità relativamente bassa per un'argilla e pari a circa 1 m ogni 70 s, nelle condizioni più favorevoli. Durante la perforazione

sono stati attraversati frequentemente strati calcarei in corrispondenza dei quali le velocità si sono ridotte ulteriormente.



Figura 1.21. La perforazione teleguida eseguita nella formazione FYRagms della galleria Grottaminarda (Progr. km 4 +300).

Argille policrome (FYR avc).

Il Flysch Rosso a quota cavo galleria presenta una seconda facies prettamente argillosa in diversi tratti e più precisamente alle progressive da km 3+450 a km 3+750; da km 4+515 a km 4+460; da km 4+695 a km 4+715 della galleria Grottaminarda e da km 5+080 a km 5+275; da km 6+345 a km 5+650 della galleria Melito (vedi tabella riepilogativa Melito). I sondaggi che hanno attraversato queste argille sono: SNGR03-06-07 nella galleria Grottaminarda e SN ME 01-02-03-04-05-07 nella galleria Melito.

Si tratta di argille policrome (rosse, verdi e grigie), scagliose e che contengono spesso livelli centimetrici di calciliti biancastre (*Figura 1.22* e *Figura 1.24*). Le variazioni cromatiche delle argille a luoghi sono molto fitte (scala centimetrica, *Figura 1.24*), in altri casi invece si osservano alla scala metrica (*Figura 1.25* e *Figura 1.26*); anche gli spessori sono molto variabili in quanto nei sondaggi tali argille sono state carotate talora per pochi metri, in altri casi per più di 20-30 m. Il rapporto pelite/lapideo è chiaramente a favore delle argille con valori di circa 80% nell'intero ammasso.

Sono pochi gli affioramenti superficiali che permettono di poter condurre osservazioni in campo sulle strutture sedimentarie di queste argille. I pochi casi osservati hanno mostrato sempre ammassi intensamente deformati sia per processi sinsedimentari che per effetto della tettonica compressiva. Alla scala del campione, infatti, le argille si presentano con evidenti piani di clivaggio, marcati da superfici traslucide per la comparsa di fillosilicati.



Figura 1.22. Affioramento della facies argillosa policroma del Flysch Rosso (FYRavc) nei pressi del sondaggio SNME07 della galleria Melito.



Figura 1.23. Evidenza di clivaggio e scagliosità alla scala del campione nelle argille FYRavc.

Le argille del FYRavc oltre ad essere presenti con intervalli di spessore tecnicamente significativo (alcune decine di metri) di fatto si ritrovano intercalate, con spessori variabili da pochi dm a pochi metri, in tutte le altre facies del F. Rosso (breccie e conglomerati; marne, arenarie e calcari) come mostrato nella sintesi dei sondaggi della tavola colonne stratigrafiche allegata alla presente relazione.



Figura 1.24. Le fitte alternanze di colorazione (verdi e rosse) delle argille FYRavc.



Figura 1.25. Variazioni cromatiche nelle argille FYRavc ed intercalazione di calcilutiti biancastre.



Figura 1.26. Variazioni cromatiche alla scala metrica nelle argille FYRavc.



Figura 1.27. Dettagli della facies FYRavc a quota cavo galleria. È evidente l'aspetto caotico e scaglioso delle argille (sondaggio SNME03).

Perforazione teleguidata nei calcari del F. Rosso FYRavc

Nei pressi dell'imbocco nord della galleria Grottaminarda, più precisamente alla progressiva Km 4 + 700, sono state eseguite 4 perforazioni teleguidate della lunghezza complessiva di circa 300 m. Le quattro indagini sono state realizzate a “raggiera” e “lanciate” da un'unica piazzola (punto “a” di *Figura 1.28* e *Figura 1.30*). Tutte le perforazioni hanno attraversato argille policrome (FYRavc) alle quali si intercalano strati calcarei dello spessore di pochi dm. Il cutting di perforazione ha evidenziato, infatti, una tipica colorazione rossa e le velocità di avanzamento sono state elevate, valutate in circa 1 metro ogni 25 s nelle situazioni ottimali. Le indagini si sono arrestate per impossibilità di avanzamento, al raggiungimento di un piccolo rilievo calcareo (facies lapidea del F. Rosso FYR 2C).

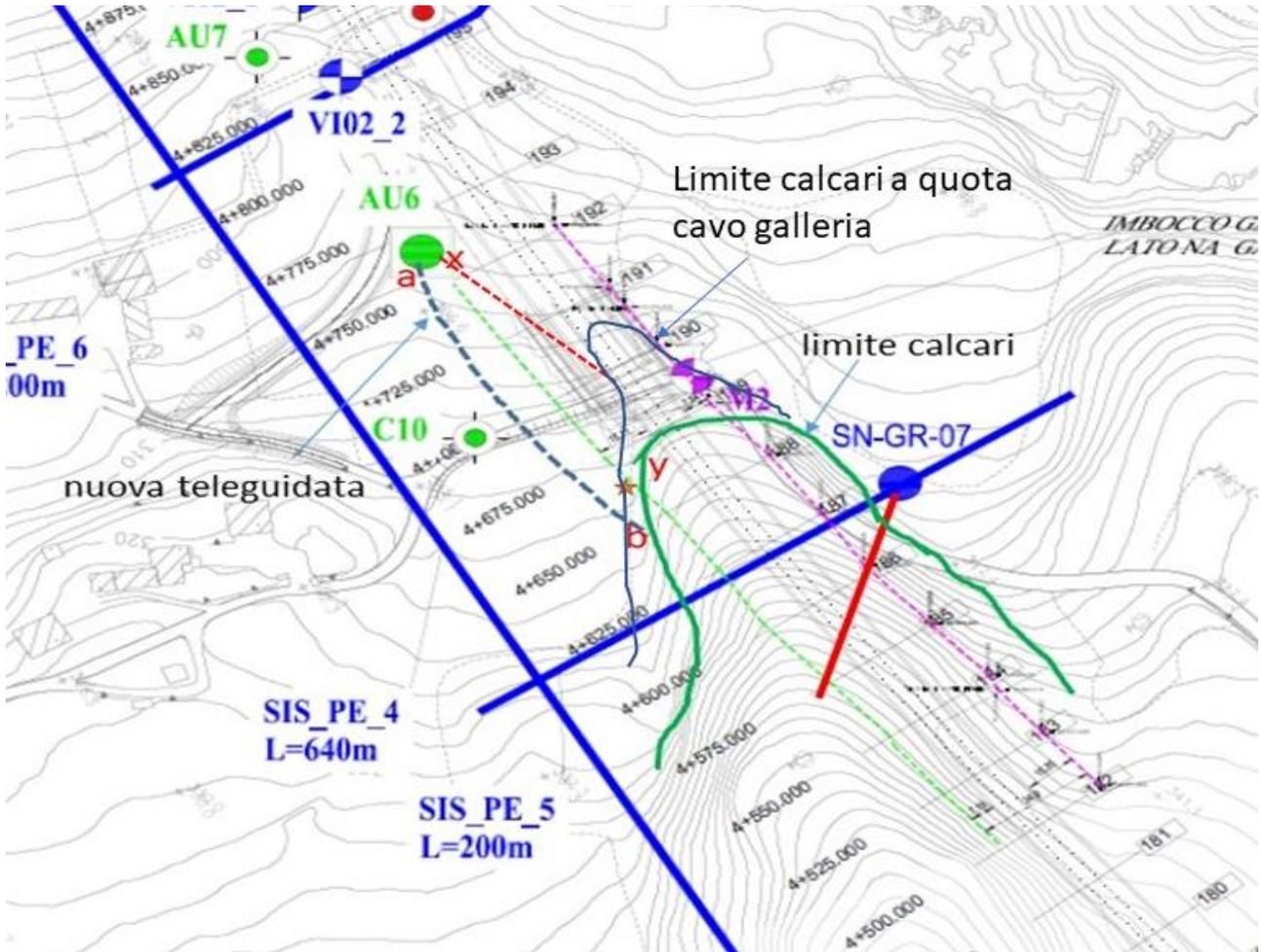


Figura 1.28. Le linee tratteggiate blu, verde e rossa indicano le 3 perforazioni teleguidate eseguite nel febbraio 2020. La linea blu, continua, il limite sepolto dei calcari a quota galleria.



Figura 1.29. La perforazione teleguidata eseguita nella formazione del FYRavc, all'imbocco nord della galleria Grottaminarda (Progr. Km 4 +700).

Flysch rosso marnoso-argilloso (FYRmar)

In alcuni tratti delle gallerie Grottaminarda e Melito i carotaggi hanno mostrato la presenza in profondità di facies più francamente marnose nella successione del Fysch Rosso. Ciò accade alle progressive da km 4+460 a km 4+350 della galleria Grottaminarda e da km 6+540 a km 6+345 della galleria Melito dove i sondaggi mostrano ammassi generalmente ben stratificati con una graduale diminuzione della frazione pelitica a spese di quella calcarea e calcareo-marnosa. I rapporti tra peliti e strati lapidei passano infatti da 80% di pelite e 20% di lapideo dei membri FYRagms a 20% di pelite e 80% di lapideo per quelli FYRmar (vedi tabella riepilogativa Galleria Grottaminarda e tabella riepilogativa Galleria Melito).

Le successioni marnose si presentano ben stratificate e con alti valori di RQD come si evince dai carotaggi della *Figura 1.30* e della *Figura 1.34*).

Al momento non è chiaro se il complesso marnoso attraversato nella galleria Melito alla progressiva km 6 +345, molto ben stratificato e poco deformato, appartenga alla formazione miocenica di Vallone Ponticello.

I sondaggi che hanno attraversato le facies marnose sono: SNGR 06 nella galleria Grottaminarda e SN ME05 in quella Melito (vedi tavola delle colonne stratigrafiche dei sondaggi allegata).



Figura 1.30. Riduzione della frazione pelitica ed aumento di quella calcarea nella parte più profonda del membro FYRagms.



Figura 1.31. Alti valori di RQD nella facies FYR mar (sondaggio SN GR 06).



Figura 1.32. Chiare evidenze di stratificazione marcate da differenze granulometriche e cromatiche nel sondaggio SN GR 06.



Figura 1.33. Successioni marnose poco deformate probabilmente attribuibili alla formazione di Vallone Ponticello.



Figura 1.34. Particolare della facies marnosa (FYRmar) alla progressiva km 4 +350 a quota cavo galleria.

Flysch Rosso arenaceo- argilloso (FYR ar)

In diversi punti, sia della galleria Grottaminarda che della Melito, i sondaggi hanno attraversato diversi metri di arenarie lapidee a grana fine, generalmente ben stratificate e poco deformate (*Figura 1.35 e Figura 1.36*). Nel dettaglio, il cavo della galleria interessa questi litotipi alle stesse progressive indicate per il complesso FYRmar (*Figura 1.37*). Le arenarie infatti si intercalano spesso alle facies marnose, con strati di spessore compreso tra 5 e 10 m, costituendo, di fatto, un importante livello guida (marker stratigrafico) che ha permesso di fare correlazioni tra i vari sondaggi delle due gallerie (SNME05, SNME07, C13, 62, nella galleria Melito e SNGR04 ed SNGR06 nella galleria Grottaminarda). In alcuni punti gli stessi livelli arenacei sono stati ritrovati intercalati anche alle successioni argilloso calcaree del Flysch Rosso.



Figura 1.35. La facies arenacea lapidea del Flysch Rosso (FYRar) poco fratturata, ben stratificata e con alti valori di RQD (sondaggio SN GR 04 e SNME05).



Figura 1.36. Dettaglio delle arenarie grigie nel sondaggio SNME07.



Figura 1.37. Foto di dettaglio delle arenarie del Fysch Rosso (FYRar) alla quota del cavo della galleria alle progressive km 4 +400 e 6 +540. È possibile osservare la presenza di numerosi minerali silicatici (sialici e femici) sub arrotondati.

Brecce e conglomerati poligenici (FYRcg)

In diversi punti lo scavo delle due gallerie prevede l'attraversamento di ammassi caotici (*Figura 1.38 e Figura 1.39*) in facies di brecce e conglomerati, immersi in abbondante matrice argillosa. In particolare, ciò accade tra le progressive da km 3+270 a km 3+450 nella galleria Grottaminarda e tra km 5+650 e km 5+275 nella galleria Melito. Alcuni sondaggi hanno evidenziato in più punti spessori di oltre 10 m di brecce e conglomerati intercalati alle argille del Flysch Rosso. Queste facies, tipicamente di alta energia, sono da associare a margini di bacini profondi e sono state riscontrate per la galleria Grottaminarda nel sondaggio SNGR03, dove interessano il cavo di scavo a circa 70 m di profondità e nella galleria Melito nei sondaggi SNME01, SNME02 e SNME07 (*Figura 1.41*). In tutti i carotaggi è possibile osservare che le facies di brecce e di conglomerati si alternano a sottili strati di calcilutiti che, nonostante il generale aspetto caotico dell'ammasso, conservano ancora, in più punti, evidenze della loro giacitura originaria (*Figura 1.40*). Queste ripetute variazioni granulometriche testimoniano fasi di deposizione a diversa energia.



Figura 1.38. La facies conglomeratico-argillosa in affioramento nei pressi del sondaggio SNME01.



Figura 1.39. Breccie e conglomerati sindeposizionali in abbondante matrice rossa e verde (Flysch rosso). Sondaggio SN ME 01.



Figura 1.40. Chiare evidenze di passaggi stratigrafici tra argille e calciluti intercalate alle facies conglomeratiche del F. Rosso (sondaggio SNME07).



Figura 1.41. Particolare della facies conglomeratica “caotica” del Fysch rosso (FYRcg) a quota cavo della galleria alla progressiva Km 6 +570. È possibile osservare la presenza di clasti poligenici, smussati, immersi in una matrice argillosa.

Alternanze di argille marne e calcari FYRac

Come si è potuto osservare dalle descrizioni dei paragrafi precedenti il Flysch Rosso si può presentare con caratteristiche litologiche molto differenti da punto a punto, avendo però sempre come elemento distintivo la presenza di livelli argillosi, il più delle volte tipicamente di colore rosso. Le argille talora sono prevalenti (facies argillose FYRagms e FYRavc). In altri casi costituiscono la matrice di membri più francamente conglomeratici (FYRcg); in altri casi ancora si intercalano a pacchi prettamente calcarei (FYR 2C). Tuttavia, in alcuni tratti della galleria Melito i sondaggi hanno attraversato settori nei quali le argille si alternano con frequenza regolare a strati di calcilutiti di pochi dm di spessore con un rapporto pelite/lapideo prossimo all'unità. Per tale motivo si è deciso di differenziare anche questa facies definendola come “alternanze regolari di argille, marne e calcari” (FYR ac).

In superficie è possibile osservare questi terreni solo in pochi punti (*Figura 1.42*) mentre essi sono ben visibili nelle carote dei sondaggi SNME05 ed SNME07 alle progressive km 5 +275 e km 5 + 900, in prossimità del cavo della galleria (da *Figura 1.43* a *Figura 1.45* e tavola delle colonne stratigrafiche dei sondaggi allegata.)

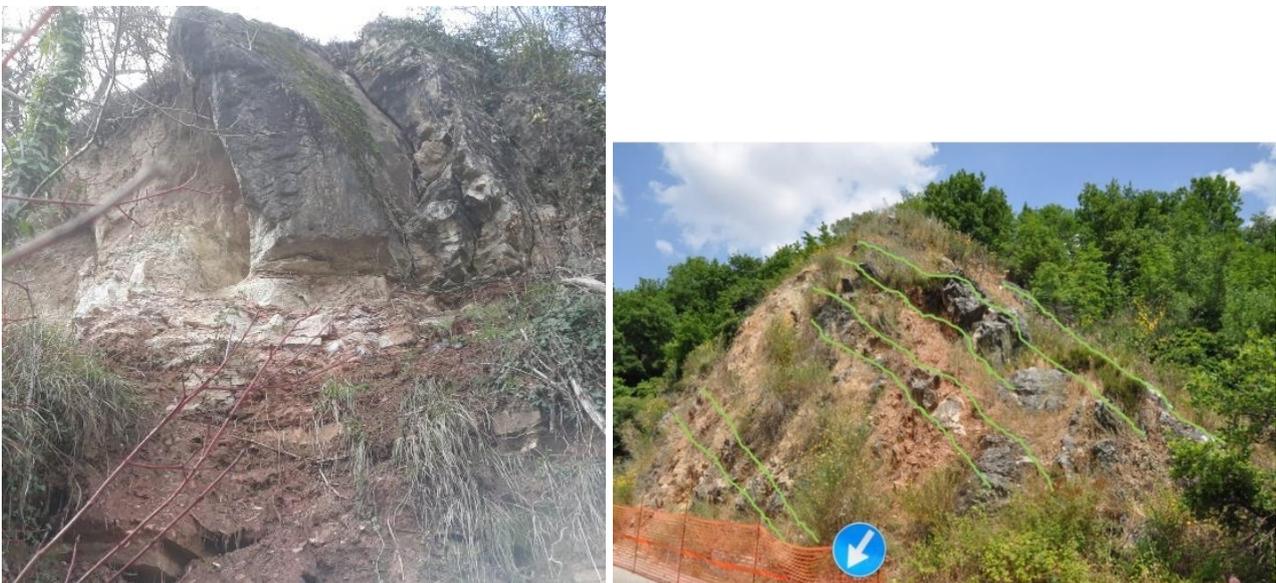


Figura 1.42. Tipiche alternanze di argille e marne rosse e calcari affioranti lungo la strada per Melito vecchia.



Figura 1.43. Alternanze di calcilutiti ed argille nella facies FYRac (sondaggio SNME07) in prossimità del cavo galleria.



Figura 1.44. Dettagli dei passaggi stratigrafici tra argille e calcilutiti nella facies FYRac.



Figura 1.45. Particolare delle alternanze di argille e calcari del Fysch Rosso (FYRac) a quota cavo della galleria alla progressiva km 5 +900. È possibile osservare i bruschi passaggi stratigrafici tra i due litotipi.

Calcari breccie ed argille (FYR 2C)

Le gallerie Grottaminarda e Melito attraversano in diversi punti, e per lunghi tratti, successioni prevalentemente calcaree e lapidee dell'Unità del Fylsch Rosso (FYR2C). In particolare tra le progressive km 4+715 e km 4+515 della galleria Grottaminarda e km 7+145 e km 6+540 della Galleria Melito.

Le caratteristiche sedimentologiche dei calcari sono ben visibili, lungo l'asse della galleria, sia in superficie tra le progressive km 4+715 e km 4+515 (*Figura 1.46* e *Figura 1.47*) sia in diversi sondaggi a quota cavo (SNGR07; SNME05; SNME07).

I calcari si presentano prevalentemente come calciruditi molto cementate, mal stratificate ma lapidee, tanto da essere state sede di estrazione per pietre ornamentali i cui prodotti commerciabili sono meglio conosciuti in letteratura scientifica come "Brecciato Irpino". A tal proposito, si segnala la presenza di una vecchia cava sulla verticale della galleria nei pressi del sondaggio SNME07.

I numerosi affioramenti ed i sondaggi (da *Figura 1.49* a *Figura 1.55*) hanno evidenziato che le calciruditi presentano spessori variabili da pochi metri ad un massimo di circa 10/15 m e che si alternano sempre a livelli metrici di marne ed argille rosse. Nei sondaggi non è stata intercettata la base di questa formazione che in affioramento presenta spessori di diverse decine di metri.

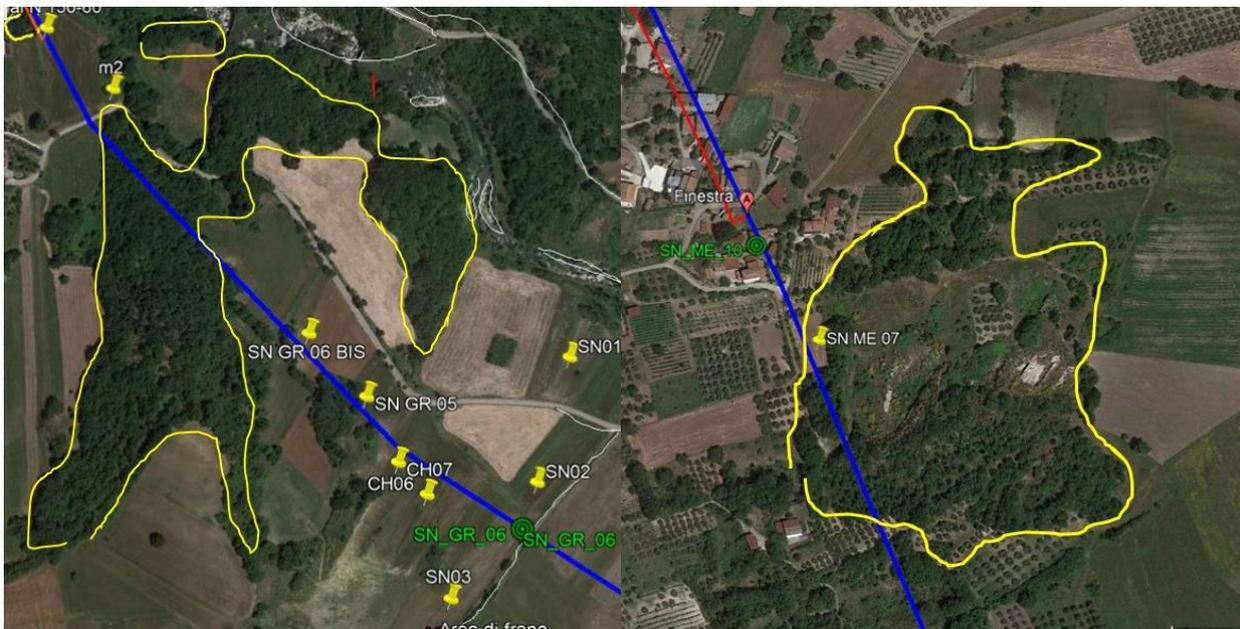


Figura 1.46. Affioramenti della facies calcarea del Fylsch Rosso (linea gialla) per le gallerie Grottaminarda e Melito rispettivamente alle progressive da km 4+715 a km 4+515 e da km 6+500 a km 7+000.

Alla scala del campione le brecce e le calciruditi si presentano con clasti sub arrotondati, fortemente cementati tra loro a testimonianza di una fase di trasporto prima della loro definitiva deposizione e di una lunga diagenesi. In alcuni casi, nei corpi calciruditici è possibile osservare piccoli slumping argilloso marnosi (*Figura 1.52*). La stratificazione non è sempre evidente e si apprezza più che alla scala del campione, a quella decametrica.

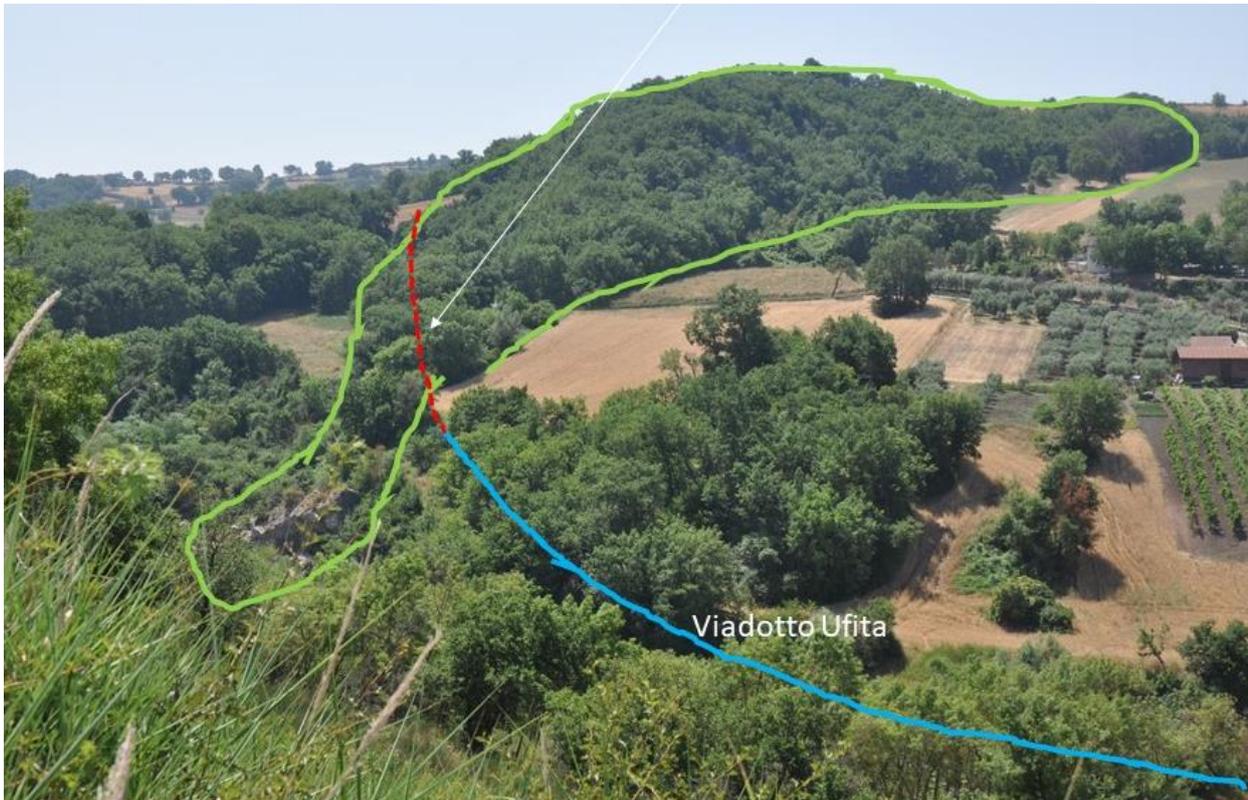


Figura 1.47. Membro calcareo del Flysch rosso FYR2C all'imbocco dalla galleria Grottaminarda (lato nord).

Nonostante le successioni del Flysch Rosso siano molto deformate, i sopralluoghi di campo e l'interpretazione del DTM eseguito da lidar, evidenziano che la facies calcarea FYR2C è affiorante in più punti, soprattutto in destra orografica del F. Ufita e lungo la galleria Melito. Nella *Figura 1.48* in giallo sono riportate piccole scarpate di morfoselezione, dell'altezza di pochi metri, che corrispondono a testate di strato della formazione FYR2C. La loro disposizione mostra una generale immersione degli strati verso i quadranti NE e una certa continuità laterale delle bancate lapidee alle quali si alternano, lungo la verticale, strati metrici di argille policrome.

Nella *Figura 1.48* sono riportati anche i principali morfolineamenti desunti da scarpate, versanti o da tratti rettilinei del F.Ufita che evidenziano la presenza di strutture tettoniche prevalentemente in direzione N150, trend tipico di faglie estensionali (ad alto angolo) della catena sud appenninica.

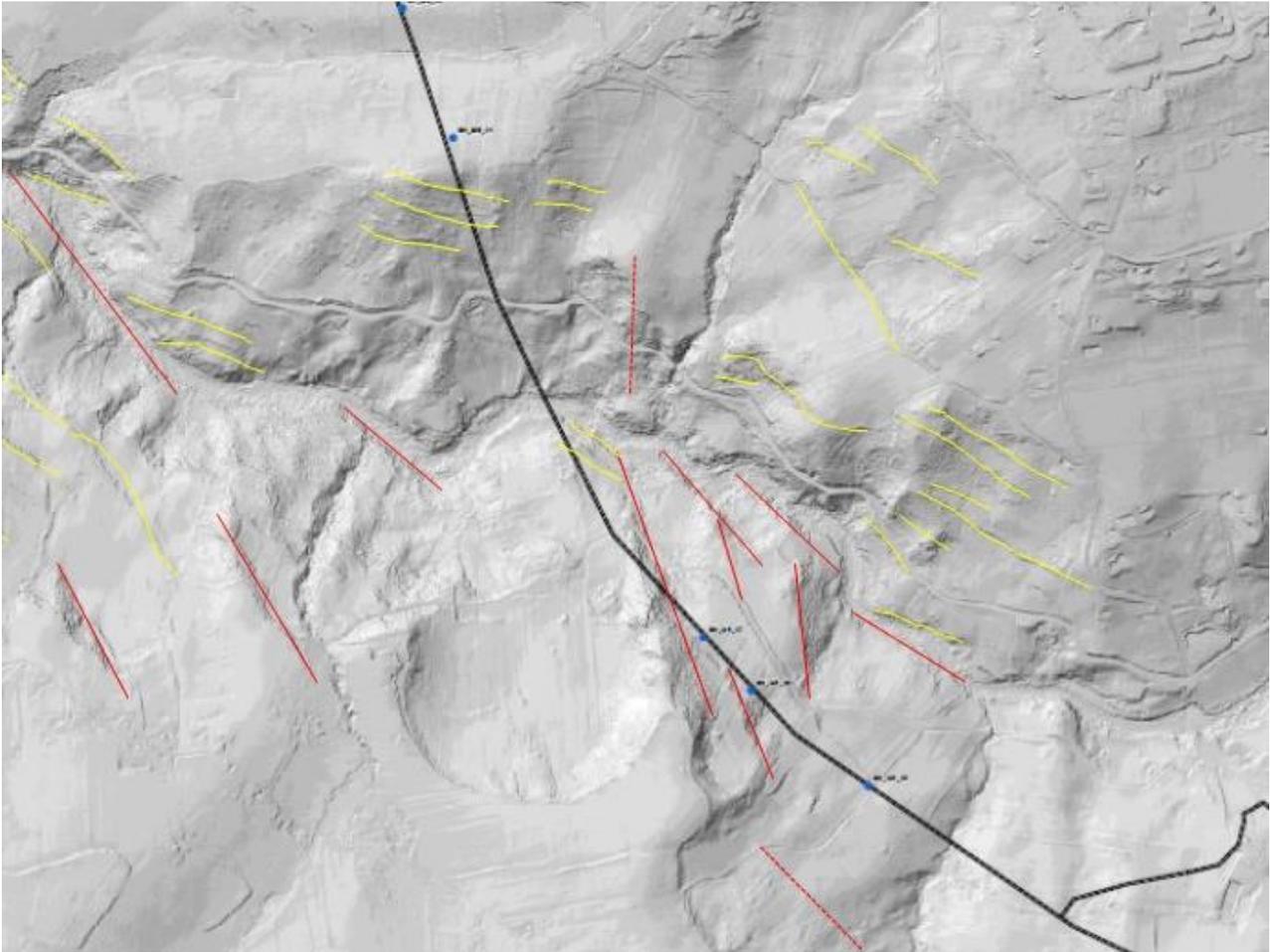


Figura 1.48. Principali lineamenti morfostrutturali riconosciuti lungo la valle del F. Ufita tra le gallerie Grottaminarda e Melito. Le linee gialle evidenziano le testate di strato della formazione calcarea del F. Rosso FYR2C.



Figura 1.49. Calcari ed intercalazioni marnose nei pressi dell'imbocco nord della galleria Grottaminarda. È ben evidente la stratificazione in banchi di 1/2m di spessore.



Figura 1.50. Tipico banco calcareo intercalato nelle successioni marnoso-argillose del Flysch Rosso.



Figura 1.51. Facies prevalentemente calciruditiche dell'intervallo FYR2C.



Figura 1.52. Facies calciruditica con intercalazioni marnose policrome (FYR2C) nei pressi del sondaggio SNME07.



Figura 1.53. La facies calciruditica con intercalazioni marnose policrome (FYR2C) come si presenta al carotaggio.



Figura 1.54. Facies prevalentemente calcarea FYR2C.



Figura 1.55. Facies prevalentemente calcarea FYR2C come si presenta al carotaggio con alti valori di RQD (SNME07).

I calcari della formazione FYR2C saranno intercettati dallo scavo dell'imbocco nord della galleria Grottaminarda. Qui, in affioramento, è possibile osservare alcune intercalazioni di livelli argillosi dello spessore da pochi dm a pochi metri (*Figura 1.56*). Gli ammassi calcarei sono chiaramente tagliati da faglie con diverse orientazioni, tra cui si riconoscono sistemi trascorrenti e distensivi sub verticali (*Figura 1.57*). Il piccolo rilievo calcareo mostra bancate lapidee dello spessore di 8-10

m per una altezza totale di circa 35 m a cui si alternano sottili interstrati argillosi. Alcune prove speditive eseguite sui calcari con il martello di Schmidt hanno mostrato valori comparabili con quelli di rocce carbonatiche lapidee anche se fratturate.



Figura 1.56. Evidenze di stratificazione e di livelli di marne e argille rosse intercalate alle calciruditi all'imbocco nord della galleria Grottaminarda.



Figura 1.57. Alcuni affioramenti di calciruditi del Flysch Rosso (FYR2C), con faglie ad alto angolo ed evidenze di stratificazione. Imbocco nord della galleria Grottaminarda. La resistenza a compressione misurata in campo ha mostrato valori tipici dei calcari lapidei, anche se fratturati.



Figura 1.58. Particolare delle calciruditi lapidee (Brecciato Irpino) che si incontreranno al cavo della galleria nei tratti da scavare in calcare (FYR2C).

Indagine di perforazioni teleguidate nei calcari del F. Rosso FYR 2C

Il DTM ricavato dal volo lidar di *Figura 1.59* mostra chiaramente la presenza di corpi lapidei allungati sia in direzione nord-sud che appenninica (NW-SE) che emergono per morfoselezione rispetto ai complessi argillosi circostanti.

All'imbocco della galleria Grottaminarda (lato nord) la sezione geologica del progetto definitivo riporta un sovrascorrimento che sovrappone i calcari alle arenarie del Flysch Numidico. Tale ipotesi è dettata dalla presenza in affioramento di arenarie molto tettonizzate con piani di taglio a basso angolo ed è confermata dal sondaggio M2 che ha intercettato breccie calcaree poggianti su arenarie. In questa ipotesi la galleria avrebbe un tratto di oltre 100 m scavato lungo il sovrascorrimento, impostato soprattutto nelle arenarie.

La presenza di numerosi affioramenti calcarei ben stratificati lungo tutta la dorsale (punti verdi in *Figura 1.59*), la morfologia del rilievo e l'assenza di altre chiare evidenze di sovrascorrimenti hanno suscitato l'interesse ad eseguire indagini più approfondite su questo tratto di galleria finalizzate a capire la presenza o meno di calcari lapidei a quota cavo galleria.

La presenza di calcari sembrerebbe confermata innanzitutto dal sondaggio SNGR07, inclinato, che ha raggiunto a quota ferro, breccie e conglomerati calcarei. Inoltre sono state eseguite tre perforazioni orizzontali, teleguidate, che hanno intercettato i calcari lapidei alla progressiva km 4+695 (vedi tab. allegata e *Figura 1.28*).

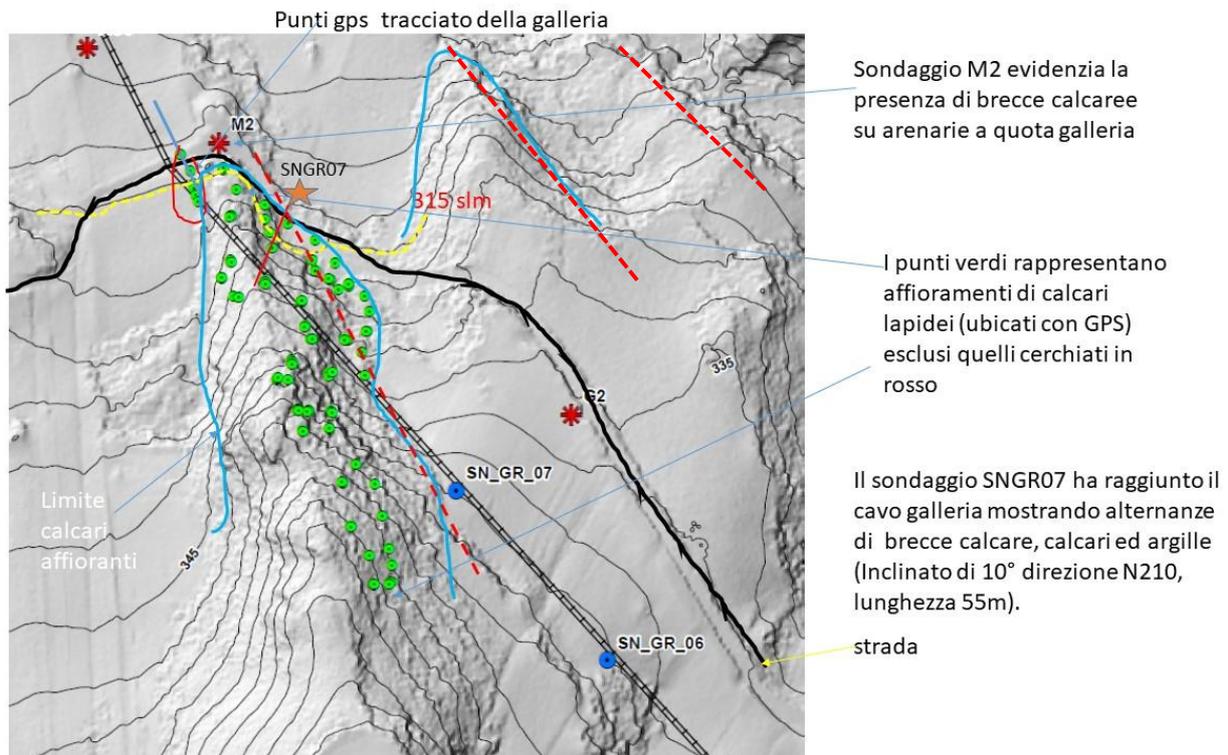


Figura 1.59. il piccolo rilievo calcareo in Flysch Rosso (FYR2C) all'imbocco nord della galleria Grottaminarda. I punti verdi rappresentano affioramenti di calcari lapidei; le linee rosse tratteggiate faglie ad alto angolo che ribassano a gradinata il Flysch Rosso calcareo.

Il 19 febbraio 2020 sono state eseguite altre due perforazioni orizzontali teleguidate, in corrispondenza del km 4+515 della galleria Grottaminarda (*Figura 1.60* e *Figura 1.61*). Lo scopo delle indagini era raggiungere l'asse della galleria alla base del rilievo calcareo per accertare la presenza di rocce lapidee a quota scavo. Le perforazioni sono state lanciate dalla piazzola riportata al punto x nella *Figura 1.61*, la prima (x-y) si è arrestata dopo circa 18 m, la seconda (x-z) dopo 42 m, entrambe incontrando calcari lapidei a circa 5 m di profondità.



Figura 1.60. La perforazione teleguidata al Km 4 + 515.



Figura 1.61. Il settore in cui sono state effettuate le perforazioni orizzontali teleguidate. La lettera "c" indica affioramenti di calcari.

Il risultato di tali indagini e la presenza in affioramento in diversi punti di calcari in prossimità dell'asse della galleria, fanno ipotizzare la possibile presenza di calcari sepolti il cui limite è riportato con la linea gialla tratteggiata di *Figura 1.61*. Se fosse confermata questa ipotesi il tratto di galleria da scavare in calcari sarebbe di circa 100 m più lungo di quanto riportato nella tabella riassuntiva galleria Grottaminarda. Per quanto detto prima dell'inizio dei lavori sarebbe opportuno prevedere una perforazione di circa 30 m di profondità, nel tratto compreso tra le progressive km 4 + 400 e 4 + 500.

I terreni argillosi al contatto con l'Unità del F. Rosso

I terreni del Flysch Rosso descritti nei paragrafi precedenti sono ricoperti da altre formazioni argillose più recenti, interessate anch'esse dallo scavo delle gallerie. Si tratta della Formazione di Anzano, nel settore orientale della galleria Grottaminarda, e delle Argille plioceniche dell'Unità della Baronia, nel settore occidentale della galleria Melito (da *Figura 1.3* a *Figura 1.6* e tavola delle colonne stratigrafiche dei sondaggi).

La formazione di Anzano (ANZ2)

Questa formazione è interessata dallo scavo della galleria dall'imbocco est della galleria Grottaminarda sino alla progressiva Km 3+270, dove ricopre l'unità più antica del F Rosso. È costituita da una successione sottilmente stratificata e poco deformata caratterizzata da tre intervalli principali: ANZ2 ar; ANZ2 ag; ANZ2mar (*Figura 1.62* e *Figura 1.63*).

La porzione più superficiale presenta sequenze arenaceo-pelitiche con alternanze centimetriche di arenarie a grana fine, sabbie gialle ed argille (ANZ2ar) aventi spessori di alcune decine di metri.



Figura 1.62. Tipico affioramento delle arenarie pelitiche della formazione di Anzano ANZ2ar lungo la galleria Grottaminarda.



Figura 1.63. Arenarie, sabbie ed argille di Anzano: aspetto alla perforazione.

In profondità le sabbie e le arenarie passano, gradualmente, a successioni più tipicamente argilloso-sabbiose marcate sia dalla maggiore presenza di componente pelitica sia da un cambio di colorazione che da gialla diventa grigia (da *Figura 1.65* a *Figura 1.67*). Questa successione ha evidenziato nei sondaggi spessori di diverse decine di metri e si presenta molto ben stratificata e poco deformata (ANZ2ag).



Figura 1.64. Argille grigie e sabbie di Anzano (ANZ2ag). È possibile osservare la fitta stratificazione alla scala centimetrica.



Figura 1.65. Particolare delle arenarie e delle sabbie di Anzano (ANZ2ar) a quota cavo della galleria.



Figura 1.66. Particolare delle arenarie e sabbie di Anzano (ANZ2ag) a quota cavo della galleria nel settore orientale (lato Bari) della galleria Gsottaminarda.

Le perforazioni più profonde nella formazione di Anzano hanno evidenziato il passaggio “sfumato” da membri argilloso-sabbiosi a marnoso-argillosi. La componente lapidea aumenta in modo graduale sino ad essere prevalente in alcuni punti interessati dallo scavo della galleria Grottaminarda (*Figura 1.66* e tabella riepilogativa galleria Grottaminarda).



Figura 1.67. La facies marnoso argillosa della formazione di Anzano (ANZ2mar).



Figura 1.68. Dettaglio della facies ANZ2 marnoso-argillosa a quota cavo galleria alla progressiva km 3 +205 (sondaggio SN GR 02).

Le argille Plioceniche della Baronia (BN A2 ag)

In corrispondenza all'incirca della progressiva km 7+145 nella galleria Melito è stato rilevato un brusco passaggio litologico tra le successioni prevalentemente calcaree del F. Rosso (ad est) e quelle argillose plioceniche dell'Unità della Baronia (BN A2 ag) ad ovest. Le argille si presentano in affioramento con spessori notevoli, (alcune centinaia di metri), e superiori ai 100 m in sondaggio, sempre con caratteristiche sedimentologiche simili. I carotaggi ed alcuni affioramenti hanno mostrato successioni monotone, sottilmente stratificate di argille grigio-scuro e sabbie a cui si intercalano strati decimetrici di marne argillose. Nell'insieme questi terreni si presentano molto ben strutturati, con evidente stratificazione e poco deformati (*Figura 1.69 e Figura 1.70*).



Figura 1.69. Le tipiche successioni argillose dell'Unità BNA2ag in affioramento nei pressi della galleria Melito.



Figura 1.70. Evidenze nel carotaggio della fitta stratificazione e passaggi stratigrafici a facies francamente marnose nella formazione della Baronia (BNA2ag).



Figura 1.71. Dettaglio della facies più francamente marnosa alla quota cavo della galleria Melito alla progressiva Km 7 +350.

Aspetti macroscopici e cenni sulla mineralogia delle diverse facies argillose interessate dalle gallerie

Lo scavo delle gallerie interesserà diverse facies argillose già descritte nei paragrafi precedenti alle quali sono stati associati i corrispondenti parametri geotecnici (vedi tabella riepilogativa galleria Grottaminarda e tabella riepilogativa galleria Melito). Anche alla scala del campione le argille presentano caratteristiche diverse che verranno riassunte in questo breve paragrafo mettendo a confronto le diverse facies.

Caratteristiche macroscopiche delle facies argillose

Seguendo un criterio stratigrafico vengono descritte le argille dalle più recenti alle più antiche. Un primo gruppo è quello dei cumuli di frana (cf). Queste argille derivano dall'alterazione e dal rimaneggiamento di successioni pelitiche del substrato interessato da movimenti franosi; si riconoscono facilmente per la loro forte eterogeneità, per la presenza di clasti litici immersi nella matrice, per la loro colorazione marrone-giallastra e per la presenza di frequenti patine di ossidazione (*Figura 1.73*).

Le argille (cf) interessano i settori più superficiali (primi 20-30 m) dei rilievi attraversati dalle gallerie e solo raramente si avvicinano alla quota di progetto (galleria Grottaminarda), in alcuni casi potrebbero essere interessate dallo scavo delle gallerie di servizio (finestre).

Un altro gruppo di argille è quello del substrato dell'Unità pliocenica della Baronina. Si presentano con una tipica colorazione grigia, costante per tutta la verticale, sono omogenee per centinaia di metri di spessore, ben stratificate, prive di cristalli riconoscibili ad occhio nudo ed allo stesso tempo non presentano scagliosità avendo una tipica rottura concoide alla percussione (*Figura 1.74*). Questo gruppo di argille interessa per un lungo tratto il settore settentrionale della galleria Melito.

In tutto il primo tratto (lato est) della galleria Grottaminarda affiorano successioni argillose arenacee della Formazione messiniana di Anzano. In queste argille si riconoscono minerali idiomorfi di fillosilicati (probabilmente muscovite). Le argille sono laminate, ben stratificate, ma prive di scagliosità (*Figura 1.74*). La pasta di fondo è omogenea e la fratturazione alla percussione è di tipo concoide.

Per lunghi tratti la galleria Grottaminarda interessa il complesso argilloso FYRagms dell'Unità del Flysch Rosso. Queste argille più antiche e di età terziaria, a differenza di quelle descritte precedentemente, hanno subito notevoli stress tettonici a seguito delle fasi compressive mio-

plioceniche che hanno costruito la catena sud appenninica. Per tale motivo le argille si presentano sempre molto deformate, hanno una evidente scagliosità e clivaggio (*Figura 1.74*). Ad occhio nudo non si riconoscono cristalli. Presentano superfici traslucide per la presenza di fillosilicati di neoformazione. La pasta di fondo non è omogenea. La colorazione è costantemente grigia; talora esse presentano una maggiore componente calcarea (argille marnose) ed essendo più antiche, sono più diagenizzate e molto consistenti.

Un ultimo gruppo di argille è quello del FYRavc e cioè delle argille policrome, caotiche del F. Rosso. Presentano la stessa struttura delle argille FYRagms con la differenza di avere colorazioni molto variabili da punto a punto (rosso, verde, grigio) con cambiamenti repentini anche alla scala centimetrica. La scagliosità è molto evidente, così come la presenza di superfici traslucide per la presenza di fillosilicati di neoformazione (*Figura 1.74*).



Figura 1.72. Tipici aspetti delle argille dei cumuli di frana (sondaggio SN01 nella frana della galleria Grottaminarda).

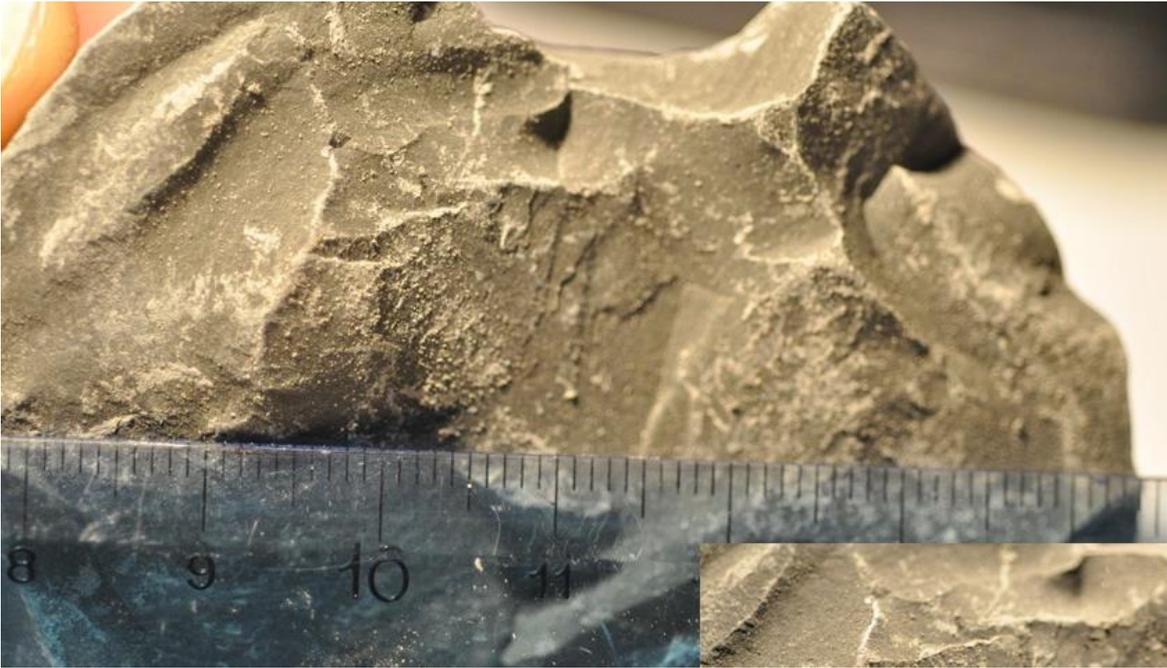


Figura 1.73. Argille grigie, compatte ben stratificate, omogenee con fratture concoidi (Unità della Baronia).



Figura 1.74. Le argille marnoso arenacee della Formazione di Anzano. Sono ben evidenti i cristalli di fillosilicati e la fratturazione concoide.



Figura 1.75. Le argille marnoso-scagliose (FYRags) del F. Rosso. Sono evidenti le ondulazioni da clivaggio e la scagliosità evidenziata dalle superfici traslucide.



Figura 1.76. Le argille policrome (FYRavc). È ben evidente la scagliosità e la presenza di superfici traslucide lungo i piani di intensa deformazione (stress tettonico).



Parte II

Sperimentazione sulla matrice pelitica. Le prove eseguite presso il laboratorio geotecnico dell'Università degli Studi di Napoli Federico II

2. Descrizione delle Facies Litologiche del FLYSCH ROSSO interessate dallo scavo delle gallerie “GROTTAMINARDA” E “MELITO” tra le progressive km 2 +705 e km 7 +145

2.1.Premessa

Nell’ambito delle attività di “Progettazione esecutiva ed esecuzione dei lavori della linea ferroviaria Napoli-Bari raddoppio Tratta Apice-Orsara, 1° Lotto funzionale Apice-Hirpinia tra le pk 0+310 e pk 18+715.205 comprensiva di armamento ferroviario, degli impianti di trazione elettrica, delle altre tecnologie ferroviarie, di un impianto di fermata e uno di stazione” è stata condotta un’estesa campagna di indagine sia in sito che in laboratorio finalizzata alla caratterizzazione delle principali formazioni attraversate dalle gallerie Grottaminarda e Melito.

In questo capitolo si darà conto dei principali aspetti del comportamento meccanico di tali formazioni, sulla base dei risultati delle prove sperimentali condotte presso il laboratorio di Geotecnica del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, DICEA dell’Università degli studi di Napoli; ciò per esemplificare l’approccio metodologico utilizzato nell’interpretazione delle prove di laboratorio.

Tabella 2.1. Elenco dei campioni analizzati e delle prove di laboratorio effettuate.

		profondità (m)	DD	AA	LL	Gs	n _v ,w	TX CIU	TXC	RCTS
Galleria Grottaminarda	cf	SN01c1	6.60-7.10	x	x	x	x	x	x	
		SN01C2	12.50-13.00	x	x	x	x	x		x
		SN02C1	8.00-8.50	x	x	x	x			
		SN01-C3	19.00-19.30	x	x	x				
		SN03C1	4.00-4.40	x	x	x	x	x	x	x
		SN04C1	5.50-6.00	x	x	x	x	x	x	x
	FJR agms	SN04C2	11.50-12.00	x	x	x	x	x	x	
		SN03C2	9.00-9.30	x	x	x	x	x		x
	colluvioni	SNGR02-C1	4.70-5.20	x	x	x	x	x	x	x
		SNGR01-C2	11.50-12.00	x	x		x	x	x	
	ANZ2 ar	SNGR01_C4	21.00-21.50	x	x		x	x	x	
		SNGR02-C2	24.50-24.80	x	x		x			
		SNGR02-C6	47.70-48.00	x	x	x	x	x		x
	ANZ2ag	SNGR03-C2	15.45-16.00	x	x	x	x	x		
		SNGR01-c7	33.60-34.00	x	x		x	x		
	ANZ2mar	SNGR03-C4	37.30-37.90	x	x	x	x	x	x	x
	FJR avc	SNGR04_C4	21.00-21.50	x	x	x	x	x	x	x
	FJRar	SNGR06-C5	31.50-32.00	x	x	X	x	x		
	FJRcgp	SNGR03-C5	46.30-46.80	x	x	x	x	x		
		SNGR03-C7	67.50-68.00	x	x	x	x	x		x
Galleria Melito	FJRavc	SNME02-C2	17.80-18.20	x	x	x	x	x		
		SNME02-C4	56.60-57.00	x	x	x	x	x		
		SNME01-C3	17.80-18.40	x	x	X	x	x	x	x
		SNME05-C2	15.00-15.40	x	x	X	x	x		
	FJRcgp	SNME07-C3	27.00-27.50	x	x	X	x		x	x
		SNME 01-C7	50.00-50.70	x	x	X	x			
			SNME01-C12	78.50-79.00	x	x	x	x	x	

Nella tabella precedente si riporta l'elenco dei campioni investigati, distinti sulla base dell'ubicazione e della formazione di appartenenza. Nella stessa tabella è riportata anche la tipologia di prove effettuate.

Come si evince dalla tabella, non sempre è stato possibile eseguire prove meccaniche, attesa la complessità delle formazioni attraversate, la presenza di elementi lapidei all'interno dei campioni, la struttura caotica di alcuni di essi, la tettonizzazione molto spinta di altri. Pertanto, solo alcune facies sono state caratterizzate sulla base di queste prove, peraltro attraverso un numero piuttosto esiguo di dati sperimentali. Nei capitoli successivi la caratterizzazione è stata completata, in modo del tutto esaustivo, con i dati della sperimentazione eseguita presso altri laboratori.

Nel seguito, per ciascuna delle facies, si procederà alla caratterizzazione in termini di classificazione, caratteristiche fisiche generali e stato iniziale, deformabilità e resistenza a taglio.

2.1. Cumulo di frana – cf

I terreni appartenenti a questo deposito sono stati caratterizzati grazie alle prove eseguite su sei campioni, prelevati da quattro fori di sondaggio di cui uno solo posto in asse alla galleria Grottaminarda (SN02). Oltre alla classificazione, alla determinazione dei limiti di Atterberg e delle caratteristiche fisiche generali, sono state eseguite tre prove triassiali CIU, due prove triassiali cicliche e tre prove di taglio torsionale ciclico.

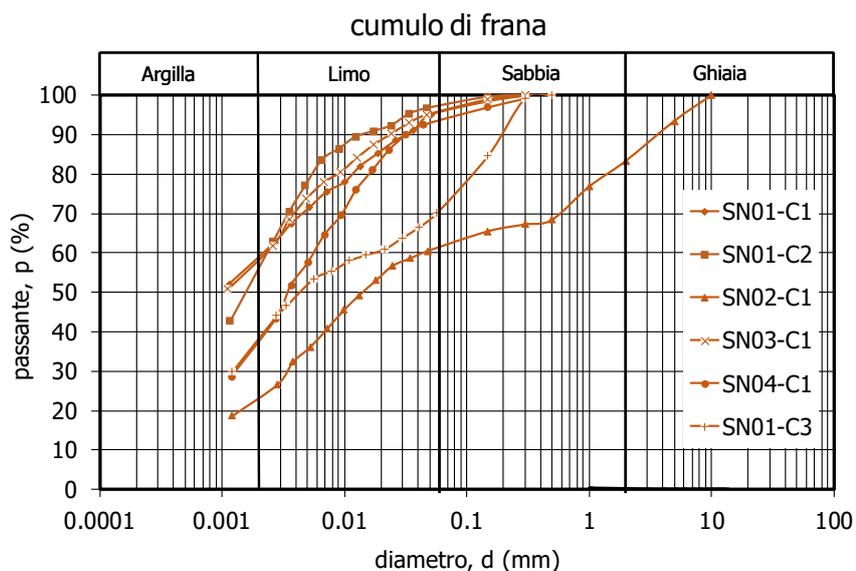


Figura 2.1. Fuso granulometrico relativo ai campioni prelevati nel cumulo di frana.

Classificazione, caratteristiche fisiche generali e condizioni iniziali

In *Figura 2.1* si riporta il fuso granulometrico ottenuto sintetizzando i risultati delle analisi eseguite su sei campioni. Si tratta di terreni a granulometria medio-fine classificabili come argille con limo o limi con argilla con percentuali di sabbia che arrivano fino al 30%. Il diametro massimo è compreso tra 0.3 e 0.5 mm, mentre il D_{60} assume valori variabili all'interno dell'intervallo dei limi (0.002 mm-0.06 mm). In un solo caso (SN02-C1) la granulometria è caratterizzata dalla presenza di una frazione grossolana del 40% costituita in parti uguali da sabbia e ghiaia, a conferma del fatto che si tratta di un materiale a struttura caotica tipica dei depositi di frana.

Il deposito è costituito da terreni fini di plasticità e attività medio-alta, come mostrano i diagrammi riportati in *Figura 2.2 a-b*.

Tutti i campioni analizzati sono piuttosto superficiali, la loro profondità di prelievo non eccede i 20 m dal piano campagna.

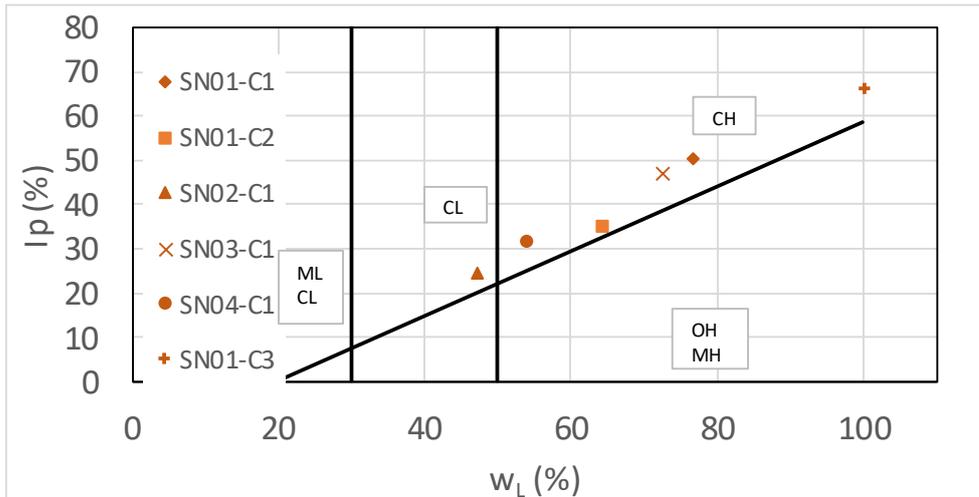
In *Figura 2.3a* si riportano le determinazioni dei limiti di consistenza e del contenuto d'acqua naturale dei campioni, in funzione della loro profondità di prelievo. Tutti i campioni analizzati sono caratterizzati da un contenuto d'acqua minore o uguale a quello di plasticità, corrispondente al contenuto d'acqua di saturazione. Tale contenuto d'acqua conferisce ai terreni una consistenza medio alta.

La gravità specifica ha valori compresi tra 2.7 e 2.8, tipici dei minerali argillosi, come si rileva dai dati mostrati in *Figura 2.3b*. L'indice dei vuoti iniziale è sempre superiore a 0.4 e decresce al crescere della profondità di prelievo (*Figura 2.3c*). Non si dispone di dati relativi al grado di sovraconsolidazione di questi terreni.

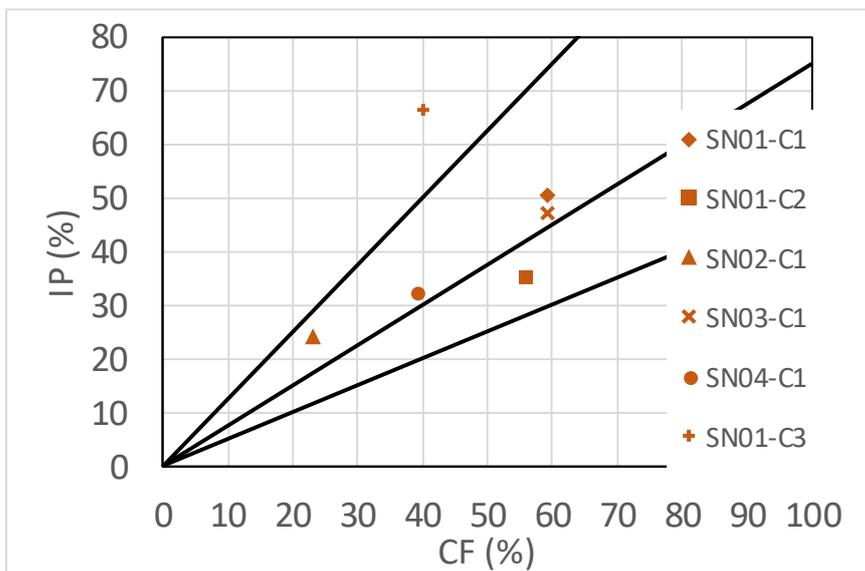
Resistenza a taglio

Per caratterizzare la resistenza a taglio dei terreni del cumulo di frana si dispone dei risultati sperimentali di tre prove triassiali consolidate isotropicamente non drenate, tutte eseguite su campioni superficiali.

In *Figura 2.4* si riportano i risultati delle prove rappresentati in termini di andamento del deviatore e delle sovrappressioni neutre con la deformazione assiale ($q-\varepsilon_a$) e ($\Delta u-\varepsilon_a$). Per la determinazione dei parametri di rottura in termini di angolo di attrito e coesione efficace si è fatto riferimento ai percorsi tensionali nel piano ($q-p'$).



a)



b)

Figura 2.2. a) Carta di plasticità e b) carta di attività relative ai campioni prelevati nel cumulo di frana (cf).

I terreni del corpo di frana (Figura 2.4) presentano un comportamento duttile con pressioni neutre prevalentemente positive che hanno sempre raggiunto una condizione stazionaria in corrispondenza della rottura; solo i provini relativi al campione SN04-C1 sottoposti alle tensioni di confinamento più basse (80 kPa e 160 kPa) mostrano pressioni neutre negative in corrispondenza della rottura, significative di un probabile stato di sovraconsolidazione.

I risultati delle stesse prove sono rappresentati in termini di percorsi delle tensioni efficaci nel piano degli invarianti (Figura 2.5); nello stesso diagramma sono anche riportati gli involuipi dei valori di resistenza di picco e dei valori ultimi.

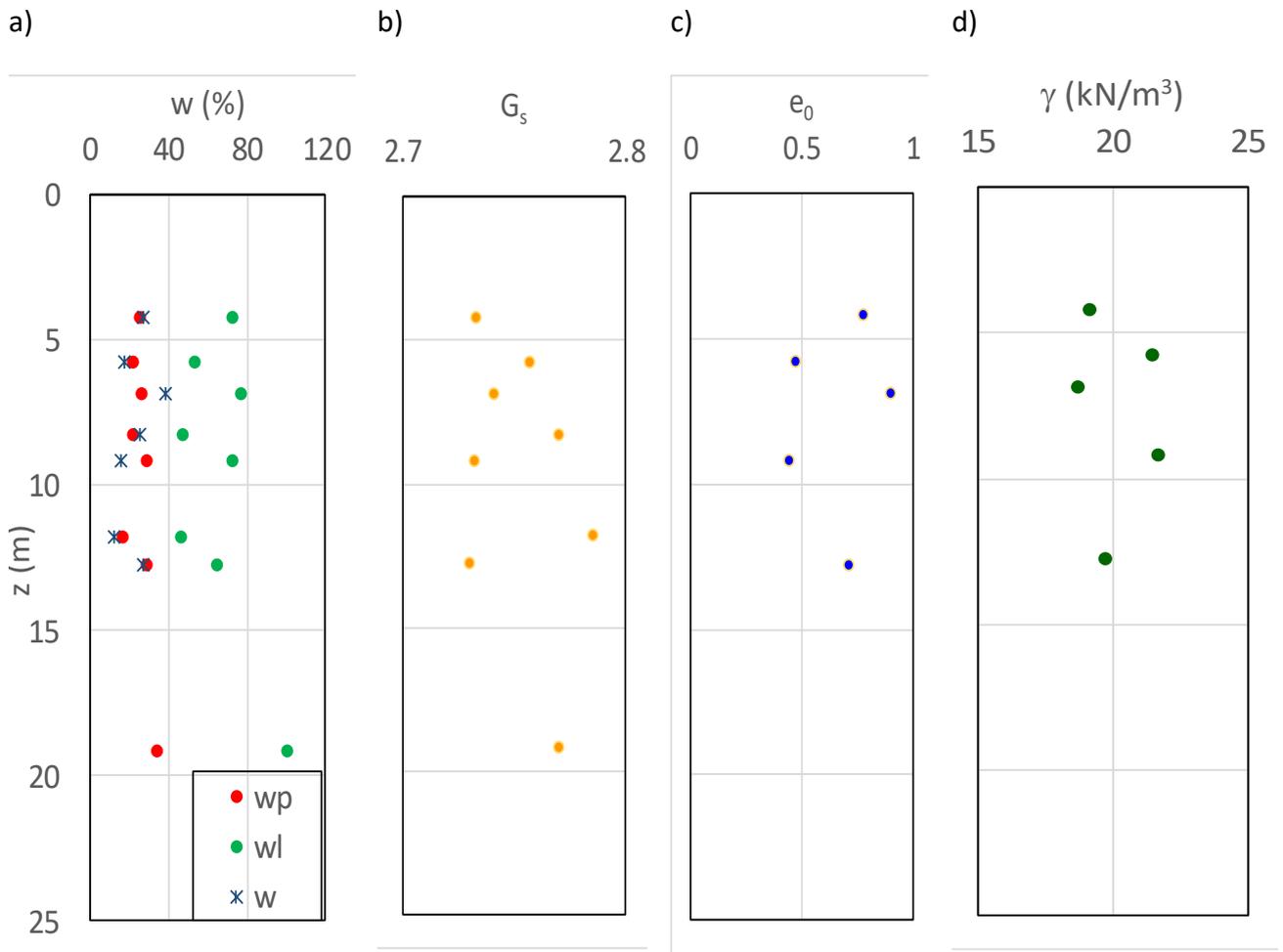


Figura 2.3. Distribuzione con la profondità di: a) limiti di Atterberg e contenuti d'acqua; b) gravità specifica; c) indice dei vuoti iniziale e d) peso dell'unità di volume.

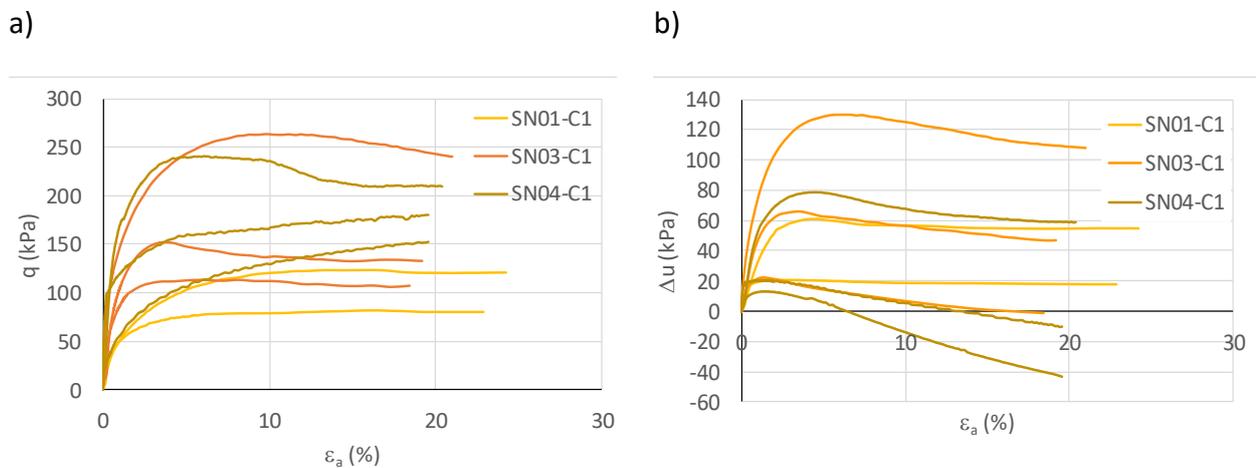


Figura 2.4. Risultati delle prove triassiali CIU: a) tensioni vs. deformazioni; b) sovrappressioni neutre.

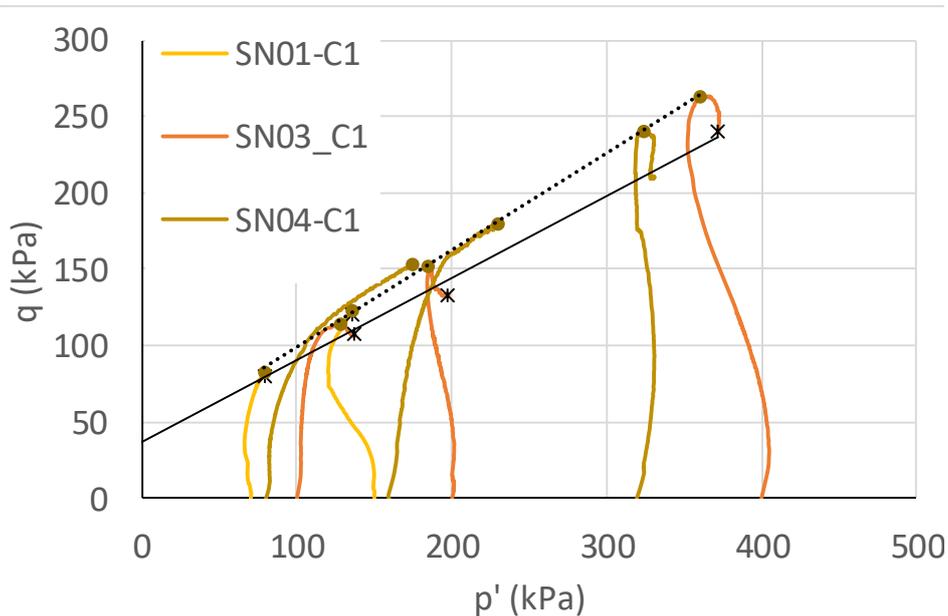


Figura 2.5. Risultati delle prove triassiali CIU: percorsi tensionali e involucri di rottura.

Tabella 2.2. Parametri di resistenza del corpo di frana.

	ϕ' (°)	c' (kPa)
picco	16.7	16.45
ultimo	14.2	17.8

Deformabilità

Per la caratterizzazione delle proprietà di deformabilità dei terreni costituenti il cumulo di frana sono state eseguite tre prove di taglio torsionale ciclico su campioni prelevati entro i primi 13 m dal piano campagna, lungo quattro verticali di sondaggio. I risultati sono stati elaborati sia in termini di modulo di taglio e fattore di smorzamento iniziali sia in termini di andamento di questi stessi parametri con il livello di deformazione. In *Figura 2.6* sono riportati i valori iniziali del modulo di taglio e del fattore di smorzamento in funzione dello stato tensionale di confinamento applicato in fase sferica. Le tensioni sferiche sono state definite sulla base dello stato tensionale litostatico alla profondità di prelievo. I valori iniziali del modulo di taglio mostrano un andamento crescente ma non linearmente con la profondità secondo una legge che è ben descritta da una funzione potenza a esponente minore dell'unità. Il valore dell'esponente evidenzia una marcata sensibilità del modulo alla tensione di confinamento, tuttavia tale valore risente del fatto che l'intervallo di tensioni analizzato è ridotto e relativo a tensioni piuttosto basse. Gli stessi terreni sono caratterizzati da uno

smorzamento viscoso che non supera il 3%, assumendo valori tipici dei terreni argillosi e un andamento decrescente con la tensione di confinamento.

Le proprietà di non linearità e l'andamento del fattore di smorzamento sono mostrati in *Figura 2.7* in termini di modulo di taglio normalizzato e fattore di smorzamento in funzione del livello di deformazione.

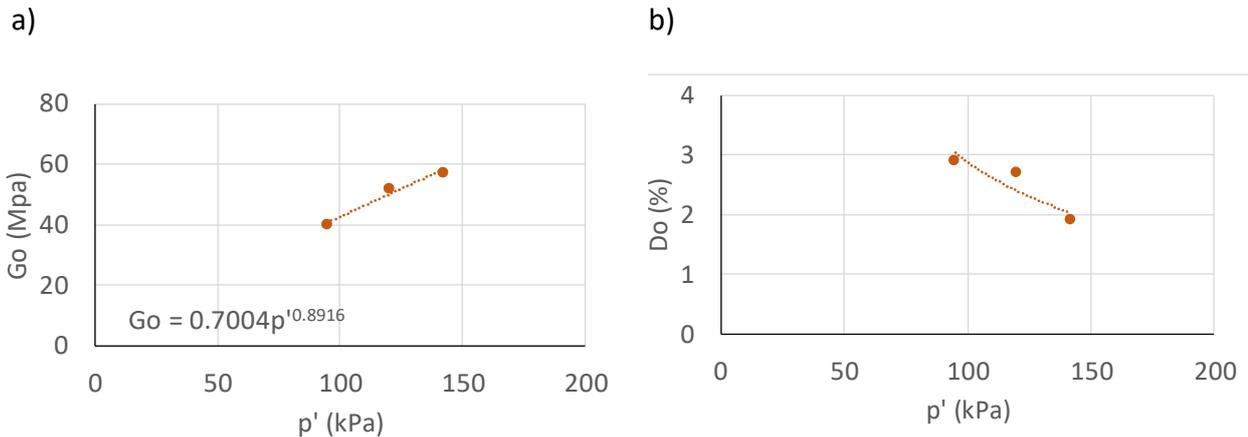


Figura 2.6. Risultati delle prove di taglio torsionale: a) modulo di taglio iniziale e b) fattore di smorzamento vs. tensione media efficace di confinamento.

I terreni costituenti il cumulo di frana sono caratterizzati da una soglia di linearità (valore della deformazione tangenziale corrispondente a un decadimento del modulo iniziale pari al 5%) piuttosto elevata e poco variabile ($\gamma_{el} = 0.02-0.03\%$) e da un'evoluzione molto lenta delle proprietà di non linearità. I valori di sovrappressione neutra registrati durante le prove non consentono di identificare con chiarezza il valore di deformazione corrispondente all'accoppiamento volumetrico-distorsionale, che pertanto viene definito in corrispondenza di un decadimento del modulo pari al 50%. Tale valore, denominato soglia di riferimento, γ_r , si attinge in corrispondenza di un livello di deformazione pari a 0.2% per tutti i campioni sottoposti a prova. I valori di smorzamento sono piuttosto elevati per deformazioni eccedenti 0.5%.

Comportamento ciclico

Il comportamento ciclico è stato investigato attraverso due prove triassiali cicliche non drenate eseguite a tensione controllata. In *Figura 2.8* si riportano i risultati di una delle prove in termini di cicli ($q-\varepsilon_a$) e percorsi tensionali nel piano degli invarianti.

I risultati mostrano un comportamento completamente stabile e reversibile in corrispondenza del livello di deviatore ciclico più basso applicato (± 20 kPa) e una sensibile degradazione della rigidità con il numero di cicli in corrispondenza del deviatore ciclico più elevato (± 70 kPa). Infatti, il modulo E_u misurato sul primo e sull'ultimo di 800 cicli a 20 kPa di deviatore assume lo

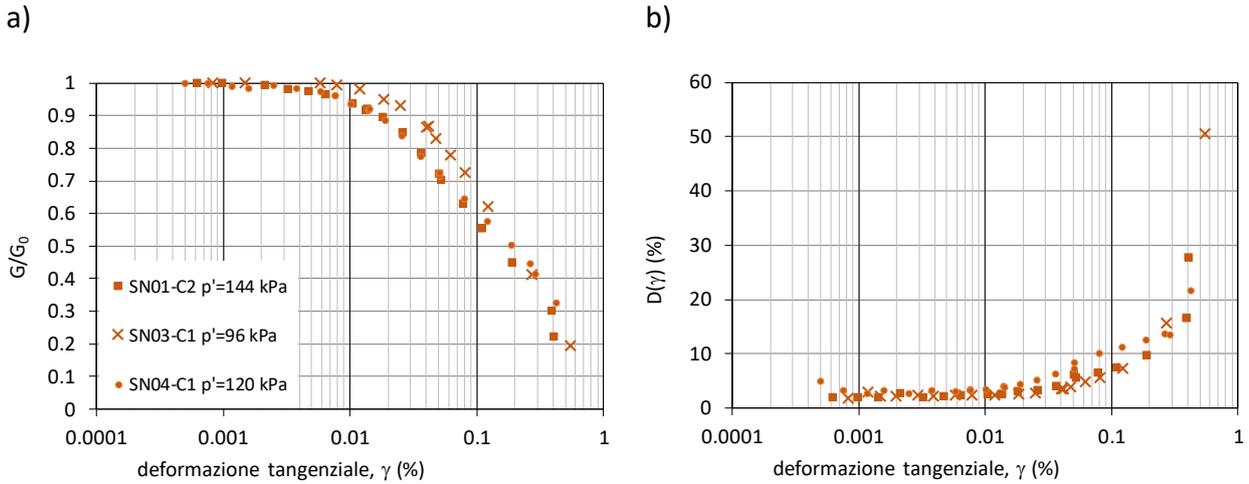


Figura 2.7. Risultati delle prove di taglio torsionale: a) curve di decadimento del modulo di taglio iniziale e b) andamento del fattore di smorzamento con il livello di deformazione.

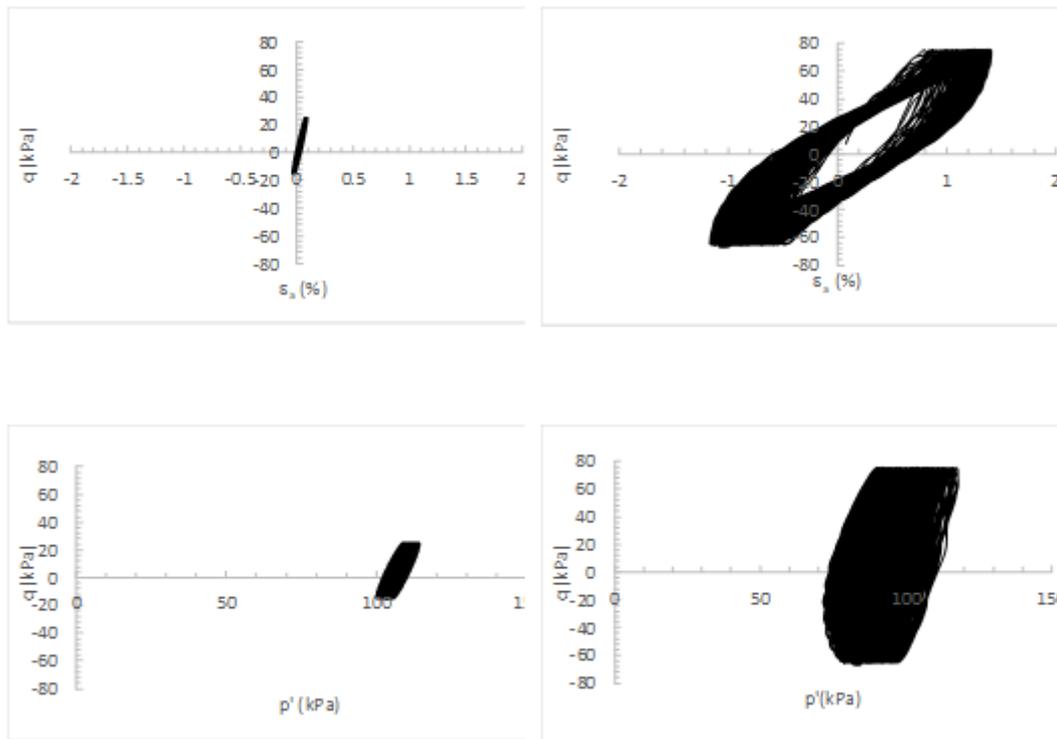


Figura 2.8. Risultati delle prove in termini di cicli ($q-\epsilon_a$) e percorsi tensionali nel piano degli invarianti.

stesso valore di 36 Mpa, mentre in corrispondenza di un deviatore pari a 70 kPa il modulo passa da un valore di 10.5 Mpa al primo ciclo a un valore di 5.5 MPa dopo seicento cicli.

A conferma di questo comportamento in *Figura 2.9* si riportano le deformazioni assiali misurate in corrispondenza dei due livelli di deviatore applicati. Il livello di deformazione ciclica attinto in corrispondenza del deviatore di ± 20 kPa è pari a $\epsilon_{app}=0.11\%$ e resta costante per tutti i cicli, mentre

in corrispondenza del deviatore pari a ± 70 kPa le deformazioni assiali crescono con il numero di cicli partendo da un valore minimo di $\varepsilon_{app}=1.33\%$ e stabilizzandosi a un massimo pari a 2.6%.

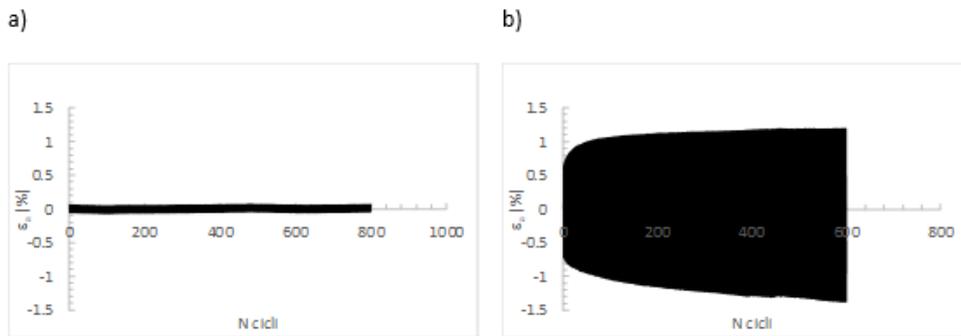


Figura 2.9. Risultati della prova TXC SN03-C1; deformazioni assiali vs Ncicli: a) $q=\pm 20$ kPa; b) $q=\pm 70$ kPa.

2.2. Argille Grigie Marnose Scagliose del Flysch Rosso - FYRagms

I terreni appartenenti a questa formazione sono stati scarsamente caratterizzati nell'ambito della campagna 1 (eseguita presso il laboratorio dell'Università di Napoli); infatti si dispone unicamente dei risultati di una prova triassiale TX CIU e di una prova di taglio torsionale, oltre ai dati relativi alla classificazione, alla determinazione dei limiti di Atterberg e alle caratteristiche fisiche generali. Il risultato della prova triassiale ciclica eseguita sul campione SN04-C2 non sembra attendibile pertanto non è stato preso in considerazione.

Classificazione e caratteristiche fisiche generali e condizioni iniziali

In *Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.* si riporta il fuso granulometrico ottenuto sintetizzando i risultati delle analisi eseguite su due campioni.

Si tratta di terreni a granulometria fine classificabili come limi con argilla con percentuali di sabbia che non superano il 20%. Il diametro massimo è compreso tra 0.3 e 0.5 mm, mentre il D_{60} ha un valore medio di 0.008 mm. Essi sono caratterizzati da un'elevata plasticità e un'attività da normale a elevata, come mostrano i diagrammi riportati in *Figura 2.11 a-b*.

I campioni analizzati sono stati prelevati a una profondità compresa tra 9 e 12 m, immediatamente al di sotto di quella che è stata ipotizzata come superficie di scorrimento del sovrastante cumulo di frana.

In *Figura 2.12a* si riportano le determinazioni dei limiti di consistenza e del contenuto d'acqua naturale dei campioni, in funzione della loro profondità di prelievo. I campioni sono caratterizzati

da un contenuto d'acqua minore o uguale quello di plasticità, corrispondente al contenuto d'acqua di saturazione. Tale contenuto d'acqua conferisce ai terreni una consistenza medio alta.

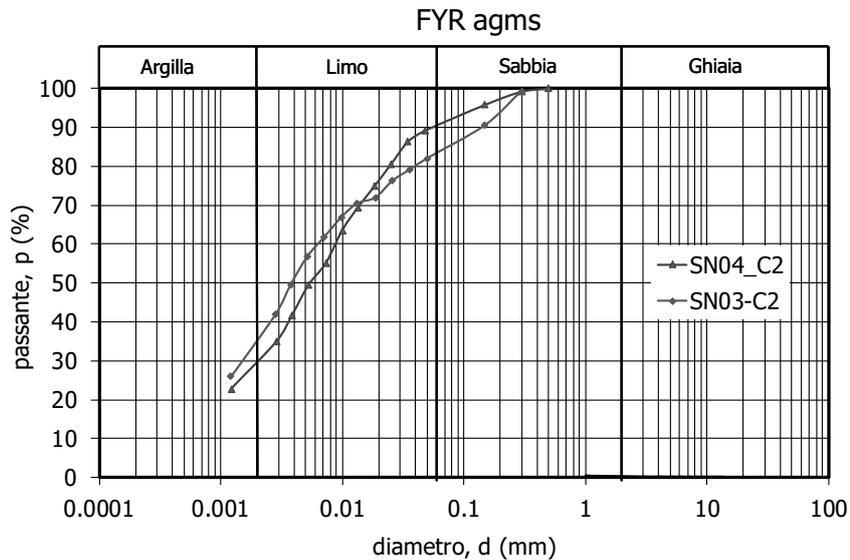


Figura 2.10. Fuso granulometrico delle argille grigie marnose scagliose del Flysch Rosso.

La gravità specifica ha valori compresi tra 2.7 e 2.8, tipici dei minerali argillosi, come si rileva dai dati mostrati in Figura 2.12b. L'indice dei vuoti iniziale e il peso dell'unità di volume sono pressoché costanti e pari a 0.41 e 21.8 kN/m³, rispettivamente. (Figura 2.12c-d).

Resistenza a taglio

Per caratterizzare la resistenza a taglio delle argille grigie marnose scagliose del Flysch si dispone dei risultati sperimentali di una prova triassiale consolidata isotropicamente, eseguita sul campione prelevato nel sondaggio SN04 alla profondità di 11.5m.

In Figura 2.13 si riportano risultati della prova, rappresentati in termini di andamento del deviatore e delle sovrappressioni neutre con la deformazione assiale ($q-\epsilon_a$) e ($\Delta u-\epsilon_a$). Per la determinazione dei parametri di rottura in termini di angolo di attrito e coesione efficace si è fatto riferimento ai percorsi tensionali nel piano ($q-p'$).

I provini (Figura 2.13) esibiscono pressioni neutre prevalentemente positive che hanno sempre raggiunto una condizione stazionaria in corrispondenza della rottura.

I risultati delle stesse prove sono rappresentati in termini di percorsi delle tensioni efficaci nel piano degli invarianti (Figura 2.14); nello stesso diagramma sono anche riportati gli involucri dei valori di picco e dei valori ultimi.

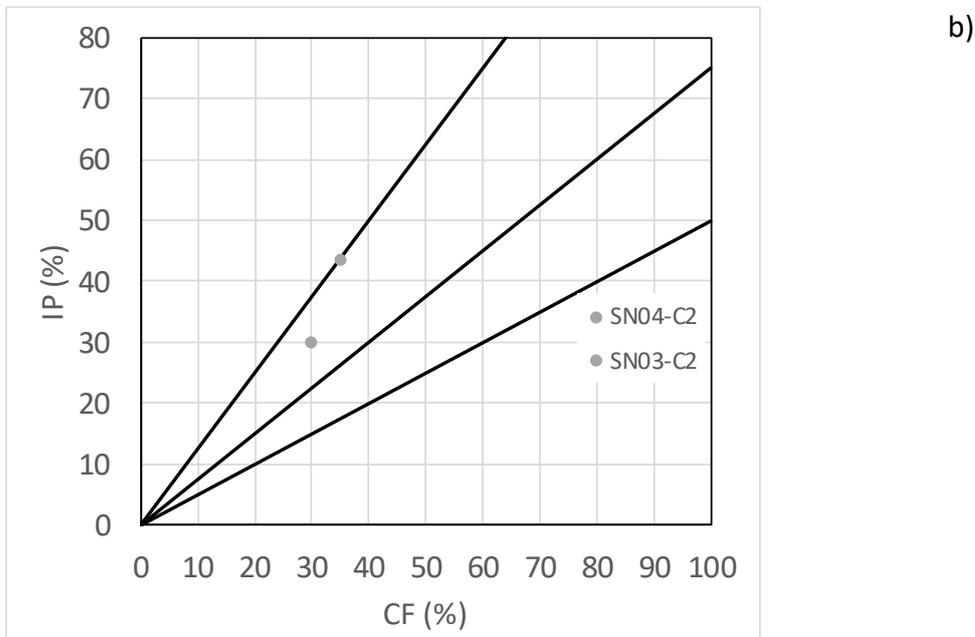
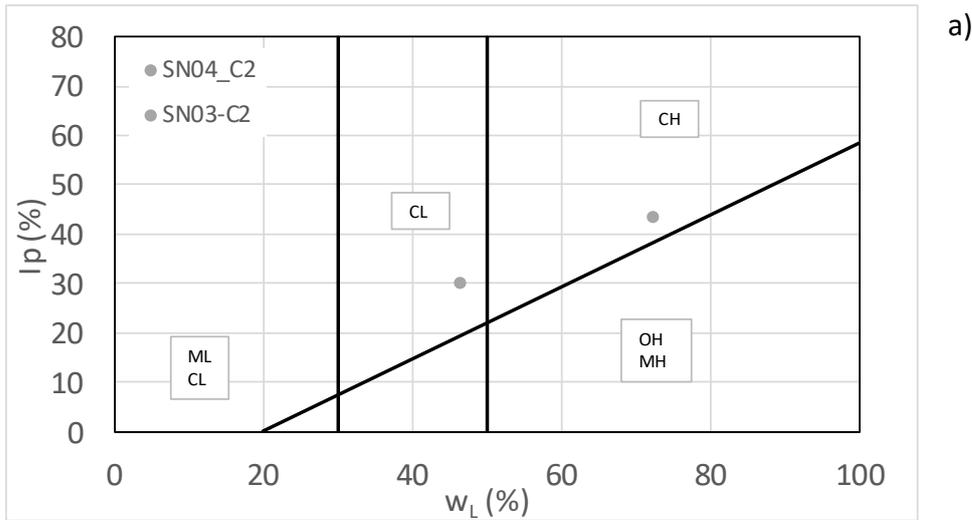


Figura 2.11. a) Carta di plasticità e b) carta di attività delle argille grigie marnose scagliose del Flysch Rosso.

L'involuppo presentato in *Figura 2.14*, relativo a una prova di compressione triassiale CIU, danno conto di un valore di coesione intercetta molto elevato e di un valore di angolo di attrito molto ridotto, il che però non è affatto inusuale per le argille a scaglie. A tal proposito si ricordano i risultati ritrovati da Fenelli et al. (1982) [FENELLI G.B., PAPARO FILOMARINO M., PICARELLI L., RIPPA L. (1982). PROPRIETÀ FISICHE E MECCANICHE DI ARGILLE VARICOLORI DELL'IRPINIA. RIG VOL.3/82 PP. 110-124] che condussero un'ampia sperimentazione sulle argille varicolori dell'Irpinia ritrovando che le prove di taglio diretto (TD) fornivano in genere una resistenza maggiore di quella ottenuta dalle prove di compressione triassiale (TX), il cui angolo di attrito era particolarmente

ridotto. Di seguito si riportano i parametri di resistenza ottenuti dai suddetti Autori. Argille di Laviano: $c'_{TD} = 10-11$ kPa, $\phi_{TD} = 22^\circ-29^\circ$; $c'_{TX} = 26-54$ kPa, $\phi_{TX} = 7^\circ-14^\circ$. Argille di Fiumarella: $c'_{TD} = 11$ kPa, $\phi_{TD} = 20^\circ$; $c'_{TX} = 27$ kPa, $\phi_{TX} = 15^\circ$.

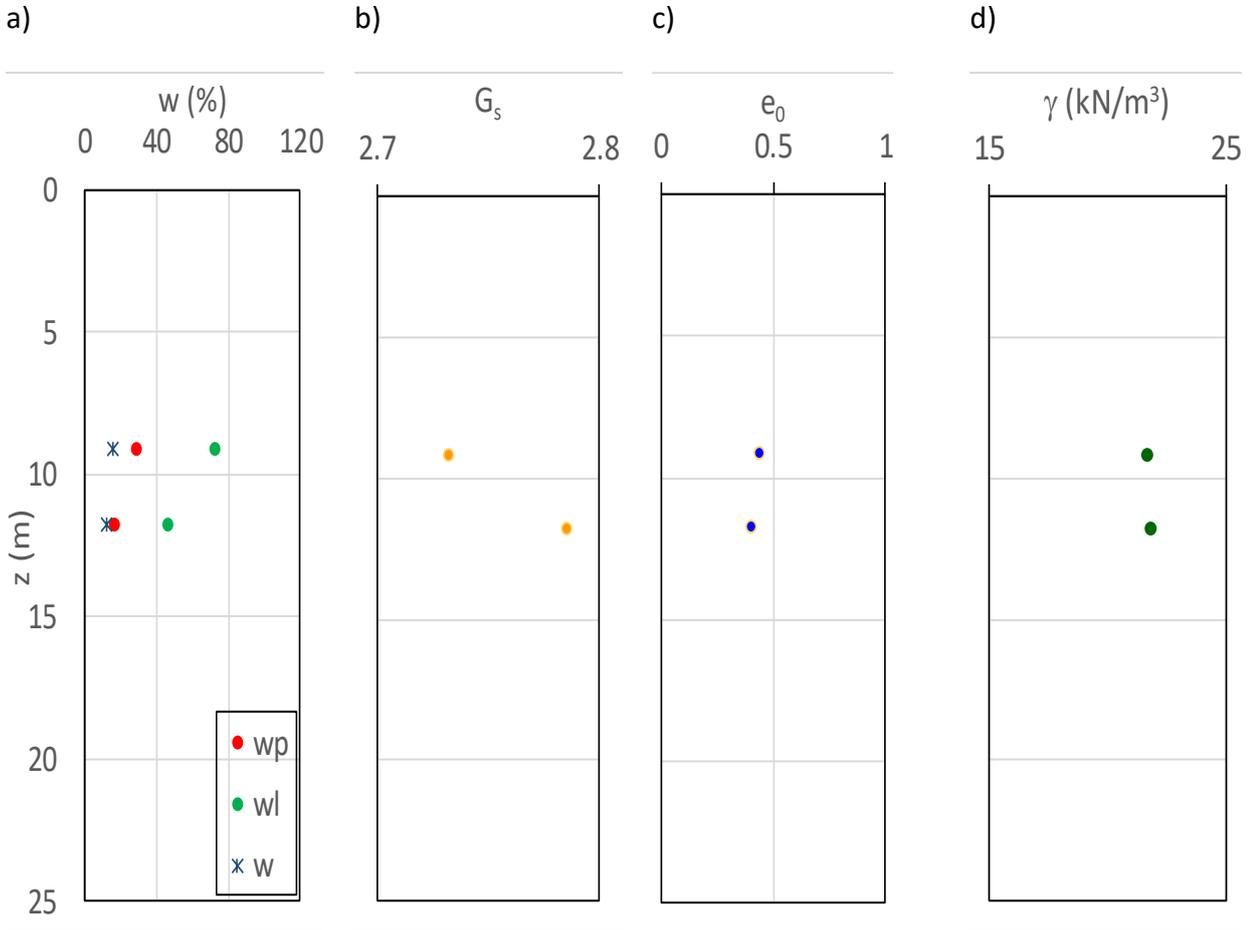


Figura 2.12. a) Limiti di consistenza e contenuto d'acqua naturale; b) gravità specifica; c) indice dei vuoti iniziale e d) peso dell'unità di volume dei campioni prelevati nelle argille grigie marnose scagliose del Flysch.

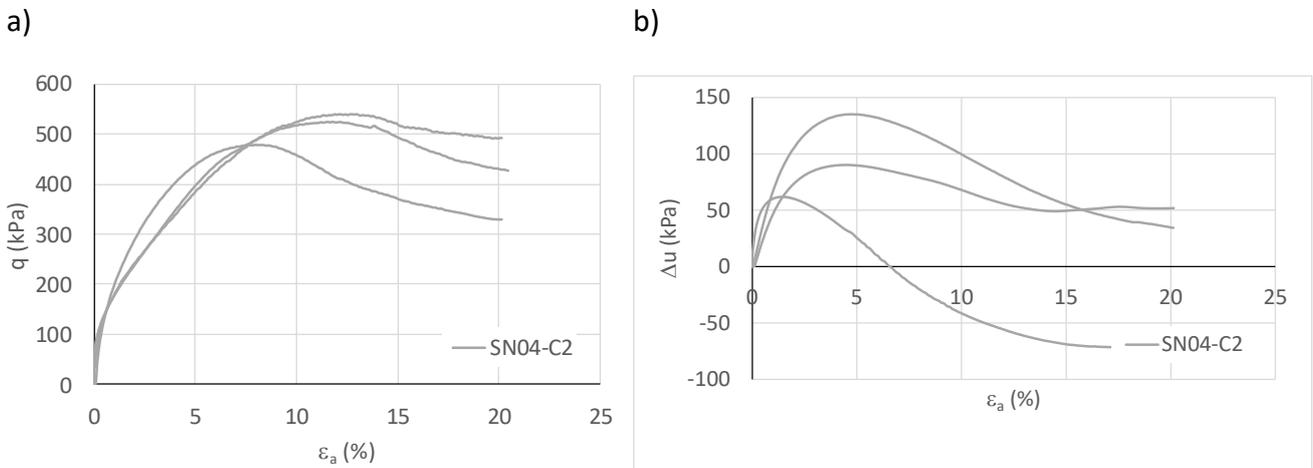


Figura 2.13. Risultati delle prove TX CIU: a) tensioni vs. deformazioni e b) sovrappressioni neutre.

vs. deformazioni assiali.

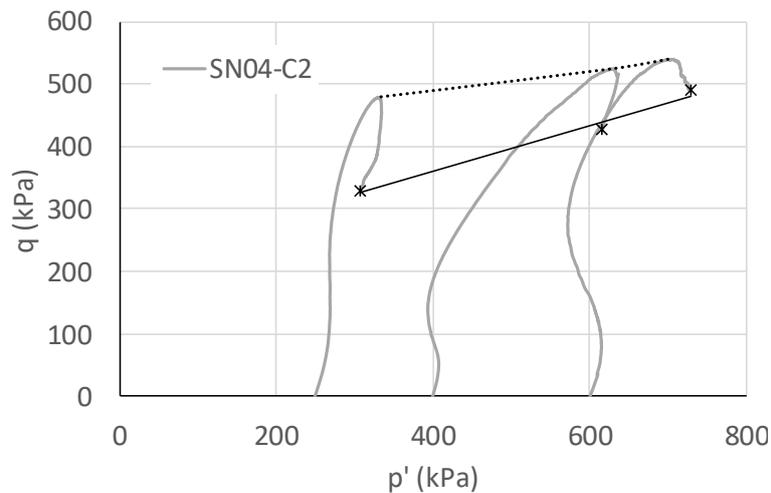


Figura 2.14. Risultati delle prove TX CIU: percorsi di tensione nel piano degli invarianti.

Tabella 2.3. Parametri di resistenza delle Argille grigie marnose del Flysch

	ϕ' (°)	c' (kPa)
picco	4.5	208
ultimo	10	102

Deformabilità

Per la caratterizzazione delle proprietà di deformabilità delle argille grigie marnose scagliose del Flysch si dispone dei risultati di una sola prova di taglio torsionale ciclico eseguita sul campione SN03-C2 prelevato alla profondità di 9.15 m. I risultati sono stati elaborati solo in termini di andamento del modulo di taglio e del fattore di smorzamento con il livello di deformazione. Non è stato possibile definire una legge di variazione di rigidità e smorzamento con la profondità, dal momento che non si dispone di misure di modulo di taglio e fattore di smorzamento iniziali a diverse tensioni di confinamento. Il modulo di taglio iniziale misurato in corrispondenza di una pressione di confinamento di 186 kPa ha un valore di 143 MPa, doppio di quello esibito dal sovrastante cumulo di frana in corrispondenza della stessa tensione di confinamento. La curva di decadimento del modulo di taglio iniziale (Figura 2.15a) mostra un comportamento marcatamente non lineare evidenziato sia dal valore basso della soglia di linearità (valore della deformazione tangenziale corrispondente a un decadimento del modulo iniziale pari al 5%) $\gamma_{el}=0.004\%$, sia dalla variazione repentina del modulo con il livello di deformazione. Il valore della soglia di riferimento γ_r è pari a 0.07%.

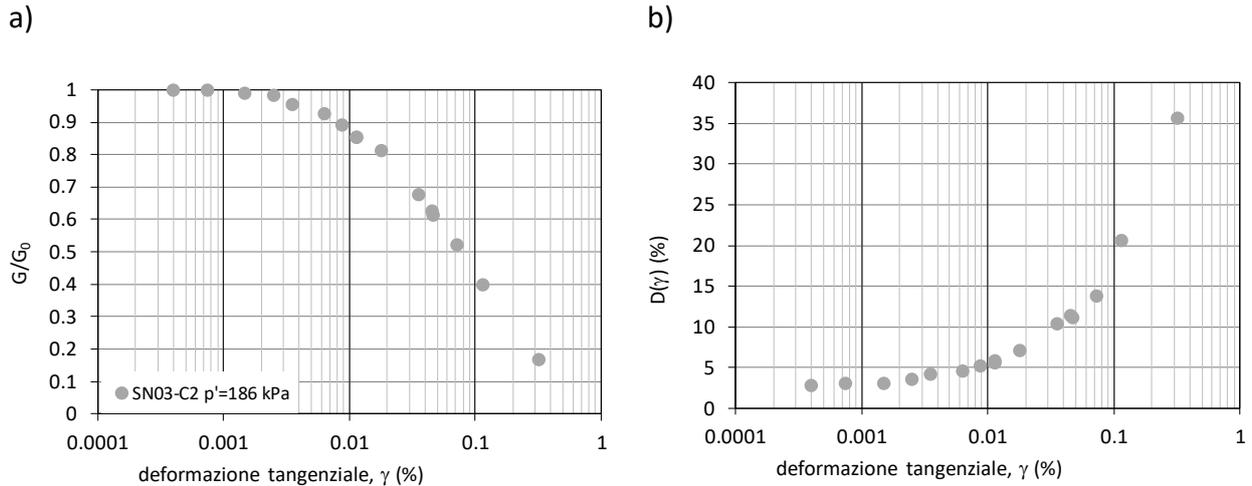


Figura 2.15. Risultati delle prove di taglio torsionale: a) curve di decadimento del modulo di taglio iniziale e b) andamento del fattore di smorzamento con il livello di deformazione.

Il fattore di smorzamento iniziale ha un valore piuttosto elevato di circa 4% e la curva di variazione con il livello di deformazione conferma la marcata non linearità. Tale comportamento fortemente non lineare nonostante l'elevata plasticità dell'argilla è attribuibile alla struttura micro-scagliosa di quest'ultima. Infatti, si può ipotizzare che oltre un certo livello di deformazione è l'interazione tra le scaglie a influenzare il comportamento meccanico dell'elemento di volume e non quello del materiale costituente la singola scaglia.

2.3. Formazione di Anzano

Come già precisato nel paragrafo relativo alla geologia dell'area, nella formazione di Anzano si distinguono, sulla base dell'età e dell'assortimento granulometrico tre diversi membri, il primo ANZ2ar è una formazione prevalentemente arenacea, il secondo, ANZag è invece caratterizzato da una granulometria più fine ed è essenzialmente costituito da argille e sabbie, infine il terzo più antico è sempre caratterizzato da una granulometria fine ma molto consistente ed è costituito prevalentemente da marne argillose. Pur disponendo di numerosi campioni prelevati in questa formazione, spesso non è stato possibile confezionare provini da sottoporre a prove meccaniche sia per la presenza di elementi lapidei del diametro del campione, sia per il rinvenimento di strati marnosi molto consistenti, sia per la fratturazione dei campioni attribuibile anche alla qualità scadente di questi ultimi, che talvolta sono risultati notevolmente disidratati.

Classificazione e caratteristiche fisiche generali e condizioni iniziali

In Figura 2.16 si riportano i fusi granulometrici ottenuti sintetizzando i risultati delle analisi eseguite sui campioni appartenenti alla formazione di Anzano, distinti nelle tre facies.

Come già accennato, la facies arenacea (*Figura 2.16a*) è essenzialmente costituita da terreni limo sabbiosi con un diametro massimo compreso tra 0.3 mm e 1 mm e un D_{60} estremamente variabile. Le facies argillosa (*Figura 2.16b*) e marnosa (*Figura 2.16c*) sono invece caratterizzate da granulometrie decisamente più fini comprese tra limi argillosi e argille limose. Il diametro massimo è sempre pari a 0.3 mm mentre il valore del D_{60} è compreso tra 0.012 e 0.008 mm.

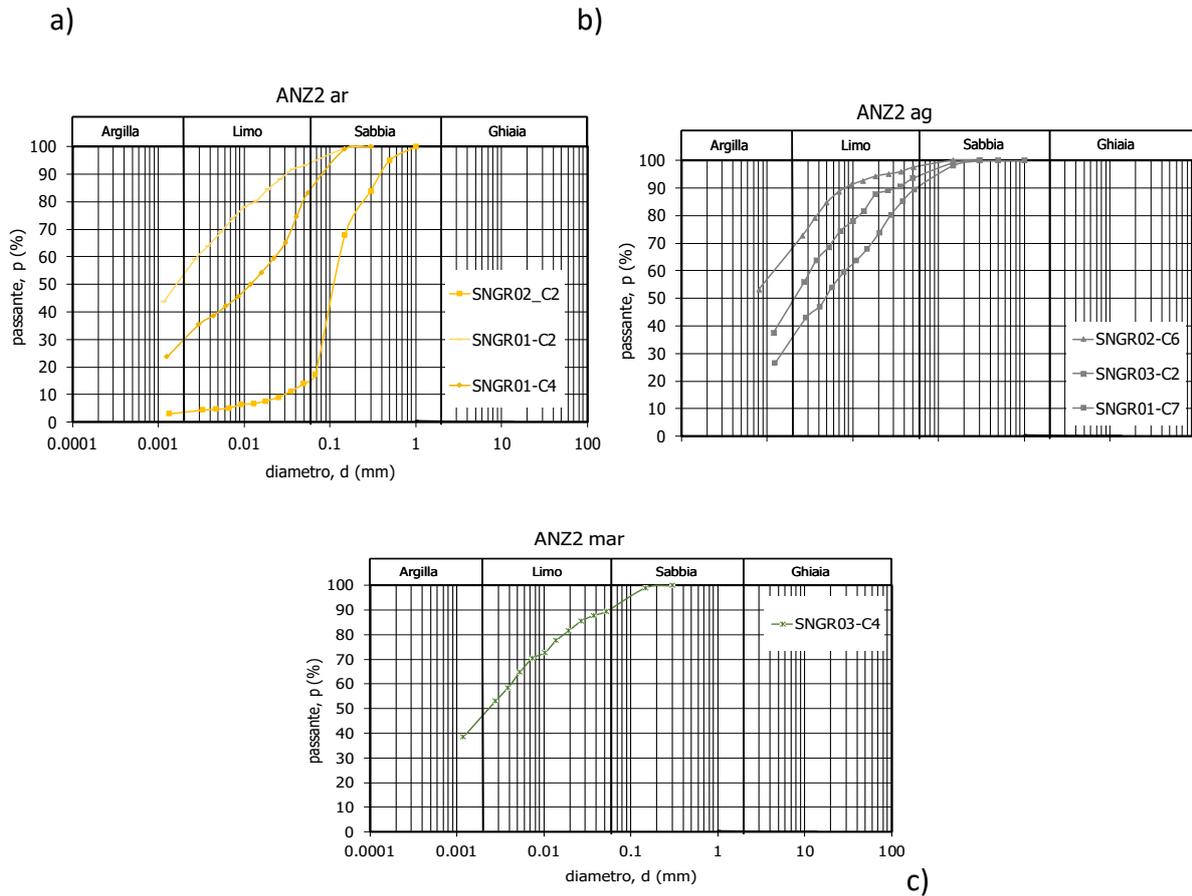


Figura 2.16. Curve granulometriche della formazione di Anzano: a) Anzano arenaceo; b) Anzano argilloso; c) Anzano Marnoso.

La facies arenacea (cerchi gialli nella *Figura 2.17a-b*) è caratterizzata da una bassa plasticità ma da una discreta attività, mentre quella argillosa (cerchi grigi in *Figura 2.17a-b*) e quella marnosa (cerchio verde in *Figura a-b*) sono decisamente più plastiche, anche se caratterizzate da un'attività paragonabile a quella della facies arenacea.

In *Figura 2.18a* si riportano le determinazioni dei limiti di consistenza e del contenuto d'acqua naturale dei campioni, in funzione della loro profondità di prelievo.

I campioni sono tutti caratterizzati da un contenuto d'acqua minore o uguale a quello di plasticità, corrispondente a un grado di saturazione compreso tra 0.8 e 1. Tale contenuto d'acqua conferisce ai terreni una consistenza medio alta.

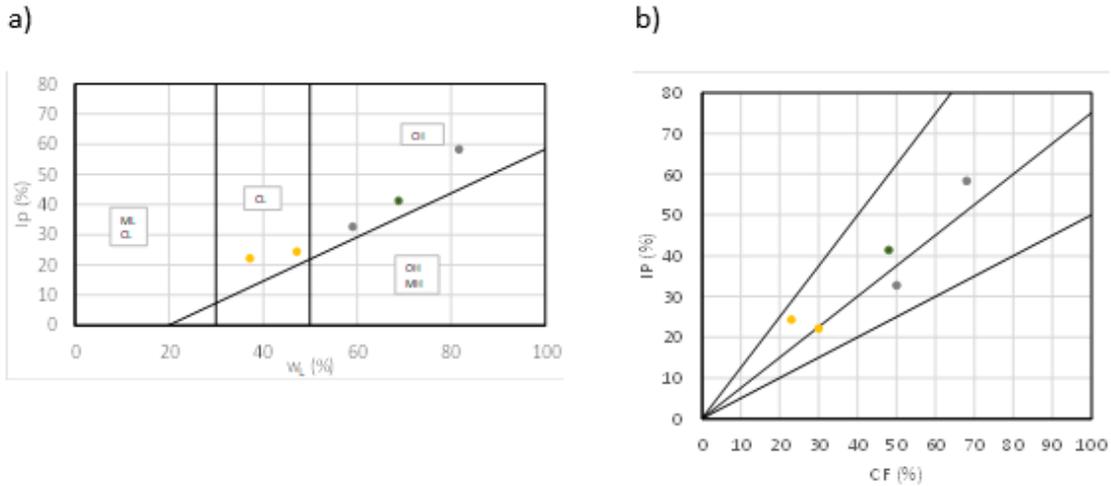


Figura 2.17. Formazione di Anzano: a) carta di Plasticità; b) carta di attività.

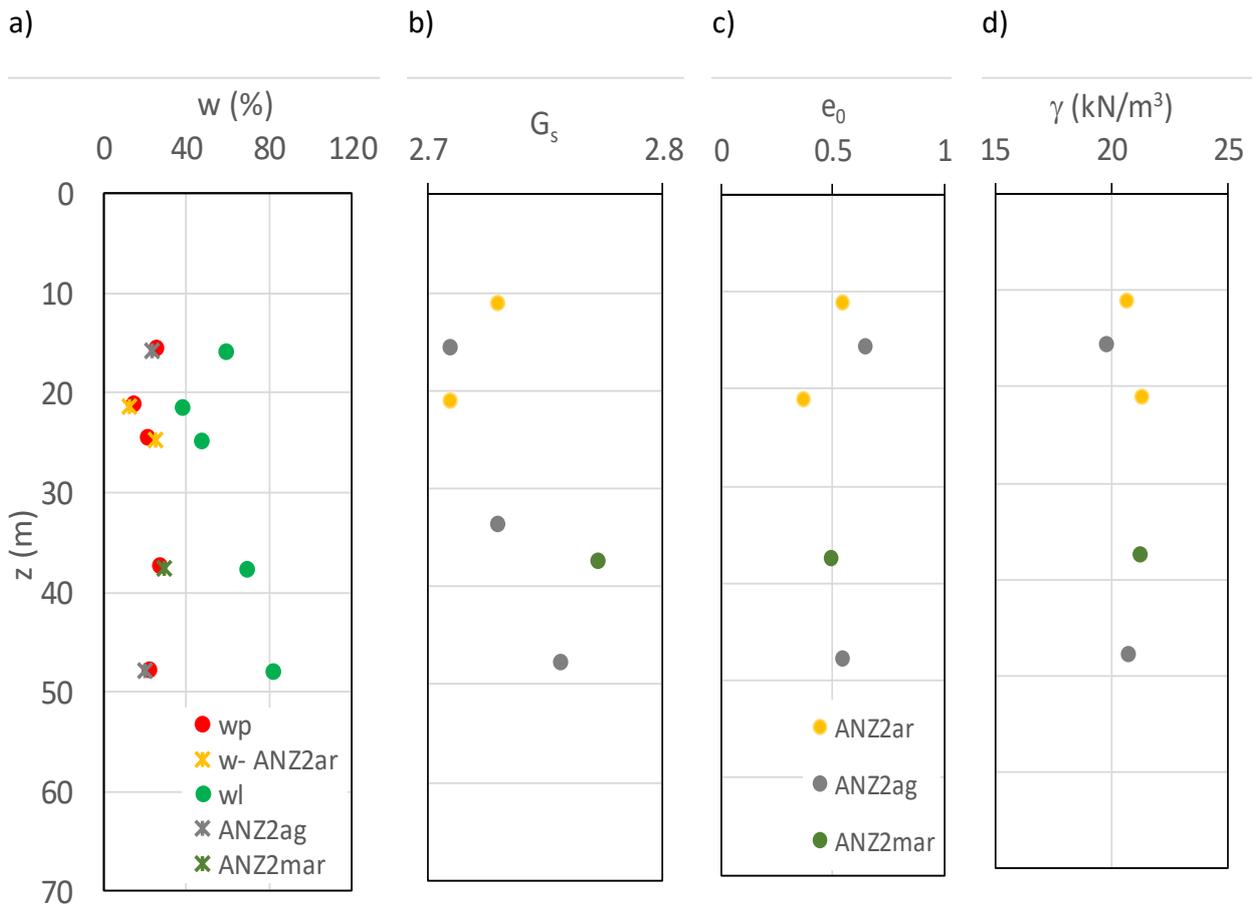


Figura 2.18. a) Limiti di consistenza e contenuto d'acqua naturale; b) gravità specifica; c) indice dei vuoti iniziale e d) peso dell'unità di volume dei campioni prelevati nella formazione di Anzano.

La gravità specifica ha valori compresi tra 2.7 e 2.8, tipici dei minerali argillosi, come si rileva dai dati mostrati in *Figura 2.18b*. L'indice dei vuoti iniziale e il peso dell'unità di volume sono pressoché costanti e pari a 0.51 e 20.8 kN/m³, rispettivamente (*Figura 2.18c-d*).

Resistenza a taglio

Come già precisato nella premessa di questo capitolo il confezionamento dei provini dai campioni appartenenti alla formazione di Anzano non è stata agevole. Per questo i dati sperimentali relativi alla resistenza di questi terreni sono esigui e consistono in due prove triassiali CIU eseguite sui campioni prelevati nel sondaggio SNGR01, allr profondità di 11.75 m (C2) e 21.25 m (C4), utili per la caratterizzazione della sola facies arenacea della formazione di Anzano. La *Figura 2.19* mostra i risultati delle prove rappresentati in termini di andamento del deviatore e delle sovrappressioni neutre con la deformazione assiale (q - ϵ_a) e (Δu - ϵ_a). Per la determinazione dei parametri di rottura in termini di angolo di attrito e coesione efficace si è fatto riferimento ai percorsi tensionali nel piano (q - p').

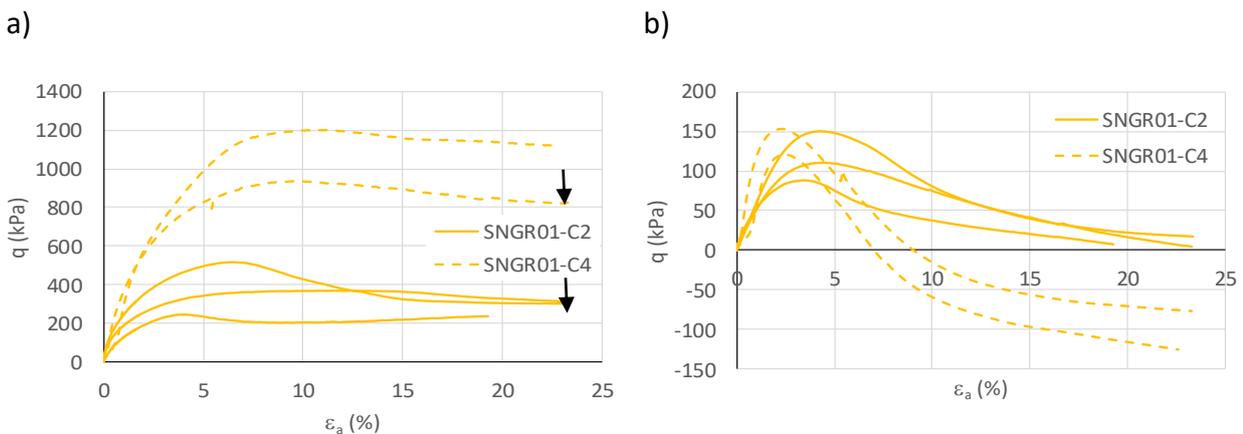


Figura 2.19. Risultati delle prove TX CIU: a) tensioni vs. deformazioni e b) sovrappressioni neutre vs. deformazioni assiali.

La risposta tensio-deformativa esibita dai due campioni sembra significativamente influenzata dalla loro granulometria. Infatti, a parità di stato tensionale applicato il materiale più fine (SNGR01-C2) mostra un deviatore ultimo che è circa la metà del limo argilloso sabbioso del campione SNGR01-C4 (vedi le frecce in *Figura 2.19a*). Il campione più superficiale (SNGR01-C2) esibisce pressioni neutre inizialmente positive che tendono ad azzerarsi verso la rottura mentre quello più profondo è caratterizzato da pressioni neutre negative in corrispondenza della rottura a causa di un probabile stato di sovraconsolidazione.

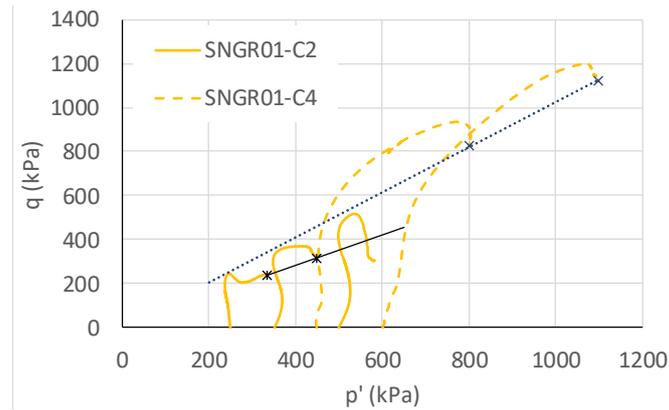


Figura 2.20 – Risultati delle prove TX CIU: percorsi di tensione nel piano degli invarianti.

Tabella 2.4. Parametri di resistenza della facies arenacea della formazione di Anzano.

	ϕ' (°)	c' (kPa)
SNGR01-C2	15.6	15
SNGR01-C4	25	13

I risultati delle stesse prove sono rappresentati in termini di percorsi delle tensioni efficaci nel piano degli invarianti (Figura 2.20); nello stesso diagramma sono anche riportati gli involucri dei valori ultimi, che sono stati elaborati separatamente per ciascun campione.

Deformabilità

Per la caratterizzazione delle proprietà di deformabilità della formazione di Anzano si dispone dei risultati di due prove di taglio torsionale ciclico eseguite sui campioni SNGR02-C6, appartenenti alla facies argillosa e SNGR03-C4 appartenente alla facies marnosa. Nella Tabella 2.5 sono sintetizzati i valori del modulo di taglio e del fattore di smorzamento iniziali insieme con la tensione di confinamento applicata.

Tabella 2.5. Parametri di rigidezza e smorzamento iniziali della formazione di Anzano.

Campione	p'	G_0	D_0
	(kPa)	(MPa)	(%)
SNGR02-C6	475	126	2.15
SNGR03-C4	428	152	3.13

I valori riportati in tabella evidenziano che, pressoché a parità di stato tensionale applicato, la facies marnosa è caratterizzata da una rigidità e uno smorzamento maggiori e rispetto alla facies argillosa.

Non è stato possibile definire una legge di variazione di rigidità e smorzamento con la profondità dal momento che non si dispone di misure di modulo di taglio e fattore di smorzamento iniziali a diverse tensioni di confinamento. I risultati sono stati quindi elaborati in termini di andamento del modulo di taglio e del fattore di smorzamento con il livello di deformazione. Le curve di decadimento del modulo di taglio iniziale (*Figura 2.21a*) mostrano un comportamento molto simile per le due diverse facies, caratterizzato da una soglia di linearità (valore della deformazione tangenziale corrispondente a un decadimento del modulo iniziale pari al 5%) piuttosto elevata e confrontabile ($\gamma_{el-AZN2mar}=0.009\%$ e $\gamma_{el-AZN2ag}=0.016\%$). In entrambi i casi la variazione del modulo con il livello di deformazione è molto graduale con un valore della deformazione di riferimento γ_r che, per entrambi i casi, è pari a 0.15%. Il fattore di smorzamento iniziale della facies marnosa è più elevato rispetto a quello misurato sulla facies argillosa; questo determina la posizione mutua delle curve $D(\gamma)$ che hanno un andamento molto simile tra loro.

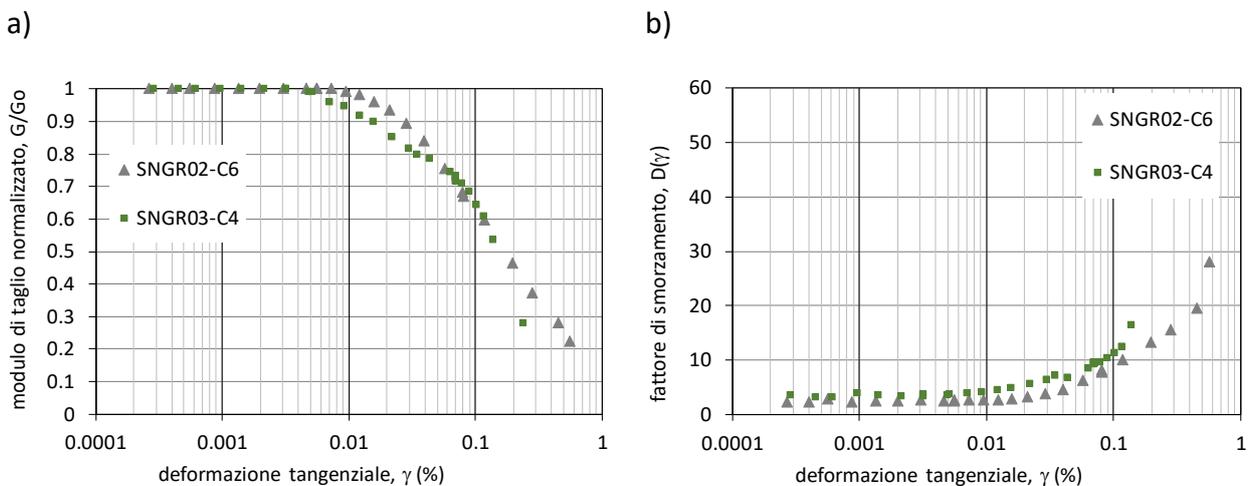


Figura 2.21. Risultati delle prove di taglio torsionale: a) curve di decadimento del modulo di taglio iniziale e b) andamento del fattore di smorzamento con il livello di deformazione.

Comportamento ciclico

Il comportamento ciclico è stato indagato attraverso due prove triassiali cicliche non drenate eseguite a tensione controllata sui campioni SNGR02-C6 e SNGR03-C4. In *Figura 2.22* si riportano i risultati della sola prova eseguita sul campione SNGR03-C4 durante la quale, a partire da uno stato tensionale isotropo efficace di 450 kPa, sono stati eseguiti più set di cicli a deviatore crescente.

Nella *Figura 2.22a-d* i risultati della prova sono rappresentati in termini di cicli (q - ε_a) mentre nella *Figura 2.22 e-h* sono mostrati i relativi percorsi tensionali nel piano degli invarianti.

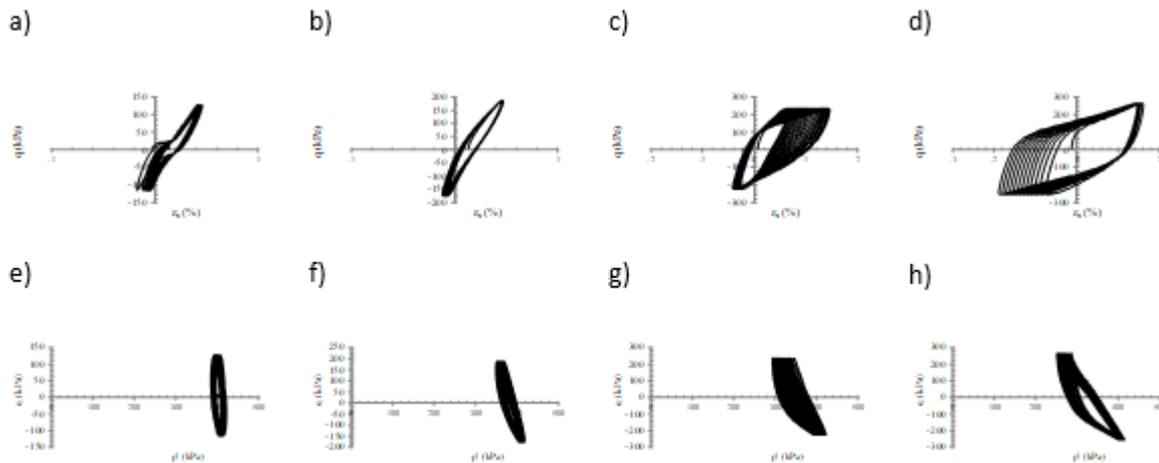


Figura 2.22. Risultati della prova triassiale ciclica non drenata in termini di cicli tensioni-deformazioni e percorsi tensionali nel piano degli invarianti al variare del deviatore ciclico applicato: a)- e) $q = \pm 120$ kPa; b)- f) $q = \pm 180$ kPa; c)- g) $q = \pm 230$ kPa; d)- h) $q = \pm 260$ kPa.

I risultati relativi al primo set di cicli mostrano, dopo una significativa deformazione plastica al primo ciclo, un comportamento essenzialmente elastico nei cicli successivi mentre, al crescere del deviatore applicato, il comportamento degradante diventa sempre più significativo. L'effetto del numero di cicli sul modulo di rigidezza è valutabile attraverso l'indice di degradazione del modulo di Young, δE pari a E_N/E_1 . In *Figura 2.23* è riportato l'andamento di tale indice al variare del numero di cicli, valutato in corrispondenza dell'applicazione di un deviatore pari a ± 230 kPa e ± 260 kPa.

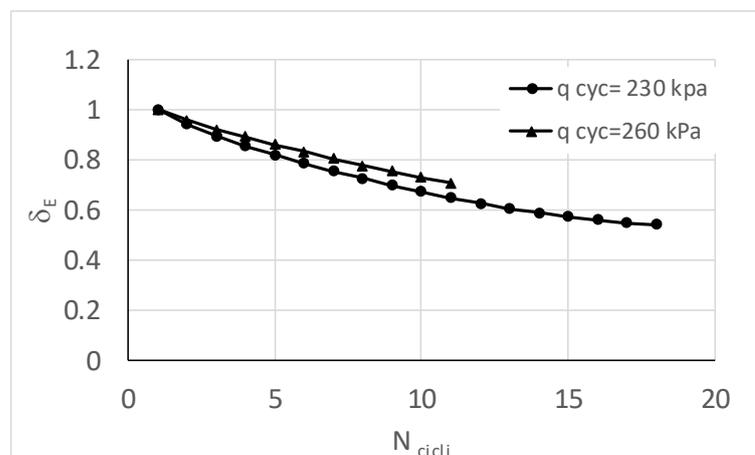


Figura 2.23. Indice di degradazione del modulo di Young al variare del numero di cicli in prova TXC.

La degradazione del modulo ha un andamento simile, indipendentemente dal valore di deviatore ciclico applicato; è più significativa in corrispondenza dei primi cicli e si stabilizza intorno a un valore pari a circa il 50% del modulo.

2.4. Argille Policrome del Flysch Rosso - FYRavc

Le argille policrome del Flysch sono state caratterizzate grazie alla disponibilità di un campione prelevato in un sondaggio effettuato lungo il tracciato della galleria Grottaminarda, e di cinque campioni estratti lungo le verticali di quattro sondaggi eseguiti lungo l'asse della galleria Melito. Anche in questo caso non è stato sempre possibile confezionare i provini da sottoporre alle prove meccaniche, data la complessa struttura di questi terreni e la presenza di elementi lapidei marnosi. Per la caratterizzazione meccanica sono disponibili i risultati sperimentali di due prove triassiali CIU, due prove di taglio torsionale e una prova triassiale ciclica non drenata.

Classificazione e caratteristiche fisiche generali e condizioni iniziali

In *Figura 2.24* si riporta il fuso granulometrico ottenuto sintetizzando i risultati delle analisi eseguite sui campioni appartenenti alle argille policrome del Flysch.

Il fuso appare abbastanza ampio includendo sia limi con argilla più o meno sabbiosi che materiali con granulometria più grossolana classificabili come sabbie limose o con limo. Conseguentemente il diametro massimo varia tra 0.5 mm e 10 mm e il D_{60} risulta estremamente variabile.

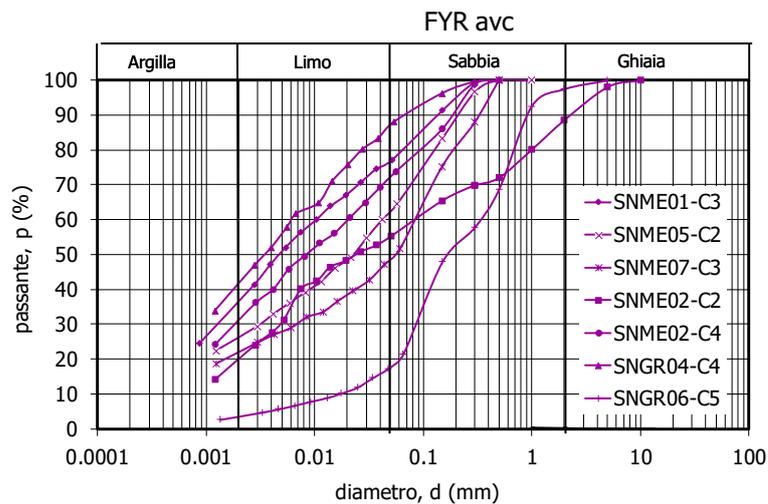


Figura 2.24. Curve granulometriche dei campioni appartenenti alle argille policrome del Flysch.

I campioni analizzati sono tutti caratterizzati da una plasticità e un'attività medio alta (*Figura 2.25*). Particolarmente elevata risulta la plasticità del campione SNGR04-C4 evidentemente conferita dalla

elevata attività dei minerali argillosi presenti, come si evince dalla carta di attività riportata in *Figura 2.25*. In *Figura 2.26a* si riportano le determinazioni dei limiti di consistenza e del contenuto d'acqua naturale dei campioni, in funzione della loro profondità di prelievo.

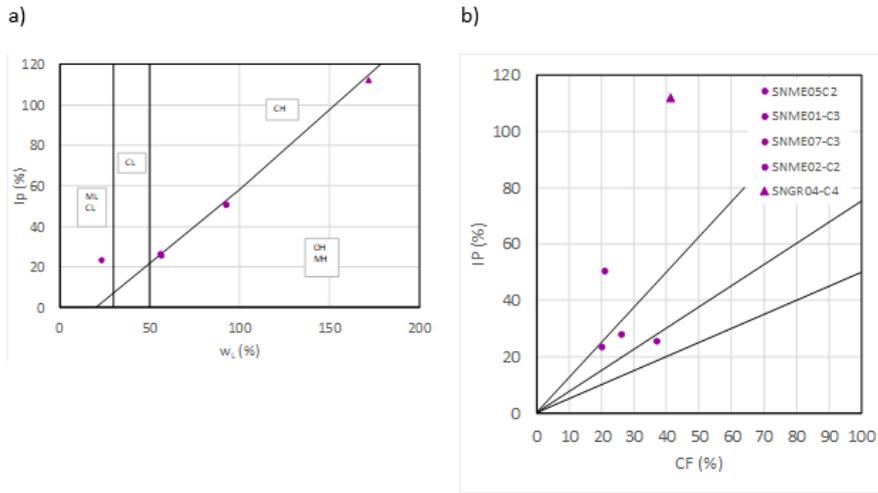


Figura 2.25. a) Carta di plasticità e b) carta di attività delle argille policrome del Flysch.

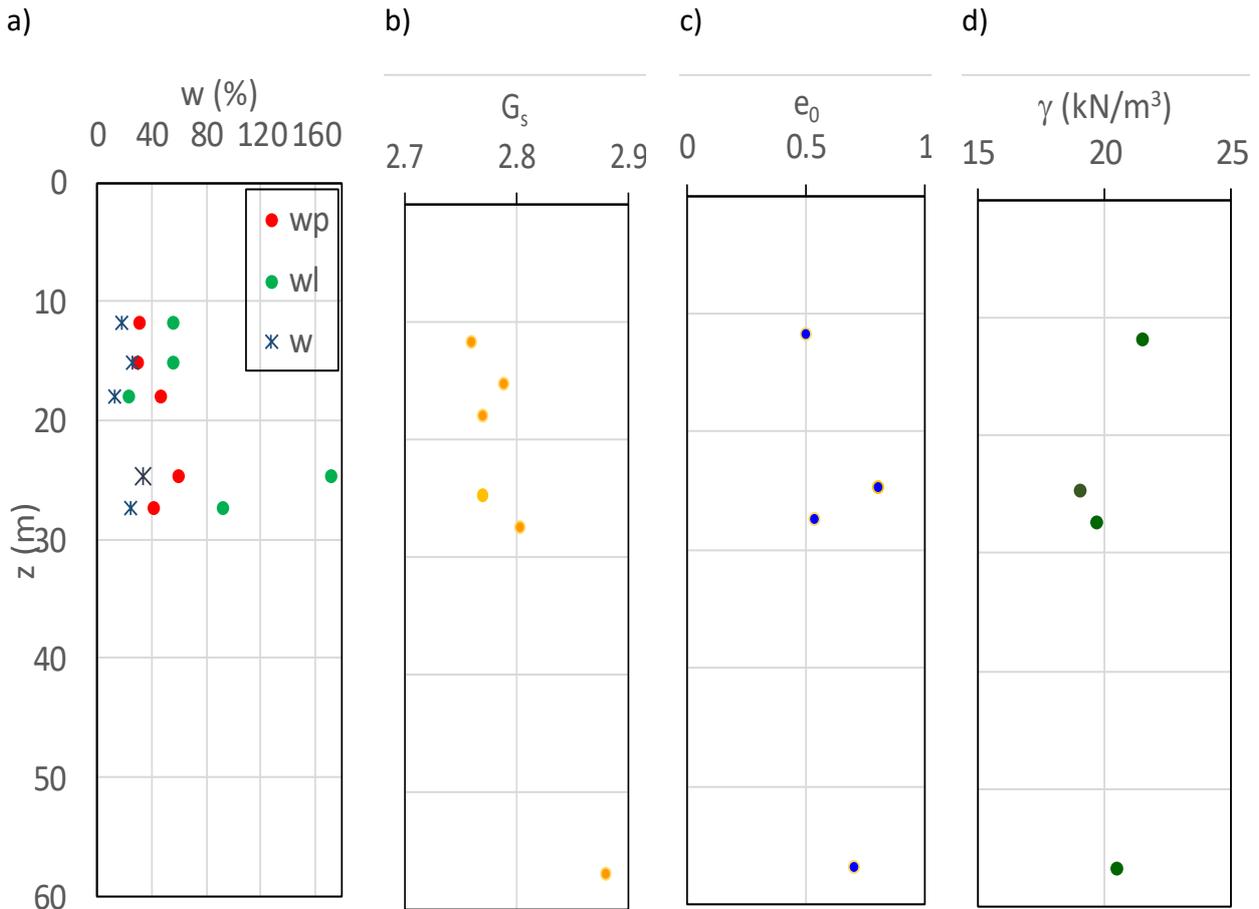


Figura 2.26. Limiti di consistenza e contenuto d'acqua naturale; b) gravità specifica; c) indice dei vuoti iniziale e d) peso dell'unità di volume dei campioni prelevati nelle argille policrome del Flysch.

I campioni sono tutti caratterizzati da un contenuto d'acqua minore di quello di plasticità, corrispondente a un grado di saturazione compreso tra 0.8 e 1. Tale contenuto d'acqua conferisce ai terreni una consistenza piuttosto elevata.

La gravità specifica ha valori compresi tra 2.7 e 2.9 come si rileva dai dati mostrati in *Figura 2.26b*. L'indice dei vuoti iniziale è compreso tra 0.5 e 0.8 (*Figura 2.26c*) e il peso dell'unità di volume è mediamente pari a 20 kN/m^3 (*Figura 2.26d*).

Resistenza a taglio

Come già precisato nella premessa di questo capitolo, il confezionamento dei provini dai campioni appartenenti alle argille policrome del Flysch non è stata agevole. Per questo i dati sperimentali relativi alla resistenza di questi terreni sono esigui e consistono in due prove triassiali CIU eseguite sui campioni prelevati nei sondaggi SNME01-C3 alle profondità di 11.75 m e SNME07-C3 alla profondità di 27.35 m. La *Figura 2.27* mostra i risultati delle prove rappresentati in termini di andamento del deviatore e delle sovrappressioni neutre con la deformazione assiale ($q-\varepsilon_a$) e $(\Delta u-\varepsilon_a)$. Per la determinazione dei parametri di rottura in termini di angolo di attrito e coesione efficace si è fatto riferimento ai percorsi tensionali nel piano ($q-p'$).

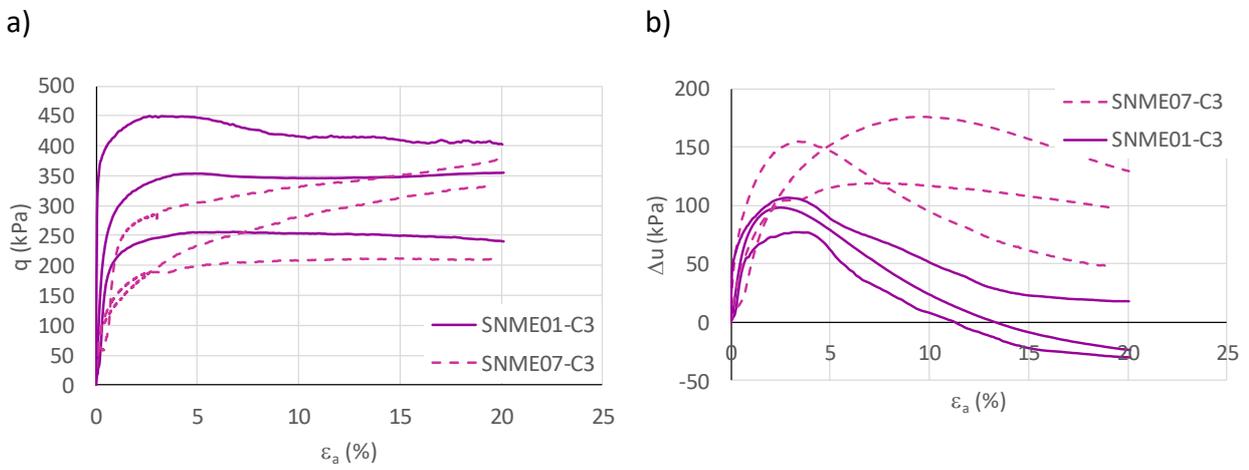


Figura 2.27. Risultati delle prove TX CIU: a) tensioni vs. deformazioni e b) sovrappressioni neutre vs. deformazioni assiali.

I provini sono appartenenti ai due campioni sono stati sottoposti a stati tensionali sferici uguali, tuttavia essi mostrano un andamento tensio-deformativo che in fase pre-rottura è influenzato dallo sviluppo delle pressioni neutre che in un caso (SNME07-C3) sono sempre positive, determinando un comportamento duttile dei provini, mentre in un altro (SNME01-C3) sono inizialmente positive per poi diventare negative verso la rottura.

I risultati delle stesse prove sono rappresentati in termini di percorsi delle tensioni efficaci nel piano degli invarianti (*Figura 2.28*); nello stesso diagramma è anche riportato l'involuppo dei valori ultimi.

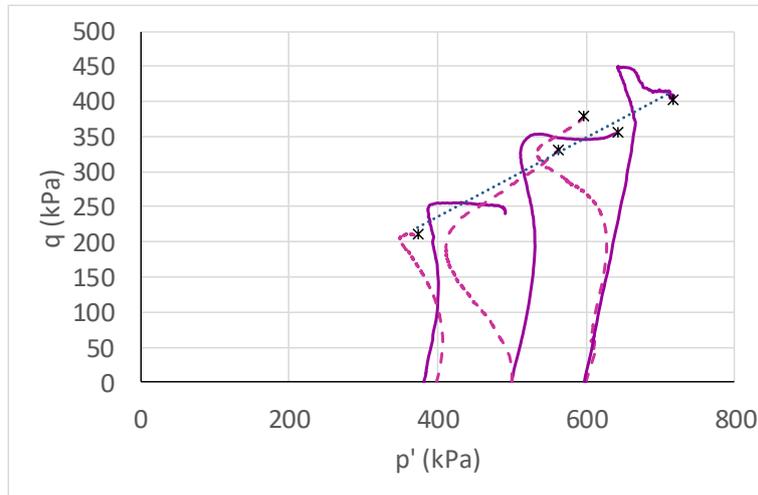


Figura 2.28. Risultati delle prove TX CIU: percorsi di tensione nel piano degli invarianti.

I parametri di resistenza a volume costante ottenuti sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 2.6. Parametri di resistenza argille policrome del Flysch.

ϕ' (°)	c' (kPa)
14.9	5.9

Deformabilità

Per la caratterizzazione delle proprietà di deformabilità delle argille del Flysch si dispone dei risultati di due prove di taglio torsionale ciclico eseguite sui campioni SNGR04-C4 e SNME01-C3. Nella tabella VI sono sintetizzati i valori del modulo di taglio e del fattore di smorzamento iniziali insieme con la tensione di confinamento applicata.

Tabella 2.7. Rigidezza e smorzamento iniziale delle argille policrome del Flysch.

Campione	p'	G_0	D_0
	(kPa)	(MPa)	(%)
SNGR04-C4	426	109	4.8
SNME01-C3	353	147	3.2

Il modulo di taglio iniziale misurato sul provino del campione SNGR04-C4 è minore di quello misurato sul provino del campione SNME01-C3, nonostante quest'ultimo sia stato sottoposto a uno

stato tensionale di confinamento sensibilmente minore del primo. Questa differenza è certamente associata all'elevata plasticità che caratterizza il campione SNGR04-C4.

Non è stato possibile definire una legge di variazione di rigidezza e smorzamento con la profondità dal momento che non si dispone di misure di modulo di taglio e fattore di smorzamento iniziali a diverse tensioni di confinamento. I risultati sono stati quindi elaborati in termini di andamento del modulo di taglio e del fattore di smorzamento con il livello di deformazione. Le curve di decadimento del modulo di taglio iniziale (*Figura 1.29a*) mostrano un comportamento molto diverso per i due provini, chiaramente influenzato dalla diversa plasticità dei due campioni. Infatti, analizzando i valori della soglia di linearità (valore della deformazione tangenziale corrispondente a un decadimento del modulo iniziale pari al 5%) questi passano da un valore di $\gamma_{el}=0.007\%$ del campione con IP pari a 25.6 a uno di $\gamma_{el}=0.02\%$ per il campione caratterizzato da un IP pari a 112.2. In entrambi i casi la variazione del modulo con il livello di deformazione è piuttosto rapida con un valore della deformazione di riferimento γ_r che per il campione mediamente plastico è pari a 0.08%, mentre per quello a plasticità elevata è pari a 0.3%. L'andamento delle curve $D(\gamma)$ confermano la sensibile differenza di ampiezza del campo di comportamento elastico già osservato in riferimento alle curve di decadimento del modulo di taglio iniziale.

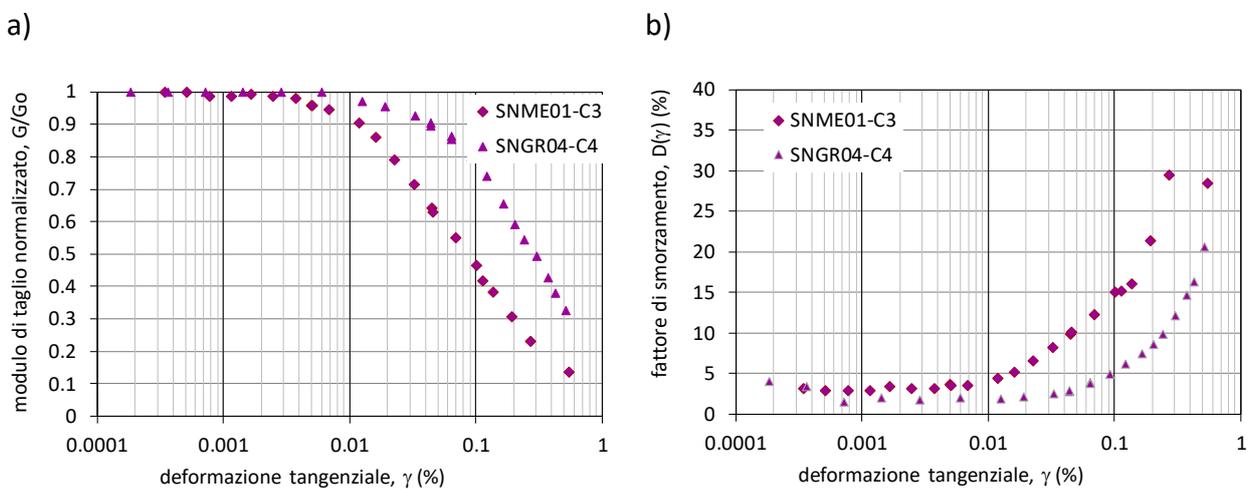


Figura 28. Risultati delle prove di taglio torsionale: a) curve di decadimento del modulo di taglio iniziale e b) andamento del fattore di smorzamento con il livello di deformazione.

Comportamento ciclico

Il comportamento ciclico è stato investigato attraverso un'unica prova triassiale ciclica non drenata eseguita a tensione controllata sul campione SNGR04-C4. In *Figura 2.29* si riportano i risultati della prova, a partire da uno stato tensionale isotropo efficace di 452 kPa, il provino è stato sottoposto a 20 cicli con ampiezza di ± 200 kPa. Nelle *Figura 2.29a* i risultati della prova sono rappresentati in

termini di cicli (q - ε_a) mentre nella *Figura 2.29b* sono mostrati i relativi percorsi tensionali nel piano degli invarianti e in *Figura 29c* sono riportate le pressioni neutre.

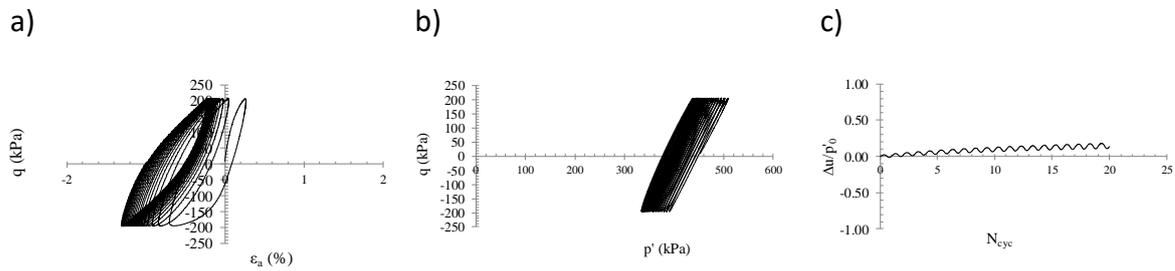


Figura 2.29. Risultati della prova triassiale ciclica non drenata: a) cicli tensione-deformazione; b) percorsi tensionali nel piano degli invarianti; c) rapporto di sovrappressione neutra vs. numero di cicli.

I risultati mostrano un discreto accumulo di deformazioni plastiche in estensione e un rapporto di sovrappressione neutra che non supera il 20% dello stato tensionale isotropo iniziale. L'effetto del numero di cicli sul modulo di rigidezza è valutato attraverso l'indice di degradazione del modulo di Young, δE pari a $EN/E1$ riportato in *Figura 2.30* in funzione del numero di cicli.

La degradazione del modulo è poco significativa e si stabilizza intorno a un valore pari a circa l'80% del modulo.

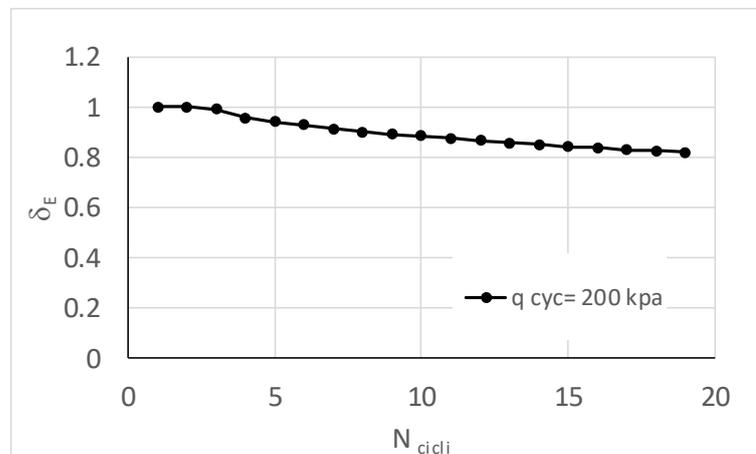


Figura 2.30. Indice di degradazione del modulo di Young al variare del numero di cicli da prova TXC.

2.5. Matrice argillosa dei conglomerati del Flysch Rosso - FYRcgp

I conglomerati in matrice argillosa sono prevalentemente costituiti da elementi lapidei immersi in una matrice argillosa che rappresenta non più del 30% dell'ammasso. Attraverso le prove di

laboratorio è stato possibile caratterizzare solo la risposta della componente argillosa di tale facies eseguendo una prova triassiale TXCIU e una prova di taglio torsionale.

Classificazione e caratteristiche fisiche generali e condizioni iniziali

In *Figura 2.31* si riporta il fuso granulometrico ottenuto sintetizzando i risultati delle analisi eseguite sui campioni appartenenti alle argille policrome del Flysch.

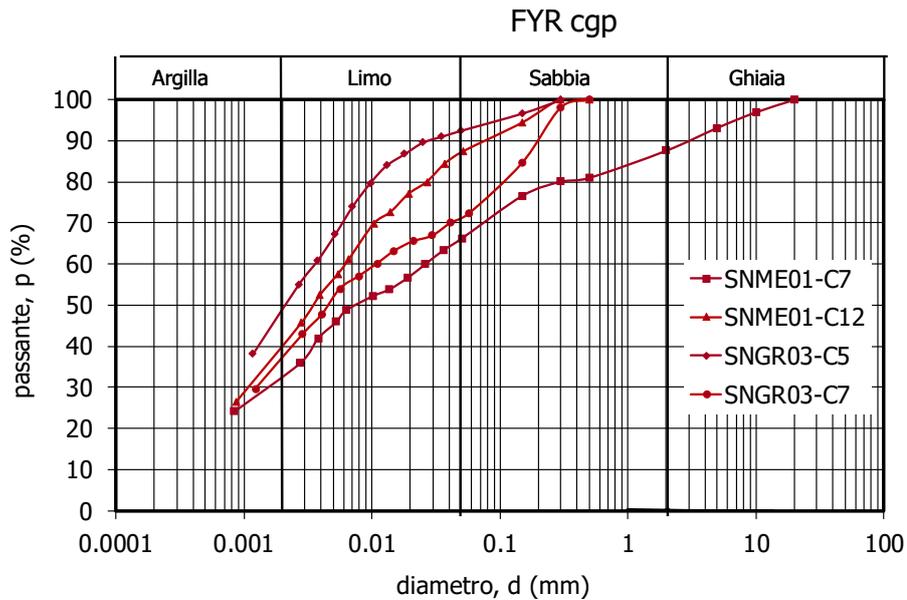


Figura 2.31. Curve granulometriche dei campioni appartenenti alla matrice argillosa dei conglomerati del Flysch.

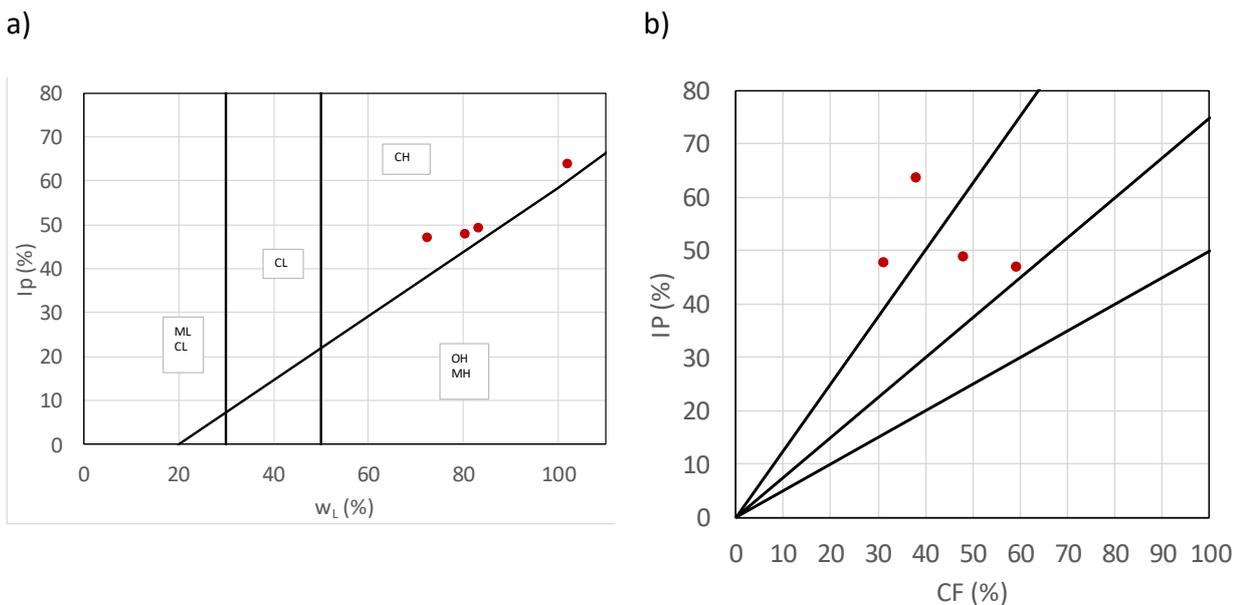


Figura 2.32. a) Carta di plasticità e b) carta di attività della matrice argillosa dei conglomerati del Flysch.

Il fuso appare abbastanza ampio includendo sia limi con argilla più o meno sabbiosi che materiali con granulometria più grossolana classificabili come sabbie limose o con limo. Conseguentemente il diametro massimo varia tra 0.5 mm e 10 mm e il D_{60} risulta estremamente variabile.

I campioni analizzati sono tutti caratterizzati da una plasticità e un'attività alta (*Figura 2.32*), evidentemente conferita dalla elevata attività dei minerali argillosi presenti.

In *Figura 2.33a* si riportano le determinazioni dei limiti di consistenza e del contenuto d'acqua naturale dei campioni, in funzione della loro profondità di prelievo. I campioni sono tutti caratterizzati da un contenuto d'acqua anche significativamente minore di quello di plasticità, corrispondente a un grado di saturazione compreso tra 0.8 e 1. Tale contenuto d'acqua conferisce ai terreni una consistenza elevata. La gravità specifica ha valori compresi tra 2.7 e 2.9 come si rileva dai dati mostrati in *Figura 2.33b*. L'indice dei vuoti iniziale è costante e pari a 0.5 (*Figura 2.33c*) e il peso dell'unità di volume è mediamente compreso tra 20 kN/m^3 e 22 kN/m^3 (*Figura 2.33d*).

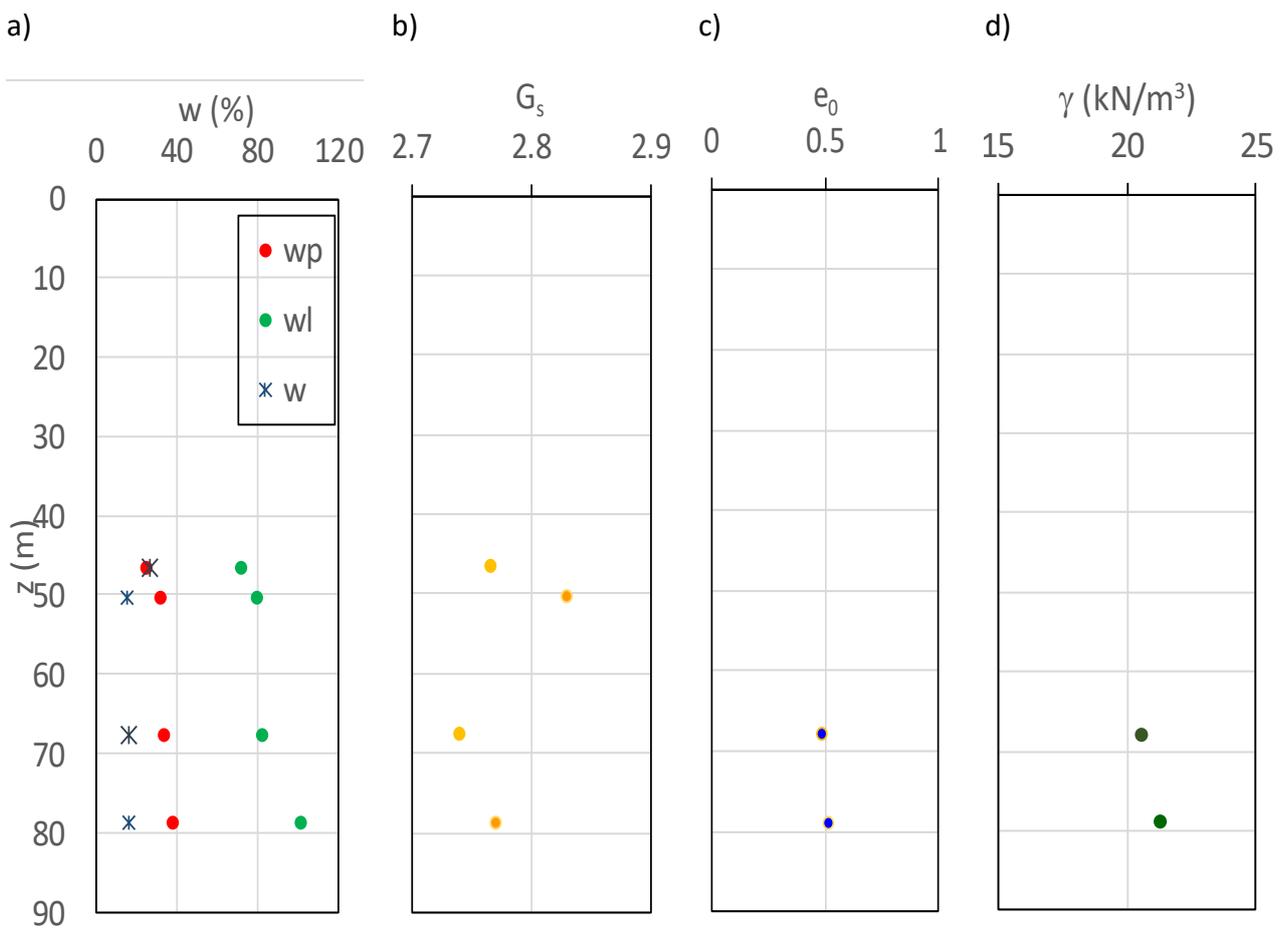


Figura 2.33. a) Limiti di consistenza e contenuto d'acqua naturale; b) gravità specifica; c) indice dei vuoti iniziale e d) peso dell'unità di volume dei campioni prelevati nella matrice argillosa dei conglomerati del Flysch.

Resistenza a taglio

Come già precisato in premessa per la caratterizzazione della matrice argillosa dei conglomerati del Flysch si dispone dei risultati d'un'unica prova triassiale eseguita sul campione SNME01-C12 prelevato alla profondità di 78.75 m. La *Figura 34* mostra i risultati delle prove rappresentati in termini di andamento del deviatore e delle sovrappressioni neutre con la deformazione assiale (q - ε_a) e (Δu - ε_a). Per la determinazione dei parametri di rottura in termini di angolo di attrito e coesione efficace si è fatto riferimento ai percorsi tensionali nel piano (q - p').

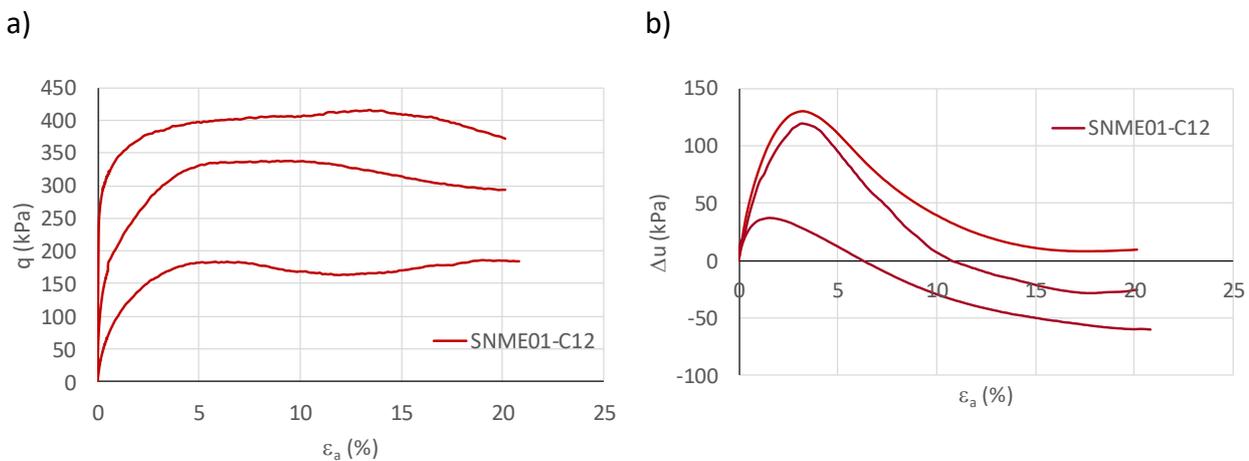


Figura 2.34. Risultati delle prove TX CIU: a) tensioni vs. deformazioni e b) sovrappressioni neutre vs. deformazioni assiali.

I provini mostrano un comportamento duttile con pressioni neutre che sono inizialmente positive per poi diventare negative verso la rottura.

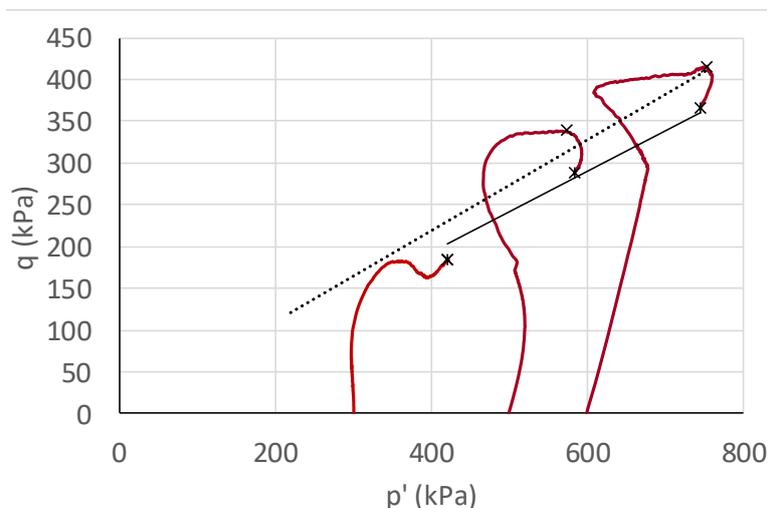


Figura 2.35. Risultati delle prove TX CIU: percorsi di tensione nel piano degli invarianti.

Tabella 2.8. Parametri di resistenza della matrice dei conglomerati del Flysch

	ϕ' (°)	c' (kPa)
picco	14.5	
ultimo	13	

I risultati delle stesse prove sono rappresentati in termini di percorsi delle tensioni efficaci nel piano degli invarianti (*Figura 2.28*); nello stesso diagramma è anche riportato l'involuppo dei valori ultimi.

Deformabilità

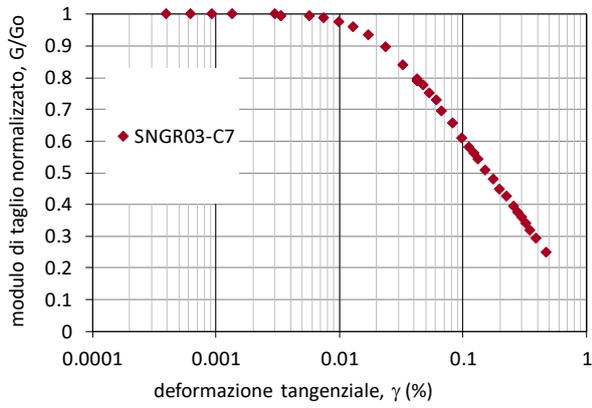
Per la caratterizzazione delle proprietà di deformabilità delle argille del Flysch si dispone dei risultati di una prova di taglio torsionale ciclico eseguite sul campione SNGR03-C7. Nella tabella seguente sono sintetizzati i valori del modulo di taglio e del fattore di smorzamento iniziali insieme con la tensione di confinamento applicata.

Tabella 2.9. Rigidezza e smorzamento iniziali misurati sulla matrice argillosa dei conglomerati del Flysch.

Campione	p'	G_0	D_0
	(kPa)	(MPa)	(%)
SNGR03-C7	563	206	2.7

Non è stato possibile definire una legge di variazione di rigidezza e smorzamento con la profondità dal momento che non si dispone di misure di modulo di taglio e fattore di smorzamento iniziali a diverse tensioni di confinamento. I risultati sono stati quindi elaborati in termini di andamento del modulo di taglio e del fattore di smorzamento con il livello di deformazione. La matrice argillosa dei conglomerati del Flysch è caratterizzata da una soglia di linearità (valore della deformazione tangenziale corrispondente a un decadimento del modulo iniziale pari al 5%) piuttosto elevata pari a $\gamma_{el}=0.013\%$ e da una variazione del modulo con il livello di deformazione graduale con un valore della deformazione di riferimento γ_r ($G/G_0=0.5$) pari a 0.15%. Lo smorzamento iniziale ha valori tipici delle argille di pari plasticità e la curva $D(\gamma)$ conferma la graduale evoluzione della non linearità del comportamento tensio-deformativo.

a)



b)

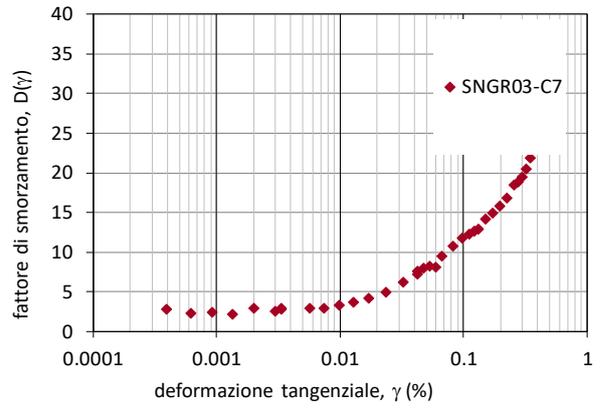


Figura 2.36. Risultati delle prove di taglio torsionale: a) curve di decadimento del modulo di taglio iniziale e b) andamento del fattore di smorzamento con il livello di deformazione.



Parte III

Caratterizzazione fisica e meccanica alla scala dell'ammasso

3. Caratteristiche Fisiche del Flysch Rosso

3.1. Caratterizzazione Fisica

La caratterizzazione fisica dei terreni qui proposta è basata su un approfondito esame delle formazioni geologiche e delle facies rinvenute nell'area di studio. L'integrazione del database di prove svolte presso il laboratorio geotecnico dell'Università di Napoli con le indagini svolte dal laboratorio dell'Università della Basilicata e dai laboratori commerciali ha consentito un'esaustiva rielaborazione dei dati disponibili. In particolare, sulla base della caratterizzazione fisica, sono stati definiti raggruppamenti piuttosto ampi delle matrici argillose, che uniscono (in tre gruppi) le facies ritenute affini sotto il profilo geotecnico:

- 1) FYR_avc, FYR_cgp, FYR_ac, FYR_ar;
- 2) FYR_2c, FYR_mar;
- 3) FYR_agms.

In aggiunta ai gruppi precedentemente elencati, nella caratterizzazione fisica è stata inclusa anche l'analisi dei dati relativi alla coltre in frana [cf], effettuando una distinzione rispetto alla formazione a cui quest'ultima è sovrapposta.

Di seguito si riportano le tabelle riepilogative, Tabella 3.1 e Tabella 3.2, indicanti i campioni analizzati.

Le elaborazioni che vengono presentate nel seguito tengono conto, per i tre gruppi di terreni innanzi costituiti, delle prove di tutte le campagne geognostiche condotte, vale a dire anche di quanto fu svolto in sede di progetto definito, oltre che della campagna geognostica integrativa condotta a corredo del presente progetto esecutivo nel corso del 2019 e agli inizi del 2020.

- **Raggruppamento 1: FYR_avc, FYR_cgp, FYR_ac, FYR_ar**

La *Figura 3.1* mostra i dati relativi alla granulometria del primo raggruppamento elencato; in particolare il valore medio delle varie frazioni evidenzia un'aliquota limosa pari circa al 53%, una frazione argillosa circa pari al 25 % e una frazione sabbiosa circa pari al 22%. Nello specifico, come evidenziato nel diagramma, i dati acquisiti sono stati distinti con simboli diversi in base alla diversa facies e al laboratorio che ha eseguito la campagna sperimentale: si ipotizza che alcuni

laboratori non abbiano completamente disaggregato il materiale per cui la parte di materiale sabbioso sia sovrastimata.

L'elaborazione dei dati di plasticità ha permesso la costruzione della carta di plasticità di Casagrande, *Figura 3.2*, da cui si evince che il gruppo in esame può essere classificato come un'argilla inorganica di medio/alta plasticità. Inoltre, si evidenzia una certa uniformità dei valori ottenuti dalle diverse campagne di indagini.

Tabella 3.1. Campioni analizzati per la caratterizzazione fisica delle facies.

FYR_avc/cgp/ac/ar																	
Campioni indagati			Campioni indagati			Campioni indagati			Campioni indagati			Campioni indagati					
Sondaggio	Campione	Prof. [m]	Sondaggio	Campione	Prof. [m]	Sondaggio	Campione	Prof. [m]	Sondaggio	Campione	Prof. [m]	Sondaggio	Campione	Prof. [m]			
SN_GR_06	CR_T95	20,65	VI02_4	MC_1	5,8	SN_GR_06	CR_T95	20,65	C15	CR2	25,5	SN_ME_01	CR_T153	47,75			
SN_GR_03	CR_T144	70,24		MC_2	12,2	SN_ME_05	CR_T64	45,25		CR3	29,85		CI_T184	56,725	CR_T154	58,2	
	CR_T147	72,9		CR_2	14,25		CI_T70	50,25	M1	N1	14,25		CI_T185	63,75	CLIT_T157	69,1	
	CI_T177	74,65		CR_3	22,275	CR_T65	55,25	SNME 05		N2	26,75		CR_T155	76,2	CI_T188	83,75	
SN_GR_04	CR_T2	20,65		MC_3	23,2	SN_ME_07	CI_T71	65,25	SNME 07	C2	15,2		SN_GR_06	C3	27,25	CR_T156	88,85
	CI_T6	30,25		CR_4	30,75		CI_T72	68,2		C6	65,4			CI2	15,25	CLIT_T158	97,3
	CR_T3	31,65		MC_4	33,9	CR_T66	70,2	C10	C3	19,8	SN_ME_02		CI3	20,25	CR_T161	25,5	
	CI_T9	43,25		MC_5	37,75	CI_T73	71,2		CR_T20	66,9			CI4	25,25	CR_T162	32,4	
	CI_T10	44,75		CR_5	39,2	A8	CR_T200	21,25	C9	CI1	5,25		SN_ME_03	CI190	54,25	CI_T191	62,4
	CI_T11	46,25		MC_6	46,25		CI_T27	68,2		CR_T221	22,25			CI2	10,25	CR_T65	55,25
	CI_T12	49,35		CR_6	48,25	C10	CR_T219	10,2	CR_T222	23,25	CI3		15,25	SN_ME_02	C2	18	
CR_T5	50,25	CL_1		20,15	CR_T220		21,25	CR_T223	24,25	SN_GR_04	CI4		24,7	SN_ME_02	C4	56,8	
CI_T13	52,1	CL_2		26,6	CLIT_T157	69,1	G3	CI1	29,75	SN_ME_01	C3		11,75	SN_GR_03	C7	67,75	
SGR_3	CR_T125	5,2		SN_ME_01	CI_T181	25,3		AU7	CR1	44,75	SN_ME_01		CR_T160	11,4	SN_ME_02	CR_T163	42,2
	CR_T126	13,7	CR_T151		27,325	C13			CR2	59,75		SN_ME_02	CR_T168	45,5		CLIT_T195	46,15
	CR_T127	17,35	CI_T182		35,275				G3	CR3bis	68,25		SN_ME_03	CR_T63	35,25	CR_T63	35,25
	CR_T128	22,2	CR_T152	37,25	SN_ME_02	CR3				70,25	VI02_3	CR_3		15,25	CR_T34	65,8	
	CR_T129	25,7	CI_T183	40,75		CR4			80,25	SN_ME_07		CI_T42	80,25	CI_T43	83,85		
	CR_T130	28,7	CR_T153	47,75	CR4bis	82,4			SN_ME_06		CI_T48	35,15	CI_T99	36,2			
	CR_T131	32,7	CI_T184	56,725	CR_T67	74,2	CR_T15			18,825	CR_T96	38,15	CR_T96	38,15			
CI_T135	35,25	CR_T154	58,2	AU6	CR3	15,25	CR_T16	25,25	CI_T100	40,65	CI_T7	33,25					
CR_T132	36,2	CI_T185	63,75		SN_ME_03	CI1	20,25	SN_ME_07	CI4	19,75	SN_GR_04	CR_T4	40,25				
CR_T133	39,7	CLIT_T157	69,1	CR_T186		71,075	CI2		25,25	SN_GR_04	CI5	30,25	CI_T8	41,3			
AU6	CI_T22	29,75	CI_T187	75,75	AU7	CR3	15,25	SN_ME_07	CI6	35,25	SN_ME_05	CR_T228	91,75				
	CR_T17	37,525	CR_T155	76,2		CI2	20,25		SN_ME_06	CI7		80,5	CLIT_T231	94,5			
	CI_T23	42,3	CI_T188	83,75	CI4	25,25	SN_ME_07	CI8		44,25	CR_T229	99,8					
	CR_T18	47,65	CR_T156	88,85	CR4	30,25		SN_ME_06	CI9	49,75	AU7	CR6	44,75				
	CR_T19	56,175	CLIT_T158	97,3	CR5	34,75	SN_ME_06		CI3	15,75	AU8	CI2	10,75				
CI_T24	68,2	CR_T160	11,4	CR_T161	25,5	CI3		39,25	SN_ME_06	CI4	20,25	SN_GR_03	CI_T176	65,725			
CLIT_T89	58,6	CR_T161	25,5	CLIT_T194	29,6	CR_T15	18,825	SN_GR_06		CI5	25,5		CR_T145	80,25			
VI02_1	SC_5	20,25	CR_T162	33,15	SN_ME_04	CR_T16	25,25	SN_ME_06	CI6	30,25	SN_ME_05	CI_T178	83,85				
	CR_3	25,75	CR_T163	42,2		AU6	CR_T162		33,15	SN_ME_06		CI7	80,5	SN_ME_05	CR_T146	89,75	
VI02_3	CR_4	30,25	CR_T164	51,3	SN_ME_04		CR_T162	33,15	SN_ME_06		CI8	44,25	SN_ME_05		CR_T248	4,15	
	CR_1	8,25	CR_T165	68,85		SN_ME_04	CR_T162	33,15		SN_ME_06	CI9	49,75		SN_ME_05	CI_T40	20	
	CM_1	11,2	CI_T190	54,25	SN_ME_04		CR_T162	33,15	SN_ME_06		CI3	15,75	SN_ME_07		CR_T32	46,15	
	CR_2	14,75	CI_T191	62,4		SN_ME_04	CR_T162	33,15		SN_ME_06	CI4	20,25		SN_ME_07	MC_3	21,95	
	CL_3	23,4	CI_T192	65,25	SN_ME_04		CR_T162	33,15	SN_ME_06		CI5	25,5	SN_ME_07				
	CL_2	23,9	CR_T165	68,85		SN_ME_04	CR_T162	33,15		SN_ME_06	CR1	30,75		SN_ME_07			
	CR_3	24,75	CR_T166	70,85	SN_ME_04		CR_T162	33,15	SN_ME_06		CR2	35,75	SN_ME_07				
	CM_2	25,8	CR_T62	25,25		SN_ME_04	CR_T162	33,15		SN_ME_06	CR3	40,25		SN_ME_07			
	CM_3	28,25	CR_T63	35,25	SN_ME_04		CR_T162	33,15	SN_ME_06		CR4	45,6	SN_ME_07				
	CR_4	35,75	CI_T69	40,25		SN_ME_04	CR_T162	33,15		SN_ME_06	CR5	49,8		SN_ME_07			
	CM_4	39,4	CI_T1	12,85	SN_ME_04		CR_T162	33,15	SN_ME_06		CI6	26,25	SN_ME_07				
	CM_5	42,4				SN_ME_04	CR_T162	33,15		SN_ME_06				SN_ME_07			
	CR_5	44,25			SN_ME_04		CR_T162	33,15	SN_ME_06				SN_ME_07				
	CM_6	45,25				SN_ME_04	CR_T162	33,15		SN_ME_06				SN_ME_07			
CR_6	54,75			SN_ME_04	CR_T162		33,15	SN_ME_06				SN_ME_07					
SN_GR_06	CR_T95	20,65	M2		CI1	12,85	G2		CI6	26,25	VI02_5		MC_3	21,95			

Tabella 3.2. Campioni analizzati per la caratterizzazione fisica delle facies.

FYR_agms						FYR_mar/FYR_2c			cf		
Campioni indagati											
Sondaggio	Campione	Prof. [m]									
SN_GR_04	CR_T1	10,75	SN_GR_04	CR_T1	10,75	SN_GR_06	CR_T97	42,35	SGR_3	CR_T124	2,2
SN_GR_05	CR_T85	8,15	SN_ME_07	CR_T33	55,85		CR_T118	43,15		CI_T134	2,75
	CL_T193	14,4		G3	CR5	90,25	CR_T101	46,65	CH_02	CR_T54	2,25
	CR_T86	16,15			CR1bis	91,65	CR_T102	49,15	CR_T55	4,75	
	CI_T90	20,25			CR6	100,25	CR_T98	54,65	CR_T56	9,75	
	CR_T87	24,15	AU7	CR2bis	101,7	SN_03	CLIT_T39	51,125	CH_06	CR_T49	2,8
	CI_T91	25,25		CR7	49,75		CR_T36	56,2	CR_T50	32,8	
	CR_T88	32,15	VI02_1	SC_3	14,25		CR_T37	63,625	SN_01	CR_T1	2,8
	CI_T92	38,25		CR_2	15,25	CR_T38	68,725	CR_T2		7,8	
CR_T89	40,15	VI02_5	MC_2	7,55	SN_ME_01	CI_T180	10,275	CR_T3		10,7	
CR_T5	20,825		CR_2	8,25	SN_ME_02	CLIT_T186	71,075	CLIT_T11	15,85		
CR_T6	24,8		CR_3	15,25	SN_ME_05	CLIT_T194	29,6	CR_T4	16,5		
CR_T7	37,5		CR_4	24,75		CR_T167	32,4	SN_02	CR_T15	3,85	
CR_T8	46,2		MC_4	25,95	CR_T222	30,25	CR_T16	9,15			
CLIT_T12	48,55	MC_5	29,25	SN_ME_07	CR_T223	40,25	CR_T17	11,8			
SN_01	CLIT_T13	51,25	VI02_2	SC_4	14,75	SN_ME_05	CR_T224	50,25	SN_03	CR_T29	0,75
	CLIT_T14	51,6		SC_5	18,25		CR_T225	60,7	CR_T30	2,85	
	CR_T9	54,2	CR_4	27,25	CI_T39	9,6	CR_T31	7,15			
	CR_T10	67,5	G1	CI5	17,75	SN_04	CLIT_T29	13,85	CR_T42	1,75	
	CR_T18	15,8		CI6	22,25		CLTI_T35	74,15	CR_T43	3,2	
	CR_T19	20,725		CI7	28,25		CI_T42	80,25	CR_T44	5,225	
	CR_T21	21,2		CI8	32,25		CI_T44	96,675	G1	CI1	3,25
	CR_T22	24,175	CH_02	CI9	39,75	CR_T37	99,85	CI2	6,25		
CR_T20	25,2	CR_T57		19,75	CLIT_T84	101,2	CI3	9,75			
CR_T23	32,675	CH_06	CR_T58	25,75	CLIT_T85	102,7	CI4	14,75			
CLIT_T26	34,45		CR_T51	12,2	CI_T45	104,1	G2	CI1	3,3		
CLIT_T27	35,35		CR_T52	24,3	CI_T46	107,65	CI2	6,3			
CI_T28	41,15	SN_01	CR_T53	33,4	CLIT_T86	108,65	AU6	CI1	4,75		
CR_T24	43,2		C4	25,15	CLIT_T87	109,4	CI2	10,25			
CR_T25	45,375	SN_02	C8	43,45	CLIT_T38	110,15	C10	CI1	5,25		
SN_03	CR_T32		10,3	SN_02	C2	27,3	CI_T47	111,3	AU8	CI1	5,2
	CR_T33	14,85	SN_03	C3	12,15	CLIT_T88	113,35	C13	CI1	5,25	
	CI_T34	27,325		C4	20,35	VI02_1	SC_4	16,75	C15	CI1	5,55
	CLIT_T40	35,575	SN_04	C1	5,75	VI02_5	C1	5,75	CR_1	1,25	
	CLIT_T41	39,9		C2	11,75		SC_1	2,75			
CR_T35	48,655	C3		14,25	VI02_3		CL_1	4,65			
CR_T45	8,625	C4		15,6	VI02_4		CR_1	4,75			
CR_T46	13,75	SN_ME_01	C5	18,25	SN_01	C1	6,85				
CL_T48	23,7		C6	22,2	SN_01	C2	12,75				
CR_T47	29,25	SN_ME_01	CI3	18	SN_02	C1	8,25				
CR_T149	3,85		SN_03	SN_01	C1	4,2					
CI_T179	4,25				C2	9,15					
CR_T150	14,85	SN_04			C1	5,75					

• **Raggruppamento 2: FYR_2c, FYR_mar**

La Figura 3.3 mostra i dati relativi al secondo raggruppamento elencato; almeno mediamente si evidenzia una frazione limosa circa pari al 47%, una frazione argillosa circa pari al 20 % e una frazione sabbiosa circa pari al 33%. Nello specifico, come evidenziato nel diagramma di seguito fornito, i dati sono stati distinti in base alla diversa facies e al laboratorio che ha eseguito la sperimentazione.

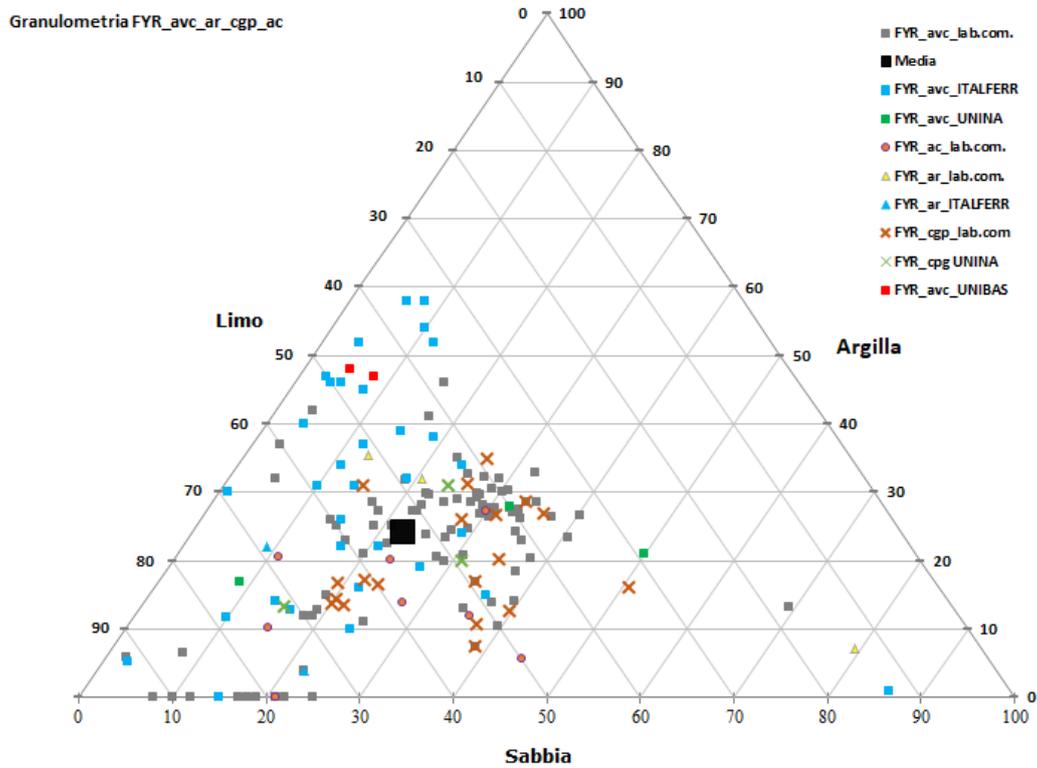


Figura 3.1. Diagramma triangolare della composizione granulometrica del raggruppamento 1: FYRave, FYR_cgp, FYR_ac, FYR_ar.

Carta di CASAGRANDE FYR_ave_ar_cgp_ac

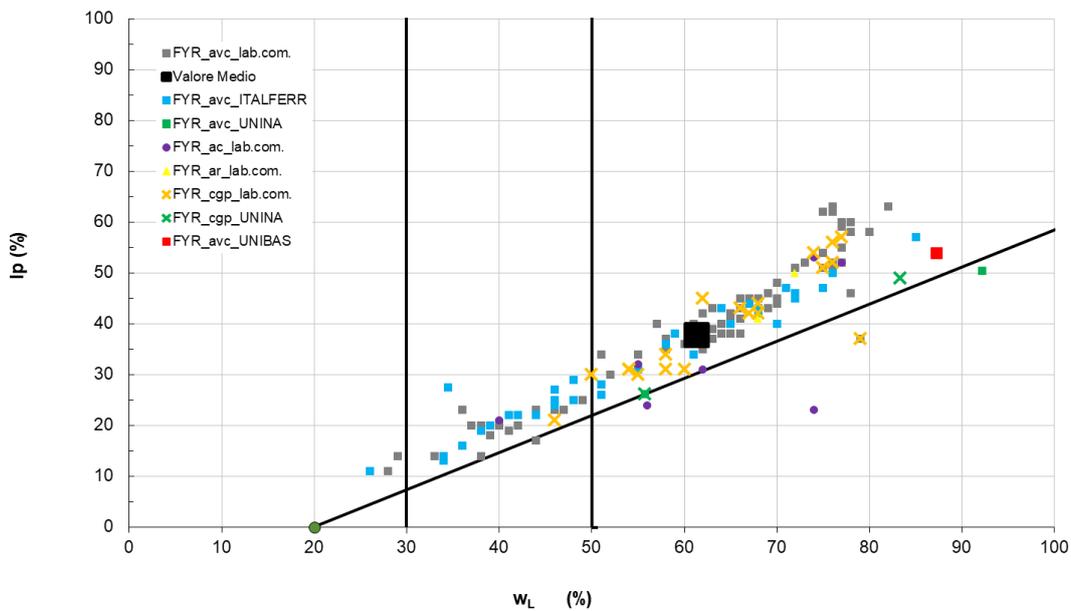


Figura 3.2. Rappresentazione dei risultati sulla carta di plasticità di Casagrande.

Granulometria FYR_2c, FYR_mar

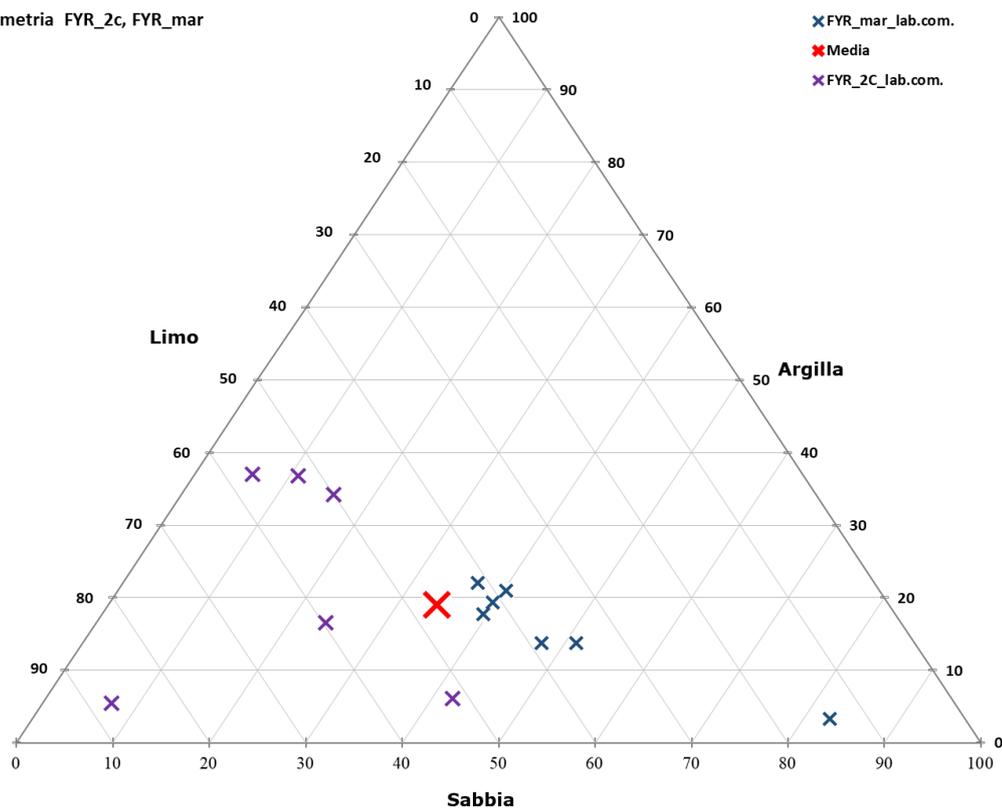


Figura 3.3. Diagramma triangolare della composizione granulometrica del raggruppamento 2: FYR_2c, FYR_mar.

Dall'analisi condotta emerge una modesta variazione della composizione granulometrica tra le due facies costituenti il gruppo considerato, tuttavia in base alle evidenti similitudini descrittive per esse si ritiene opportuna l'aggregazione fatta.

In aggiunta, rispetto alle considerazioni di natura granulometrica sopra esposte, i dati di plasticità sono stati rappresentati sulla carta di Casagrande, *Figura 3.4*, da cui si evince che il raggruppamento in esame può essere classificato come un'argilla inorganica di medio/alta plasticità.

- **Argille Grigie marnoso scagliose [FYRagms]**

La *Figura 3.5* mette in evidenza le difficoltà che si sono verificate nella determinazione della composizione granulometrica della facies delle argille grigie marnoso scagliose FYRagms, per la quale è ben evidente la differenza fra i risultati dei laboratori UNIBAS e UNINA e gli altri laboratori.

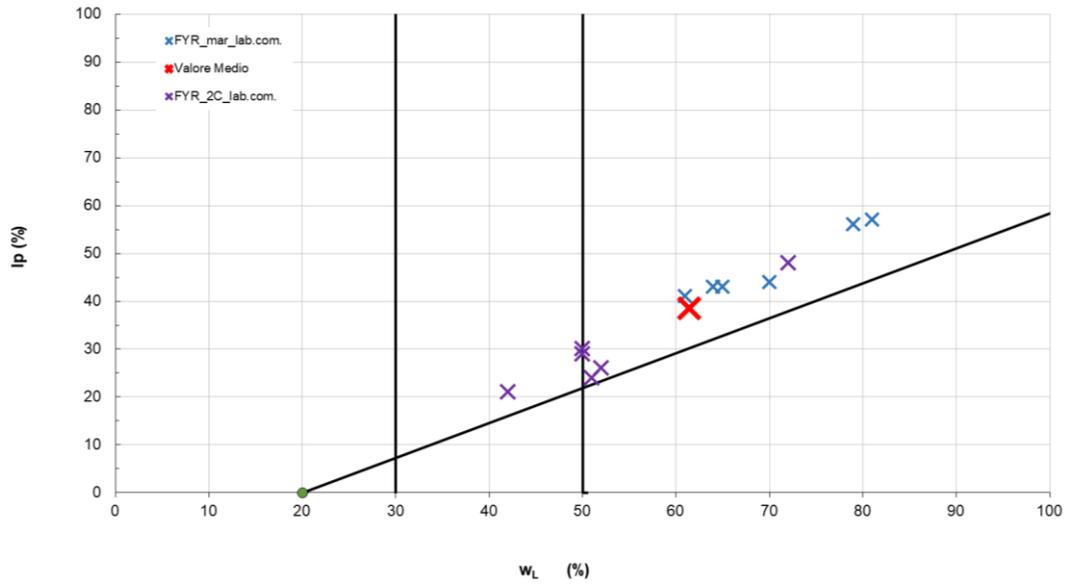


Figura 3.4. Rappresentazione dei risultati sulla carta di plasticità di Casagrande

Granulometria FYR_agms

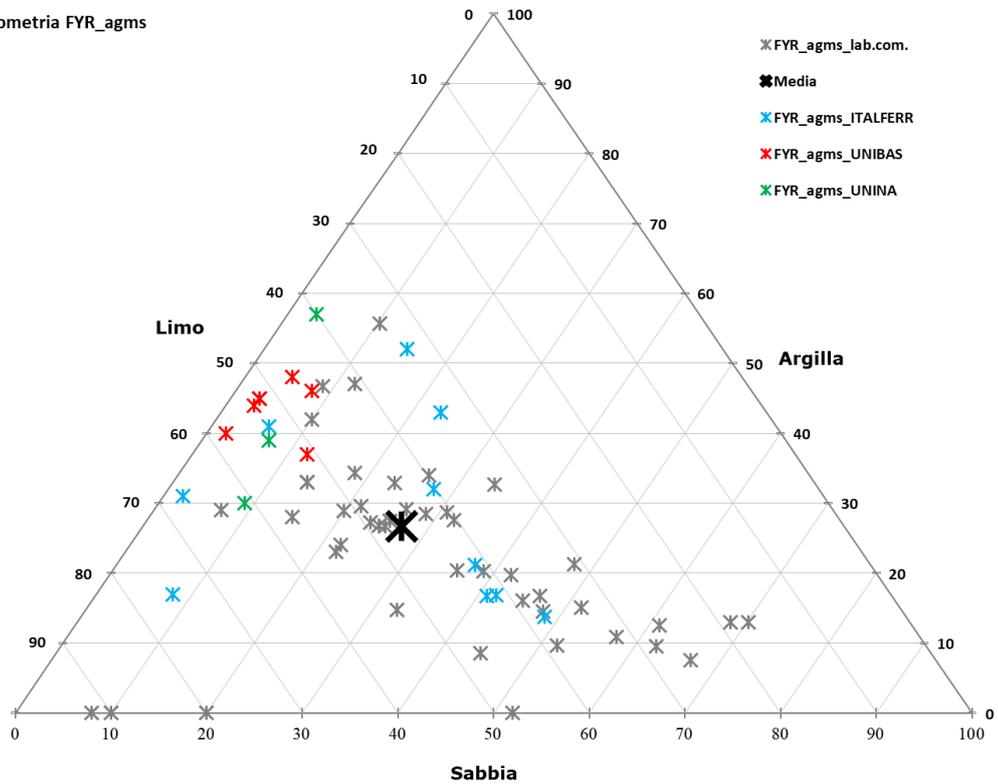


Figura 3.5. Diagramma triangolare della composizione granulometrica della facies FYR_agms.

Infatti, la *Figura 3.5* mostra la composizione granulometrica della facies FYRagms e le differenze riscontrate fra i risultati dei vari laboratori: in particolare, dalle campagne di indagini UNIBAS ed UNINA risulta una minore percentuale di sabbia rispetto ai valori determinati dagli altri laboratori. Mediamente la frazione limosa è circa pari al 48%, la frazione argillosa circa pari al 28 % e la frazione sabbiosa circa pari al 34%.

In *Figura 3.6* i dati di plasticità sono riportati sulla carta di Casagrande, da cui si evince che la facies FYR_agms può essere classificata come un'argilla inorganica di alta plasticità.

Inoltre, la stessa figura evidenzia che i dati di UNIBAS, i cui campioni sono stati prelevati a profondità maggiori rispetto agli altri, si collocano sulla retta A, mentre tutti gli altri si discostano più o meno da essa.

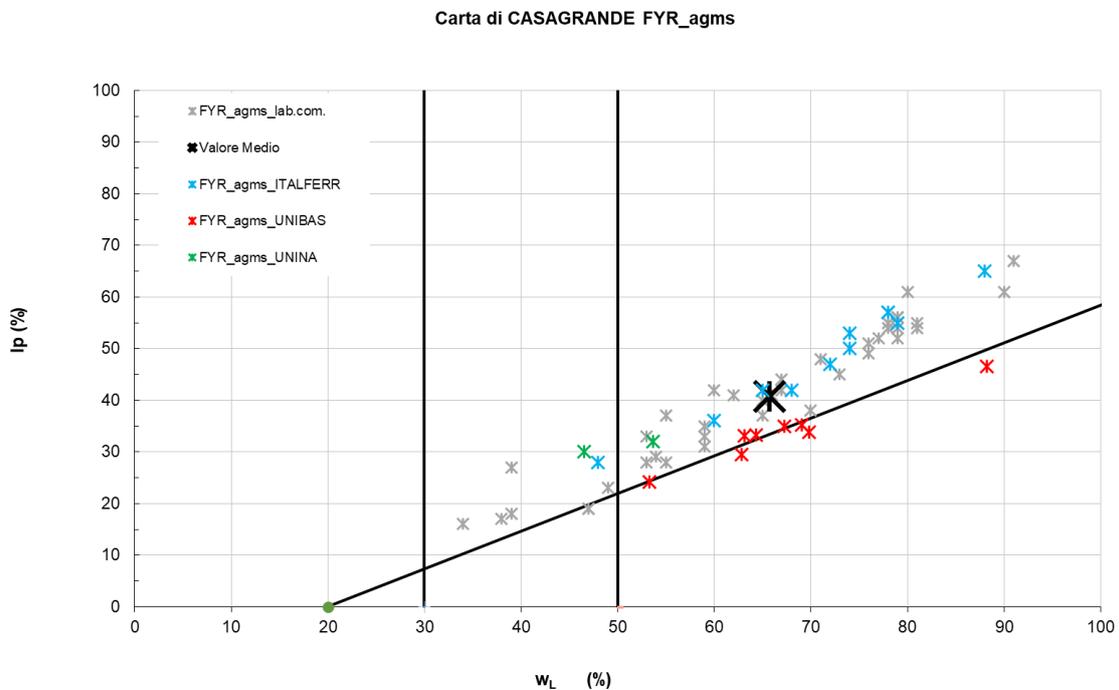


Figura 3.6. Rappresentazione dei risultati sulla carta di plasticità di Casagrande.

- **Coltre in frana [cf]**

La *Figura 3.7* mostra, sotto il profilo granulometrico, i valori relativi a due coltri di frana, che coinvolgono rispettivamente i terreni FYR_agms e FYR_avc. Per quanto riguarda FYR_agms i risultati mediamente indicano una frazione limosa circa pari al 42%, una frazione argillosa circa pari al 38% e una frazione sabbiosa circa pari al 20%. Per quanto riguarda FYR_avc è presente una frazione limosa circa pari al 46%, una frazione argillosa circa pari al 34 % e una frazione sabbiosa circa pari al 20%.

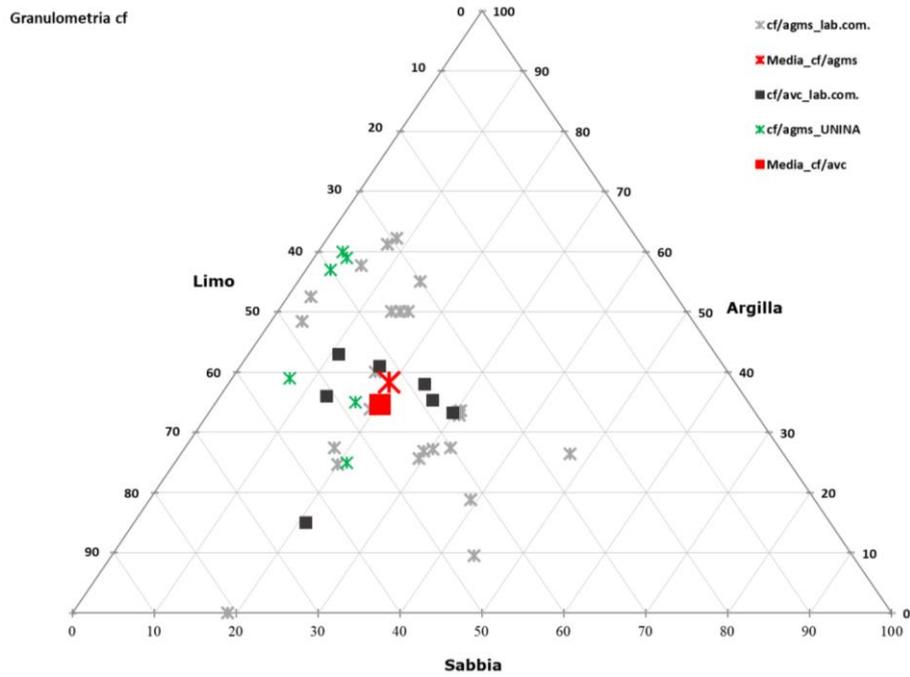


Figura 3.7. Diagramma triangolare della composizione granulometrica della coltre in frana cf.

In Figura 3.8 i dati di plasticità sono riportati sulla carta di Casagrande: la facies FYR_agms può essere classificata come un'argilla inorganica di medio/alta plasticità, mentre la coltre in frana sovrimposta alla facies FYR_avc è di media plasticità.

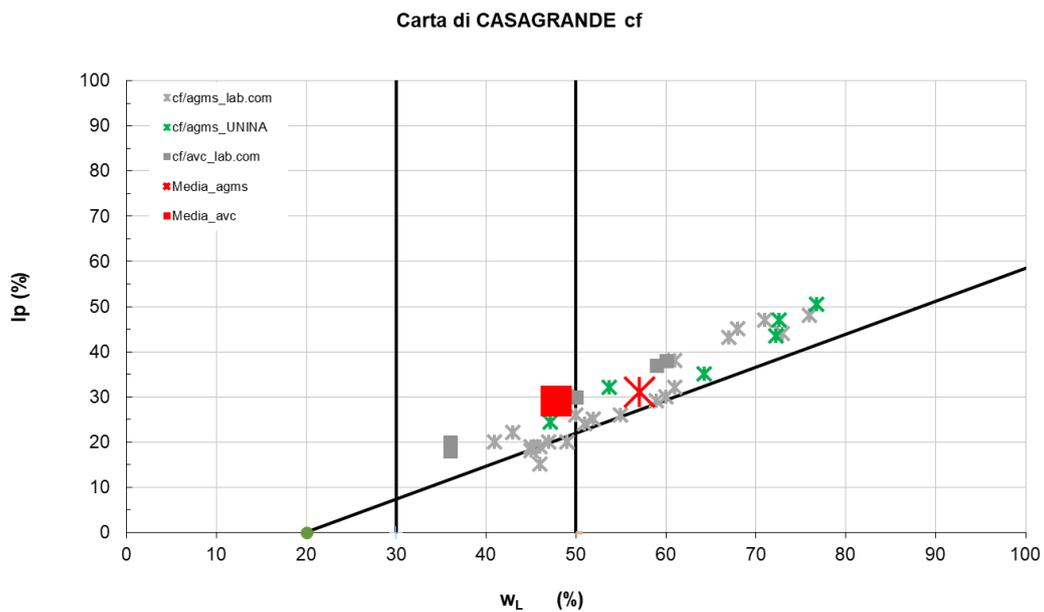


Figura 3.8. Rappresentazione dei risultati sulla carta di plasticità di Casagrande.

- **Membro arenaceo argilloso della formazione di Anzano [ANZ2ar]**

La *Figura 3.9* mostra che la facies del membro arenaceo argilloso della formazione di Anzano ANZ2ar è classificabile come un'argilla con limo debolmente sabbiosa.

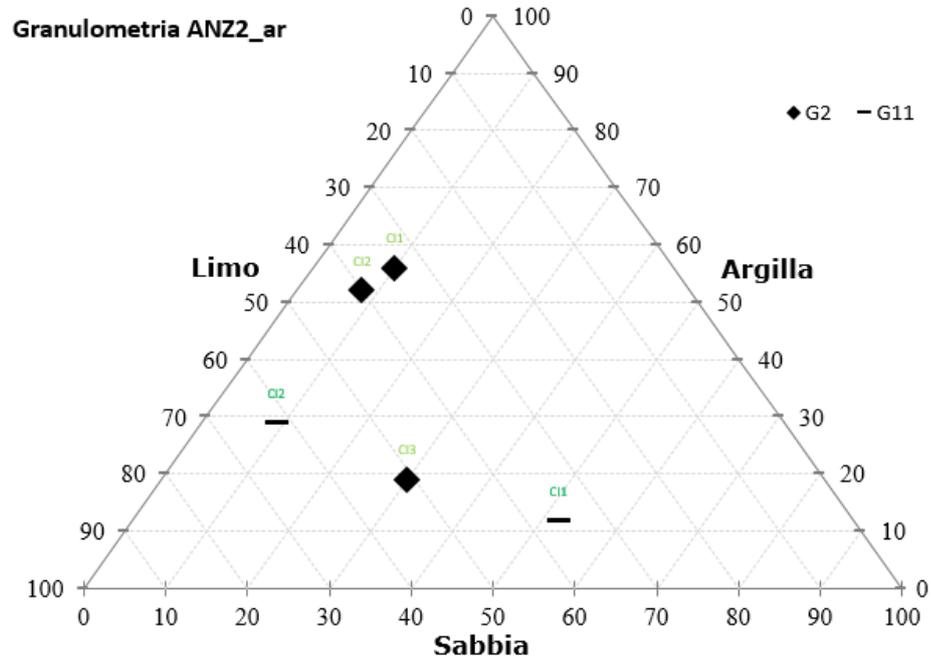


Figura 3.9. Diagramma triangolare rappresentativo della composizione granulometrica della facies ANZ2ar.

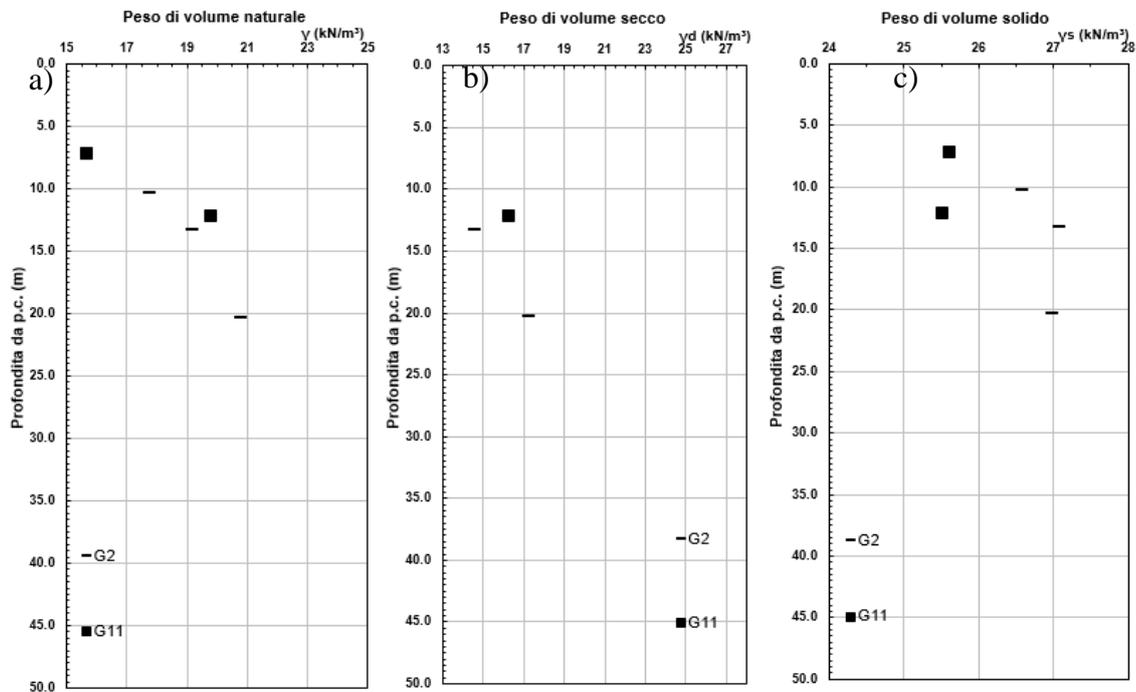


Figura 3.10. Proprietà fisiche della facies ANZ2ar, a) peso dell'unità di volume, γ , b) peso secco dell'unità di volume, γ_d , c) peso specifico dei grani, γ_s .

I terreni relativi alla facies ANZ2ar mostrano andamenti delle proprietà fisiche pressoché costanti con la profondità. Il peso dell'unità di volume γ è assunto pari a 20 kN/m^3 .

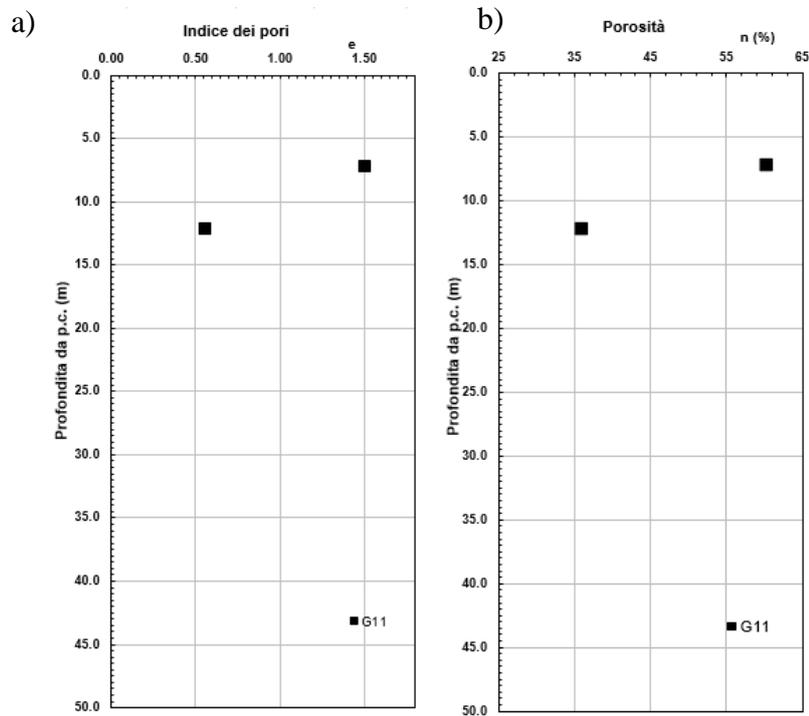


Figura 3.11. Proprietà fisiche di ANZ2ar: a) indice dei pori, e , b) porosità, n .

In Figura 3.11a è riportato l'indice dei pori, e , che si attesta intorno ad un valore medio pari a 0.50, mentre in Figura 3.11b è riportata la porosità, n , che varia tra valori di 35 e 60% .

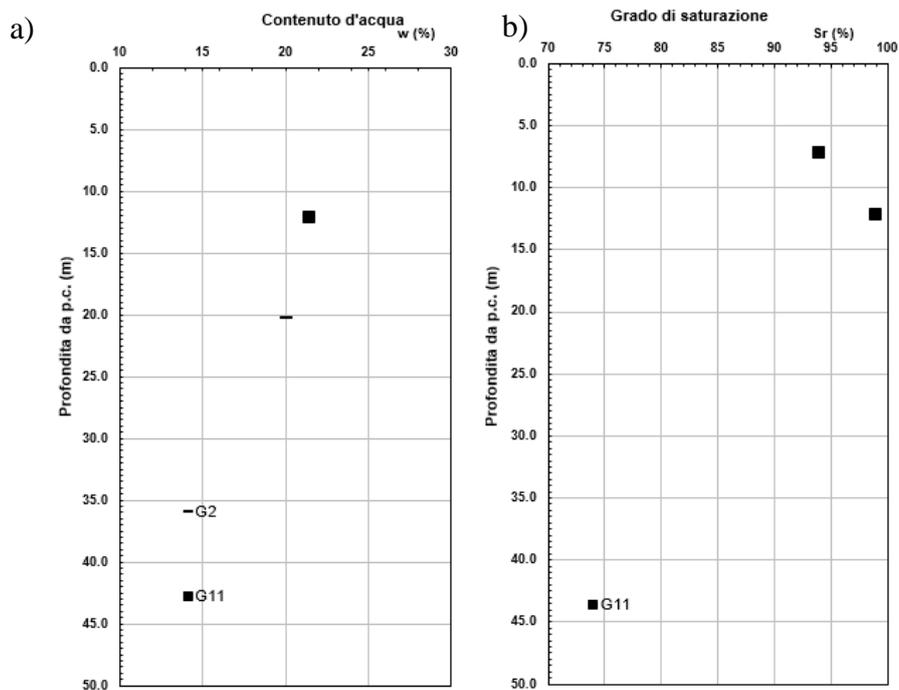


Figura 3.12. Proprietà fisiche ANZ2ar: a) contenuto d'acqua, w , b) grado di saturazione S_r .

La *Figura 3.12a* mostra il contenuto d'acqua (w , %) che è mediamente pari al 20%. Il grado di saturazione in *Figura 3.12b* assume valori tra il 95 e il 99%.

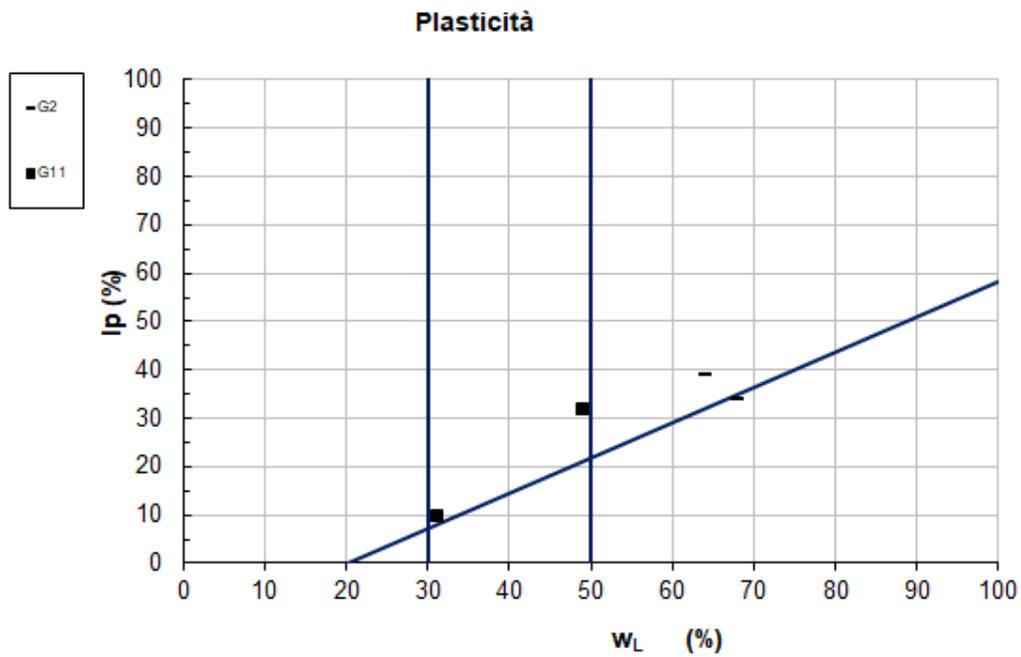


Figura 3.13. Rappresentazione dei risultati sulla carta di plasticità di Casagrande.

I dati di plasticità sono riportati sulla carta di Casagrande, in *Figura 3.13*: la facies ANZ2ar può essere classificata come un'argilla inorganica di media/alta plasticità.

4. Caratteristiche Meccaniche del Flysch Rosso

4.1. Generalità

Fra le formazioni presenti lungo il tracciato ferroviario oggetto di progettazione, il Flysch Rosso è quella decisamente più significativa, soprattutto per la complessità del comportamento meccanico.

Il Flysch Rosso è un deposito calcareo-pelitico di colore rossastro (*Figura 4.1*), ascrivibile al Cretacico superiore-Paleogene, presente in sito con potenze di 300-500 m, in cui si riconoscono due facies più significative delle altre, dal punto di vista geotecnico: quella inferiore costituita da un'alternanza di calcari torbiditici e marne rosse o verdastre e quella superiore con netta prevalenza pelitica. I termini pelitici sono presenti in vari livelli. Nel seguito le facies saranno molto meglio dettagliate.



Figura 4.1. Flysch Rosso.

Il Flysch Rosso, così come una rilevante parte dei terreni attraversati dal tracciato ferroviario ed in particolare dalla galleria Grottaminarda tra le Pk 2+705 e Pk 4+715 e dalla galleria Melito tra le Pk 5+080 e Pk 7+145, è un terreno a struttura complessa, ossia un terreno contenente particolarità di vario genere (definite appunto strutture) che conferiscono all'ammasso caratteri di disomogeneità

ed anisotropia, più specificamente individuabili come corpi solidi (frammenti argillosi o lapidei, lenti sabbiose,...) o discontinuità (fessure, superfici di taglio,...).

I terreni a struttura complessa, per definizione, contengono strutture in misura tale da condizionare il comportamento meccanico dell'ammasso, che di conseguenza non è agevolmente interpretabile sulla base dei modelli comunemente utilizzati in Geotecnica di mezzo continuo deformabile e mezzo rigido discontinuo.

La parte pelitica del Flysch Rosso, se soggetta a meccanismi di detensionamento, si ammorbidisce con conseguente decadimento delle proprietà meccaniche (resistenza, deformabilità, compressibilità). Per effetto dell'assorbimento di acqua, il materiale comincia a rammollire in prossimità delle fessure; da qui il fenomeno progredisce fino a poter trasformare il terreno in un materiale di bassa consistenza con inclusioni di argilla o marna ancora integre. Questi fenomeni di degrado sono fortemente condizionati da aspetti di natura chimica e vengono esaltati dal contatto con acqua distillata o comunque con acqua povera di ioni salini, in quanto la naturale acqua di porosità del Flysch Rosso si caratterizza per un'elevata concentrazione ionica (trattandosi di un terreno di origine marina).

Con questa breve introduzione si è inteso mettere in evidenza i caratteri particolari del Flysch Rosso che fanno di questo terreno un materiale complesso e non modellabile in maniera convenzionale: in particolare si deve tener conto dell'interazione meccanica fra componente lapidea e componente pelitica e del comportamento viscoso della componente pelitica.

4.2. Aspetti generali del comportamento meccanico del Flysch Rosso

Ammasso

Nel Flysch Rosso, oltre che una caratterizzazione di natura litologica (peraltro già deducibile in buona misura dalle indagini a corredo del progetto definitivo), è stato necessario sviluppare una caratterizzazione strutturale relativa all'ammasso.

Per quanto riguarda gli aspetti strutturali si è fatto riferimento alla classificazione di ESU (1977), relativa alle formazioni strutturalmente complesse, secondo cui il Flysch Rosso appartiene al gruppo B, cioè a quello dei materiali litologicamente eterogenei, costituiti da elementi rocciosi e da argille, assemblati secondo una delle seguenti configurazioni:

- B1, sequenze ordinate di strati di roccia ed argille ed argilliti, più o meno giuntati e fessurati;

- B2, insieme caotico di strati lapidei disarticolati ed argille da intensamente fessurate e giuntate a scagliettate;
- B3, argille e argilliti scagliettate per effetto di intense e ripetute sollecitazioni di taglio di tipo tettonico inglobanti elementi lapidei.

Nel primo caso (B1) gli strati lapidei sono continui per distanze significative anche rispetto ai problemi al finito (decine o centinaia di metri), sono disposti secondo una o più famiglie sub-parallele e ad interassi variabili dalle decine di centimetri ai metri. A causa delle vicende tettoniche subite, gli strati possono presentarsi curvi, piegati o con direzioni diverse all'interno della stessa formazione; inoltre anche lo spessore, la spaziatura ed il grado di fratturazione di tali strati possono essere sensibilmente variabili.

Per effetto della loro continuità e frequenza gli strati lapidei, a seconda della loro orientazione nel problema al finito, regolano in maniera più o meno preponderante la resistenza e la deformabilità dell'ammasso. Le deformazioni si concentrano all'interno della matrice pelitica; in casi particolari la configurazione dei litotipi è tale da consentire (nei problemi di collasso) alla superficie di rottura di svilupparsi interamente negli strati argillosi, mobilitando la resistenza disponibile di questi ultimi. Per tale motivo piuttosto che schematizzare il terreno come stratificato, secondo la sua reale litologia, è preferibile adottare il modello di mezzo continuo equivalente, la cui resistenza dipende da quella delle componenti lapidea ed argillosa e dalla direzione delle sollecitazioni rispetto all'orditura degli strati.

I flysch caoticizzati (B2) rispetto a quelli a struttura ordinata hanno subito sollecitazioni tettoniche più intense di quelli di categoria B1; quindi si presentano con gli strati lapidei disarticolati, continui per lunghezze modeste (alcuni metri) e diretti secondo direzioni variabili, in quanto spostati dalla loro posizione originale. Anche la matrice argillosa o argillitica si presenta intensamente fessurata o addirittura scagliettata per la sua tormentata storia geologica.

In questi terreni, essendo minore la continuità degli strati lapidei (rispetto alla categoria B1), è più alta la probabilità che le superfici di rottura si sviluppino negli strati argillosi e che questi regolino il comportamento dell'intero ammasso. D'altro canto, non essendo più riconoscibili direzioni di prevalente orientazione degli strati lapidei il mezzo nella sua globalità deve essere considerato isotropo.

Il flysch è fortemente caoticizzato (B3) quando ha subito una storia tettonica estremamente gravosa, che ha prodotto il completo smantellamento degli strati lapidei, trasformati in insiemi di blocchi e

pezzame lapideo di varie dimensioni. In questo caso la componente lapidea è del tutto influente sulla resistenza meccanica dell'ammasso se non presente in maniera rilevante ($> 25\%$).

Anche la permeabilità in grande dell'ammasso risente in maniera significativa della presenza degli strati lapidei che in genere sono fortemente fratturati e, se continui, costituiscono percorsi preferenziali di circolazione dell'acqua, così come le stesse fessure della matrice pelitica (queste ultime con un ruolo meccanico minore).

In *Figura 4.2* sono rappresentati gli schemi strutturali di ESU (1977) che devono essere intesi come cubi di dimensioni 5 x 5 m o 10 x 10 m, affinché al loro interno siano rappresentate tutte le strutture della formazione. La finalità di questo studio è modellare il comportamento idro-meccanico di questi cubi ed assumerlo valido per l'intero ammasso.

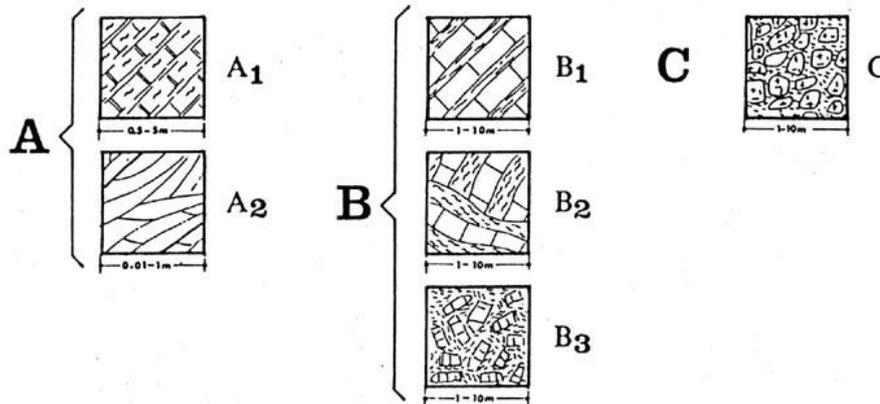


Figura 4.2. Terreni strutturalmente complessi. Dimensioni del volume in cui sono rappresentate le strutture.

In *Figura 4.3* è riportato uno schema delle possibili disposizioni della sezione della galleria rispetto alla componente lapidea dei terreni circostanti, in dipendenza della configurazione degli strati. I problemi di scavo e l'interazione fra rivestimento e terreno variano in dipendenza delle configurazioni rappresentate e dell'orientazione degli strati.

I flysch rilevati lungo l'asse delle due gallerie si presentano quasi sempre ammorbiditi nella parte più prossima al piano campagna. La matrice diventa meno consistente e le discontinuità tendono progressivamente ad obliterarsi. L'ammorbidente è spesso provocato dall'infiltrazione di acqua piovana che dilava gli ioni salini dell'acqua di porosità (la cui origine è marina) e provoca fenomeni di alterazione di natura essenzialmente chimica, che interessano uno spessore di alcuni metri ed eccezionalmente della decina di metri, a partire dal piano campagna. Al fenomeno chimico descritto

si possono sovrapporre fenomeni meccanici dovuti alla dislocazione e decompressione dei terreni, il cui effetto fenomenologico consiste in una apparente perdita di sovraconsolidazione.

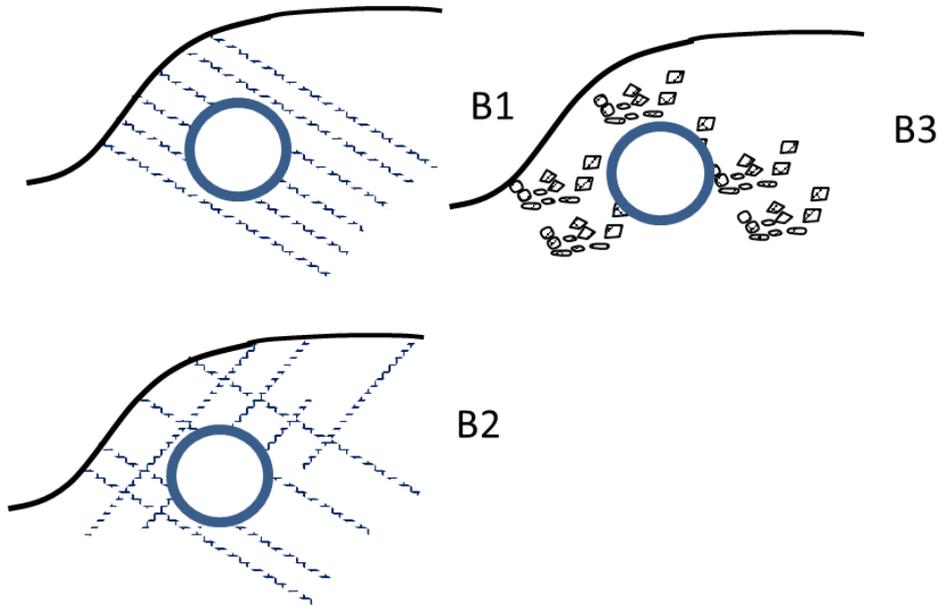


Figura 4.3. Schemi della galleria e dei terreni circostanti.

Nei corpi di frana (scorrimenti e colate di terra) l'ammorbidimento della matrice argillosa può essere significativo.

Elemento di volume

Quando gli stress tettonici sono stati particolarmente intensi, la fatturazione raggiunge livelli molto elevati e la componente argillosa si presenta suddivisa in scaglie. Le argille a scaglie del Flysch Rosso sono costituite da un fitto aggregato di lamine millimetriche (scaglie) estremamente consistenti e di solito ben serrate fra di loro (Figura 4.4).

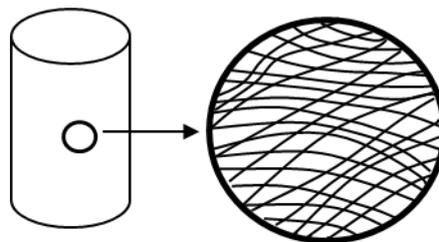


Figura 4.4. Struttura della componente pelitica del Flysch Rosso (argille a scaglie).

Le discontinuità fra le scaglie costituiscono un sistema che conferisce debolezza al materiale, ma che si attiva solo per valori del deviatore maggiori della resistenza residua. Per valori minori il

terreno è molto rigido, in quanto le deformazioni interessano la matrice (*Figura 4.5*); successivamente iniziano gli scorrimenti fra le scaglie che imprimono al mezzo una spiccata e repentina deformabilità, a cui segue una rottura duttile, senza dilatanza. Ciò è in contrasto con l'elevata consistenza e la sovraconsolidazione del materiale e dipende dal fatto che le deformazioni che producono la rottura sono dovute allo scorrimento fra le scaglie e non alle variazioni di volume della matrice. Durante la rottura si sviluppa una superficie che raccorda le discontinuità esistenti, lungo la quale le due parti del provino si muovono in modo relativo. A causa di questo meccanismo, benché la matrice costituente le scaglie sia fortemente consistente e sovraconsolidata, il provino presenta un comportamento duttile e contraente, perché la deformazione misurata al contorno non è dovuta alla deformazione della matrice, bensì allo scorrimento fra le scaglie. Data questa situazione, si può di solito assumere che resistenza di picco e resistenza di stato critico siano di fatto coincidenti. Le verifiche geotecniche delle opere di progetto potranno essere eseguite considerando disponibile la resistenza di stato critico in tutti i problemi in cui le rotture attese sono di neoformazione.

E' ben noto che la resistenza della componente pelitica del Flysch Rosso ottenuta da prove di compressione triassiale (TX) può essere diversa da quella ricavata da prove di taglio diretto (TD), perché in quest'ultimo caso le scaglie o altre inclusioni lapidee o consistenti possono attraversare la superficie di scorrimento imposta, mentre nel provino triassiale la superficie di scorrimento può seguire superfici di debolezza determinate dal reticolo di discontinuità, senza interessare in alcun modo la matrice delle scaglie e senza dover rispettare alcun vincolo cinematico. Si pone però il problema di capire quale dei due meccanismi sia più prossimo a quanto si verifica in sito alla scala del problema reale. A parere dello scrivente, nei problemi di rottura o plasticizzazione alla scala dell'ammasso le superfici di scorrimento non possono essere qualsiasi, poiché devono essere cinematicamente compatibili con le condizioni al contorno del problema esaminato, né sono del tutto imposte, in quanto esiste una molteplicità di superfici cinematicamente compatibili. Seguendo questo convincimento, lo scrivente ha scelto di considerare nelle elaborazioni che seguono i risultati delle prove TD e quelli delle prove TX ugualmente significativi ai fini della determinazione della resistenza della matrice pelitica e quindi di ricercare un unico involuppo di tutti i dati disponibili.

La resistenza di stato critico dipende dalla plasticità del materiale e, nel caso se ne ravvisasse la necessità, potrà essere verificata rispetto alle correlazioni empiriche disponibili in letteratura. Comunque, considerata la struttura a scaglie del materiale, non è particolarmente significativa. Quando invece si esaminano riattivazioni lungo superfici esistenti, come ad esempio nell'analisi di

stabilità di frane pregresse (è il caso della frana di Grottaminarda), sarà considerata disponibile la resistenza residua lungo l'intera superficie di scorrimento preesistente.

Per le argille a scaglie la determinazione della resistenza residua può essere un'operazione complessa ed incerta, per la possibilità che le scaglie attraversino la superficie di rottura imposta dalla macchina. Per evitare questi problemi la resistenza residua deve essere sempre verificata alla luce di correlazioni sperimentali con il contenuto in argilla, CF, e il limite liquido, w_L .

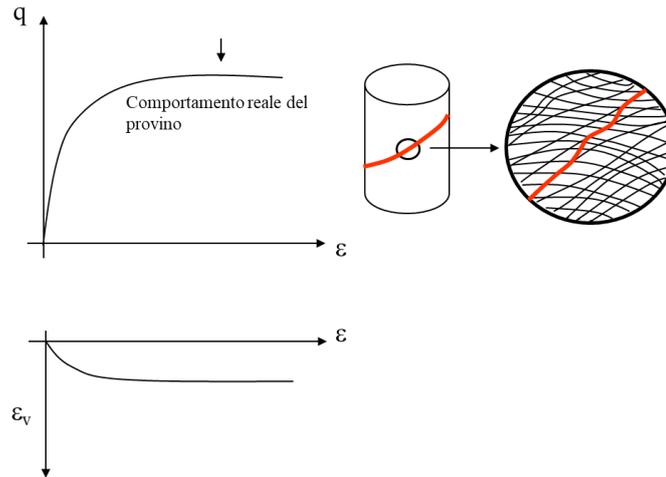


Figura 4.5. Comportamento meccanico della componente pelitica del Flysch Rosso e rappresentazione di una possibile superficie di scorrimento in un ipotetico provino di compressione triassiale.

4.3. Caratterizzazione meccanica del Flysch Rosso

La caratterizzazione meccanica dell'ammasso, come accennato in precedenza, risulta piuttosto difficile e articolata, in quanto il complesso matrice-componente lapidea non si presta ad esperimenti di laboratorio convenzionali. In letteratura sono presenti alcuni tentativi di superare questa difficoltà mediante lo sviluppo di approcci empirici basati su case histories e studi di laboratorio su bimrocks, che in virtù del rapporto volumetrico matrice/roccia, delle relative caratteristiche meccaniche (angolo di attrito interno, coesione e resistenza a compressione dei blocchi lapidei) definiscono le caratteristiche meccaniche dell'ammasso.

Tra le diverse formulazioni ed approcci presenti in letteratura si è considerato ragionevolmente cautelativo l'approccio proposto da Lindquist¹ e Goodman che dopo numerosi test in laboratorio

¹ A Conceptual empirical approach for the overall strength of unwelded bimrocks. Aut.:H. Sonmez, K.E. Kasapoglu & A. Coskun; C. Tunusluoglu; E.W. Medley; R.W. Zimmerman - SRM Regional Symp. "Rock Eng. in Difficult Ground Conditions, Soft Rock and Karst" - Dubrovnik, Croatia, 29-31 Oct. 2009; Systematic characterization of melange bimrocks and other chaotic soil/rock mixtures. Aut.:Edmund W. Medley. - Final version as sent to Felsbau Editor (Prod Wolf Schubert) for Felsbau March 1999 edition.

(con blocchi diversamente orientati e vari rapporti tra blocco e matrice), e test sul campo (studio del comportamento delle fondazioni della diga Scott ubicata a nord di San Francisco – California, fondata su una formazione complessa, detta Franciscan melange), identificarono semplici relazioni lineari tra le proprietà di resistenza dell'ammasso e l'incidenza volumetrica dei blocchi lapidei, tenendo anche conto del loro orientamento; gli Autori definirono un abaco che viene presentato nel seguito.

Tale approccio è basato sulle considerazioni che seguono.

- L'angolo di attrito interno dell'ammasso aumenta all'aumentare della proporzione volumetrica dei blocchi a causa dell'aumento della tortuosità della superficie di rottura; in particolare tale angolo di attrito interno assume lo stesso angolo della matrice fino a quando il volume dei blocchi raggiunge il 25% del volume totale; esso subisce incrementi fino a 15° quando la porzione lapidea raggiunge il 75% del volume totale; al di sopra della percentuale volumetrica del 75% non si verificano, nel modello, ulteriori incrementi.
- La coesione potrebbe diminuire all'aumentare della proporzione volumetrica dei blocchi a causa dei contatti blocco-matrice sulla cui superficie la coesione può essere minore che nella matrice; l'entità di questa diminuzione dipende dal fatto che la superficie di scorrimento si sviluppa in parte lungo le interfacce; ciò viene trascurato nella presente trattazione.
- L'orientamento dei blocchi lapidei (in particolare dei blocchi più grandi) influenza la geometria della superficie di rottura. Questa si sviluppa intorno ai blocchi e, poiché i contatti tra matrice e blocchi lapidei costituiscono delle superfici di debolezza, la rottura si forma verosimilmente proprio in quelle zone.

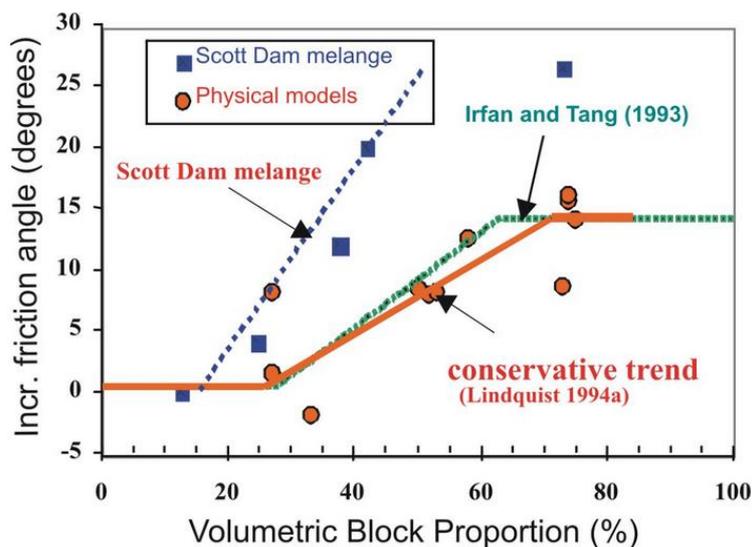


Figura 4.6. Relazione tra l'angolo di attrito interno dell'ammasso e della matrice, in funzione della proporzione volumetrica della componente lapida.

Alla luce di quanto rappresentato, dunque, nell'ambito della stessa formazione in virtù della variazione volumetrica della porzione lapidea può cambiare radicalmente il comportamento meccanico dell'ammasso a seconda del maggiore o minore volume della roccia; si riporta nella tabella seguente l'esempio della formazione delle Argille grigie marnoso scagliose – Unità del Flysch Rosso (FYRagms).

Proporzione volumetrica (%)	MATRICE	LAPIDEO	AMMASSO
Peliti 90% Lapideo 10%	Peso di volume [kN/m ³] = 20 Coesione Drenata [kPa] = 75 Angolo di Attrito $\phi' = 16.5^\circ$ $E_{(20\text{ m})} = 165 \text{ MPa}$ $E_{(30\text{ m})} = 245 \text{ MPa}$ $E_{(30\text{ m})} = 330 \text{ MPa}$	CALCARI Peso di volume [kN/m ³] = 22 $E = 15000 \text{ MPa}$	Peso di volume [kN/m ³] = 20 Coesione Drenata [kPa] = 75 Angolo di Attrito $\phi' = 16.5^\circ$ $E_{(20\text{ m})} = 165 \text{ MPa}$ $E_{(30\text{ m})} = 245 \text{ MPa}$ $E_{(30\text{ m})} = 330 \text{ MPa}$
Peliti 40% Lapideo 60%	Peso di volume [kN/m ³] = 20 Coesione Drenata [kPa] = 75 Angolo di Attrito $\phi' = 16.5^\circ$ $E_{(20\text{ m})} = 165 \text{ MPa}$ $E_{(30\text{ m})} = 245 \text{ MPa}$ $E_{(30\text{ m})} = 330 \text{ MPa}$	CALCARI Peso di volume [kN/m ³] = 22 $E = 15000 \text{ MPa}$	Peso di volume [kN/m ³] = 21 Coesione Drenata [kPa] = 75 Angolo di Attrito $\phi' = 27^\circ$ $E_{(20\text{ m})} = 480 \text{ MPa}$ $E_{(30\text{ m})} = 705 \text{ MPa}$ $E_{(30\text{ m})} = 935 \text{ MPa}$

Analoghe considerazioni valgono per la caratterizzazione delle proprietà elastiche dell'ammasso del Flysch Rosso; anche in questo caso la stima del modulo di deformabilità avviene in funzione della percentuale volumetrica della parte lapidea e di quella pelitica.

A tal proposito tra gli studi proposti in letteratura sono state prese in esame le trattazioni fornite da Salamon (1968) e Gerrard (1982)²; quest'ultimo ha determinato le proprietà elastiche "equivalenti" dell'ammasso caratterizzato da comportamento anisotropo, partendo dal comportamento isotropo degli strati di matrice e di roccia che compongono l'ammasso (costituito da un sistema composto a strati alterni di matrice e roccia).

La formulazione proposta per la determinazione del modulo elastico equivalente in direzione parallela agli strati (E_h) ed in direzione normale ad essi (E_v), riportati di seguito, sono funzione delle caratteristiche elastiche della matrice e della roccia, nonché della percentuale volumetrica (φ_i) della porzione lapidea:

$$E_h = (1 - \nu_{hh}^2) \sum \frac{\varphi_i \cdot E_i}{1 - \nu_i^2}$$

² A physically meaningful homogenization approach to determine equivalent elastic properties of layered soil - Pejzun Guo and Dieter F.E. Stolle – NCR Research Press

$$\frac{1}{E_v} = \sum \frac{\varphi_i}{E_i} \left(1 - \frac{2v_i^2}{1-v_i} \right) + \frac{2v_{hv}^2}{(1-v_{hh})E_h}$$

$$v_{hh} = \frac{\sum \frac{\varphi_i v_i E_i}{1-v_i^2}}{\sum \frac{\varphi_i E_i}{1-v_i^2}}$$

$$v_{hh} = (1-v_{hh}) \sum \frac{\varphi_i v_i}{1-v_i}$$

$$\frac{1}{G_{hv}} = \sum \frac{\varphi_i}{G_i}$$

L'aumento della porzione volumetrica della roccia determina un incremento del modulo elastico; tale incremento, trattandosi di ammasso con comportamento anisotropo, è sensibilmente maggiore nella direzione degli strati (qui supposta orizzontale).

4.4. Prove di Laboratorio

Nell'area oggetto di studio sono stati eseguiti numerosi sondaggi stratigrafici al fine di caratterizzare in maniera dettagliata i terreni attraversati, con particolare riferimento alle diverse facies del Flysch Rosso, che interessano il tracciato delle gallerie di progetto Grottaminarda (tra le Pk 2+705 e Pk 4+715) e Melito (tra le Pk 5+080 e Pk 7+145).

Le informazioni desunte dalle diverse campagne di indagine pregresse, allegate al Progetto Definitivo, sono state integrate con le informazioni e i risultati della campagna integrativa condotta a corredo della presente fase della progettazione (campagna di indagini del 2019 e ad inizi 2020).

Per comodità del lettore, è utile ricordare quanto scritto ai capitoli precedenti. I campioni prelevati e identificati come terre sono stati caratterizzati dal punto di vista fisico e meccanico. La determinazione del peso specifico della fase solida, dei limiti di Atterberg e l'analisi granulometrica per setacciatura e sedimentazione è stata eseguita per tutti i campioni prelevati. Le proprietà di stato quali il contenuto d'acqua, l'indice dei vuoti, il peso dell'unità di volume sono stati determinati per tutti i campioni indisturbati. La caratterizzazione meccanica dei terreni è stata svolta sui campioni indisturbati investigati nei laboratori dei Dipartimenti dell'Università di Napoli Federico II [identificato con la sigla UNINA] e dell'Università degli Studi della Basilicata [identificato con la sigla UNIBAS], nonché sulla base dei dati relativi alla campagna di indagini Italferr e a quella



condotta dai laboratori commerciali. Inoltre, tale caratterizzazione, è stata completata, per le caratteristiche di deformabilità con le prove in foro (pressiometriche e dilatometriche).

Nelle seguenti tabelle si riporta il programma di prove svolto sui campioni di terra prelevati nei diversi sondaggi.

Sondaggio	Camp.	Profondità media	Formazione	Y, Y ₀ , Y _{sat}	Y _s	W	S _r	n, e	Wl, Wp	IP	IC	Granul.	TD	TR	COMP. UNI.	UU	CIU	CID	POINT LOAD TEST	COMP. ELL.	PROVAT.I.	
SN_GR_06	C1	9,35	Anz	X	X	X	X	X	X	X		X										
	C2	13,2	Anz	X	X	X	X	X	X	X		X										
	C3	19,8	FYR_avc	x	x	x			x	x		x										
	CR_T95	20,65	FYR_avc		X	X			X	X		X										
	C4	25,25	FYR_avc	X	X	X			X	X		X						X				
	C4	25,65	FYR_avc	x	x	x			x	x		x										
	CLIT_T148	35,15	FYR_ar																	X		
	CI_T99	36,2	FYR_ar	X	X		X	X					X									X
	CR_T96	38,15	FYR_ar		X	X				X	X		X									
	CI_T100	40,65	FYR_ar			X										X						
	CR_T97	42,35	FYR_mar		X	X				X	X		X									
	CR_T118	43,15	FYR_mar			X							X									
CR_T101	46,65	FYR_mar			X																	
CR_T102	49,15	FYR_mar	X	X	X				X	X		X			X							
CR_T98	54,65	FYR_mar	X	X	X				X	X		X										
SN_GR_03	C2	15,725	Anz	X	X	X	X	X	X	X		X										
	C3	31,2	Anz	X	X	X	X	X	X	X		X										
	C5	46,55	Anz	X	X	X	X	X	X	X		X										
	CI_T176	65,725	FYR_cgpp		X	X						X										
	C7	67,75	FYR_cgpp	x	x	x			x	x		x										
	CR_T144	70,24	FYR_avc		X	X						X										
	CLIT_T147	72,9	FYR_avc		X	X						X								X		
	CI_T177	74,65	FYR_avc		X	X						X			X					X		
	CR_T145	80,25	FYR_cgpp		X	X						X										
	CI_T178	83,85	FYR_cgpp		X	X						X			x						x	
CR_T146	89,75	FYR_cgpp		X	X						X											
SN_GR_04	CR_T1	10,75	FYR_agms		X	X			X	X		X										
	CR_T2	20,65	FYR_avc		X	X			X	X		X										
	CI_T6	30,25	FYR_avc	X	X	X	X	X	X	X		X			X						X	
	CR_T3	31,65	FYR_avc		X	X			X	X		X										
	CI_T7	33,25	FYR_ar	X	X	X	X	X	X	X		X			X							X
	CR_T4	40,25	FYR_ar			X						X										
	CI_T8	41,3	FYR_ar/FYR_avc	X	X	X									X							X
	CI_T9	43,25	FYR_avc	X	X	X									X							X
	CI_T10	44,75	FYR_avc	X	X	X									X							X
	CI_T11	46,25	FYR_avc	X	X	X	X	X	X	X	X		X		X							X
	CI_T12	49,35	FYR_avc	X	X	X	X	X	X	X	X		X		X							X
	CR_T5	50,25	FYR_avc			X				X	X											
CI_T13	52,1	FYR_avc	X	X	X	X	X	X	X	X		X		X							X	

SN_GR_05	CR_T85	8,15	FYR_agms		X	X			X	X		X						
	CL_T193	14,4	FYR_agms														X	
	CR_T86	16,15	FYR_agms		X				X	X		X						
	CI_T90	20,25	FYR_agms	X	X	X	X	X	X	X		X		X			X	X
	CR_T87	24,15	FYR_agms		X				X	X		X						
	CI_T91	25,25	FYR_agms	X	X	X	X	X	X	X		X		X				X
	CR_T88	32,15	FYR_agms		X				X	X		X						
	CI_T92	38,25	FYR_agms	X	X	X	X	X	X	X		X		X				X
CR_T89	40,15	FYR_agms		X				X	X		X							
SGR3	CR_T124	2,2	s/cf		X	X			X	X		X	X					
	CI_T134	2,75	cf		X	X			X	X		X	X	X				
	CR_T125	5,2	FYR_avc		X	X			X	X		X						
	CR_T126	13,7	FYR_avc		X	X			X	X		X						
	CR_T127	17,35	FYR_avc		X	X			X	X		X						
	CR_T128	22,2	FYR_avc		X	X			X	X		X						
	CR_T129	25,7	FYR_avc		X	X			X	X		X						
	CR_T130	28,7	FYR_avc		X	X			X	X		X						
	CR_T131	32,7	FYR_avc		X	X			X	X		X		X				X
	CI_T135	35,25	FYR_avc		X	X			X	X		X						
	CR_T132	36,2	FYR_avc		X	X			X	X		X						
CR_T133	39,7	FYR_avc		X	X			X	X		X		X				X	
CH_02	CR_T54	2,25	cf		X	X			X	X		X						
	CR_T55	4,75	cf		X	X			X	X		X						
	CR_T56	9,75	cf		X	X			X	X		X						
	CR_T57	19,75	FYR_agms		X	X			X	X		X						
	CR_T58	25,75	FYR_agms		X	X			X	X		X						
CH_06	CR_T49	2,8	cf		X	X			X	X		X						
	CR_T50	32,8	cf		X	X			X	X		X						
	CR_T51	12,2	FYR_agms		X	X			X	X		X						
	CR_T52	24,3	FYR_agms		X	X			X	X		X						
	CR_T53	33,4	FYR_agms		X	X			X	X		X						
SN_01	CR_T1	2,8	cf		X	X			X	X		X						
	C1	6,85	cf	X	X	X			X	X		X		X				
	CR_T2	7,8	cf		X	X			X	X		X						
	CR_T3	10,7	cf		X	X			X	X		X						
	C2	12,75	cf	X	X	X			X	X		X						
	CLIT_T11	15,85	cf											X				
	CR_T4	16,5	cf		X	X			X	X		X						
	CR_T5	20,825	FYR_agms		X	X			X	X		X						
	CR_T6	24,8	FYR_agms		X	X			X	X		X						
	C4	25,15	FYR_agms	X	X	X			X	X		X	X					
	C5	29,75	FYR_agms	X	X	X			X	X		X						
	C6	34,8	FYR_agms	X	X	X			X	X		X						
	C7	40,75	FYR_agms	X	X	X			X	X		X						
	C8	43,45	FYR_agms	X	X	X			X	X		X						
	CR_T7	37,5	FYR_agms		X	X			X	X		X	X					
	CR_T8	46,2	FYR_agms		X	X			X	X		X						
	CLIT_T12	48,55	FYR_agms											X				
CLIT_T13	51,25	FYR_agms														X		
CLIT_T14	51,6	FYR_agms															X	
CR_T9	54,2	FYR_agms		X	X			X	X		X							
CR_T10	67,5	FYR_agms		X	X			X	X		X							

SN_02	CR_T15	3,85	cf		X	X			X	X		X							
	C1	8,25	cf	x	x	x			x	x		x						X	
	CR_T16	9,15	cf		X	X			X	X		X							
	CR_T17	11,8	cf		X	X			X	X		X							
	CR_T18	15,8	FYR_agms		X	X			X	X		X		x					
	CR_T19	20,725	FYR_agms		X	X			X	X		X							
	CR_T21	21,2	FYR_agms	X	X	X	X	X	X	X		X							X
	CR_T22	24,175	FYR_agms		X	X			X	X		X							
	CR_T20	25,2	FYR_agms		X	X			X	X		X							
	C2	27	FYR_agms	X	X	X	X	X	X	X		X			X	X			
	CR_T23	32,675	FYR_agms		X	X			X	X		X							
	CLIT_T26	34,45	FYR_agms											X					X
	CLIT_T27	35,35	FYR_agms											X					
	CL_T28	41,15	FYR_agms	X	X	X	X	X	X	X		X							X
CR_T24	43,2	FYR_agms																	
CR_T25	45,375	FYR_agms		X	X			X	X		X								
SN_03	CR_T29	0,75	cf		X	X			X	X		X							
	CR_T30	2,85	cf		X	X			X	X		X							
	C1	4,2	cf	x	x	x			x	x		x						X	
	CR_T31	7,15	cf		X	X			X	X		X							
	C2	9,15	FYR_agms/cf	x	x	x			x	x		x							
	CR_T32	10,3	FYR_agms		X	X			X	X		X							
	CR_T33	14,85	FYR_agms		X	X			X	X		X							
	C4	20,35	FYR_agms	X	X	X	X	X	X	X		X	X						
	CL_T34	27,325	FYR_agms	X	X	X	X	X	X	X		X		X					X
	CLIT_T40	35,575	FYR_agms																X
	CLIT_T41	39,9	FYR_agms																X
	C8	42	FYR_agms	X	X	X	X	X	X	X		X						X	
	CR_T35	48,655	FYR_agms		X	X			X	X		X							
	CLIT_T39	51,125	FYR_mar																
	CR_T36	56,2	FYR_mar		X	X			X	X		X							
	CR_T37	63,625	FYR_mar		X	X			X	X		X							
	CR_T38	68,725	FYR_mar		X	X			X	X		X							
SN_04	CR_T42	1,75	cf		X	X			X	X		X							
	CR_T43	3,2	cf		X	X			X	X		X							
	CR_T44	5,225	cf		X	X			X	X		X							
	C1	5,75	cf/FYR_agms	x	x	x			x	x		x						X	
	CR_T45	8,625	FYR_agms		X	X			X	X		X							X
	C2	11,75	FYR_agms	x	x	x			x	x		x							X
	CR_T46	13,75	FYR_agms		X	X			X	X		X							
	C3	14,25	FYR_agms	x	x	x			x	x		x		X					
	C4	15,5	FYR_agms	x	x	x			x	x	x	x			X				
	C5	18,25	FYR_agms	x	x	x			x	x	x	x		X					
	C6	22	FYR_agms	x	x	x			x	x	x	x			X				
CL_T48	23,7	FYR_agms																X	
CR_T47	29,25	FYR_agms		X	X			X	X		X								

G1	C11	3,25	cf	x	x	x			x	x	x	x							
	C12	6,25	cf	x	x	x			x	x	x	x	x						
	C13	9,75	cf	x	x	x			x	x	x	x	x			x			
	C14	14,75	cf	x	x	x			x	x	x	x		x			x		
	C15	17,75	FYR_agms	x	x	x			x	x	x	x	x						
	C16	22,25	FYR_agms	x	x	x			x	x	x	x		x					
	C17	28,25	FYR_agms	x	x	x			x	x		x	x			x			
	C18	32,25	FYR_agms	x	x	x			x	x		x	x			x			
	C19	39,75	FYR_agms	x	x	x			x	x		x	x				x		
G2	C11	3,3	cf/coll	x	x	x			x	x		x	x			x			
	C12	6,3	cf/coll	x	x	x			x	x		x					x		
	C13	10,3	anz	x	x	x			x	x		x	x			x		x	
	C14	13,3	anz	x	x	x			x	x		x	x						
	C15	20,3	anz	x	x	x			x	x		x							
	C16	26,25	FYR_ava	x	x	x			x	x		x	x						
AU6	C11	4,75	cf	x	x	x			x	x		x	x			x			
	C12	10,25	cf	x	x	x			x	x		x							
	C13	19,75	FYR_ava	x	x	x			x	x		x	x						
	C14	25,25	FYR_ava	x	x	x			x	x		x					x		
	C15	30,25	FYR_ava	x	x	x			x	x		x							
	C16	35,25	FYR_ava	x	x	x			x	x		x	x			x			
	C17	40,25	FYR_ava	x	x	x			x	x		x					x		
	C18	44,25	FYR_ava	x	x	x			x	x		x				x			
	C19	49,75	FYR_ava	x	x	x			x	x		x				x			
C10	C11	5,25	cf	x	x	x			x	x		x	x						
	C12	15,25	FYR_ava	x	x	x			x	x		x				x			
	C13	20,25	FYR_ava	x	x	x			x	x		x	x						
	C14	25,25	FYR_ava	x	x	x			x	x		x							
	C15	29,75	FYR_ava	x	x	x			x	x		x				x			
C9	C11	5,25	FYR_ava	x	x	x			x	x		x							
	C12	10,25	FYR_ava	x	x	x			x	x		x				x			
	C13	15,25	FYR_ava	x	x	x			x	x		x							
AU1	C11	10,25	dep.all.	x	x	x			x	x		x	x						
	C12	16,25	dep.all.	x	x	x			x	x		x					x		
	C13	20,25	dep.all.	x	x	x			x	x		x	x						
	C14	30,25	dep.all.	x	x	x			x	x		x					x		
	C15	35,25	dep.all.	x	x	x			x	x		x					x		
	C16	40,25	dep.all.	x	x	x			x	x		x					x		
	C17	45,25	dep.all.	x	x	x			x	x		x					x		
	C18	49,75	dep.all.	x	x	x			x	x		x					x		
G11	C11	2,75	coll	x	x	x			x	x		x	x			x			
	C12	7,25	anz	x	x	x			x	x		x	x						
	C13	12,25	anz	x	x	x			x	x		x	x						
M2	C11	12,85	FYR_ava	x	x	x	x	x			x	x							
SNGR02	C1	4,95	anz	x	x	x			x	x		x							
	C2	24,65	anz	x	x	x			x	x		x							
	C6	47,85	anz	x	x	x			x	x		x							

SN_ME_01	CR_T149	3,85	FYR_agms			X	X			X	X								
	CI_T179	4,25	FYR_agms			X	X			X	X								
	CI_T180	10,275	FYR_2c			X	X			X	X								
	CR_T150	14,85	FYR_agms			X	X			X	X								
	CI_T181	25,3	FYR_avc?			X	X			X	X								
	CR_T151	27,325	FYR_avc			X	X			X	X								
	CI_T182	35,275	FYR_avc	X		X	X	X	X	X	X								
	CR_T152	37,25	FYR_avc			X	X			X	X								
	CI_T183	40,75	FYR_avc	X		X	X	X	X	X	X							X	X
	CR_T153	47,75	FYR_cgp			X	X			X	X								
	CI_T184	56,725	FYR_cgp			X	X			X	X								
	CR_T154	58,2	FYR_cgp			X	X			X	X								
	CI_T185	63,75	FYR_cgp	X		X	X	X	X	X	X							X	X
	CLIT_T157	69,1	FYR_cgp															X	
	CI_T186	71,075	FYR_2c/FYR_2c	X			X												X
	CI_T187	75,75	FYR_cgp	X			X											X	X
	CR_T155	76,2	FYR_cgp			X	X			X	X								
CI_T188	83,75	FYR_cgp			X	X			X	X									
CR_T156	88,85	FYR_cgp			X	X			X	X									
CLIT_T158	97,3	FYR_cgp															X	X	
SN_ME_02	CR_T160	11,4	FYR_ac			X	X			X	X								
	CR_T161	25,5	FYR_cgp			X	X			X	X								
	CLIT_T194	29,6	FYR_2c														X		
	CR_T167	32,4	FYR_2c/FYR_cgp	X		X	X	X	X	X	X						X		
	CR_T162	33,15	FYR_cgp			X	X			X	X								
	CR_T163	42,2	FYR_ac			X	X			X	X								
	CR_T168	45,5	FYR_ac			X	X			X	X								
	CLIT_T195	46,15	FYR_ac														X		
	CR_T164	51,3	FYR_avc			X	X			X	X								
	CI_T190	54,25	FYR_avc/FYR_cgp			X	X			X	X								
	CI_T191	62,4	FYR_cgp	X		X	X	X	X	X	X						X		
	CI_T192	65,25	FYR_avc	X		X	X	X	X	X	X						X		
	CR_T165	68,85	FYR_avc			X	X			X	X								
	CR_T166	70,85	FYR_avc			X	X			X	X								
	SN_ME_03	CR_T62	25,25	FYR_avc			X	X			X	X							
CR_T63		35,25	FYR_ac			X	X			X	X								
CI_T69		40,25	FYR_avc	X		X	X	X	X	X	X					X			
CR_T64		45,25	FYR_avc			X	X			X	X								
CI_T70		50,25	FYR_avc	X		X	X	X	X	X	X					X			
CR_T65		55,25	FYR_avc/FYR_cgp			X	X			X	X								
CI_T71		65,25	FYR_avc	X		X	X	X	X	X	X					X			
CI_T72		68,2	FYR_avc	X		X	X	X	X	X	X							X	
CR_T66		70,2	FYR_avc			X	X			X	X								
CI_T73		71,2	FYR_avc	X		X	X	X	X	X	X					X			
CI_T74		76,75	FYR_avc	X		X	X	X	X	X	X							X	
CR_T67		74,2	FYR_avc			X	X			X	X								
SN_ME_04		CR_T15	18,825	FYR_avc			X	X			X	X							
	CR_T16	25,25	FYR_ac			X	X			X	X								
	CI_T22	29,75	FYR_avc	X		X	X	X	X	X	X					X			
	CR_T17	37,525	FYR_avc			X	X			X	X								
	CI_T23	42,3	FYR_avc	X		X	X	X	X	X	X					X			
	CR_T18	47,65	FYR_avc			X	X			X	X								
	CR_T19	56,175	FYR_avc			X	X			X	X								
	CI_T24	68,2	FYR_avc	X		X	X	X	X	X	X					X			
	CLIT_T89	58,6	FYR_avc															X	
	CI_T25	60,2	FYR_avc	X		X	X	X	X	X	X								X
	CI_T26	63,25	FYR_avc	X		X	X	X	X	X	X					X			
	CR_T20	66,9	FYR_avc			X	X			X	X								
CI_T27	68,2	FYR_avc	X		X	X	X	X	X	X								X	

SN_ME_05	CR_T219	10,2	FYR_ava		X	X				X										
	CR_T220	21,25	FYR_ava		X	X			X	X										
	CR_T221	25,25	FYR_ava		X	X			X	X										
	CR_T222	30,25	FYR_2c			X														
	CR_T223	40,25	FYR_2c		X	X			X	X										
	CR_T224	50,25	FYR_2c			X														
	CR_T225	60,7	FYR_2c		X	X			X	X										
	CR_T226	70,475	FYR_mar			X													X	
	CR_T227	80,55	FYR_ava/FYR_mar			X													X	
	CR_T228	91,75	FYR_ar		X	X			X	X									X	
CLIT_T231	94,5	FYR_ar																X		
CR_T229	99,8	FYR_ar		X	X			X	X									X		
SN_ME_07	CR_T28	4,15	FYR_cgp		X	X			X	X										X
	CI_T39	9,6	FYR_2c			X														
	CLIT_T29	13,85	FYR_2c																X	
	CI_T40	20	FYR_cgp			X														
	CR_T30	26,15	FYR_ava		X	X			X	X										
	CR_T31	36,85	FYR_ava																	
	CR_T32	46,15	FYR_ava/FYR_cgp																	
	CI_T41	48,35	FYR_ava		X	X	X	X	X	X										X
	CR_T33	55,85	FYR_agms																	
	CR_T34	65,8	FYR_ac																	
	CLIT_T35	74,15	FYR_2c																X	
	CI_T42	80,25	FYR_2c/FYR_ac		X		X													X
	CR_T36	83,85	FYR_ac																	
	CI_T43	88,65	FYR_ac		X		X												X	
	CI_T44	96,675	FYR_2c		X		X												X	
	CR_T37	99,85	FYR_2c																	
	CLIT_T84	101,2	FYR_2c																X	
	CLIT_T85	102,7	FYR_2c																X	
	CI_T45	104,1	FYR_2c		X		X												X	
	CI_T46	107,65	FYR_2c		X		X												X	
CLIT_T86	108,65	FYR_2c																X		
CLIT_T87	109,4	FYR_2c																X		
CLIT_T38	110,15	FYR_2c																X		
CI_T47	111,3	FYR_2c		X		X												X		
CLIT_T88	113,35	FYR_2c																X		
G3	CI1	29,75	FYR_ava		X	X	X		X	X	X									
	CR1	44,75	FYR_ava		X	X	X		X	X	X	X								
	CR2	59,75	FYR_ava		X	X	X		X	X	X	X	X					X		
	CR3bis	68,25	FYR_ava		X	X	X		X	X	X	X								
	CR3	70,25	FYR_ava		X	X	X		X	X	X	X	X					X		
	CR4	80,25	FYR_ava		X	X	X		X	X	X	X	X							
	CR4bis	82,4	FYR_ava		X	X	X		X	X	X	X	X							
	CR5	90,25	FYR_agms		X	X	X		X	X	X	X	X	X						
	CR1bis	91,65	FYR_agms		X	X	X		X	X	X	X	X	X					X	
	CR6	100,25	FYR_agms		X	X	X		X	X	X	X	X	X					X	
CR2bis	101,7	FYR_agms		X	X	X		X	X	X	X	X	X					X		
AU7	CR3	15,25	FYR_ava		X	X	X		X	X	X									
	CI1	20,25	FYR_ava		X	X	X		X	X	X	X								
	CI2	25,25	FYR_ava		X	X	X		X	X	X	X								
	CR4	30,25	FYR_ava		X	X	X		X	X	X	X								
	CR5	34,75	FYR_ava		X	X	X		X	X	X	X								
	CI3	39,25	FYR_ava		X	X	X		X	X	X	X								
	CR6	44,75	FYR_ar		X	X	X		X	X	X	X								
CR7	49,75	FYR_agms		X	X	X		X	X	X	X									

V102_5	CR_1	1,25	cf			X					X								
	SC_1	2,75	cf	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
	MC_2	7,55	FYR_agms	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X		
	CR_2	8,25	FYR_agms			X						X							
	CR_3	15,25	FYR_agms			X						X							
	MC_3	21,95	FYR_cgp	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
	CR_4	24,75	FYR_agms			X						X							
	MC_4	25,95	FYR_agms	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X	
V102_2	MC_5	29,25	FYR_agms	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
	SC_4	14,75	FYR_agms	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
	SC_5	18,25	FYR_agms	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X		
V102_3	CR_4	27,25	FYR_agms		X	X				X	X								
	CL_1	4,65	cf		X										X				
	CR_1	8,25	FYR_ac/FYR_avc			X						X							
	CM_1	11,2	FYR_avc	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
	CR_2	14,75	FYR_avc			X						X			X				
	CL_3	23,4	FYR_avc	X											X				
	CL_2	23,9	FYR_avc	X														X	
	CR_3	24,75	FYR_avc			X						X							
	CM_2	25,8	FYR_avc	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
	CM_3	28,25	FYR_avc	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X		
	CR_4	35,75	FYR_avc			X						X							
	CM_4	39,4	FYR_avc	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
	CM_5	42,4	FYR_avc	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X		
	CR_5	44,25	FYR_avc			X						X							
	CM_6	45,25	FYR_avc	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
	CR_6	54,75	FYR_avc			X						X							
V102_4	CR_1	4,75	cf		X	X			X	X		X							
	MC_1	5,8	FYR_avc	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X		
	MC_2	12,2	FYR_avc	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
	CR_2	14,25	FYR_avc			X						X							
	CR_3	22,275	FYR_avc			X						X							
	MC_3	23,2	FYR_avc	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
	CR_4	30,75	FYR_avc		X	X			X	X		X							
	MC_4	33,9	FYR_avc	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
	MC_5	37,75	FYR_avc	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X		
	CR_5	39,2	FYR_avc			X						X							
	MC_6	46,25	FYR_avc	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
	CR_6	48,25	FYR_avc			X						X							
CL_1	20,15	FYR_avc	X											X					
CL_2	26,6	FYR_avc	X											X					
Legenda																			
Laboratori commerciali					Italferr PD					UNINA					UNIBAS				

4.5. Caratterizzazione meccanica della matrice argillosa

Si riportano nel seguito le elaborazioni dei risultati delle prove meccaniche eseguite in laboratorio sui campioni prelevati nel corso dei sondaggi di tutte le campagne geognostiche condotte (pregresse ed integrative); si precisa che tali dati sono stati riferiti ai raggruppamenti definiti nel Capitolo 3.

- **Argille Grigie marnoso scagliose [FYRagms]**

Per la determinazione dei parametri di resistenza a taglio drenati dei litotipi pelitici è stata eseguita un'elaborazione particolare, considerando per le prove triassiali non il cerchio di Mohr delle tensioni efficaci, come si fa usualmente, ma lo stato tensionale lungo i piani di rottura, in maniera tale da poter inserire i punti corrispondenti a ciascuna di tali prove nel piano τ - σ' , nel quale si riportano anche le prove di taglio diretto.

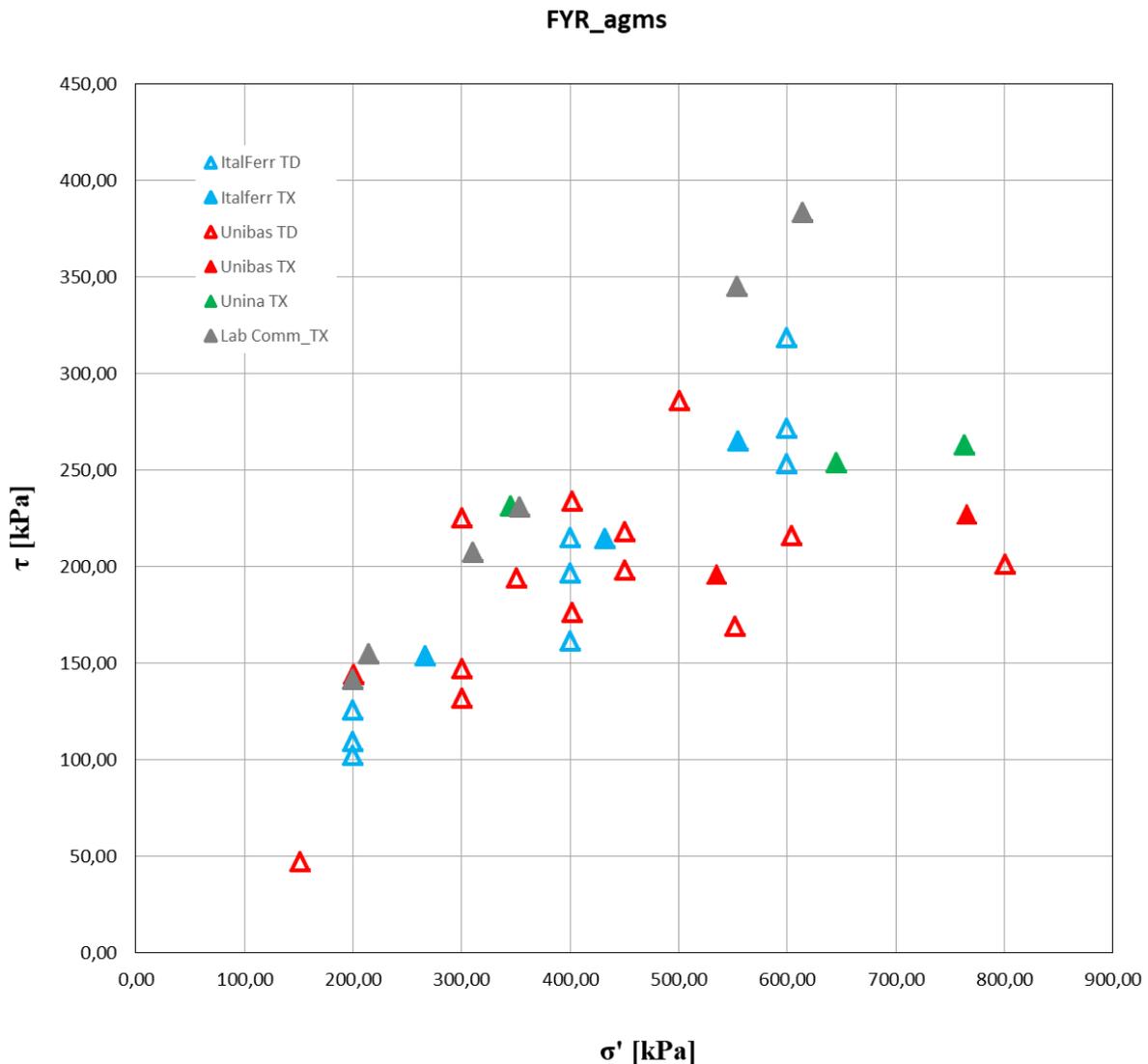


Figura 4.7. Risultati delle prove di taglio diretto e delle prove triassiali CIU da tutte le campagne geognostiche condotte.

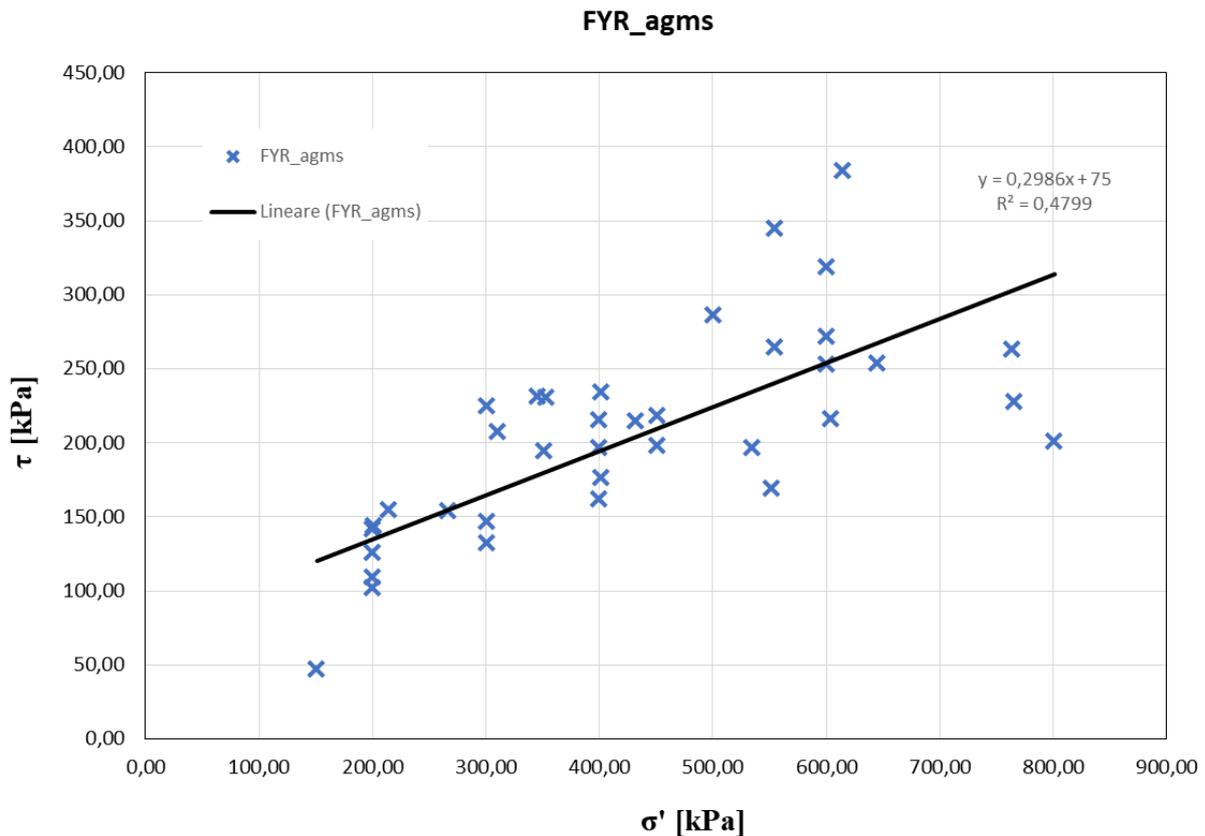


Figura 4.8. Interpolazione dei risultati delle prove di taglio diretto e delle prove triassiali CIU da tutte le campagne geognostiche condotte.

In Figura 4.7 sono rappresentati i risultati delle prove svolte sulla matrice pelitica identificata come **FYRagms** (costituente il terzo gruppo elencato nel Capitolo 3); in Figura 4.8 è riportata l'interpolazione dei dati di Figura 4.7. Da tale interpolazione risulta: $\tan\phi'=0.2986$ ($\phi'=16.5^\circ$) e c' (coesione) = **75 kPa**.

In merito alla caratterizzazione in condizioni non drenate, i risultati ottenuti sono illustrati in Figura 4.9. In tale diagramma è riportata la variazione della coesione non drenata (c_u) con la profondità. In particolare, oltre alle misure dirette ottenute dalle prove triassiali UU, e i valori ottenuti per correlazione dalle prove in sito (pressiometriche e dilatometriche) effettuate nei fori di sondaggio, è riportato l'andamento di c_u ottenuto dai risultati delle prove CIU attraverso una correlazione teorica; a tal fine è stato dapprima calcolato il gradiente di c_u con la profondità, ossia l'angolo ϕ_u , e da esso è stato ricavato il valore di c_u , in funzione della tensione media efficace alla profondità considerata, σ'_c :

$$\sin \phi_{cu} = \frac{\sin \phi'}{1 + (2 A_f - 1) \sin \phi'}$$

$$c_u = \frac{\text{sen } \varphi_{cu}}{1 - \text{sen } \varphi_{cu}} \sigma'_c$$

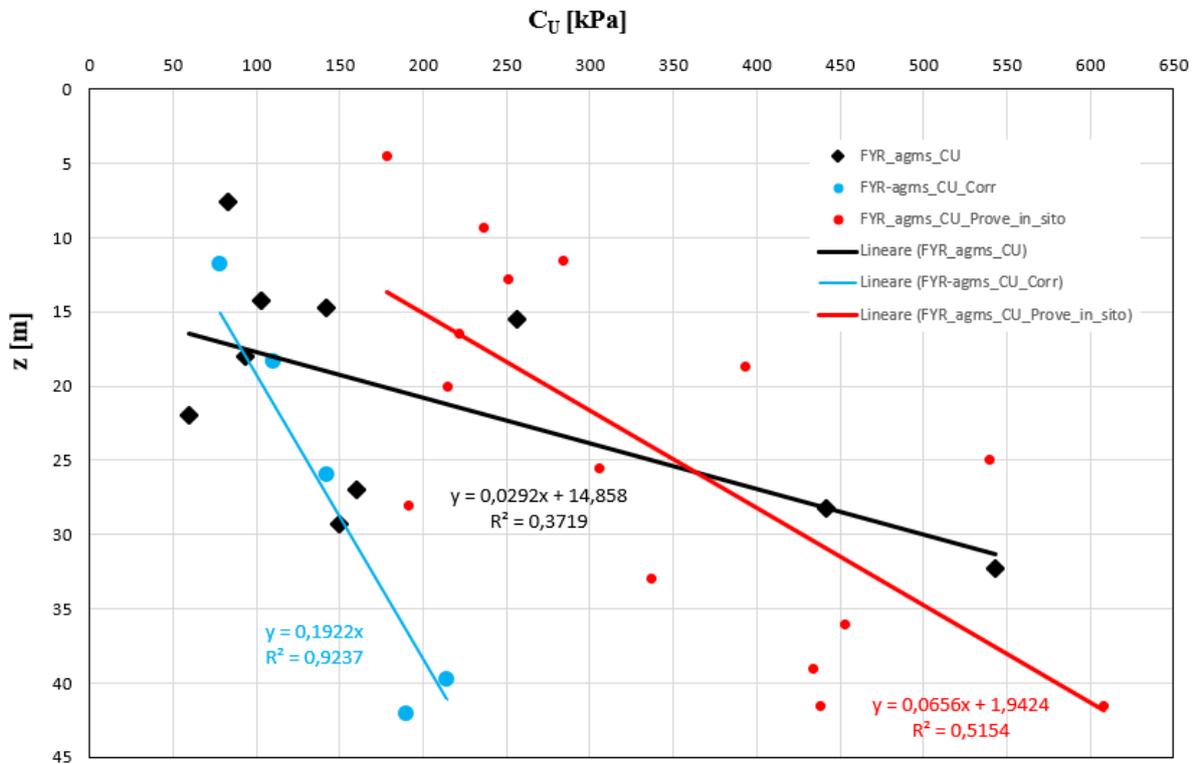


Figura 4.9. Valori della coesione non drenata: misure dirette da prove UU (rombi neri), correlazione con prove CIU (cerchi azzurri), correlazione con prove in foro (cerchi rossi). Per il progetto si consiglia di assumere l'andamento tratto dalle prove UU.

Nell'espressione di ϕ_u compare il coefficiente A_f di Skempton, ricavato nelle condizioni finali della prova CIU dalla misura delle sovrappressioni neutre; ϕ' è l'angolo di attrito drenato.

Detto ciò, riferendosi alla Figura 4.9, si consiglia di assumere per la c_u un andamento coerente con i risultati delle prove UU che rappresentano la misura diretta della grandezza in questione.

Per ciò che concerne la caratterizzazione della deformabilità, rappresentata dal modulo elastico E , si è scelto di derivare quest'ultimo dalle prove dilatometriche in foro che consentono di determinare la variazione di E con la profondità, procedendo all'interpolazione dei dati sperimentali, come è illustrato in Figura 4.10. I moduli E ivi rappresentati sono stati desunti dal ramo di scarico del terzo ciclo di carico delle prove dilatometriche, che consistono appunto in tre cicli di carico successivi. I dati così ottenuti sono stati confrontati con quelli desumibili da prove di laboratorio a piccole deformazioni, secondo quanto di seguito riportato.

Infatti, il modulo elastico E può essere ricavato dalla correlazione tra il modulo di rigidezza a taglio G_0 e la tensione media p' , definita dalla seguente espressione ottenuta sperimentalmente presso il laboratorio UNINA:

$$G_0 = 0,7004 \cdot p^{0,8916}$$

A dire il vero la suddetta relazione è stata ricavata sui terreni del corpo di frana ed è stata estesa in maniera arbitraria ai terreni sottostanti che hanno la stessa origine geologica, nel convincimento che per lo meno rappresentano un limite inferiore del parametro di deformabilità (i terreni del corpo di frana sono ammorbiditi). Considerando le tensioni medie rispettivamente alla profondità della calotta della galleria ed in corrispondenza della base rispettivamente di 320 kPa e 400 kPa, si stima un valore del modulo di taglio G a partire dal modulo G_0 , rispettivamente pari a:

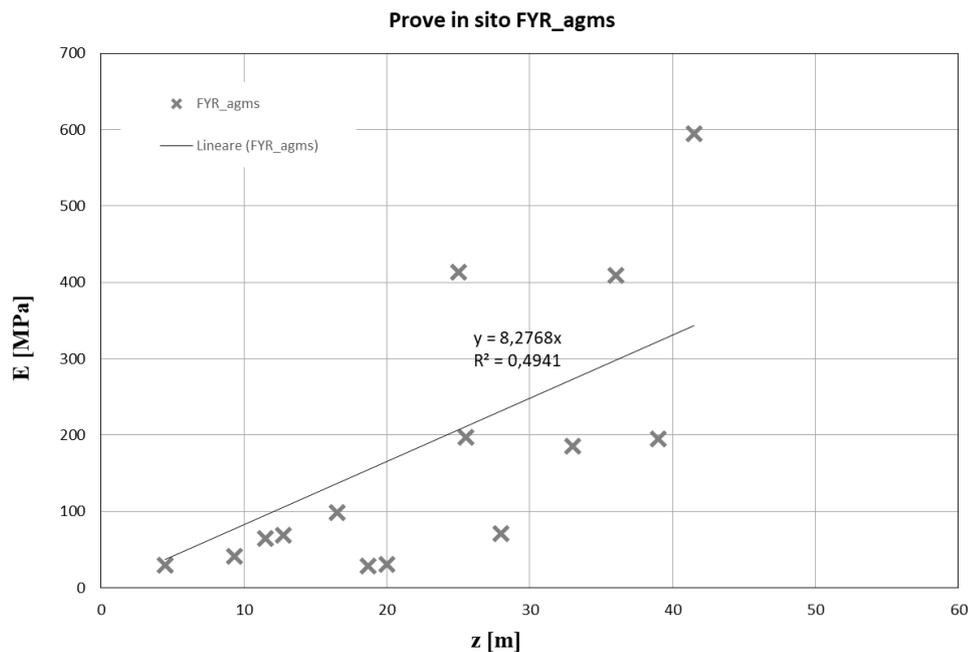


Figura 4.10. Risultati in termini di interpolazione delle prove in foro (pressiometriche e dilatometriche).

$$G = 0,40 \cdot G_0 = 0,40 \cdot (0,7004 \cdot 320^{0,8916}) = 47,97 \text{ MPa} \quad \text{calotta}$$

$$G = 0,40 \cdot G_0 = 0,40 \cdot (0,7004 \cdot 400^{0,8916}) = 58,53 \text{ MPa} \quad \text{base.}$$

Il valore operativo del modulo G è stato stimato pari al 40% del modulo G_0 , per tenere conto del livello di deformazione atteso nel problema reale.

Il modulo elastico E può essere definito secondo la seguente espressione elastica a partire dal modulo di taglio G:

$$E = G \cdot 2[1 + \nu]$$

$$E = 130 \text{ MPa} \quad \text{calotta}$$

$$E = 160 \text{ MPa} \quad \text{base.}$$

Tali valori, come ci si attendeva sono un limite inferiore rispetto a quelli ricavati dalle prove dilatometriche che sono rispettivamente 330 e 410 Mpa (alle due suddette profondità) e quindi, a parere dello scrivente, questo confronto dà forza a entrambe le elaborazioni, fermo restando che nel seguito si farà riferimento ai valori desunti dalle prove dilatometriche.

- **Raggruppamento 1: FYR_avc, FYR_cgp, FYR_ac, FYR_ar**

Anche per la caratterizzazione meccanica di questo raggruppamento, e per i successivi gruppi di matrice pelitica, si utilizzano le medesime elaborazioni descritte per FYR_agms.

In *Figura 4.11* sono rappresentati i risultati delle prove svolte sui terreni del raggruppamento in esame (costituente il primo gruppo elencato nel Capitolo 3) ed in *Figura 4.12* è illustrata l'interpolazione dei relativi dati. Da essa risulta $\tan\phi'=0.4125$ ($\phi'=22^\circ$) e c' (coesione) = **20 kPa**.

In merito alla caratterizzazione in condizioni non drenate, invece, i risultati sono illustrati in *Figura 4.13*. Dei tre andamenti raffigurati, è considerato più affidabile quello derivato dalle prove triassiali UU (i cui valori, fra l'altro, sono i più cautelativi), essendo queste ultime una misura diretta della grandezza in questione.

Il modulo elastico E è stato ricavato dalle prove dilatometriche. Da esse è stato possibile ricavare la variazione di E con la profondità, attraverso la retta interpolante i dati sperimentali (*Figura 4.14*).

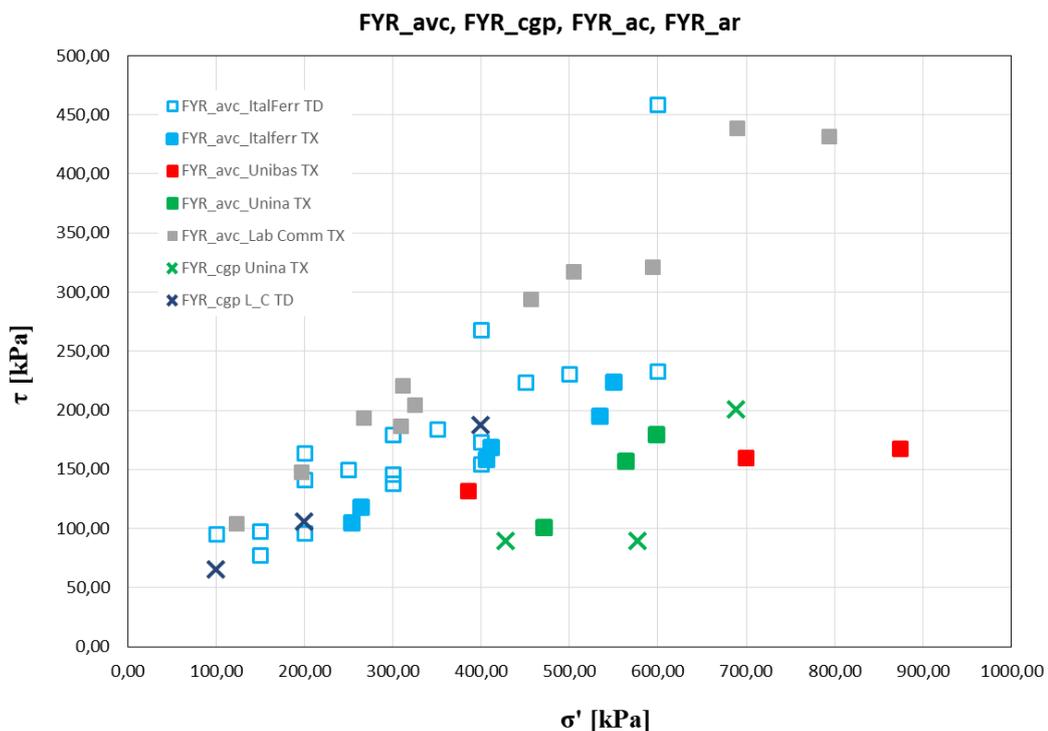


Figura 4.11. Risultati delle prove di taglio diretto e delle prove triassiali CIU da tutte le campagne geognostiche eseguite.

FYR_avc, FYR_cgp, FYR_ac, FYR_ar

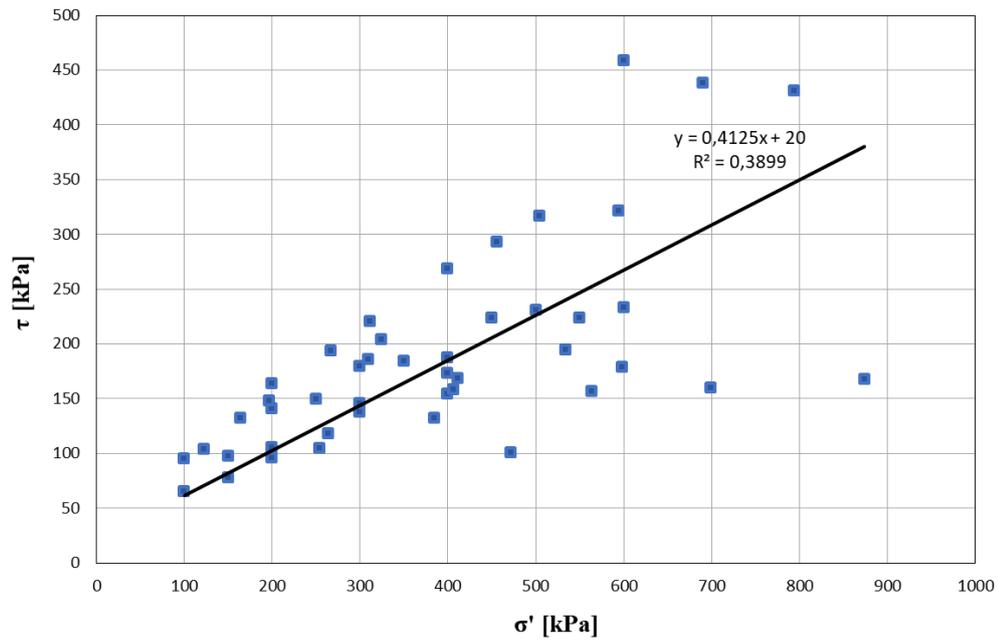


Figura 4.12. Interpolazione delle prove di taglio diretto e delle prove triassiali CIU, da tutte le campagne geonostiche eseguite.

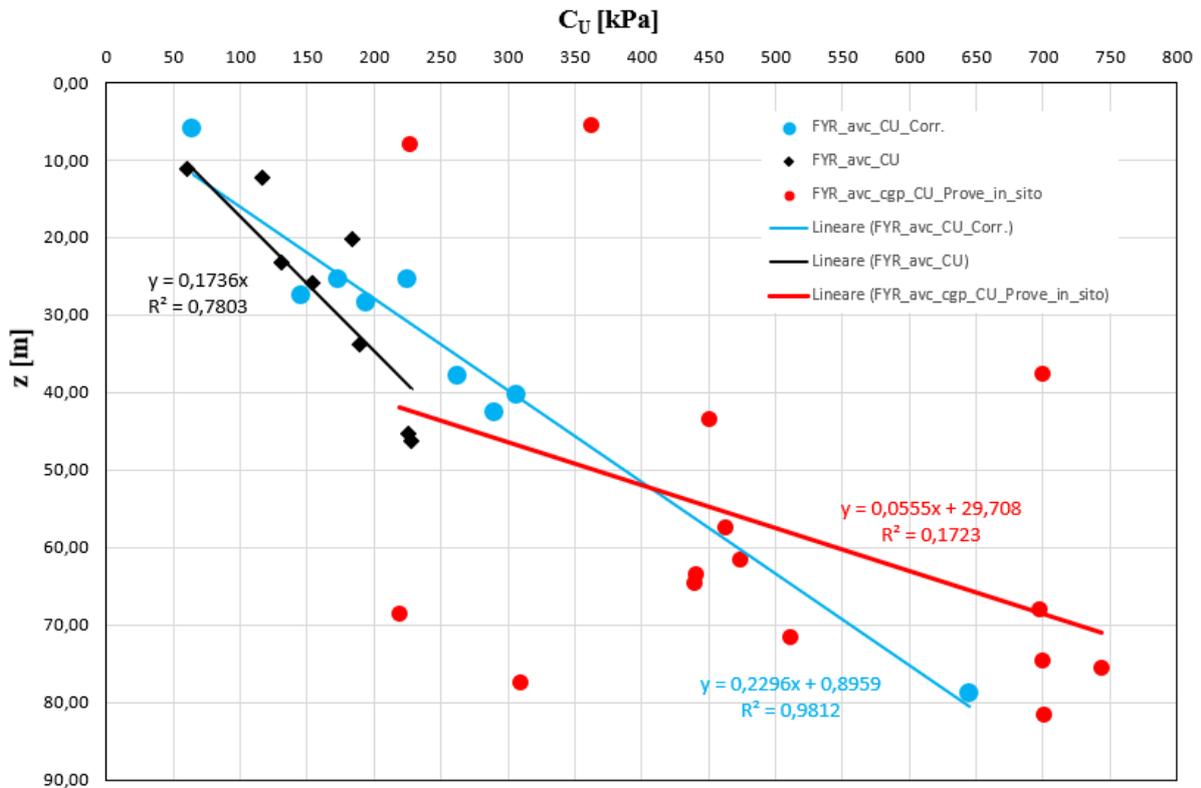


Figura 4.13. Valori della coesione non drenata: misure dirette da prove UU (rombi neri), correlazione con prove CIU (cerchi azzurri), correlazione con prove in foro (cerchi rossi).

Prova in sito FYR_avc-cgp-ar-ac

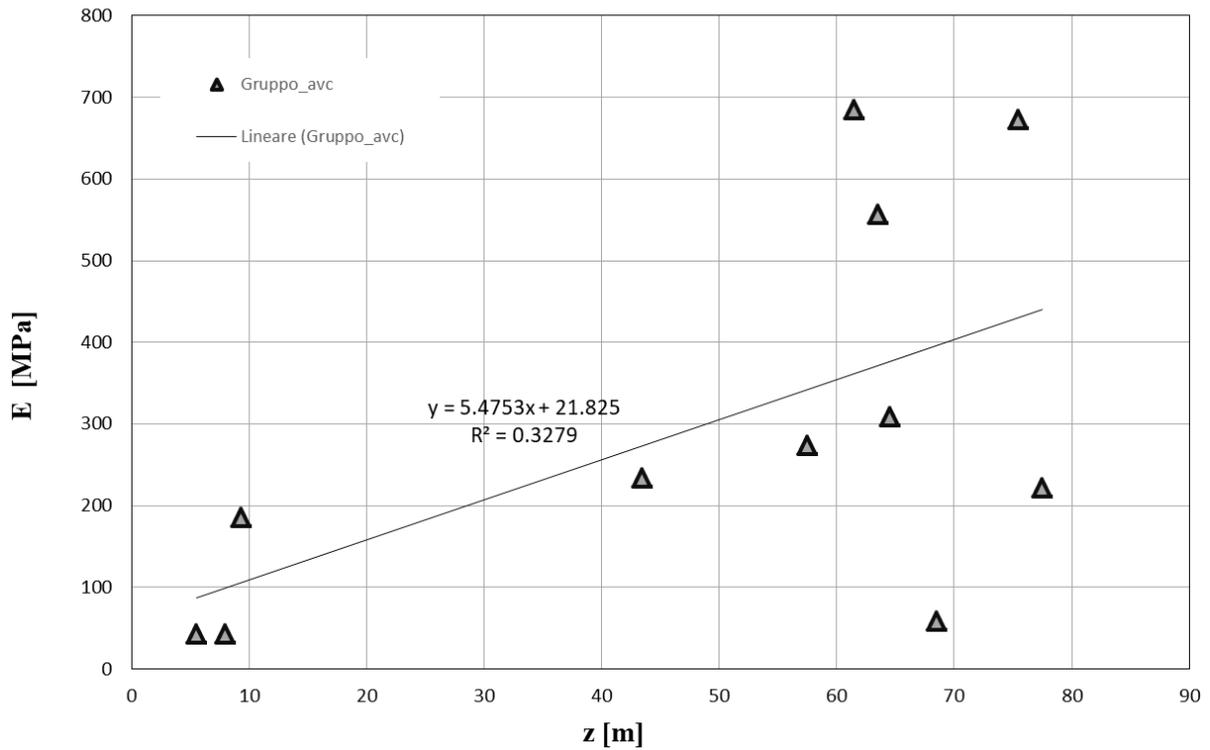


Figura 4.14. Interpolazione dei moduli di elasticità ottenuti da prove in foro (pressiometriche e dilatometriche).

• **Raggruppamento 2: FYR_2c, FYR_mar**

FYR_2c, FYR_mar

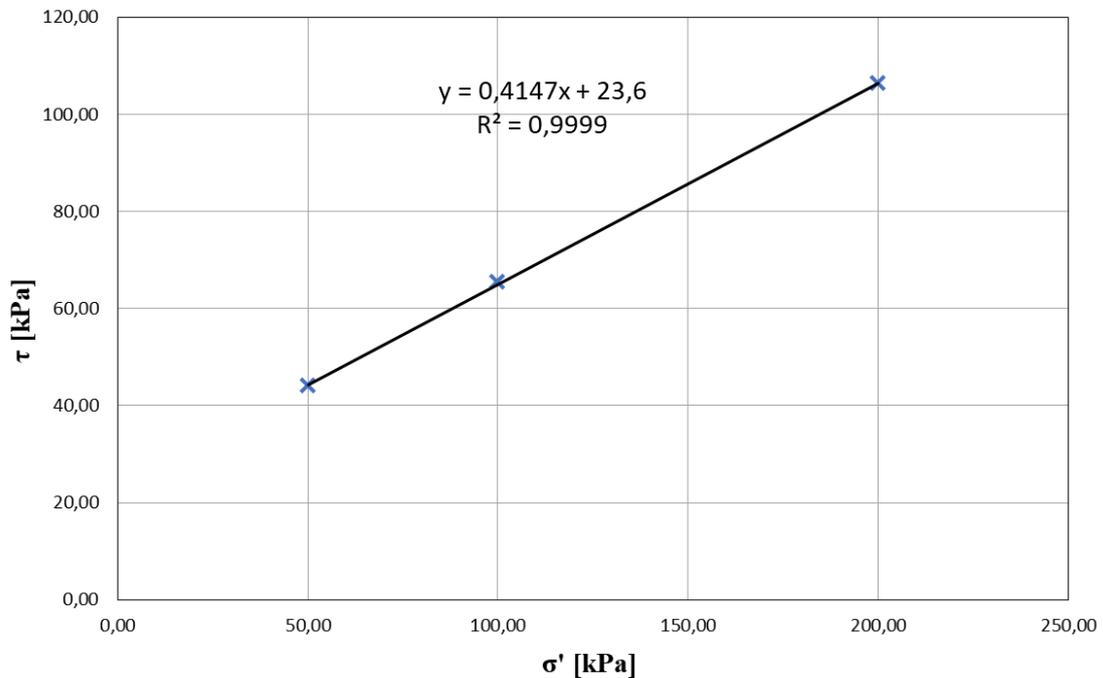


Figura 4.15. Interpolazione dei risultati delle prove di taglio diretto e delle prove triassiali CIU da tutte le campagne geognostiche.

In *Figura 4.15* sono rappresentati i risultati delle prove di taglio diretto eseguite sul raggruppamento in esame (costituente il secondo gruppo elencato nel Capitolo 3) ed è riportata l'interpolazione dei dati ottenuti. Da essa risulta $\tan\phi=0.4125$ ($\phi=22.5^\circ$) e c' (coesione) = **23 kPa**.

Per ciò che concerne la caratterizzazione dei parametri di deformabilità, il modulo elastico E è stato ottenuto dalle indagini condotte in sito. In realtà, in questo caso, come evidenziato dall'esiguità dei dati disponibili, per il raggruppamento in esame è possibile ricavare solo un singolo valore, pari a 500 Mpa, e non una funzione della profondità.

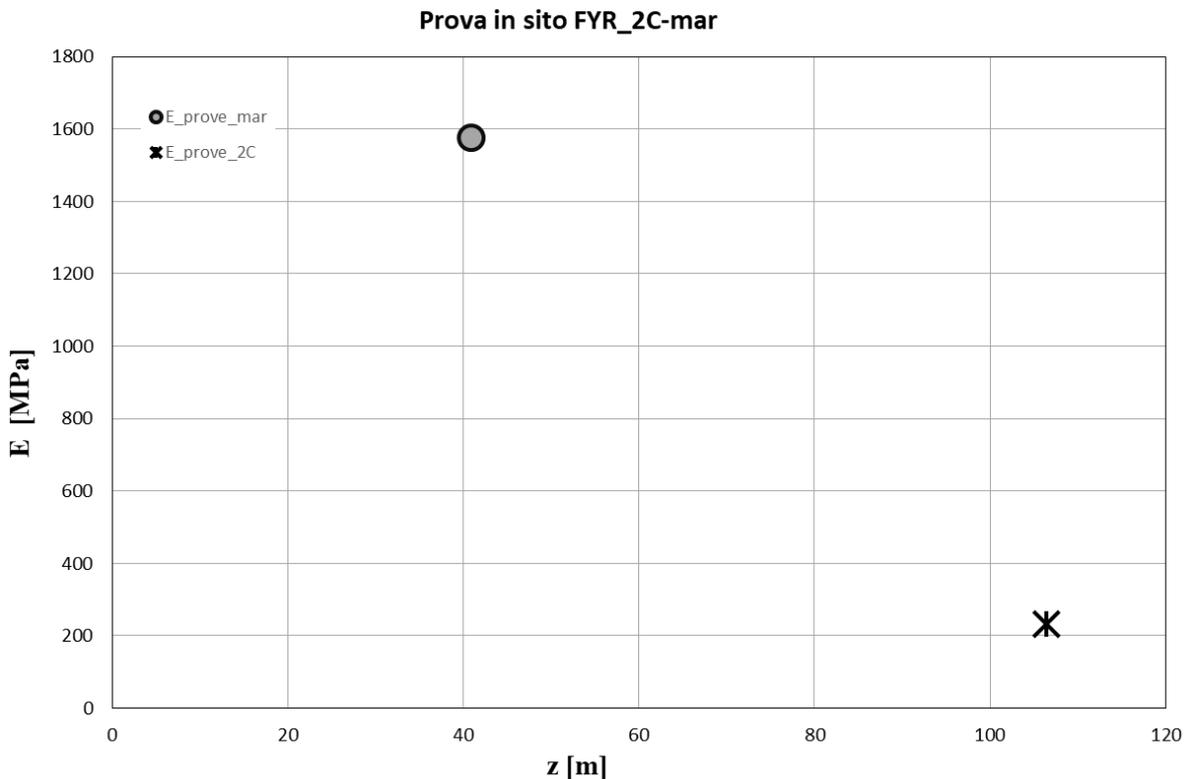


Figura 4.16. Risultati delle prove in foro (pressiometriche e dilatometriche).

- **Coltre in frana [cf]**

Sono state rilevate due coltri di frana, derivate dall'alterazione fisico-chimica dei terreni sottostanti. In *Figura 4.17* sono rappresentati i risultati delle prove svolte sulla prima di esse, sovrimposta alla facies FYR_agms, ed in *Figura 4.18* è illustrata l'interpolazione dei dati ottenuti. Da essa risulta $\tan\phi=0.3219$ ($\phi'=17.5^\circ$) e c' (coesione) = **16 kPa**.

In merito alla caratterizzazione in condizioni non drenate, invece, si dispone di una sola prova triassiale UU dalla quale si ottiene un valore della c_u pari a 70 kPa (assunto come riferimento) per un campione prelevato alla profondità di 9.75 m. Tale valore è stato anche confrontato con quelli

ottenuti dalla correlazione teorica illustrata in precedenza e con i risultati forniti dalle prove in situ, risultando il più cautelativo, come si evince dalla *Figura 4.19*.

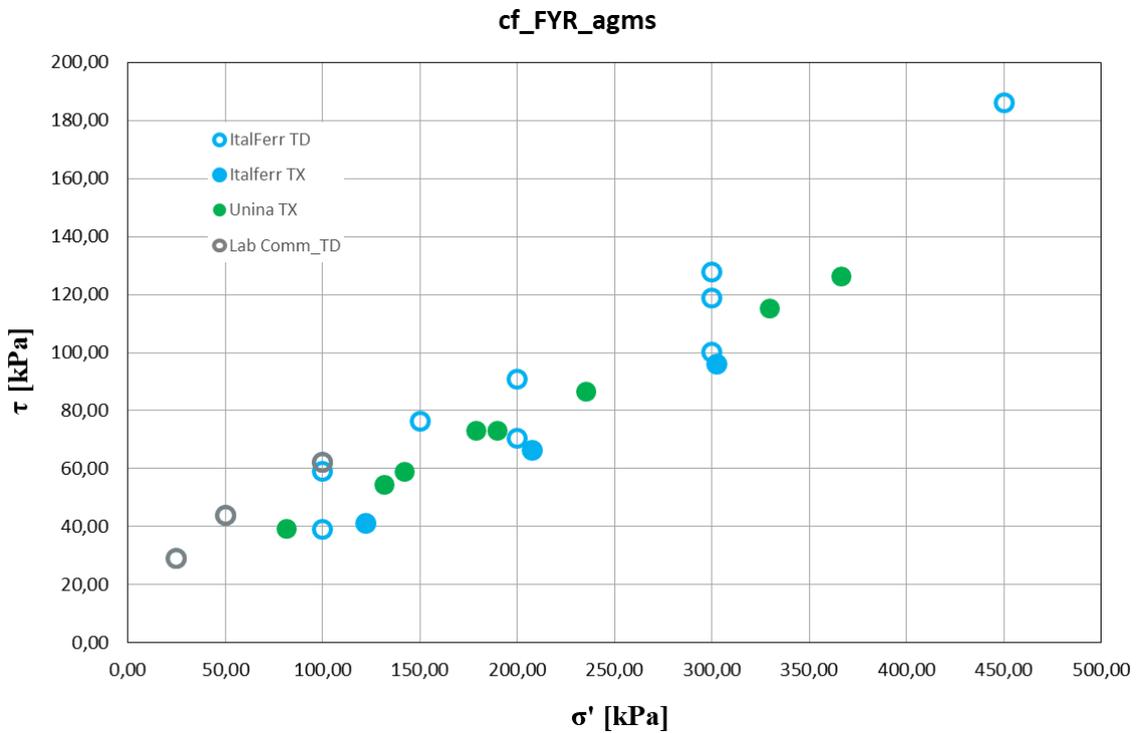


Figura 4.17. Risultati delle prove di taglio diretto e delle prove triassiali CIU da tutte le campagne geognostiche.

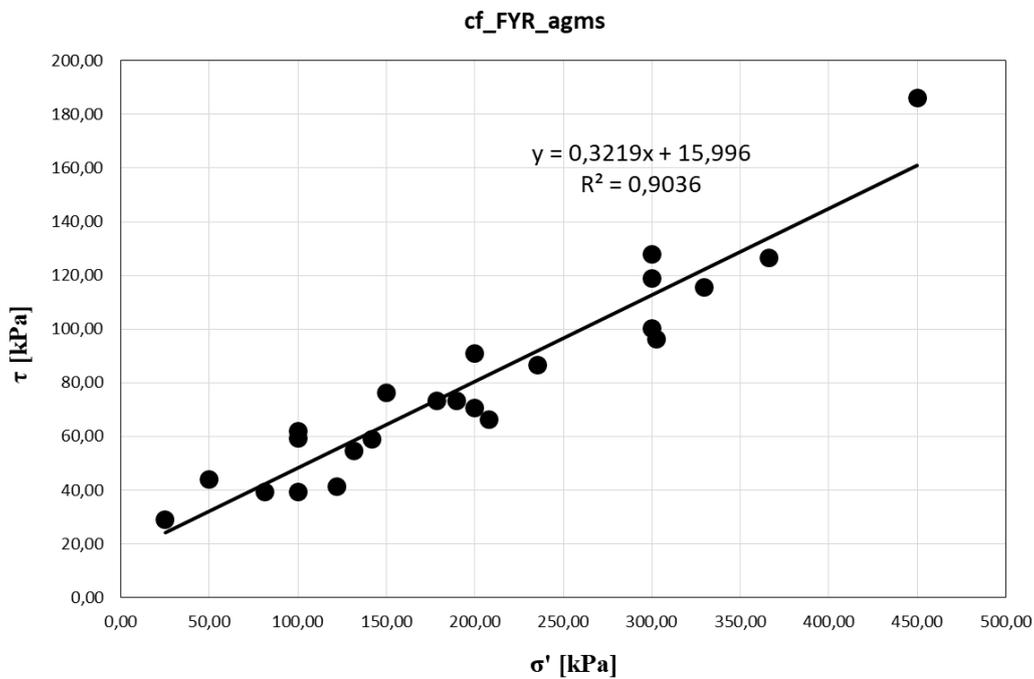


Figura 4.18. Interpolazione dei risultati delle prove di taglio diretto e delle prove triassiali CIU da tutte le campagne geognostiche.

Correlazione CU - cf/agms

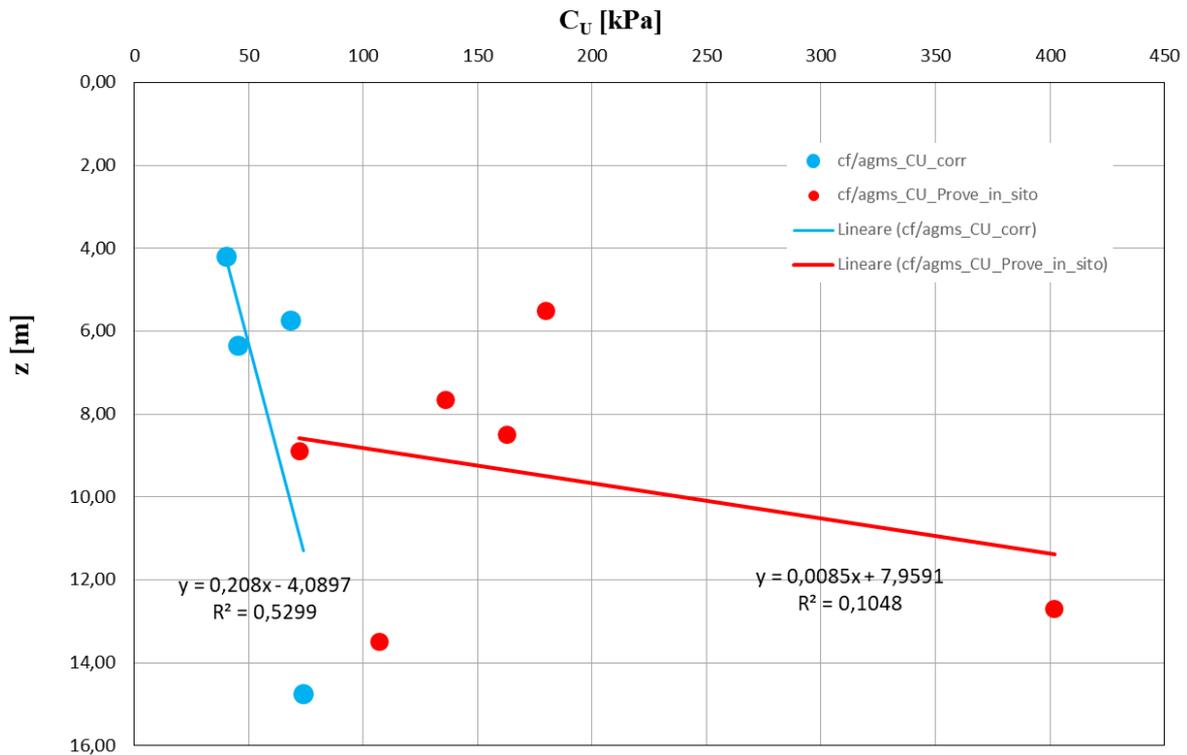


Figura 4.19. Coesione non drenata: interpolazione delle correlazioni con la prova CIU e con le prove in foro (pressiometriche e dilatometriche).

Per ciò che concerne la caratterizzazione dei parametri di deformabilità, l'individuazione del modulo elastico E derivante dalle indagini pressiometriche conduce alla determinazione di un valore medio pari a 20 Mpa.

In merito alla resistenza drenata della coltre di frana sovrapposta alla formazione FYR_ave., i dati di interesse sono riportati nelle figure che seguono. In Figura 4.20 sono rappresentati i risultati sperimentali ed in Figura 4.21 la loro interpolazione. Da essa risulta $\tan\phi=0.3519$ ($\phi'=19^\circ$) e c' (coesione) = 13 kPa.

cf_FYR_avc

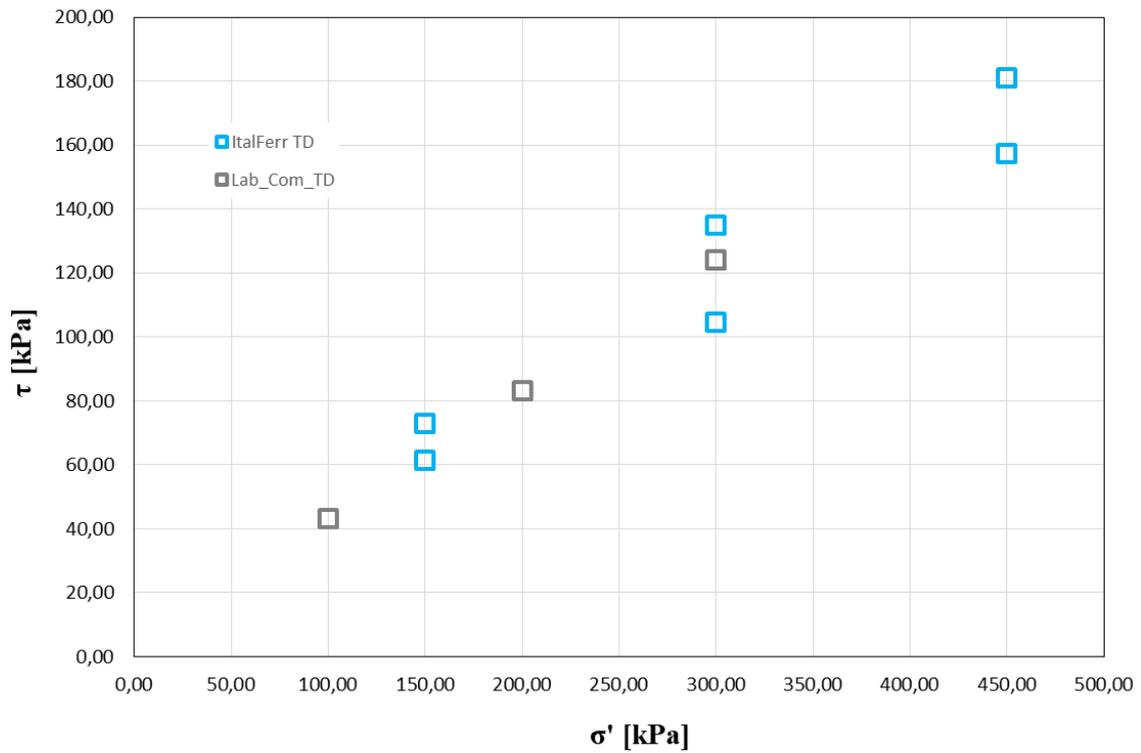


Figura 4.20. Risultati delle prove di taglio diretto da tutte le campagne geognostiche.

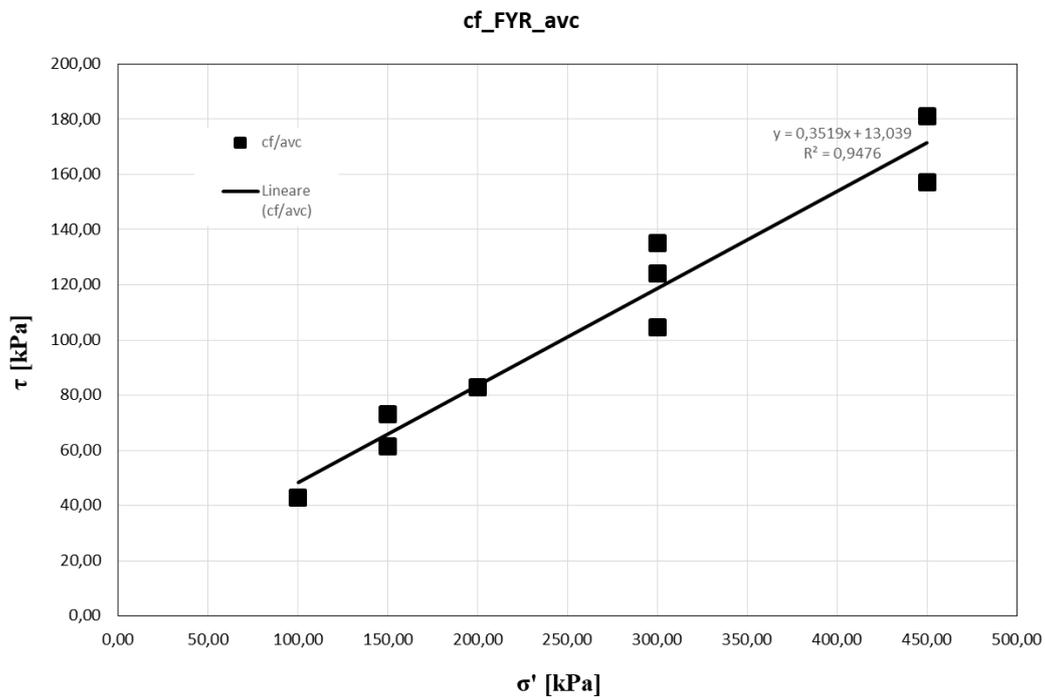


Figura 4.21. Interpolazione delle prove di taglio diretto da tutte le campagne geognostiche.

- Membro arenaceo argilloso della formazione di Anzano [ANZ2ar]

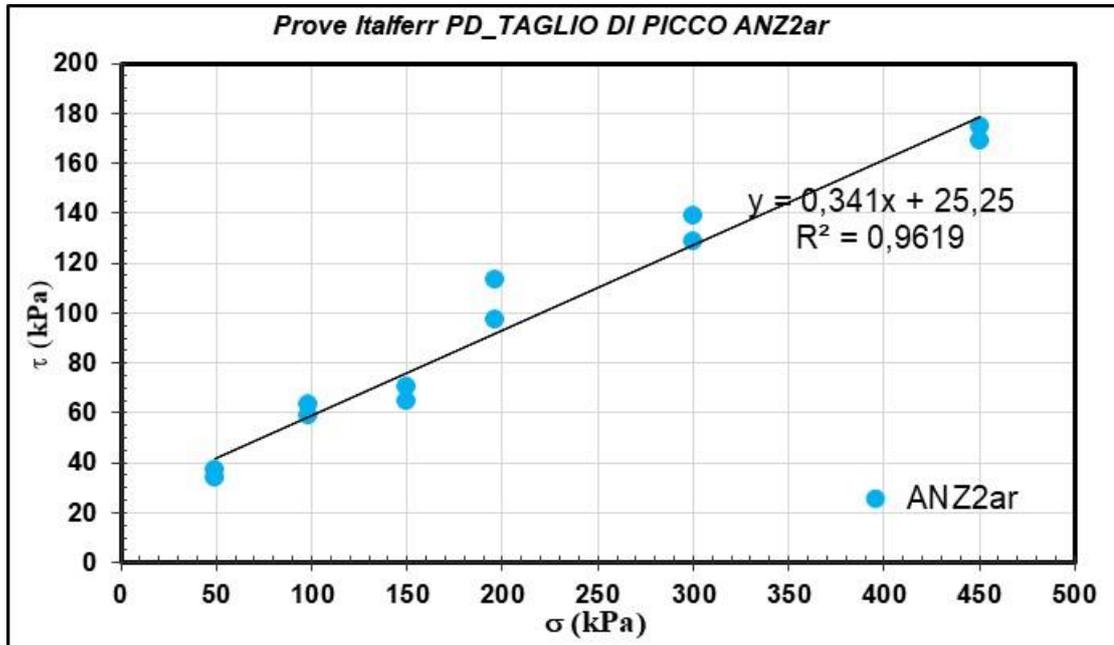


Figura 4.22. Risultati delle prove di taglio diretto della campagna Italferr.

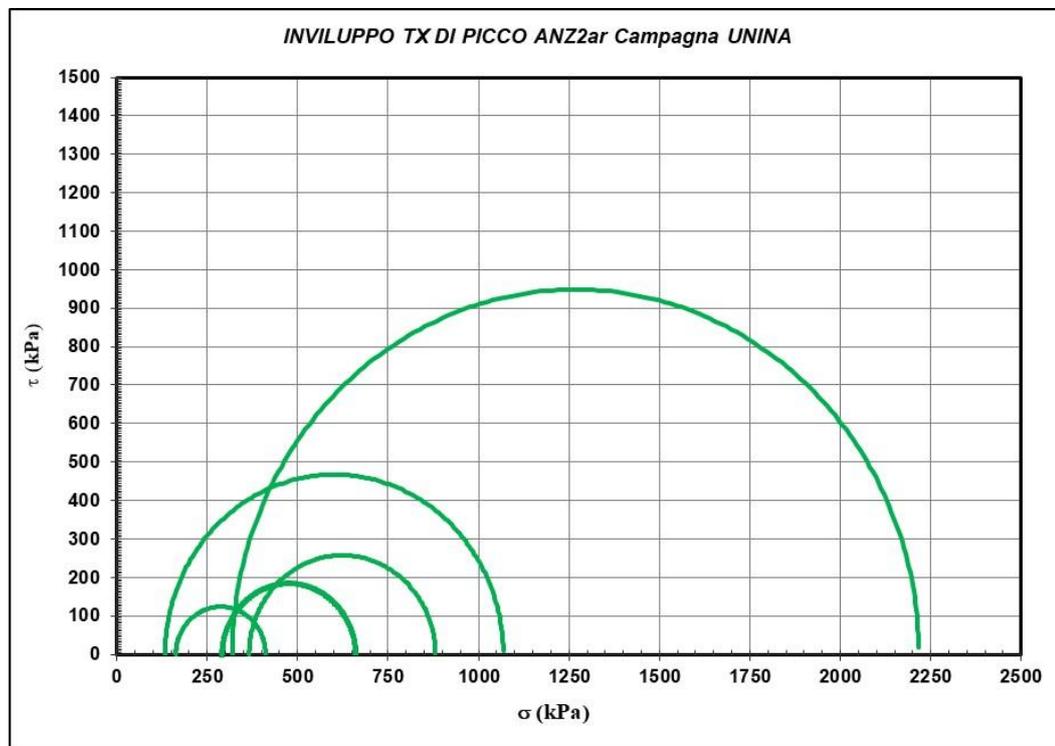


Figura 4.23. Prove triassiali CIU dalla campagna integrativa 2019 [Laboratorio UNINA].

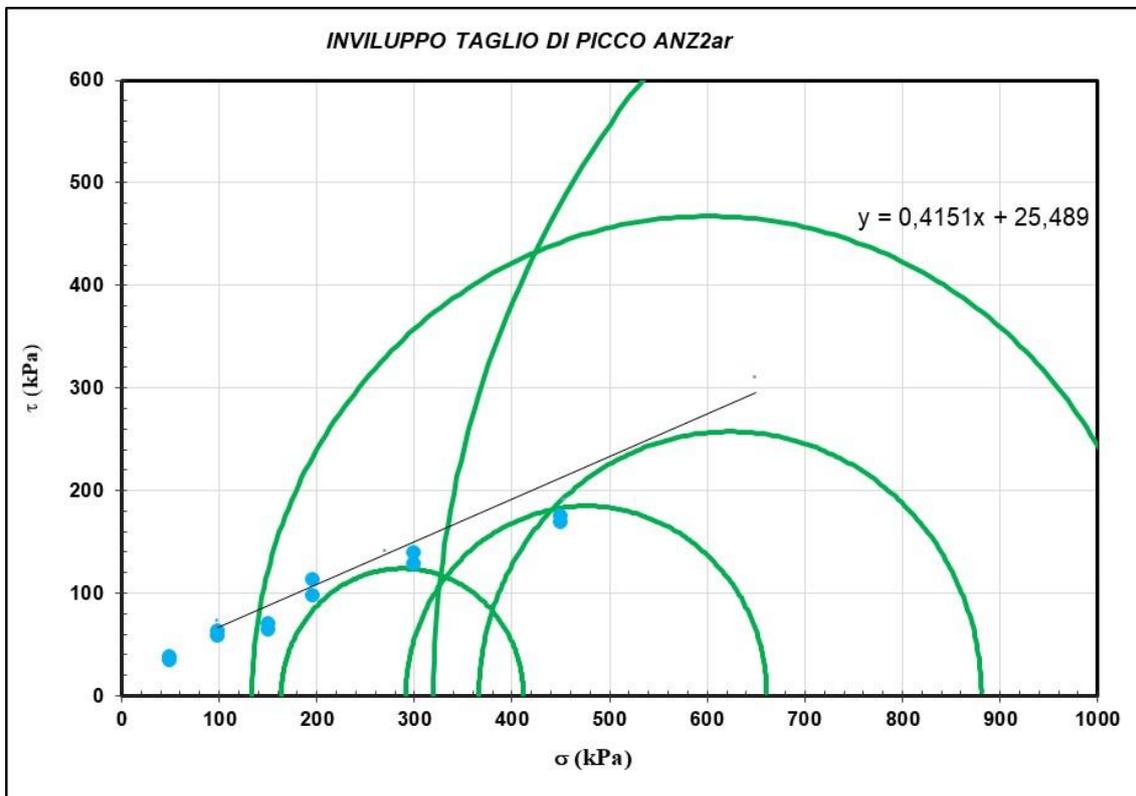
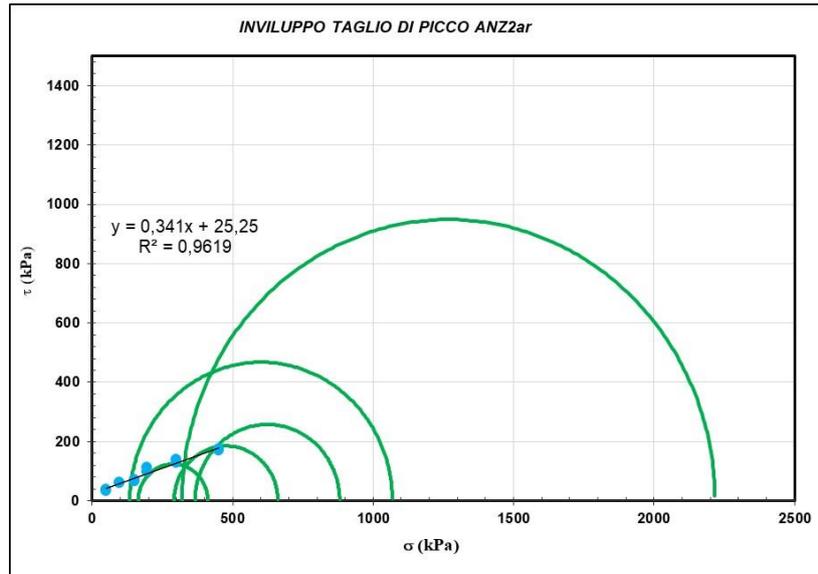


Figura 4.24. Inviluppo delle prove di taglio diretto e delle prove triassiali CIU da tutte le campagne geognostiche.

In Figura 4.24 sono rappresentati i risultati delle prove di taglio diretto svolte sulla matrice pelitica identificata come **ANZ2ar**. In figura è riportato anche l'inviluppo di resistenza determinato dalle prove triassiali. I valori di ϕ' e c' tengono conto dei risultati delle due prove triassiali condotte dal laboratorio UNINA (SN_Gr01_C2 prof 11,50-12,00 m) da cui risulta $\phi'=25.0^\circ$ e $c' = 7.00$ kPa ed SNGr01_C4 prof. 21.00-21.50 m da cui risulta

$\phi'=26.0^\circ$ e $c' = 78.00$ kPa) e dall'involuppo delle prove di taglio da cui risulta $\phi'=25.0^\circ$ e $c' = 19.00$ kPa.

Dall'interpretazione di tali dati in maniera unitaria risulta $\tan\phi'=0.415$ ($\phi'=22.0^\circ$) e c' (coesione) **25 kPa**.

Il modulo elastico relativo a tale formazione è stato assunto pari a:

$$E = 225 \text{ MPa} \quad \text{calotta}$$

$$E = 225 \text{ MPa} \quad \text{base.}$$

4.6. Caratterizzazione meccanica della componente lapidea

La determinazione dei moduli di elasticità della frazione lapidea (marne, arenarie e calcari) dell'ammasso del Flysch Rosso è stata eseguita secondo l'approccio proposto da Bieniawski (1973) [BIENIAWSKI Z.T. (1973). ENGINEERING CLASSIFICATION OF JONTEED ROCK MASSES. CIVIL ENGINEER IN SOUTH AFRICA, 15(12), PP.335-343] che per mezzo di correlazioni empiriche, ne definisce una stima.

La correlazione lega il modulo di deformabilità agli indici di classificazione adottati negli studi geomeccanici, nello specifico all'indice RMR (Rock Mass Rating), nell'ipotesi semplificativa di assimilare l'ammasso roccioso ad un mezzo "continuo" equivalente.

Nello specifico adottando la classifica RMR, si prende in considerazione la seguente correlazione (applicabile solo per valori di RMR superiori a 55) tra modulo di deformabilità e indice RMR:

$$E(\text{GPa}) = 2 \cdot \text{RMR} - 100$$

Dove RMR è la somma dei sei parametri:

A1 = resistenza a compressione uniassiale;

A2 = *Rock Quality Designation Index* (Indice RQD);

A3 = spaziatura delle discontinuità;

A4 = condizioni delle discontinuità;

A5 = condizioni idrauliche;

A6 = orientamento delle discontinuità.

Tali parametri sono raggruppati in cinque intervalli, la cui somma permette di suddividere gli ammassi rocciosi in altrettante cinque classi di qualità.

Tabella 4.1. Classificazione di Bieniawski

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter			Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
	Rating	15	12	7	4	2	1	0	
2	Drill core Quality RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of		> 2 m	0.6 - 2 . m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock.	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Groundwater	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Joint water press)/ (Major principal σ)	0	< 0.1	0.1, - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating		15	10	7	4	0		
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations			Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnels & mines		0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations		0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes		0	-5	-25	-50			
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS									
Rating	100 ← 81		80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21			
Class number	I		II	III	IV	V			
Description	Very good rock		Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock			
D. MEANING OF ROCK CLASSES									
Class number	I		II	III	IV	V			
Average stand-up time	20 yrs for 15 m span		1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span			
Cohesion of rock mass (kPa)	> 400		300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100			
Friction angle of rock mass (deg)	> 45		35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15			
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions									
Discontinuity length (persistence)	< 1 m		1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m			
Rating	6		4	2	1	0			
Separation (aperture)	None		< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm			
Rating	6		5	4	1	0			
Roughness	Very rough		Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided			
Rating	6		5	3	1	0			
Infilling (gouge)	None		Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm			
Rating	6		4	2	2	0			
Weathering	Unweathered		Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed			
Ratings	6		5	3	1	0			
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**									
Strike perpendicular to tunnel axis					Strike parallel to tunnel axis				
Drive with dip - Dip 45 - 90°			Drive with dip - Dip 20 - 45°		Dip 45 - 90°		Dip 20 - 45°		
Very favourable			Favourable		Very unfavourable		Fair		
Drive against dip - Dip 45-90°			Drive against dip - Dip 20-45°		Dip 0-20 - Irrespective of strike*				
Fair			Unfavourable		Fair				

* Some conditions are mutually exclusive. For example, if infilling is present, the roughness of the surface will be overshadowed by the influence of the gouge. In such cases use A.4 directly.

** Modified after Wickham et al (1972).

- **Marne ed arenarie**

Si considerano i risultati delle prove di carico del tipo Point Load sui campioni prelevati dal sondaggio SN Me05:

- C.LIT1 prelevato da SN E05 a m da p.c. 94.40÷94.60 m: $I_{s(50)} = 0.71 \text{ N/mm}^2$
- C.LIT2 prelevato da SN ME05 a m da p.c. 102.10÷102.35 m: $I_{s(50)} = 0.63 \text{ N/mm}^2$
- C.R. n° 12 prelevato da SN ME05 a m da p.c. 109.50÷110.0 m: $I_{s(50)} = 0.76 \text{ N/mm}^2$
- C.R. n° 8 prelevato da SN ME05 a m da p.c. 70.15÷70.80 m: $I_{s(50)} = 0.08 \text{ N/mm}^2$
- C.R. n° 9 prelevato da SN ME05 a m da p.c. 80.30÷80.80 m: $I_{s(50)} = 0.46 \text{ N/mm}^2$

nonché i risultati della prova di compressione uniassiale su un provino di laboratorio:

- C.Rim 11 prel.da SN ME05 a m da p.c. 99.60÷100.00 m: Resist. a compr. = 6.46 MPa

A1 = 2: resistenza a compressione uniassiale;

A2 = 13: *Rock Quality Designation Index* (Indice RQD);

A3 = 10: spaziatura delle discontinuità;

A4 = 20: condizioni delle discontinuità;

A5 = 10: condizioni idrauliche;

A6 = -2: orientamento delle discontinuità.

$$\text{RMR} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6 = 53.$$

$$\mathbf{E = 2 \cdot 53 - 100 = 6GPa = 6000 MPa}$$

Il modulo E ricavato dalla suddetta correlazione è ritenuto significativo per le arenarie, a meno di una modesta penalizzazione che si applicherà nel seguito per ragioni meramente cautelative, stante l'incertezza della procedura di determinazione. Tale valore invece non può essere applicato alle marne, che sicuramente in certe parti sono consistenti e rigide e potrebbero esibire il valore del modulo E appena calcolato, ma in altre zone potrebbero essere fortemente ammorbidite ed essere caratterizzate da un valore di E decisamente minore. Fra l'altro, proprio intorno al cavo della galleria, i liquidi usati per la perforazione potrebbero contribuire all'ammorbidimento.

È evidente che questo approccio deriva dall'esperienza personale dello scrivente e non può essere circostanziato in modo oggettivo.

- **Calcari**

Per i calcari, le prove sull'elemento di volume hanno fornito valori di E variabili fra 12000 e 48000 kPa con una concentrazione di dati sperimentali verso l'estremo superiore del suddetto intervallo. Per tali dati sperimentali si rimanda alle relazioni dei laboratori commerciali che hanno contribuito alla caratterizzazione dei materiali.

Per quanto riguarda la correlazione di Bieniawski si è fatto riferimento ai dati di ingresso rilevati nei sondaggi ed in particolare al sondaggio SN_ME07 alla profondità di 70-80 m:

A1 = 4: resistenza a compressione uniassiale;

A2 = 20: *Rock Quality Designation Index* (Indice RQD);

A3 = 10: spaziatura delle discontinuità;

A4 = 20: condizioni delle discontinuità;

A5 = 15: condizioni idrauliche;

A6 = 0: orientamento delle discontinuità.

$$RMR = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6 = 69.$$

$$E = 2 \cdot 69 - 100 = 38 \text{ GPa} = 38000 \text{ MPa}$$

Alle considerazioni innanzi sviluppate si aggiungono, per i calcari, i risultati ottenuti dalle prove dilatometriche eseguite nei fori di sondaggio. Infatti in talune circostanze la prova è stata eseguita in corrispondenza di un tratto costituito da soli calcari (ciò è stato osservato dalle foto delle cassette catalogatrici allegate alla relazione sulle prove dilatometriche), per cui è stato possibile determinare che il valore medio ricavabile da queste prove è pari a circa 20000 Mpa.

Considerati tutti gli aspetti e le incertezze finora descritte, al fine di trarre valori dei moduli di deformabilità che fossero rappresentativi del comportamento meccanico dell'ammasso alla scala reale e fossero allo stesso tempo cautelativi, per la necessità di tener in conto variabilità locali del quadro di fratturazione e fessurazione che potrebbero determinare zone di debolezza e possibili processi di ammorbidimento dei materiali plastici (come ad esempio le marne), si è operata una decurtazione dei moduli innanzi ricavati, basata soprattutto sull'esperienza dello scrivente che risulta difficile esprimere in forma oggettiva:

Calcari: $E = 15000 \text{ Mpa}$;

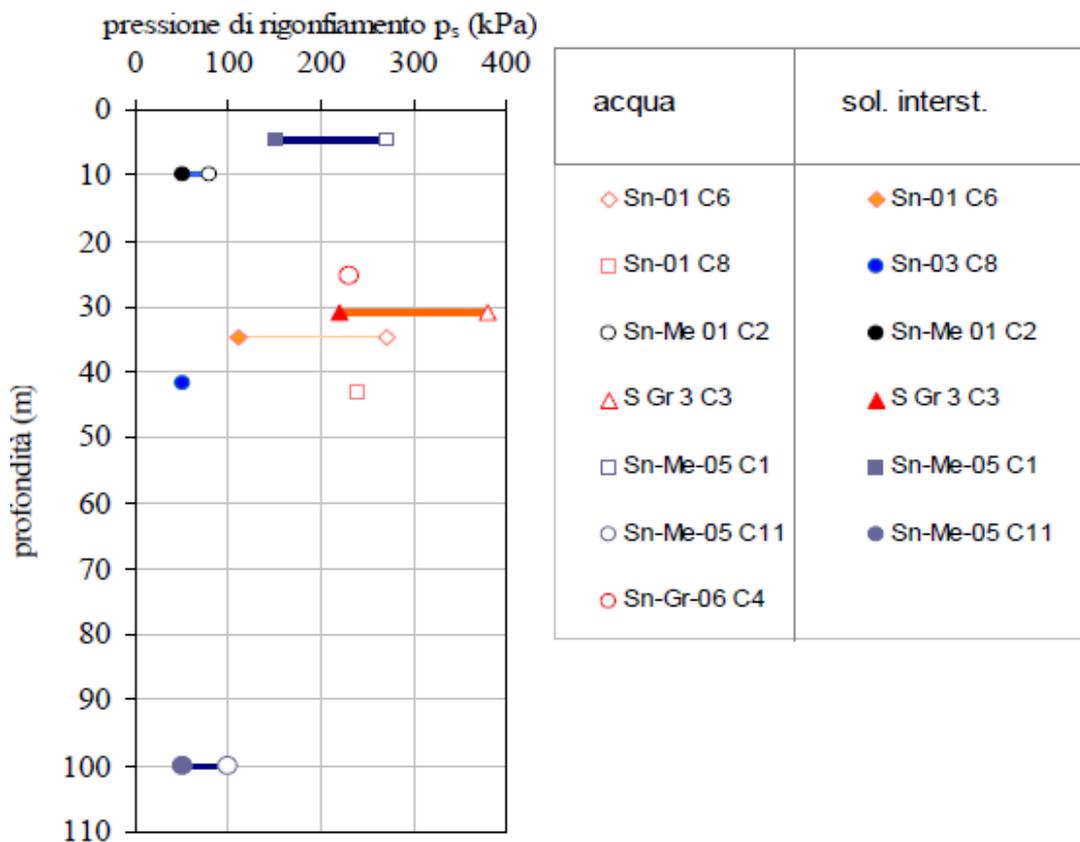
Arenarie: $E = 5000 \text{ Mpa}$;

Marne: $E = 1500 \text{ Mpa}$.

4.7. Considerazioni sulla pressione di rigonfiamento

Tra le prove condotte presso il laboratorio di Geotecnica dell'Università degli Studi della Basilicata, su alcuni campioni è stata determinata la pressione di rigonfiamento in edometro seguendo il "Metodo C" dello standard ASTM D4546; come fluido di cella è stata usata acqua distillata oppure, in alternativa, una soluzione acquosa ionica simile a quella naturale dell'acqua interstiziale, preventivamente determinata dallo stesso laboratorio.

Figura 4.25. Pressione di rigonfiamento di provini a contatto con acqua e con soluzione naturale.



Per le varie matrici del Flysch Rosso, definite nel presente studio, si sono osservate le seguenti pressioni di rigonfiamento, di cui il primo valore si riferisce all'acqua naturale, il secondo all'acqua distillata:

Sn-01 C6; Sn-01 C8: [Formazione FYR agms] P = 150 kPa/280 kPa;

Sn-Me 05 C1: [Formazione BNa2as (baronia)] P = 180 kPa/280 kPa;

SGr3 C3: [Formazione FYR avc] P= 210 kPa/380 kPa

Sn Me 05 C11 [Formazione PLC (vallone ponticello)] P = 70 kPa/100 kPa

Sn Gr 06 C4 [Formazione FYR avc] P= ??/250 kPa.

I maggiori incrementi si riscontrano per la facies FYRagms e per la facies FYRavc, in linea con quanto rappresentato dalla carta di plasticità ove, la facies FYRagms (*Figura 3.6*) è caratterizzata da un indice di plasticità I_p che varia tra 30 e 70, classificabile come materiale di alta plasticità; analogamente la facies FYRavc (*Figura 3.2*) ha un indice di plasticità I_p che varia tra 20 e 50, che indica media/alta plasticità.

Si osservi che il rapporto fra le pressioni di rigonfiamento determinate in acqua salina (il cui contenuto ionico è quello dell'acqua naturale) e in acqua distillata varia fra 0.55 e 0.70. Questo rapporto dipende dalle proprietà osmotiche delle particelle argillose e dell'acqua interstiziale, per cui può essere assunto significativo per tutti i materiali investigati.

La pressione di rigonfiamento dipende soprattutto dalla profondità di prelievo del campione, ossia dalla pressione neutra residua che rimane impressa nel materiale dopo il campionamento, quindi non è lecito estendere ai terreni profondi i valori di pressione di rigonfiamento determinati su campioni superficiali; è lecito estendere invece ad essi il limite superiore del rapporto prima determinato. In altri termini, a parere dello scrivente, si può ridurre al 70% la pressione di rigonfiamento determinata in acqua distillata sui terreni profondi per ottenere la pressione di rigonfiamento corrispondente alla medesima sperimentazione in una soluzione di acqua interstiziale.

4.8. Considerazioni sugli effetti del creep

Presso il laboratorio dell'Università della Basilicata sono state eseguite n. 4 prove di creep deviatorico, che hanno messo in evidenza la significativa presenza di deformazioni secondarie nei terreni esaminati. Le prove sono state eseguite per diversi livelli deviatorici.

È ben noto che le deformazioni viscosi non hanno natura elastica e quindi a rigore non hanno alcuna relazione col modulo di deformabilità che è definito come parametro del modello elastico lineare, omogeneo ed isotropo. Ciò nonostante per consentire al progettista di portare in conto il comportamento viscoso di questi terreni in modo semplice e speditivo lo scrivente ha scelto di conglobare le deformazioni di creep in quelle elastiche e calcolare un modulo globale equivalente (E_{creep}) che ovviamente risulta minore di quello elastico (E_{el}), come mostrato in figura 4.27.

I dati disponibili riguardano le matrici FYRagms e FYR2c. Per la matrice FYRagms sono stati sottoposti a prova n. 5 provini prelevati dai campioni Sn-02-C2 (2 provini), Sn-04-C3 (1 provino) e Sn-04-C6 (2 provini). Sul primo campione sono state eseguite una prova di creep sul primo provino e una sul secondo. Dal secondo campione è stato estratto un solo provino, sul quale sono state

eseguite tre prove di creep a livelli deviatorici crescenti. Dal terzo campione è stato estratto un primo provino sul quale sono state condotte due prove di creep a due livelli deviatorici diversi e un secondo provino su cui sono state eseguite tre prove di creep a diversi livelli deviatorici.

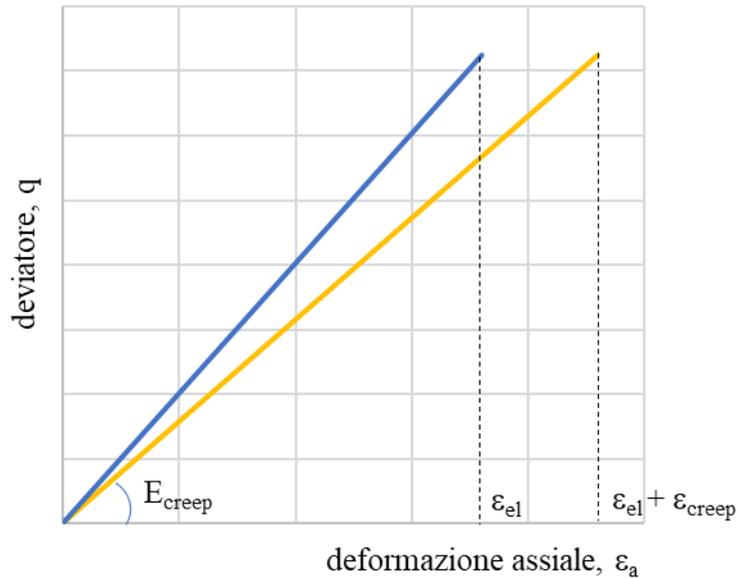


Figura 4.26. Definizione del modulo di deformabilità globale equivalente, E_{creep} .

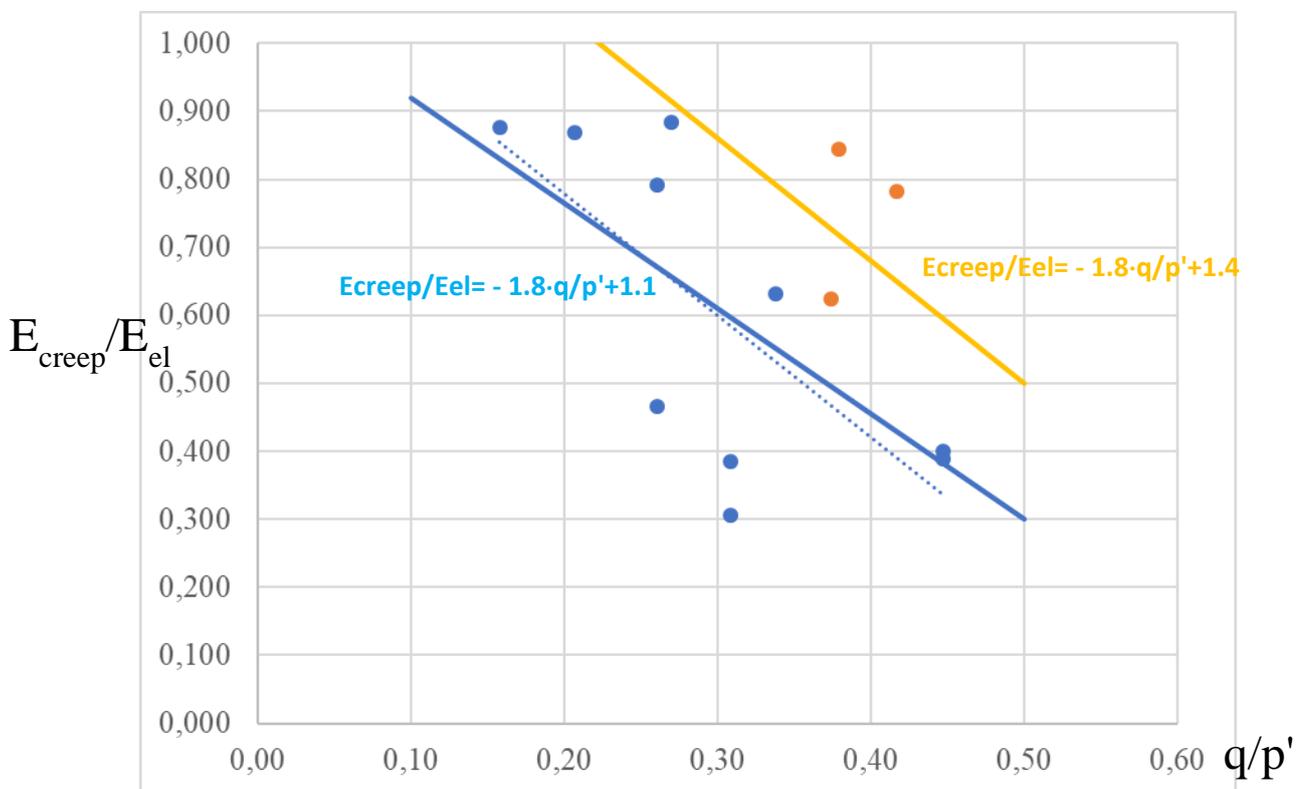


Figura 4.27. Rapporto E_{creep}/E_{el} in funzione del livello deviatorico per i terreni FYRagms (punti azzurri) e FYR2c (punti gialli).



Per la matrice FYR2c sono stati sottoposti a prova n. 2 provini prelevati dal campione Sn-Me01-C2. Sono state eseguite una prova di creep sul primo provino e due sul secondo a livelli deviatorici crescenti.

I risultati sono riportati in figura 4.27 in funzione del rapporto q/p' , laddove p' è la tensione efficace di confinamento dei provini applicata in cella triassiale. Il rapporto E_{creep}/E_{el} decresce fortemente col rapporto q/p' ed è decisamente minore per FYRagms rispetto a FYR2c. Ciò si giustifica con la maggiore attività della matrice FYRagms rispetto alla matrice FYR2c. Le leggi di variazione sono riportate in figura 4.27.

4.9. Riepilogo e conclusioni

Si riportano nel seguito due tabelle riepilogative con la descrizione litologica dei terreni, distinti nelle diverse facies del Flysch Rosso, rilevate alle varie progressive chilometriche del tracciato delle gallerie di Grottaminarda e Melito, ed individuate nell'ambito delle campagne di indagini geognostiche pregresse, allegate al progetto definitivo, e della campagna di indagini integrativa 2019-2020.

In particolare, nella prima tabella si sintetizzano le leggi ritrovate nei diagrammi delle pagine precedenti, relative alle variazioni di E (E_{el}) e di c_u con la profondità, per ciascuna delle matrici pelitiche o dei gruppi di matrici dei "gruppi FYR".

Nella seconda si riportano le caratteristiche di resistenza e deformabilità della matrice, della porzione lapidea e dell'ammasso; queste ultime sono quelle significative ai fini della progettazione.

Le caratteristiche meccaniche della matrice per ciascuna facies del Flysch Rosso sono il frutto della elaborazione delle prove di laboratorio condotte sui campioni indisturbati testati presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale dell'Università di Napoli Federico II (DICEA) e presso il laboratorio di Geotecnica dell'Università degli Studi della Basilicata, presso i laboratori commerciali, nonché dei risultati delle campagne di indagini pregresse allegate al progetto definitivo. Per quanto riguarda la deformabilità i dati di laboratorio sono stati integrati con i risultati delle prove dilatometriche.

GRUPPO	E [MPa]	C_u [kPa]
Raggruppamento 1: FYR_avc, FYR_cgpc, FYR_ac, FYR_ar	$E (Mpa) = 5,4753 \cdot z (m) + 21,825 (MPa)$	$C_u (kPa) = 0,1736 \cdot z (m)$
Raggruppamento 2: FYR_2c, FYR_mar	$E_{2c} = 230$ $E_{mar} = 500$	
Argille grigie marnoso-scagliose [FYRagms]	$E(Mpa) = 8,2768 \cdot z (m)$	$C_u(kPa) = 0,1922 \cdot z (m)$

GALLERIA GROTTAMINARDA

Descrizione litologica	MATRICE		LAPIDEO	AMMASSO	
<p>FYR avc Argille policrome alternate a strati calcarei dello spessore di 50 cm/1m. Peliti 80% ; Lapideo 20%.</p>	<p>Peso di volume [kN/m³] = 20 Coesione drenata [kPa] = 20 Angolo di att. ϕ' = 22°</p>	<p>Modulo di Def.: E_(10 m) = 75 MPa E_(20 m) = 130 MPa E_(30 m) = 185 MPa E_(40 m) = 240 MPa E_(50 m) = 295 MPa E_(60 m) = 350 MPa E_(70 m) = 405 MPa E_(80 m) = 455 MPa</p>	<p>CALCARI Peso di volume [kN/m³] = 22 Modulo di def.: E = 15000 MPa</p>	<p>Peso di volume [kN/m³] = 20 Coesione drenata [kPa] = 20 Angolo di att. ϕ' = 22°</p>	<p>Modulo di def.: E_(10 m) = 75 MPa E_(20 m) = 130 MPa E_(30 m) = 185 MPa E_(40 m) = 240 MPa E_(50 m) = 295 MPa E_(60 m) = 350 MPa E_(70 m) = 405 MPa E_(80 m) = 455 MPa</p>
<p>FYR 2C Calciruditi lapidee e breccie calcaree in matrice argillosa, alternate a livelli metrici di marne ed argille rosse Peliti 30% Lapideo 70% GDP 20% 80%.</p>	<p>Peso di volume [kN/m³] = 20 Coesione drenata [kPa] = 23 Angolo di attr. ϕ' = 22.5 Modulo di def.: E = 230 MPa</p>		<p>CALCARI Peso di volume [kN/m³] = 22 Modulo di def.: E = 15000 MPa</p>	<p>Peso di volume [kN/m³] = 21.5 Coesione Drenata [kPa] = 23 Angolo di Att. ϕ' = 36.5° Modulo di def.: E = 870 MPa</p>	
<p>FYRmar+FYRar Marne ed arenarie lapidee con sottili livelli pelitici dell'unità del Flysch Rosso Peliti 30% Lapideo 70%</p>	<p>Peso di volume [kN/m³] = 20 Coesione drenata [kPa] = 20 Angolo di att. ϕ' = 22°</p>	<p>Modulo di Def.: E_(10 m) = 75 MPa E_(20 m) = 130 MPa E_(30 m) = 185 MPa E_(40 m) = 240 MPa E_(50 m) = 295 MPa E_(60 m) = 350 MPa E_(70 m) = 405 MPa E_(80 m) = 455 MPa</p>	<p>MARNE e ARENARIE: Peso di volume [kN/m³] = 22 Modulo di def.: E = 1500 MPa</p>	<p>Peso di volume [kN/m³] = 21.5 Coesione drenata [kPa] = 20 Angolo di att. ϕ' = 36°</p>	<p>Modulo di def.: E_(10 m) = 250 MPa E_(20 m) = 395 MPa E_(30 m) = 515 MPa E_(40 m) = 615 MPa E_(50 m) = 705 MPa E_(60 m) = 780 MPa E_(70 m) = 845 MPa E_(80 m) = 900 MPa</p>

Descrizione litologica	MATRICE		LAPIDEO	AMMASSO	
<p>FYRagms Argille grigie marnoso-scagliose, molto consistenti, alternate a sottili livelli di marne e calcilutiti. Peliti 90% Lapideo 10%</p>	<p>Peso di volume [kN/m³] = 20 Coesione drenata [kPa] = 75 Angolo di att. ϕ' = 16.5°</p>	<p>Modulo di def.: E_(10 m) = 80 MPa E_(20 m) = 165 MPa E_(30 m) = 245 MPa E_(40 m) = 330 MPa E_(50 m) = 410 MPa E_(60 m) = 495 MPa E_(70 m) = 575 MPa E_(80 m) = 660 MPa</p>	<p>CALCARI Peso di volume [kN/m³] = 22 Modulo di def.: E = 15000 MPa</p>	<p>Peso di volume [kN/m³] = 20 Coesione drenata [kPa] = 75 Angolo di att. ϕ' = 16.5°</p>	<p>Modulo di Def.: E_(10 m) = 80 MPa E_(20 m) = 165 MPa E_(30 m) = 245 MPa E_(40 m) = 330 MPa E_(50 m) = 410 MPa E_(60 m) = 495 MPa E_(70 m) = 575 MPa E_(80 m) = 660 MPa</p>
<p>FYRmar Calcilutiti e peliti del Flysch Rosso Peliti 40% Lapideo 60%</p>	<p>Peso di volume [kN/m³] = 20 Coesione drenata [kPa] = 23 Angolo di att. ϕ' = 22.5° Modulo di def.: E = 500 MPa</p>		<p>CALCARI Peso di volume [kN/m³] = 22 Modulo di def.: E = 15000 MPa</p>	<p>Peso di volume [kN/m³] = 21 Coesione drenata [kPa] = 23 Angolo di att. ϕ' = 33° Modulo di def.: E = 1380 MPa</p>	
<p>FYRcgp Conglomerati e breccie poligeniche in matrice argillosa Peliti 30% Lapideo 70%</p>	<p>Peso di volume [kN/m³] = 20 Coesione drenata [kPa] = 20 Angolo di att. ϕ' = 22°</p>	<p>Modulo di Def.: E_(10 m) = 75 MPa E_(20 m) = 130 MPa E_(30 m) = 185 MPa E_(40 m) = 240 MPa E_(50 m) = 295 MPa E_(60 m) = 350 MPa E_(70 m) = 405 MPa E_(80 m) = 455 MPa</p>	<p>CALCARI Peso di volume [kN/m³] = 22 Modulo di def.: E = 15000 MPa</p>	<p>Peso di volume [kN/m³] = 21.5 Coesione drenata [kPa] = 20 Angolo di att. ϕ' = 36°</p>	<p>Modulo di Def.: E_(10 m) = 290 MPa E_(20 m) = 500 MPa E_(30 m) = 705 MPa E_(40 m) = 905 MPa E_(50 m) = 1100 MPa E_(60 m) = 1290 MPa E_(70 m) = 1475 MPa E_(80 m) = 1640 MPa</p>

Descrizione litologica	MATRICE	LAPIDEO	AMMASSO
<p>ANZ2ar e ANZ2ag Peliti 80% Lapideo 20%</p>	<p>Peso di volume [kN/m³] = 20 Coesione drenata [kPa] = 25 Angolo di att. $\phi' = 22^\circ$ Modulo di def.: E = 225 MPa</p>	<p>ARENARIE: Peso di volume [kN/m³] = 22 Modulo di def. calotta [MPa] = 5000 Modulo di def. base [MPa] = 5000</p>	<p>Peso di volume [kN/m³] = 20 Coesione drenata [kPa] = 25 Angolo di att. $\phi' = 22^\circ$ Modulo di def.: E = 225 MPa</p>
<p>ANZ2ar Arenarie e sabbie giallastre e argille della formazione di Anzano Peliti e sabbie 80% Lapideo 20%</p>	<p>Peso di volume [kN/m³] = 20 Coesione drenata [kPa] = 25 Angolo di att. $\phi' = 22^\circ$ Modulo di def.: E = 225 MPa</p>	<p>ARENARIE: Peso di volume [kN/m³] = 22 Modulo di def. calotta [MPa] = 5000 Modulo di def. base [MPa] = 5000</p>	<p>Peso di volume [kN/m³] = 20 Coesione drenata [kPa] = 25 Angolo di att. $\phi' = 22^\circ$ Modulo di def.: E = 225 MPa</p>

GALLERIA MELITO

Descrizione litologica	MATRICE		LAPIDEO	AMMASSO	
<p>FYR 2C + FYRbrc Alternanze di banchi calcarei (calciruditi e brecce ben cementate) dello spessore di 10/20 m, conglomerati e brecce calcaree in matrice argillosa ed arenarie; strati di argille policrome dello spessore di pochi metri. Unità del Flysch Rosso Peliti 30% Lapideo 70%</p>	Peso di volume [kN/m ³] = 20 Coesione drenata [kPa] = 23 Angolo di att. $\phi' = 22.5^\circ$ Modulo di def.: E = 230 MPa		CALCARI Peso di volume [kN/m ³] = 22 Modulo di def.: E = 15000 MPa	Peso di volume [kN/m ³] = 21.5 Coesione drenata [kPa] = 23 Angolo di att. $\phi' = 36.5^\circ$ Modulo di def.: E = 870 MPa	
<p>FYRavc Argille policrome (grigie, rosse e verdi), molto deformate, e strati calcarei dello spessore di alcuni dm dell'Unità del Flysch Rosso (FYRavc). Peliti 80% Lapideo 20%</p>	Peso di volume [kN/m ³] = 20 Coesione drenata [kPa] = 20 Angolo di att. $\phi' = 22^\circ$	Modulo di Def.: E _(10 m) = 75 MPa E _(20 m) = 130 MPa E _(30 m) = 185 MPa E _(40 m) = 240 MPa E _(50 m) = 295 MPa E _(60 m) = 350 MPa E _(70 m) = 405 MPa E _(80 m) = 455 MPa	CALCARI Peso di volume [kN/m ³] = 22 Modulo di def.: E = 15000 MPa	Peso di volume [kN/m ³] = 20 Coesione drenata [kPa] = 20 Angolo di att. $\phi' = 22^\circ$ Modulo di def.:	Modulo di Def.: E _(10 m) = 75 MPa E _(20 m) = 130 MPa E _(30 m) = 185 MPa E _(40 m) = 240 MPa E _(50 m) = 295 MPa E _(60 m) = 350 MPa E _(70 m) = 405 MPa E _(80 m) = 455 MPa
<p>FYRcgp Conglomerati e brecce poligeniche in matrice argillosa dell'Unità del F. Rosso alternati a strati calcarei dello spessore di alcuni metri. Peliti 30% Lapideo 70%</p>	Peso di volume [kN/m ³] = 20 Coesione drenata [kPa] = 20 Angolo di att. $\phi' = 22^\circ$	Modulo di Def.: E _(10 m) = 75 MPa E _(20 m) = 130 MPa E _(30 m) = 185 MPa E _(40 m) = 240 MPa E _(50 m) = 295 MPa E _(60 m) = 350 MPa E _(70 m) = 405 MPa E _(80 m) = 455 MPa	CALCARI Peso di volume [kN/m ³] = 22 Modulo di def.: E = 15000 MPa	Peso di volume [kN/m ³] = 22 Coesione drenata [kPa] = 20 Angolo di att. $\phi' = 36^\circ$	Modulo di Def.: E _(10 m) = 290 MPa E _(20 m) = 500 MPa E _(30 m) = 705 MPa E _(40 m) = 905 MPa E _(50 m) = 1100 MPa E _(60 m) = 1290 MPa E _(70 m) = 1475 MPa E _(80 m) = 1640 MPa

Descrizione litologica	MATRICE		LAPIDEO	AMMASSO	
<p>FYR ac Alternanze di argille policrome e marne (grigie, rosse e verdi), molto deformate e strati calcarei dello spessore di pochi m (Flysch rosso argilloso calcareo) Peliti 60% Lapideo 40%</p>	<p>Peso di volume [kN/m³] = 20 Coesione drenata [kPa] = 20 Angolo di att. ϕ' = 22°</p>	<p>Modulo di Def.: E_(10 m) = 75 MPa E_(20 m) = 130 MPa E_(30 m) = 185 MPa E_(40 m) = 240 MPa E_(50 m) = 295 MPa E_(60 m) = 350 MPa E_(70 m) = 405 MPa E_(80 m) = 455 MPa</p>	<p>CALCARI Peso di volume [kN/m³] = 22 Modulo di def. calotta [MPa] = 15000 Modulo di def. base [MPa] = 15000</p>	<p>Peso di volume [kN/m³] = 21 Coesione drenata [kPa] = 20 Angolo di att. ϕ' = 26°</p>	<p>Modulo di Def.: E_(10 m) = 145 MPa E_(20 m) = 255 MPa E_(30 m) = 360 MPa E_(40 m) = 465 MPa E_(50 m) = 570 MPa E_(60 m) = 670 MPa E_(70 m) = 770 MPa E_(80 m) = 865 MPa</p>

5. Appendice 1

RISULTATI DELLE PROVE CROSS-HOLE E DOWN-HOLE

5.1. Prove CROSS_HOLE

Nell'ambito del progetto di raddoppio della tratta Apice-Orsara, I Lotto funzionale Apice Hirpinia a Grottaminarda (AV), sono state eseguite dalla società Akron srl n° 4 prove CROSS-HOLE lungo il tracciato della galleria Melito.

Tali indagini sono state realizzate nei giorni 10-14 febbraio 2020; le verticali investigate corrispondono a quelle dei sondaggi elencati nella Tabella T-1 in cui sono anche precisate le profondità raggiunte e le progressive.

sondaggio	lunghezza	progressive
SN ME01	94.0	Km 5+400
SN ME04	72.0	Km 5+900 – 6+00
SN ME05	94.0	Km 6+600 – 6+700
SN ME08	94.0	Km 7+200 – 7+300

Tabella T-1: verticali cross-hole

È necessario premettere un'osservazione di carattere generale sulle modalità di esecuzione delle prove: il sistema di energizzazione utilizzato è di tipo elettrodinamico, si tratta infatti di uno sparker Geotomographie dotato di sonda per onde P (SB42), questo produce un impulso non polarizzato e quindi non produce un'onda S_v . Un sistema di energizzazione che genera un'onda non polarizzata rende difficile l'interpretazione del tempo di arrivo dell'onda S al geofono ricevitore.

Per questo motivo i risultati ottenuti dalle prove si ritengono scarsamente affidabili. In ogni caso si è tentato di interpretarli. Di seguito si dà conto dei risultati ottenuti in corrispondenza delle verticali SNME 01-04 05 mentre quelli relativi alla verticale SNME08 non sono stati analizzati perché si riferiscono alle argille plioceniche della formazione di Ariano.

Cross hole SNME 01

I risultati della prova CROSS HOLE SNME01 sono riportati in *Figura A-1a* insieme con una colonna stratigrafica in cui sono mostrate sinteticamente le formazioni o facies attraversate. Nei primi 30 m si rinvencono le argille policrome del Flysch (FYRavc) che si poggiano su un potente strato di conglomerati (FYRcgp).

I valori di velocità crescono con la profondità con un andamento più che lineare che poco realisticamente rappresenta l'andamento della rigidezza con la profondità. La velocità delle onde S cresce rapidamente e, dopo i primi 20 m raggiunge già il valore di 800 m/s. Alla profondità di 94 m,

la massima investigata, la velocità delle onde S si attesta intorno al valore poco verosimile di 2550 m/s.

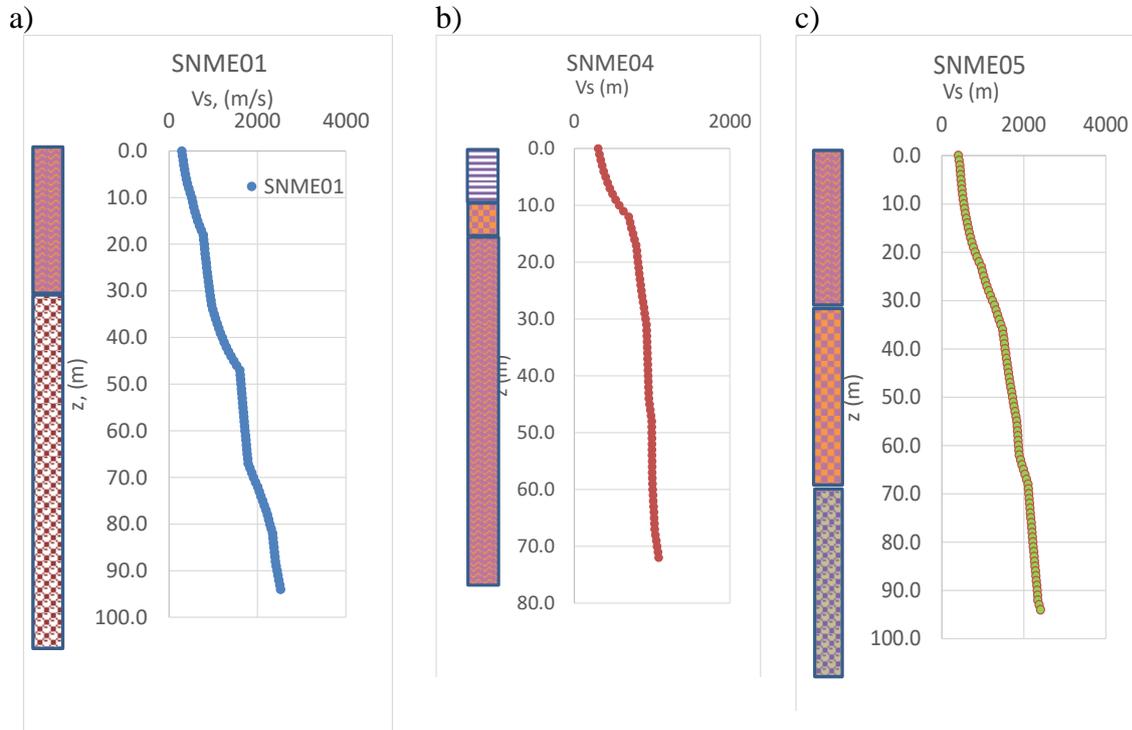


Figura A-1. Risultati delle prove Cross hole: a) SNME01; b) SNME04; c) SNME05.

Cross hole SNME 04

I risultati della prova CROSS HOLE SNME04 sono riportati in *Figura A-1b* insieme con una colonna stratigrafica in cui sono mostrate sinteticamente le formazioni attraversate. Nei primi 10 m si rinvencono le argille grigie della formazione di Ariano (BNA2) seguite da uno strato di pochi metri di brecce e calciruditi del Flysch Rosso (FYR2c) poggianti su un banco di oltre 50 m di argille policrome del flysch (FYRavc).

Nei primi 10 m la velocità cresce con la profondità con un andamento più che lineare e alla base delle argille plioceniche della formazione di Ariano si attesta già intorno a valori di 900 m/s. Nelle argille policrome le velocità mostrano un andamento pressoché costante non superando i 1000 m/s in corrispondenza della massima profondità di indagine.

Cross hole SNME 05

I risultati della prova CROSS HOLE SNME05 sono riportati in *Figura A-1c* insieme con una colonna stratigrafica in cui sono mostrate sinteticamente le formazioni o facies attraversate. Nei primi 30 m si rinvencono le argille policrome del Flysch (FYRavc) poggianti su uno strato di circa 40 m di spessore di calciruditi e breccie del Flysch (FYR2c), seguito da uno strato di arenarie e argille del Flysch (FYRar).

La velocità risulta elevata sin dai primi metri di profondità variando tra 400 m/s e 900 m/s nei 30 m di argille policrome del Flysch. Essa continua a crescere con la profondità sia nei conglomerati che nelle arenarie del Flysch raggiungendo valori che superano i 2400 m/s alla profondità di 94 m.

Nonostante la scarsa qualità dei risultati sperimentali i dati sono stati interpretati per definire le leggi di variazione della velocità con la profondità per le diverse formazioni investigate. Le correlazioni individuate sono state anche espresse in termini di variazione del modulo di taglio iniziale con la profondità.

Argille policrome del Flysch rosso (FYRavc)

Il profilo di velocità per le argille policrome del Flysch è stato ricostruito sintetizzando i dati disponibili lungo le tre verticali investigate. È stato quindi ottenuto un profilo di velocità continuo fino alla profondità di circa 70 m, riportato in *Figura A-2a*. I dati sono stati quindi interpretati con una funzione potenza mostrata nella stessa figura. Gli stessi dati sono mostrati in *Figura A-2b* in termini di andamento del modulo di taglio iniziale con la profondità, anche in questo caso è riportata nella stessa figura la funzione potenza utilizzata per interpretare i dati.

Conglomerati e breccie del Flysch rosso (FYR cgp)

Il profilo di velocità per i conglomerati e le breccie del flysch (FYRcgp) è stato ricostruito a partire dai risultati della prova cross-hole effettuata lungo la verticale SNME01; tale profilo è riportato in *Figura A-3a*. I dati sono stati quindi interpretati con una funzione potenza mostrata nella stessa figura. Gli stessi dati sono mostrati in *Figura A-3b* in termini di andamento del modulo di taglio iniziale con la profondità, anche in questo caso è riportata nella stessa figura la funzione potenza utilizzata per interpretare i dati. Le funzioni interpolanti descrivono andamenti decisamente poco verosimili con valori di velocità e moduli iniziali estremamente bassi in superficie e insolitamente elevati in profondità e con leggi di variazione eccessivamente sensibili allo stato tensionale.

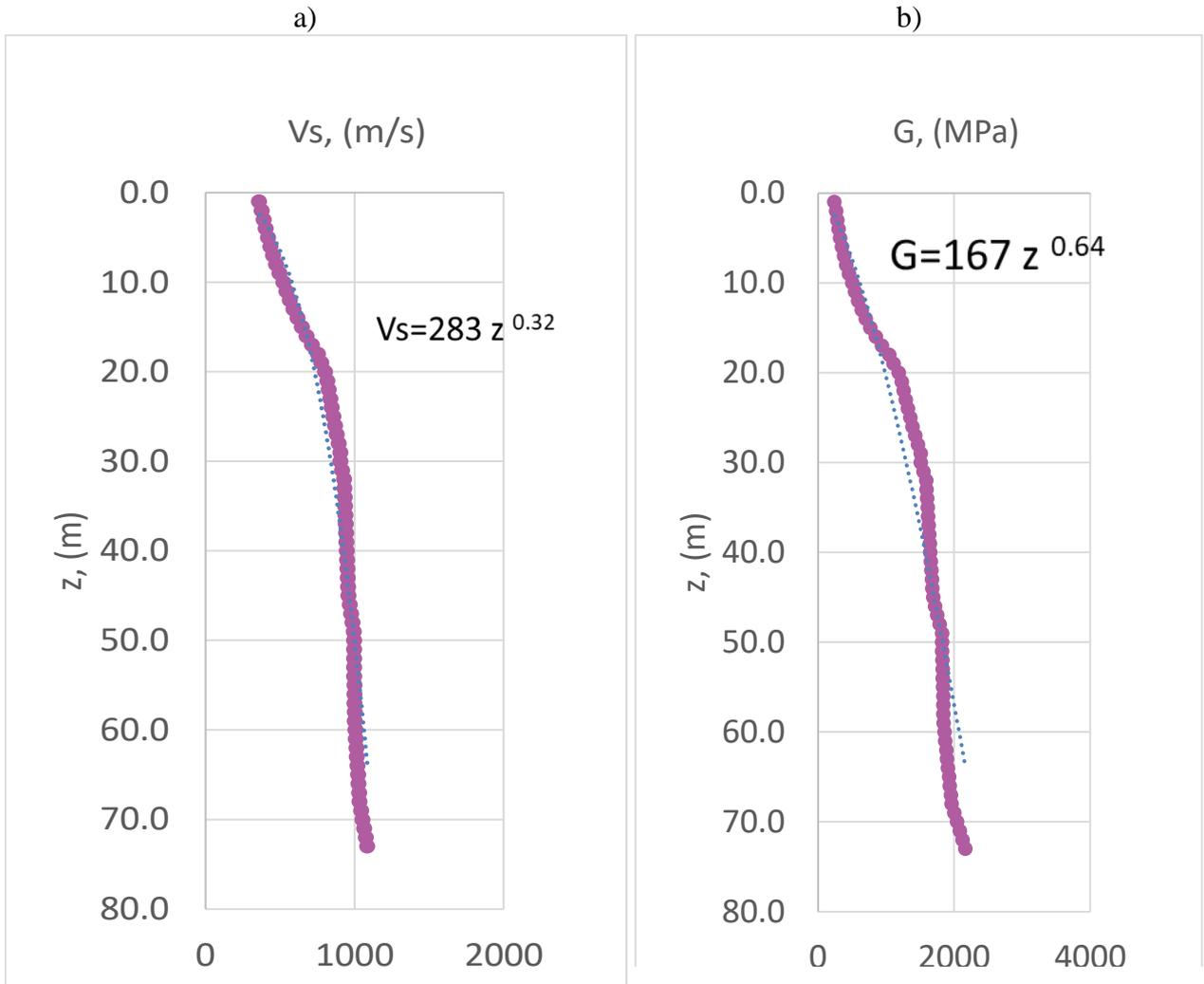


Figura A-2. FYRavc: andamento a) della velocità e b) del modulo di taglio iniziale con la profondità.

Calciruditi e breccie del Flysch rosso (FYR 2c)

Il profilo di velocità per le calciruditi e le breccie del flysch è stato ricostruito a partire dai risultati della prova cross-hole effettuata lungo la verticale SNME05; esso è riportato in *Figura A-4a*. I dati sono stati quindi interpretati con una funzione potenza mostrata nella stessa figura. Gli stessi dati sono mostrati in *Figura A-4b* in termini di andamento del modulo di taglio iniziale con la profondità, anche in questo caso è riportata nella stessa figura la funzione potenza utilizzata per interpretare i dati.

In Tabella T-2 sono state sintetizzate le funzioni interpolanti determinate per le diverse formazioni.

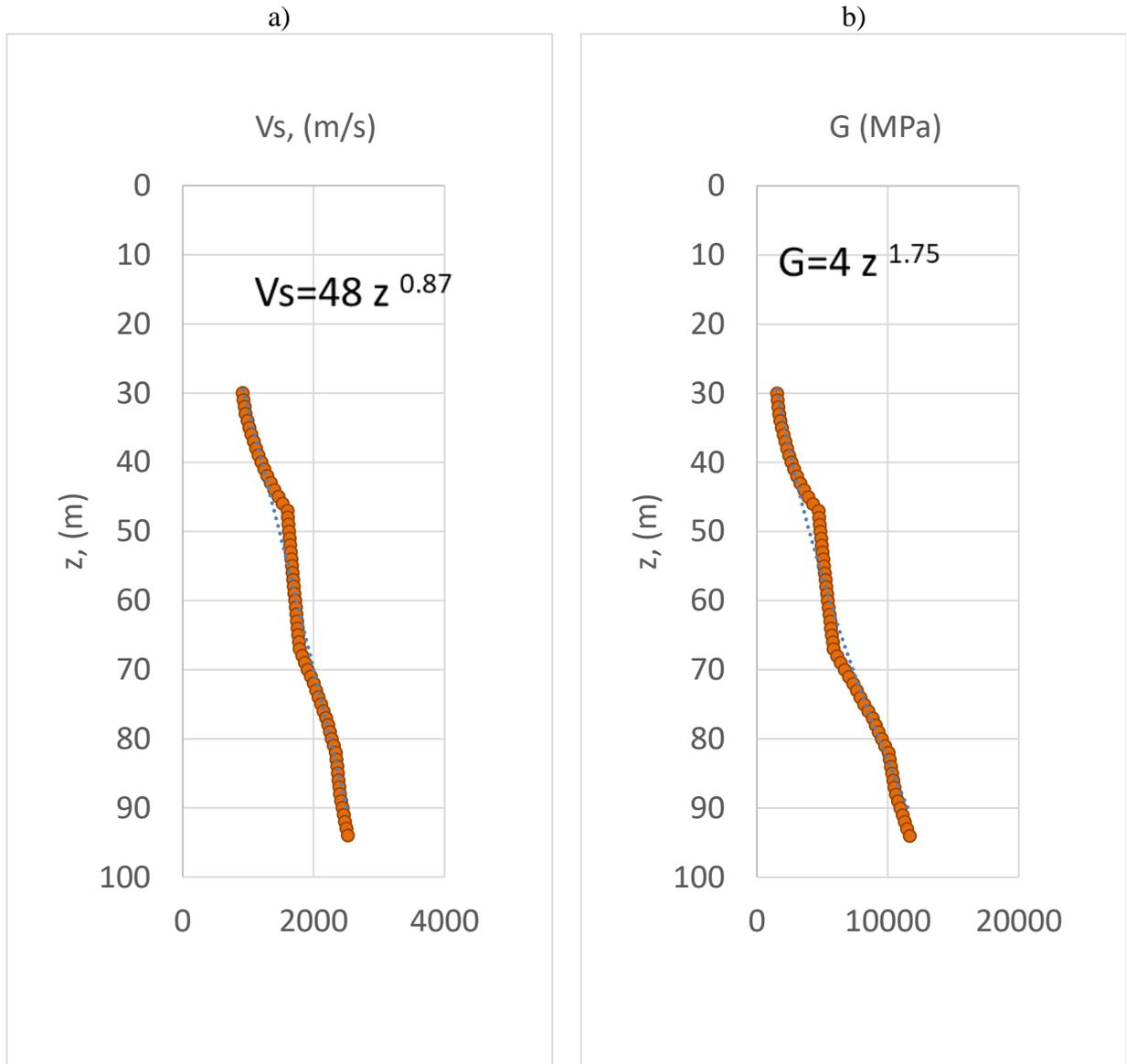


Figura A-3. FYRavc: andamento a) della velocità e b) del modulo di taglio iniziale con la profondità.

Formazione	Vs-z	G-z
FYRavc	$283 z^{0.32}$	$167 z^{0.64}$
FYRcgp	$48 z^{0.87}$	$4 z^{1.75}$
FYR2c	$118 z^{0.97}$	$26 z^{1.76}$

Tabella T-2: Relazioni tra velocità delle onde S e modulo di taglio iniziale con la profondità.

V_s (m/s), G (Mpa), z (m)

5.2. Prove DOWN-HOLE

Nell'ambito del progetto di raddoppio della tratta Apice-Orsara, I Lotto funzionale da Apice Hirpinia a Grottaminarda (AV) è stata eseguita una prova DOWN-HOLE in corrispondenza del

sondaggio SNGR02 lungo il tracciato della galleria Grottaminarda alla progressiva km 3+150. Non si dispone dei dati relativi alle modalità di esecuzione della prova e alle attrezzature utilizzate.

I risultati forniti sono stati completamente rielaborati in termini di dromocrone, come mostrato in *Figura A-5b* e, quindi in termini di profili di velocità (*Figura A-5c*) e modulo di taglio iniziale (*Figura A-5d*) con la profondità.

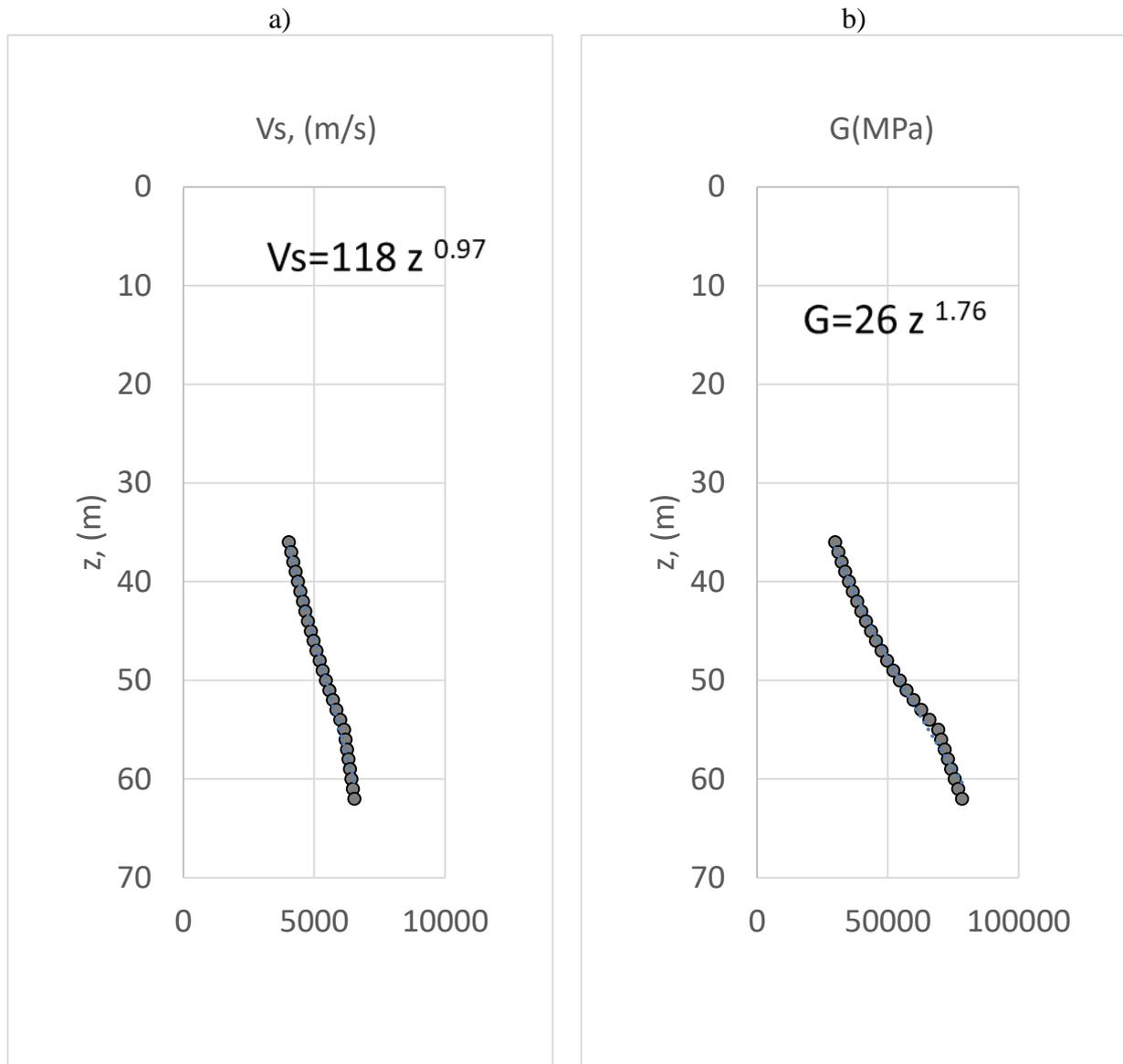


Figura A-4. FYR a2: andamento a) della velocità e b) del modulo di taglio iniziale con la profondità.

Il profilo ottenuto dalla rielaborazione mostra chiaramente il passaggio dalle colluvioni di copertura, caratterizzate da un valore di velocità di circa 200 m/s alla formazione di Anzano (facies arenacea ANZ2ar) che risulta caratterizzata nei primi 10 m da velocità dell'ordine di 320 m/s, per poi crescere con la profondità fino a valori dell'ordine di 540 m/s.

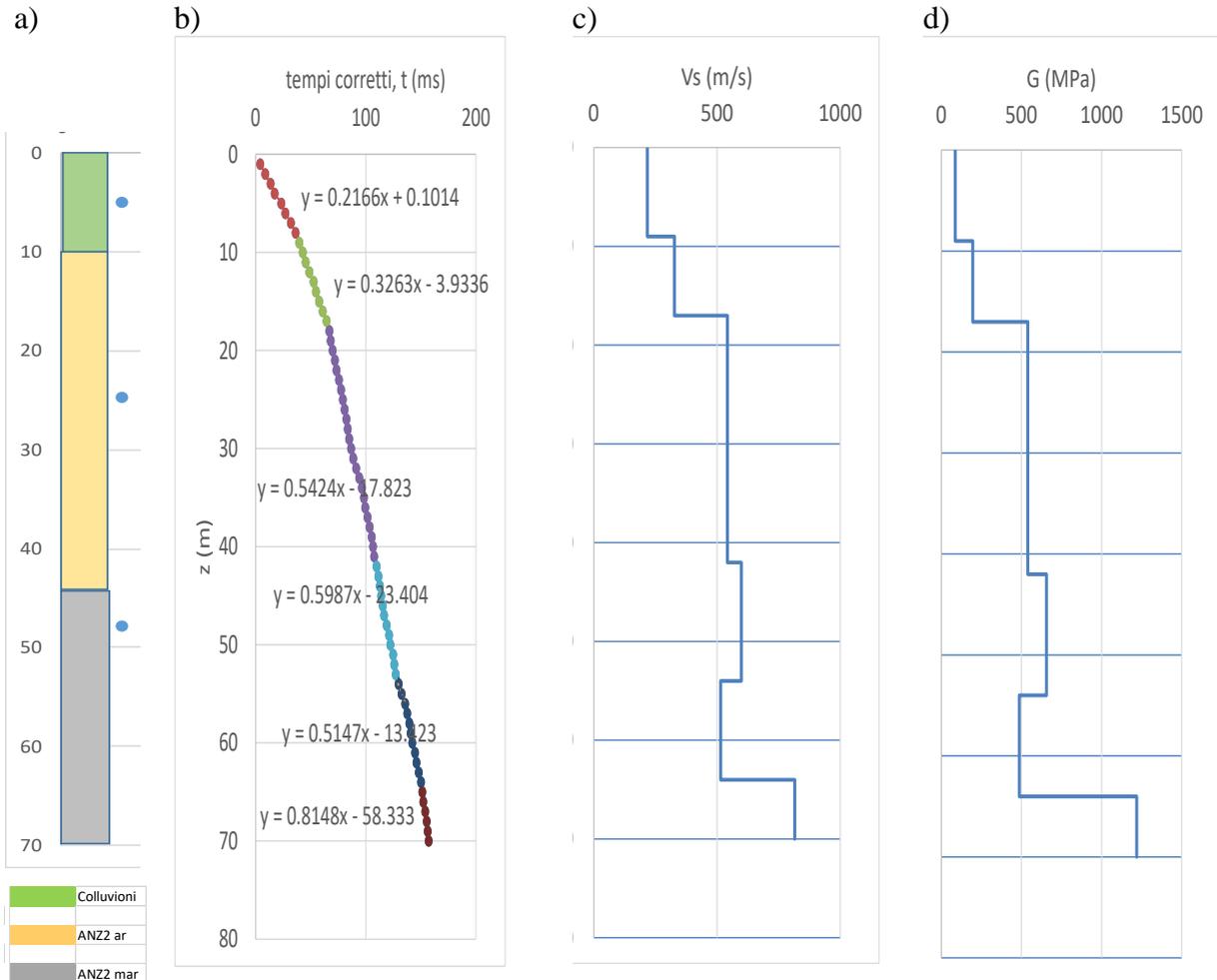


Figura A-5. a) Profilo stratigrafico del sondaggio SNGR02; b) dromocrone della prova DH; c) profilo di velocità; d) profilo del modulo di taglio iniziale.

Il passaggio nella facies marnosa della formazione di Anzano (ANZ2mar) è segnato da un incremento ulteriore della velocità che raggiunge i 600 m/s circa per poi mostrare una leggera inversione prima di arrivare al tetto della formazione calcareo-marnosa di base, a 64 m di profondità, caratterizzata da velocità superiori agli 800 m/s.

In Tabella T-3 si riporta il modello di velocità desunto dai risultati della prova DH.

Formazione	Profondità (m)	Vs (m/s)
Colluvioni	0-9	217
ANZ2 ar	10-17	326
	18-42	542
ANZ2 mar	42-54	599
	54-64	515
Substrato calcareo marnoso	64-70	815

Tabella T-3: Profilo di velocità desunto dalla prova DH SNGR02.