Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti

PROVVEDITORATO PER LE OPERE PUBBLICHE
PIEMONTE VALLE D'AOSTA LIGURIA

COMUNE DI SANTA MARGHERITA LIGURE

PROGETTAZIONE DEFINITIVA
PER LA REALIZZAZIONE DI UN CANALE SCOLMATORE E SISTEMAZIONE IDRAULICA DEI TORRENTI SAN SIRO E MAGISTRATO IN COMUNE DI SANTA MARGHERITA LIGURE (GE)

RELAZIONE GEOLOGICA E DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE INTEGRATIVE PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI E DELL'AMMASSO ROCCIOSO NELL'AMBITO DELLA STUDIO GEOTECNICO DELLA "DGPV" IN CORRISPONDENZA DELL'IMBOCCO DEL TORRENTE S.SIRO



Progettazione

D'APOLLONIA S.P.A

BETA STUDIO S.R.L

MONTALDO ENGINEERING S.R.L

GEOTECHNICAL SERVICES STUDIO ASS.

STEGEO

Coordinatore della Progettazione
(Provveditorato per le OO.PP.)
Dr. Ing..Francesco Caldani

Responsabile deProcedimento
(Provveditorato per le OO.PP.)
Dr. Ing..Alessandro Pentimalli

INDICE

		pag.
1	PREMESSA	3
2	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	4
3	INQUADRAMENTO NORMATIVO	5
4	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E ASSETTO STRUTTURALE	6
5	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO	8
	5.1 Dettaglio al piede del Movimento Gravitativo zona imbocco	9
6	INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO	10
	6.1 Rilevamento geologico di campo	15
7	CONSIDERAZIONI SULLA DEFORMAZIONE GRAVITATIVA PROFONDA DI VERSANTE (DGPV)	16
8	STRATIGRAFIA	21
9	CARATTERIZZAIONE GEOTECNICA DEI TERRENI DELLA COLTRE DI COPERTURA	22
	9.1 Aspetti generali	22
	9.2 Parametri da prove SPT	22
	9.3 Parametri da indagini geofisiche	23
	9.4 Parametri da prove di laboratorio	23
10	L'AMMASSO ROCCIOSO	24
11	CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA DEL BASAMENTO CALCAREO	25
12	CRITERI DI CLASSIFICAZIONE ADOTTATI	26
	12.1 Classificazione dell'A.R. con il sistema RMR89	26
	12.2 Attribuzione dei punteggi ai singoli parametri	27
	12.3 Classificazione dell'A.R. con il sistema Q	27
13	ANALISI DEI MECCANISMI DI ROTTURA DELL'AMMASSO ROCCIOSO CINEMATICAMENTE POSSIBILI	31 29
	13.1 Aspetti generali	29
14	RISULTATI DELLE ANALISI STRUTTURALI	31

ALLEGATI

A Tavole tematiche

B Sezioni stratigrafiche e posizione indagini

C Fotografie degli affioramenti

D Stratigrafie dei sondaggi con documentazione fotografica

E Indagine con BHTV in foro

F Certificati delle prove geotecniche di laboratorio

G Stereo proiezioni delle discontinuità e analisi di stabilità cinematica dell'ammasso roccioso

H Relazione specialistica delle indagini geofisiche

1 PREMESSA

Questa Relazione è preparata per illustrare gli esiti di una campagna di indagini supplementari relative al progetto definitivo di un canale scolmatore e della sistemazione idraulica dei torrenti San Siro e Magistrato in Comune di Santa Margherita Ligure.

In particolare questo elaborato costituisce un approfondimento circa le problematiche geologiche-geomorfologiche presenti nella zona di imbocco della condotta in corrispondenza del torrente San Siro ove l'obiettivo dell'indagine è stato quello di ricostruire il "modello geologico" delle porzioni di versante attraversate dalla condotta a progetto, in ottemperanza al D.M. 14 gennaio 2008 ("Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni") e relativa circolare ministeriale n° 617 del 02/02/09 ("Istruzioni per l'applicazione delle NCT di cui al D.M. 14 gennaio 2008"). A tale scopo sono stati eseguiti i seguenti approfondimenti di ricerca:

a) Rilevamenti:
   - geologico-geomorfologico di superficie sul tracciato e su un congruo intorno
   - e geomeccanico.

b) Prospezioni geognostiche:
   - N°2 sondaggi geognostici a carotaggio continuo
   - N°2 prove SPT (Standard Penetration Test)
   - Prove geotecniche-geomeccaniche di laboratorio
   - N°6 profili MASW (Multichannel Analysis Surface Waves)
   - N°6 prospezioni HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)

2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L’area di studio ricade su un versante che si diparte dal Monte della Croce (391mslm) a Sud e degrada verso il torrente San Siro (circa 25mslm) a Nord.

Il contesto d’intervento è collinare ed è caratterizzato un assetto geomorfologico che, come si dirà in seguito, risulta eterogeneo oltre che condizionato in superficie da urbanizzazioni piuttosto discontinue lato monte, costituite principalmente da edifici abitativi e relative infrastrutture, e da un tessuto urbano più compatto verso l’area di fondovalle.

Buona parte dei pendii sono caratterizzati dalla presenza dei classici terrazzamenti realizzati storicamente ad utilizzo agricolo attraverso l’energico rimaneggiamento degli originari manti eluvio-colluviali.

Dalla quota di circa 200m slm le colture ad uliveto lasciano il posto al bosco. Il deflusso superficiale delle acque è regolato da una serie di colatori minori direzionati circa Nord-Sud che dunque scorrono circa perpendicolari all’asta torrentizia principale orientata circa Ovest-Est. Il pendio è caratterizzato da un grado di acclività medio che aumenta decisamente in prossimità del crinale.

3 INQUADRAMENTO NORMATIVO

Propedeuticamente alle operazioni di rilevamento si è proceduto ad una analisi della cartografia allegata al Piano di Bacino Stralcio – Ambito 15 vigente sul territorio, si vedano gli schemi tematici presenti in Allegato A; con i seguenti esiti:

- ***Carta della Franosità Reale*** (All.A Fig.3)**:**

Nell'area di studio è denunciata la presenza di una Deformazione Profonda Gravitativa di Versante, che verrà analizzata dettagliatamente nei capitoli successivi.

- ***Carta della Suscettività al Dissesto*** (All.A Fig.4)**:**

Conseguentemente alla presenza del cinematismo rilevato, il tratto di versante di interesse è classificato a suscettività al dissesto elevata – Pg3b

Richiamo alla normativa di bacino relativamente a vincoli e prescrizioni.

In relazione alla classificazione Pg3b si riporta il seguente stralcio della Norme di Attuazione relative al Piano di Bacino vigente :

Art.16 ….. 3-ter. Recita***:***

"*Nelle aree a suscettività al dissesto levata – Pg3b , oltre al regime normativo applicato nelle aree Pg3a, è consentita anche la nuova edificazione e l'esecuzione di opere infrastrutturali, purché tali interventi siano previsti dallo strumento urbanistico comunale adeguato al presente Piano di bacino. Tale adeguamento comporta l'effettuazione di un'apposita verifica di compatibilità delle previsioni urbanistiche con il quadro dei dissesti del piano di bacino nei termini indicati al successivo articolo 19. 3-quater. Nelle more dell'adeguamento di cui al comma precedente, l'ammissibilità di nuovi interventi è subordinata all'esecuzione di indagini di maggior dettaglio i cui contenuti minimi sono riportati nell'allegato 1 alla presente normativa. 3-quinquies. La Provincia, sulla base delle indagini di maggior dettaglio di cui al comma precedente, trasmesse dal Comune, valuta la compatibilità della realizzazione dell'intervento stesso con le condizioni di suscettività al dissesto accertate ed esprime, a riguardo, parere vincolante…*"

- ***Carta del Rischio Geologico*** (All.A Fig.5)

L'area è classificata a rischio da moderato (R1) a Medio (R2).

- ***Carta delle Aree Sottoposte A Vincolo Idrogeologico*** (All.A Fig.6)***:***

Il settore interessato dallo studio non è sottoposto al Vincolo Idrogeologico.

4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E ASSETTO STRUTTURALE

(Si veda Figura 1 in Allegato A)

Dal punto di vista geologico, l'ossatura litologica del versante è costituita dalla Formazione dei Calcari del Monte Antola, (Turoniano Maastrichtiano).

I Calcari del Monte Antola affiorano lungo il versante litoraneo tra Chiavari e Genova (ad esclusione del Promontorio di Portofino, interessato dagli omonimi Conglomerati oligocenici).

Si illustrano di seguito i principali lineamenti litostratigrafici e strutturali che caratterizzano l'areale di interesse.

Il Flysch del M. Antola è costituito da torbiditi marnoso-calcaree a base calcareo-arenacea in strati medio spessi, con frequenti icno-facies a Helminthoïdes e Chondrites (Marini, 1998).

Formalizzata da Allasinaz et al. (1971) e ripresa da Cortesogno & Haccard (1984) come "Calcari del M. Antola" questa unità ha il limite stratigrafico inferiore sempre definito dalle Argilliti di Montoggio, mentre quello superiore può essere caratterizzato dal passaggio a unità tardo e post-orogeniche come anche, a Nord, dal limite transizionale con le argilliti di età paleocenico-eocenica.

L'unità è costituita da una successione ritmica di strati torbiditici di spessore da submetrico a plurimetrico definiti dalla coppia calcare arenaceo - marna calcarea / marna. Si osservano, inoltre, calcilutiti in strati submetrici e giunti argillitici emipe-lagici.

La stratificazione, nella zona interessata dal progetto immerge generalmente verso Sud – Sud Ovest con inclinazioni variabili da 25°-30° a 65°-75°.

L'ambiente di deposizione è attribuibile ad una piana abissale posta al di sotto del livello di compensazione dei carbonati (Scholle, 1971). Il forte spessore medio degli strati fa pensare altresì a zone di bacino depresse (Marini, 1998).

L'assetto strutturale dei calcari dell'Antola è determinato dalla presenza delle strutture sedimentarie (stratificazione e strutture deformative sindeposizionali) e dalle successive deformazioni in regime duttile e fragile, che ne hanno determinato il piegamento, oltre alla comparsa di altre superfici strutturali quali clivaggi di fratturazione, giunti e faglie.

Secondo Marini (1981) il complesso dei Calcari dell'Antola è stato sottoposto ad almeno tre fasi di deformazione per pieghe, post-deposizionali, che hanno agito su una struttura originale rappresentata dalle superfici litologiche (stratificazione) e sulle strutture sin-deposizionali costituite da pieghe di "slumping" e laminazioni convolute. La giacitura delle strutture sinsedimentarie testimonierebbe la direzione del bacino di sedimentazione, probabilmente allineato lungo la direzione del piano di subduzione. La prima fase, di età Eocenica Medio-superiore, si realizza attraverso piegamenti disposti secondo assi diretti circa N80°E, vergenti verso Sud: le pieghe che si formano sono di dimensioni chilometriche ed alla loro formazione non è legato lo sviluppo di foliazioni.

La seconda fase di piegamento presenta assi con direzione quasi ortogonale al primo, con vergenza ad Est (e assi diretti fra N160E e N180E) a Nord Est (con assi diretti N140E. Le pieghe raggiungono dimensioni fino a plurichilometriche e la loro formazione è accompagnata dallo sviluppo di clivaggi di fratturazione molto evidenti, generalmente coniugati. I due gruppi di pieghe a geometria e giacitura differente sono probabilmente riferibili a due distinti eventi all'interno della

stessa fase. Il primo, con direzione Nord-Sud, è meglio sviluppato nel settore occidentale dell'area di pertinenza dell'Unità del Monte Antola, mentre il secondo è meglio rappresentato nella zona del Tigullio, quindi nell'area oggetto del presente studio progettuale. Questa fase di piegamento si estenderebbe come intervallo temporale dall'Eocene Superiore al Miocene, in particolare la seconda subfase, che interessa maggiormente l'area di Rapallo – Santa Margherita, potrebbe riferirsi alla fase Miocenica di accavallamento delle varie unità nel settore appenninico orientale (Fase appenninica Miocenica Precoce).

La terza ed ultima fase di piegamento, forse ricollegabile ad un prolungamento di smorzata intensità della subfase miocenica descritta in precedenza, provoca blande ondulazioni con assi disposti circa N100°-110°E nelle strutture precedentemente formatesi. Tale fase, caratterizzata da spinte tettoniche verso Nord e Nord Est, è presumibilmente compresa tra il Miocene medio ed il Pliocene Inferiore ed è responsabile dell'attuale incurvamento della catena appenninica. Nell'Unità del Monte Antola essa determina il basculamento degli assi della fase precedente rispettivamente verso Nord sul versante Padano e verso sud sul versante del Mar Ligure. La stessa fase può essere responsabile quindi anche del basculamento verso sud della sequenza dei conglomerati di Portofino, solidalmente con il proprio basamento di calcari dell'Antola.

La deformazione appenninica dei calcari dell'Antola si conclude con la sovrimposizione di una serie di strutture di faglia, legate sia alle fasi terminali della deformazione per pieghe, sia ad eventi deformativi fragili successivi. Nell'area interessata dal progetto le faglie sono organizzate secondo due famiglie principali con direzioni predominanti WNW-ESE (localmente parallela alla costa del Mar Ligure) e NE-SW, quindi circa ortogonali. Si tratta normalmente di faglie immergenti ad alto angolo (superiore a 60°) che determinano nel paesaggio la comparsa di lineamenti molto evidenti.

Il grado di fratturazione dei calcari dell'Antola è molto variabile in ragione della posizione strutturale e della eterogeneità litologica della formazione flyschoide; all'interno delle bancate calcaree il grado di fratturazione è medio, con giunti a spaziatura decimetrico – metrica e con frequenti vene di calcite spesso ortogonali alle superfici di fratturazione. Localmente i giunti possono presentarsi carsificati. In prossimità delle cerniere di piega, all'interno delle bancate carbonatiche più competenti, si sviluppa un pervasivo clivaggio di fratturazione con spaziatura decimetrica. Nei livelli marnosi i giunti si propagano in maniera differente, spesso compaiono clivaggi coniugati che suddividono l'ammasso roccioso in blocchetti allungati con dimensioni centimetriche ("pencil cleavage"). La diffusione di questi clivaggi è più evidente in prossimità delle superfici di faglia, dove si verifica una concentrazione della deformazione fragile all'interno delle bancate meno competenti.

5 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

(Si veda la Fig.2 in Allegato A)

Sotto il profilo geomorfologico il tratto versante di interesse è caratterizzato da un grado di acclività da medio, nella parte inferiore del versante, ad alto circa al di sopra dell'isoipsa 150m slm.

Il contesto, come già detto, è caratterizzato nel suo complesso da un assetto geomorfologico abbastanza naturale, condizionato da rare urbanizzazioni e dai classici terrazzamenti realizzati storicamente ad utilizzo agricolo; in prossimità del fondovalle tuttavia si riscontrano insediamenti ascrivibili ad interventi recenti.

Il territorio risulta morfologicamente eterogeneo ed attraversato da incisioni torrentizie disposte lungo lineamenti strutturali a direzione WSW-ENE circa ortogonalmente al corso del torrente San Siro, disposto in direzione EW.

Procedendo dal crinale e scendendo verso valle si riscontra la presenza di coperture di natura eluvio-colluviali generalmente di spessore contenuto entro 3m ma che obliterano quasi completamente il substrato roccioso. Proseguendo ancora verso valle si incontra il limite della DPGV, caratterizzata sostanzialmente da un ispessimento delle coltri di copertura che assumono valori di potenza fino a plurimetrica. Si tratta di depositi a granulometria eterometrica, da medio fine a grossolana, con blocchi di dimensioni anche plurimetriche, in abbondante matrice sabbioso - limosa o argillosa, generalmente derivante dal disfacimento superficiale dei calcari dell'Antola, più sviluppata in corrispondenza degli affioramenti di bancate marnose e argillose.

Per quanto riguarda le coperture sciolte, in generale gli spessori sono stati stimati sulla base degli esiti delle indagini geognostiche laddove disponibili, del rilevamento di superficie, dall'analisi di dati bibliografici nonché dalla cartografia geomorfologica allegata al Piano di Bacino vigente.

Sotto il profilo tessiturale tali coperture sono costituite prevalentemente da una matrice sabbioso limosa con elementi lapidei di pezzatura da centimetrica a decimetrica, prevalentemente monogenetici, provenienti dal sottostante substrato (Calcari di Monte Antola).

Relativamente alla tematica inerente la Deformazione Profonda Gravitativa di Versante questa sarà approfondita nel successivo capitolo 7.

5.1 Dettaglio al piede del Movimento Gravitativo zona imbocco

In prossimità del "piede" del movimento gravitativo sono invece presenti numerosi ed estesi affioramenti rocciosi in allineamento con l'incisione di fondovalle, a testimonianza di una condizione di roccia subaffiorante con coperture generalmente sottili, localmente medie in corrispondenza di cinematismi superficiali che hanno determinato accumuli.

I pendii risultano inoltre attraversati da ruscellamenti, talvolta concentrati e lievemente incisi; lungo l'alveo dell'asta torrentizia è altresì presente un materasso alluvionale a granulometria prevalente media e di spessore contenuto.

In prossimità dell'imbocco dello scolmatore, lungo la stradina che corre in sponda destra, si sono riscontrati dissesti su un tratto di lunghezza pari a circa alcune decine di metri; a monte di questo tratto è visibile una ripida scarpata con fronti in roccia particolarmente disarticolata sintomo di cinematismi pregressi e tuttora quiescenti con evidenti svuotamenti sottostanti ed accumuli in

prossimità del ciglio stradale ove, per il loro contenimento, sono state realizzate in passato gabbionate in pietrame che denunciano evidenti deformazioni.

Lo stesso profilo longitudinale della strada evidenzia gibbosità presumibilmente connesse con i fenomeni soprastanti.

A fronte di queste evidenze sui manufatti d'argine a valle in destra orografica non si riscontrano tangibili segni di dissesto.

La documentazione fotografica che illustra la situazione è presentata all'Allegato C alle foto da 1 a 6.

6 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

(Si veda la Fig. 3 in Allegato A)

Sotto il profilo idrogeologico i Calcari del Monte Antola, generalmente interessati da circolazione idrica in accordo con l'intrinseca pervietà secondaria per fratturazione e fessurazione, possono complessivamente essere considerati permeabili con grado da basso a medio.

La circolazione in essi è dunque fortemente influenzata dal grado di fratturazione, ed è teoricamente destinata generalmente a diminuire contestualmente all'aumentare della profondità per il progressivo serraggio del reticolo delle discontinuità e per la presenza di materiale di riempimento nelle fratture stesse, nella realtà la circolazione è soprattutto concentrata al contatto tra la formazione francamente calcarea, prevalente, e gli strati erratici, argillitici come evidenziato in seguito

In relazione a ciò si precisa che le condizioni che hanno indotto una favorevole condizione di accumulo sono da ricercare nel comportamento meccanico dell'ammasso calcareo e nelle condizioni di stress derivate soprattutto dall'attività neotettonica che ha interessato questo settore ligure, inducendo un reticolo idrografico fitto e diffusamente impostato lungo faglie e fratture in buona parte a piano subverticale come evidenziato nelle figure sotto riportate (Fig 6-7-8).

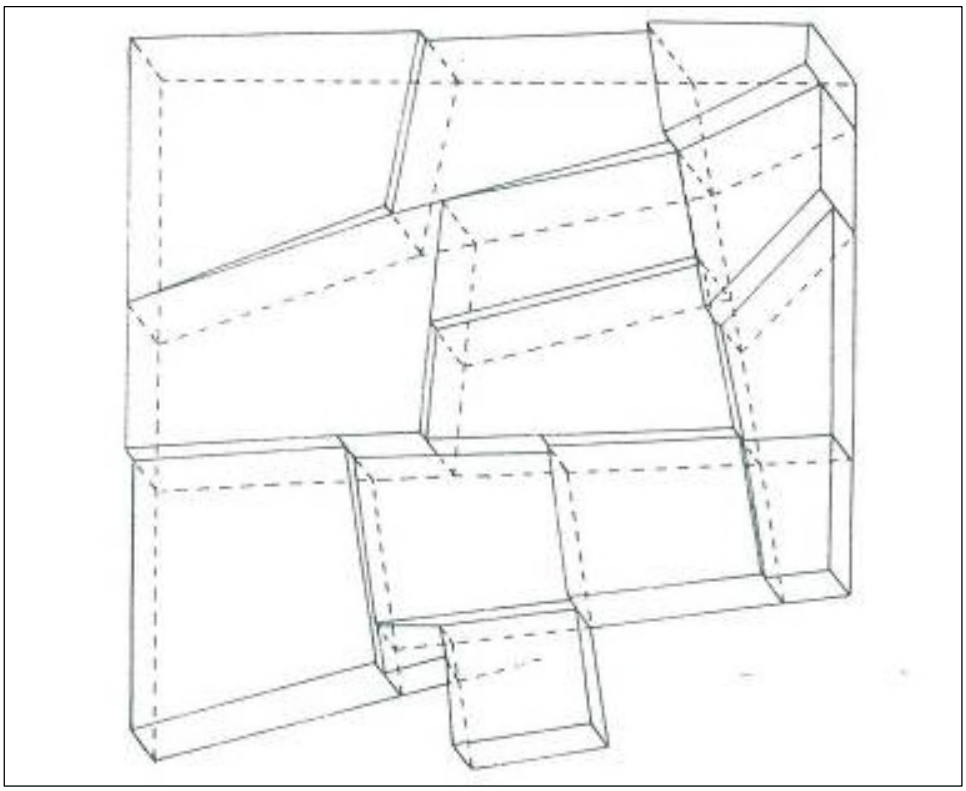


Figura 6 Schema della suddivisione in blocchi del territorio oggetto dello studio (Brancucci e Motta 1988)

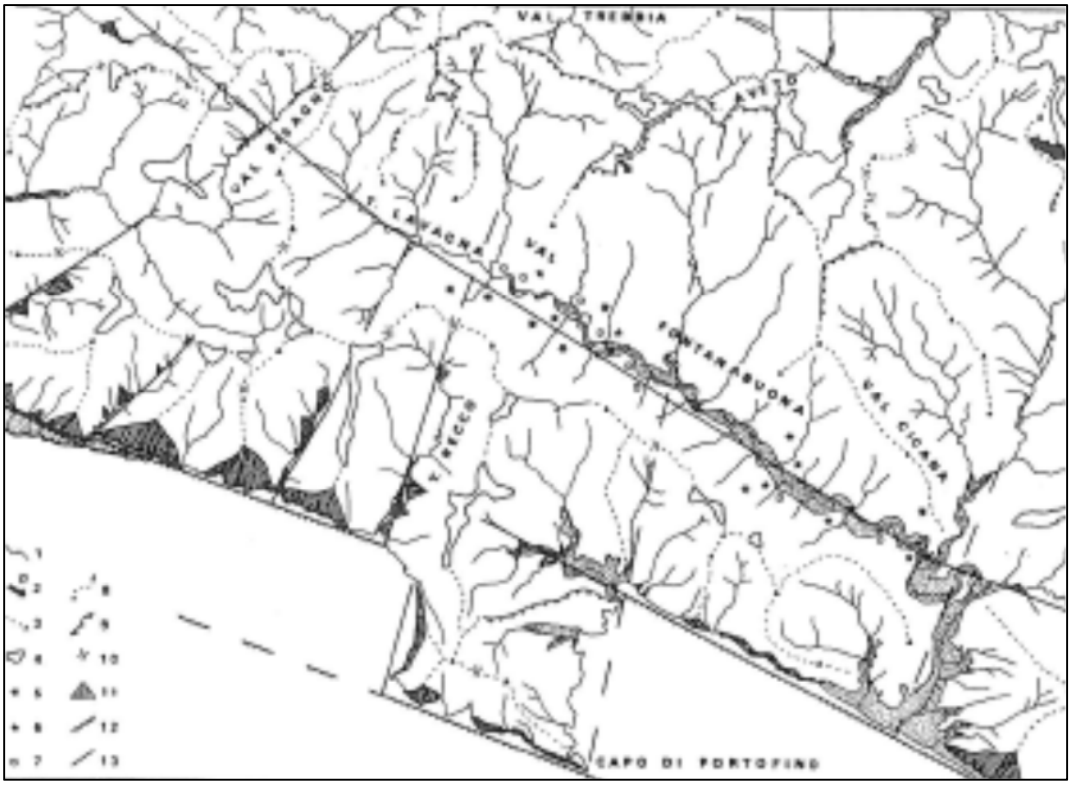


Figura 7 Mappatura indicativa dei limiti dei blocchi

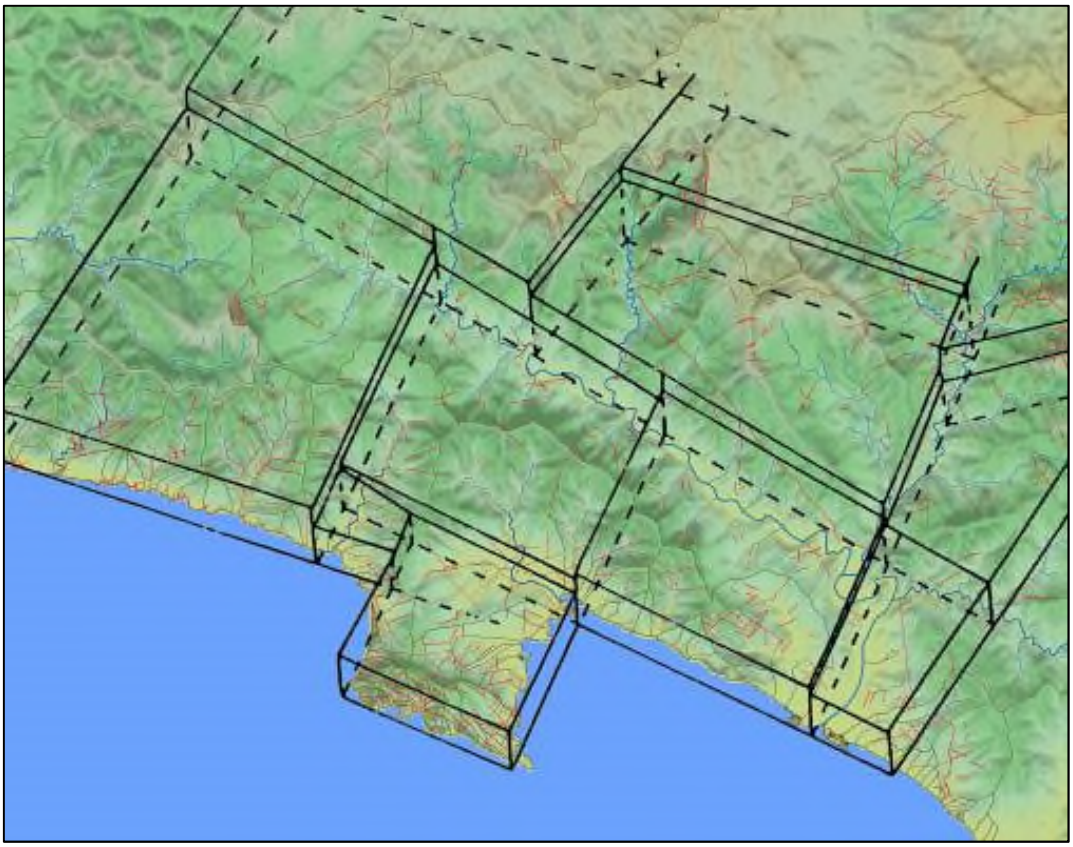


Figura 8 Schema indicativo 3D

Dette considerazioni, derivate da studi reperibili in bibliografia (Brancucci e Motta; Nosengo e Fannucci, Brancucci e Paliaga), confermano che la morfologia attuale di tutto il comparto, e la quasi totalità dei solchi vallivi, sono impostati lungo preesistenti linee tettoniche.
Questa condizione, legata come detto al complesso e fitto sistema fessurativo, rappresenta l'aspetto principale rispetto alla circolazione di acque in questi ammassi rocciosi infatti, come noto, la condizione di ricettività e movimento delle acque, in una roccia coerente e massiva, è determinato dalla presenza di fratture. La configurazione generale delle lineazioni tettoniche rivela un andamento a blocchi piuttosto regolari a giunzioni subverticali che inducono sistemi fessurativi comunicanti che dovrebbero avere maggior rilevanza in corrispondenza dei nodi di incrocio.

A queste condizioni generali si aggiunge il comportamento meccanico delle litologie calcaree dominanti (spessori di centinaia di metri) rispetto ai subordinati livelli argillitici: il comportamento rigido dei primi si contrappone a quello duttile e meno resistente dei secondi, caratterizzati da giacitura prevalentemente suborizzontale.

Gli stress deformativi, a causa delle differenti caratteristiche geotecniche delle due litologie, hanno indotto deformazioni duttili di notevole entità nelle argilliti a causa del "softening" generato dall'imbibizione delle stesse al contatto con le prime acque di percolazione.

Tale processo ha favorito l'intensa decompressione dell'ammasso calcareo sovrastante che, a causa della sua rigidità, si è fratturato ulteriormente. Le argilliti costituiscono dunque il letto impermeabile delle camere di accumulo acquifero generate dal processo di fratturazione. Questa situazione è stata rilevata nella terebrazione di un pozzo da parte dello scrivente, lungo il Torrente San Siro a circa 200m a valle dell'imbocco dello scolmatore, che ha individuato una rilevante circolazione d'acqua ad una profondità di circa 90 m dal piano campagna, mentre alle quote superiori la presenza è risultata sempre poco significativa.

In particolare, considerati i risultati delle indagini eseguite a corredo del progetto Definitivo (2005), nella relativa relazione geologica si era ipotizzata la presenza di più falde acquifere localizzate piuttosto che una unica interessante tutto il versante. Inoltre oltre alla circolazione all'interno dell'ammasso roccioso è frequente la localizzazione di acquiferi al contatto depositi superficiali-substrato roccioso.

Le letture piezometriche effettuate a suo tempo coprono il periodo di un anno da Dicembre 2003 a Dicembre 2004 e sono sufficienti a documentare un periodo di piena (Marzo-Aprile) e un periodo di morbida dalla falda (Agosto-Settembre).

Nell'ambito di campagne geognostiche pregresse (2003 e 2005) ed in particolare contestualmente a sondaggi a carotaggio continuo, sono state effettuate delle Prove di Permeabilità Lugeon in roccia (sondaggi SA, SB, SC, SD).

Nella tabella sottostante tratta dal lavoro D'Appolonia (aprile 2005) vengono riportate sia le misure effettuate nella campagna 2003 che quelle nella campagna 2005.

Le prove vengono riportate assieme ad una descrizione della litologia individuata nella tasca di prova e dal parametro RQD% relativo allo stesso intervallo.

La relazione cui si fa riferimento specifica che lunghezza delle tasche adottate nel 2003 varia da 2 a 6 m quindi il parametro RQD% viene indicato con un massimo e un minimo, la lunghezza delle tasche utilizzate nel 2005 è pari a 1 m per cui il parametro RQD% viene indicato da un singolo valore.

	SONDAGGIO	da m	a m	L	LITOLOGIA	U.L.	RQDmax %	RQDmin %	Permeabilità m/sec
INDAGINI 2003	S2	24	27	3	Calcare marnoso e calcarenite	4,3	92	24	2,6E-07
	S3	16	19	3	calcare marnoso e marna	9,9	30	20	5,9E-07
	S4	27	31	4	Calcare marnoso-calcarenite e marna-argillite	3,9	56	25	2,3E-07
	S4	33	36	3	argillite e calcarenite	3,8	83	76	2,3E-07
	S5	24	30	6	calcare marnoso e marna argillosa	1,1	70	45	6,6E-08
	S5	33	36	3	calcare marnoso	3,7	87	85	2,2E-07
	S6	16	18	2	calcare marnoso e marna argillosa brecciati	15,9	42	23	9,5E-07
	S7	26	30	4	calcare marnoso e argillite marnosa	11,4	39	0	6,8E-07
	S7	38	41	3	calcare marnoso	7,7	78	60	4,6E-07
	S8	54	58	4	calcare marnoso e argillite marnosa	2,8	52	28	1,7E-07
	S9	31	35	4	calcari marnosi con frequenti interstrati argilliti e marne	3	30	10	1,8E-07
	S10	8	10	2	calcare marnoso fratturato	12,9	45	40	7,7E-07
INDAGINI 2005	SA	20	21	1	calcare marnoso fratturato	24	60		1,4E-06
	SA	24	25	1	calcare fratturato	38	55		2,3E-06
	SA	30	31	1	calcare	18	65		1,1E-06
	SB	35	36	1	calcare intensamente fratturato	29,8	40		1,8E-06
	SB	38,5	39,5	1	calcare debolmente fratturato	1,7	80		1,0E-07
	SB	47	48	1	calcare	4,3	85		2,6E-07
	SC	14	15	1	calcare con riempimento 40 cm calcite	7,6	75		4,6E-07
	SC	19	20	1	calcare deb. marnoso poco fratturato con interstrati	6,6	70		4,0E-07
	SC	24	25	1	calcari, calcari marnosi loc. int, fratturati	7,3	50		4,4E-07
	SD	19	20	1	calcare marnoso con riemp. calcite	2,2	30		1,3E-07
	SD	32	33	1	calcare marnoso con interstrati	3,1	40		1,9E-07
	SD	39	40	1	calcare marnoso con interstrati	4,1	40		2,5E-07

Tabella 1

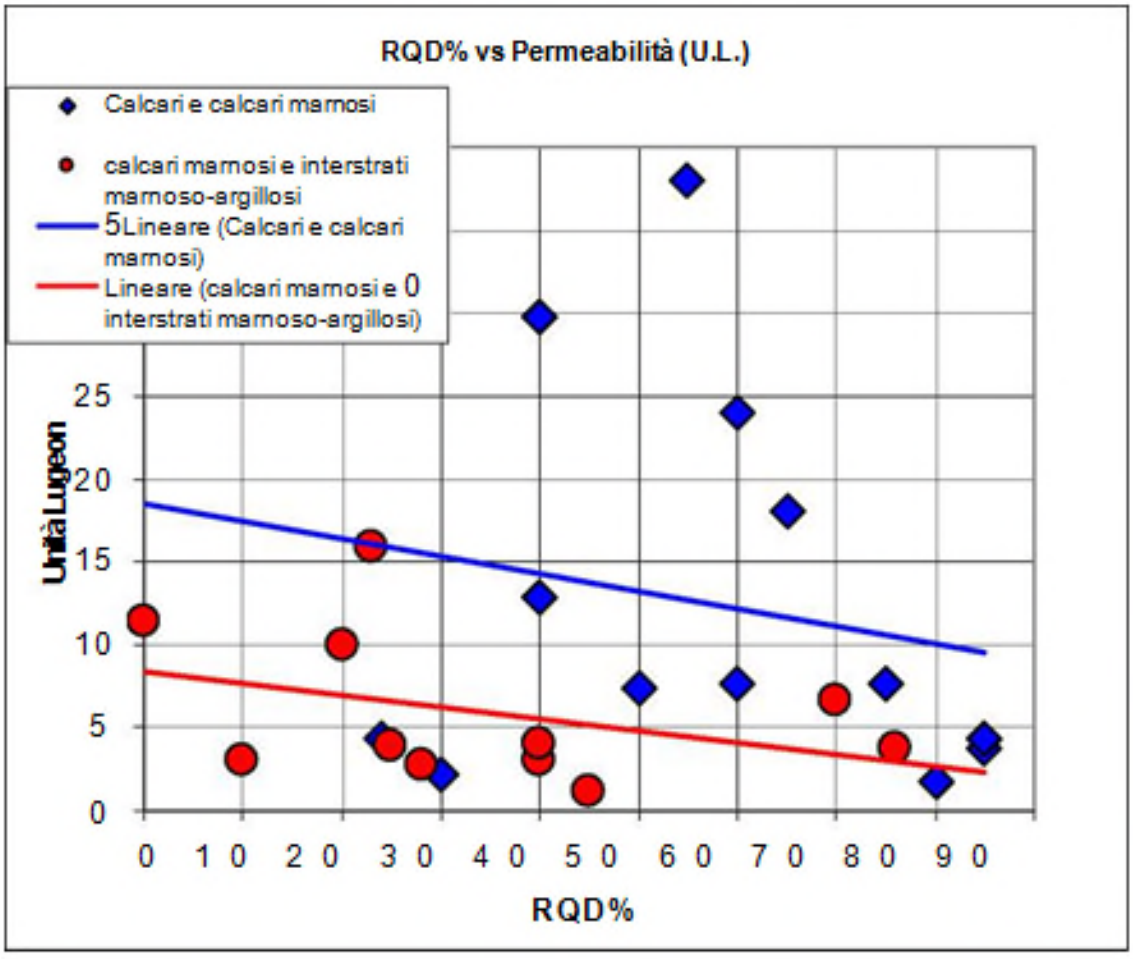


Figura 9

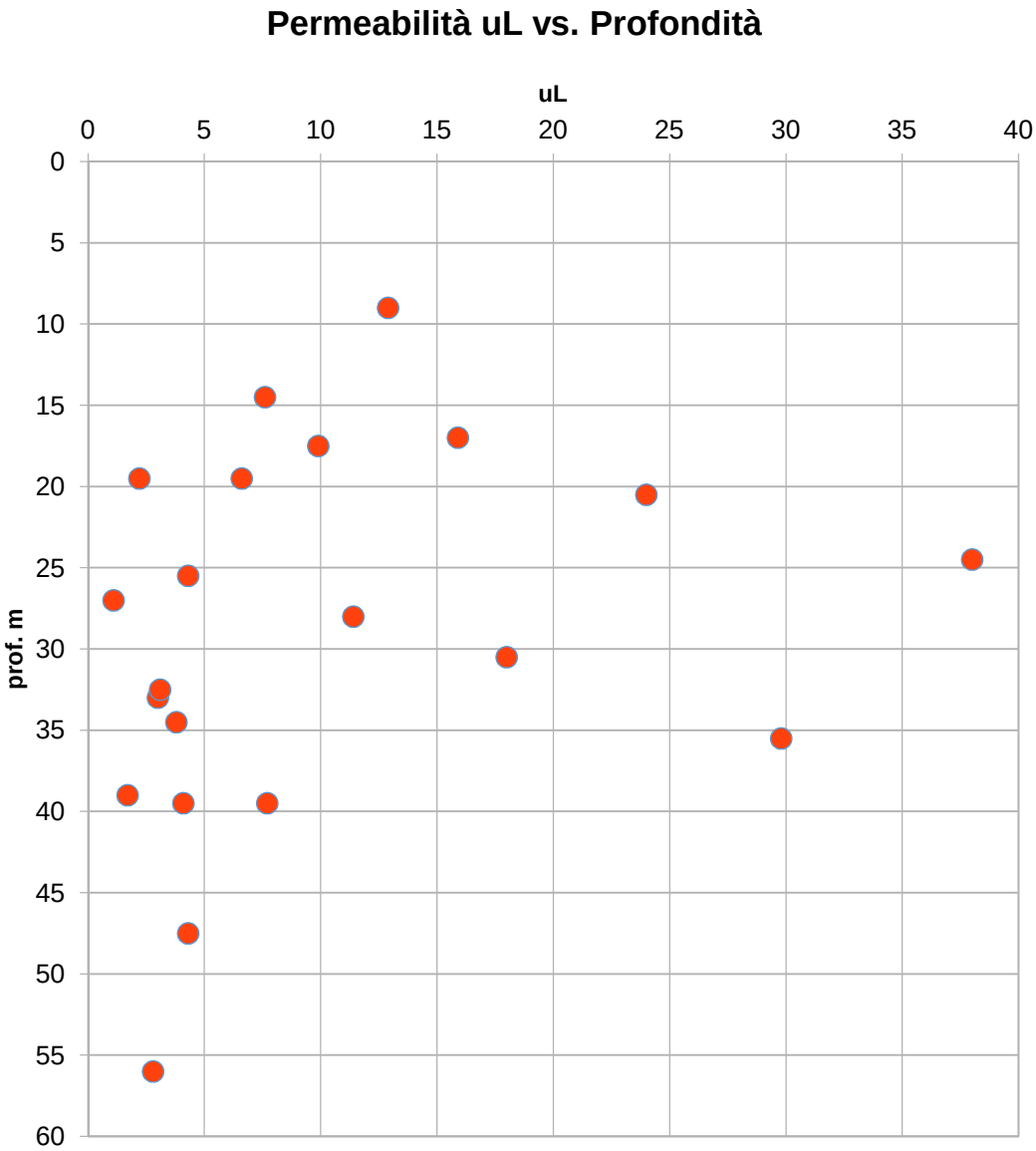

Permeabilità uL vs. Profondità
uL
0
5
10
15
20
25
30
35
40
prof. m
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60

Figura 10

6.1 Rilevamento geologico di campo

Nell'area investigata gli affioramenti di calcari sono pochi e di estensione modesta: ne sono stati individuati 5, la cui posizione è indicata in Fig. 4 (Allegato B). Di ciascun affioramento sono state misurate le giaciture delle discontinuità (stratificazione e fratturazione).

La roccia appare in discreto stato di conservazione, fratturata e poco alterata.

Le misure registrate sono elencate nella Tabella 2 che segue.
Fotografie degli affioramenti esaminati sono raccolte nell' Allegato C**.**

STAZIONE	K0 strato (°)	K1 frattura (°)	K2 frattura (°)
A	210/35	350/35	50/80
	210/30	340/30	45/75
	205/40	350/30	50/70
	220/35	355/25	65/75
	215/25	330/35	50/75
	240/35	315/25	45/85
B	155/40	310/60	40/85
	160/45	300/70	45/80
	165/50	290/65	50/75
	140/35	320/55	40/70
	150/45	305/60	40/85
	155/40	320/60	45/85
C	160/20	310/60	240/65
	150/30	350/80	220/70
	140/25	340/65	215/65
	155/25	320/60	250/50
	165/20	315/70	245/65
D	195/78	320/60	60/73
	200/80	315/65	50/75
	190/70	330/55	65/75
	185/75	320/65	70/75
	210/75	280/50	65/70
	190/75	310/55	55/70
E	210/40	320/73	50/85
	200/28	310/75	45/75
	220/30	300/85	60/85
	225/40	360/85	55/80
F	205/40	30/60	270/72
	210/35	40/65	90/70
	200/40	35/40	350/70

Tabella 2

7 CONSIDERAZIONI SULLA DEFORMAZIONE GRAVITATIVA PROFONDA DI VERSANTE (DGPV)

La DGPV è un fenomeno franoso che coinvolge il sistema crinale-versante-fondovalle, ed è stato oggetto di studi approfonditi solo negli ultimi decenni.

Essa viene catalogata tra i movimenti di “frana” in quanto comporta nello stesso modo dei cinematismi tradizionali uno spostamento verso il "basso" di una porzione di pendio a seguito della azione della gravità.

Cambiano però i parametri principali del fenomeno:

- la dimensione, che può raggiungere anche diversi chilometri quadrati; l'estensione del fenomeno e la sua mappatura sono facilitate da tecniche di aerefotogeologia e "remote sensing" in generale;
- la “velocità” con cui avviene il movimento della massa rocciosa (indicativamente inferiore al mm/anno).

Tali valori fanno ipotizzare caratteristiche affini alla geotettonica, ma tale presunzione appare tutta da chiarire, e nel nostro caso pare possa essere legato alle condizioni Neotettoniche illustrate al punto precedente.

Le deformazioni gravitative sono movimenti che tendono a portare in situazione di equilibrio versanti che, per cause diverse, in equilibrio non sono. Una delle cause predisponenti è l'esistenza di una condizione di debolezza strutturale, sia questa a piccola scala e intrinseca al materiale roccioso (scistosità, debolezza coesiva della roccia, ...), sia a scala medio strutturale e dipendente, dunque dalla geotettonica locale e regionale (esistenza di sistemi di fatturazione e faglie).

Questo fenomeno viene chiamato "deformazione" e classificato tra i "colamenti" ("flows") perché in genere, e nelle parti medio-basse, non si individua un vero piano di scivolamento. Questo si può trovare limitatamente nella zona sommitale del fenomeno, in genere evidenziato da tutta una serie di tagli (emersione di piani di movimento) trasversali alla linea di massima pendenza. Nella parte medio-bassa si verifica, piuttosto, un "rigonfiamento" ("bulging") del pendio verso l'esterno, a compensare la spinta verso il basso delle parti sommitali. Frequentemente, la porzione inferiore, trovandosi essa stessa in un nuovo e locale disequilibrio evolve in vera e propria “frana” per taglio con piano circolare o frana rotazionale, oppure di crollo.

In accordo con tali concetti, la Regione Liguria definisce la DGPV come movimento di massa molto complesso che si attua attraverso una deformazione per lo più lenta e progressiva della massa rocciosa, senza che vi siano apprezzabili superfici di rottura continue.

Il processo deformativo avviene per spostamenti differenziali estremamente lenti che si sviluppano lungo serie di giunti e piani di discontinuità variamente orientati, o per deformazione dell'ammasso roccioso, concentrati lungo fasce di maggior debolezza localizzati a diversa profondità e aventi differenti spessori.

Ciò determina un mutamento delle condizioni di stabilità generale di ampi settori di versante, coinvolgendoli dagli spartiacque fino, talora, al fondovalle per profondità che superano il centinaio di metri, causando spostamenti di volumi rocciosi di parecchie decine di milioni di metri cubi verso il basso e verso l'asse della valle.

Le evidenze morfologiche più significative si osservano dunque sulle parti sommitali dei versanti, caratterizzati dalla presenza di contropendenze e trincee (trench), nonché di veri e propri avvallamenti trasversali al versante o lungo le dorsali spartiacque. Si verificano così quei tipici fenomeni di sdoppiamento anche multiplo della cresta stessa (sackung).

In tal senso il versante di interesse presenta alcune analogie con le descrizioni generali suindicate, sia a monte (valutando la morfologia del versante rispetto a quella confinante ai lati, l'interruzione di continuità morfologica conseguente alla presenza di estesi ripiani, i repentini cambi di pendenza ascrivibili a scarpate morfologiche allungate, la convergenza delle due aste torrentizie che confinano l'areale) che alla base, come già descritto precedentemente, in rapporto al disturbo tensionale rilevato a carico dell'ammasso roccioso.

Allo scopo di meglio definire il dettaglio geomorfologico di questo settore sono state analizzate le foto aeree esistenti, il risultato è riportato alle Fig13 e 14.



Figura 11 Contorni presunti della DGPV Scala 1:2000



Figura 12 Veduta frontale dell'area di studio

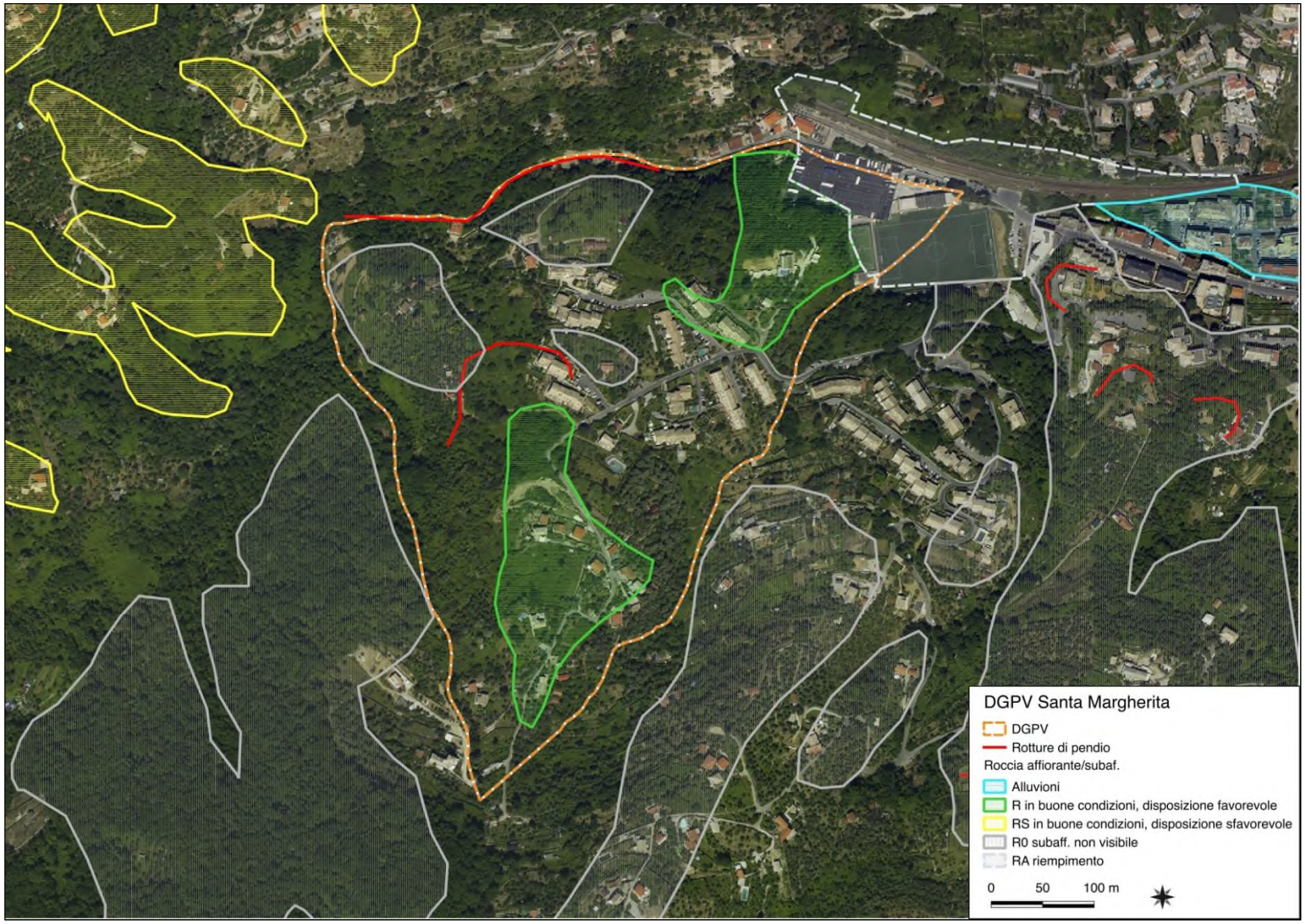


Figura 13 Analisi Geomorfologica su foto Aeree dell'area, con Dettaglio della DGPV

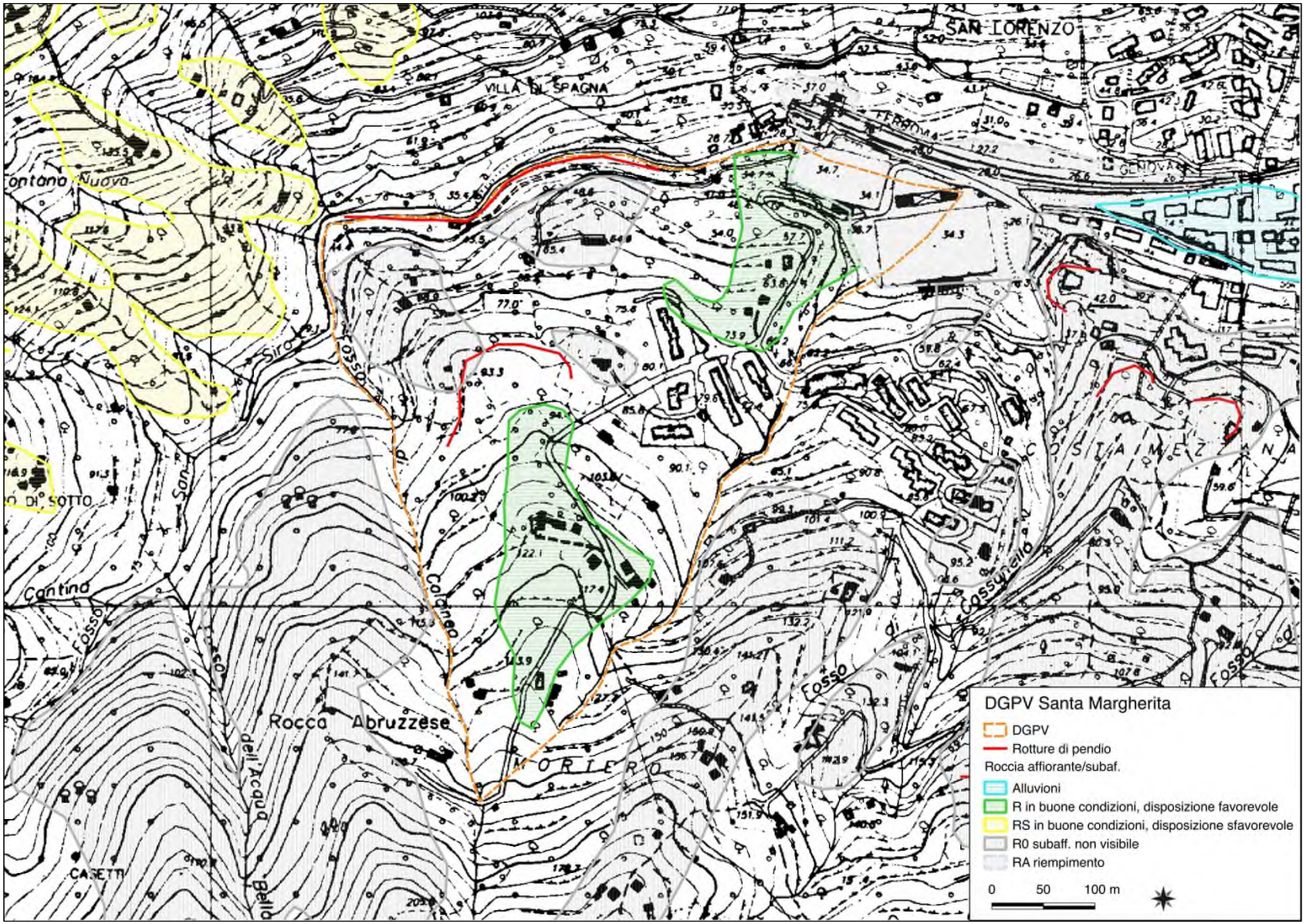


Figura 14 Dettaglio della DPGV riportato su CTR

8 STRATIGRAFIA

Nei capitoli che seguono si esaminano in particolare le condizioni litostratigrafiche e le proprietà geotecniche e geomeccaniche dei terreni di coltre e della roccia del substrato nel tratto iniziale della galleria dove essa si sviluppa per una lunghezza di circa 200m nell'area ascritta alla deformazione gravitativa profonda. Basandosi sulle informazioni derivanti dal rilevamento di superficie, da due sondaggi geognostici eseguiti in corrispondenza dell'imbocco e del primo tratto di galleria e dalle indagini geofisiche di superficie, è stato possibile caratterizzare dal punto di vista geotecnico i terreni della coltre eluvio – colluviale e definire la qualità dell'ammasso roccioso secondo noti e referenziati sistemi di classificazione.

La stratigrafia tipica dei terreni nell'area di studio è costituita da un sistema a due strati: la coltre eluvio – colluviale e il basamento calcareo marnoso del flysch di M.te Antola. La transizione è costituita da uno strato di roccia alterata e fratturata fino alla destrutturazione.

La coltre oblitera totalmente il substrato ma con spessori modesti (3 – 10m).

La geofisica e le perforazioni hanno permesso di costruire 5 sezioni interpretative dell'assetto stratigrafico del sito.

Le sezioni sono raccolte nell'Allegato B, dove la loro traccia planimetrica è indicata alla Tavola 1.

9 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI DELLA COLTRE DI COPERTURA

9.1 Aspetti generali

Nel tratto indagato i terreni di coltre presentano spessori modesti, compresi tra circa 4,0m e <1,0m come evidenziato dai sondaggi SG1 e SG2, i profili sismici di superficie, MASW e HVSR, individuano spessori di coltre massimi di 4-5m e uno strato sottostante di spessore massimo di 5-7m associabile al cappellaccio di alterazione del substrato calcareo.

Dal punto di vista geotecnico i terreni della coltre sono costituiti da materiali granulari anche rimaneggiati in matrice limo sabbiosa con clasti di litologia calcarea, la matrice può essere presente in percentuali elevate, lo stato di addensamento è medio. Lo strato di alterazione del calcare marnoso è costituito da roccia alterata e destrutturata.

Per l'attribuzione dei parametri geotecnici si possono utilizzare i dati forniti dai sondaggi e dalle indagini geofisiche: i primi sono limitati a due prove SPT eseguite nel sondaggio SG1 nei primi 3,50m, le seconde sono costituite in 5 profili MASW.

Alcune informazioni ulteriori sono fornite da prove geotecniche condotte su di un unico campione di coltre prelevato nel sondaggio SG1 alla profondità di 2.0m.

9.2 Parametri da prove SPT

Le prove SPT hanno dato N=21 alla profondità di 2,20m e N=18 alla profondità di 3.50m.

Questi valori indicano terreni mediamente addensati, con una densità relativa D_R dell'ordine del 40-50%. La massa volumica dei terreni di coltre può essere ragionevolmente considerata di 2000kg/m^3

È possibile stimare il valore dell'angolo di attrito effettivo dei terreni sabbiosi in base al valore di N, la stima fornisce valori di ϕ' sovrastimati nel caso di prove superficiale (z<5m) e diventa puramente indicativa in presenza di alte % di ghiaia e di fine.

Sono disponibili in letteratura numerose relazioni empiriche Nspt – ϕ', sia dirette oppure stimando dapprima la D_R e da questa ϕ'; è preferibile utilizzare le correlazioni dirette.

Si utilizzano le seguenti correlazioni:

Meyerhof (1965) suggerisce per prove superficiali (z<5m) l'espressione seguente:

$$\phi' = 23,7 + 0,57Nspt - 0,006Nspt^2$$

Inserendo Nspt = 20 si calcola ϕ' = 32,7°

Più recente la correlazione proposta da Mayne (2010) e riportata anche da NHI (National Highway Institute):

$$\phi' = (N_{60}*15,4)^{0,5} + 20$$

Per N_{60} = 15 si calcola ϕ' = 35°

Per quanto riguarda la stima del modulo elastico E sussistono le stesse limitazioni ricordate per l'angolo di attrito, le correlazioni sono del tipo E = s_1*Nspt + s_2 dove s1 e s2 sono costanti che

dipendono dalla natura del terreno, a rigore queste relazioni sono valide per sabbie o mix di ghiaie e sabbie. Nel caso in esame si utilizzano le relazioni seguenti con Nspt = 20.

D'Appolonia (1970) per ghiaie con sabbia

E = 0.756*20 + 18,75 = 34MPa

Webb per sabbie

E = 0.478*20 + 7.17 = 17MPa

Schultze per terreni granulari in genere

E = 0.517*20 + 7.46 = 18MPa

9.3 Parametri da indagini geofisiche

E' possibile una stima grossolana di ϕ' a partire dalla velocità delle onde di taglio Vs, i valori di Vs per i primi 4m di coltre sono compresi tra 150 300m/s, la correlazione suggerita è la seguente (si veda Roccaforte F. & Cucinotta C, Stima dei parametri geotecnici in geofisica applicata, Flaccovio editore, 2015)

$$\phi' = 28,6*lnVs - 122,23$$

Inserendo un valore di Vs medio per la coltre di 250m/s si ottiene ϕ' = 33°.

Per quanto concerne lo strato di transizione coltre – substrato calcareo marnoso costituti da roccia molto fratturata, alterata e destrutturata, con velocità Vs compresa tra 400 e 600m/s questo può essere assimilato, a favore di sicurezza, alla sovrastante coltre.

9.4 Parametri da prove geotecniche di laboratorio

Un solo campione parzialmente disturbato (spezzone di carota) è stato prelevato durante la perforazione del sondaggio SG1, tale campione può essere considerato rappresentativo della frazione fine della coltre anche in relazione al modesto spessore della medesima.

Il campione è risultato essere una argilla inorganica con sabbia in percentuale subordinata e pochi clasti calcarei centimetrici, (argilla+limo 66.74% - sabbia 20.58% - ghiaia sottile 12.68%) moderatamente plastica (Limite liquido 46% - Limite plastico 24% - Indice di plasticità 22).

La massa volumica è risultata di 1900kg/m

E' stata inoltre eseguita una prova di taglio diretto, in condizioni consolidate e drenate, per una ulteriore valutazione della resistenza a taglio in termini di tensioni efficaci (angolo di attrito efficace ϕ' e coesione efficace c'), l'angolo di attrito è risultato pari a 30,6° e la coesione a 4,3kPa, che si suggerisce di trascurare a favore di sicurezza. Il valore di ϕ' è ragionevolmente coerente con le stime da Nspt.

10 L'AMMASSO ROCCIOSO

I sondaggi hanno evidenziato la presenza del substrato flyschoide sotto una debole ricopertura di terreni sciolti.

La transizione coltre – basamento è costituita da uno strato di calcare marnoso alterato, fratturato fino a destruttorato, con aspetto di un ghiaione.

Per la caratterizzazione del substrato sono stati scelti alcuni spezzoni di carote, 2 spezzoni da ciascun sondaggio, i campioni sono stati utilizzati per effettuare le seguenti prove geomeccaniche di laboratorio:

N. 4 determinazioni della massa volumica

N. 4 prove di compressione monoassiale , due delle quali con controllo delle deformazioni

N. 2 prove di trazione indiretta "brasiliane"

N. 21 prove di Point- Load

Le prove hanno fornito i seguenti risultati

Massa volumica 2500-2600kg/m^3 valore medio 2592kg/m^3

Resistenza alla compressione monoassiale compresa tra 26 e 33MPa valore medio 29,66MPa

Resistenza a trazione indiretta 5.11 – 6.44MPa

Ulteriori informazioni circa la resistenza della roccia sono state ricavate da 21 prove di Point Load eseguite su spezzoni di carote: come noto questa prova fornisce valori di resistenza soggetti ad un errore maggiore rispetto alle prove di compressione.

Nove delle 21 prove sono state eseguite con applicazione diametrale del carico, le restanti con applicazione assiale; il rapporto tra i due valori da una indicazione approssimata dell'anisotropia della roccia.

Il coefficiente di correlazione tra l'indice di Point Load e la resistenza UCS per il calcare dell'Antola è di 17, valore calcolato sperimentalmente. Si ottengono i valori riepilogati nella Tabella che segue: i valori medi di UCS derivata sono, rispettivamente, di 58.7MPa per le prove assiali e 28,9MPa per le prove diametrali, risulta quindi evidente una significativa anisotropia di resistenza in funzione della direzione di applicazione del carico.

Per quanto riguarda la posizione della falda alla data di esecuzione delle indagini, questa è stata individuata a 7m di profondità nel sondaggio SG1 e a 18m nel sondaggio SG2.

La permeabilità del substrato è condizionata dal grado di fratturazione della roccia e dalla separazione dei giunti. I risultati delle prove Lugeon eseguire nel corso delle indagini 2015, 2005 e 2003 sono compresi tra 1uLa oltre 30uL. Si osserva una moderata tendenza ad una diminuzione della permeabilità all' aumentare della profondità (si veda il grafico di Figura 10).

I risultati delle prove PLT sono riepilogati nella Tabella che segue. I certificati del laboratorio sono raccolti nell'Allegato E.

11 CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA DEL BASAMENTO CALCAREO

Si presenta nel seguito la classificazione geomeccanica dell'ammasso roccioso costituito dal flysch calcareo marnoso con interstratificazioni argillitiche di Monte Antola che costituisce la litologia entro la quale si sviluppa l'intero tracciato della galleria.

In particolare gli elementi conoscitivi necessari ad applicare i criteri di classificazione sono costituiti da informazioni derivate dai sondaggi geognostici SG-1 e SG-2, realizzati in asse in prossimità dell'imbocco NW della galleria e nel suo tratto iniziale che si sviluppa entro l'area interessata dal dissesto gravitativo profondo (si veda la Figura 1). L'area è stata inoltre oggetto di un rilevamento geologico di superficie di dettaglio.

Per quanto riguarda i sondaggi le osservazioni geostrutturali derivano dall'analisi ed interpretazione di rilievi in foro con telecamera ultrasonica (si veda il Rapporto della GEOlogic sas), oltre alle giaciture sono state registrate informazioni qualitative relative alla morfologia ed apertura dei giunti di discontinuità oltre alla misurazione delle giaciture. Di queste osservazioni si dirà successivamente.

Il rilevamento di superfice ha interessato 5 affioramenti, di modesta, estensione, (stazioni A-B-C-D-E) ubicati in prossimità dell'imbocco NW della galleria e del primo tratto che attraversa la porzione superficiale del movimento gravitativo profondo. Su questi affioramenti sono state misurate le giaciture della discontinuità presenti (giunti di strato e di fessurazione) per un totale di 90 misurazioni (si veda Tabella 2 a pag.16), non sono state effettuate altre misurazioni.

12 CRITERI DI CLASSIFICAZIONE ADOTTATI

L'ammasso roccioso flyschoide è classificato sia in base alle procedure stabilite dalla Classificazione Geomeccanica nota come sistema RMR (Rock Mass Rating, Bieniawski 1972 – 1989) sia secondo i criteri enunciati dal sistema Q (Barton, Lien e Lunde, NGI, 1974). I sistemi utilizzano criteri sostanzialmente analoghi anche se inseriti in formulazioni diversificate, entrambi sono nati per fornire informazioni codificate per la progettazione degli interventi di supporto di scavi in sotterraneo.

12.1 Classificazione dell'A.R. con il sistema RMR89

Il metodo si basa sulla valutazione della qualità dell'ammasso roccioso mediante l'attribuzione, a 6 parametri caratteristici della roccia di un punteggio che dipende dalla "qualità" del parametro stesso.

I parametri da valutare/determinare sono i seguenti:

RQD%	calcolato da sondaggi
resistenza a compressione non confinata	determinata in laboratorio
spaziature delle discontinuità	misurata in sito
condizioni delle discontinuità comprendono	la persistenza, l'apertura, la scabrezza, il materiale di riempimento, il grado di alterazione
condizioni idrauliche	orientazione

Il valore dell'Indice RMR così calcolato consente di definire il parametro GSI *(Geological Strenght Index, Hoek, Kaiser e Bawden, 1995-2002)* che fornisce un criterio per stimare la riduzione dei parametri di resistenza alla scala dell'ammasso in funzione delle condizioni geologiche.

In questo caso non si dispone di tutti i dati necessari, quelli mancanti saranno stimati sulla base di dati tipici relativi all'AR noti da precedenti rilievi:

RQD% determinato nei sondaggi =50%

Resistenza alla compressione non confinata (UCS) il valore medio per i calcari marnosi in base a oltre 200 risultati è di 40MPa

Morfologia/rugosità	misurata mediante osservazione dell'elaborazione delle riprese TV
Apertura	misurata mediante osservazione dell'elaborazione delle riprese TV
Spaziatura	stimata da osservazione dell'elaborazione delle riprese TV
Persistenza, alterazione, riempimento	stimati da informazioni relative ad altri lavori

Con accettabile approssimazione il valore di RMR risulta dalla somma dei valori attribuiti a ciascun parametro:

12.2 Attribuzione dei punteggi ai singoli parametri

RQD	50%	punti	8
UCS	25-50MPa	punti	4
SPAZIATURA	<60mm-60/200mm	punti	5/8
CONTINUITA*	1-3m/3-10m	punti	4/2
SCABREZZA	lisci/deb.scabri	punti	1/3 (si veda istogramma di Figura 1)
APERTURA *	>5mm/1-5mm	punti	0/1 (si veda istogramma di Figura 2)
RIEMPIMENTO*	>5mm/<5mm	punti	0/2
ALTERAZIONE*	mod.alt/alterati	punti	5/3
COND.IDRAULICHE*	asciutti	punti	15

(*) valore tratto da dati di altri lavori

(**) default per calcolo GSI

RMR(minimo)	40	scadente al limite di discreta
RMR(massimo)	48	discreta
GSI (minimo)	35	
GSI(massimo)	43	

12.3 Classificazione dell'AR con il sistema Q

Il sistema di classificazione Q sviluppato dal Norwegian Geotechnical Institute (Barton, Lien e Lunde) è anch'esso basato sulla conoscenza di 6 parametri che formano3 rapporti il cui prodotto esprime il valore di Q.

I sei parametri sono:

RQD%

Jn un fattore che dipende dal numero di sistemi di discontinuità

Jr un fattore che dipende dalla scabrezza dei giunti

Ja un fattore che dipende dal grado di alterazione dei giunti

Jw un fattore che dipende dalla pressione di acqua nell'ammasso

SRF un fattore che dipende dallo stato tensionale della roccia

$$Q = RQD/Jn * Jr/Ja * Jw/SRF \qquad (1)$$

I primi due parametri rappresentano la struttura dell'ammasso e il loro rapporto rappresenta la dimensione del blocco, il rapporto tra il terzo e il quarto fattore rappresenta la resistenza intergranulare tra i blocchi, il rapporto tra il quinto e il sesto fattore descrive lo stato tensionale attivo dell'AR,

A differenza di RMR, nelle applicazioni di tunneling Q non tiene conto dell'orientazione delle discontinuità.

In questo caso i fattori assumono i valori seguenti:

RQD = 50

Jn = 6 (2 sistemi + giunti random)

Jr = 1.5-1.0 (superfici piane e irregolari / superfici piane e lisce)

Ja = 3 – 4 (giunti leggermente alterati / moderatamente alterati

Jw = 1.0 (scavo asciutto o flusso trascurabile)

SRF = 2.5 – 5.0 (basso stato tensionale – roccia molto fratturata, destrutturata)

Calcolando Q per le differenti combinazioni dei fattori si ottiene Q(massimo) = 1.66 e Q(minimo) = 0.42

Questi valori identificano un A.R. di qualità da scadente e molto scadente

13 ANALISI DEI MECCANISMI DI ROTTURA DELL'AMMASSO ROCCIOSO CINEMATICAMENTE POSSIBILI

13.1 Aspetti generali

I fenomeni di instabilità che coinvolgono il movimento di blocchi di roccia secondo i piani di discontinuità presenti nell'ammasso risultano da una, o dalla combinazione, di tre modalità fondamentali *(Goodman, 1989):*

- lo scivolamento piano,
- lo scivolamento di un cuneo
- il ribaltamento di blocchi

Affinché una delle tre tipologie basiche di rottura possa avvenire devono essere soddisfatte alcune condizioni geometriche:

Per lo scivolamento di un blocco di roccia su di un piano per effetto della gravità è necessario che il piano di scivolamento abbia una inclinazione tale da intercettare la superficie libera del fronte roccioso e che l'inclinazione del piano di rottura sia maggiore della resistenza attritiva disponibile sul piano di rottura. È inoltre necessario che il blocco sia libero lateralmente ovvero che venga superata la resistenza della roccia che lo confina oppure che il blocco sia delimitato da superfici di discontinuità deboli.

Per lo scivolamento di un cuneo di roccia è necessario che esistano due piani di discontinuità che si intersecano a definire un tetraedro, che la linea intersezione dei due piani intercetti la luce libera del fronte e che l'inclinazione della linea intersezione che delimita il blocco sia maggiore dell'angolo di attrito disponibile lungo i piani di scorrimento.

Una rottura per ribaltamento presuppone la presenza sul fronte di discontinuità verticali o subverticali delimitate alla base da altre discontinuità con orientazione tale da poter scivolare, in questo caso gli elementi verticali possono ribaltarsi sia come colonne rigide sia a seguito di flessione sotto l'azione del peso proprio.

Le verifiche dei fronti rocciosi esaminati nei riguardi dell'instaurarsi di possibili meccanismi di rottura a carico della roccia in posto sono effettuate analizzando i rapporti geometrici (di orientazione) che intercorrono tra i diversi sistemi di discontinuità che interessano l'ammasso roccioso e l'orientazione del fronte. Queste analisi sono di tipo cinematico e, quindi, si riferiscono esclusivamente al moto di corpi senza alcun riferimento alle forze che causano il movimento stesso.

Al fine di condurre le analisi è necessario definire alcune proprietà dei giunti di discontinuità presenti nell'ammasso: in particolare occorre stabilire le caratteristiche di scabrezza delle superfici dei giunti, rappresentate mediante il Coefficiente di Rugosità *(JRC, Joint Roughness Coefficient – Barton & Choubey, 1977)* e stimare la resistenza della roccia adiacente i giunti espressa mediante il valore del coefficiente JCS - Joint Compressive Strength - espresso in MPa. *(Barton, 1973-1990).*

I valori di resistenza della roccia al contorno del giunto possono differire significativamente dalla resistenza della roccia integra per effetto, ad esempio, del maggior grado di alterazione che tipicamente si osserva in corrispondenza delle discontinuità. La resistenza JCS è normalmente determinata mediante misure puntuali effettuate con lo sclerometro appropriato (“martello di Schmidt). Dal numero di “rimbalzo” misurato si risale al valore della resistenza a compressione non confinata della roccia. I risultati sono, tipicamente approssimati in quanto soggetti ad ampia dispersione che cresce esponenzialmente all’aumentare della durezza della roccia. La conversione può essere effettuata utilizzando nomogrammi o, meglio, correlazioni sperimentali

Nel caso in esame non sono disponibili misure dirette sia della scabrezza delle superfici di discontinuità sia di resistenza della roccia adiacente ai giunti, si sono pertanto utilizzati valori di resistenza attritiva lungo il giunto (angolo di attrito) tipici del flysch di M.te Antola, calcolati per altri progetti e pari a 30° e 35°.

14. RISULTATI DELLE ANALISI STRUTTURALI

Per una valutazione delle condizioni di stabilità cinematica degli scavi nei confronti dei possibili modi di rottura si è fatto ricorso all'opzione disponibile in *DIPS 6.017 (Rocscience lnc, 2016*) che consente di valutare le condizioni cinematiche di stabilità di blocchi di roccia presenti su di un versante o fronte roccioso fratturato, generati dall'intersezione tra i piani di discontinuità e non vincolati cosicché possano muoversi per effetto della gravità se la resistenza per attrito disponibile lungo le superfici venga superata *(Goodman, 1989).*

Per mezzo di semplici costruzioni sul reticolo stereografico è possibile individuare quali piani possano generare, per una data orientazione ed inclinazione del fronte di scavo, blocchi o cunei di roccia discreti in condizioni instabili nei confronti di uno o più dei possibili modi di rottura o per una combinazione di questi.

Le analisi sono state condotte considerando i valori estremi dell'angolo di attrito lungo i giunti sopra ricordati.

Si sono analizzate le condizioni di stabilità cinematica delle pareti della galleria e del fronte di avanzamento assumendo fronti di scavo sub-verticali con direzioni di immersione contrapposte nel caso delle pareti del tunnel. Le analisi sono state eseguite nei confronti dello scivolamento di un blocco lungo un piano e di un cuneo lungo l'intersezione tra due piani, non è stata analizzata la rottura per ribaltamento.

Per la costruzione degli stereoplot si sono utilizzati i dati di orientazione delle discontinuità misurati sugli affioramenti presenti nelle adiacenze del tracciato, non si è invece ritenuto utile utilizzare i dati derivati dal log geomeccanico eseguito nel sondaggio SG-2 in quanto poco coerenti con le misure di superficie in sito: in pratica la proiezione stereografica restituisce una distribuzione random dei poli dei piani che contrasta con la presenza di cluster ben definiti di differenti set di discontinuità (si vedano e si confrontino in proposito le Figure 3, 4, 5, 6, 7 presentate in Allegato G).

A seguito delle singole analisi effettuate che hanno verificato le condizioni seguenti,

Scivolamento di un blocco lungo i piani di strato S e di frattura J1 e J2
Scivolamento di un cuneo lungo la linea intersezione (media) S-J1, S-J2, J1-J2

Considerando sia un angolo di attrito di 30° sia di 35°, si è ottenuto un quadro complessivo delle condizioni di potenziale rischio di rotture nell'A.R. per le differenti interferenze geometriche, questo risultato è sintetizzato nello schema di Tabella1 seguente.

I risultati delle analisi per il caso di phi =30° sono presentati mediante gli elaborati grafici delle Figure da 8 a 21 prodotti da Dips.

	PARETI DI SCAVO				FRONTE DI SCAVO	
	DIR-IM-FRONTE/INCL		DIR-IM-FRONTE/INCL		DIR-IM/INCL	
	NE(90/45)	SW(90/225)	NE(90/45)	SW(90/225)	90/315	
	PHI (GIUNTO) = 30°		PHI (GIUNTO) = 35°		PHI =30°	PHI = 35°
SCIV.BLOCCO						
TUTTI I PIANI						
J1						
J2						
STRAT						
SCIV.CUNEO						
TUTTE LE INTERS.						
S-J1						
S-J2						
J1-J2						

CHIAVE	
	0 - 10%
	10 - 30%
	30 - 50%
	50 - 70%
	>70%

Tabella 4