

COMUNE DI CARONA
PROVINCIA DI BERGAMO

COMMITTENTE
Amministrazione comunale di Carona

**ESTENSIONE DELLE OPERE DI PROTEZIONE DALLA CADUTA
MASSI IN LOCALITÀ MISOI**

**CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E
SISMICA AI SENSI DELLA LR 12/2005 (DGR
IX/2616/2011) E DEL DM 17 GENNAIO 2018**

Settembre 2021

ERA

Via Promessi Sposi 24 b – 24127 Bergamo (BG)
Email mail4info@era.cc – Tel/Fax +39 035.265.2801

RESPONSABILE DELLE PRESTAZIONI

Geol. Umberto Locati



INDICE

1.	PREMESSA	3
2.	CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO – GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA	8
2.1	Inquadramento geostrutturale, geologico ed idrogeologico	8
2.2	Dinamica del dissesto e sua probabile evoluzione	13
2.3	Analisi di dettaglio	16
2.3.1	Settore 1	16
2.3.2	Settore 1b	18
2.3.3	Settore 2	18
2.3.4	Settore 3	20
2.3.5	Settore 4	22
2.3.6	Settore 4b	25
2.3.7	Settore 5	26
2.3.8	Settore 6	28
2.3.9	Settore 6b	31
2.3.10	Settore 7	31
2.3.11	Settore 7B	35
2.3.12	Settore 8	35
2.3.13	Situazione A	38
2.3.14	Situazione B	40
2.3.15	Situazione C	41
2.3.16	Settore C2	41
2.3.17	Settore 9	42
2.3.18	Sintesi dei settori sottesi alle aree oggetto dell'intervento di mitigazione	43
3.	MODELLAZIONE SISMICA DEL SITO	45
3.1	Inquadramento sismico (accelerazione sismica di base)	45
3.2	Vita di riferimento	47
3.3	Aspetti metodologici	51
3.3.1	Amplificazione litologica	51
3.3.2	Amplificazione topografica	54
3.4	Verifiche sitospecifiche	54
3.4.1	Amplificazione litologica	54
3.4.1.1	Indagini di riferimento	54
3.4.1.1.1	Metodologia di indagine HVSr	55
3.4.1.1.1.1	Strumentazione	56
3.4.1.1.1.2	Restituzione dei risultati	57
3.4.1.2	Risultati	57
3.4.2	Amplificazione morfologica	58
3.5	Valutazioni complessive	58
3.6	Liquefazione del terreno	59
3.7	Definizione dell'andamento del substrato roccioso	60
4.	ELEMENTI GEOGNOSTICI E PARAMETRIZZAZIONE	62
4.1	Interazione strutture – terreno	62
4.2	Definizione dei parametri e del profilo geotecnico	62
4.3	Parametri geotecnici caratteristici	63
5.	CARATTERISTICHE SINTETICHE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO CONSEQUENTI ALL'INDAGINE	66
6.	SINTESI	68
	APPENDICE A	72
	Indagini sismiche di riferimento	72
	HVSr 1	72
	HVSr 2	74
	HVSr 3	76
	HVSr 4	78



Gestione dei diritti (Rights Management)

CC – BY – NC – SA

REVISIONE	DATA	OGGETTO
00	Sett. 2021	Emissione
01		
02		
03		

Estratto da metadata standard ISO15836 / Dublin Core (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>)

Il presente documento è costituito da 79 pagine.

Le leggi e le altre normative menzionate in questo documento ed eventuali allegati sono fornite al solo scopo informativo ed elaborate per un inquadramento tecnico dell'incarico; non costituiscono in alcun modo parere o raccomandazione legale.

Il consulente risponde unicamente sulla rispondenza del presente documento agli obiettivi descritti in premessa e/o meglio precisati nell'atto di affidamento dell'incarico. La responsabilità per l'utilizzo delle valutazioni / dati contenuti nel presente documento per qualsiasi altra finalità, ricade esclusivamente sull'utilizzatore dei dati stessi; pertanto non si assume alcuna responsabilità per eventuali danni sofferti, risultanti da decisioni intraprese e/o azioni eseguite da terze parti sulla base dei contenuti del presente documento ed eventuali allegati.

Le valutazioni riportate nel presente documento sono basate su informazioni acquisite o disponibili in conseguenza dell'affidamento dell'incarico e sono condizionate dai limiti imposti dalla tipologia e dalla consistenza dei dati utilizzabili, dalle risorse disponibili, nonché dal programma di lavoro concordato.

1. PREMESSA

Nel presente documento, redatto su incarico dell'Amministrazione Comunale di Carona, è fornita la caratterizzazione geologica, geomorfologica, idrogeologica e geotecnica relativamente ad una serie di interventi di mitigazione del rischio per caduta massi correlato alla presenza di risalti rocciosi in località Misoi.

Gli interventi sono posti a protezione della porzione centro – settentrionale dell'abitato (si veda Figura 1).

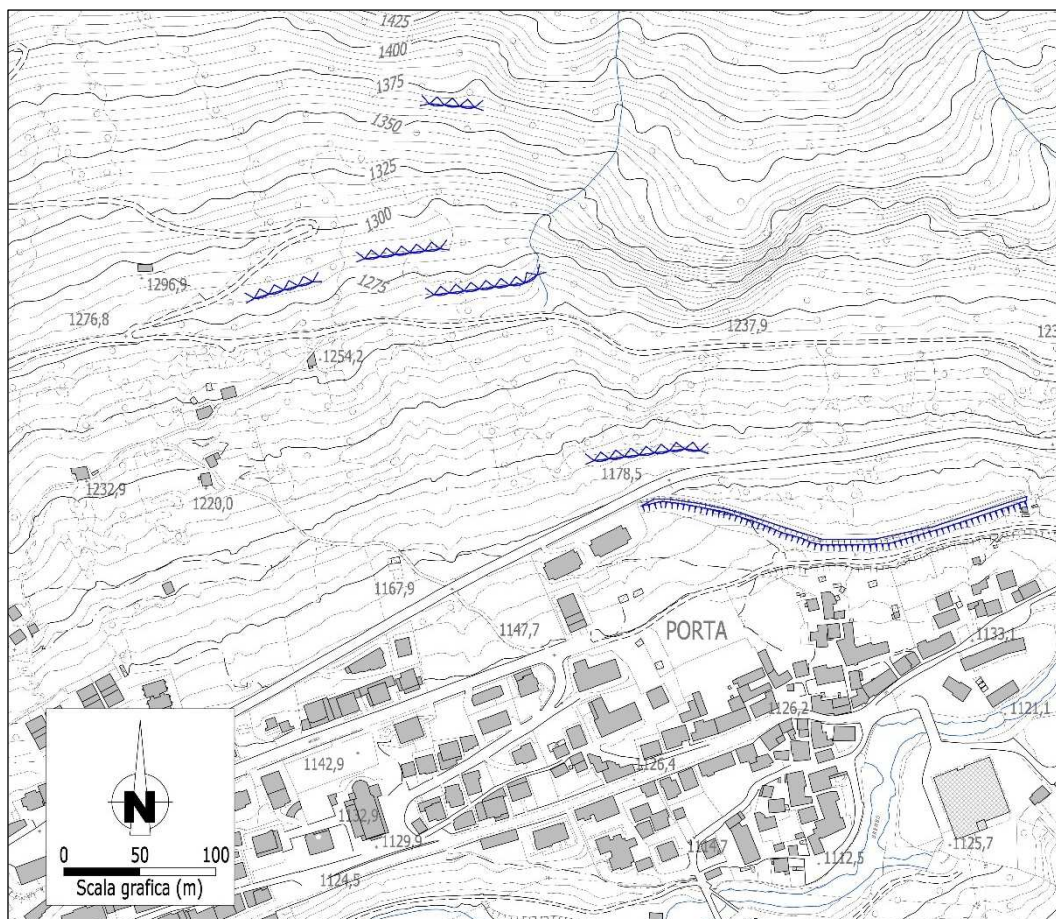


Figura 1: Ubicazione dell'area sulla Carta Tecnica Comunale (riproduzione in scala 1:10.000). In blu sono indicate le opere di difesa passiva esistenti o in corso di realizzazione non oggetto di valutazione nel presente documento.

Dal punto di vista normativo, gli approfondimenti contenuti nel presente documento sono realizzati ai sensi della LR 12/2005 e relativi criteri attuativi (DGR IX/2616/2011), nonché ai sensi del DM 17 gennaio 2018 "Norme Tecniche per le Costruzioni" (in seguito NTC18) e della Circolare 7 del 21 gennaio 2019 "Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle 'Norme tecniche per le costruzioni' di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018" (in seguito Circolare 7/2019); oltre a ciò si fa riferimento alla DGR X/5001/2016 relativamente agli aspetti di amplificazione sismica locale.

Il comune di Carona è dotato di "Studio geologico del territorio comunale" redatto ai sensi della LR 12/2005 ed i relativi criteri attuativi (DGR IX/2616/2011). Nello

studio geologico la zonazione della fattibilità è stata fatta per l'intero territorio comunale (un estratto è riportato in Figura 2): i risalti rocciosi rientrano in classe di fattibilità 4 (fattibilità con gravi limitazioni) in quanto classificate come aree sorgenti di crolli, come pure parte delle falde detritiche sottostanti in quanto soggette a transito di massi o a fenomeni di valanga; le restanti aree rientrano in classe di fattibilità 3 (fattibilità con consistenti limitazioni) in quanto soggette a fenomeni di transito o accumulo di fenomeni di crollo.

Come previsto dalla DGR IX/2616/2011 (sezione 3.1.4), essendo le opere in progetto di interesse pubblico e di pubblica utilità, la loro realizzazione può comunque avvenire indipendentemente dal grado di fattibilità (cioè anche entro aree in classe 4).

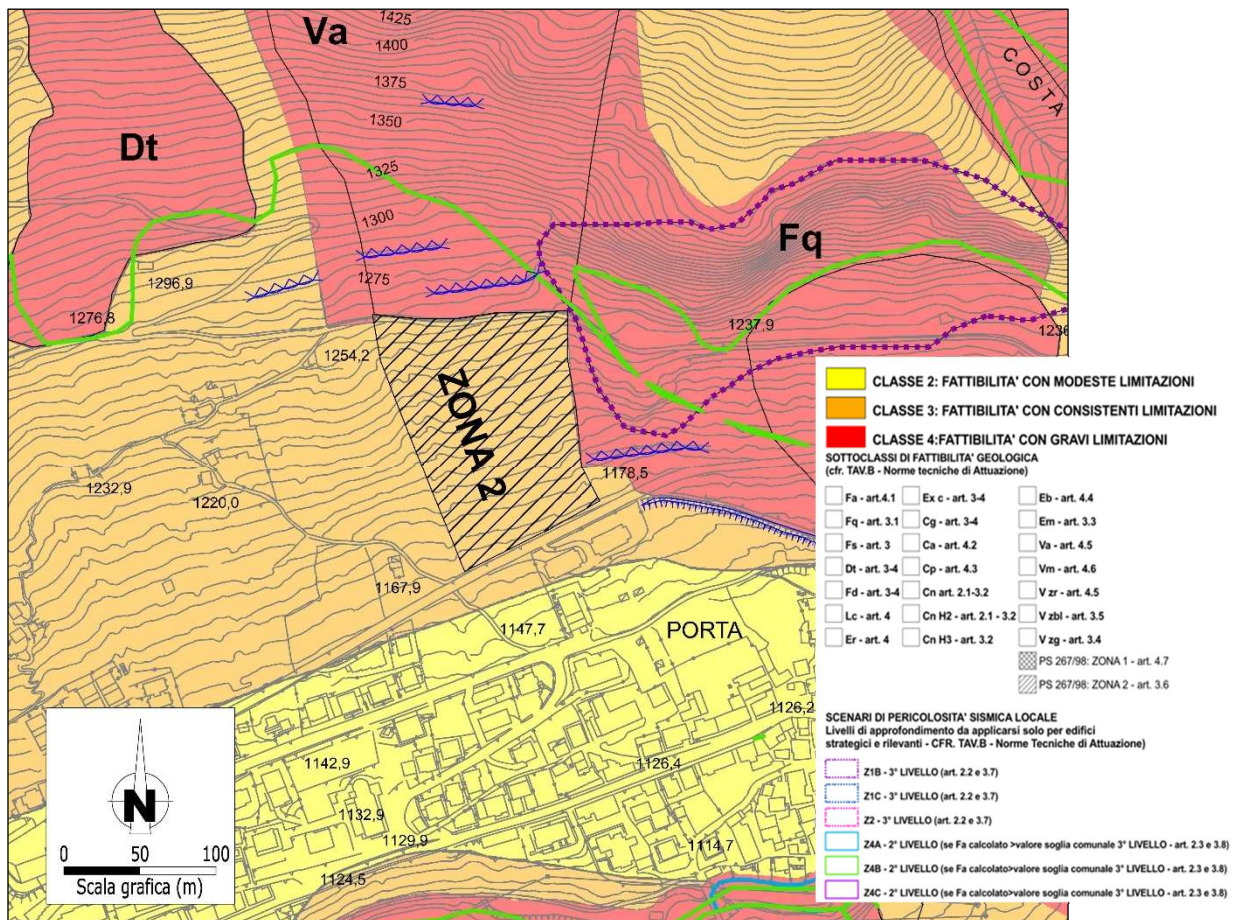


Figura 2: Estratto dalla Carta di Fattibilità ricavato dallo "Studio geologico del territorio comunale" (riproduzione in scala 1:5.000).

Nell'ambito della predisposizione del PGT, quando si è provveduto ad aggiornare la componente geologica correlata alla pianificazione comunale, si è introdotto anche l'aspetto della pericolosità sismica (analisi di I° Livello). Gli interventi di mitigazione del rischio ricadono entro lo scenario di pericolosità sismica Z4b "Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide deltizio - lacustre".

Nell'ambito dello studio geologico è presente il quadro del dissesto con legenda uniformata PAI di cui all'Elaborato 2 (per il comune vige il quadro dei dissesti aggiornato). Parte delle aree sorgenti dei crolli sono classificate come "Fa" (frana

attiva), "Fq" (frana quiescente) e Ve (pericolosità molto elevata o elevata per valanga) nel PAI (si veda Figura 3) come disciplinate dal Titolo II delle NdA del PAI. Vi è anche un'area classificata in "Zona 2" a rischio idrogeologico molto elevato per fenomeni di valanga come disciplinata dal Titolo IV delle NdA del PAI.

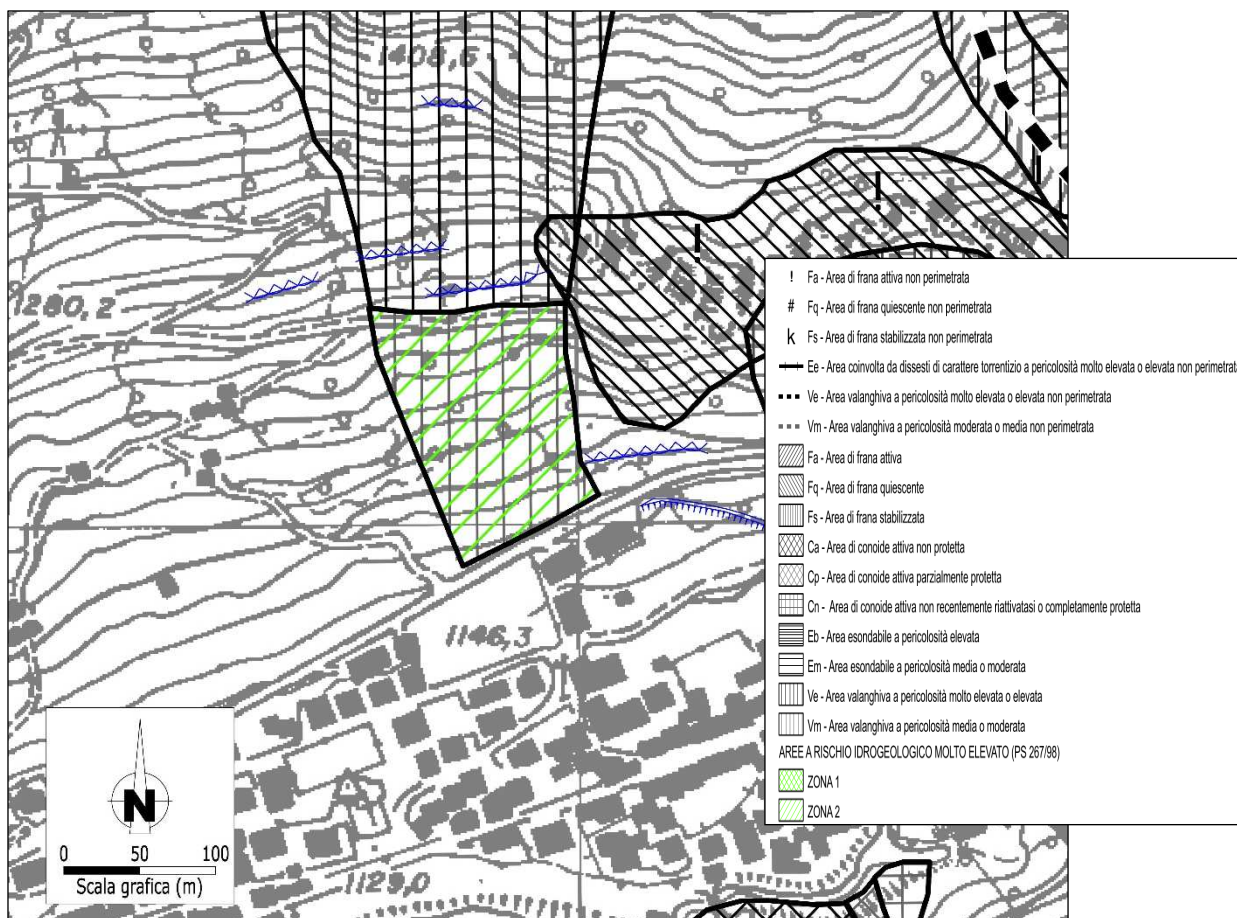


Figura 3: Stralcio della "Carta PAI" redatta a supporto del PGT (riproduzione in scala 1:5.000).

Integrando / sovrapponendosi alle previsioni dell'Elaborato 2 del PAI, vi sono le previsioni del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del distretto idrografico padano (in seguito PGRA), predisposto ai sensi dell'art. 7 della Direttiva 2007/60/CE e dell'art. 7 del d.lgs. 49/2010, approvato con deliberazione 2/2016 da parte del Comitato Istituzionale dell'Autorità di bacino del Fiume Po e successivamente dal Presidente del Consiglio dei Ministri con DPCM 27 ottobre 2016. L'ambito territoriale di riferimento è quello corrispondente alla parte disciplinata dal Titolo V delle NdA del PAI relativamente al Reticolo Secondario Collinare e Montano. Le aree allagabili presenti nelle mappe del PGRA per l'ambito del Reticolo secondario corrispondono in gran parte alle aree già classificate come Ee, Eb, Em, Ca, Cp, Cn nell'Elaborato 2 del PAI aggiornato dai Comuni tramite la procedura di cui all'art. 18 delle NdA del PAI.

Nell'ambito dell'areale in cui sono previsti gli interventi non è individuata alcuna area ricompresa nel PGRA.

Le indagini contemplate dalla DGR IX/2616/2011 prevedono di verificare preventivamente, in dettaglio e sotto il profilo geologico, che la trasformazione d'uso del

suolo avvenga in sicurezza e che tale trasformazione d'uso non sia di pregiudizio per l'incolumità di cose e persone terze (anche a seguito di prescrizioni): pertanto viene verificata la compatibilità delle opere in progetto con l'assetto geologico – geomorfologico della zona.

Relativamente alle caratteristiche geologiche delle aree coinvolte dell'intervento, anche mediante l'attuazione degli approfondimenti previsti dalla DGR IX/2616/2011, il presente documento risponde ai dettami della sezione 6.2.1 delle NTC18 (Caratterizzazione e modellazione geologica del sito) ed analogo punto della Circolare 7/2019. Al riguardo si veda il capitolo 2; per dare organicità al documento e per evitare una duplicazione delle informazioni, alcuni elementi propri della relazione geologica sono contenuti nelle sezioni successive alla 2 (es. sezioni 3 e 4).

Oltre alle preventive valutazioni di natura geologica (contemplate dalla DGR IX/2616/2011 e dalla sezione 6.2.1 delle NTC18) e geotecniche (contemplate dal punto 6.2.2 delle NTC18), si sono effettuate le valutazioni di risposta sismica del sito (ex OPCM 3274/2003) previste dalla sezione 7.11.3 delle NTC18 e meglio dettagliate al punto 10.1 della Circolare 7/2019 applicativa delle NTC (si veda il capitolo 3).

Sulla base della caratterizzazione geologica e di risposta sismica del sito, nonché delle informazioni progettuali contenute nel capitolo 5, si è proceduto alla definizione geotecnica del terreno e/o geomeccanica delle rocce prevista al punto 6.2.2 delle NTC18 e meglio dettagliata alla sezione 6.2.2.5 della Circolare 7/2019 (relazione geotecnica); al riguardo si veda il capitolo 4.

Rispetto alla classificazione di cui alla DGR X/5001/2016, il presente documento contiene gli elementi previsti dai documenti R3 (relazione geologica prevista dal Parte 1, punto 4 della DGR IX/2616/2011) e R1 (relazione geologica prevista al punto 6.2.1 delle NTC18).

Rispetto alla compiuta definizione dell'interazione struttura – terreno (R2 – relazione geotecnica prevista al punto 6.2.2 delle NTC18) si rimanda alla documentazione progettuale; anche rispetto alla compiuta definizione dei cinematismi di crollo (studi traiettografici, definizione compiuta delle geometrie delle traiettorie e relative energie) da cui deriva la scelta della posizione degli interventi di mitigazione del rischio, si rimanda alla documentazione di progetto.

In base all'assetto del sito e agli scenari delineati con lo studio traiettografico, si sono individuate le aree da indagare in dettaglio per definire la dimensione dei blocchi, utile al dimensionamento delle opere di difesa passiva; nelle valutazioni in sito si sono considerate situazioni che possono generare fenomeni di crollo gestibili con interventi di difesa attiva o passiva (volumetria complessiva dei crolli sino a 1.000 m³ – coincidente con il limite dell'applicabilità della procedura RHAP); non si sono valutate le condizioni di stabilità globale del versante, o situazioni con volumetrie rimobilizzabili superiori a 1.000 m³, in quanto tali valutazioni richiedono indagini, dati, simulazioni e modalità di intervento totalmente differenti rispetto a quelle impiegate per la mitigazione del rischio da fenomeni di caduta massi. Alcune situazioni anomale riscontrate nel corso delle indagini sono segnalate al § 2.3.

Considerando le caratteristiche delle opere di mitigazione del rischio, con puntuale e circoscritta interazione con il terreno, non risulta significativa la verifica di stabilità globale del complesso opera – terreno seppure in presenza di acclività talora superiori a 15°.

Nel capitolo 6 sono sintetizzati gli aspetti geologico – geomorfologici, sismici e geotecnici descritti nel presente documento, valutate le eventuali criticità indotte dalle opere in progetto e, se ritenute necessarie, sono prescritte modalità esecutive per l’ottimale realizzazione delle opere con idonei standard di sicurezza, il tutto considerando il livello di progettazione di riferimento. In tale capitolo, o in altri capitoli del presente documento, può essere prevista l’implementazione del “metodo osservazionale” di cui alla sezione 6.2.5 delle NTC18 al fine di ovviare ad incertezze risolvibili solo durante la fase esecutiva / costruttiva; nel qual caso, al fine dell’implementazione del “metodo osservazionale”, sono specificati gli elementi da monitorare a cura della DL in corso d’opera ed eventualmente descritte le possibili soluzioni alternative.

Il vincolo idrogeologico è finalizzato a garantire la stabilità dei versanti e la corretta regimazione delle acque superficiali nel caso di interventi in tali aree. La LR 19/2014 ha trasferito ai comuni le competenze inerenti alla trasformazione d’uso del suolo in ambiti sottoposti a vincolo idrogeologico (RD 3267/1923) solo per gli interventi edilizi disciplinati dal DPR 380/2001 purché non comportanti anche la contestuale trasformazione del bosco: essendo presente tale vincolo (talora con interventi sul bosco), vengono analizzati gli interventi anche ai fini della loro compatibilità con la presenza del vincolo (valutazione è ricompresa con quanto richiesto dalla DGR IX/2616/2011).

2. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO – GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA

2.1 INQUADRAMENTO GEOSTRUTTURALE, GEOLOGICO ED IDROGEOLOGICO

La catena orobica è caratterizzata da uno stile deformativo definito "*thin skin tectonics*", tipico delle zone marginali delle catene prossime agli avampaese, in cui manca un'impronta metamorfica simile a quelle delle Alpi Centrali. Le strutture, di tipo fragile, sono rappresentate da faglie e sovrascorrimenti talora accompagnate da fasce di cataclasi, mentre la presenza di miloniti in alcune zone del basamento cristallino testimonia una deformazione più duttile delle porzioni più profonde dello stesso.

L'assetto strutturale principale della catena è dato da *thrust* prevalentemente sud – vergenti, che dividono la catena in fasce disposte E – W. Procedendo da N verso S, le unità strutturali che costituiscono tali fasce sono le seguenti:

- 1) *Thrust orobici*: compresi tra la Linea Insubrica e la Linea Orobica, sono costituiti dal basamento metamorfico ercinico, scagliato al suo interno ed accavallato sulle successioni di copertura permio – triassiche.
- 2) *Anticlinali orobiche*: strutture anticlinali, con disposizione *en échelon* destra, comprese tra la Linea Orobica e la Linea Valtorta – Valcanale; sono costituite dalle coperture permio – scitiche e dal sottostante basamento cristallino.
- 3) *Fascia mediana delle unità alloctone*: edificio strutturale con immersione regionale verso S, formato da *thrust* con geometria "*foreland dipping duplex*"; le diverse unità sono costituite dalla successione triassica.
- 4) *Settore frontale*: fascio di pieghe probabilmente associate a *thrust* sepolti ("*fault propagation folding*"), dislocate da strutture trascorrenti NE – SW; sono costituite prevalentemente dalle coperture giurassico – cretache.

Il territorio di Carona si colloca nella zona delle "*Anticlinali orobiche*" ed in particolare sul fianco settentrionale di un'ampia anticlinale asimmetrica, con asse orientato WSW – ENE, denominata nella letteratura più recente "Unità tettonica Trabuchello – Cabianca" o "Unità dell'Anticlinale Trabuchello – Cabianca" (Figura 4). Nel settore in esame la piega è sormontata dall'"Unità Menna – Pegherolo", costituita da successioni di età compresa tra il Triassico inferiore ed il Carnico. Lo scollamento che separa le due unità è impostato lungo il Servino e la Carniola di Bovegno ed è dislocato da faglie che, nella zona in esame, a tratti ne hanno sensibilmente modificato l'andamento suborizzontale.

Il substrato roccioso dell'area oggetto d'intervento e del suo immediato intorno è rappresentato dalle seguenti unità (Figura 5):

Vulcanite del Monte Cabianca (già "*membro inferiore*" o "*membro vulcano – clastico inferiore*" della Formazione di Collio Auct.) (Permiano inferiore). Di tale formazione nell'area in oggetto affiorano unicamente piroclastiti di flusso o di caduta, di colore verde – chiaro, grigio o, talora, violaceo, in bancate metriche o con

aspetto massiccio. Sono presenti in un limitato settore della parte bassa del versante che scende dalla conca di Carisole, tra 1200 e 1380 m slm.

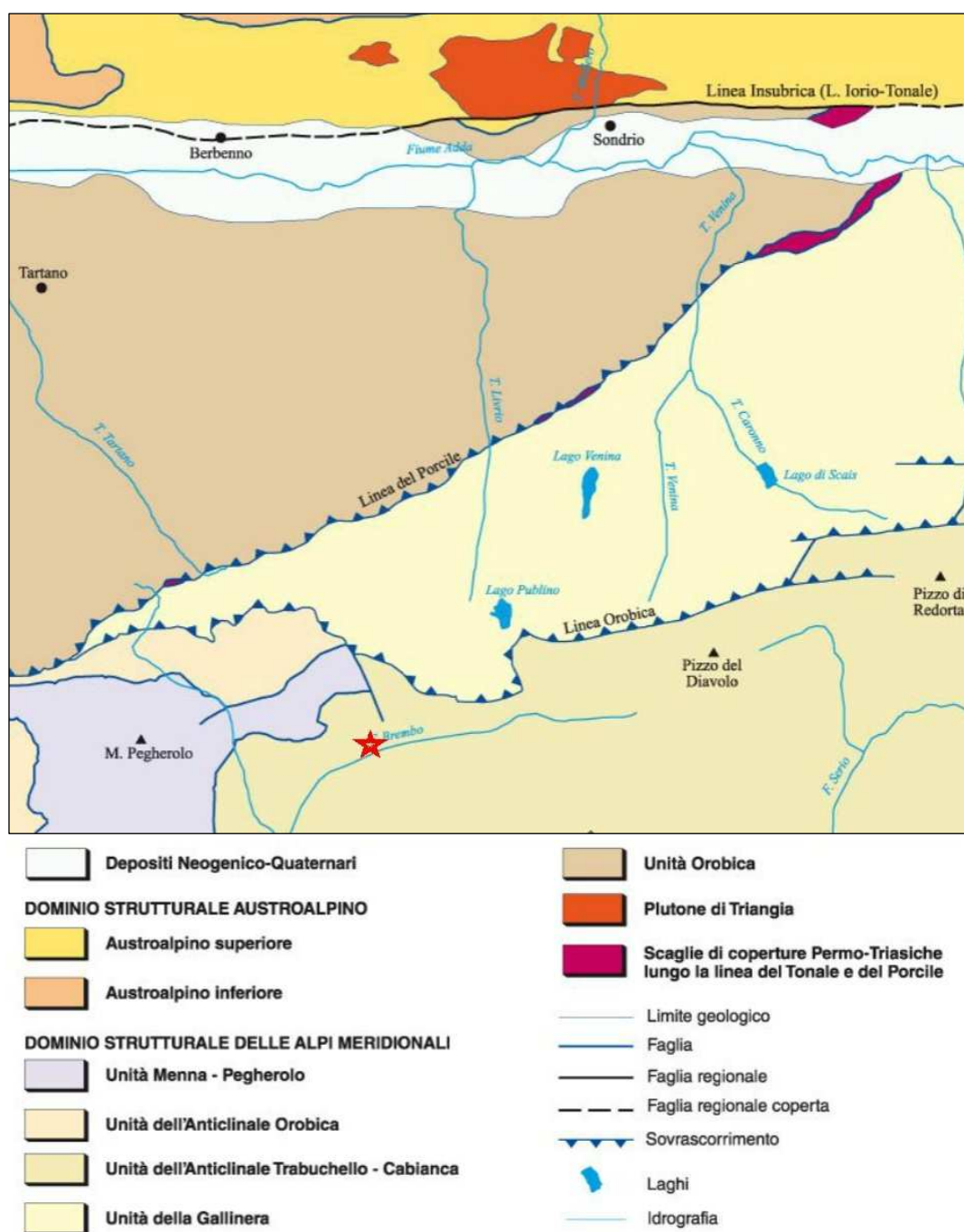


Figura 4: Schema tettonico del Foglio 056 "Sondrio" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (Boriani et al., 2012). La stella rossa indica la posizione di Carona.

Formazione del Pizzo del Diavolo (già "*membro sedimentario*" o "*membro superiore sedimentario*" della Formazione di Collio Auct.) (Permiano inferiore). Di tale formazione nell'area in oggetto affiorano le seguenti litofacies:

- ♦ "*litofacies prevalentemente pelitica*", costituita da siltiti e argilliti nere, talora massicce ma più spesso fittamente laminate o con alternanze d'orizzonti arenacei da millimetrici a pluridecimetrici, da grigi a marrone. Queste alternanze, in cui prevalgono i sedimenti più fini, formano delle bancate anche di svariate

decine di metri. Tra Branzi e di Carona questa litofacies è caratterizzata da un incipiente metamorfismo alpino (da cui il nome di "Scisti o Ardesie di Carona" *Auct.*), responsabile del tipico clivaggio, ripidamente immergente a N e della trasposizione, lungo tali piani, della stratificazione. Le litofacies di questa formazione costituiscono il substrato roccioso del fondovalle e di gran parte del versante che scende dalla conca di Carisole. Sullo stesso versante, ma più ad est dell'area d'intervento, sono ribassati da una faglia subverticale ad andamento NNW – SSE (Figura 5).

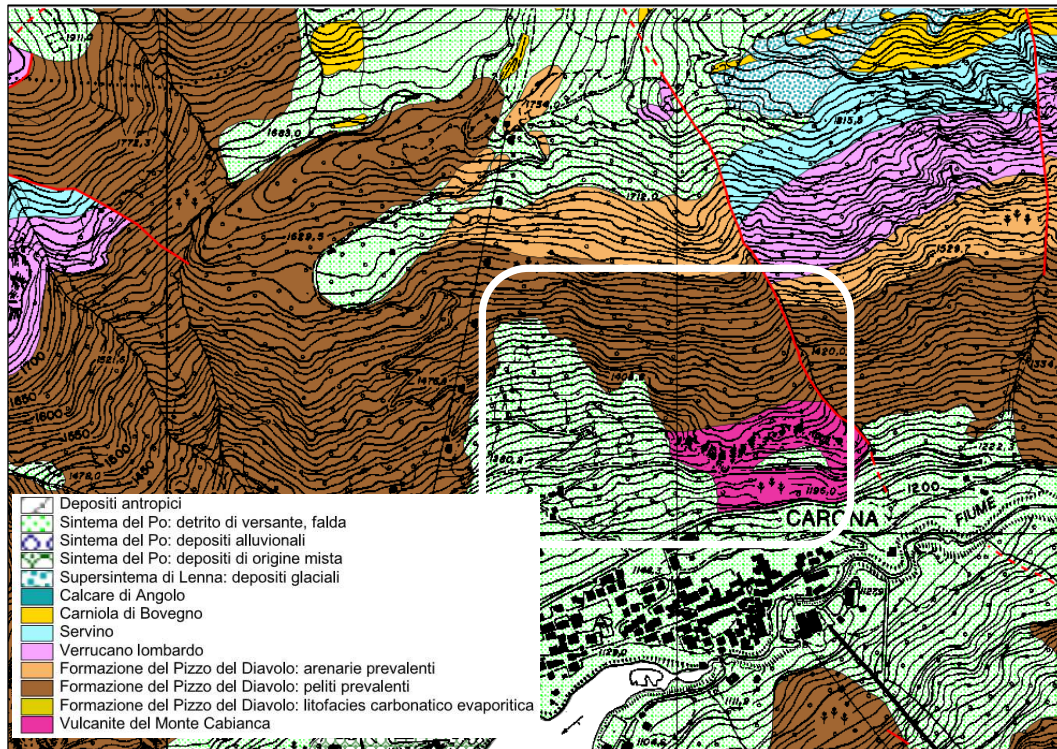


Figura 5: Stralcio di carta d'inquadramento geologico ricavata dai rilievi originali del Progetto CARG per la stesura del Foglio 056 "Sondrio" (ridisegnata e modificata). Le linee rosse indicano i contatti tettonici.

- ♦ *"litofacies prevalentemente arenacea"*, costituita da arenarie litiche, talora vere e proprie epiclastiti, di colore da grigio a marrone chiaro, costituite prevalentemente da frammenti vulcanici e subordinatamente da quarzo, miche e feldspati. Localmente appaiono stratificate e presentano strutture sedimentarie, ma per gran parte hanno stratificazione indistinta. Spesso al loro interno sono presenti livelli pelitici scuri, intervalli conglomeratici, e intervalli vulcanoclastici più o meno fini. Le litofacies di questa formazione affiorano nella parte alta del versante che scende dalla conca di Carisole, tra 1600 e 1760 m slm. Anch'esse più ad est dell'area d'intervento sono ribassate dalla citata faglia NNW – SSE (Figura 5).

Verrucano lombardo (Permiano superiore *p.p.*). È costituito da conglomerati poligenici, a clasti pluricentimetrici (in media 3 – 4 cm) subarrotondati, prevalentemente di quarzo, in subordine di vulcaniti violacee e, raramente, di scisti cristallini. All'interno sono presenti intervalli arenacei rossastri, talora con ciottoli sparsi o tasche di ciottoli, e lenti siltose, rosso scuro. In linea generale può essere suddiviso

in due porzioni: quella inferiore, è rappresentata da conglomerati e da arenarie conglomeratiche, con rare lenti siltose; la porzione superiore è costituita invece da alternanze d'arenarie grossolane e siltiti. Il contatto con le sottostanti litofacies della Formazione del Pizzo del Diavolo è netto in quanto si è depositato in discordanza angolare (angoli variabili da 10° a 30°). Il Verrucano forma un lembo di limitate dimensioni alla sommità del versante che scende dalla conca di Carisole. Affioramenti più estesi si riscontrano lungo la parte alta del versante ad est della faglia citata in precedenza (Figura 5).

Servino (Induano – Olenekiano). È suddivisibile in due principali associazioni di litofacies. L'inferiore è prevalentemente costituita da arenarie quarzose, a cemento dolomitico giallastro, ben stratificate, con laminazioni parallele od oblique da *ripple* d'onda e di corrente; alle arenarie s'intercalano siltiti, marne, argilliti giallastre o verdastre e localmente sottili orizzonti – lenti di calcareniti oolitiche e bioclastiche. La litofacies superiore è invece caratterizzata da alternanze di siltiti, siltiti marnose spesso micacee, marne dolomitiche e dolomie marnose – siltose in strati decimetrici. Il Servino affiora lungo la parte alta del versante ad est della faglia NNW – SSE citata in precedenza (Figura 5).

Carniola di Bovegno (Olenekiano superiore – Anisico inferiore). È costituita da calcari dolomitici e dolomie di colore giallastro, con sottili intercalazioni argillose da ocre a grigio verdi. La stratificazione in grossi banchi metrici o indistinta è tipica delle intercalazioni di dolomie – calcaree vacuolari (carniole). I carbonati vacuolari presentano intercalazioni lenticolari strato – concordanti, ma anche in tasche – filoni discordanti di brecce intraformazionali costituite da clasti angolosi centimetrici di calcari dolomitici, dolomie marnose, e subordinate argilliti e marne. Affiora in maniera alquanto limitata nella conca di Carisole e lungo la parte alta del versante ad est della faglia NNW – SSE citata in precedenza (Figura 5).

Per quanto riguarda le coperture neogenico – quaternarie, i depositi più antichi sono riferiti al Supersintema di Lenna, costituito da sintemi che esprimono le fasi Last Glacial Maximum di singoli apparati vallivi, mai entrati in coalescenza tra di loro o con i sistemi glaciali delle valli principali. Sono costituiti da diamicton a ciottoli e blocchi con abbondante matrice limoso – sabbiosa e numerosi massi erratici, e si riscontrano unicamente lungo i pendii della conca di Carisole.

Lungo i versanti che scendono dalla conca sino al fondovalle di Carona vi sono ampie e spesse falde di detrito riferite al Sintema del Po, unità di nuova istituzione che raggruppa tutti i depositi (indipendentemente dall'agente deposizionale) formati posteriormente all'ultimo evento glaciale pleistocenico. È diacrona su tutta la sua estensione ed abbraccia un arco temporale che va dalla parte terminale del Pleistocene Superiore sino a tutto l'Olocene. Ad essa vengono riferiti anche i depositi alluvionali lungo il corso del Brembo di Carona e i depositi di origine mista (frana, debris – flow, valanga) che formano conoidi allo sbocco dei canali.

Relativamente ai tratti morfologici salienti dell'area in esame, questi sono determinati principalmente da:

- 1) processi di erosione fluviale che hanno portato alla formazione e all'approfondimento della valle, di origine prequaternaria;

2) processi glacigenici, connessi a ripetute glaciazioni, che hanno determinato, dalla fine del Pliocene e per tutto il Quaternario, diversi episodi di avanzata e ritiro del ghiacciaio vallivo. Degli eventi passati sono conservate poche testimonianze sedimentarie, prevalentemente prive della morfologia originaria. Quelle della più recente fase del Last Glacial Maximum sono meglio conservate nelle aree di anfiteatro di testata (forme di erosione e modellamento del substrato in dossi montonati e conche di sovraescavazione, deposizione di materiale glaciale con colmamento, parziale o totale, delle depressioni del substrato roccioso, ecc.)

3) processi gravitativi di dinamica dei versanti.

Attualmente risultano prevalenti i processi gravitativi, che annoverano: produzione di detrito di versante alle quote più elevate, frane per crollo in roccia (con corpi di modesta entità, ma che interessano in modo pervasivo il substrato roccioso), frane per colata e scivolamento che interessano i depositi quaternari insieme a processi di soliflusso, colate di *debris* – o *mud* – *flow* e fenomeni di colluvionamento. Anche i piccoli conoidi presenti nella conca di Carona per la morfologia e la natura dei depositi mostrano prevalenti caratteri di depositi gravitativi (conoidi di frana) o da trasporto in massa (*debris* – *flow*) più che alluvionale *s.s.*

Per quanto riguarda le condizioni idrogeologiche, nell'area d'intervento e nel suo immediato intorno non si è riscontrata la presenza di emergenze idriche di carattere perenne.

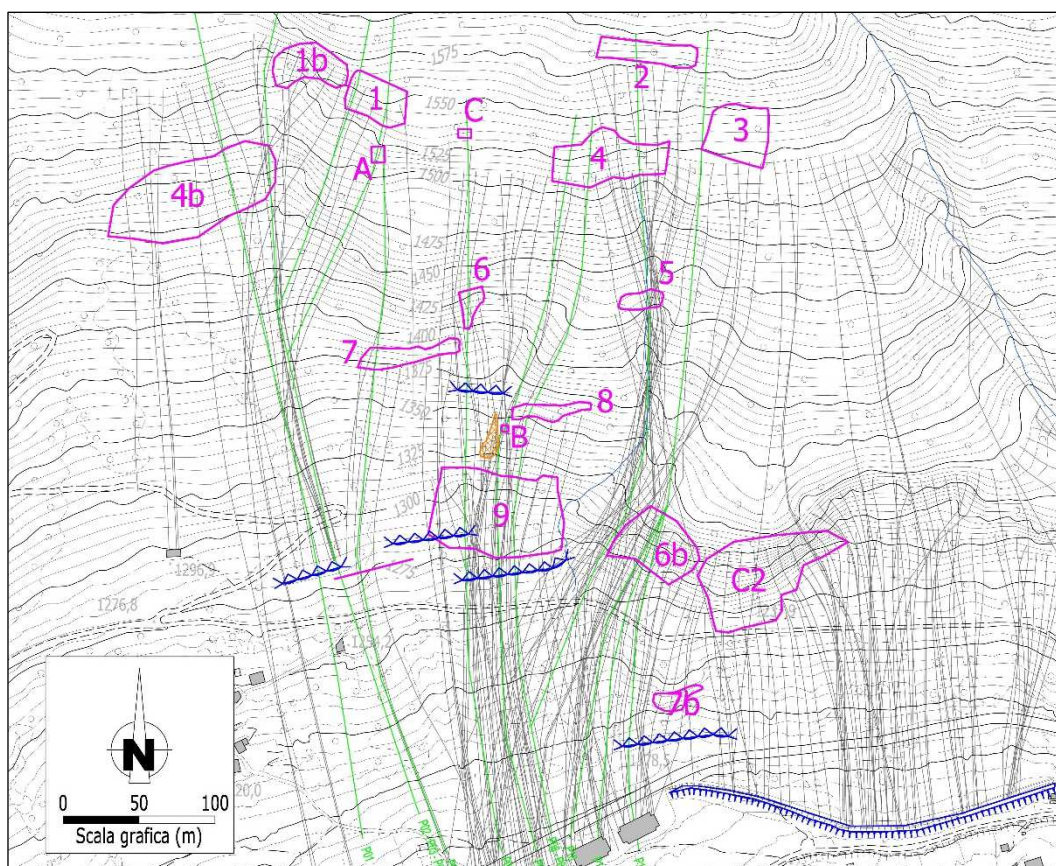


Figura 6: Estratto dallo studio traiettografico e ubicazione dei settori indagati. In blu sono identificate le opere di protezione esistenti o in corso di realizzazione.

2.2 DINAMICA DEL DISSESTO E SUA PROBABILE EVOLUZIONE

Per l'individuazione delle criticità si sono eseguiti dei sopralluoghi, anche con l'ausilio di drone per delineare il quadro del dissesto; associata a tale analisi preliminare del sito è stato redatto uno studio traiettografico per individuare l'ampiezza dei settori da valutare per la mitigazione del rischio.

In base all'assetto del sito e agli scenari delineati con lo studio traiettografico (si veda Figura 6), si sono individuati i settori da indagare in dettaglio per definire il quadro del dissesto (tale indagine ha utilizzato come quadro conoscitivo di base l'indagine ERA, novembre 2020). Non si è impiegata la metodica del rilievo statistico delle dimensioni dei blocchi presenti nelle aree di accumulo per il dimensionamento delle opere di difesa passiva; questo perché è presente un'elevata alterazione antropica delle aree di accumulo con possibile occultamento dei blocchi di dimensioni maggiori (per via dell'antropizzazione delle aree di accumulo è possibile che i blocchi di dimensioni maggiori siano stati rimossi, inoltre sono anche presenti alcuni terrazzamenti con possibili interramenti di massi di dimensioni maggiori).

Il versante vallivo destro che sovrasta l'abitato di Carona si eleva per oltre 700 m al di sopra dell'abitato, fino a crinale arrotondato che delimita a meridione la conca di Carisole.

Tale versante è ripido e presenta affioramenti rocciosi sparsi, che diventano più estesi e continui man mano che ci si innalza di quota, dove si alternano irregolarmente con tratti di pendio sempre molto inclinati, con copertura detritico – eluviale di limitato spessore ma ben colonizzata dalla vegetazione, anche di alto fusto (tranne alcune plaghe di detrito di pezzatura molto grossolana, non pedogenizzato).

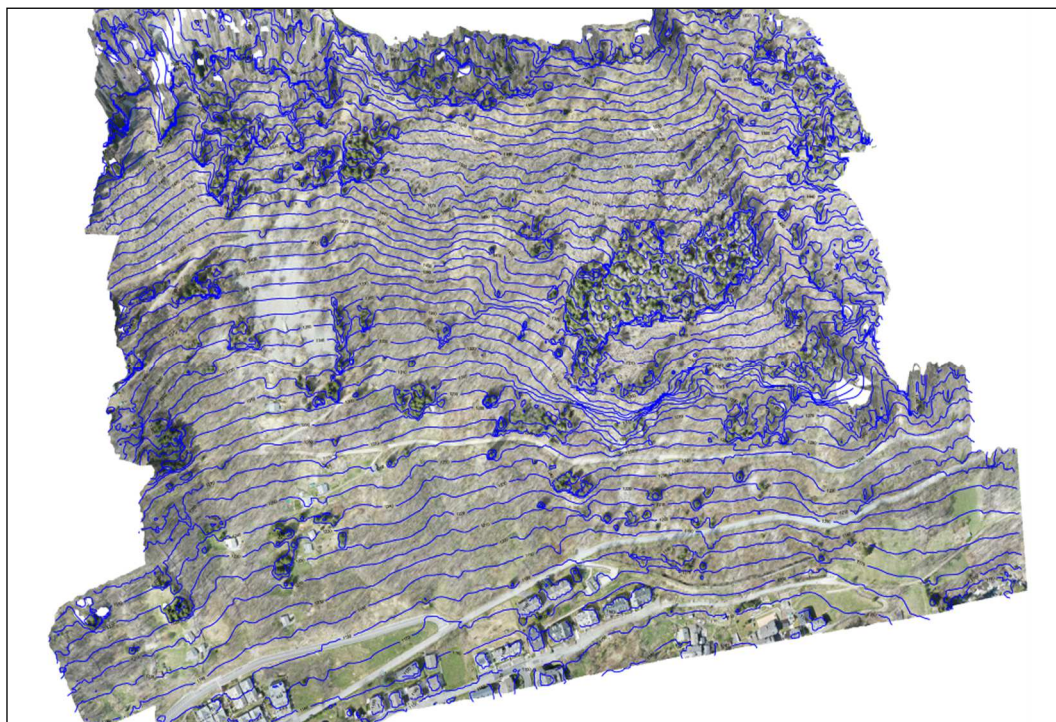


Foto 1: Fotocomposizione con curve di livello della zona (rilievo eseguito con drone).

Nella parte bassa del versante è presente un'ampia falda di detrito di elevato spessore, a tratti costituita da blocchi di discrete dimensioni, anch'essa ben vegetata (Foto 1).



Foto 2: Vista dall'alto della barriera paramassi a circa 1370 m slm.



Foto 3: Immagine tratta dal sito de L'Eco di Bergamo del blocco che ha raggiunto via Carisole il 3 maggio 2020.

Si sono già avuti dei crolli dai settori medio – alti del versante, tanto che si sono effettuati già alcuni interventi di mitigazione del rischio come barriere paramassi di tipo elastico: (1) circa 30 m di lunghezza a circa 1370 m slm e (2) circa 50 metri a

circa 1290 m slm.

Le evidenze di distacchi di blocchi in tempi recenti sono numerose e diffuse, ma probabilmente hanno interessato volumi di limitate dimensioni, che si arrestavano lungo il pendio senza raggiungere la viabilità o l'edificato e, quindi, non venivano segnalati.

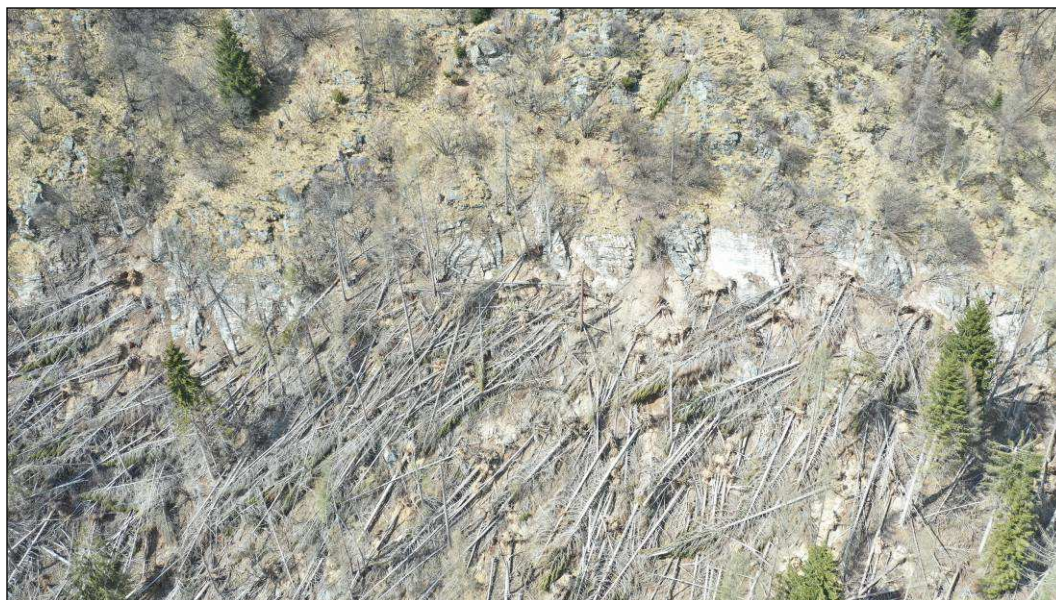


Foto 4: Ripresa con drone di una porzione della parte alta del versante dove la quasi totalità degli alberi di alto fusto è stata abbattuta dal vento durante la cosiddetta "Tempesta Vaia" di fine ottobre 2018.

Il 3 maggio 2020 si è verificato il crollo di una porzione rocciosa di circa 6 m³ nella parte medio – alta del versante: durante la discesa la massa si è frantumata a causa degli impatti, ma un blocco di discrete dimensioni ha raggiunto via Carisole, arrestandosi (Foto 3). Ciò ha comportato il divieto di accesso a 6 edifici condominiali, oltre che la chiusura della strada; per la protezione delle abitazioni è stata posata una barriera paramassi a dissipazione d'energia da 3000 kJ a circa 1290 m slm).

Per quanto riguarda le condizioni generali di dissesto del versante, la situazione si è aggravata a seguito della cosiddetta "Tempesta Vaia" di fine ottobre 2018, che ha provocato lo schianto di diversi alberi di alto fusto, con conseguente instabilizzazione dei blocchi che venivano trattenuti dall'apparato radicale o ne erano inglobati (Foto 4).

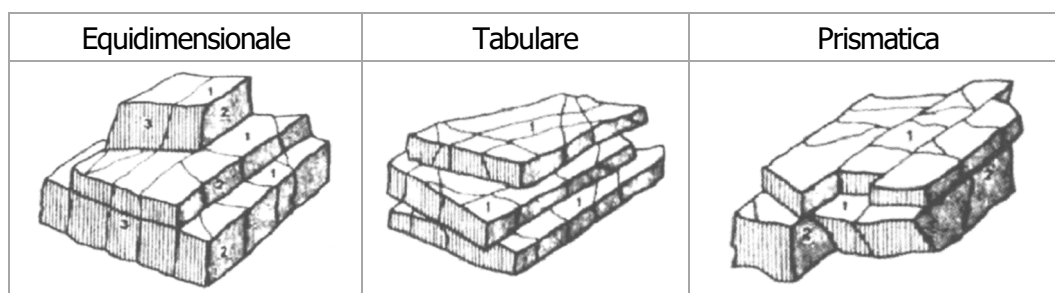


Figura 7: Forme ricorrenti dei massi presenti nelle aree di accumulo.

Rispetto alle aree indagate in dettaglio, i blocchi di dimensioni maggiori presentano

sostanzialmente le seguenti forme ricorrenti: tabulari e prismatica (si veda **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**); subordinatamente equidimensionale (spesso subarrotondata).

Considerate le litologie dei blocchi di crollo afferenti alla Formazione di Pizzo del Diavolo, si può fare riferimento a una densità di 26 kN/m³.

2.3 ANALISI DI DETTAGLIO

Per le caratteristiche del versante e l'eterogeneità delle situazioni di dissesto, non è stato possibile contemplare un'indagine statistica sulla volumetria dei massi al detrito al piede del versante; questo anche per l'alterazione antropica della morfologia della falda di detrito compresa tra l'abitato e il versante instabile (formazione di terrazzamenti, viabilità, ecc...) che ha alterato la visibilità dei blocchi (in questi casi i blocchi di dimensioni maggiori vengono interrati o demoliti). L'indagine statistica entro la falda detritica la si è potuta effettuare esclusivamente entro al piede del settore 9b che, peraltro, è caratterizzato dalla presenza di litologie differenti (esclusivamente Vulcaniti del Monte Cabianca) rispetto agli altri settori caratterizzati dalla prevalente presenza delle facies pelitiche della formazione del Pizzo del Diavolo.

L'acclività del versante in alcune zone è molto elevata e per le ispezioni sarebbe necessario ricorrere a tecniche alpinistiche, inoltre alcune ampie porzioni sono di difficile accesso a causa dei numerosi alberi abbattuti dalla tempesta Vaia a fine ottobre 2018. Pertanto, con esclusione del settore 9b, per l'individuazione delle problematiche inerenti alla caduta massi, oltre ad ispezioni dirette lungo le zone accessibili, sono state eseguite sia delle osservazioni a distanza, sia un'analisi di riprese foto e video da drone.

In base ai rilievi effettuati, si sono individuati settori omogenei per propensione al dissesto (si veda Figura 6).

2.3.1 Settore 1

È costituito da risalti rocciosi sovrapposti di altezza variabile da 5 a 12 – 13 m circa, che si estendono per oltre 40 m di larghezza tra 1540 e 1580 m slm di quota (Foto 5). Localmente i risalti presentano porzioni in aggetto.

La fascia rocciosa localmente è caratterizzata da un assetto delle discontinuità sfavorevole alla stabilità.

In particolare sono stati individuati i seguenti sistemi:

- 1) Ks 325/50: È costituito dalle discontinuità impostate lungo la stratificazione/foliazione della roccia pelitica (siltiti e argilliti della Fm. del Pizzo del Diavolo). Ha spaziature variabili legate al grado di definizione dei giunti sedimentari: la spaziatura più frequente è quella larga (classe ISRM 60 – 200 cm), seguita da quella moderata (classe ISRM 20 – 60 cm). Riguardo la persistenza, la più frequente è quella media (classe ISRM 3 – 10 m), ma un discreto numero di giunti ha lunghezza della traccia superiore.
- 2) K1 212/85. È il sistema su cui sono impostate gran parte delle pareti dei risalti

rocciosi. La spaziatura più frequente è quella larga (60 – 200 cm) seguita da quella molto larga (2 – 6 m). Ha prevalentemente persistenza bassa (1 – 3 m), ma alcune fratture hanno lunghezze della traccia superiori (persistenza media – classe ISRM 3 – 10 m).



Foto 5: Vista dal basso di una porzione del settore 1, nella parte alta del versante.

- 3) K2 125/65. Ha come spaziatura più frequente quella larga (60 – 200 cm), seguita da quella molto larga (2 – 6 m). Ha prevalentemente persistenza bassa (1 – 3 m) e numerosi giunti di ridotte dimensioni (persistenza molto bassa – classe ISRM <1 m).
- 4) K3 238/60. È un sistema secondario e compare solo in alcune zone degli affioramenti. Ha come spaziatura più frequente quella molto larga (2 – 6 m), seguita da quella larga (60 – 200 cm). Ha prevalentemente persistenza bassa (1 – 3 m).

Le superfici delle discontinuità di tutti i sistemi descritti hanno andamento da piano – ondulato, sono lisce e, prevalentemente, non sono alterate (solo decolorazione superficiale o blanda ossidazione).

Oltre che dalle discontinuità dei sistemi individuati, l'ammasso roccioso è suddiviso anche da fratture "random" (che non compaiono sistematicamente e, quindi, non definiscono sistemi), ma tali discontinuità hanno generalmente persistenza da bassa a molto bassa.

L'analisi dei possibili cinematismi, rappresentata in Figura 8, evidenzia che la mobilitazione dei blocchi, laddove sono presenti le discontinuità del sistema secondario K3, può verificarsi secondo la modalità di scivolamento di cuneo roccioso

lungo l'intersezione **K2 – K3** (modalità confermata dall'osservazione di due nicchie di distacco). Laddove le pareti dei risalti rocciosi sono impostate su K1 e vi sono delle porzioni in aggetto si possono verificare distacchi diretti di porzioni isolate a tetto da **Ks** e lateralmente da **K2** (anche questa modalità è confermata dall'osservazione delle nicchie di distacchi già avvenuti). Infine, a causa dell'andamento irregolare del pendio, localmente possono verificarsi scivolamenti di cunei rocciosi lungo le intersezioni **K1 – K2** (sono state osservate tre nicchie di distacco legate a questa tipologia di cinematismo).

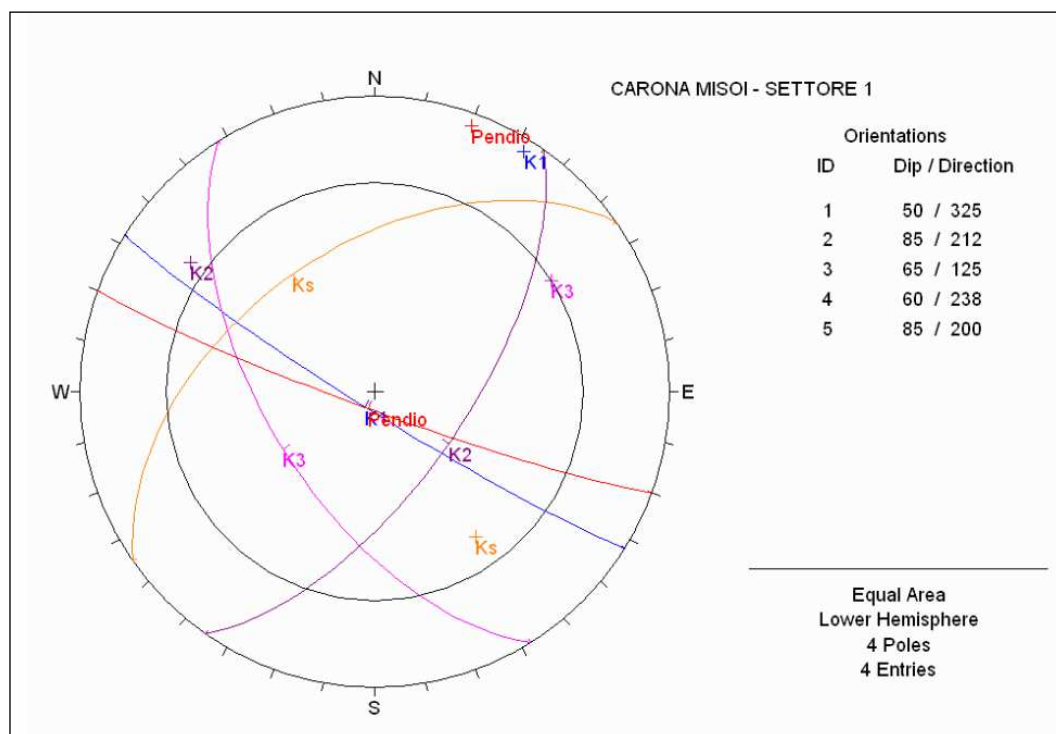


Figura 8: Stereogramma con le ciclografiche dei sistemi di discontinuità individuati. È riportata anche la ciclografica che rappresenta l'orientazione media del pendio (giacitura 200°/85°) ed il cerchio che rappresenta graficamente un angolo di attrito di 30°. I valori di giacitura sono espressi come Immersione/inclinazione.

Per quanto riguarda i volumi mobilizzabili, i blocchi di maggiori dimensioni visivamente più instabili sono dell'ordine di $0,8 \div 1,2 \text{ m}^3$. Le dimensioni delle nicchie dei distacchi già avvenuti indicherebbero volumi fino a $2 \div 2,5 \text{ m}^3$.

2.3.2 Settore 1b

Riguardo al settore 1b valgono le medesime considerazioni del settore 1 riguardo i volumi mobilizzabili.

2.3.3 Settore 2

È costituito da risalti rocciosi sovrapposti di altezza variabile da 5 a 15 m circa, che si estendono per 70 m di larghezza tra 1580 e 1610 m slm di quota (Foto 6). Localmente i risalti rocciosi presentano porzioni in forte aggetto.

La fascia rocciosa è caratterizzata da un assetto delle discontinuità sfavorevole alla stabilità. In particolare sono stati individuati i seguenti sistemi:

- 1) Ks 345/30: È costituito dalle discontinuità impostate lungo la

stratificazione/foliazione della roccia pelitica (siltiti e argilliti della Fm. del Pizzo del Diavolo). Ha spaziature variabili legate al grado di definizione dei giunti sedimentari: la spaziatura più frequente è quella larga (60 – 200 cm), seguita da quella moderata (20 – 60 cm). Relativamente alla persistenza, la più frequente è quella media (3 – 10 m), seguita da quella bassa (1 – 3 m).

- 2) K1 176/72. È il sistema su cui sono impostate gran parte delle pareti dei risalti rocciosi. La spaziatura più frequente è quella larga (60 – 200 cm) seguita da quella moderata (20 – 60 cm). Ha prevalentemente persistenza bassa (1 – 3 m), ma diverse discontinuità hanno lunghezze della traccia superiori (persistenza media, 3 – 10 m).
- 3) K2 046/87. Ha come spaziatura più frequente quella larga (60 – 200 cm), seguita da quella molto larga (2 – 6 m). Ha prevalentemente persistenza bassa (1 – 3 m), seguita da quella molto bassa (<1 m) e solo un numero molto limitato di discontinuità ha lunghezze della traccia superiori (fino a 6 – 7 m).
- 4) K3 112/65. Ha caratteristiche geometriche (spaziatura e persistenza) simili a quelle del sistema K2.



Foto 6: Vista dal basso di una porzione aggettante del settore 2, nella parte alta del versante.

Le superfici delle discontinuità di tutti i sistemi descritti hanno andamento da planare a piano – ondulato, sono lisce e, prevalentemente, non sono alterate (solo decolorazione superficiale o blanda ossidazione).

Oltre che dalle discontinuità dei sistemi individuati, l'ammasso roccioso è suddiviso anche da fratture "random" con persistenza da bassa a molto bassa.

L'analisi dei possibili cinematismi, rappresentata in Figura 9, evidenzia che la mobilitazione dei blocchi può verificarsi secondo la modalità di scivolamento di cuneo

roccioso lungo l'intersezione **K2 – K3**. Laddove le pareti dei risalti rocciosi sono impostate su K1 e vi sono delle porzioni in aggetto si possono verificare distacchi diretti di porzioni isolate a tetto da **Ks** e lateralmente da **K2** o **K3**. Infine, a causa dell'andamento irregolare del pendio, localmente possono verificarsi scivolamenti di cunei rocciosi lungo le intersezioni **K1 – K2** e **K1 – K3**.

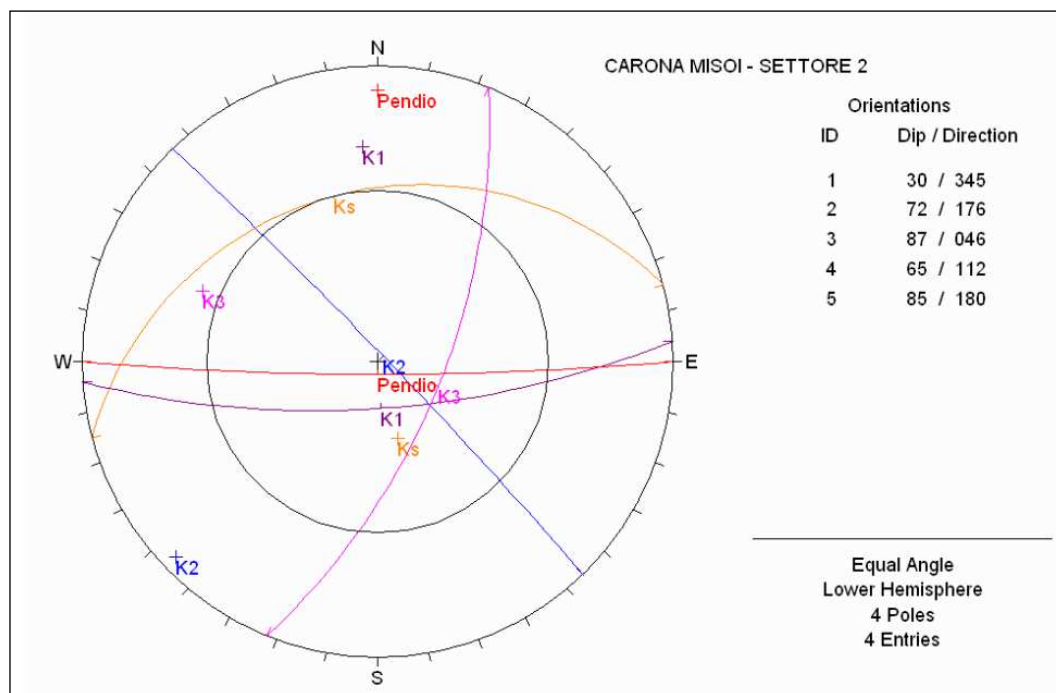


Figura 9: Stereogramma con le ciclografiche dei sistemi di discontinuità individuati. È riportata anche la ciclografica che rappresenta l'orientazione media del pendio (giacitura 180°/85°) ed il cerchio che rappresenta graficamente un angolo di attrito di 30°. I valori di giacitura sono espressi come Immersione/inclinazione.

Per quanto riguarda i volumi mobilizzabili, i blocchi di maggiori dimensioni visivamente più instabili sono dell'ordine di $0,3 \div 0,5 \text{ m}^3$. Le dimensioni delle nicchie dei distacchi già avvenuti indicherebbero volumi fino a $1 \div 1,5 \text{ m}^3$.

2.3.4 Settore 3

È costituito da risalti rocciosi sovrapposti di altezza variabile da 4 a 12 m circa, che si estendono per 45 m di larghezza tra 1520 e 1570 m slm di quota (Foto 7). Localmente i risalti rocciosi presentano porzioni leggermente aggettanti.

La fascia rocciosa localmente è caratterizzata da un assetto delle discontinuità sfavorevole alla stabilità. In particolare sono stati individuati i seguenti sistemi:

- 1) Ks 352/56: È costituito dalle discontinuità impostate lungo la stratificazione/foliazione della roccia pelitica (siltiti e argilliti della Fm. del Pizzo del Diavolo). Ha spaziature variabili legate al grado di definizione dei giunti sedimentari: la spaziatura più frequente è quella larga (60 – 200 cm), seguita da quella moderata (20 – 60 cm). Relativamente alla persistenza, la più frequente è quella bassa (1 – 3 m), seguita da quella media (3 – 10 m).
- 2) K1 160/60. È il sistema su cui sono impostate alcune delle pareti dei risalti rocciosi. La spaziatura più frequente è quella larga (60 – 200 cm) seguita da

quella moderata (20 – 60 cm). Ha prevalentemente persistenza bassa (1 – 3 m), seguita da quella molto bassa (<1 m), e solo un numero molto limitato di discontinuità ha lunghezze della traccia superiori (fino a 7 – 8 m).

- 3) K2 224/70. Ha caratteristiche geometriche (spaziatura e persistenza) simili a quelle del sistema K1.
- 4) K3 078/46. È un sistema secondario e compare solo in alcune zone degli affioramenti. Ha come spaziatura più frequente quella larga (60 – 200 cm), seguita da quella molto larga (2 – 6 m). Ha prevalentemente persistenza molto bassa (<1 m), seguita da quella bassa (1 – 3 m) e solo un numero molto limitato di discontinuità ha lunghezze della traccia superiori (fino a 4 – 5 m).



Foto 7: Vista laterale di una porzione del settore 3, nella parte alta del versante.

Le superfici delle discontinuità di tutti i sistemi descritti hanno andamento da planare a piano – ondulato, sono lisce e, prevalentemente, non sono alterate (solo decolorazione superficiale o blanda ossidazione).

Oltre che dalle discontinuità dei sistemi individuati, l'ammasso roccioso è suddiviso anche da fratture "random" con persistenza da bassa a molto bassa.

L'analisi dei possibili cinematismi, rappresentata in Figura 10, evidenzia che la mobilitazione dei blocchi può verificarsi secondo la modalità di scivolamento di cuneo roccioso lungo l'intersezione **K1 – K2**. Laddove le pareti dei risalti rocciosi sono impostate su K1 e vi sono delle porzioni in aggetto si possono verificare distacchi diretti di porzioni isolate a tetto da **Ks** e lateralmente da **K2** o **K3**. Infine, a causa dell'andamento irregolare del pendio, localmente possono verificarsi scivolamenti di cunei rocciosi lungo le intersezioni **K1 – K3**.

Per quanto riguarda i volumi mobilizzabili, i blocchi di maggiori dimensioni visivamente più instabili sono dell'ordine di $0,3 \div 0,5 \text{ m}^3$. Le dimensioni delle nicchie dei distacchi già avvenuti indicherebbero volumi fino a $0,8 \div 1,2 \text{ m}^3$.

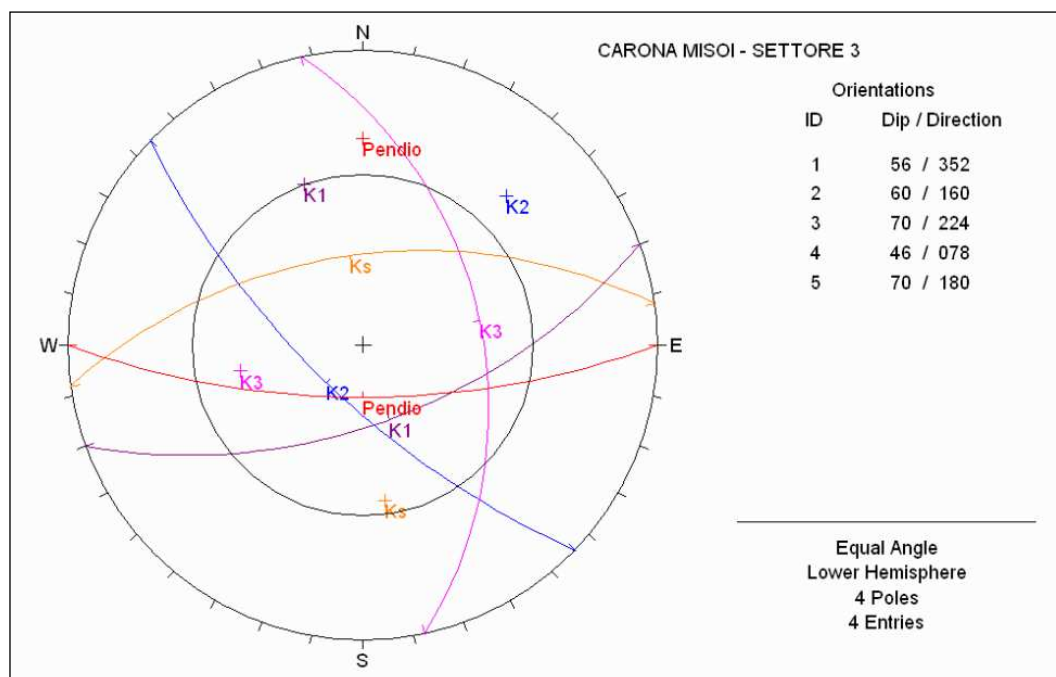


Figura 10: Stereogramma con le ciclografiche dei sistemi di discontinuità individuati. È riportata anche la ciclografica che rappresenta l'orientazione media del pendio (giacitura $180^\circ/70^\circ$) ed il cerchio che rappresenta graficamente un angolo di attrito di 30° . I valori di giacitura sono espressi come Immersione/inclinazione.

2.3.5 Settore 4

È costituito da risalti rocciosi sovrapposti di altezza variabile da 5 a 18 m circa, che si estendono per 75 m di larghezza tra 1505 e 1550 m slm di quota (Foto 8). Localmente i risalti rocciosi presentano porzioni leggermente aggettanti.

La fascia rocciosa è caratterizzata da un assetto delle discontinuità sfavorevole alla stabilità. In particolare sono stati individuati i seguenti sistemi:

- 1) Ks 005/70: È costituito dalle discontinuità impostate lungo la stratificazione/foliazione della roccia pelitica (siltiti e argilliti della Fm. del Pizzo del Diavolo). Ha spaziature variabili legate al grado di definizione dei giunti sedimentari: la spaziatura più frequente è quella larga (60 – 200 cm), seguita da quella moderata (20 – 60 cm). Relativamente alla persistenza, la più frequente è quella media (3 – 10 m), seguita da quella bassa (1 – 3 m).
- 2) K1 158/58. La spaziatura più frequente è quella larga (60 – 200 cm) seguita da quella molto larga (2 – 6 m). Ha prevalentemente persistenza bassa (1 – 3 m), seguita da quella media (3 – 10 m).
- 3) K2 210/50. Ha caratteristiche geometriche (spaziatura e persistenza) simili a quelle del sistema K1.
- 4) K3 097/68. È un sistema secondario e compare solo in alcune zone degli affioramenti. Ha come spaziatura più frequente quella larga (60 – 200 cm), seguita

da quella molto larga (2 – 6 m). Ha prevalentemente persistenza molto bassa (<1 m), seguita da quella bassa (1 – 3 m) e solo un numero molto limitato di discontinuità ha lunghezze della traccia superiori (fino a 6 – 7 m).



Foto 8: Vista dal basso di una porzione del settore 4, nella parte alta del versante.

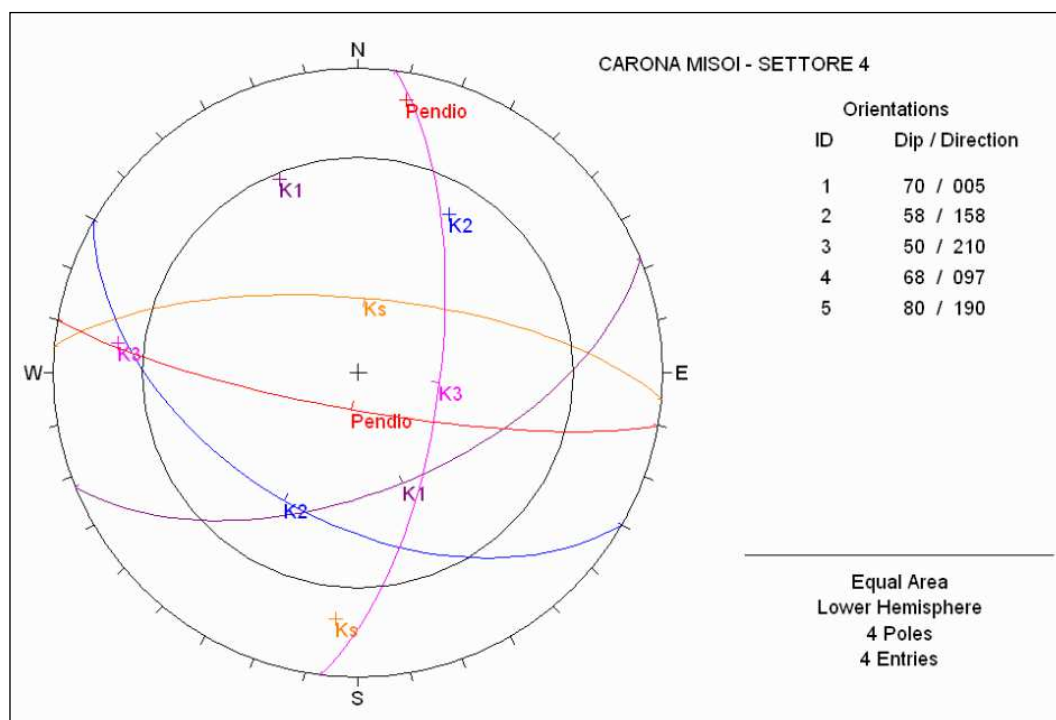


Figura 11: Stereogramma con le ciclografiche dei sistemi di discontinuità individuati. È riportata anche la ciclografica che rappresenta l'orientazione media del pendio (giacitura 190°/80°) ed il cerchio che rappresenta graficamente un angolo di attrito di 30°. I valori di giacitura sono espressi come

Immersione/inclinazione.

Le superfici delle discontinuità di tutti i sistemi descritti hanno andamento da planare a piano – ondulato, sono lisce e, prevalentemente, non sono alterate (solo decolorazione superficiale o blanda ossidazione).

Oltre che dalle discontinuità dei sistemi individuati, l'ammasso roccioso è suddiviso anche da fratture "random" con persistenza da bassa a molto bassa.

L'analisi dei possibili cinematismi, rappresentata in Figura 11, evidenzia che la mobilitazione dei blocchi può verificarsi secondo la modalità di scivolamento di cuneo roccioso lungo l'intersezione **K1 – K2**, e, laddove compare il sistema secondario K3, anche lungo le intersezioni **K1 – K3** e **K2 – K3** (Foto 9). A causa dell'andamento irregolare del pendio, localmente possono verificarsi scivolamenti planari su **K1** (modalità confermata dall'osservazione di alcune nicchie di distacco).



Foto 9: Settore 4: particolare di un cuneo roccioso isolato dalle discontinuità K2 – K3.

Per quanto riguarda i volumi mobilizzabili, i blocchi di maggiori dimensioni visivamente più instabili sono dell'ordine di $1,5 \div 2,2 \text{ m}^3$. Le dimensioni delle nicchie dei distacchi già avvenuti indicherebbero volumi fino a $3 \div 4 \text{ m}^3$.

La fascia di versante che, tra 1460 e 1520 m slm circa, si estende per circa 300 m di larghezza al di sotto dei settori 1 (in parte), 2, 3 e 4, è stata interessata dal completo abbattimento degli alberi di alto fusto durante la cosiddetta "Tempesta Vaia" di fine ottobre 2018 (Foto 4 e Foto 10).

Tale fascia di versante è di difficile ispezione per la presenza della vegetazione caduta. Sono stati osservati diversi blocchi fino a $0,4 \text{ m}^3$ inglobati negli apparati radicali sradicati (Foto 11) che, col progredire del deterioramento delle radici, inevitabilmente si mobilizzeranno.



Foto 10: Particolare dall'alto di un tratto della fascia di versante interessata dal completo abbattimento degli alberi di alto fusto durante la cosiddetta "Tempesta Vaia" di fine ottobre 2018.

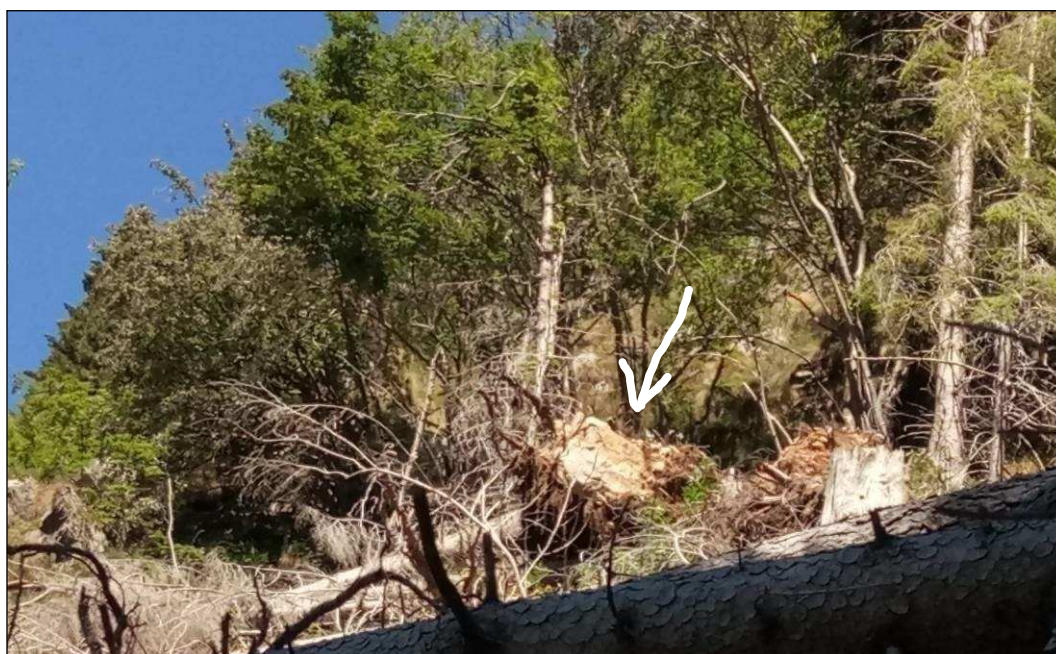


Foto 11: Particolare di un blocco inglobato in un apparato radicale sradicato.

2.3.6 Settore 4b

Riguardo al settore 4b valgono le medesime considerazioni del settore 4 riguardo

i volumi mobilizzabili.

2.3.7 Settore 5

È costituito da balze rocciose discontinue di altezza variabile da 5 a 12 m circa, che si estendono per 30 m di larghezza tra 1435 e 1450 m slm di quota (Foto 12).

La fascia rocciosa è caratterizzata da un assetto delle discontinuità sfavorevole alla stabilità. In particolare sono stati individuati i seguenti sistemi:

- 1) Ks 318/75: È costituito dalle discontinuità impostate lungo la stratificazione/foliazione della roccia pelitica (siltiti e argilliti della Fm. del Pizzo del Diavolo). Ha spaziature variabili legate al grado di definizione dei giunti sedimentari: la spaziatura più frequente è quella moderata (20 – 60 cm), seguita da quella larga (60 – 200 cm). Relativamente alla persistenza, la più frequente è quella bassa (1 – 3 m), seguita da quella media (3 – 10 m).
- 2) K1 185/38. La spaziatura più frequente è quella moderata (20 – 60 cm) seguita da quella larga (60 – 200 cm). Ha prevalentemente persistenza bassa (1 – 3 m), seguita da quella molto bassa (< 1 m).



Foto 12: Vista dal basso di una porzione del settore 5, nella parte medio – alta del versante.

- 3) K2 060/84. La spaziatura più frequente è quella larga (60 – 200 cm) seguita da quella moderata (20 – 60 cm). Ha prevalentemente persistenza bassa (1 – 3 m), seguita da quella molto bassa (< 1 m).
- 4) K3 120/36. Ha come spaziatura più frequente quella larga (60 – 200 cm), seguita da quella molto larga (2 – 6 m). Ha prevalentemente persistenza molto bassa (<1 m), seguita da quella bassa (1 – 3 m) e solo un numero molto

limitato di discontinuità ha lunghezze della traccia superiori (fino a 4 – 5 m).

- 5) K4 080/58. È un sistema secondario e compare solo in alcune zone degli affioramenti. Ha come spaziatura più frequente quella molto larga (2 – 6 m), seguita da quella molto larga (larga (60 – 200 cm). Ha prevalentemente persistenza molto bassa (<1 m), seguita da quella bassa (1 – 3 m).

Le superfici delle discontinuità di tutti i sistemi descritti hanno andamento da planare a piano – ondulato, sono lisce e, prevalentemente, non sono alterate (solo decolorazione superficiale o blanda ossidazione).

Oltre che dalle discontinuità dei sistemi individuati, l'ammasso roccioso è suddiviso anche da fratture "random" con persistenza da bassa a molto bassa.

L'analisi dei possibili cinematismi, rappresentata in Figura 12, evidenzia che la mobilitazione dei blocchi può verificarsi secondo la modalità di scivolamento di cuneo roccioso lungo le intersezioni K1 – K2, K1 – K3 e K2 – K3. Laddove compare il sistema secondario K4, anche lungo le intersezioni K1 – K4. A causa dell'andamento irregolare del pendio, localmente possono verificarsi scivolamenti planari sia su K1 che su K3 (modalità confermate dall'osservazione di alcune nicchie di distacco).

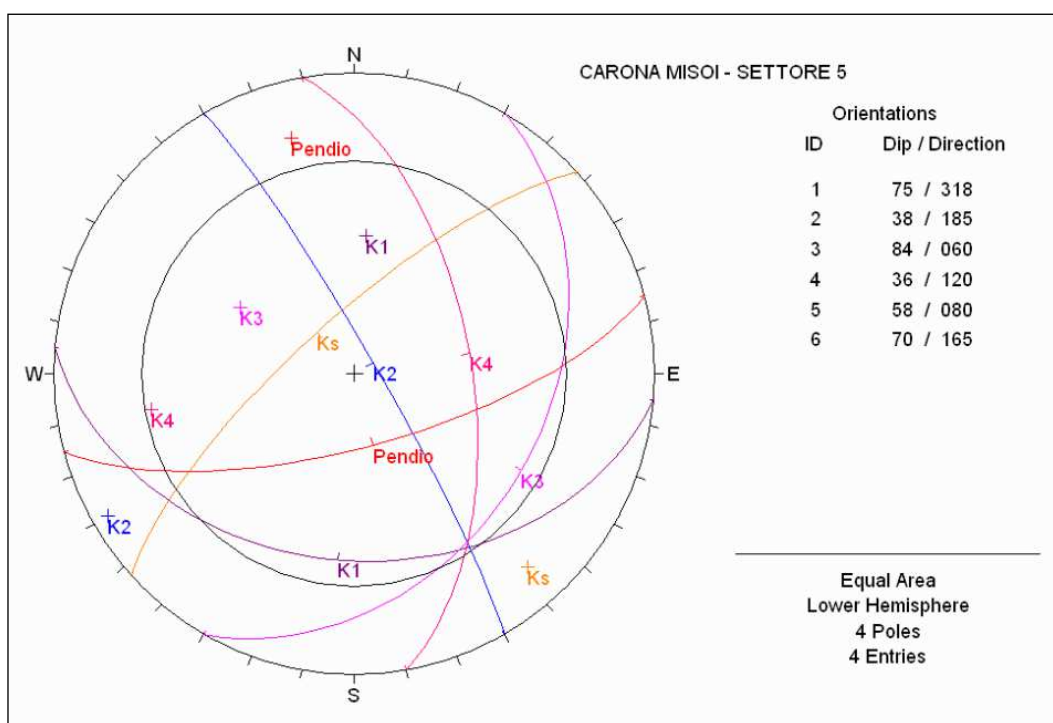


Figura 12: Stereogramma con le ciclografiche dei sistemi di discontinuità individuati. È riportata anche la ciclografica che rappresenta l'orientazione media del pendio (giacitura 165°/70°) ed il cerchio che rappresenta graficamente un angolo di attrito di 30°. I valori di giacitura sono espressi come Immersione/inclinazione.

Per quanto riguarda i volumi mobilizzabili, i blocchi di maggiori dimensioni visivamente più instabili o crollati recentemente sono dell'ordine di $0,3 \div 0,4 \text{ m}^3$. Le dimensioni delle nicchie dei distacchi già avvenuti indicherebbero volumi fino a $0,7 \div 0,8 \text{ m}^3$.

2.3.8 Settore 6

È costituito dalla porzione sommitale, in aggetto, di una balza rocciosa che si estende per 28 m di larghezza tra 1410 e 1440 m slm di quota (Foto 12).

La porzione in aggetto è caratterizzata da un assetto delle discontinuità sfavorevole alla stabilità. In particolare sono stati individuati i seguenti sistemi:

- 1) Ks 340/20: È costituito dalle discontinuità impostate lungo la stratificazione/foliazione della roccia pelitica (siltiti e argilliti della Fm. del Pizzo del Diavolo). Ha spaziature variabili legate al grado di definizione dei giunti sedimentari: la spaziatura più frequente è quella larga (60 – 200 cm), seguita da quella moderata (20 – 60 cm). Relativamente alla persistenza, la più frequente è quella bassa (1 – 3 m), seguita da quella media (3 – 10 m).
- 2) K1 168/70. La spaziatura più frequente è quella larga (60 – 200 cm), seguita da quella molto larga (2 – 6 m). Ha prevalentemente persistenza bassa (1 – 3 m), seguita da quella media (3 – 10 m).
- 3) K2 052/82. La spaziatura più frequente è quella larga (60 – 200 cm) seguita da quella molto larga (2 – 6 m). Ha prevalentemente persistenza bassa (1 – 3 m), seguita da quella molto bassa (< 1 m) e solo un numero molto limitato di discontinuità ha lunghezze della traccia superiori (fino a 5 – 6 m).



Foto 13: Vista dal basso del settore 6, nella parte medio – alta del versante.

- 4) K3 050/65. È un sistema secondario e compare solo in alcune zone degli affioramenti. Ha come spaziatura più frequente quella molto larga (2 – 6 m), seguita da quella larga (60 – 200 cm). Ha prevalentemente persistenza molto bassa (<1 m), seguita da quella bassa (1 – 3 m).

Le superfici delle discontinuità di tutti i sistemi descritti hanno andamento da planare a piano – ondulato, sono lisce e, prevalentemente, non sono alterate (solo decolorazione superficiale o blanda ossidazione).

Oltre che dalle discontinuità dei sistemi individuati, l'ammasso roccioso è suddiviso anche da fratture "random" con persistenza da bassa a molto bassa.

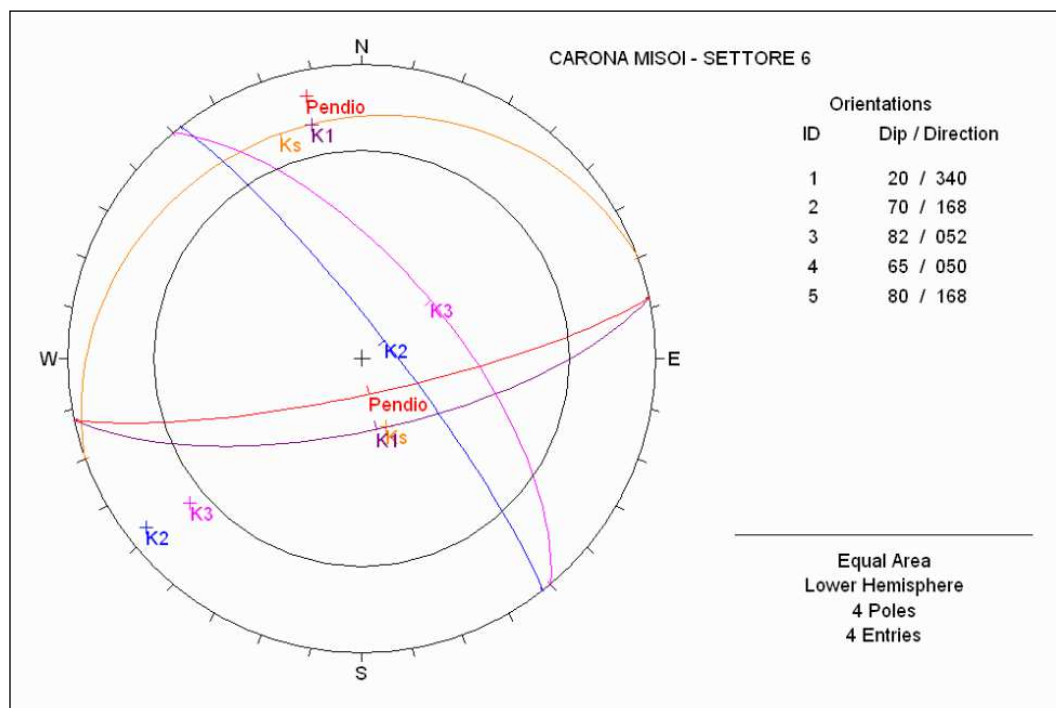


Figura 13: Stereogramma con le ciclografiche dei sistemi di discontinuità individuati. È riportata anche la ciclografica che rappresenta l'orientazione media del pendio (giacitura 168°/80°) ed il cerchio che rappresenta graficamente un angolo di attrito di 30°. I valori di giacitura sono espressi come Immersione/inclinazione.



Foto 14: Vista sulla barriera paramassi installata a valle del settore 6, si notano alcuni blocchi di pochi decimetri cubi di volume fermati dalla rete.

L'analisi dei possibili cinematismi, rappresentata in Figura 13, evidenzia che la mobilitazione dei blocchi può verificarsi sia secondo la modalità di scivolamento planare su **K1** (modalità più probabile dalle osservazioni effettuate sul terreno) che di scivolamento di cuneo roccioso lungo le intersezioni **K1 – K2** e **K1 – K3** (modalità possibili dove l'andamento del pendio presenta delle irregolarità e le pareti non sono impostate su K1).



Foto 15: Particolare del detrito di piccola pezzatura fermato dalla barriera sottostante il settore 6.



Foto 16: Particolare di blocchi tabulari poggianti sulla coltre fine detritico – eluviale lungo il versante a valle del settore 6.

Per quanto riguarda i volumi mobilizzabili, i blocchi di maggiori dimensioni visivamente più instabili sono dell'ordine di $2 \div 2,4 \text{ m}^3$ (quelli di $0,4 \div 0,6 \text{ m}^3$ sono i più frequenti). Le dimensioni delle nicchie dei distacchi già avvenuti sembrano confermare l'entità di tali volumi.

Inferiormente a tale settore è posta la barriera paramassi riscontrata durante i sopralluoghi e, molto probabilmente, installata da ben oltre un decennio. Dopo la realizzazione di tale barriera non si sono verificati crolli di volumi rocciosi significativi, ma solo di blocchi di piccola pezzatura, trattenuti dall'opera (Foto 14 e Foto 15). A valle di tale barriera vi sono numerosi blocchi tabulari di volume fino a $2,5 \text{ m}^3$, alcuni, seppur apparentemente stabili, poggiano sulla coltre fine detritico – eluviale, che potrebbe essere dilavata dalle acque di ruscellamento (Foto 16). Vi è anche un piccolo conoide detritico, costituito da blocchi fino a $1,8 \text{ m}^3$, che evidenzia come dal settore 6, in passato, si siano verificati frequenti distacchi (Foto 17).



Foto 17: Vista dal basso del conoide detritico presente lungo il versante a valle del settore 6.

2.3.9 Settore 6b

Per il settore 6b riguardo i volumi mobilizzabili valgono le stesse considerazioni del settore 6, seppure costituito dalle litofacies delle Vulcaniti del M. Cagianca.

2.3.10 Settore 7

È costituito da risalti rocciosi sovrapposti di altezza variabile da 7 a 15 m circa, che si estendono per 65 m di larghezza tra 1380 e 1410 m slm di quota (Foto 18). Localmente i risalti rocciosi presentano porzioni leggermente aggettanti (Foto 19).

La fascia rocciosa localmente è caratterizzata da un assetto delle discontinuità sfavorevole alla stabilità. In particolare sono stati individuati i seguenti sistemi:

- 1) Ks 210/55. È costituito dalle discontinuità impostate lungo la stratificazione/foliazione della roccia pelitica (siltiti e argilliti della Fm. del Pizzo del Diavolo). A causa di pieghe a scala metrica, l'andamento di tale sistema varia sensibilmente: pur mantenendo immersioni tra il traverspoggio ed il franapoggio, le inclinazioni raggiungono anche i 70°. Ha spaziature variabili legate al grado di definizione dei giunti sedimentari: la spaziatura più frequente è quella larga (60 – 200 cm), seguita da quella moderata (20 – 60 cm). Relativamente alla persistenza, la più frequente è quella bassa (1 – 3 m), seguita da quella molto bassa (<1 m) e solo un numero molto limitato di discontinuità ha lunghezze della traccia superiori (fino a 4 – 5 m).

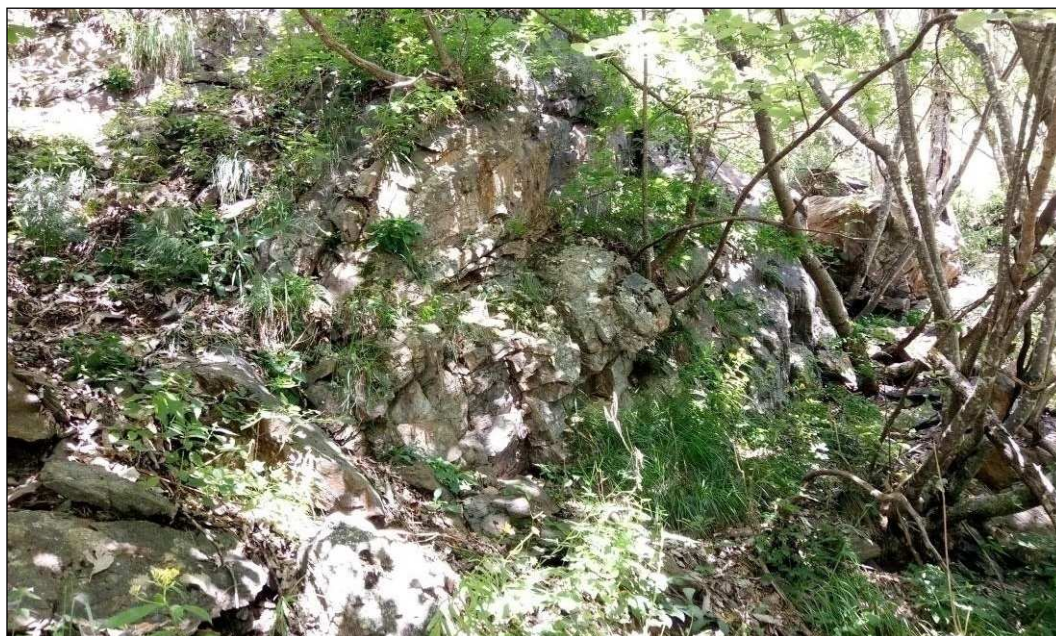


Foto 18: Particolare di una porzione del piede del settore 7, nella parte mediana del versante.

- 2) K1 185/70. È il sistema su cui sono impostate alcune delle pareti dei risalti rocciosi. La spaziatura più frequente è quella larga (60 – 200 cm) seguita da quella molto larga (2 – 6 m). Ha prevalentemente persistenza bassa (1 – 3 m), seguita da quella media (3 – 10 m).
- 3) K2 038/80. La spaziatura più frequente è quella larga (60 – 200 cm) seguita da quella molto larga (2 – 6 m). Ha prevalentemente persistenza bassa (1 – 3 m), e solo un numero limitato di discontinuità ha lunghezze della traccia superiori (fino a 6 – 7 m).
- 4) K3 246/85. È un sistema secondario e compare solo in alcune zone degli affioramenti. Ha come spaziatura più frequente quella larga (60 – 200 cm), seguita da quella molto larga (2 – 6 m). Ha prevalentemente persistenza bassa (1 – 3 m) e solo un numero molto limitato di discontinuità ha lunghezze della traccia superiori (fino a 5 – 6 m).

Le superfici delle discontinuità di tutti i sistemi descritti hanno andamento da

planare a piano – ondulato, sono lisce e, prevalentemente, non sono alterate (solo decolorazione superficiale o blanda ossidazione).

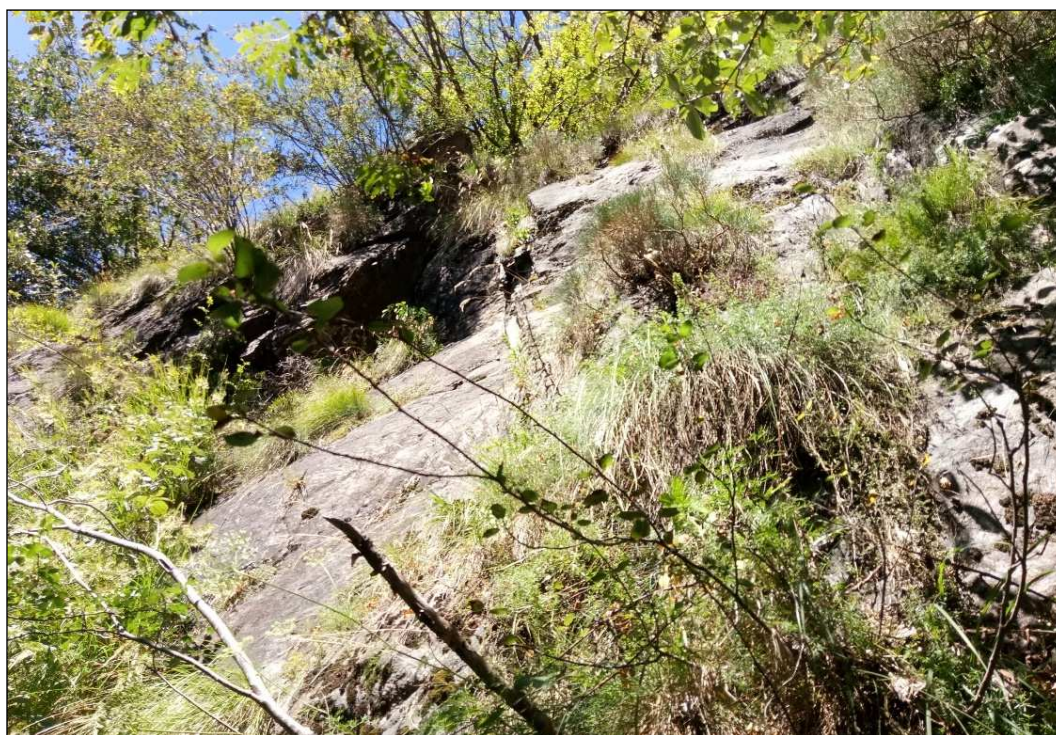


Foto 19: Particolare di una porzione in leggero aggetto del settore 7.

A causa delle pieghe della foliazione/stratificazione, oltre che dalle discontinuità dei sistemi individuati, l'ammasso roccioso è suddiviso anche da numerose fratture "random" con persistenza da bassa a molto bassa.

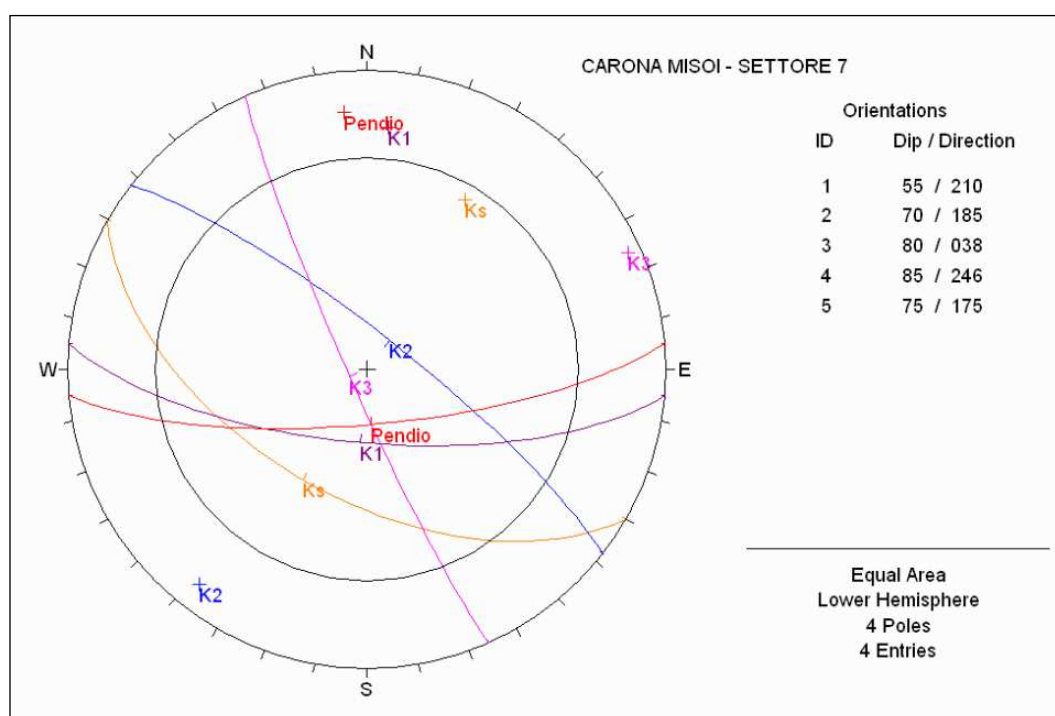


Figura 14: Stereogramma con le ciclografiche dei sistemi di discontinuità individuati. È riportata anche la ciclografica che rappresenta l'orientazione media del pendio (giacitura 175°/75°) ed il cerchio che rappresenta graficamente un angolo di attrito di 30°. I valori di giacitura sono espressi come

Immersione/inclinazione.

L'analisi dei possibili cinematismi, rappresentata in Figura 14, evidenzia che laddove compare il sistema secondario K3 la mobilitazione dei blocchi può verificarsi secondo la modalità di scivolamento di cuneo roccioso lungo l'intersezione **K1 – K3**.



Foto 20: Blocco di circa 1,5 m³ distaccatosi recentemente dal piede di un risalto roccioso del settore 7.



Foto 21: Blocco di circa 0,4 m³ distaccatosi recentemente dal settore 7. Il blocco è trattenuto

precariamente dalla vegetazione presente.

A causa dell'andamento irregolare del pendio, localmente possono verificarsi scivolamenti planari sia su **K1** che su **Ks** (in particolare dove sono presenti porzioni rocciose leggermente in aggetto), e scivolamenti di cunei lungo le intersezioni **Ks – K1** e **K1 – K2** (modalità confermate dall'osservazione di alcune nicchie di distacco).

Per quanto riguarda i volumi mobilizzabili, i blocchi di maggiori dimensioni visivamente più instabili sono dell'ordine di $0,8 \div 1,0 \text{ m}^3$. Le dimensioni delle nicchie dei distacchi già avvenuti indicherebbero volumi fino a $2 \div 2,5 \text{ m}^3$. Al piede di un risalto vi è un blocco di circa $1,5 \text{ m}^3$ distaccatosi recentemente ed arrestatosi immediatamente contro i fusti degli alberi presenti (Foto 20).

Lungo il pendio sottostante vi sono numerosi blocchi tabulari di volume compreso tra $0,4$ ed 1 m^3 , alcuni dei quali in precarie condizioni di stabilità poiché trattenuti in loco dalla vegetazione (Foto 21). È stata riscontrata anche la presenza di un masso di circa $0,8 \text{ m}^3$ apparentemente distaccatosi molto recentemente, arrestatosi per infossamento nella coltre superficiale fine (Foto 22).



Foto 22: Vista di un blocco di circa $0,8 \text{ m}^3$ distaccatosi molto recentemente dal settore 7 ed arrestatosi per infossamento nella coltre superficiale fine.

2.3.11 Settore 7B

Per il settore 7b riguardo i volumi mobilizzabili valgono le stesse considerazioni del settore 7, seppure costituito dalle litofacies delle Vulcaniti del M. Cabianca.

2.3.12 Settore 8

È costituito da una fascia rocciosa ad andamento molto irregolare, che si estendono per oltre 50 m tra 1350 e 1380 m slm di quota, con risalti di altezza variabile da 6 a 16 m circa (Foto 23). Localmente i risalti rocciosi presentano porzioni

leggermente aggettanti.

La fascia rocciosa è caratterizzata da un assetto delle discontinuità sfavorevole alla stabilità.



Foto 23: Particolare di una porzione del piede del settore 8, nella parte mediana del versante.

In particolare sono stati individuati i seguenti sistemi:

- 1) Ks 345/70. È costituito dalle discontinuità impostate lungo la stratificazione/foliazione della roccia pelitica (siltiti e argilliti della Fm. del Pizzo del Diavolo). Ha spaziature variabili legate al grado di definizione dei giunti sedimentari: la spaziatura più frequente è quella larga (60 – 200 cm), seguita da quella moderata (20 – 60 cm). Relativamente alla persistenza, la più frequente è quella bassa (1 – 3 m), seguita da quella media (1 – 3 m).
- 2) K1 085/80. La spaziatura più frequente è quella larga (60 – 200 cm) seguita da quella molto larga (2 – 6 m). Ha prevalentemente persistenza bassa (1 – 3 m), seguita da quella media (3 – 10 m).
- 3) K2 150/65. La spaziatura più frequente è quella larga (60 – 200 cm) seguita da quella molto larga (2 – 6 m). Ha prevalentemente persistenza bassa (1 – 3 m), seguita da quella molto bassa (< 1 m) e solo un numero limitato di discontinuità ha lunghezze della traccia superiori (fino a 4 – 5 m).
- 4) K3 215/48. Ha come spaziatura più frequente quella larga (60 – 200 cm), seguita da quella molto larga (2 – 6 m). Ha prevalentemente persistenza bassa (1 – 3 m), seguita da quella molto bassa (< 1 m).
- 5) K3 115/45. È un sistema secondario e compare solo in alcune zone degli affioramenti. Ha come spaziatura più frequente quella molto larga (2 – 6 m), seguita

da quella larga (60 – 200 cm). Ha prevalentemente persistenza molto bassa (<1 m) e solo un numero limitato di discontinuità ha lunghezze della traccia superiori (fino a 2 – 3 m – persistenza media).

Le superfici delle discontinuità di tutti i sistemi descritti hanno andamento da planare a piano – ondulato, sono lisce e, prevalentemente, non sono alterate (solo decolorazione superficiale o blanda ossidazione).

Oltre che dalle discontinuità dei sistemi individuati, l'ammasso roccioso è suddiviso anche da fratture "random" con persistenza da bassa a molto bassa.

L'analisi dei possibili cinematismi, rappresentata in Figura 15, evidenzia che la mobilitazione dei blocchi può verificarsi sia secondo la modalità di scivolamento planare su **K2**, che di scivolamento di cuneo roccioso lungo le intersezioni **K1 – K2**, **K1 – K3** e **K2 – K3** (modalità confermate dall'osservazione di varie nicchie di distacco). Laddove compare il sistema secondario K4 si possono verificare anche mobilitazioni secondo la modalità di scivolamento di cuneo roccioso lungo le intersezioni **K2 – K4** e **K3 – K4** (riscontrate sul terreno due nicchie di distacco secondo tale tipologia di mobilitazione).

Per quanto riguarda i volumi mobilizzabili, i blocchi di maggiori dimensioni visivamente più instabili sono dell'ordine di $1,0 \div 1,2 \text{ m}^3$. Le dimensioni delle nicchie dei distacchi già avvenuti indicherebbero volumi fino a $3,0 \div 4,0 \text{ m}^3$, ma non è possibile stabilire se si tratti di un crollo di un blocco singolo o di più blocchi. Lungo il pendio immediatamente sottostante vi sono numerosi blocchi tabulari di volume compreso tra 1 ed $1,5 \text{ m}^3$ poggianti sulla superficie ed in buone condizioni di stabilità (Foto 24), ed altri di volume superiore (fino a 7 m^3 circa) parzialmente inglobati nel detrito fine (Foto 25).

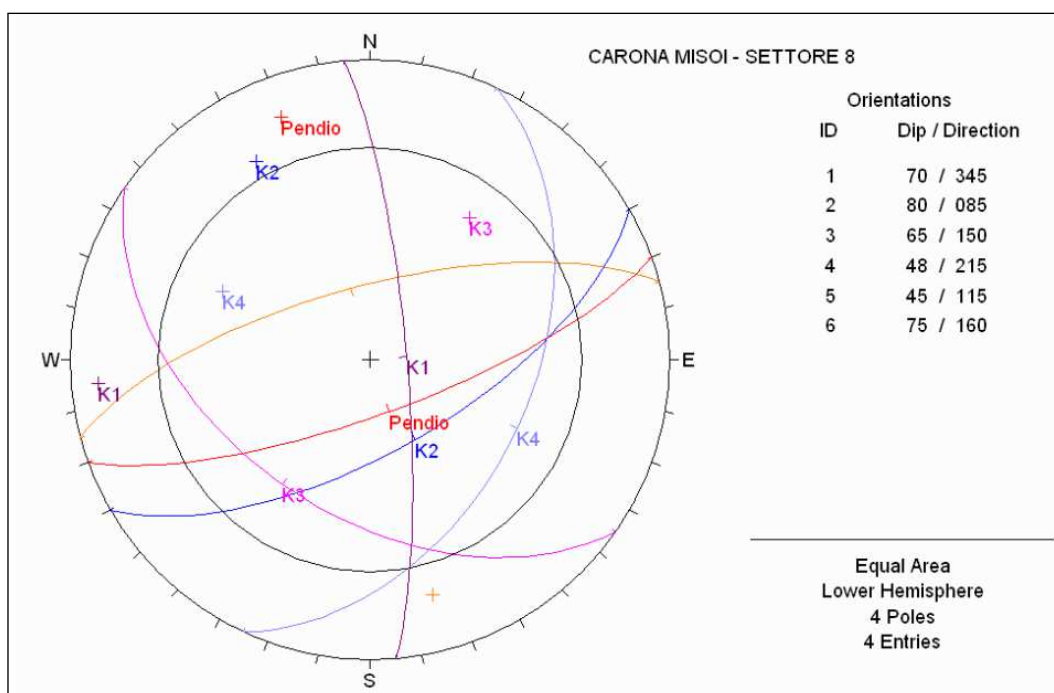


Figura 15: Stereogramma con le ciclografiche dei sistemi di discontinuità individuati. È riportata anche la ciclografica che rappresenta l'orientazione media del pendio (giacitura $160^\circ/75^\circ$) ed il cerchio che rappresenta graficamente un angolo di attrito di 30° . I valori di giacitura sono espressi come

Immersione/inclinazione.



Foto 24: Particolare di un blocco tabulare poggiante sul detrito poco a valle del settore 8.



Foto 25: Blocco di circa 7 m³ parzialmente inglobato nel detrito fine a valle del settore 8.

2.3.13 Situazione A

È costituita da una porzione d'ammasso roccioso disarticolata, posta tra 1520 e 1530 m slm, pochi metri a valle del settore 1 (Foto 26).



Foto 26: Vista dal basso della porzione d'ammasso disarticolata della situazione A.

Presenta vari blocchi smossi, poggianti l'uno sull'altro. Alcuni sono già crollati (volumi fino a $0,4 \text{ m}^3$) e sono trattiene dalla vegetazione esistente (Foto 27).

Risulta difficile valutare le condizioni di stabilità complessive: apparentemente non sembrano esserci i presupposti per ulteriori crolli, ma a



Foto 27: Particolare di blocchi già crollati ed in precarie condizioni di stabilità.

causa dell'azione dell'apparato radicale della vegetazione di alto fusto presente, che si insinua nelle fratture beanti o nello spazio tra i vari blocchi, lo spostamento dei massi di minori dimensioni, sul quale poggiano quelli più grandi, potrebbe causare la rimobilizzazione di questi ultimi, uno dei quali ha un volume prossimo a 6 m^3 .

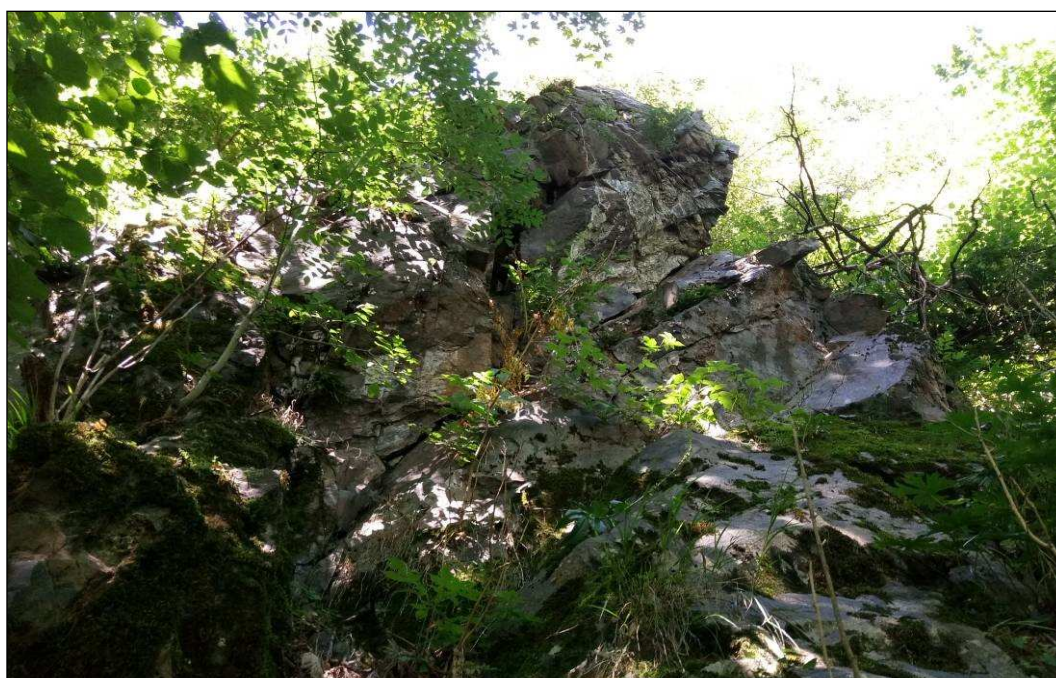


Foto 28: Vista dal basso dello sperone roccioso della situazione B.

2.3.14 Situazione B

È costituita da uno sperone roccioso posto tra 1340 e 1355 m slm pochi metri a SW del settore 8 (Foto 28 e Foto 29). L'ammasso che lo costituisce è molto fratturato e parzialmente rilasciato.

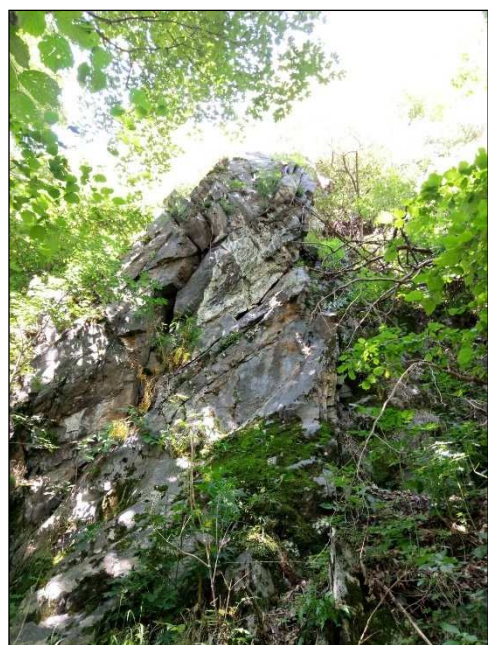


Foto 29: Vista laterale dello sperone roccioso della situazione B.

L'assetto strutturale, stimabile solo con osservazioni dal basso per problemi di accessibilità diretta, è definito dai seguenti sistemi di discontinuità:

- 1) Ks 330/70. È costituito dalle discontinuità impostate lungo la stratificazione/foliazione della roccia pelitica (siltiti e argilliti della Fm. del Pizzo del Diavolo);
- 2) K1 065/88;
- 3) K2 224/40;
- 4) K3 075/52;
- 5) K3 265/65.

L'analisi dei possibili cinematismi, rappresentata in Figura 16, evidenzia che la mobilitazione dei blocchi può verificarsi secondo varie modalità di scivolamento dai fronti laterali dello sperone, ed in misura molto limitata da quello rivolto direttamente verso il fondovalle (in pratica solo cuneo lungo **K2 – K4**).

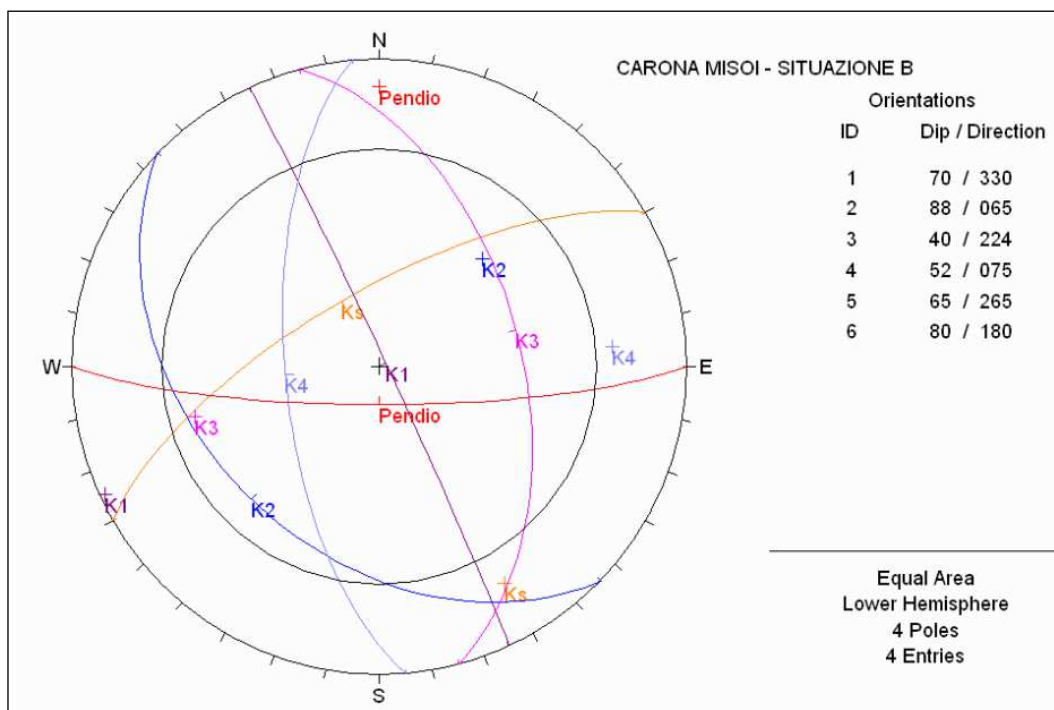


Figura 16: Stereogramma con le ciclografiche dei sistemi di discontinuità individuati. È riportata unicamente la ciclografica che rappresenta l'orientazione media del pendio rivolto verso valle (giacitura 180°/80°) ed il cerchio che rappresenta graficamente un angolo di attrito di 30°. I valori di giacitura sono espressi come Immersione/inclinazione.

Per quanto riguarda i volumi mobilizzabili, vi sono diversi blocchi visivamente instabili dell'ordine di $0,2 \div 0,4 \text{ m}^3$. Visto il grado di fatturazione e la persistenza di alcune discontinuità non è comunque da escludere la possibilità di crolli in massa che potrebbero coinvolgere un volume roccioso complessivo compreso tra 10 e 15 m^3 , costituito da più blocchi con volumi singoli fino a $2,0 \div 2,5 \text{ m}^3$.

2.3.15 Situazione C



Foto 30: Vista dal basso della situazione C. Si nota la frattura molto aperta sulla quale poggia la porzione d'ammasso disarticolata.

È costituita da una porzione d'ammasso roccioso disarticolata, posta tra 1530 e 1540 m slm, tra i settori 1 e 4 (Foto 26).

È suddivisa da fratture beanti fino a 25 cm e poggia su una discontinuità con superficie molto ondulata e disposta a franapoggio (giacitura $188^\circ/48^\circ$), anch'essa con tratti molto aperti. Risulta difficile valutarne le condizioni di stabilità complessive poiché l'ammasso si può osservare solo dal basso o, in maniera al-

quanto limitata, lateralmente.

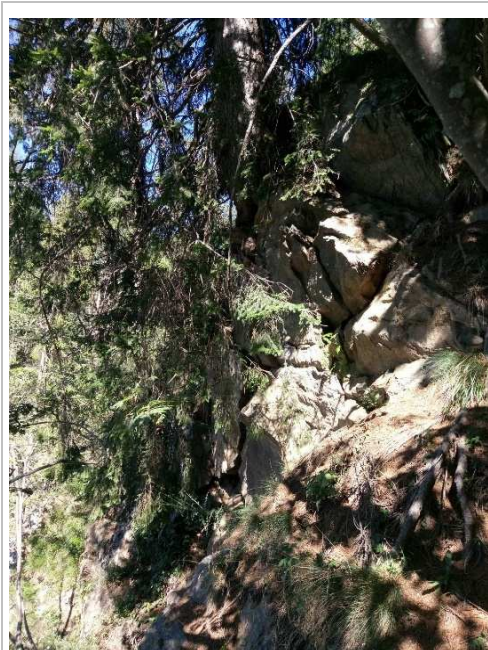


Foto 31: Vista laterale della porzione d'ammasso disarticolata della situazione C.

La parte visivamente più instabile, entro la quale s'insinua l'apparato radicale della vegetazione di alto fusto presente, ha un volume complessivo stimabile in $8 - 10 \text{ m}^3$, ed è costituita da blocchi singoli di forma tabulare fino a $2 - 2,5 \text{ m}^3$ (Foto 31). La porzione rocciosa che poggia sulla superficie a franapoggio, invece, ha un volume complessivo stimabile in almeno $60 - 70 \text{ m}^3$, ed è costituita da blocchi che sembrano superare anche i $7 - 8 \text{ m}^3$.

2.3.16 Settore C2

Per la caratterizzazione del Settore C2, per via della presenza di un'ampia falda detritica al piede poco disturbata dall'azione antropica, si è effettuato il

rilevamento statistico delle dimensioni dei blocchi presenti nelle aree di accumulo per il dimensionamento delle opere di difesa passiva.

È costituito da pareti esposte in modo variabili e che si sviluppano tra 1.240 m slm e 1.350 m slm. Al piede è presente una falda detritica poco alterata dall'azione antropica, parzialmente vegetata e che si sviluppa dal piede delle pareti soprastanti (1.240 m slm) e sino a 1.170 m slm ove si sviluppa l'interdigitazione con i depositi glaciali e periglaciali.

La litologia dei massi è molto omogenea ed è riferibile esclusivamente alle litologie della Formazione del Monte Cbianca. La falda detritica analizzata è sostanzialmente equi ripartita tra vegetata e non vegetata (la vegetazione presente è essenzialmente di aghifoglie); gli elementi arborei di dimensioni maggiori presentano talora tracce di impatti sulla porzione di tronco volta a monte senza che si sia potuta riconoscere una o più aree con elevata incidenza di questi impatti (fenomeno quindi diffuso nell'area indagata).

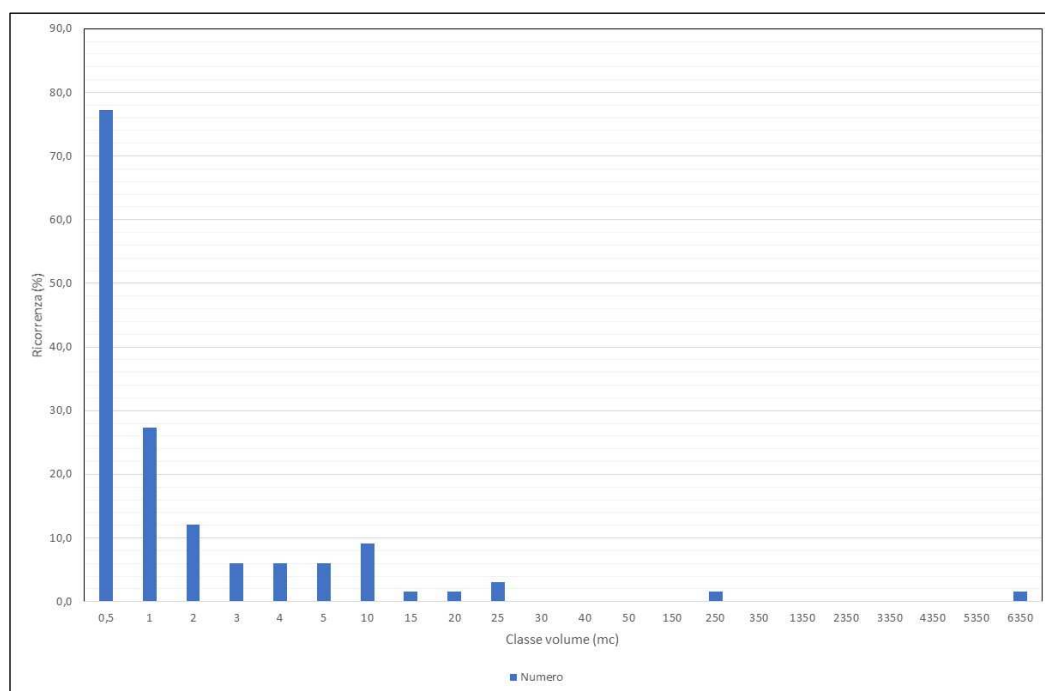


Grafico 1: Distribuzione volumetrica dei massi dell'area di accumulo degli eventi di crollo.

In Grafico 1 sono sintetizzati i risultati del rilievo effettuato nell'area con valori statistici riportati in Tabella 1 inerenti ai volumi ricorrenti.

	Max	Med	Min	95 percentile
Equidimensionale	24,75	1,51	0,03	5,03
Tabulare	22,18	2,60	0,02	9,86
Prismatico	3,03	0,70	0,01	2,12
Totale	24,75	1,88	0,01	8,31

Tabella 1: Dati statistici dei rilievi effettuati (valori in m³). Dal conteggio si sono esclusi, in quanto non rappresentativi, i bocchi con volume di 6.050 m³ e 184 m³.

2.3.17 Settore 9

È costituito dalla falda detritica che si estende tra 1280 e 1320 m slm di quota a valle dei settori 6 e 8. Tale falda, ben vegetata e stabilizzata, è caratterizzata dalla presenza di blocchi di crollo di grandi dimensioni: diversi superano i 4 – 5 m³,

alcuni raggiungono gli 8 – 10 m³, ed uno, semisepolto da detrito fine, ha un volume stimabile in almeno 30 m³.

Ad ovest (dove nel 2020 è stata realizzata la nuova barriera paramassi) la falda detritica posta alla stessa altezza è stata per gran parte terrazzata dall'attività antropica, e i massi di grandi dimensioni generalmente sono stati ricoperti da materiale riportato.

Si può comunque presumere che la loro frequenza fosse meno elevata, così da consentire agevolmente la realizzazione dei terrazzamenti.

2.3.18 Sintesi dei settori sottesi alle aree oggetto dell'intervento di mitigazione

Per ogni settore sotteso si sono identificati in Tabella 2: sviluppo altimetrico minimo e massimo, le dimensioni di riferimento o più frequenti dei blocchi (seppure in assenza di un numero di misure in sito idoneo a fini statistici, in base ad osservazioni sitospecifiche e/o analisi geomeccaniche tali dimensioni possono rappresentare la distribuzione compresa tra il 5° e il 95° percentile), le dimensioni massime o presenza di blocchi ciclopici (dimensioni reputate poco frequenti o eccezionali).

In relazione a quest'ultimo aspetto sono presenti blocchi e blocchi ciclopici (superiori a 7 ÷ 8 m³ e sino a 30 m³) instabili o connessi a crolli già accaduti in condizioni metastabili; anche in virtù delle risorse economiche disponibili per tali blocchi non risultano proponibili interventi di difesa attiva o passiva.

ID	Quota (m slm)		Dimensione di riferimento (m ³)	Dimensioni massime o ciclopici	Note
	Min	Max			
Settore 1	1540	1580	0,8 ÷ 1,2	2,0 ÷ 2,5 m ³ osservati	Settore attivo in substrato lapideo
Settore 1b	1520	1575	0,8 ÷ 1,2	2,0 ÷ 2,5 m ³ osservati	Settore attivo in substrato lapideo
Settore 2	1580	1610	0,3 ÷ 0,5	0,3 ÷ 0,5 m ³ da rilievo geomeccanico / 1,0 ÷ 1,5 m ³ dimensione nicchie di stacco	Settore attivo in substrato lapideo
Settore 3	1520	1570	0,3 ÷ 0,5	0,3 ÷ 0,5 m ³ da rilievo geomeccanico / 0,8 ÷ 1,2 m ³ dimensione nicchie di stacco	Settore attivo in substrato lapideo
Settore 4	1505	1550	0,4	1,5 ÷ 2,2 m ³ da rilievo geomeccanico / 3,0 ÷ 4,0 m ³ dimensione nicchie di stacco	Settore attivo in substrato lapideo sormontato da detrito a blocchi scomposti dallo sradicamento della vegetazione → tempesta Vaia
Settore 4b	1445	1495	0,4	1,5 ÷ 2,2 m ³ da rilievo geomeccanico / 3,0 ÷ 4,0 m ³ dimensione nicchie di stacco	Settore attivo in substrato lapideo sormontato da detrito a blocchi scomposti dallo sradicamento della vegetazione → tempesta Vaia
Settore 5	1435	1450	0,3 ÷ 0,4	0,7 ÷ 0,8 m ³ dimensione nicchie di stacco	Settore attivo in substrato lapideo
Settore 6	1410	1440	0,4 ÷ 0,6	2,0 ÷ 2,4 m ³ da rilievo geomeccanico / 2,5 ÷ 3,0 m ³ dimensione nicchie di stacco / 2,5 m ³ osservati al piede della parete	Settore molto attivo in substrato lapideo
Settore 6b	1265	1335	0,4 ÷ 0,6	2,0 ÷ 2,4 m ³ da rilievo geomeccanico / 2,5 ÷ 3,0 m ³ dimensione nicchie	Settore molto attivo in substrato lapideo

				distacco	
Settore 7	1380	1410	0,4 ÷ 1,0	1,5 m ³ osservati	Settore attivo in substrato lapideo con blocchi di forma prevalentemente tabulare
Settore 7b	1200	1220	0,4 ÷ 1,0	1,5 m ³ osservati	Settore attivo in substrato lapideo con blocchi di forma prevalentemente tabulare
Settore 8	1350	1380	1,0 ÷ 1,2	1,5 m ³ da rilievo geomeccanico / 3,0 ÷ 4,0 m ³ dimensione nicchie distacco	Settore attivo in substrato lapideo
Settore 9	1280	1320	0,3 ÷ 1,0	4,0 ÷ 5,0 m ³ osservati 8 ÷ 10 m ³ numerosi (presente uno di 30 m ³)	Falda detritica parzialmente vegetata
Settore A	1520	1530	0,4	6,0 m ³ osservati	Settore attivo in substrato lapideo
Settore B	1530	1540	2,0 ÷ 2,5	7,0 ÷ 8,0 m ³ osservati	Settore attivo in substrato lapideo
Settore C	1530	1540	2,0 ÷ 2,5	7,0 ÷ 8,0 m ³ osservati al piede della parete 10 m ³ blocco di dimensioni massime	Settore molto attivo in substrato lapideo con blocchi di forma prevalentemente tabulare
Settore C2	1240	1340	8,31 *	Nel detrito sono presenti blocchi ciclopici con volume stimato di 6.050 m ³ e di 185 m ³ 22,0 ÷ 25,0 m ³ alcuni blocchi di forma tabulare osservati al piede della falda detritica analizzata	Settore molto attivo in substrato lapideo con blocchi di forma prevalentemente tabulare

Tabella 2: Sintesi dei settori omogenei di propensione al dissesto sottesi alle opere di difesa passiva. La dimensione delle nicchie (quando identificata) è utile per determinare il volume complessivo di materiale mobilizzato: non corrisponde quindi alla dimensione dei blocchi. * 95 percentile determinato in base alla dimensione dei blocchi presenti nella falda detritica.

3. MODELLAZIONE SISMICA DEL SITO

Gran parte delle aree caratterizzate (si veda il capitolo 2) ricadono nello scenario di pericolosità sismica Z4b "Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide deltizio – lacustre" con possibili amplificazioni litologiche e geometriche; gli interventi in progetto ricadono in predetto scenario che risulta coerente con quanto osservato e valutato in sito.

Per approfondire l'aspetto di pericolosità sismica si è effettuata una specifica campagna di indagine sismica; considerando l'inaccessibilità con mezzi del sito in cui sono previsti gli interventi, la medesima indagine sismica la si è impiegata per definire il rapporto depositi di copertura – substrato lapideo (si veda il 3.7).

3.1 INQUADRAMENTO SISMICO (ACCELERAZIONE SISMICA DI BASE)

Relativamente alla caratterizzazione sismica del sito, si è fatto riferimento alla sezione 3.2.2 delle NTC18 "Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche" che sostituisce l'OPCM 3274/2003 e l'OPCM 3519/2006. In luogo della classificazione dell'intero comune per quanto riguarda la pericolosità sismica di base, le NTC18 (analogamente alle previgenti NTC08) contemplano valori di accelerazione sismica di base determinati con una griglia avente lato di circa 5 km.

La precedente suddivisione dei comuni italiani in 4 classi di pericolosità sismica è mantenuta ai soli fini amministrativi (es. obblighi di valutazione della documentazione presso apposite commissioni, ecc.); in riferimento a tale classificazione, il comune in cui ricadono le opere ricade in zona sismica 3 (DGR X/2129/2014), bassa sismicità (come definita dal DM 31 luglio 2012).

Ai fini della valutazione dell'azione sismica cui sono soggette le opere in progetto, si è adottato l'approccio pseudostatico contemplato dalle NTC18 che non prevede l'amplificazione delle azioni durante l'evento sismico, ma la sola degradazione della resistenza del terreno.

In base della griglia di riferimento adottata nelle NTC18 e con le metodiche riportate nell'OPCM 3519/2006, le regioni possono individuare delle sottozone caratterizzate da valori a_g intermedi, comunque non inferiori a 0,025 g.

Gli interventi (punto baricentrico) sono ubicati alle seguenti coordinate geografiche:

WGS84 → Latitudine: 46,025348° N Longitudine: 9,786297° E

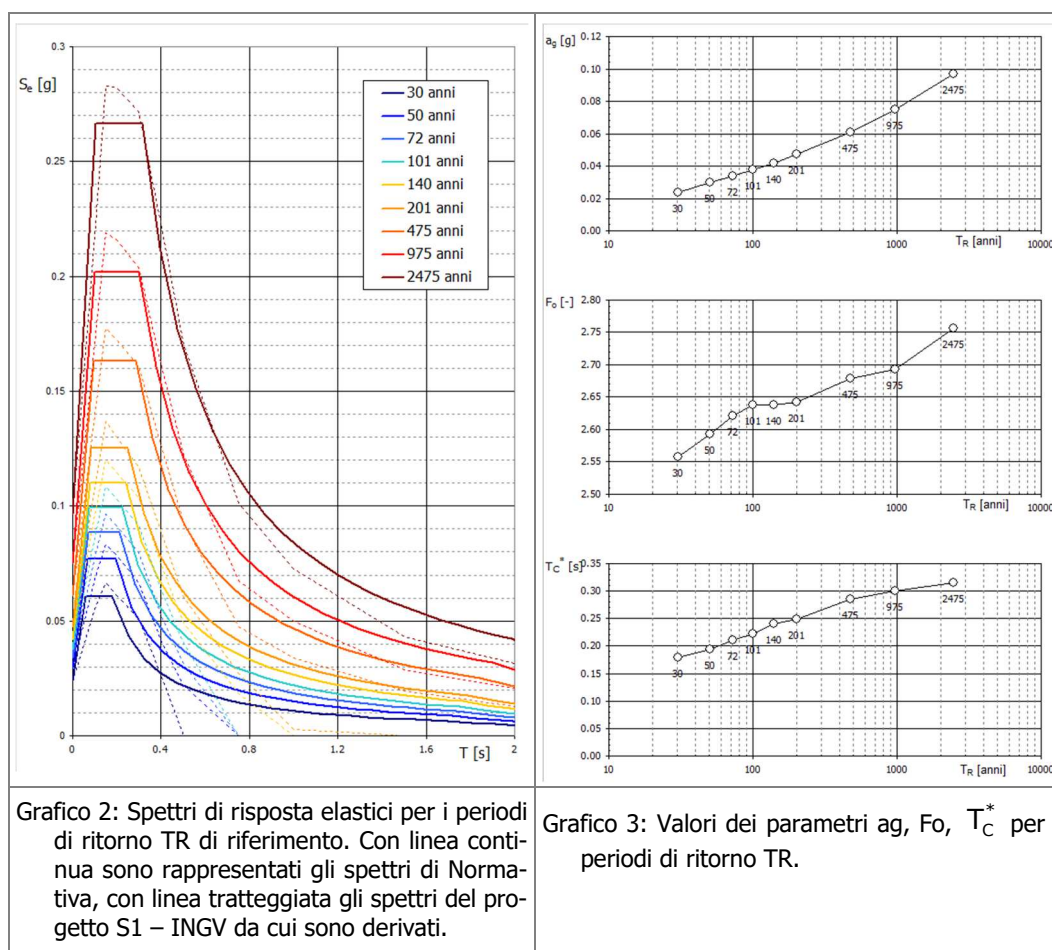
ED50 → Latitudine: 46,026262° N Longitudine: 9,787353° E

Attraverso la media ponderata dei valori dei vertici della griglia di riferimento di 5 km, si ricavano i parametri di base che definiscono l'effetto sismico del sito in cui ricade l'intervento (in condizioni di campo libero, su substrato sismico rigido e con superficie topografica orizzontale – Tabella 3).

T_R [anni]	a_g [g]	F_o [–]	T_c^* [s]
30	0,024	2,557	0,179

50	0,030	2,593	0,195
72	0,034	2,620	0,210
101	0,038	2,638	0,222
140	0,042	2,638	0,240
201	0,047	2,642	0,249
475	0,061	2,678	0,285
975	0,075	2,693	0,300
2475	0,097	2,756	0,316

Tabella 3: Valori dei parametri a_g , F_0 , T_C^* per i periodi di ritorno T_R di riferimento.



Per lo sviluppo del III° Livello di cui alla DGR IX/2616/2011 (analisi effetto sismico in fase di progettazione), la Regione ha suddiviso il territorio regionale in fasce caratterizzate da severità sismica omogenea. In particolare sono state individuate 8 fasce nelle quali i comuni presentano valori di accelerazione massima attesa al suolo e valori dell'ordinata spettrale massima compresi in un range del $\pm 10\%$ dal valore medio.

Il Comune ricade in **Fascia 3** (un valore crescente indica una accelerazione maggiore). Per ogni fascia sono stati messi a disposizione 5 accelerogrammi registrati (diagramma in funzione del tempo che rappresenta le accelerazioni indotte al suolo in un dato sito, durante un evento sismico); tali accelerogrammi, come previsto

dalle NTC18 e dalla Circolare 7/2019, sono da utilizzarsi nelle analisi dinamiche dei sistemi geotecnici nella fascia corrispondente (FASCIA1 – FASCIA8).

Nelle NTC18 e nella Circolare 7/2019, infatti, viene esplicitamente richiesto nelle analisi dinamiche dei sistemi geotecnici (amplificazioni, frane, ecc.) l'uso di 5 accelerogrammi registrati rappresentativi della sismicità del sito in analisi, compatibili con le caratteristiche sismogenetiche della sorgente, con la coppia magnitudo – distanza dalla sorgente e con la massima accelerazione orizzontale attesa e registrate su bedrock sismico, provenienti dai database nazionali ed internazionali più accreditati. Gli accelerogrammi sono utilizzati per l'analisi dinamica non lineare delle strutture poiché consentono di ottenere una stima accurata e statisticamente corretta della domanda sismica.

3.2 VITA DI RIFERIMENTO

Il tempo di ritorno da impiegare per la scelta dei valori dei parametri a_g , F_0 e T_c^* dipende dallo stato limite da considerare e dalla vita di riferimento dell'opera; la vita di riferimento dipende dalla vita nominale e dalle classi d'uso.

Tipi di costruzione		Vita Nominale V_N (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie.	≤ 10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari.	≥ 50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati.	≥ 100

Tabella 4: Vita nominale V_N per diversi tipi di opere (Tabella 2.4.I delle NTC18). Le verifiche sismiche di opere provvisorie o strutture in fase costruttiva possono omettersi quando le relative durate previste in progetto siano inferiori a 2 anni.

La vita nominale di un'opera V_N è intesa come il periodo (anni) nel quale l'opera, purché soggetta a manutenzione ordinaria, debba poter essere usata per lo scopo al quale è destinata. La vita nominale dei diversi tipi di opere è riportata nella Tabella 2.4.I delle NTC18. Alla presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso (C_U) definite in Tabella 5 (corrispondenti alle Classi di Importanza di EC8).

Classe	Uso dell'opera
Classe I	Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.
Classe II	Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.
Classe III	Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi.

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

Tabella 5: Classi d'uso per diversi tipi di opere (Tabella 2.4.2 delle NTC18).

Classe d'uso	I	II	III	IV
Coefficiente C_U	0,7	1	1,5	2

Tabella 6: Valore di C_U per classe d'uso (Tabella 2.4.II delle NTC18).

Il valore del coefficiente d'uso C_U è definito, al variare della classe d'uso, come mostrato nella Tabella 6.

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione sono valutate in relazione ad un periodo di riferimento V_R . La vita di riferimento V_R si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale V_N per il coefficiente d'uso C_U .

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

Se $V_R \leq 35$ anni si pone comunque $V_R = 35$ anni.

Con riferimento al tipo di opera, s'individuano i tempi di riferimento dell'azione sismica (si veda la Tabella 7).

Tipi di costruzione		Classe d'uso ►	I	II	III	IV
		C_U ►	0,7	1,0	1,5	2,0
		V_N	V_R			
1	Costruzioni temporanee e provvisorie ⁽¹⁾	≤ 10	35	35	35	35
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	≥ 50	≥ 35	≥ 50	≥ 75	≥ 100

¹ Le verifiche sismiche di opere provvisorie o strutture in fase costruttiva possono omettersi quando le relative durate previste in progetto siano inferiori a 2 anni.

3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	≥ 100	≥ 70	≥ 100	≥ 150	≥ 200
---	--	------------	-----------	------------	------------	------------

Tabella 7: Tempo di riferimento in anni per diversi tipi di opere (Tabella C2.4.I della Circolare 7/2019).

Relativamente alle opere in progetto si ha:

Tipo di costruzione		2
Vita nominale	V_N	≥ 50
Classe d'uso		III
	C_U	1,5
Vita di riferimento ($V_R = V_N \cdot C_U$)	V_R (anni)	75

Seppure l'intervento sia correlato alla messa in sicurezza di edifici esistenti caratterizzati da non elevato grado di affollamento, l'intervento indirettamente però riduce il rischio a cui è soggetta anche viabilità comunale; pertanto si è adottato una classe d'uso III.

Nei confronti delle azioni sismiche, gli stati limite (sia ultimi che di esercizio) sono individuati riferendosi alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti:

Gli stati limite di esercizio (SLE) comprendono:

- ♦ *Stato Limite di Operatività (SLO):* a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e le apparecchiature rilevanti in relazione alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;
- ♦ *Stato Limite di Danno (SLD):* a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidezza nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

Gli stati limite ultimi (SLU) comprendono:

- ♦ *Stato Limite di salvaguardia della Vita o ultimo (SLV):* a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidezza nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidezza per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- ♦ *Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC):* a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

Stato limite		PV _R
Stato limite di esercizio (SLE)	SLO	81%
	SLD	63%
Stato limite ultimo (SLU)	SLV	10%
	SLC	5%

Tabella 8: Probabilità di superamento (PVR) per ciascun stato limite (tabella 3.2.I delle NTC18).

La probabilità di superamento, nel periodo di riferimento V_R, è riportata in Tabella 8.

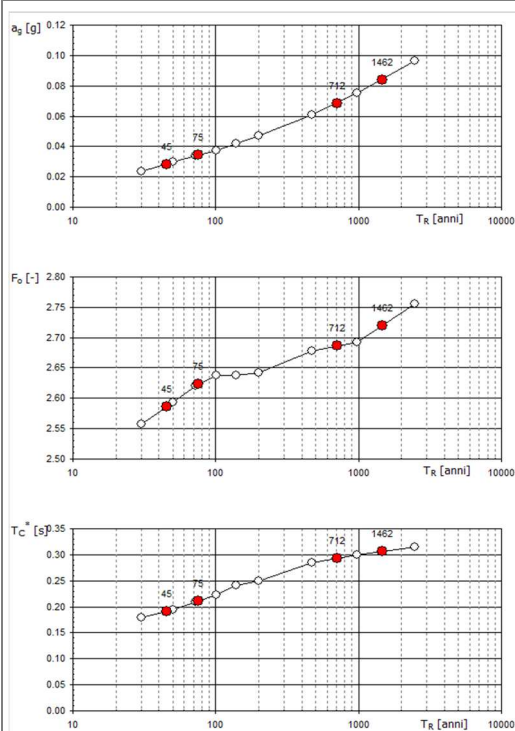


Grafico 4: Valori dei parametri a_g, F_o, T_c^{*} in funzione del periodo di ritorno T_R.

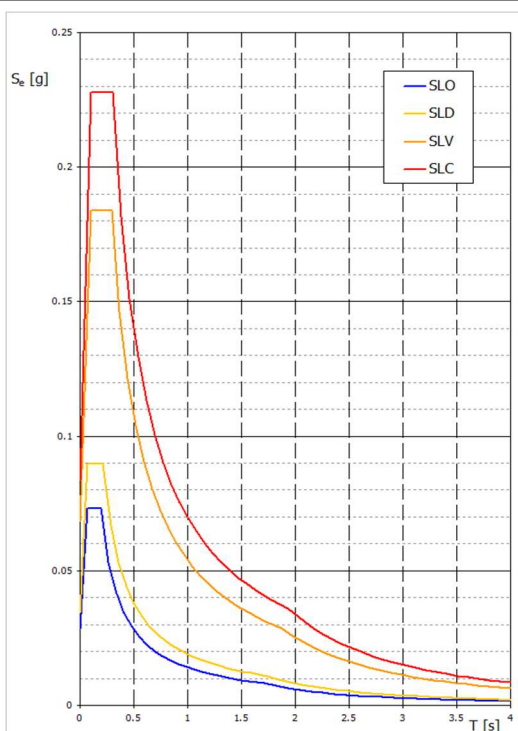


Grafico 5: Spettri di risposta elastici per i diversi Stati Limite.

Per ciascuno stato limite e relativa probabilità di eccedenza P_{VR} nel periodo di riferimento V_R, il periodo di ritorno T_R del sisma è dato da:

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

Le NTC18 stabiliscono i valori dei parametri a_g (accelerazione orizzontale massima al sito), F_o (valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale) e T_c^{*} (valore di riferimento per la determinazione del periodo d'inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale) utili per la definizione delle forme spettrali, per ciascuna delle probabilità di superamento PV_R nel periodo di riferimento V_R.

Stato limite		T _R [anni]		a _g [g]	F _o [-]	T _c [*] [s]
SLE	SLO	0,6·V _R (min 30)		0,028	2,586	0,191

	SLD	V_R	75	0,034	2,623	0,211
	SLV	$9,5 \cdot V_R$	712	0,068	2,686	0,293
SLU	SLC	$19,5 \cdot V_R$ (max 2475)	1462	0,084	2,72	0,306

Tabella 9: Valori dei parametri a_g , F_0 , T_C^* per i periodi di ritorno T_R associati a ciascun stato limite.

3.3 ASPETTI METODOLOGICI

3.3.1 Amplificazione litologica

Per la determinazione dell'amplificazione sismica, fattori geomorfologici e stratigrafici locali possono modificare le caratteristiche del moto sismico, filtrando le onde nel passaggio dal bedrock alla superficie. L'effetto di filtraggio conduce ad una ridistribuzione dell'energia con eventuale amplificazione del moto vibratorio associato ad alcune frequenze.

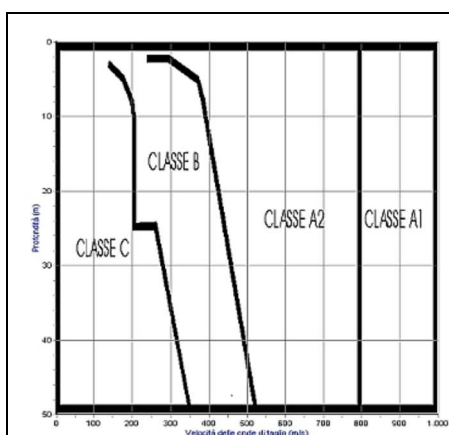


Figura 17: Schema di riferimento per la determinazione della classe del sito.

Per la classificazione del sito per determinare l'eventuale amplificazione sismica, le NTC18, riprendendo quanto riportato nell'Eurocodice 8 (con particolare riferimento alla prima parte EN1998 – 1 in cui si definiscono le regole generali, le azioni sismiche e regole specifiche per edifici), fa riferimento sia alla velocità delle onde S nella copertura sia allo spessore della stessa.

L'Eurocodice 8 identifica diverse classi: la A (a sua volta suddivisa in due sottoclassi, la A1 e la A2), e dalla B alla E, ad ognuna delle quali è associato uno spettro di risposta elastico. Lo schema indicativo di riferimento per la determinazione della

classe del sito è riportato in Figura 18.

Categoria	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente

	compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato sismico non superiore a 30 m.

Tabella 10: Categorie di sottosuolo di fondazione dell'Eurocodice 8 come trasposta nelle NTC18 (Tabella 3.2.II delle NTC18). Per la categoria di suolo D, è stata introdotta una soglia minima sulla velocità media, pari a 100 m/s, mentre tutte le altre soglie numeriche sono state conservate inalterate.

In generale il fenomeno dell'amplificazione sismica diventa più accentuato passando dalla classe A alla classe D.

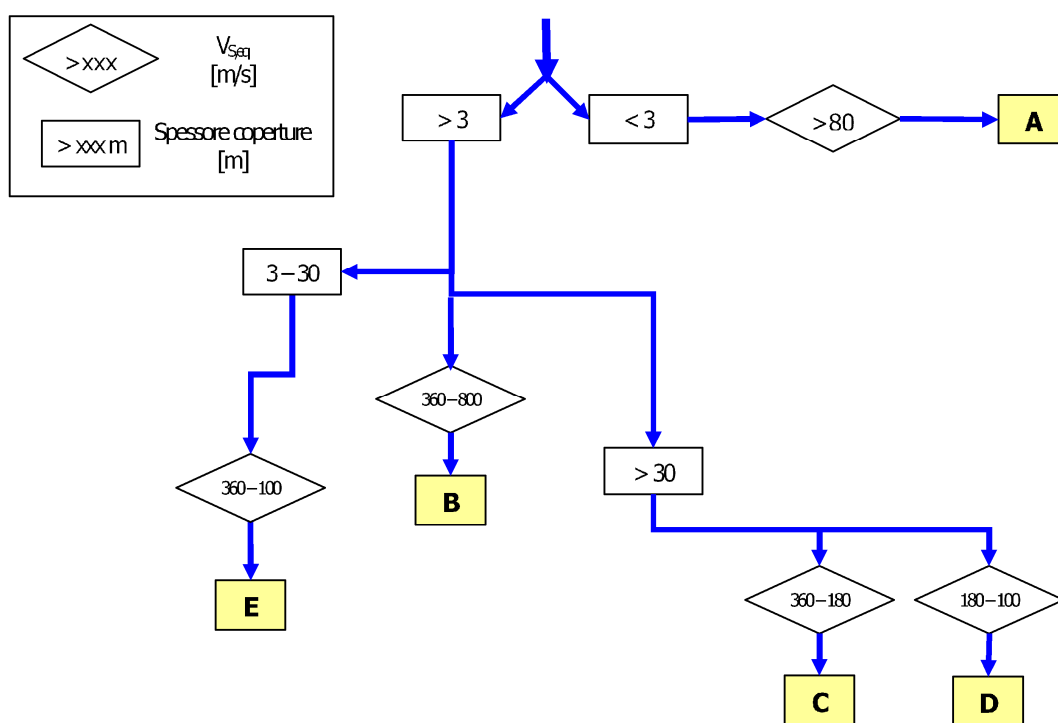


Figura 18: Diagramma di flusso per l'individuazione delle categorie di sottosuolo.

Diversamente dalle NTC08, con particolare riferimento al suolo di categoria B, le NTC18 contemplano l'abbandono del parametro V_{s30} a favore di un simile parametro denominato "Velocità equivalente". Questa è calcolata in modo perfettamente analogo alla V_{s30} ma, invece, di estendere la media pesata fino ai rigorosi 30 m di profondità è portata sino ad una profondità H (che può essere pari a 30 m, ma anche ad un valore minore).

Il valore della profondità H è il raggiungimento del "substrato sismico", caratterizzato da velocità superiori agli 800 m/s. Per le diverse categorie di suolo (con esclusione della categoria residuale E) si ha quindi (rif. Punto 3.2.2 della Circolare

7/2019):

- ◆ Suoli di categoria A ove non è prevista la verifica della velocità equivalente con la soglia di 800 m/s, ma viene previsto l'utilizzo diretto delle V_s . Questo perché per tale categoria di suoli è facile avere una profondità H pari a 0 m, per cui sarebbe impossibile calcolare la "Velocità equivalente";
- ◆ Suoli di categoria B, ove non è prevista una verifica della stratigrafia per l'assegnazione della categoria di suolo, ma vale esclusivamente il valore di $V_{s,eq}$ misurato sino al raggiungimento del substrato sismico (H variabile);
- ◆ Suoli di categoria C e D, ove il substrato sismico è superiore a 30 m, la $V_{s,eq}$ coincide con la V_{s30} .

Secondo la Circolare 7/2019 per i terreni nei quali la profondità del substrato sismico è maggiore di 30 m ($H \geq 30$ m), la $V_{s,eq}$ coincide di fatto con la V_{s30} delle NTC08. L'introduzione della $V_{s,eq}$, unita alla modifica nella definizione delle categorie di sottosuolo, si è resa necessaria al fine di includere le configurazioni stratigrafiche che rimanevano escluse nelle NTC08 (ad esempio profili di tipo B con profondità del substrato inferiore a 30 m).

Ai sensi delle NTC18, la stratigrafia delle V_s è misurata dal piano indicato in Figura 19.

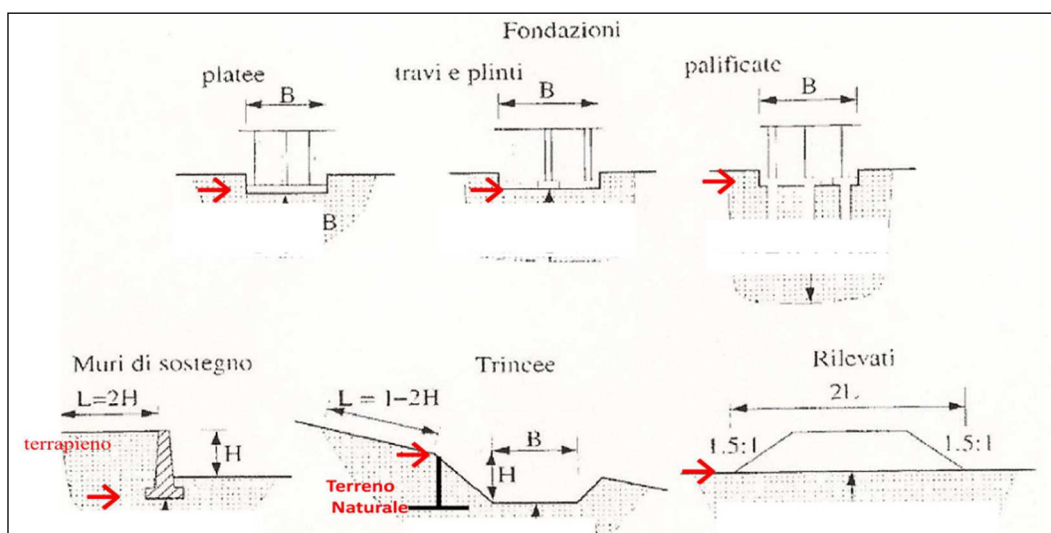


Figura 19: Punto di misura della profondità per la determinazione delle $V_{s,eq}$. Per le fondazioni superficiali la profondità è riferita al piano di imposta mentre, per le fondazioni su pali, è riferita alla testa dei pali.

Per velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio si intende la media armonica delle velocità delle onde S negli strati nei primi metri di profondità dal piano di posa della fondazione, secondo la relazione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s,i}}} \quad (\text{m/s})$$

Per le componenti orizzontali del moto e per le categorie di sottosuolo di fondazione definite in Tabella 10, la forma spettrale del sottosuolo di categoria A viene

adeguata al sito attraverso il coefficiente stratigrafico S_s ed il coefficiente topografico S_T . Il valore del periodo T_C è adeguato attraverso l'applicazione del coefficiente C_C . I coefficienti S_s e C_C , in relazione alla tipologia di sottosuolo, si determinano come riportato in Tabella 11.

Categoria	S_s	C_C
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1,50$	$1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1,80$	$1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$

Tabella 11: Parametri di adeguamento forma spettrale e del periodo in relazione al tipo di sottosuolo (Tabella 3.2.IV delle NTC18).

3.3.2 Amplificazione topografica

Per condizioni topografiche complesse è necessario predisporre specifiche analisi di risposta sismica locale. Per configurazioni superficiali semplici si può adottare la classificazione riportata in Tabella 12.

Le categorie topografiche si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali. Creste o dorsali allungate devono essere considerate nella definizione dell'azione sismica se di altezza maggiore di 30 m.

Cat.	Caratteristiche della superficie topografica	S_T
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$	1,0
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$	1,2
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$	1,2
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$	1,4

Tabella 12: Parametri di adeguamento forma spettrale riguardo la topografia (Tab. 3.2.III delle NTC18).

3.4 VERIFICHE SITOSPECIFICHE

3.4.1 Amplificazione litologica

Rispetto alla classificazione sismica del sottosuolo, sulla base dei dati ricavati dalla bibliografia disponibile (studio geologico a supporto del PGT) e dalle indagini / verifiche effettuate, si ha una stratigrafia geologica costituita da depositi di copertura di natura detritica sovrapposti al substrato lapideo.

3.4.1.1 Indagini di riferimento

Nell'ambito della predisposizione dello studio geologico a supporto del PGT si è

effettuata la valutazione della pericolosità sismica locale di primo livello (sono assenti indagini simiche in prossimità dell'area di intervento).

Si è quindi realizzata una campagna di indagini sismiche mediante tecnica HVSR per la definizione della categoria simica di suolo e la cui ubicazione è riportata in Figura 20.

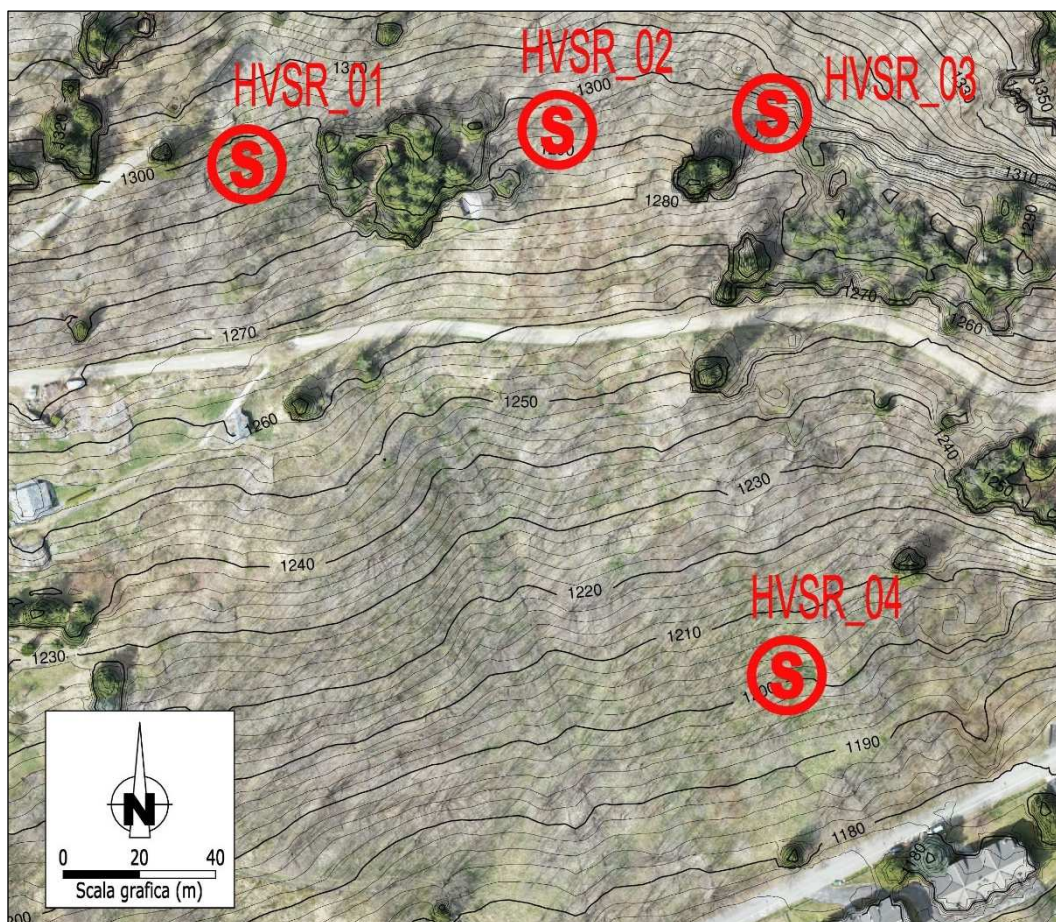


Figura 20: Ubicazione prove disponibili. HVSR punto di indagine sismica.

3.4.1.1.1 Metodologia di indagine HVSR

Le misure sismiche HVSR o H/V (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) sono indagini geofisiche a stazione singola finalizzate alla caratterizzazione sismica di sito tramite la stima delle frequenze fondamentali di risonanza.

Le NTC18 ricalcano l'Eurocodice 8, il quale a sua volta ha recepito in toto la normativa californiana, che prevede di fornire una base quantitativa per la classificazione dei suoli in termini di effetti di sito attraverso la determinazione della velocità delle onde S nelle porzioni superficiali di suolo.

Le misure a stazione singola del tremore sismico portano, attraverso i rapporti spettrali, alla misura immediata della frequenza di risonanza del sottosuolo e con l'inversione delle misure H/V, permettono di stimare sia la stratigrafia superficiale, sia la stratigrafia delle V_s .

Il metodo HVSR è una tecnica a stazione singola, si effettua cioè per mezzo di un singolo sismometro tricomponente a larga banda e alta sensibilità che viene posto

sul terreno e campiona il rumore sismico per alcuni minuti. Le basi teoriche della tecnica HVSR si rifanno in parte alla sismica tradizionale (riflessione, rifrazione e diffrazione) e in parte alla teoria dei microtremori.

Le basi teoriche dell'H/V sono facilmente comprensibili in un mezzo del tipo strato + bedrock (o strato assimilabile al bedrock) in cui i parametri sono costanti in ciascuno strato (modellazione 1 – D). Con questa configurazione si ricava la frequenza di risonanza (f_r) dello strato relativa alle onde S:

$$f_r = \frac{V_{SI}}{(4 \cdot H)}$$

Teoricamente questo effetto è sommabile cosicché la curva H/V mostra come massimi relativi le frequenze di risonanza dei vari strati. Questo, insieme ad una stima delle velocità che è solitamente disponibile almeno a livello di massima, è in grado di fornire previsioni sullo spessore h degli strati. Questa informazione è per lo più contenuta nella componente verticale del moto ma la prassi di usare il rapporto tra gli spettri orizzontali e quello verticale, piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce un'importante normalizzazione del segnale per il contenuto in frequenza, la risposta strumentale e l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto. La normalizzazione, che rende più semplice l'interpretazione del segnale, è alla base della diffusione del metodo.

La situazione, nel caso di un suolo reale, è però più complessa. Innanzitutto il modello di strato piano al disopra del bedrock si applica molto raramente. Inoltre la velocità aumenta con la profondità, possono esserci eterogeneità laterali importanti ed infine la topografia può non essere piana. L'inversione delle misure di tremore a fini stratigrafici, nei casi reali, sfrutta quindi la tecnica del confronto degli spettri singoli e dei rapporti H/V misurati con quelli 'sintetici', cioè con quelli calcolati relativamente al campo d'onde completo di un modello 3D.

L'interpretazione è tanto più soddisfacente, e il modello tanto più vicino alla realtà, quanto più i dati misurati e quelli sintetici sono vicini. Inoltre uno dei problemi principali di questa visione è che i microtremori sono solo in parte costituiti da onde di volume, P o S. Essi sono costituiti in misura molto maggiore da onde superficiali e in particolare da onde di Rayleigh, tuttavia ci si può ricondurre a risonanza delle onde di volume poiché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime.

3.4.1.1.1 *Strumentazione*

La strumentazione utilizzata è costituita da GEOBOX che ottimizza la misura del microtremore nell'intervallo di frequenze comprese tra 0,1 e 300 Hz, permettendo di raggiungere una risoluzione migliore di quella raggiunta dalle più recenti catene di sismometri fissi e digitalizzatori.

I sensori sono costituiti da una terna di velocimetri smorzati criticamente che trasmettono il segnale ad un sistema di acquisizione digitale a basso rumore a dinamica non inferiore a 23 bit. Le caratteristiche progettuali di tale strumentazione consentono una accuratezza relativa maggiore di 10^{-4} sulle componenti spettrali

al di sopra di 0,1 Hz. Il moto del terreno è amplificato, convertito in forma digitale, organizzato e trasferito ad un PC dove, mediante il codice di calcolo Easy HVSR della Geostru, viene analizzato e revisionato il segnale.

3.4.1.1.1.2 Restituzione dei risultati

L'elaborazione del segnale permette di ottenere:

- ♦ la frequenza caratteristica di risonanza del sito, che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale. Si dovranno adottare adeguate precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di "doppia risonanza" estremamente pericoloso per la stabilità degli stessi;
- ♦ la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. In seguito sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;
- ♦ la velocità media delle onde di taglio V_s calcolata tramite un apposito codice di calcolo. È necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prove penetrometriche, sondaggio, sismica a rifrazione, ecc.) e riconoscibile nella curva H/V. Sarà quindi possibile calcolare la stratigrafia delle V_s e la relativa categoria del suolo di fondazione in ottemperanza delle NTC18;
- ♦ stratigrafia del sottosuolo in un range di indagine compreso tra 0,5 e 700 m di profondità.

Tutte le valutazioni effettuate sono riportate in un report (contenente anche la tabella con i criteri di significatività).

3.4.1.2 Risultati

Le principali correlazioni stratigrafiche realizzate sulla base delle V_s sono riportate in APPENDICE A e, relativamente alla risposta sismica del sito, le indagini di riferimento (scegliendo la prova HVSR_01 in quanto quella che presenta la migliore registrazione del segnale) hanno restituito i valori riportati in Tabella 13.

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m ³]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	14,56	19	0,31	383
2	14,56	10,62	18	0,32	275
3	25,17	24,21	22	0,3	618
4	49,38	24,45	20	0,32	348
5	73,83	5	26	0,29	1209

Tabella 13: Stratigrafia delle V_s misurata, cautelativamente, a partire dal piano campagna in luogo della casistica riportata Figura 19.

$$V_{s,eq} = 354,4 \text{ m/s}$$

Considerando che il substrato sismico si colloca a 73,8 m da pc, tali valori portano ad individuare un suolo di Categoria C.

Al fine di verificare le modalità di applicazione del metodo semplificato di cui alle NTC18, bisogna verificare che il fattore di amplificazione (FAC) del sito calcolato secondo le modalità stabilite dalla DGR IX/2616/2011, Allegato 5, sia inferiore al valore soglia del fattore di amplificazione (FAS) predeterminato per ogni comune dalla Regione Lombardia. In base alla procedura regionale contenuta nella DGR IX/2616/2011 e sulla base dei dati della stratigrafia delle Vs riportata in Tabella 13, si ricava il periodo proprio del sito T , che risulta $0,4862$ s (calcolato da una profondità minima di 4 metri da p.c. e considerando tutta la stratigrafia fino alla profondità in cui il valore della velocità Vs è pari o superiore a 800 m/s – dato reale in quanto l'indagine ha raggiunto il substrato sismico).

Oltre a ciò si è individuata la scheda di valutazione idonea che è quella sabbiosa; da tale scheda si ricava la curva da impiegare per il calcolo dei valori di Fa nell'intervallo 0,1 – 0,5 s e che corrisponde alla NUMERO 2.

I valori di FAC calcolati sono rispettivamente di 1,5 per l'intervallo di 0,1 – 0,5 s e 1,8 per l'intervallo 0,5 – 1,5 s; considerando una variabilità di + 0,1 che tiene in conto la variabilità del valore di Fa ottenuto (punto 2.2.2 dell'Allegato 5), si ricavano i valori di Fa definitivi:

Intervallo 0,1 – 0,5 s $Fa = 1,5 \rightarrow +0,1$ (da DGR IX/2616/2011) $\rightarrow Fa = 1,2$

Intervallo 0,5 – 1,5 s $Fa = 1,8 \rightarrow +0,1$ (da DGR IX/2616/2011) $\rightarrow Fa = 1,9$

Considerando che si è in presenza di suoli in Categoria C, i valori soglia stabiliti dalla Regione per il comune sono rispettivamente di 1,8 per l'intervallo di 0,1 – 0,5 s e 2,4 per l'intervallo 0,5 – 1,5 s. I valori di amplificazione calcolati sono quindi rispettivamente INFERIORI al valore di soglia regionale nell'intervallo di periodi 0,1 – 0,5 s e INFERIORI al valore di soglia regionale nell'intervallo di periodi 0,5 – 1,5 s.

Pertanto può applicarsi il metodo semplificato di cui alle NTC18 e risulta necessario adottare un suolo di Categoria C.

Data la limitata estensione delle opere e l'assetto stratigrafico locale, è possibile fare riferimento ad un suolo equivalente in Categoria C per tutte le opere in progetto.

3.4.2 Amplificazione morfologica

Per quanto riguarda le caratteristiche morfologiche del sito, cautelativamente si assume un assetto morfologico di Categoria T2 (le opere si collocano in un contesto pianeggiante con acclività < 15°).

3.5 VALUTAZIONI COMPLESSIVE

In relazione alle valutazioni riportate in precedenza, gli interventi ricadono in Categoria C di suolo ed assetto topografico T2 si ha quindi:

	SLE		SLU	
	SLO	SLD	SLV	SLC
S_s	1,50	1,50	1,50	1,50

C_c	1,81	1,75	1,57	1,55
S_T	1,2	1,2	1,2	1,2

Per quanto riguarda l'azione sismica, al fine di determinare i coefficienti k_h e k_v , si introduce il coefficiente β_m di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito; pertanto coefficienti k_h e k_v si determinano con:

$$k_h = \beta_m \cdot \frac{a_{\max}}{g} \quad k_v = \pm 0,5 \cdot k_h$$

Dove il valore di β_m è riportato in Tabella 14.

	Categoria di sottosuolo	
	A	B, C, D, E
	β_m	β_m
$0,2 < a_g(g) \leq 0,4$	0,30	0,028
$0,1 < a_g(g) \leq 0,2$	0,27	0,24
$a_g(g) \leq 0,1$	0,20	0,20

Tabella 14: Coefficienti di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito (tabella 7.11.II NTC18).

Con i valori S_s e S_T , si è determinato il valore massimo di accelerazione sismica utile per le opere in progetto e gli altri parametri sito dipendenti, cui corrispondono i parametri sismici riportati in Tabella 15.

Parametri	SLE		SLU	
	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0,009	0,011	0,022	0,027
kv	0,005	0,006	0,011	0,014
A_{max} [m/s²]	0,5	0,603	1,209	1,478
Beta	0,18	0,18	0,18	0,18

Tabella 15: Parametri sismici del sito relativi alla stabilità dei pendii e fondazioni superficiali. Il valore di a_{\max} così determinato considera il coefficiente β_m di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito.

Riguardo ai diversi stati limite, considerando la tipologia di opere e l'assenza di diverse indicazioni da parte del Committente, per lo stato limite di esercizio (SLE) dinamico si è considerato lo stato limite di danno (SLD), per lo stato limite ultimo (SLU) dinamico si è considerato stato limite di salvaguardia della vita (SLV).

Considerando che le opere in progetto ricadono in zona sismica 3 non vengono considerate le componenti verticali.

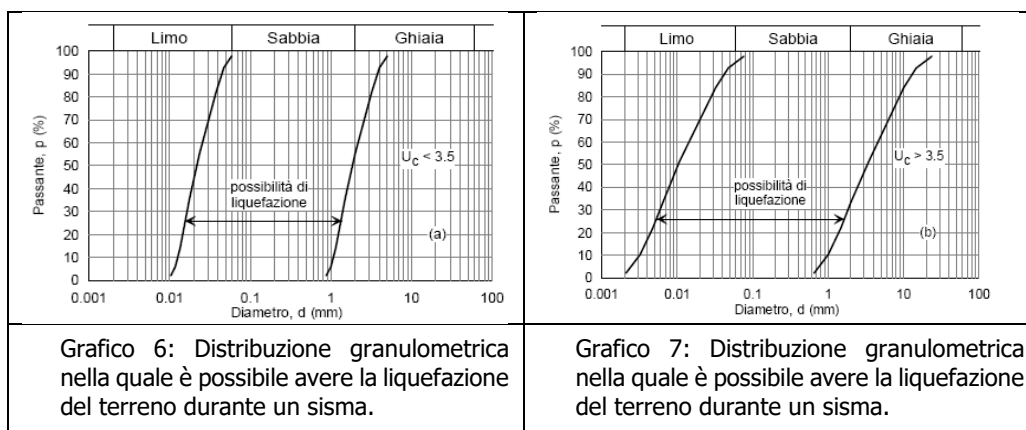
Le opere previste non rientrano tra quelle giudicate classificate "strategiche" – "rilevanti" dalla Regione Lombardia (DDUO 19904/2003).

3.6 LIQUEFAZIONE DEL TERRENO

In caso di verifiche agli stati limite dinamici, deve essere effettuata la verifica alla

liquefazione del terreno. La verifica a liquefazione (sezione 7.11.3.4.2 NTC18) può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti cinque circostanze:

1. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;
2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub – orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata* $(N1)_{60} > 30$ oppure $qc_{1N} > 180$ dove $(N1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e qc_{1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;



4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate in Grafico 6 (a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ e Grafico 7 (b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$. Dove U_c è il rapporto D_{60}/D_{10} , dove D_{60} e D_{10} sono il diametro delle particelle corrispondenti rispettivamente al 60% e al 10% del passante sulla curva granulometrica cumulativa.

Necessità di verifiche alla liquefazione

Nel caso specifico, come risulta dalla Tabella 9 (0,125 ag/g – SLV) si è in presenza di accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) inferiori a 0,1g: pertanto è soddisfatta la condizione prevista dalla sezione 7.11.3.4.2 NTC08 per non effettuare la verifica alla liquefazione dei suoli in condizioni sismiche.

3.7 DEFINIZIONE DELL'ANDAMENTO DEL SUBSTRATO ROCCIOSO

Essendo presenti delle coperture detritiche di significativo spessore, per individuare l'andamento della profondità del substrato roccioso, si è implementata l'indagine sismica finalizzata alla definizione dell'amplificazione sismica locale con ulteriori punti di indagine (posizionati sia nei punti di intervento a quota superiore, sia nei punti di intervento a quota inferiore).

Per la metodica di indagine si rimanda al capitolo 3.4.1.1.1 e per i risultati si rimanda all'APPENDICE A (sintetizzati nel seguente schema).

HVSr_01		HVSr_02		HVSr_03	
Profondità [m]	Velocità onde di taglio [m/s]	Profondità [m]	Velocità onde di taglio [m/s]	Profondità [m]	Velocità onde di taglio [m/s]
0	366	0	358	0	383
13,56	299	11,59	283	14.56	275
27,91	694	21,67	670	25.17	618
57,88	300	48,91	311	49.38	348
77,26	1300	62,87	1372	73.83	1209

Tabella 16: Andamento del substrato nei punti di intervento quota superiore.

Relativamente ai punti di intervento a quota superiore, dallo schema risulta che in corrispondenza della prova HVSr_01 il substrato lapideo (non coincidente con il substrato sismico) si colloca a 27,9 m da pc, nella prova HVSr_02 il substrato lapideo si colloca a 21,7 m da pc. e nella prova HVSr_03 il substrato lapideo si colloca a 25,2 m da pc.

HVSr_04	
Profondità [m]	Velocità onde di taglio [m/s]
0	271
16,13	434
33,19	570
43,46	398
68,39	1117

Tabella 17: Andamento del substrato nei punti di intervento quota inferiore.

Relativamente ai punti di intervento a quota inferiore, della prova HVSr_04 il substrato lapideo (non coincidente con il substrato sismico) si colloca a 16,1 m da pc.

4. ELEMENTI GEOGNOSTICI E PARAMETRIZZAZIONE

4.1 INTERAZIONE STRUTTURE – TERRENO

Le opere in progetto, considerando la loro posizione, si sviluppano essenzialmente entro depositi di copertura costituiti, nella porzione più superficiale, da detriti sciolti con abbondante presenza di massi e blocchi ciclopici, sovrapposti / interdigitati a depositi glaciali con abbondanti massi e blocchi ciclopici.

In base all'indagine geofisica, il substrato lapideo si colloca tra 16 e 20 metri di profondità, risultando pertanto non influente per quanto in progetto.

4.2 DEFINIZIONE DEI PARAMETRI E DEL PROFILO GEOTECNICO

Per la definizione del profilo geotecnico, oltre all'impiego di dati bibliografici, si sono effettuate valutazioni di back analyses utilizzando i dati topografici dell'aerofotogrammetrico e i risultati dei rilievi geologici.

Considerando la natura dei terreni potenzialmente coinvolti dalla realizzazione delle opere (granulometria anche di ghiaie grossolane – molto grossolane, massi e blocchi ciclopici) che non permettono una puntuale caratterizzazione in sito mediante le usuali metodiche di indagine (prove penetrometriche e SPT in foro), tale metodologia risulta idonea per le opere in progetto.

Escludendo cautelativamente le aree più acclivi in quanto caratterizzate da maggior frequenza di materiali grossolani (blocchi), in corrispondenza della probabile ubicazione delle difese passive nel settore centrale da analisi con GIS in assenza di dissesti superficiali il natural declivio presenta un'acclività minima di 27,9°, massima di 35,6° e mediana di 31,7° (superficie indagata 5.200 m² circa).

In base a tali elementi e considerando le caratteristiche dei sottostanti depositi glaciali ricavate da bibliografia, è possibile definire un profilo geotecnico tipo ed attribuire i valori dei parametri geotecnici (si veda Tabella 18).

Litotipo	Prof. (m)	γ_h (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	ϕ (°)	ν	E (MPa)
Depositi detritici grossolani	0,0 – 5,0	18,56	19,23	31,7	0,32	6,77
Depositi glaciali interdigitati a depositi detritici	5,0 – 15,0	17,97	19,05	30,5	0,33	5,88

Tabella 18: Stratigrafia geotecnica (parametri nominali).

Valutato l'assetto morfologico e strutturale del versante, il profilo geotecnico di riferimento può essere esteso a tutti gli interventi.

Vista la profondità massima alla quale si spingono le opere in progetto e per la natura geologico – geomorfologica del sito, si esclude l'interferenza con la circolazione di acque sotterranee; non si reputa necessario prevedere l'introduzione di fattori correttivi dei parametri geotecnici per la presenza di falda.

4.3 PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI

Secondo l'EC7, il valore caratteristico è quel valore al quale è associata una prefissata probabilità di non superamento (es. un valore caratteristico di 26° dell'angolo di attrito del terreno con una probabilità di non superamento del 5% – frattile 5% –, vuol dire ipotizzare che ci sia una probabilità del cinque per cento che il valore reale dell'angolo di attrito sia inferiore a 26°). I valori caratteristici (v_k) sono determinabili con:

$$v_k = v_m \cdot (1 + X \cdot V)$$

dove:

v_k valore caratteristico del parametro geotecnico;

v_m valore medio del parametro geotecnico;

X parametro dipendente dalla legge di distribuzione della probabilità e dalla probabilità di non superamento adottata.

V coefficiente di variazione (COV), definito come il rapporto fra lo scarto quadratico medio e la media dei valori relativi al parametro geotecnico.

Parametro	Valori	COV	Riferimento
Peso di volume: γ kN/m ³	14 ÷ 20	0,03	Harr
Peso di volume dry: γ_d kN/m ³	13 ÷ 18	0,03	Harr
Coesione: c_u kPa	10 ÷ 400	0,40	Harr
Coesione efficace: c' kPa		0,45	Cherubini & Orr
Angolo di attrito: ϕ °	argille	0,30	Cherubini & Orr
	limi	0,15	Cherubini & Orr
	sabbie	0,10	Cherubini & Orr
N_{SPT}	sabbie	0,35	Phoon
Dr	sabbie	0,15	Phoon
E_D	sabbie	0,55	Phoon

Tabella 19: Coefficienti di variazione (COV) delle principali grandezze geotecniche (sintesi da Harr – 1987, Cherubini et Orr – 1999, Phoon – 1995).

L'EC7 fissa una probabilità di non superamento del 5% alla quale corrisponde, per una distribuzione di tipo gaussiana, un valore di X pari a $-1,645$. Per quanto riguarda il coefficiente V , si può fare riferimento alla Tabella 19.

In alternativa ed in relazione al numero di prove disponibili, al fine di determinare il valore caratteristico, può essere adottato l'approccio Bayesiano proposto da Cherubini e Orr (1999):

$$v_k = v_m \cdot \left(1 - \frac{COV}{2}\right)$$

v_k valore caratteristico del parametro geotecnico;

v_m valore medio del parametro geotecnico;

COV coefficiente di variazione relativo al parametro geotecnico.

Tale approccio è applicabile in tre diverse condizioni di disponibilità dei risultati delle prove: Condizione A (nessun valore di prove disponibile), Condizione B (alcuni valori di prova disponibili – da laboratorio o prove in situ) e Condizione C (informazioni a priori con valori di prova disponibili).

Condizione A

In relazione alla formulazione generale, il valore medio ed il coefficiente di variazione sono così definiti:

$$v_m = \frac{(v_a + 4 \cdot v_b + v_c)}{6} \quad \text{COV} = \frac{v_c - v_a}{v_a + 4 \cdot v_b + v_c}$$

Dove

v_a valore minimo stimato del parametro geotecnico

v_b valore più probabile del parametro geotecnico

v_c valore massimo stimato del parametro geotecnico

Condizione B

Valore medio:

$$v_m = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}$$

Deviazione standard

$$v_x = 0,5 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - v_m) \cdot 2}{n - 1}$$

Coefficiente di variazione

$$\text{COV} = \frac{v_x}{v_m}$$

Condizione C

Valore medio

$$v_m = \frac{v_{mp} + \frac{\sum_{i=1}^n v_{mb}}{n} \cdot \frac{\text{COV}_b}{\text{COV}_p} \cdot 2}{1 + \frac{1}{n} \cdot \frac{\text{COV}_b}{\text{COV}_p} \cdot 2}$$

Coefficiente di variazione

$$\text{COV} = \text{COV}_p \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\text{COV}_p}{\text{COV}_b} \cdot 2}$$

v_{mb} e COV_b sono il valore medio e la deviazione standard valutati a priori v_{mp} e COV_p sono il valore medio e la deviazione standard ottenuti da valori di prova.

Secondo la Circolare 7/2019, si ha una doppia possibilità in relazione al volume di terreno che interagisce con la struttura:

In caso di volume elevato di terreno che interagisce con la struttura: il valore caratteristico può essere assunto pari al valore medio quando nello stato limite considerato è coinvolto un elevato volume di terreno, con possibile compensazione

delle eterogeneità, o quando la struttura a contatto con il terreno è dotata di rigidità sufficiente a trasferire le azioni dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti. Pertanto il valore medio può essere impiegato nel caso di: 1) terreno di sedime di fondazioni superficiali, 2) pali per la portata laterale, 3) pendii (coltre di frana) e fronti di scavo, 4) opere di contenimento di notevole altezza e 5) strutture rigide;

In caso di volume modesto di terreno che interagisce con la struttura: il valore caratteristico può essere assunto pari al valore minimo quando nello stato limite considerato è coinvolto un modesto volume di terreno, con concentrazione delle deformazioni fino alla formazione di superfici di rottura nelle porzioni di terreno meno resistenti del volume significativo, o nel caso in cui la struttura a contatto con il terreno non sia in grado di trasferire forze dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti a causa della sua insufficiente rigidità. La scelta di valori caratteristici prossimi ai valori minimi dei parametri geotecnici può essere dettata anche solo dalle caratteristiche dei terreni (ad esempio, effetto delle discontinuità sul valore operativo della resistenza non drenata). Una migliore approssimazione nella valutazione dei valori caratteristici può essere ottenuta operando le opportune medie dei valori dei parametri geotecnici nell'ambito di piccoli volumi di terreno, quando questi assumano importanza per lo stato limite considerato. Pertanto il valore minimo può essere impiegato nel caso di: 1) terreno di base di un palo, 2) verifica a scorrimento di un muro, 3) plinti e travi non collegati, 4) fronti di scavo di modesta ampiezza e muri di H contenuta e 5) struttura con insufficiente rigidità.

Per la determinazione dei parametri caratteristici, nel caso specifico si è adottata la soluzione proposta dalla Circolare 7/2019 nel caso di volume elevato di terreno che interagisce con la struttura. Pertanto i parametri nominali riportati nel capitolo 4.2 relativamente alle stratigrafie geotecniche coincidono con i parametri caratteristici.

5. CARATTERISTICHE SINTETICHE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO CONSEGUENTI ALL'INDAGINE

In relazione al quadro di dinamica del dissesto sintetizzato al § 2.2, si sono definiti una serie di interventi di mitigazione del rischio di tipo passivo (non esaustivi dell'intervento di mitigazione del rischio in quanto il finanziamento non copre tutte le necessità). L'ubicazione degli interventi è riportata in Figura 21 ed è stata determinata sulla base degli studi traiettografici.

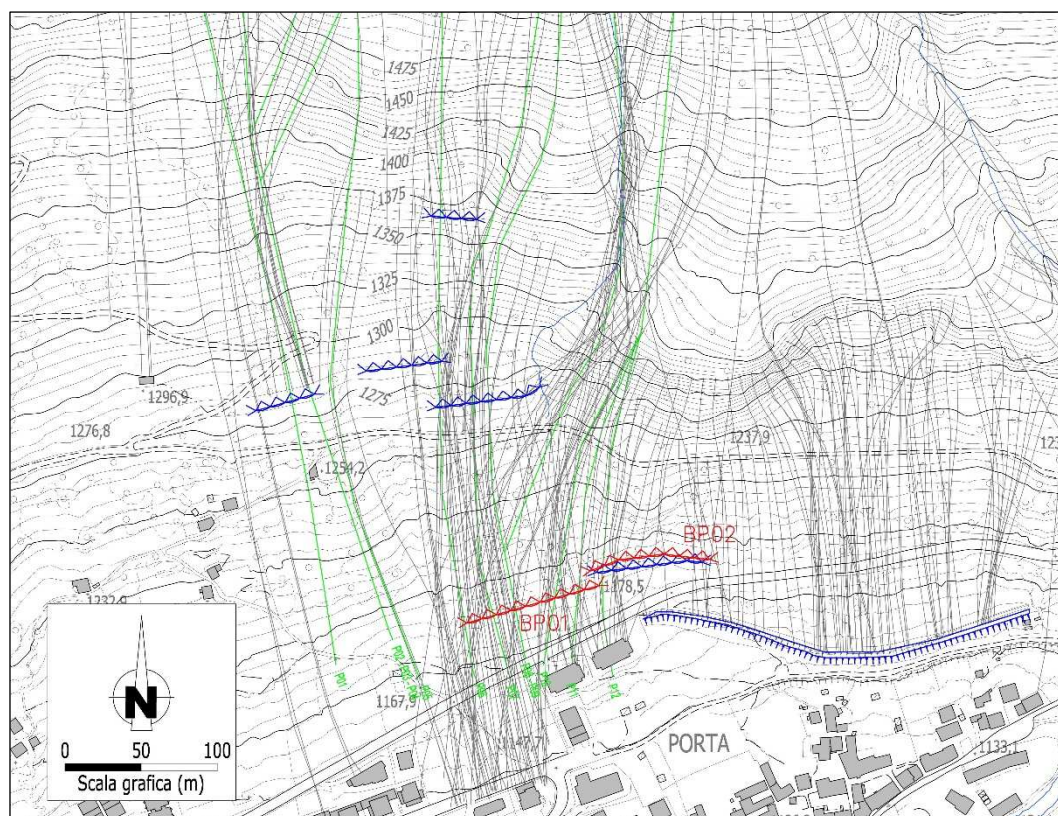


Figura 21: Ubicazione interventi con relativo identificativo (scala 1:5.000). In blu le opere di difesa esistenti ed in rosso le opere di difesa in progetto.

Le modalità di intervento, definite anche a seguito di valutazioni di progetto riguardo all'energia cinetica caratteristica per ogni situazione (si rimanda al progetto per tali valutazioni), sono:

- ♦ Intervento BP01: protezione delle aree a valle mediante installazione di barriera paramassi di lunghezza di 90 metri.

Sulla base dello studio traiettografico, i settori afferenti a questa barriera sono numerosi e talora posti a significativa distanza (sino a 430 metri): 2, 3, 4, 5, 6, 6b, 8, 9 e B che presentano in sintesi le seguenti caratteristiche:

ID	Dimensione di riferimento (m ³)	Dimensioni massime o ciclopici (m ³)
Settore 2	0,3 ÷ 0,5	0,3 ÷ 0,5 m ³ da rilievo geomeccanico / 1,0 ÷ 1,5 m ³ dimensione nicchie distacco

Settore 3	0,3 ÷ 0,5	0,3 ÷ 0,5 m ³ da rilievo geomeccanico / 0,8 ÷ 1,2 m ³ dimensione nicchie distacco
Settore 4	0,4	1,5 ÷ 2,2 m ³ da rilievo geomeccanico / 3,0 ÷ 4,0 m ³ dimensione nicchie distacco
Settore 5	0,3 ÷ 0,4	0,7 ÷ 0,8 m ³ dimensione nicchie distacco
Settore 6	0,4 ÷ 0,6	2,0 ÷ 2,4 m ³ da rilievo geomeccanico / 2,5 ÷ 3,0 m ³ dimensione nicchie distacco / 2,5 m ³ osservati al piede della parete
Settore 6b	0,4 ÷ 0,6	2,0 ÷ 2,4 m ³ da rilievo geomeccanico / 2,5 ÷ 3,0 m ³ dimensione nicchie distacco
Settore 8	1,0 ÷ 1,2	1,5 m ³ da rilievo geomeccanico / 3,0 ÷ 4,0 m ³ dimensione nicchie distacco
Settore 9	0,3 ÷ 1,0	4,0 ÷ 5,0 m ³ osservati 8 ÷ 10 m ³ numerosi (presente uno di 30 m ³)
RIFERIMENTO DI PROGETTO	2,0	10,0

- Intervento BP02: protezione delle aree a valle mediante installazione di barriera paramassi di lunghezza di 80 metri in sostituzione di barriera esistente in quanto giudicata inadeguata.

Sulla base dello studio traiettografico, i settori afferenti a questa barriera sono 6b e C2 che presentano in sintesi le seguenti caratteristiche:

ID	Dimensione di riferimento (m ³)	Dimensioni massime o ciclopici (m ³)
Settore 6b	0,4 ÷ 0,6	2,0 ÷ 2,4 m ³ da rilievo geomeccanico / 2,5 ÷ 3,0 m ³ dimensione nicchie distacco
Settore C2	8,31	Nel detrito sono presenti blocchi ciclopici con volume stimato di 6.050 m ³ e di 185 m ³ 22,0 ÷ 25,0 m ³ alcuni blocchi di forma tabulare osservati al piede della falda detritica analizzata
RIFERIMENTO DI PROGETTO	8,31	25,0 (escludendo quelle eccezionali)

In base ai dati disponibili ed alla tipologia / modesta interazione con il terreno delle opere previste in progetto, oltre che della natura dei terreni presenti in sito, si è scelto di non procedere alla realizzazione di specifiche indagini geognostiche / geotecniche in sito; tale scelta è compatibile con la normativa come stabilito al paragrafo 6, punto 6.2.2 del DM 14 gennaio 2018 "Norme tecniche per le costruzioni".

Nel vigente PGT non sono disponibili indagini sismiche prossime agli interventi in progetto, si è effettuato pertanto uno specifico approfondimento per la definizione della risposta sismica locale e la definizione dell'assetto stratigrafico sottostante.

6. SINTESI

L'area ove sono previsti gli interventi è collocata a nord dell'abitato di Carona, in località Misoi e a quota 1.300 m slm circa, in una zona con acclività molto elevata ed articolata.

Gli elementi a rischio sono eterogenei anche in relazione all'estensione delle aree: edifici residenziali e viabilità comunale.

Il versante indagato si presenta ripido con affioramenti rocciosi sparsi, che diventano più estesi e continui man mano che ci si innalza di quota, dove si alternano irregolarmente a tratti di pendio sempre molto inclinati, con copertura detritico – eluviale di limitato spessore ma ben colonizzata dalla vegetazione anche di alto fusto (tranne alcune plaghe di detrito di pezzatura molto grossolana, non pedogenizzato). Nella parte bassa del versante è presente un'ampia falda di detrito di elevato spessore, a tratti costituita da blocchi di discrete dimensioni, anch'essa ben vegetata.

Il substrato lapideo presente nell'area è rappresentato dalla *Formazione del Pizzo del Diavolo* (ex "membro superiore sedimentario" della Formazione di Collio Auct.). La Formazione del Pizzo del Diavolo è costituita da arenarie e siltiti, con subordinate intercalazioni di vulcaniti e conglomerati. In entrambe le litofacies le caratteristiche della stratificazione sono molto variabili: abbastanza frequenti sono gli strati decimetrici, che si alternano sia a bancate metriche o plurimetriche a stratificazione poco evidente o indistinta, sia ad orizzonti con strati molto sottili. Nella porzione sudorientale del versante indagato affiorano le *vulcaniti del Monte Cabianca* che nell'area sono costituite da piroclastiti di flusso o di caduta, di colore verde – chiaro, grigio o, talora, violaceo, in bancate metriche o con aspetto massiccio; rispetto alle litologie della Formazione del Pizzo del Diavolo, mancando discontinuità correlate alla stratificazione sedimentaria, le vulcaniti del Monte Cabianca generano distacchi e crolli di dimensioni unitarie più elevate.

Per entrambe le litologie si può fare riferimento ad un peso specifico di 26 kN/m³.

Rispetto alla porzione di versante indagata, l'assetto giaciturale generale risulta da blando reggipoggio a traverpoggio.

La copertura sedimentaria neogenico – quaternaria più superficiale presente nell'area di intervento è costituita da depositi detritici di versante (*Unità Postglaciale*) con abbondante presenza di massi e blocchi ciclopici. Inferiormente, o interdigitati nelle porzioni inferiori dei depositi detritici, sono presenti depositi glaciali dell'Unità di Foppolo.

Dal punto di vista idrogeologico nell'area sono assenti sorgenti o venute idriche e l'area è esterna ad aree di rispetto di sorgenti o pozzi asserviti a sistemi acquedottistici pubblici. Non si ipotizza la presenza di falda freatica a profondità geotecnicamente significative, anche solo temporanea; le opere previste non alterano quindi la circolazione idrica nell'immediato sottosuolo.

In base all'assetto del sito e agli scenari delineati con lo studio traiettografico, si

sono individuate le potenziali sorgenti dei crolli; successivamente si è valutata la propensione al dissesto e l'individuazione dei volumi unitari in base all'osservazione dei sistemi di fratturazione; con esclusione del settore C2, non si è impiegata la metodica del rilievo statistico delle dimensioni dei blocchi presenti nelle aree di accumulo perché è presente un'elevata alterazione antropica in queste aree, con conseguente possibile occultamento dei blocchi di dimensioni maggiori (per via dell'antropizzazione delle aree di accumulo è possibile che i blocchi di dimensioni maggiori siano stati rimossi o, in presenza di terrazzamenti, si è avuto l'interamento degli stessi).

Gli interventi in progetto contemplano la realizzazione di barriere paramassi (BP01 e BP02) la cui ubicazione discende da uno studio traiettografico e tiene conto della presenza delle opere di difesa esistenti e dalle risorse economiche disponibili

I volumi dei massi di riferimento per il dimensionamento delle opere in progetto sono riportati in Tabella 20; i blocchi presentano forme ricorrenti: tabulari e prismatica; subordinatamente equidimensionale (spesso subarrotondata).

ID	Dimensione di riferimento (m ³)	Dimensioni ciclopiche (m ³)
BP01	2,0	10,0
BP02	8,31*	25,0 (escludendo quelle eccezionali)

Tabella 20: Dati di riferimento per il dimensionamento delle opere. * 95 percentile determinato in base alla dimensione dei blocchi presenti nella falda detritica.

Riguardo le dimensioni di riferimento riportate in Tabella 20 e relative alla BP01, seppure in assenza di un numero idoneo a fini statistici di misure in sito per via dell'eterogeneità delle tipologie di dissesto (con esclusione del settore C2 per il quale il volume di progetto determinato è il 95° percentile), in base ad osservazioni sitospecifiche e/o analisi geomeccaniche tali dimensioni possono rappresentare la distribuzione compresa tra il 5° e il 95° percentile; per i blocchi individuati di dimensioni ciclopiche, instabili o connessi a crolli già accaduti, ma in condizioni metastabili, sono reputati di dimensioni poco frequenti o eccezionali che si collocano oltre il 95% percentile.

Nella classificazione sismica il Comune ricade in classe 3 (DGR X/2129/2014), a bassa sismicità (come definita dal DM 31 luglio 2012), e le opere previste non rientrano tra quelle giudicate "strategiche" o "rilevanti" dalla Regione Lombardia (DDUO 19904/2003). Gli interventi in progetto ricadono nello scenario di pericolosità sismica Z4b "Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide deltizio – lacustre" con possibili amplificazioni litologiche e geometriche.

Relativamente alle caratteristiche di risposta sismica del sito (ricavate da specifica indagine) risulta necessario fare riferimento ad un suolo di Categoria C "*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.*" anche in conseguenza dell'applicabilità del metodo semplificato di cui al punto 3.2.2 delle NTC18 (rif. All. 5 della DGR IX/2616/2011), ed un assetto topografico T2.

I parametri sismici del sito sono riportati in Tabella 21.

Parametri	SLE		SLU	
	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0,009	0,011	0,022	0,027
kv	0,005	0,006	0,011	0,014
A_{max} [m/s ²]	0,5	0,603	1,209	1,478
Beta	0,18	0,18	0,18	0,18

Tabella 21: Parametri sismici del sito relativi alla stabilità dei pendii e fondazioni superficiali. Il valore di a_{max} così determinato considera il coefficiente β_m di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito.

Viste le caratteristiche sismiche del sito non risulta necessario procedere alla verifica della liquefazione dei terreni.

Le opere in progetto, considerando la loro posizione, si sviluppano essenzialmente entro depositi di copertura costituiti, nella porzione più superficiale, da detriti sciolti con abbondante presenza di massi e blocchi ciclopici. In base all'indagine geofisica, il substrato lapideo si colloca tra 16 e 25 metri di profondità, risultando pertanto non influente per quanto in progetto.

Per la definizione del profilo geotecnico (si veda Tabella 22), oltre all'impiego di dati bibliografici, si sono effettuate valutazioni di back analyses utilizzando i dati topografici dell'aerofotogrammetrico e i risultati dei rilievi geologici. Considerando la natura dei terreni potenzialmente coinvolti dalla realizzazione delle opere (ghiaie grossolane – molto grossolane, massi e blocchi ciclopici) che non permettono una puntuale caratterizzazione in sito mediante le usuali metodiche di indagine (prove penetrometriche e SPT in foro), anche mediante comparazione con dati inerenti situazioni fisiografiche comparabili, tale metodologia risulta idonea per le opere in progetto.

Litotipo	Prof. (m)	γ_h (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	ϕ (°)	ν	E (MPa)
Depositi detritici grossolani	0,0 – 5,0	18,56	19,23	31,7	0,32	6,77
Depositi glaciali interdigitati a depositi detritici	5,0 – 15,0	17,97	19,05	30,5	0,33	5,88

Tabella 22: Stratigrafia geotecnica (parametri caratteristici).

Considerata l'assenza della falda a profondità geotecnicamente significative, non si prevede l'introduzione di tale elemento nelle verifiche geotecniche progettuali.

Rispetto alla compiuta definizione dei cinatismi (studi traiettografici, definizione compiuta delle geometrie delle traiettorie e relative energie) si rimanda alla documentazione di progetto; analogamente per l'interazione struttura – terreno (resistenza del terreno per le fondazioni) si rimanda alla documentazione progettuale del progettista geotecnico.

Considerando la presenza di massi e porzioni di substrato in condizioni metastabili, si raccomanda l'adozione di idonei criteri di intervento al fine di garantire

l'incolumità degli operatori durante la realizzazione dell'intervento (andrà fatta una specifica ricognizione all'inizio dei lavori per verificare le condizioni di rischio in quanto queste risultano mutevoli nel tempo per via della dinamica geomorfologica dell'aerea e delle condizioni climatiche).

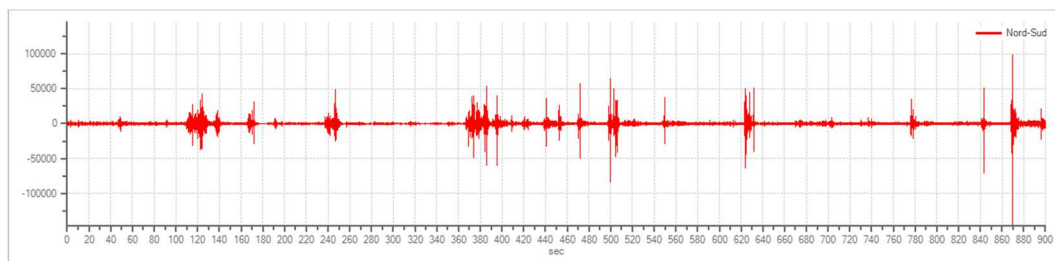
Fatti salvi gli accorgimenti tecnici in precedenza descritti, necessariamente modificabili dalla DL a sua cura e discrezione in relazione a eventuali differenze tra quanto emergerà nel corso dei lavori e quanto previsto dal presente documento, non si segnalano condizioni ostative all'attuazione del progetto nella configurazione descritta nel capitolo 5. Le opere in progetto sono quindi compatibili sia con il grado di fattibilità previsto dallo studio geologico allegato al PGT, sia con la presenza del vincolo idrogeologico.

APPENDICE A

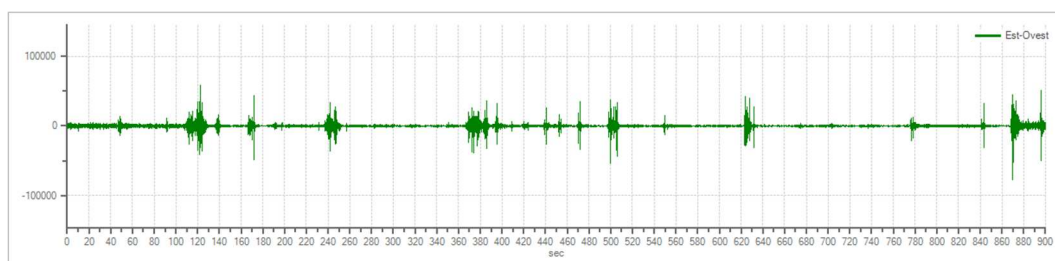
INDAGINI SISMICHE DI RIFERIMENTO

HVSR 1

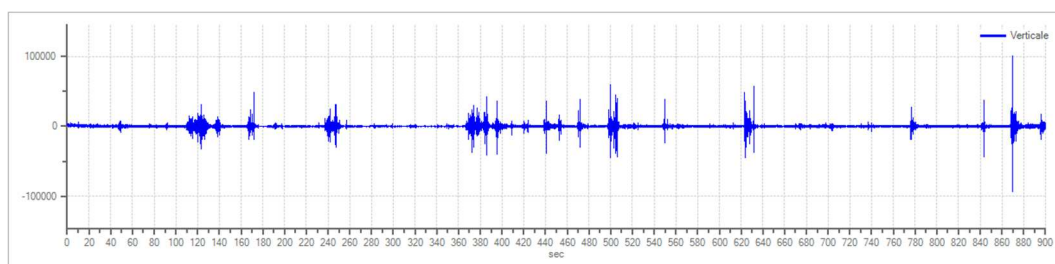
Grafici tracce



Traccia e finestre in direzione Nord – Sud

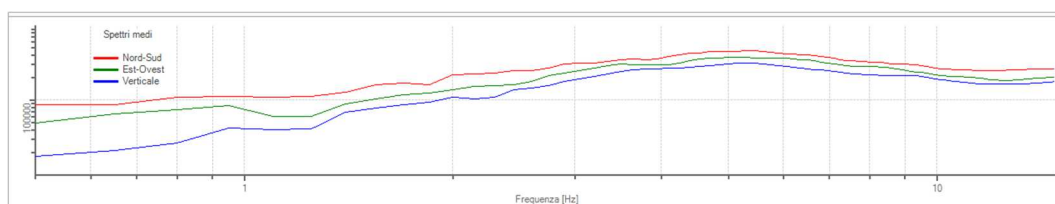


Traccia e finestre in direzione Est – Ovest



Traccia e finestre in direzione Verticale

Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni

Rapporto spettrale H/V

Dati riepilogativi

Frequenza massima:	15,00Hz
Frequenza minima:	0,50 Hz
Passo frequenze:	0,15 Hz
Tipo lisciamiento:	Triangolare proporzionale

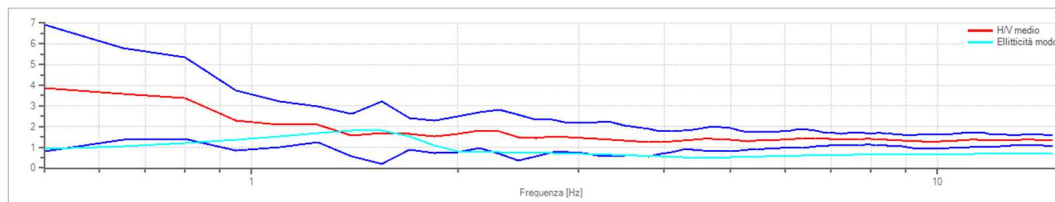
Percentuale di lisciamento: 10,00%

Tipo di somma direzionale: Media aritmetica

Risultati

Frequenza del picco del rapporto H/V: 0,50 Hz \pm 0,80 Hz

Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Modello stratigrafico

Dati riepilogativi

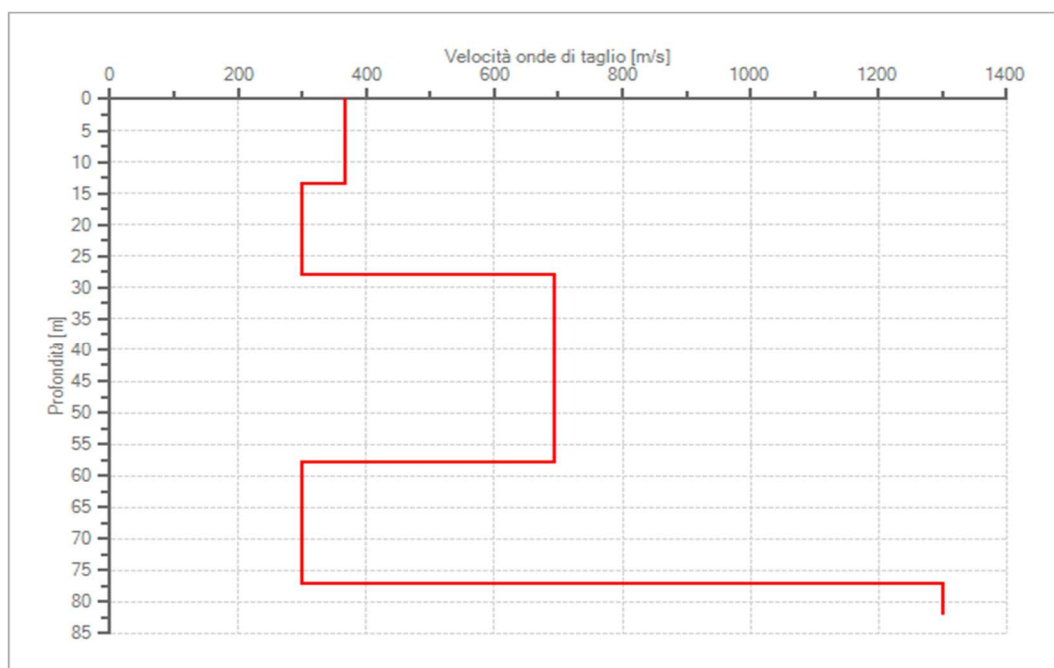
Numero strati: 5

Frequenza del picco dell'ellitticità: 1,40 Hz

Valore di disadattamento: 0,26

Dati della stratigrafia:

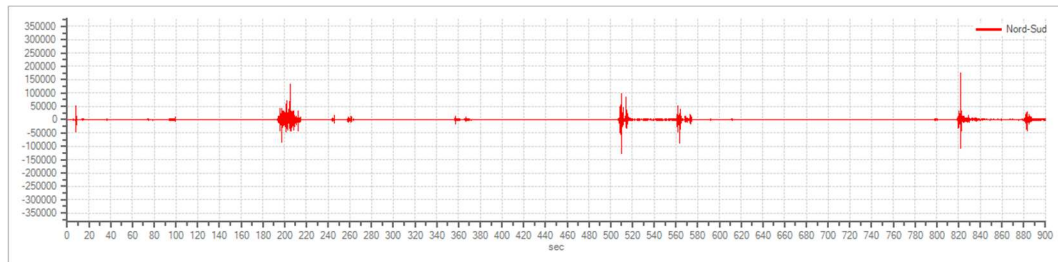
Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m ³]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	13,56	19	0,31	366
2	13,56	14,35	18	0,32	299
3	27,91	29,97	22	0,3	694
4	57,88	19,37	20	0,32	300
5	77,26	5	26	0,29	1300



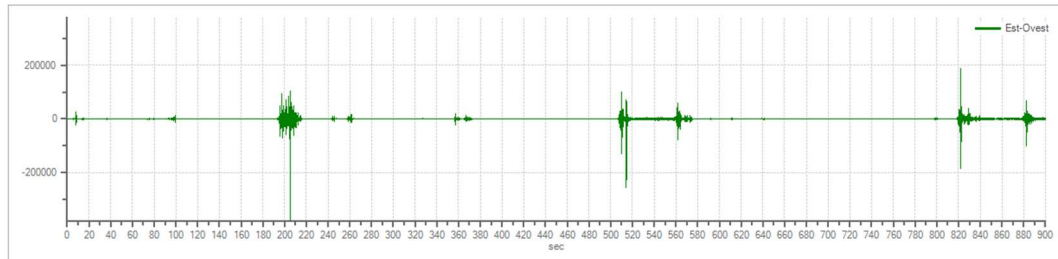
Profilo delle velocità delle onde di taglio.

HVSR 2

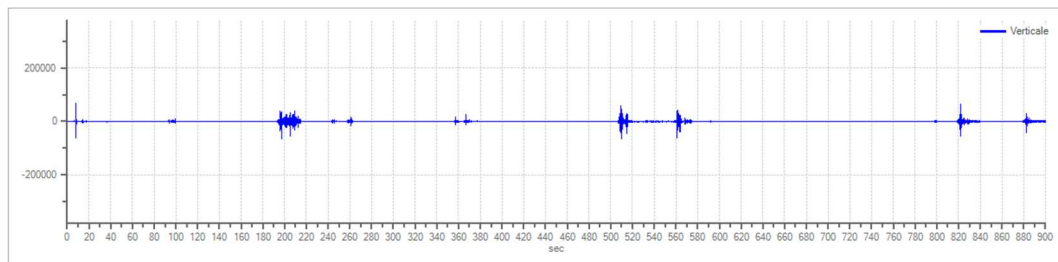
Grafici tracce



Traccia e finestre in direzione Nord – Sud

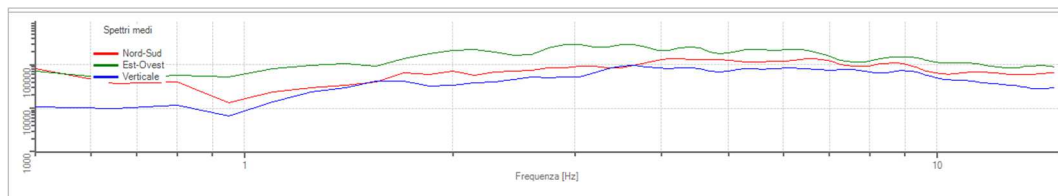


Traccia e finestre in direzione Est – Ovest



Traccia e finestre in direzione Verticale

Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni

Rapporto spettrale H/V

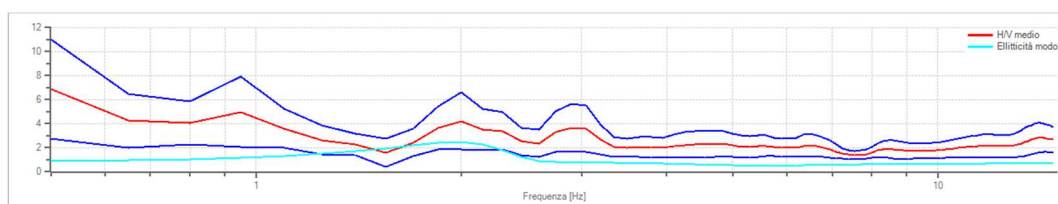
Dati riepilogativi

Frequenza massima:	15,00Hz
Frequenza minima:	0,50 Hz
Passo frequenze:	0,15 Hz
Tipo lisciamento:	Triangolare proporzionale
Percentuale di lisciamento:	10,00%
Tipo di somma direzionale:	Media aritmetica

Risultati

Frequenza del picco del rapporto H/V: 0,50 Hz \pm 0,60 Hz

Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

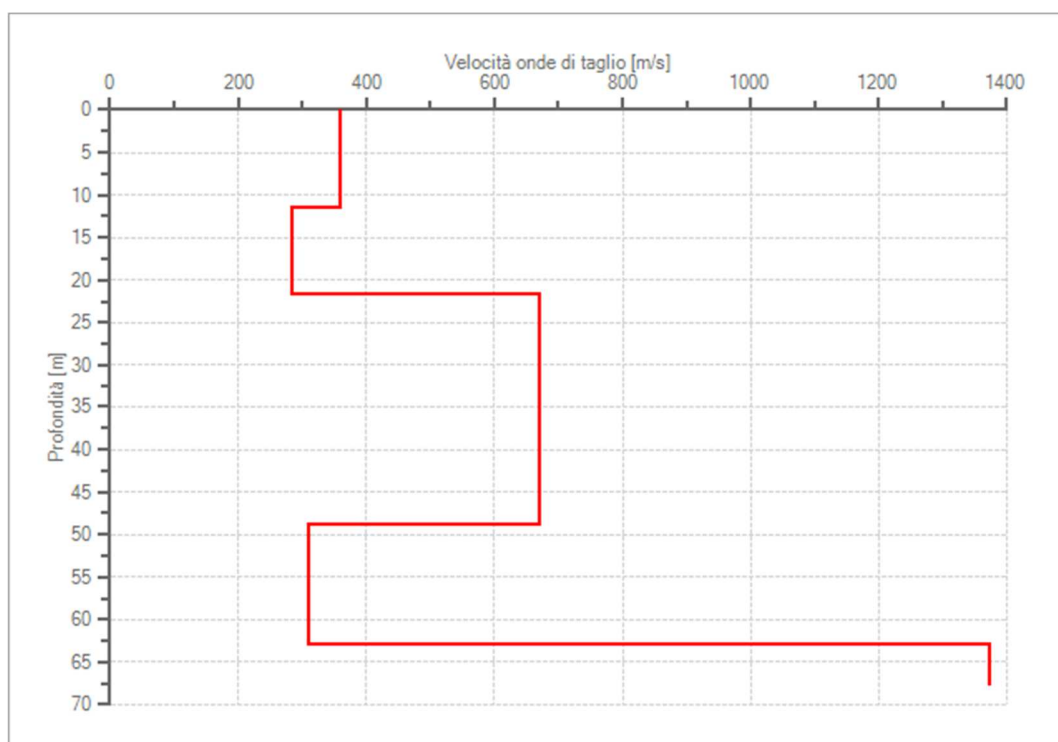
Modello stratigrafico

Dati riepilogativi

Numero strati: 5
 Frequenza del picco dell'ellitticità: 2,00 Hz
 Valore di disadattamento: 0,41

Dati della stratigrafia:

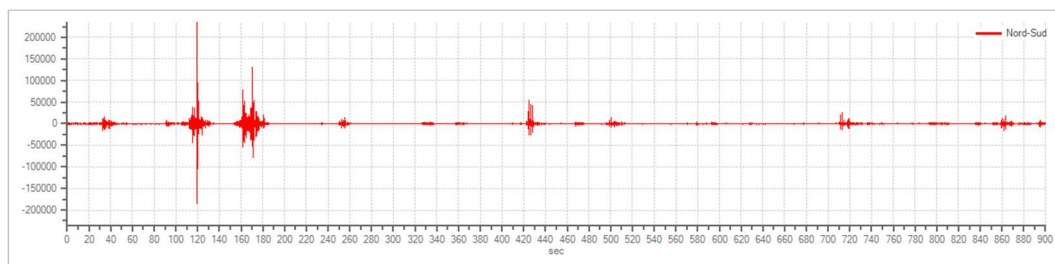
Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m ³]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	11,59	19	0,31	358
2	11,59	10,08	18	0,32	283
3	21,67	27,24	22	0,3	670
4	48,91	13,95	20	0,32	311
5	62,87	5	26	0,29	1372



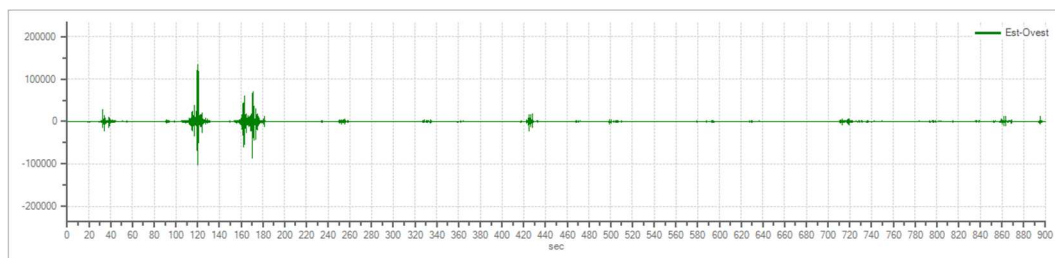
Profilo delle velocità delle onde di taglio.

HVSR 3

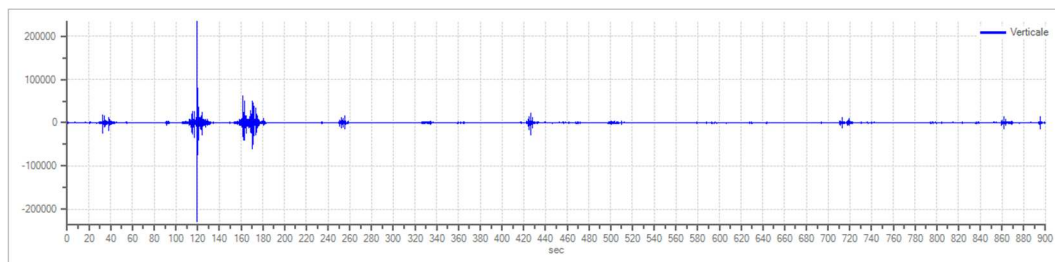
Grafici tracce



Traccia e finestre in direzione Nord – Sud

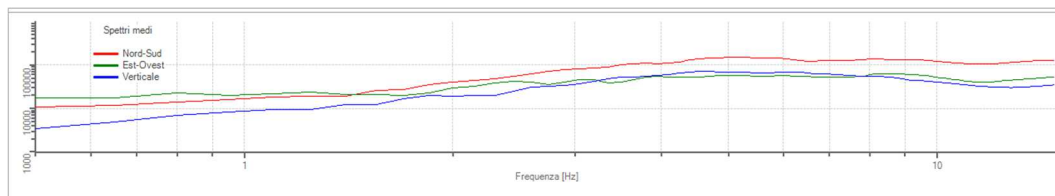


Traccia e finestre in direzione Est – Ovest



Traccia e finestre in direzione Verticale

Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni

Rapporto spettrale H/V

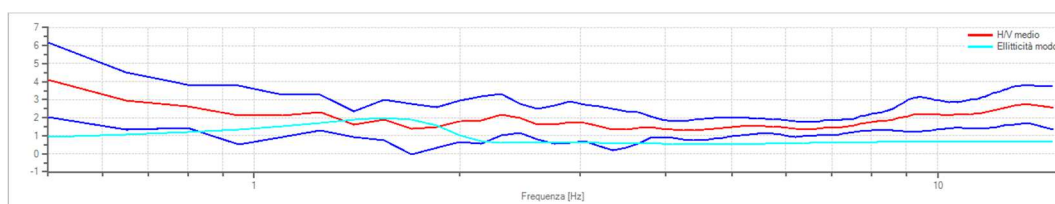
Dati riepilogativi

Frequenza massima:	15,00 Hz
Frequenza minima:	0,50 Hz
Passo frequenze:	0,15 Hz
Tipo lisciamento:	Triangolare proporzionale
Percentuale di lisciamento:	10,00%
Tipo di somma direzionale:	Media aritmetica

Risultati

Frequenza del picco del rapporto H/V: 0,50 Hz \pm 0,50 Hz

Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

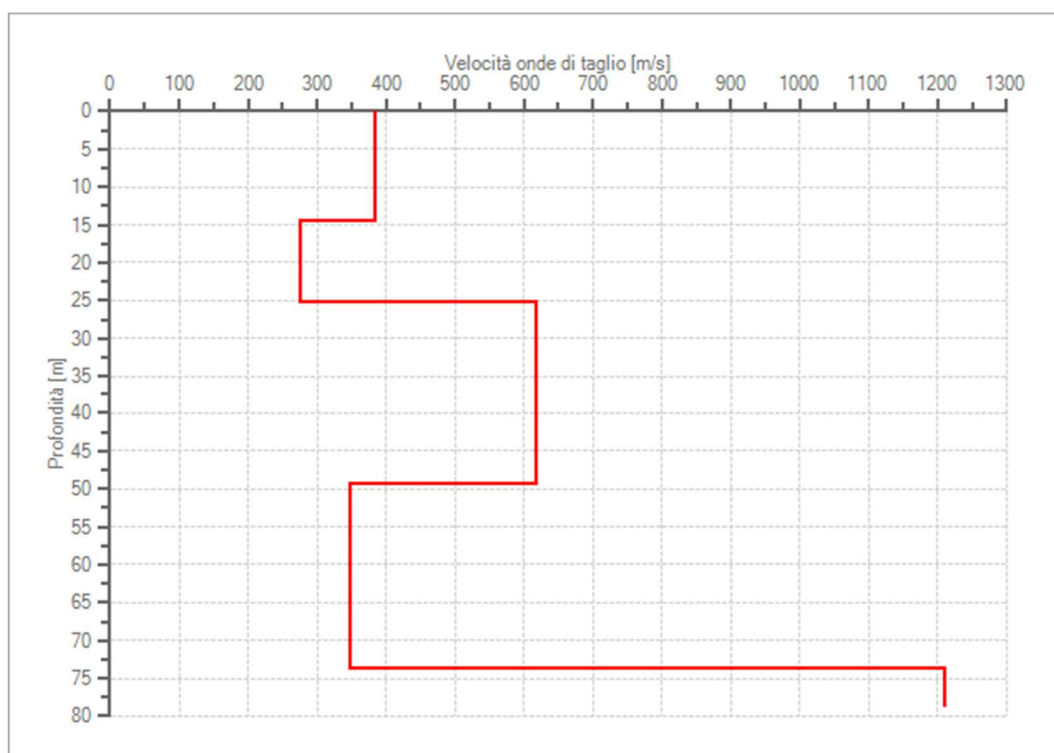
Modello stratigrafico

Dati riepilogativi

Numero strati: 5
 Frequenza del picco dell'ellitticità: 1,55 Hz
 Valore di disadattamento: 0,44

Dati della stratigrafia:

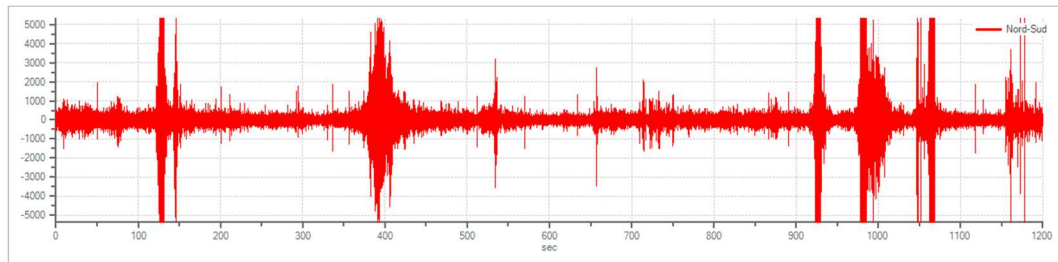
Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m ³]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	14,56	19	0,31	383
2	14,56	10,62	18	0,32	275
3	25,17	24,21	22	0,3	618
4	49,38	24,45	20	0,32	348
5	73,83	5	26	0,29	1209



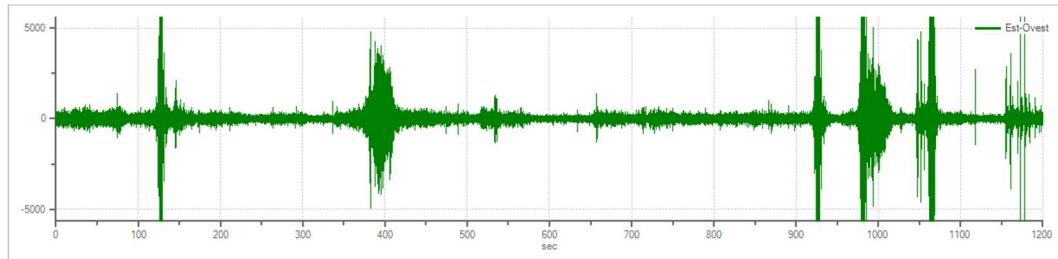
Profilo delle velocità delle onde di taglio.

HVSR 4

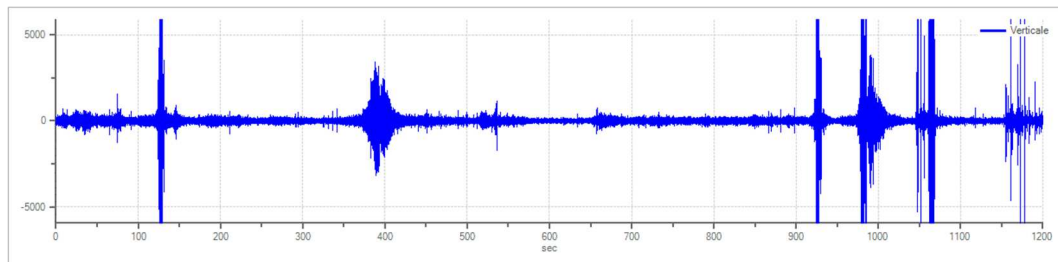
Grafici tracce



Traccia e finestre in direzione Nord – Sud

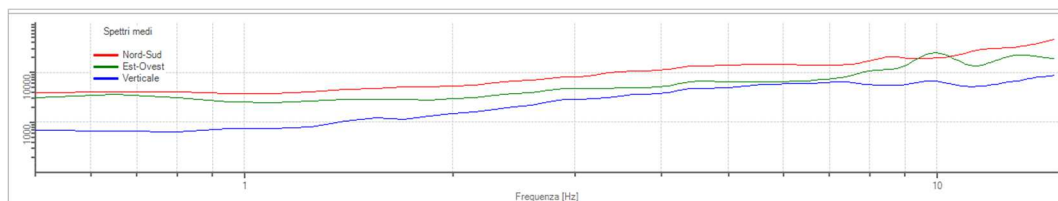


Traccia e finestre in direzione Est – Ovest



Traccia e finestre in direzione Verticale

Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni

Rapporto spettrale H/V

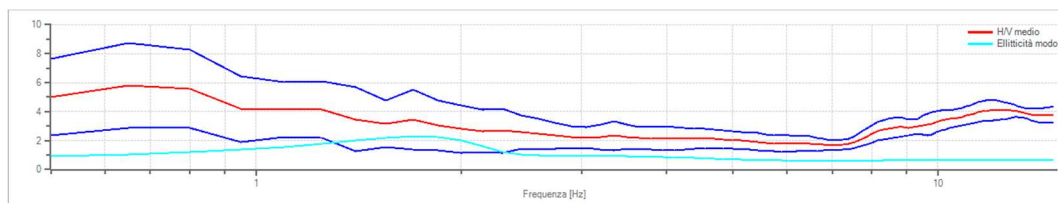
Dati riepilogativi

Frequenza massima:	15,00Hz
Frequenza minima:	0,50 Hz
Passo frequenze:	0,15 Hz
Tipo lisciamento:	Triangolare proporzionale
Percentuale di lisciamento:	10,00%
Tipo di somma direzionale:	Media aritmetica

Risultati

Frequenza del picco del rapporto H/V: 0,65 Hz \pm 0,50 Hz

Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

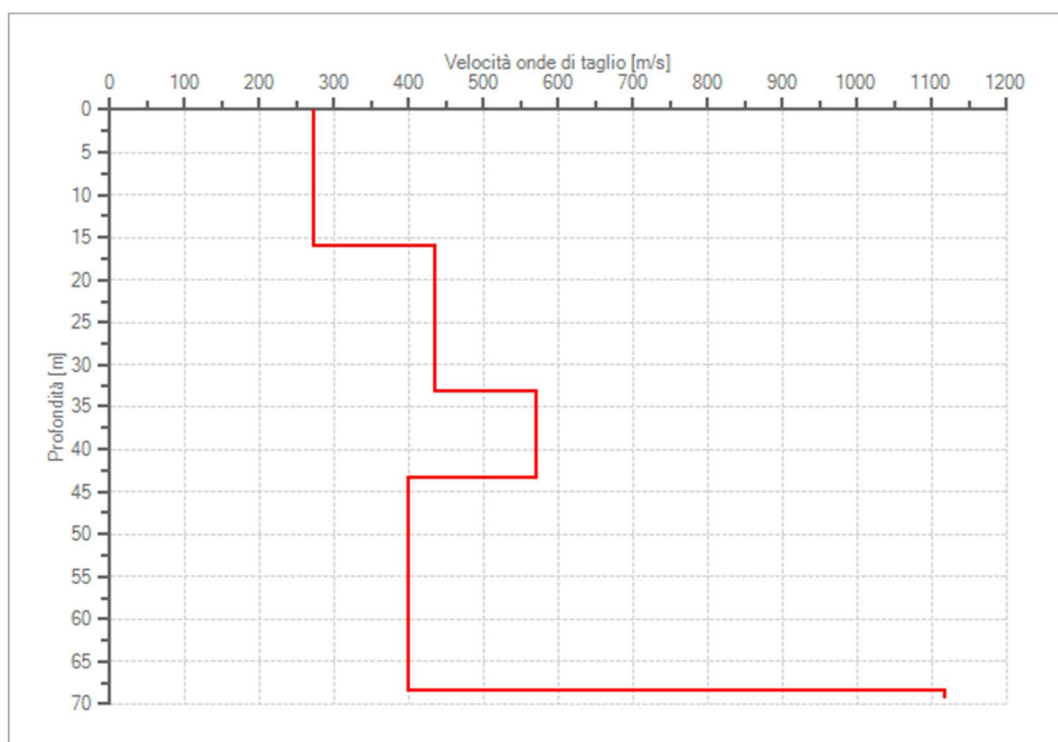
Modello stratigrafico

Dati riepilogativi

Numero strati: 5
 Frequenza del picco dell'ellitticità: 1.70 Hz
 Valore di disadattamento: 0,44

Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m ³]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	16,13	19	0,31	271
2	16,13	17,07	18	0,32	434
3	33,19	10,26	22	0,3	570
4	43,46	24,93	20	0,32	398
5	68,39	1	26	0,29	1117



Profilo delle velocità delle onde di taglio.