

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

LAUREA MAGISTRALE

in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio

Analisi dei dati di monitoraggio dei versanti in frana  
interagenti con la galleria artificiale Campus (CZ)

*Candidata:*

*Gabriella Covelli*

*Relatrice:*

*Prof.ssa Ing. Daniela Boldini*

*Correlatori:*

*Geol. Natascia Merenda*

*Ing. Gustavo Ciancio*

Anno Accademico 2019/2020



*A mio padre e al suo sogno*

*che ho reso mio.*

*A quel giorno che con un filo di voce mi ha detto:*

*“Ti voglio bene e voglio che tu sia felice!”*



# Indice

<b>Indice</b> .....	<b>IV</b>
<b>Indice figure</b> .....	<b>VII</b>
<b>Indice tabelle</b> .....	<b>XIV</b>
<b>Introduzione</b> .....	<b>XVI</b>
<b>1 Descrizione del progetto e della galleria artificiale Campus</b> .....	<b>1</b>
1.1 Introduzione .....	1
1.1.1 Linee A e B.....	1
1.1.2 Linea C.....	4
1.2 Opere d'arte maggiori .....	6
1.2.1 Galleria artificiale Campus, TG2.....	6
<b>2 Quadro geologico generale e caratteristiche geomorfologiche, idrogeologiche e geotecniche dell'area in esame.</b> .....	<b>12</b>
2.1 Introduzione .....	12
2.2 Inquadramento geologico-strutturale e cenni di geologia regionale .....	14
2.2.1 La Stretta di Catanzaro nel contesto geodinamico dell'Arco calabro-peloritano .....	14
2.2.2 Caratteri geolitologici della stretta di Catanzaro ed unità affioranti dell'area di studio.	18
2.3 Caratteri geomorfologici generali della Stretta di Catanzaro .....	23
2.3.1 Contesto geomorfologico dell'area di studio .....	25
2.3.2 Processi gravitativi .....	27
2.4 Inquadramento idrogeologico generale e caratteristiche idrogeologiche dell'area di studio	29
2.5 Caratterizzazione geotecnica .....	32
<b>3 Movimento gravitativo e monitoraggio dei corpi di frana</b> .....	<b>38</b>
3.1 Introduzione .....	38

3.2	Breve cronistoria e descrizione degli eventi .....	38
3.2.1	Analisi delle letture sugli inclinometri SOTT03 e SOTT04 .....	38
3.2.2	Sopralluogo geologico-geomorfologico di dettaglio .....	42
3.2.3	Consultazione foto da drone.....	44
3.2.4	Realizzazione rete topografica .....	45
3.2.5	Ricognizione vecchia strumentazione, installazione di un inclinometro ex novo, e stesura di un Piano di Monitoraggio Integrativo .....	46
3.3	Piano di Monitoraggio Integrativo .....	47
3.4	Descrizione della strumentazione installata .....	55
3.4.1	Inclinometri.....	55
3.4.2	Piezometri .....	58
3.5	Esecuzione e risultati campagna indagini geognostiche e prove di laboratorio.....	61
3.6	Cronologia del monitoraggio ed elaborazione dell'interpretazione dei dati acquisiti nel primo anno di misure (21/02/2019-02/03/2020).....	68
3.6.1	Letture target topografici.....	68
3.6.2	Letture inclinometriche.....	75
3.6.3	Letture piezometriche.....	82
3.7	Esiti del monitoraggio: Corpo di Frana 1 e Corpo di Frana 2 .....	87
3.7.1	Conclusioni relative ai corpi di frana.....	87
3.7.2	Corpo di Frana 2: analisi di stabilità a ritrovo e analisi dell'intervento di stabilizzazione.	88
3.7.3	Corpo di Frana 1: analisi di stabilità attuale e analisi dell'intervento di stabilizzazione	94
<b>4</b>	<b>Analisi dei dati pluviometrici e correlazione con i dati di monitoraggio .....</b>	<b>98</b>
4.1	Introduzione .....	98
4.2	Inquadramento climatico della Regione Calabria .....	98
4.3	Assetto idrologico e clima dell'area di esame.....	101

4.3.1	Caratteristiche climatiche del sito e dati pluviometrici .....	101
4.3.2	ARPACAL - Centro Funzione Multirischi.....	106
4.3.3	Rapporto evento ottobre 2018.....	107
4.4	Influenza del regime delle piogge nel movimento franoso .....	111
4.4.1	Correlazione tra le misure inclinometriche ed i dati pluviometrici .....	111
4.4.2	Correlazione tra le misure topografiche ed i dati pluviometrici.....	113
4.4.3	Correlazione tra le misure piezometriche ed i dati pluviometrici .....	117
<b>5</b>	<b>Conclusioni .....</b>	<b>130</b>
<b>6</b>	<b>Ringraziamenti .....</b>	<b>134</b>
<b>7</b>	<b>Bibliografia .....</b>	<b>136</b>

## Indice figure

Figura 1.1 Planimetria di inquadramento, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016). .....	3
Figura 1.2 Planimetria generale di progetto - Linee A e B, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016). .....	3
Figura 1.3 Planimetria generale di progetto - Linea C, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016). .....	5
Figura 1.4 Sezione tipo per il tratto di galleria artificiale zona "doppio binario", (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016). .....	9
Figura 1.5 Sezione tipo per il tratto in galleria artificiale zona "doppia camera", (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016). .....	9
Figura 1.6 Planimetria dell'opera: primo stralcio, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016). .....	10
Figura 1.7 Planimetria dell'opera: secondo stralcio, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016). .....	11
Figura 2.1 Stralcio planimetria galleria Campus e individuazione dei corpi di frana, (2020). .....	13
Figura 2.2 Caratteri sismotettonici della rift-zone siculo calabra, (Monaco & Tortorici, Active faulting in the Calabrian Arc and eastern Sicily., 2000). .....	15
Figura 2.3 Principali strutture morfo-neotettoniche e velocità di sollevamento durante il quaternario, (Sorriso, Valvo, & Tansi, 1996). .....	16
Figura 2.4 Carta delle faglie attive della Calabria, elementi geologici di superficie, (Galadini & al., 2001). .....	17
Figura 2.5 Sintesi dei dati disponibili sulle faglie attive della Calabria, (Galadini & al., 2001). .....	17
Figura 2.6 Stralcio della "Carta geologica della Calabria" ottenuto dall'unione dei fogli: Caraffa di Catanzaro (Foglio 242 IV SO), Catanzaro (Foglio 242 IV SE), Marina di Catanzaro (242 III NE) e Squillace (242 III NO). Il tracciato in progetto interessa un substrato plio-pleistocenico argilloso (colore giallastro in figura) e coperture alluvionali (bianco) e colluviali (azzurro). All'estremo limite	



setentrionale limitate sequenze arenaceo sabbiose mioceniche (marrone scuro), (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016). .....	19
Figura 2.7 Schema geologico della Calabria, (Biagi & al., 1989-2000).....	20
Figura 2.8 Stralcio della carta geologica, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016) .....	22
Figura 2.9 Postazione del sondaggio SG10 lungo la linea C. Sullo sfondo il campus universitario, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016). .....	22
Figura 2.10 Sondaggio SG10 lungo la linea C fra 0.00 – 5.00 m. È evidente il passaggio fra la coltre alterata di colore bruno giallastro e la formazione sana di colore grigio azzurro, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016). .....	23
Figura 2.11 Rilievi collinari argillosi a debole pendenza nella zona del campus universitario, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016). .....	26
Figura 2.12 Stralcio della carta idrogeologica, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016) .....	32
Figura 2.13 Depositi colluviali intercettati lungo il sondaggio SG13 (cassetta da 0 a 5 m), (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016). .....	34
Figura 2.14 Argille-siltose plio-pleistoceniche intercettate lungo il sondaggio SG10 (cassetta da 0 a 5 m), da notare il passaggio tra la coltre alteritica bruno-giallastra (sotto unità A3a) presente nei primi due metri e le sottostanti argille grigie (sotto unità A3b), (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).....	35
Figura 3.1 Stralcio aereo fotogrammetrico inclinometro SOTT03, (HYpro, 2018). .....	40
Figura 3.2 Stralcio fotogrammetria aerea inclinometro SOTT04, (HYpro, 2018). .....	40
Figura 3.3 Letture inclinometriche SOTT03, (HYpro, 2018).....	41
Figura 3.4 Letture inclinometriche SOTT04, (HYpro, 2018).....	41
Figura 3.5 In alto a sinistra è visibile la dislocazione a forma di L sulla parete di scavo nel tratto compreso tra le Pk. 2+100 e 2+125. Si osservi il netto passaggio litologico tra le 2 unità geotecniche A3a e A3b. In alto a destra si può vedere l'estensione verso monte e prosecuzione sul versante della	

dislocazione. In basso viene mostrato rigonfiamento del terreno in corrispondenza della linea di dislocazione, (Geol. Merenda, agosto 2018). .....	42
Figura 3.6 Particolare della dislocazione rilevata sul fronte di scavo tra le Pk. 2+100 e 2+125 con evidenza del rigetto locale pari a 15 cm circa (Geol. Merenda, agosto 2018). .....	43
Figura 3.7 Linee di frattura rappresentative dell'area di coronamento dei corpi di frana, (Geol. Merenda, agosto 2018).....	43
Figura 3.8 Linee di frattura rilevate in corrispondenza delle corone dei corpi di frana, (Geol. Merenda, agosto 2018).....	44
Figura 3.9 Linee di frattura rilevate all'interno dei corpi di frana, (Geol. Merenda, agosto 2018)...	44
Figura 3.10 Foto della ripresa aerea con drone realizzata nel mese di luglio 2018. ....	45
Figura 3.11 Rappresentazione planimetrica della distribuzione dei target topografici per il monitoraggio superficiale dei corpi di frana, 2018 (str92-Studio Tecnico d'Ingegneria, 2018). .....	45
Figura 3.12 Planimetria ubicazione della strumentazione prevista dal Piano di Monitoraggio Integrativo- Corpo di Frana 1, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2018).....	49
Figura 3.13 Planimetria ubicazione della strumentazione prevista dal Piano di Monitoraggio Integrativo-Corpo di Frana 2, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2018).....	49
Figura 3.14 In alto e al centro è mostrata la dislocazione tra le pk 2+025 e 2+043 al 19/11/2018. In basso a destra l'evoluzione del dissesto sul fronte di scavo tra le pk 2+000 e 2+050 al 28/11/2018 di cui si riporta un particolare della frattura nella foto in basso a sinistra, (Geol. Merenda, 2018). ....	52
Figura 3.15 Nicchia di distacco di neoformazione e particolare della linea di frattura della nicchia, (Geol. Merenda, gennaio 2019).....	53
Figura 3.16 Grafico delle precipitazioni (mm) degli ultimi 15 giorni di novembre 2018, (ARPACAL, 2020). .....	53
Figura 3.17 Planimetria di ubicazione della strumentazione attualmente attiva nel Corpo di Frana 1, (2020). .....	54
Figura 3.18 Planimetria di ubicazione della strumentazione attualmente attiva nel Corpo di Frana 2, (2020). .....	54

Figura 3.19 Sezione del tubo inclinometrico, della sonda e de nominazione delle linee guida (1-3 e 2-4) e dei sensori (A e B), (Lagic S.R.L., 2019).	56
Figura 3.20 Sezione del tubo inclinometrico con installazione della sonda inclinometrica fissa e denominazione dei sensori, (Lagic S.R.L., 2019).	57
Figura 3.21 Piezometro di Casagrande, (Università degli Studi di Firenze, 2004).	59
Figura 3.22 Piezometro elettrico a corda vibrante, (Università degli Studi di Firenze, 2004).	60
Figura 3.23 Riepilogo installazione degli inclinometri e dei piezometri, (idrogeo S.r.l., 2019).	61
Figura 3.24 Report di installazione dell'inclinometro NI01, (Metrofc S.C.a.r.l., 2019).	62
Figura 3.25 Report di installazione del piezometro NPZ01, (Metrofc S.C.a.r.l., 2019).	62
Figura 3.26 Log stratigrafici del piezometro NPZ03, (idrogeo S.r.l., 2019).	65
Figura 3.27 Log stratigrafici del piezometro NPZ03, (idrogeo S.r.l., 2019).	66
Figura 3.28 Sezione geotecnica schematica rappresentativa Corpo di Frana 2. Strumentazione di monitoraggio Corpo di Frana 2, sezione 4bis, (2020).	67
Figura 3.29 Spostamenti risultanti corona frana 1, (2020).	69
Figura 3.30 Spostamenti risultanti corona di frana 2, (2020).	70
Figura 3.31 Velocità di spostamento target T31, (2020).	71
Figura 3.32 Velocità di spostamento target T32, (2020).	72
Figura 3.33 Velocità di spostamento target T35, (2020).	72
Figura 3.34 Velocità di spostamento target T10, (2020).	73
Figura 3.35 Velocità di spostamento target T11, (2020).	74
Figura 3.36 Velocità di spostamento target T13, (2020).	74
Figura 3.37 Sezione Corpo di Frana 1 in relazione alle misure inclinometriche e piezometriche L1, L2 ed L3, (Lagic S.R.L., 2019).	76
Figura 3.38 Sezione Corpo di Frana 2 in relazione alle misure inclinometriche e piezometriche L1, L2 ed L3, (Lagic S.R.L., 2019).	77
Figura 3.39 Spostamenti relativi all'inclinometro NI03-Misura inclinometrica "L29", (Lagic S.R.L., 2020)).	79

Figura 3.40 Spostamenti relativi all'inclinometro NI08-Misura inclinometrica "L16", (Lagic S.R.L., 2020). .....	80
Figura 3.41 Evoluzione degli spostamenti nel tempo inclinometro fisso NI04, (Lagic S.R.L., 2020). 80	
Figura 3.42 Evoluzione degli spostamenti nel tempo inclinometro fisso NI09, (Lagic S.R.L., 2020). 81	
Figura 3.43 Sezioni schematiche con sintesi delle misure inclinometriche e piezometriche relative al Corpo di Frana 2 eseguite in data 02 marzo 2020, (Lagic S.R.L., 2020). .....	81
Figura 3.44 Planimetria con sintesi degli spostamenti principali relativi al Corpo di Frana 2 misurati in data 02 marzo 2020, (Lagic S.R.L., 2020). .....	82
Figura 3.45 Schema planimetrico con ubicazione della strumentazione piezometrica, (Lagic S.R.L., 2019). .....	83
Figura 3.46 Profondità e quota in funzione del periodo di osservazione, (Lagic S.R.L., 2020). .....	86
Figura 3.47 Sezione 4bis, (Amorosi & Boldini , 2019). .....	89
Figura 3.48 Sezione 4bis, condizione di incipiente collasso per le superfici di scorrimento 1,2,3,4, (Amorosi & Boldini , 2019). .....	90
Figura 3.49 Sezione 4bis, intervento con elementi strutturali, (Amorosi & Boldini , 2019). .....	91
Figura 3.50 Sezione 4bis, verifica di instabilità per meccanismo profondo, (Amorosi & Boldini , 2019). .....	92
Figura 3.51 Sezione 4bis, intervento con elementi strutturali: analisi pseudostatica, (Amorosi & Boldini , 2019). .....	93
Figura 3.52 Sezione 4bis, verifica di stabilità per meccanismo profondo: analisi pseudostatica, (Amorosi & Boldini , 2019). .....	93
Figura 3.53 Sezione 1, (Amorosi & Boldini , 2019). .....	95
Figura 3.54 Sezione 1, superficie di scorrimento più critica, (Amorosi & Boldini , 2019). .....	95
Figura 3.55 Sezione 1, coefficiente di sicurezza per tutte le superfici studiate, (Amorosi & Boldini , 2019). .....	95
Figura 3.56 Sezione 1, coefficienti di sicurezza dell'analisi pseudo statica, (Amorosi & Boldini , 2019). .....	97

Figura 3.57 Sezione 1, coefficienti di sicurezza dall'analisi pseudo statica in presenza dei pali, (Amorosi & Boldini , 2019).....	97
Figura 4.1 Precipitazione media mensile annua Regione Calabria, (ARPACAL, 2020). ....	100
Figura 4.2 Stazione termo-pluviometrica di Catanzaro COD. 1850, (ARPACAL, 2020).....	102
Figura 4.3 Istogramma piogge mensili 2018, (ARPACAL, 2020).....	105
Figura 4.4 Mappa delle precipitazioni cumulate dal 02/10/2018 al 06/10/2018, (ARPACAL, 2020) .....	108
Figura 4.5 Mappa dei comuni allertati durante l'evento che va dal 02/10/2018 al 06/10/2018, (ARPACAL, 2020) .....	109
Figura 4.6 Diagramma pluviometrico relativo al periodo che va dal 02/10/2018 al 06/10/2018, (ARPACAL, 2020). ....	110
Figura 4.7 Correlazione tra il regime delle piogge e gli spostamenti sulla superficie di scorrimento, (2020). ....	113
Figura 4.8 Piogge giornaliere dal 07/09/2018 al 25/02/2020, (2020).....	114
Figura 4.9 Spostamenti risultanti e millimetri di pioggia caduta-. Corona di Frana 1, (2020).....	115
Figura 4.10 Spostamenti risultanti e millimetri di pioggia caduti-Corona di Frana 2, (2020). ....	116
Figura 4.11 NPZ04-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 7 giorni, (2020).....	118
Figura 4.12 NPZ04-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 15 giorni, (2020).....	118
Figura 4.13 NPZ04-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 30 giorni, (2020).....	119
Figura 4.14 NPZ05-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 7 giorni, (2020).....	120
Figura 4.15 NPZ05-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 15 giorni, (2020).....	120
Figura 4.16 NPZ05-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 30 giorni, (2020).....	121
Figura 4.17 NPZ06-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 7 giorni, (2020).....	122
Figura 4.18 NPZ06-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 15 giorni, (2020).....	122
Figura 4.19 NPZ06-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 30 giorni, (2020).....	123
Figura 4.20 NPZ01-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 7 giorni, (2020).....	124

Figura 4.21 NPZ01-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 15 giorni, (2020).....	124
Figura 4.22 NPZ01-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 30 giorni, (2020).....	125
Figura 4.23 NPZ02-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 7 giorni, (2020).....	126
Figura 4.24 NPZ02-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 15 giorni, (2020).....	126
Figura 4.25 NPZ02-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 30 giorni, (2020).....	127
Figura 4.26 NPZ03-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 7 giorni, (2020).....	128
Figura 4.27 NPZ03-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 15 giorni, (2020).....	128
Figura 4.28 NPZ03-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 30 giorni, (2020).....	129

## Indice tabelle

Tabella 2.1 Dati pluviometrici relativi alle Stazioni di Catanzaro, Catanzaro Lido e Caraffa, gp=giorni piovosi, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).....	30
Tabella 2.2 Parametrizzazione geotecnica di riferimento dell'unità A0, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).....	34
Tabella 2.3 Parametrizzazione geotecnica di riferimento dell'unità A3, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).....	36
Tabella 3.1 Tabella di sintesi posizione-lunghezza degli inclinometri di installazione per il Copro di Frana 1 ed il Corpo di Frana 2 previsti dal Piano di Monitoraggio Integrativo, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2018). ....	50
Tabella 3.2 Tabella di sintesi tipo-posizione-lunghezza celle piezometriche di installazione per il Corpo di Frana 1 e il Corpo di Frana 2 previsti dal Piano di Monitoraggio Integrativo, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2018). ....	50
Tabella 3.3 Tabella riassuntiva della strumentazione installata al 21/02/2019, (Lagic S.R.L., 2019). .....	55
Tabella 3.4 Caratteristiche strumentazione, (Lagic S.R.L., 2019). ....	55
Tabella 3.5 Caratteristiche sonde inclinometriche fisse, (Lagic S.R.L., 2019).....	57
Tabella 3.6 Tabella di sintesi dei risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni indisturbati relativi al Copro di Frana 1, (C.m.g. Testing S.r.l., 2019).....	63
Tabella 3.7 Tabella di sintesi dei risultati di prove di laboratorio eseguite su campioni indisturbati relativi al Corpo di Frana 2 (Lagic S.R.L., 2019). ....	64
Tabella 3.8 Elenco dei sondaggi piezometrici, (Lagic S.R.L., 2019).....	82
Tabella 3.9 Tabella delle misure piezometriche dei piezometri elettrici, (Lagic S.R.L., 2019). ....	84
Tabella 3.10 Tabella misure piezometriche dei piezometri con cella di Casagrande (Lagic S.R.L., 2019). ....	84
Tabella 3.11 Tabella delle misure piezometriche dei piezometri elettrici fino a marzo 2020, (Lagic S.R.L., 2020).....	85

Tabella 3.12 Tabella delle misure piezometriche dei piezometri con cella di Casagrande fino a marzo 2020, (Lagic S.R.L., 2020). .....	85
Tabella 3.13 Misure inclinometriche Corpo di Frana 2, (Amorosi & Boldini , 2019) .....	89
Tabella 3.14 Misure piezometriche Corpo di Frana 2, (Amorosi & Boldini , 2019). .....	89
Tabella 3.15 Parametri di analisi per lo SLV Corpo di Frana 2, (Amorosi & Boldini , 2019). .....	93
Tabella 3.16 Misure piezometriche corpo 1, (Amorosi & Boldini , 2019).....	94
Tabella 3.17 Parametri di analisi per lo SLV Corpo di Frana 1, (Amorosi & Boldini , 2019). .....	96
Tabella 4.1 Piogge mensili dal 1916 al 1962, (ARPACAL, 2020).....	103
Tabella 4.2 Piogge mensili dal 1963 al 2020 e valori medi mensili ed annuali, (ARPACAL, 2020). .	104
Tabella 4.3 Piogge giornaliere anno 2018, (ARPACAL, 2020). .....	105
Tabella 4.4 Elenco di alcuni dei comuni allertati durante l'evento che va al 02/10/2018 al 06/10/2018, (ARPACAL, 2020).....	110



## Introduzione

La presente tesi si propone di analizzare i dati del monitoraggio di due corpi di frana e di correlare i risultati ottenuti dall'esito del monitoraggio con i dati pluviometrici riferiti sia al periodo antecedente alla formazione del movimento franoso, sia al periodo in cui è stato realizzato il monitoraggio dello stesso. L'area d'esame si riferisce al *“Nuovo collegamento metropolitano ferroviario tra la nuova stazione di Catanzaro Germaneto e la stazione di Catanzaro Sala e adeguamento della linea metropolitana nella valle della Fiumarella fra Catanzaro Sala e Catanzaro Lido”*. Le fermate previste saranno undici distribuite su tre linee: linee A e B e linea C. La linea oggetto di interesse è la linea C in quanto è quella che riguarda i corpi di frana studiati. Verrà posta particolare attenzione all'area in prosecuzione alla fermata Campus Universitario del nuovo collegamento, sul lato Est, in cui sono in corso le lavorazioni per la realizzazione della galleria artificiale Campus 2, oggetto di perizia di variante. La galleria è oggetto di modifiche rispetto a quanto previsto in sede di Progetto Esecutivo, così da fare in modo che l'opera svolga anche il ruolo di presidio strutturale per la stabilizzazione attuale e futura dei pendii circostanti, sia con riferimento alle condizioni statiche, sia in presenza di eventi sismici. L'inquadramento geologico e geomorfologico risulta essere fondamentale per affrontare l'analisi dei corpi di frana individuati a monte della galleria, ricordando che lo scopo della tesi è quello di studiare gli esiti dell'attività di monitoraggio condotta sui corpi di frana e relazionare i risultati ottenuti con i dati pluviometrici. Il tratto interessato dal movimento gravitativo definisce due corpi di frana:

- Corpo di Frana 1, che si sviluppa nelle argille azzurre che caratterizzano il sito. Si tratta di un meccanismo composito caratterizzato da movimenti roto-traslativi superficiali, oggi attivi, con superficie di discontinuità compresa tra 2 e 4 m dal piano campagna, e movimenti rotazionali più profondi, oggi ad attività sospesa, che hanno interessato il piede del pendio nel recente passato;
- Corpo di Frana 2, nella medesima formazione argillosa, che si estende per circa 135 m di lunghezza e raggiunge una profondità massima di circa 20 m dal piano campagna; si tratta di un meccanismo rotazionale, attivo sin dalle misure risalenti al 2017, caratterizzato da velocità comprese tra 20 e 100 mm/anno circa.

# **1 Descrizione del progetto e della galleria artificiale Campus**

## **1.1 Introduzione**

L'intervento prevede il raddoppio della linea ferroviaria esistente da Catanzaro Sala a Catanzaro Lido, con le linee A-B e il nuovo collegamento ferroviario alla stazione di Germaneto, denominato linea C. Nello specifico le tre linee in progetto, come si può visionare nella planimetria di inquadramento riportata in Figura 1.1 sono le seguenti:

- linea A – binario est della tratta Catanzaro Sala-Catanzaro Lido;
- linea B – binario ovest della tratta Catanzaro Sala-Catanzaro Lido;
- linea C – binario della tratta Catanzaro Sala-Dulcino-Germaneto.

Le prime due costituiscono l'adeguamento a linea metropolitana della rete ferroviaria esistente nella valle della Fiumarella tra Catanzaro Sala e Catanzaro Lido e sono affiancate per la massima parte del tracciato, per cui la nuova sede nella direttrice Sala-Lido è prevalentemente a doppio binario; la terza costituisce il nuovo collegamento metropolitano ferroviario tra la nuova stazione di Catanzaro in località Germaneto e l'attuale stazione di Catanzaro Sala ed è a unico binario.

### **1.1.1 Linee A e B**

La rete ferroviaria esistente nella valle della Fiumarella è costituita da un tratto della linea delle Ferrovie dello Stato (FS) Settingiano-Catanzaro Lido (ormai dismessa a seguito della variante tra Lamezia Terme Centrale e Catanzaro Lido), con la nuova stazione di Catanzaro in località Germaneto, e dalla linea Ferrovie della Calabria (FdC) attualmente in esercizio. Per la realizzazione della nuova sede delle linee A e B, mostrata in Figura 1.2, è stata posta particolare attenzione allo studio delle fasi di cantierizzazione: è particolarmente importante articolare l'esecuzione delle opere tenendo conto del mantenimento dell'esercizio ferroviario e dei collegamenti viari in un contesto spesso densamente urbanizzato. Per quanto concerne la linea A, l'estensione complessiva del tracciato è di 8+344.532 m e prevede, oltre alle due stazioni di testa, sei fermate intermedie, di cui cinque già esistenti ed una di nuova introduzione, ovvero la fermata Magna Grecia. Esse sono:

- Catanzaro Sala, stazione iniziale, al Km 0+097,289;
- Dulcino al km 1+255,387;
- Santa Maria al km 3+258,185;
- Pistoia al km 4+649,983;
- Corvo al km 5+689,253;
- Aranceto al km 6+503,721;
- Magna Grecia al km 7+325,221;
- Catanzaro Lido, stazione finale, al km 8+319,092.

Dalla stazione Catanzaro Sala la coppia di binari corre parallela, mantenendo una distanza tra gli assi di 4 m. Poco a valle della fermata Dulcino il rilevato della nuova sede A e B si amplia in quanto ad essa si affianca, in parallelo, il tratto finale della nuova linea C; superata la diramazione per Germaneto, i binari della linea A e B si riportano a quote prossime a quelle delle linee preesistenti e proseguono affiancati portandosi, non essendovi altre comunicazioni, ad interasse di 3.5 metri. A valle della trincea di S. Maria, ove si colloca l'omonima fermata, i due binari proseguono affiancati, a quote prossime a quelle della ex linea FS, superando le fermate di Pistoia, Corvo e Aranceto, fino in prossimità dell'attraversamento della Fiumarella. Al km 7 circa i due tracciati si separano per collocarsi sulle rispettive opere di attraversamento del corso d'acqua: la linea B sul ponte in ferro attualmente impegnato dalla linea in esercizio, la linea A sul ponte in cemento armato dove è situata la linea FS dismessa. Oltre l'attraversamento della Fiumarella è posta la nuova fermata Magna Grecia, questa fermata è l'unica ad avere i due corpi marciapiede distanti e non allineati in quanto i due tracciati sono ancora separati, seppur convergenti. A valle della fermata le due linee tornano ad affiancarsi ad interasse di 3.5 metri fino al cavalcavia di via Trapani (Cz), per poi giungere alla stazione finale di Catanzaro Lido. Lungo il tracciato delle linee A e B sono presenti numerose nuove opere di attraversamento stradale ed idraulico. Altimetricamente il tracciato raggiunge circa 135.44 m di dislivello, con una pendenza variabile tra 0 e 3,5% e media pari a circa 1.6%.

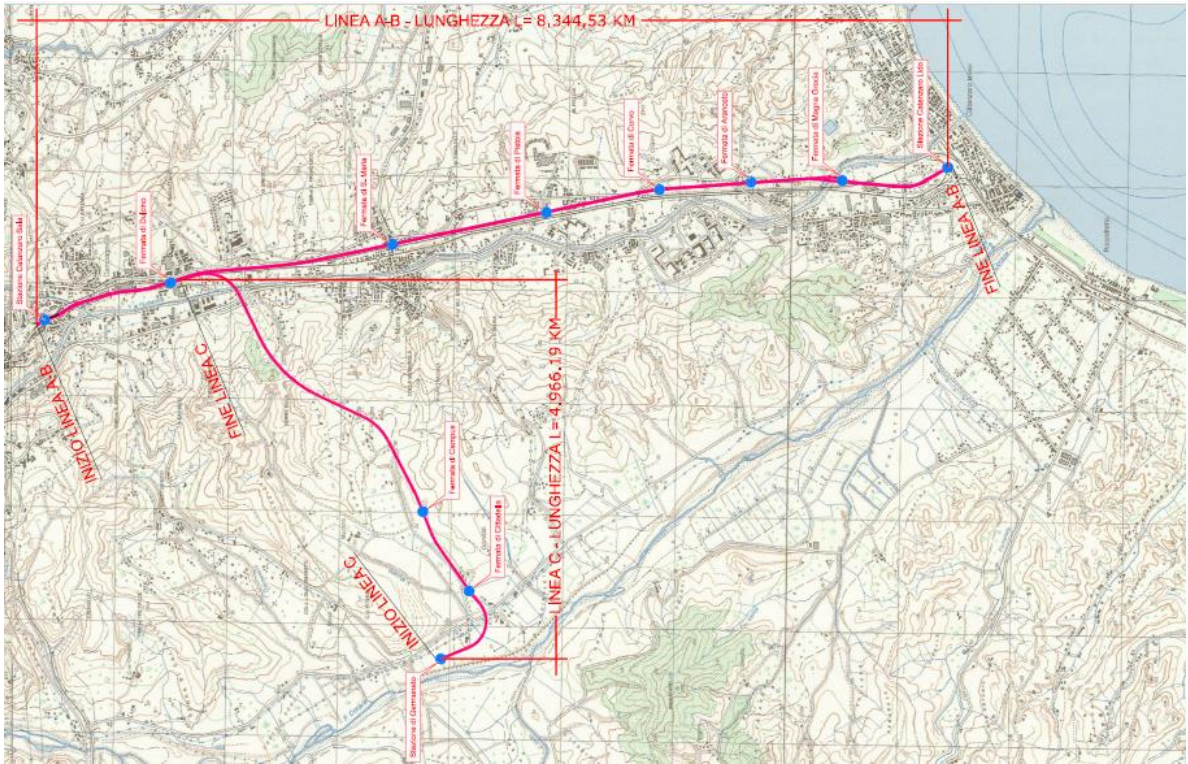


Figura 1.1 Planimetria di inquadramento, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).

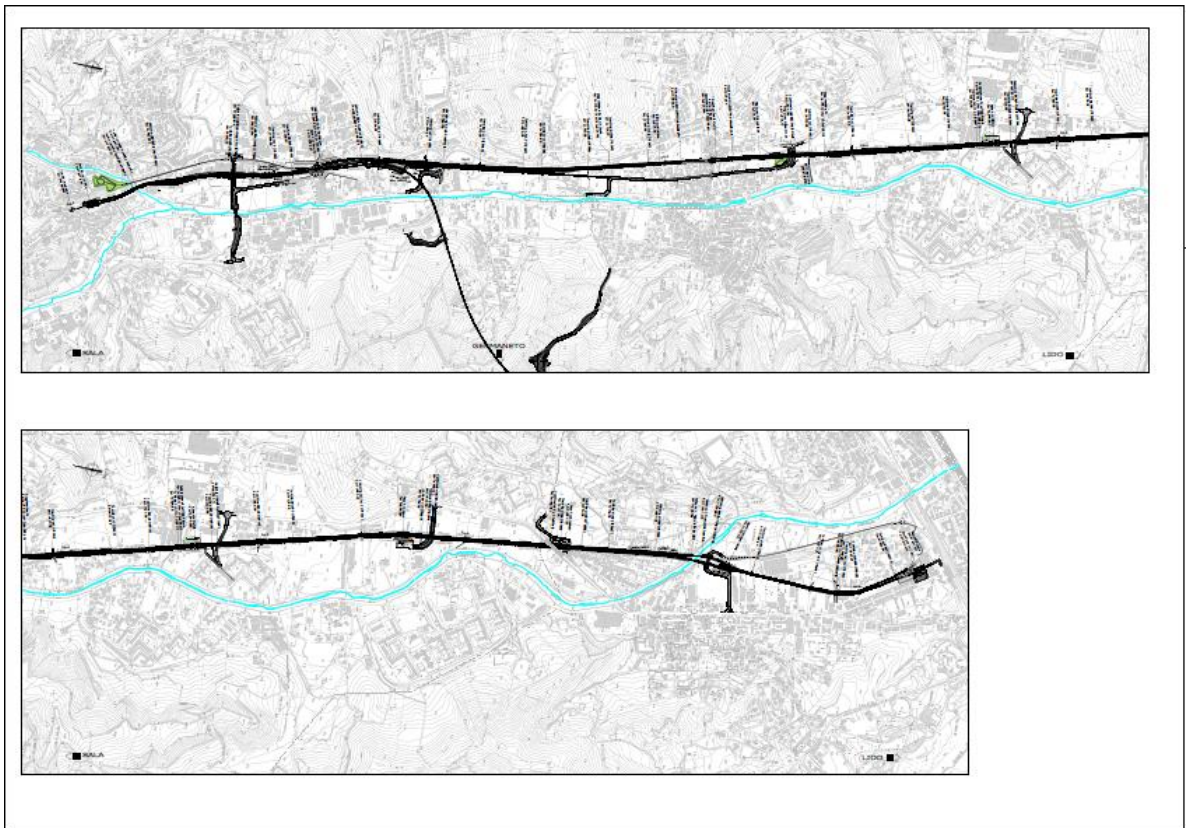


Figura 1.2 Planimetria generale di progetto - Linee A e B, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).

### 1.1.2 Linea C

Il tracciato di progetto per il collegamento metropolitano ferroviario tra la nuova stazione FS di Germaneto e l'attuale Stazione di Catanzaro Sala si sviluppa con un binario singolo ordinario non elettrificato. Il tracciato della linea nuova C, in Figura 1.3, ha una lunghezza di 4+966,194 m fino al termine del tronchino in affiancamento alle linee A e B. Lungo il tracciato della linea C sono previste cinque fermate:

- Stazione F.S. Catanzaro (Germaneto), stazione iniziale, al km 0+046,532;
- Cittadella Regionale al km 0+895,830;
- Campus Universitario – Policlinico al km 1+731,934;
- Dulcino al km 5+060,571;
- Catanzaro Sala, stazione finale al km 6.218,905.

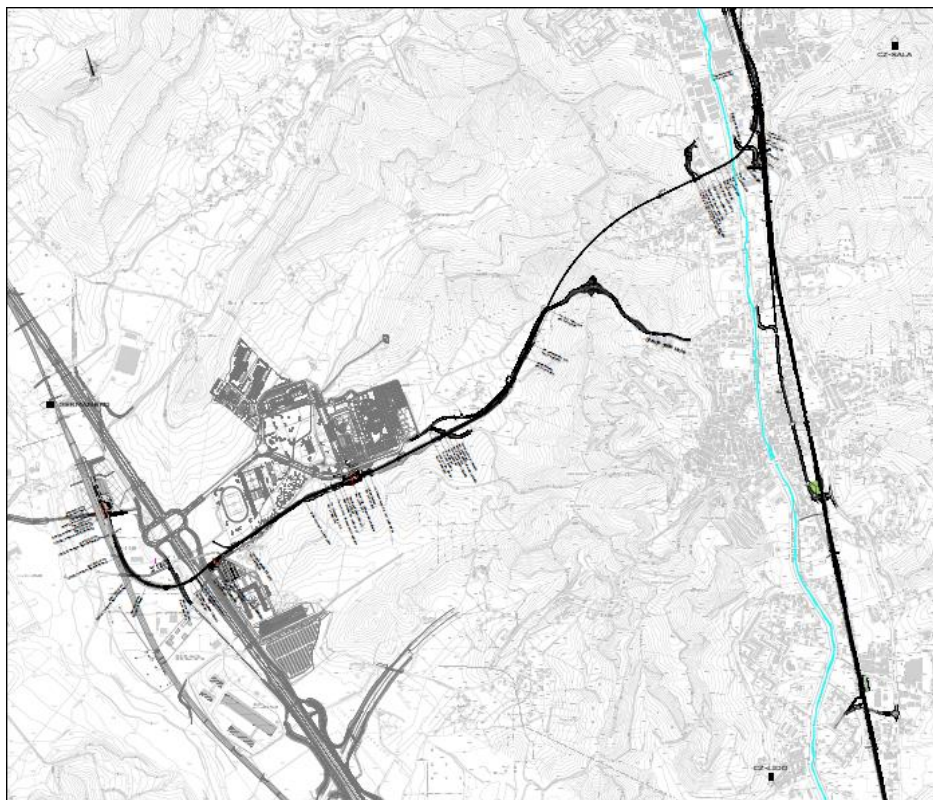
Come messo in conto nel Progetto Esecutivo, la stazione di partenza è collocata a fianco del fabbricato viaggiatori della nuova stazione FS di Germaneto ed il primo tratto della linea è in parallelo ed in quota con i contigui binari FS. Intorno al km 0+300, la nuova linea inizia a distaccarsi dal corpo del rilevato FS e, sempre in rilevato, descrive un'ampia curva, quindi scavalca la S.P. 48 e poi, in leggera trincea, sottopassa la nuova sede della S.S. 280 nel manufatto scatolare già predisposto. In questa prima parte del tracciato insistono numerose nuove opere, stradali ed idrauliche, che danno continuità a quelle già esistenti sotto il rilevato FS. A valle del sottoattraversamento della S.S. 280 è posta la fermata di Cittadella Regionale, in curva di ampio raggio (800m). Il tracciato prosegue rettilineo, in leggero rilevato, fino ad arrivare, con una piccola deviazione planimetrica, all'allineamento della fermata Campus e alla trincea con palificata di sostegno a monte; prima della fermata Campus è posta una galleria artificiale di modesto sviluppo (41m), denominata TG1. Subito a valle della fermata, dopo un breve tratto in trincea con palificate, ha inizio una lunga galleria artificiale (dal km 1+828,870 al km 2+200,524), denominata TG2, che, dati gli elevati ricoprimenti ha una sezione a doppia camera per quasi metà del suo sviluppo. Dal km 2+270 circa la sede passa in rilevato e poco dopo, al km 2+283, è posto il sottovia della viabilità locale ST105, unica altra opera di attraversamento stradale di tutta la linea oltre a quelle citate in precedenza. La sede del tracciato rimane in rilevato fino al km 2+800 circa e dal km 2+950 ha inizio, dopo un tratto di trincea con palificata della lunghezza di circa 75 metri, la

galleria artificiale di imbocco alla naturale; la stessa ha una lunghezza di 1054.5 m, si sviluppa in curva, verso destra, di ampio raggio ed è seguita da un breve tratto artificiale. Si riportano di seguito le progressive delle gallerie di imbocco e della naturale:

- inizio galleria artificiale al km 2+950,000;
- fine galleria artificiale – inizio galleria naturale al km 3+148,000;
- fine galleria naturale – inizio galleria artificiale al km 4+202,500;
- fine galleria artificiale al km 4+209,400.

Poco a valle della galleria naturale lato Dulcino ha inizio il viadotto che va dal km 4+246,763 al km 4+626,151. Già in viadotto ha inizio il raccordo planimetrico verso sinistra che porta il tracciato della nuova linea ad affiancarsi a quello delle linee A e B nel tratto in rilevato posto al termine del viadotto.

L'altimetria complessiva della linea C è la seguente: partendo dalla quota progetto di 42.20 m s.l.m. ad inizio tracciato (stazione Germaneto) si raggiunge la quota di valico di 116.64 m s.l.m. al km 4+228 per poi discendere alla quota di 110.2 m s.l.m. a fine viadotto e risalire a quota 115.9 m s.l.m. a fine tronchino (km 4+966).



**Figura 1.3 Planimetria generale di progetto - Linea C, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).**

## 1.2 Opere d'arte maggiori

Le opere d'arte maggiori che costituiscono il presente collegamento sono costituite da:

- una galleria naturale che presenta uno sviluppo di 1260 m circa, di cui 1054 m di naturale, con una unica canna di sezione media di circa 45 m<sup>2</sup>, e due tratti di galleria artificiale agli imbocchi su entrambi i lati;
- una trincea costituita da paratie di pali di diametro 1000 mm ad interasse 1.20 m, realizzati a sbalzo e aventi lunghezza di 14.00 m, ed una galleria artificiale denominata TG1;
- a monte dell'omonima fermata ritroviamo la galleria "Campus, TG2" che è, in parte, oggetto di tale tesi in quanto opera di stabilizzazione del versante in frana trattato;
- il viadotto Fiumarella, opera d'arte che ha una lunghezza complessiva di 377.84 m;
- la trincea Santa Maria, ottenuta mediante l'utilizzo di una palificata realizzata con pali di grosso diametro nel tratto più profondo e nei tratti restanti, ove le condizioni al contorno rendevano praticabile uno scavo aperto in trincea, si è passati ad una soluzione tra muri ad U o tra muri a mensola con il dente;
- il ponte Fiumarella previsto lungo la viabilità di Dulcino Nord, presenta un impalcato costituito da travi in cemento armato precompresso a V;
- la trincea SP48

### 1.2.1 Galleria artificiale Campus, TG2

La galleria artificiale Campus, denominata anche TG2, di cui si riportano gli stralci di planimetria in Figura 1.6 e Figura 1.7, è un'opera costituita da una galleria artificiale compresa tra le progressive km 1+797.36 e km 2+236.82 e dalle opere accessorie. Le opere presenti sono, dal punto di vista strutturale, caratterizzate dalle seguenti tipologie descritte partendo dalla progressiva 1+797.36:

- per 12.90 m dalla progressiva di origine un tratto di "trincea fra pali" caratterizzata da opere di sostegno costituite da due berlinesi affiancate a 10.00 m netto interno costituite da pali diametro 1000 mm, l= 13.00 m, collegati in testa da un cordolo in

cemento armato di 1.60x0.80 m avente come vincolo di contrasto la soletta di base di spessore di 1.00 m;

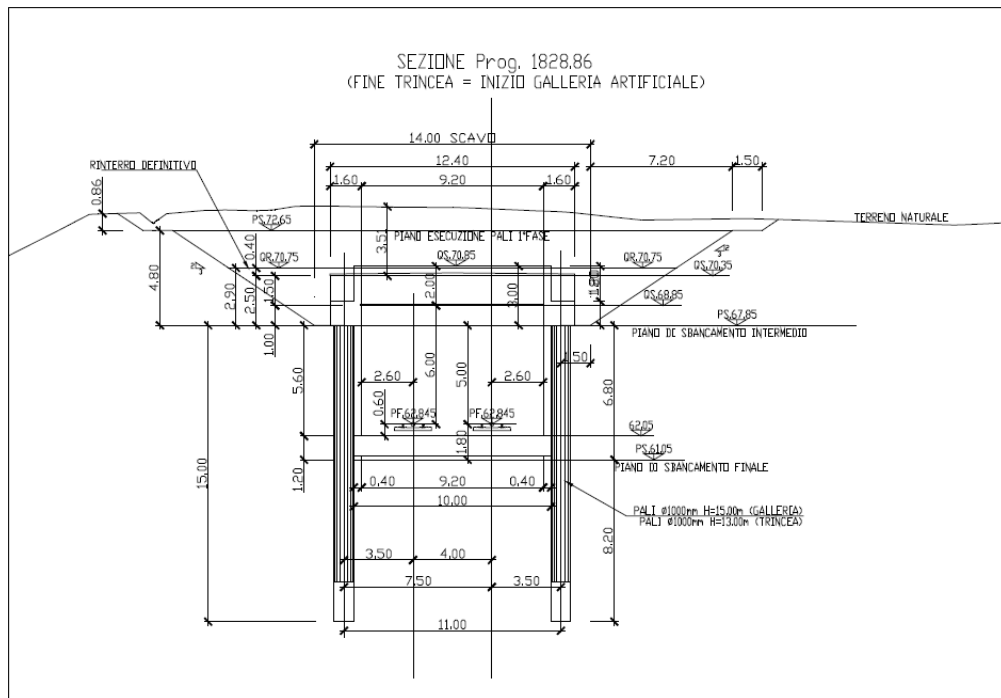
- per 18.60 m un tratto di “trincea con puntoni” caratterizzata da opere di sostegno costituite da due berlinesi affacciate a 10.00 m netto interno costituite da pali diametro 1000 mm,  $l=8.0 - 12.0$  m,  $i=1.20$  m, con dimensioni 1.80x1.20 m, collegati in testa da un cordolo in c.a. di 1.60x1.20 m ed aventi come vincolo di contrasto in sommità puntoni in c.a. di 0.80x0.80 m,  $i=6.00$  m, e la soletta di base;
- galleria artificiale composta da tre sezioni definite come segue:
  1. per 11.40 m una galleria artificiale “sezione doppio binario”, costituita da due berlinesi di pali diametro 1000 mm,  $l=15.00$  m,  $i=1.20$  m, affacciate alla distanza di 10.00 m netto interno, la cui sezione tipo è mostrata in Figura 1.4. Questa sezione viene realizzata con il metodo “Milano” scavando sotto la soletta di copertura di spessore 1.50 m che è chiamata a sostenere, in fase definitiva e nella sezione di maggior ricoprimento, 5.00 m di terreno. La soletta di copertura è vincolata ai pali da un cordolo di 1.00x1.60 m realizzato in testa agli stessi. A scavo ultimato verranno realizzate una soletta di fondo di spessore 1.00 m e le contro pareti di 0.40 m che completeranno la sezione scatolare di questo tratto della galleria artificiale. Lungo il paramento sono previste batterie di dreni sub-orizzontali lunghi 6.00 m;
  2. per 161.66 m una galleria artificiale “a doppia camera” costituita da due berlinesi di pali diametro 1000 mm,  $l=19$  m,  $i=1.20$  m, affacciate alla distanza di 6.00 m netto interno, visibile nella sezione in Figura 1.5. Questa sezione viene utilizzata nei tratti in cui la copertura di terreno per la normale sezione risulterebbe eccessiva; è costituita da una galleria con camera superiore di alleggerimento progettata in modo da permettere ricoprimenti massimi sulla soletta superiore maggiori di 5.00 m, con soletta intermedia di contrasto. Questa sezione viene realizzata anch’essa con il metodo “Milano” scavando sotto la soletta di copertura di spessore 1.20 m che è chiamata a sostenere, in fase definitiva, una quota di terreno all’intorno dei 5.50 m. Verrà di seguito realizzata una soletta intermedia, mediante inghisaggi ai pali, di spessore 0.80 m a -5.80 m dall’intradosso della precedente sotto cui si continuerà nello scavo per altri 6.80 m. La soletta di copertura è vincolata ai pali da un cordolo



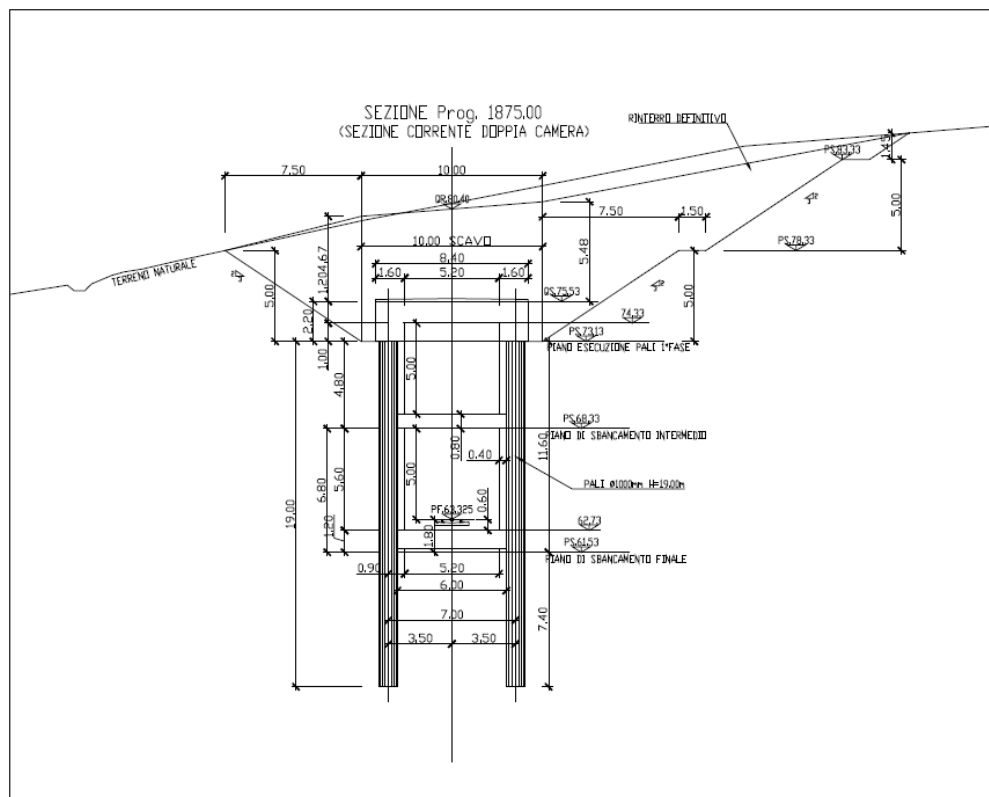
di 1.00x1.60 m realizzato in testa agli stessi. A scavo ultimato verranno realizzate una soletta di fondo di spessore 1.00 m e le contro pareti di 0.40 m che completeranno la sezione scatolare di questo tratto della galleria artificiale, saranno inoltre presenti dreni sub-orizzontali. Alle estremità del tratto a doppia camera sono previsti tratti di paratia provvisoria a sostegno degli scavi, realizzati con pali diametro 1000 mm a passo 1.20 m e di lunghezza 15.00 m, collegati in testa con cordoli 1.20x1.00 m.

3. una galleria artificiale monocamera “alto ricoprimento” in due sezioni di lunghezza rispettivamente di 42.00 m e 102.00 m, e “medio ricoprimento” in altre due sezioni di 36.00m e 18.60 m. È costituita da due berlinesi di pali diametro 1000 mm, l=13.00 m, i=1.20 m, affacciate alla distanza di 6.00 m netto interno, sulle testate dei pali sono previsti cordoli longitudinali di collegamento, di dimensioni 1.60x1.00 m. Questa sezione viene altresì realizzata con il metodo “Milano” scavando sotto la soletta di copertura di spessore 1.20 m che è chiamata a sostenere, in fase definitiva, una quota di terreno all’intorno dei 4.50 m, per l’alto ricoprimento e mediamente 1.50 m per il medio ricoprimento. A scavo ultimato verranno realizzate una soletta di fondo di spessore 1.00 m e le contro-pareti di 0.40 m che completeranno la sezione scatolare di questo tratto della galleria artificiale;

- per 11.40 m un tratto di “trincea con puntoni” caratterizzata da opere di sostegno costituite da due berlinesi affacciate a 10.00 m netto interno costituite da pali diametro 1000 mm, l=12.00 m, i=1.20 m, collegati in testa da un cordolo in c.a. di 1.60x1.10 m ed aventi come vincolo di contrasto in sommità puntoni in c.a. di 0.80x0.80 m, i=6.00 m, e la soletta di base, sul paramento dei pali è prevista altresì l'esecuzione di dreni sub orizzontali;
- per 12.90 m un tratto “muro ad U” di larghezza di 5.20 m netto interno caratterizzato da un muro ad U in c.a. di altezza massima 4.80 m con paramento verticale a sezione variabile e soletta di 0.60 m di spessore;



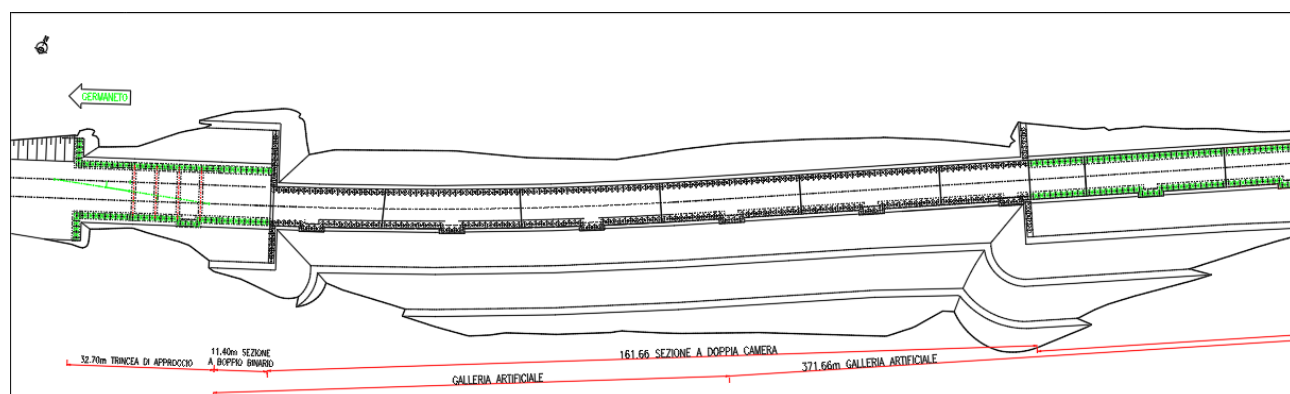
**Figura 1.4 Sezione tipo per il tratto di galleria artificiale zona "doppio binario", (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).**



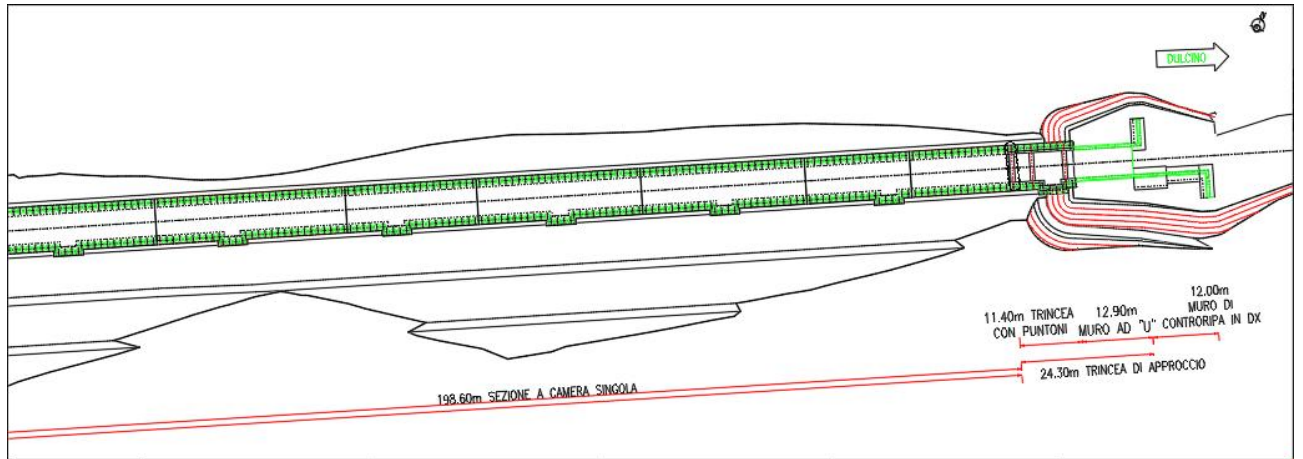
**Figura 1.5 Sezione tipo per il tratto in galleria artificiale zona "doppia camera", (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).**

In generale, per i tratti con i pali, si procederà alla costruzione secondo le seguenti fasi di lavorazione:

- pre-scavo sino alla quota di realizzazione dei pali;
- realizzazione dei pali;
- realizzazione della trave di correa o dei cordoli a solidarizzare le teste dei pali per garantire il comportamento coerente della berlinese;
- scavo fino alla quota di realizzazione della soletta superiore o dei puntoni;
- getto della soletta superiore di collegamento fra le berlinesi o dei puntoni;
- scavo top-down nelle zone “camerone”, “alto ricoprimento” e “medio ricoprimento” fino alla quota di massimo scavo; scavo a cielo aperto nelle zone di berlinesi a sbalzo;
- realizzazione della soletta di fondo;
- impermeabilizzazione della soletta superiore;
- ricoprimento delle solette superiori;
- realizzazione degli impianti e delle opere di finitura;
- realizzazione del sedime ferroviario.



**Figura 1.6 Planimetria dell'opera: primo stralcio, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).**



**Figura 1.7** Planimetria dell'opera: secondo stralcio, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).

## **2 Quadro geologico generale e caratteristiche geomorfologiche, idrogeologiche e geotecniche dell'area in esame.**

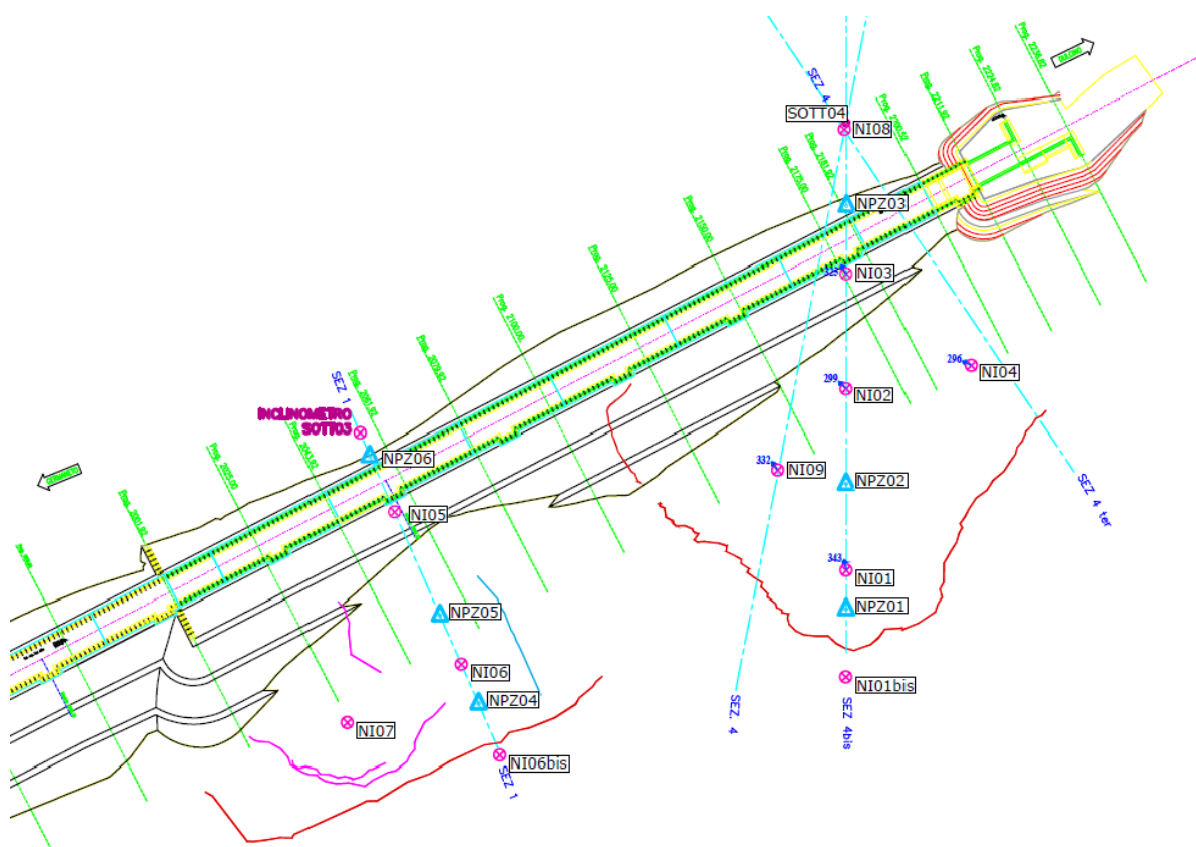
### **2.1 Introduzione**

La galleria artificiale denominata "Campus" ovvero TG2, oggetto di perizia di variante al Progetto Esecutivo Approvato, attraversa un fronte franoso per il quale la galleria stessa fungerà da misura di stabilizzazione. L'opera d'arte è costituita da una galleria artificiale compresa tra le progressive km 1+797.36 e km 2+236.82 e dalle opere accessorie. Il tratto interessato dal movimento gravitativo, oggetto del seguente capitolo, definisce due corpi di frana individuabili nella planimetria riportata in Figura 2.1:

- Corpo di Frana 1 da km 2+002.52 a km 2+095.00
- Corpo di Frana 2 da km 2+095.00 a km 2+200.52.

Prima di definire l'esito del monitoraggio dei corpi di frana su citati è stata riportata una sintesi dell'inquadramento geologico-strutturale, geomorfologico ed idrogeologico dell'intera opera ferroviaria da P.E.A., con particolare attenzione alla linea C e alla galleria artificiale "Campus", denominata TG2, che è la zona di interesse di entrambi i corpi di frana. L'inquadramento definito in sede di P.E.A. è stato svolto seguendo una successione ordinata di attività; in particolare, una fase preliminare, che ha visto l'acquisizione di tutte le conoscenze significative sull'area, basate sulla consultazione del Progetto Definitivo, e su una raccolta di materiale bibliografico. Quest'ultimo è stato reperito presso enti di ricerca (ISPRA, CNR, Università della Calabria, ecc.) ed amministrazioni pubbliche competenti per territorio fra cui: Centro Cartografico della Regione Calabria, Comune di Catanzaro, Provincia di Catanzaro, Autorità di Bacino della Regione Calabria. Sono stati inoltre visionati gli elaborati del "Progetto di Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico" (PAI). I risultati dei primi studi sono stati verificati e integrati con quelli scaturiti dal rilevamento geologico e morfologico di campagna, eseguito per una fascia ritenuta sufficientemente rappresentativa attorno all'asse ferroviario (circa 500m) oltre che dai dati emersi dalla campagna di indagini geognostiche integrative.

In tal modo è stato possibile approfondire la distribuzione spaziale dei litotipi, verificare gli elementi strutturali e morfologici caratteristici del territorio, e meglio definire il modello stratigrafico, geologico, geomorfologico ed idrogeologico. Una campagna geognostica condotta nell'inverno 2015, descritta nel dettaglio in uno specifico paragrafo, ha permesso di installare una serie di tubi piezometrici per il monitoraggio idrico sotterraneo e diversi tubi inclinometrici per verificare le condizioni di rischio di frana dei diversi settori di versante attraversati dall'opera, e poter quindi monitorare e quantificare gli spostamenti nel sottosuolo dei pendii soggetti ad eventuale dissesto. La campagna svolta ha contribuito così ad un approfondimento delle maggiori difficoltà interpretative rimaste. Nell'ultimo paragrafo inoltre viene descritta la caratterizzazione geotecnica dei terreni, cui vengono riportate le unità geotecniche riscontrate nell'area di esame.



**Figura 2.1 Stralcio planimetria galleria Campus e individuazione dei corpi di frana, (2020).**

## 2.2 Inquadramento geologico-strutturale e cenni di geologia regionale

### 2.2.1 La Stretta di Catanzaro nel contesto geodinamico dell'Arco calabro-peloritano

Dal punto di vista geologico-strutturale l'area attraversata dal tracciato ferroviario in progetto è situata al margine nord-orientale di un'ampia depressione strutturale nota in letteratura come "Stretta di Catanzaro". In particolare, essa ricade sulla pendice meridionale del Massiccio della Sila e, nei quadranti meridionali, nel settore collinare e lungo la piana alluvionale interposta tra il massiccio silano e la costa ionica. La Stretta di Catanzaro appartiene al contesto geologico regionale dell'Arco calabro-peloritano (Amodio-Morelli, 1976), un'ampia porzione d'origine alpina dalla caratteristica forma ad arco, interposta tra la catena magrebide (ad andamento E-O) e l'Appennino meridionale (ad andamento NO-SE) (Ben Avraham, Boccaletti, Grasso, Lentini, & Tortorici, 1990). Strutturalmente, l'Arco calabro-peloritano rappresenta un *thrust-system* prodotto dalla sovrapposizione, tra il Cretaceo superiore ed il Paleogene, di una serie di unità cristallino-metamorfiche paleozoiche derivanti dalla deformazione di domini continentali ed oceanici. Successivamente alla sua strutturazione, è stato interessato da un'intensa fase tettonica post-orogena estensionale, iniziata dal Pliocene Superiore e tutt'ora in atto (Westway, 1993; Wortel & Spackman, 1993; De Jonge M.R., 1994; Tortorici & al., 1995; Monaco & al., From collisional to rifted basins: an example from the southern Calabrian Arc (Italy), 1996). L'estensione ha prodotto un'ampia zona di *rift*, denominata da Monaco & Tortorici (Monaco & Tortorici, Active faulting in the Calabrian Arc and eastern Sicily., 2000) "*rift-zone siculo-calabra*", in Figura 2.2, strutturata da un sistema di faglie normali sismogeniche (Postpischl, 1985; Boschi & al., 1997), che si estende dalla costa orientale della Sicilia, attraverso lo Stretto di Messina, fino al settore nord-occidentale della Calabria. Le faglie presentano direzioni variabili tra N-S e NE-SO e, meno frequentemente, evidenziano un andamento trasversale (direzioni medie ONO-ESE). I singoli segmenti di faglia che costituiscono la *rift-zone* hanno frammentato l'Arco calabro peloritano in bacini sedimentari marini, disposti sia parallelamente che trasversalmente rispetto alla direzione dell'Arco, ed in blocchi sollevati. Le faglie, che mostrano scarpate ben sviluppate e con sensibile grado di "freschezza" morfologica, in Calabria sollevano e delimitano i fronti dei principali sistemi montuosi (Aspromonte, Serre, Catena Costiera Sila). I sistemi di faglie ad andamento trasversale della *rift-zone siculo-calabra* rivestono un ruolo particolarmente importante nell'area in esame, in

quanto individuano la depressione tettonica (*graben*) che corrisponde al Graben di Catanzaro” (Tansi & al., Mass movements and geologic structure of the Pizzotto-Greci slope (Lago, Calabria, Italy),, 1998). Secondo lo schema morfo-strutturale della Calabria proposto da Sorriso-Valvo & Tansi (Sorriso, Valvo, & Tansi, 1996), mostrato in Figura 2.3, l’area in esame ricade nel III° Settore, caratterizzato prevalentemente da una tettonica di tipo distensivo (faglie normali orientate in generale in direzione WNW-ENE); in riferimento al lavoro svolto da Galadini et al. (Galadini & al., 2001), del 2001 si riportano, inoltre, i dati disponibili relativi le caratteristiche delle faglie attive della Calabria (Figura 2.4 e Figura 2.5).

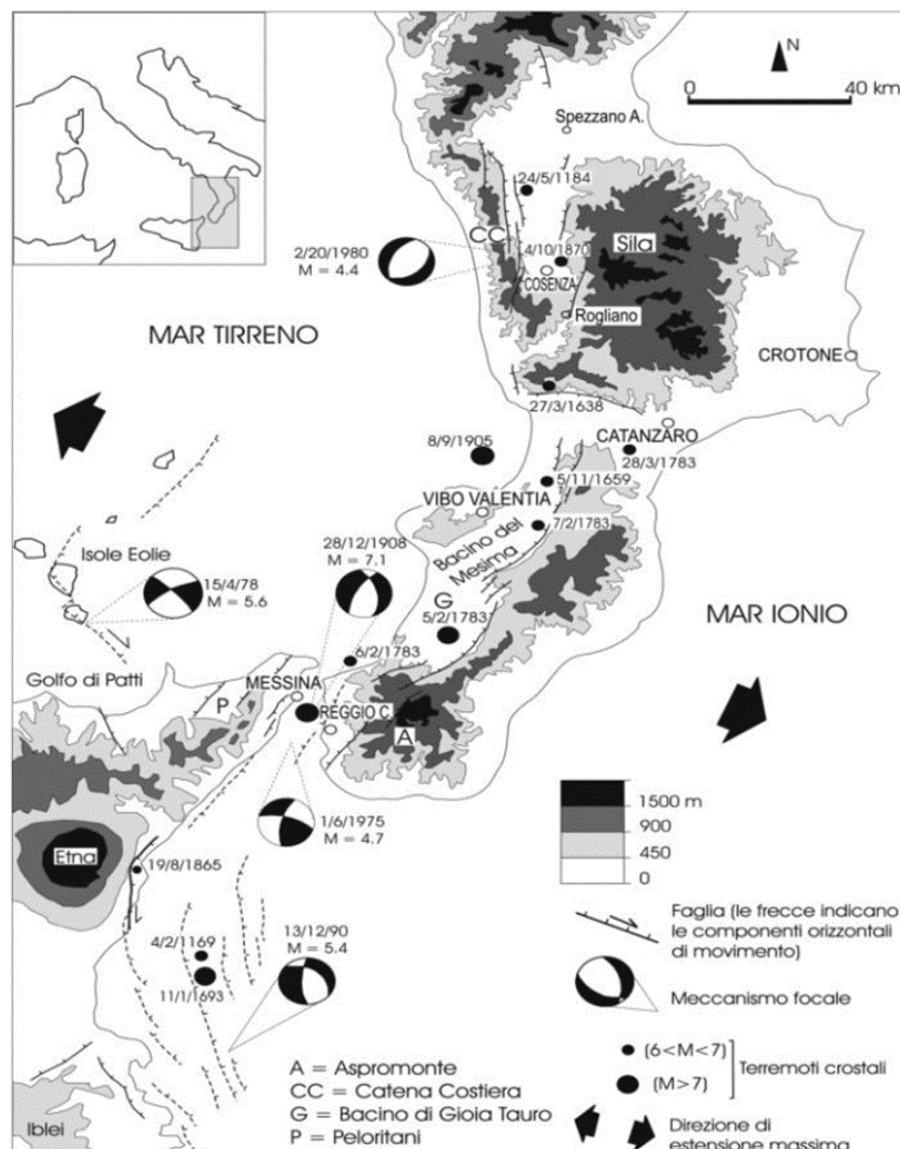
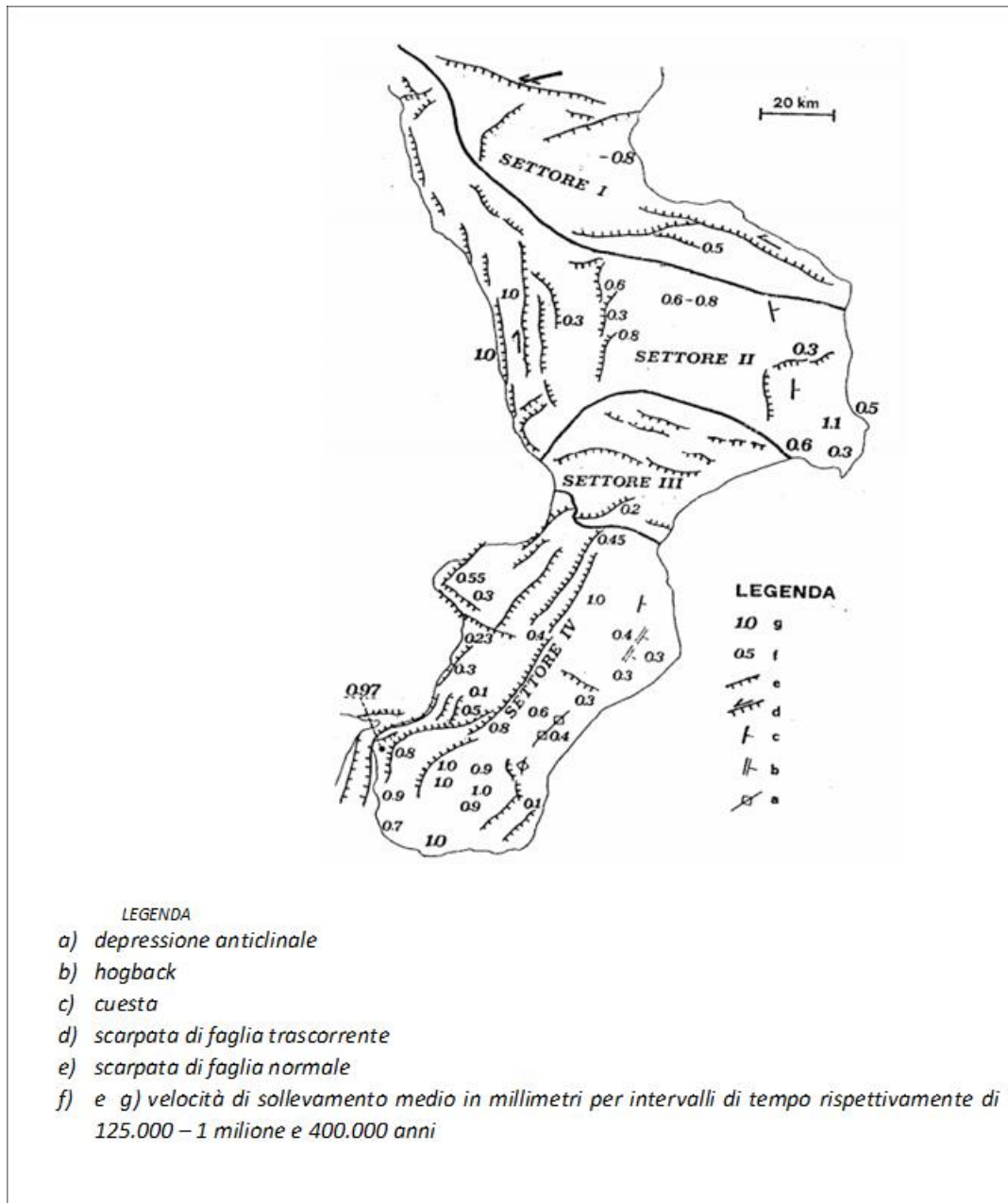


Figura 2.2 Caratteri sismotettonici della rift-zone siculo calabro, (Monaco & Tortorici, Active faulting in the Calabrian Arc and eastern Sicily., 2000).





**Figura 2.3** Principali strutture morfo-neotettoniche e velocità di sollevamento durante il quaternario, (Sorriso, Valvo, & Tansi, 1996).

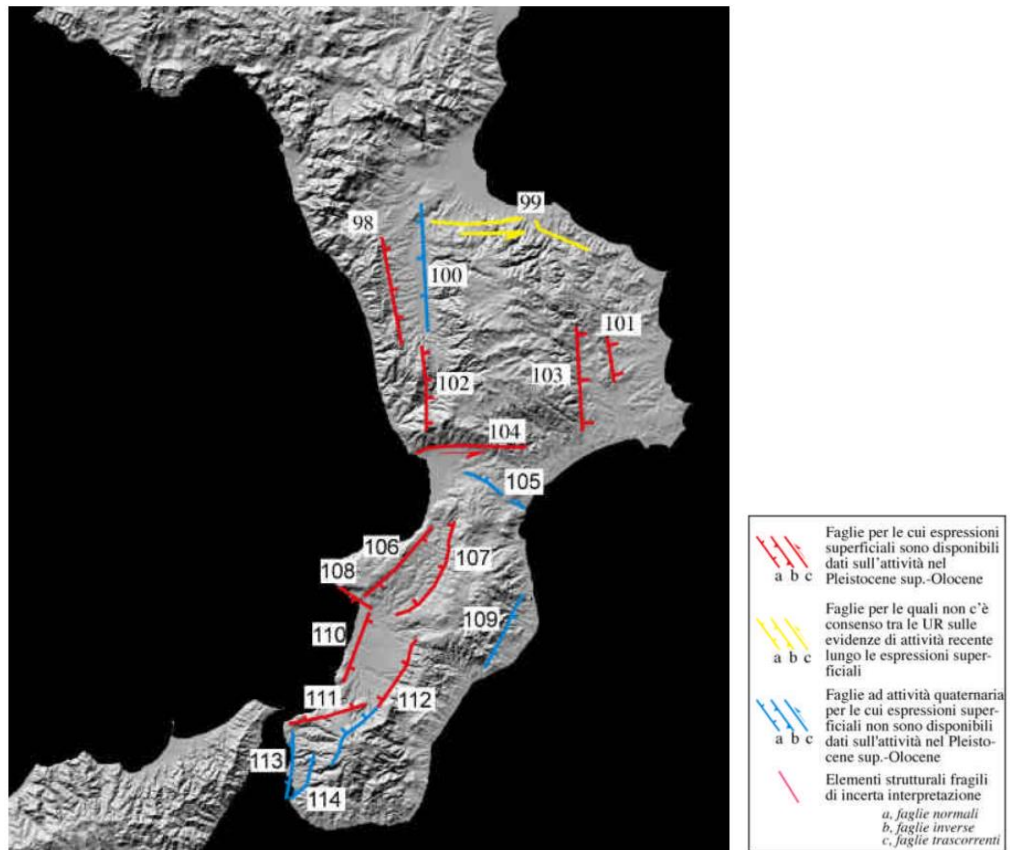


Figura 2.4 Carta delle faglie attive della Calabria, elementi geologici di superficie, (Galadini & al., 2001).

Faglie e sistemi di faglia	Lunghezza del sistema di faglia (km)	Slip-rate verticale (mm/a)	Slip-rate verticale minimo (mm/a)	Intervallo cronologico	Intervallo di ricorrenza per eventi di fagliazione di superficie (anni)	Spessore strato sismogenetico (km)
S.Marco Argentano – Domanico (98)	35	0.5–2	-	Olocene	-	5-10
Corigliano–Rossano (99)	47	1-5	-	Olocene	-	2-15
Tarsia–Zumpano (100)	40	0.1–0.5	-	Olocene	-	5
Faglie di M.Fuscaldo (101)	16	0.1–0.3	-	Olocene	-	2-6
Piano Lago-Valle del Savuto–Decollatura (102)	25	0.2–0.5	-	Olocene	-	5-10
Faglie del Marchesato (103)	33	0.5–1.5	-	Olocene	-	5-10
Lamezia–Catanzaro (104)	35	-	-	Olocene	-	5-15
Graben Catanzaro Sud (105)	21	-	0.2	Quaternario	-	5-15
Mesima Ovest (106)	33	-	0.2	Quaternario	-	5-15
Serre (107)	37	0.8–1	-	0.24 Ma	-	5-15
Nicotera (108)	14	0.7	-	0.12 Ma	-	5-15
Serre Est (109)	26	-	0.2	Quaternario	-	5-15
Gioia Tauro (110)	23	-	-	-	-	-
S.Eufemia (111)	26	0.7	-	0.12 Ma	-	5-15
Cittanova (112)	48	0.6–0.9	-	0.12 Ma	-	5-15
Reggio Calabria (113)	21	0.6	-	0.24 Ma	-	5-15
Pellaro – Mosorrofa (114)	17	-	-	-	-	5-15

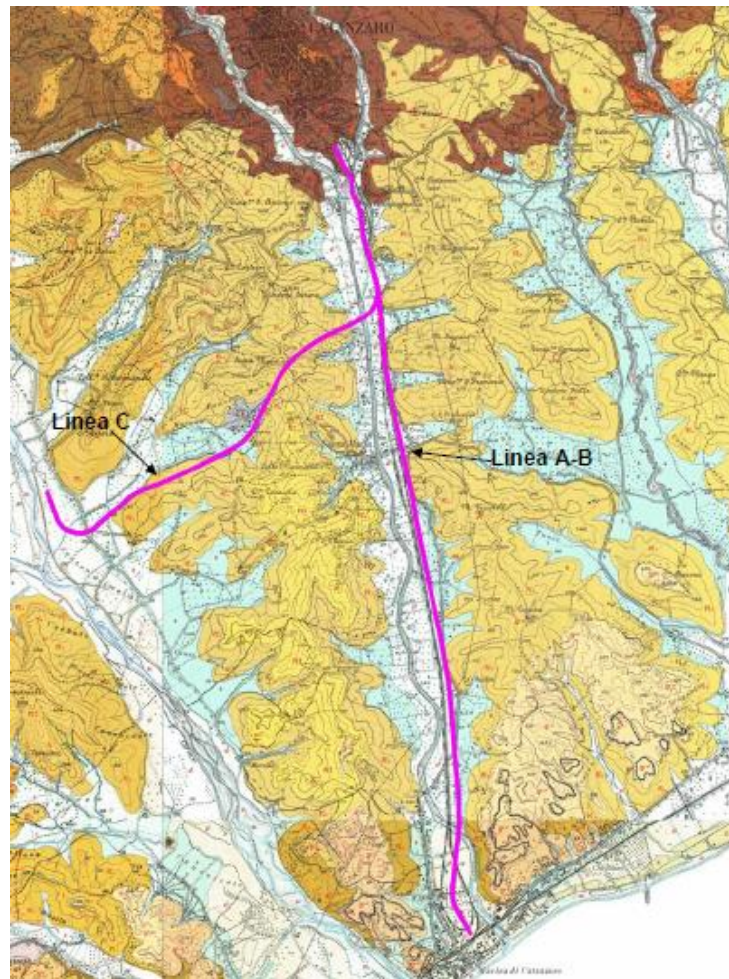
Figura 2.5 Sintesi dei dati disponibili sulle faglie attive della Calabria, (Galadini & al., 2001).

### **2.2.2 Caratteri geolitologici della stretta di Catanzaro ed unità affioranti dell'area di studio.**

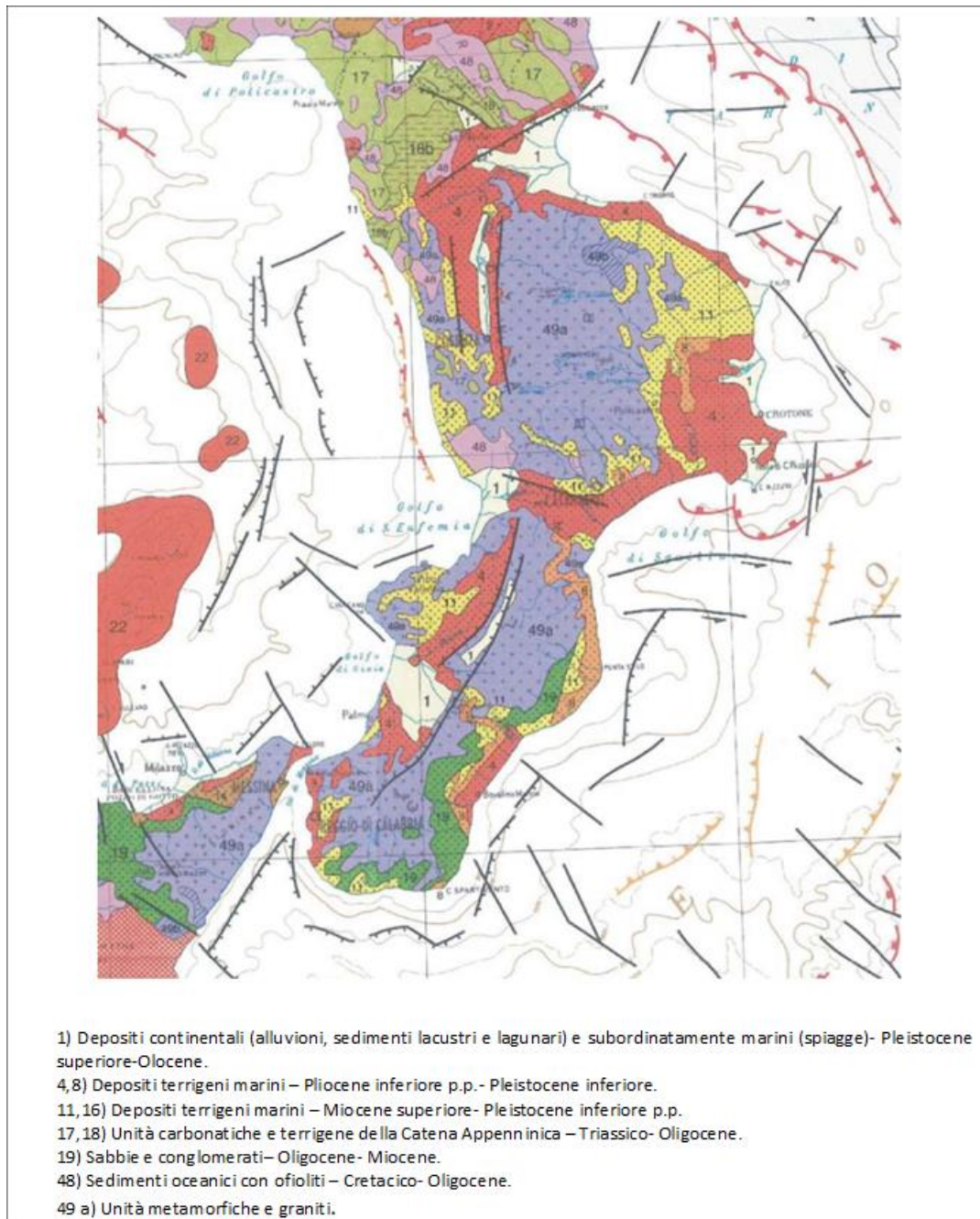
Da un punto di vista geologico-strutturale la Stretta di Catanzaro, come detto in precedenza, è una depressione tettonica denominata "graben di Catanzaro" (Tansi & al., Mass movements and geologic structure of the Pizzotto-Greci slope (Lago, Calabria, Italy)., 1998). Il graben, colmato da depositi plio-quadernari, è stato strutturato da faglie sub-verticali con direzioni prevalenti WNW-ESE (Moretti & al., 1997; Tansi, Muto, Critelli, & Iovine, 2007) che evidenziano cinematismi per lo più normali, con una componente di trascorrenza sinistra che talora può diventare predominante. Esso è interposto tra due *horst* costituiti da unità cristallino-metamorfiche paleozoiche appartenenti all'Arco calabro-peloritano (Amodio-Morelli, 1976) rappresentati, rispettivamente, dalle propaggini più meridionali dei sistemi Catena Costiera-Altopiano Silano e da quelle più settentrionali del Massiccio delle Serre. Lungo il bordo settentrionale del "graben di Catanzaro", la faglia "Gizzeria-Nicastro-Pianopoli-Marcellinara" rappresenta l'elemento tettonico più rilevante su scala regionale poiché giustappone i litotipi cristallino metamorfici paleozoici del sistema Catena Costiera-Sila ai depositi plio-quadernari: tale faglia solleva le propaggini meridionali cristallino-metamorfiche paleozoiche del sistema Catena Costiera-Altopiano Silano rispetto ai depositi tortoniano quadernari di riempimento del graben. Le faglie che strutturano il bordo meridionale del graben di Catanzaro sono riconducibili alle direttrici "Jacurso-Copanella" e "Maida-Case San Fantino". Queste due strutture sono responsabili del sollevamento delle metamorfite paleozoiche dell'Unità di Polia-Copanella rispetto ai sedimenti plio-quadernari di riempimento del graben di Catanzaro. Immediatamente a sud delle suddette faglie, i sistemi predominanti diventano decisamente le faglie estensionali appartenenti al sistema NNE-SSW. L'*horst* del sistema Catena Costiera-Altopiano Silano è costituito da rocce cristallino-metamorfiche paleozoiche d'origine alpina riferibili all'Arco calabro-peloritano e da rocce carbonatiche giurassiche appartenenti ad una sottostante catena appenninica neogenica, localmente affioranti in finestra tettonica.

Con riferimento alla cartografia geologica ufficiale (Carta geologica della Calabria in scala 1:25.000) l'area di studio ricade nei fogli Caraffa di Catanzaro (Foglio 242 IV SO) Catanzaro (Foglio 242 IV SE) e Marina di Catanzaro (242 III NE). Così come si evince dallo stralcio cartografico, esposto in Figura 2.6, e dallo schema geologico della Calabria riportato in Figura

2.7 (Biagi & al., 1989-2000), il tracciato interessa un substrato plio-pleistocenico in facies di argille grigio azzurre con relative coperture colluviali ed alluvionali. A ridosso del Massiccio Silano sono invece presenti sequenze mioceniche, che costituiscono il rilievo su cui sorge il centro abitato di Catanzaro, poggianti sul substrato cristallino-metamorfico paleozoico.



**Figura 2.6** Stralcio della “Carta geologica della Calabria” ottenuto dall’unione dei fogli: Caraffa di Catanzaro (Foglio 242 IV SO), Catanzaro (Foglio 242 IV SE), Marina di Catanzaro (242 III NE) e Squillace (242 III NO). Il tracciato in progetto interessa un substrato plio-pleistocenico argilloso (colore giallastro in figura) e coperture alluvionali (bianco) e colluviali (azzurro). All’estremo limite settentrionale limitate sequenze arenaceo sabbiose mioceniche (marrone scuro), (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).



**Figura 2.7 Schema geologico della Calabria, (Biagi & al., 1989-2000).**

A seguito del rilevamento geologico di dettaglio, e delle indagini geognostiche eseguite nelle diverse fasi, sono state individuate le formazioni geologiche ricadenti lungo l'asse di progetto. Per quanto riguarda la linea A e B e primo ed ultimo tratto della linea C ritroviamo:

- **Depositi alluvionali (Alp)**, sono costituiti da depositi di piana alluvionale e dei bassi terrazzi fluviali fissati dalla vegetazione o artificialmente. La tessitura varia da

sabbioso-ghiaiosa ad argilloso-limosa lungo successioni caratterizzate da una grossolana stratificazione sub-orizzontale. Gli spessori raggiungono generalmente profondità dell'ordine di 10-20 m da p.c., ma in prossimità della parte centrale dei corsi d'acqua principali possono anche superare i 30÷40 m. I depositi di quest'unità presentano proprietà geotecniche variabili a seconda della granulometria (incoerenti o coesivi) e della profondità (con la quale varia il grado di addensamento e di consistenza), e permeabilità molto variabile a seconda del tipo di tessitura. Il contatto con le unità basali è erosivo e irregolare.

Per i terreni che interessano la linea C, come mostrato all'interno dello stralcio della carta geologica riportato in Figura 2.8, si hanno prevalentemente nel tratto tra la gola del Fiume Corace e l'imbocco della galleria naturale:

- **Depositi detritico-colluviali (Dc)**, sono stati così cartografati tutti i depositi di origine detritico-colluviale ed i prodotti di solifluzione e dilavamento. In genere si tratta di accumuli da sabbioso-limosi a (più spesso) limoso-argillosi a seconda dei litotipi plio-pleistocenici affioranti. In alcuni casi possono essere riscontrati elementi ciottolosi. Si tratta di materiali poco consistenti, facilmente erodibili e con permeabilità variabile, generalmente bassa.

La formazione interessata in maniera significativa dalla realizzazione delle opere in progetto, poiché costituisce il rilievo collinare attraversato dalle gallerie artificiali e dalla galleria naturale lungo la linea C, così come evidenziato dal sondaggio SG10 posto nei pressi del Campus universitario, come mostrato in Figura 2.9, sarà costituita da:

- **Argille siltose plio-pleistoceniche (As)**, argille e argille siltose di ambiente batiale, consistenti e dalla caratteristica colorazione grigio azzurra, con intercalazioni siltitiche e sabbiose da grigie a brune. Così come emerso dalle osservazioni di campagna, e dalle perforazioni di sondaggio, la formazione presenta proprietà geotecniche scadenti negli spessori superficiali che costituiscono la coltre di alterazione entro la quale i litotipi si presentano degradati, allentati e fessurati con colorazione bruno giallastra. Le caratteristiche divengono migliori procedendo man mano in profondità, così come messo in evidenza anche dal cambio di colore passante dal bruno giallastro - marrone chiaro della facies alterata a grigio azzurro

della porzione sana, come visibile nella foto della cassetta catalogatrice riportata in Figura 2.10. La permeabilità è molto bassa e la resistenza all'erosione è scarsa. L'elevata alterabilità e la modesta resistenza all'erosione della formazione argillosa impongono la necessità di assicurare un controllo delle acque superficiali e la vegetazione/rivegetazione delle scarpate esposte; ove ciò non avviene possono instaurarsi fenomeni di dissesto superficiali o sub superficiali.

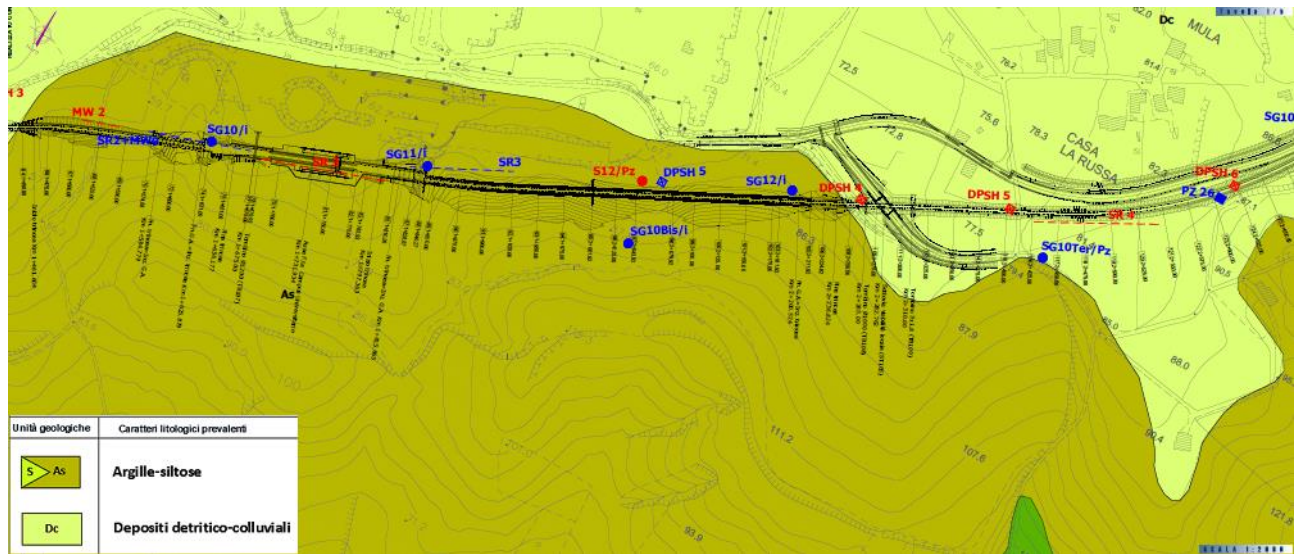


Figura 2.8 Stralcio della carta geologica, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016)



Figura 2.9 Postazione del sondaggio SG10 lungo la linea C. Sullo sfondo il campus universitario, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).



*Figura 2.10 Sondaggio SG10 lungo la linea C fra 0.00 – 5.00 m. È evidente il passaggio fra la coltre alterata di colore bruno giallastro e la formazione sana di colore grigio azzurro, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).*

### **2.3 Caratteri geomorfologici generali della Stretta di Catanzaro**

La Stretta di Catanzaro è un istmo che congiunge la Calabria settentrionale a quella meridionale. Sia la Calabria settentrionale sia quella meridionale costituiscono delle morfostrutture (Gerasimov, 1946) di primo ordine, se rapportate al rilievo emerso, ma in effetti esse mantengono tale caratterizzazione anche se rapportate alla topografia dei fondali ionico e tirrenico. La Stretta di Catanzaro è una morfostruttura di secondo ordine, costituita da una depressione tettonica, essenzialmente un graben trasversale ai rilievi delle morfostrutture di primo ordine. La depressione è emersa nel Quaternario, durante la fase di sollevamento tettonico che ha generato l'attuale configurazione morfostrutturale dell'intero territorio calabrese. La caratteristica morfologia a mesa testimonia l'antico fondale di un mare poco profondo sollevato tettonicamente. Il graben, con orientamento generale ONO-ESE e delimitato dai sistemi di faglie normali organizzate a gradinata, presenta un rilievo massimo di circa 390 m, rappresentato dall'altopiano che ospita gli abitati di Borgia e di Caraffa di Catanzaro. I due centri sono edificati sui depositi terrazzati del Pleistocene. Da Borgia verso SE, il rilievo diminuisce fino ai circa 0÷20 m s.l.m. della piana costiera ionica, grazie ad una gradinata di faglie. Nel settore settentrionale della terminazione di SE del graben, il rilievo è minore ed i depositi terrazzati sono limitati a quote che non superano i 150 m s.l.m.. Verso ovest, il pianoro di Borgia e Caraffa degrada lentamente fino ai 40 m circa



dell'abitato di S. Pietro Lametino. Verso NO, il terrazzo si trova a circa 200÷240 m in prossimità di Vena di Maida ed a quote intorno a 120÷140 m ancora più a nord. Nella parte occidentale del margine settentrionale, il sistema di grandi conoidi di Nicastro ricopre i depositi terrazzati. A nord ed a sud del graben, per effetto delle faglie bordiere, i depositi terrazzati si trovano a quote crescenti verso l'esterno, giungendo fino a 500 m di Jacurso a sud ed agli oltre 350 m a monte di Sambiase. Una caratteristica che differenzia le due terminazioni del graben è la diversità per numero e per quote dei terrazzi e delle superfici spianate. Troviamo infatti un maggior numero di terrazzamenti a NO, rispetto a SE. C'è da notare, in prima istanza, che i terrazzi francamente marini sono limitati alle quote inferiori, mentre a quote superiori, fin oltre i 700 m, si trovano superfici di spianata (probabilmente per abrasione marina) senza sedimenti marini o con depositi continentali. I diversi studi e le molteplici analisi condotte nel tempo consentono comunque di comprendere come la molteplicità di terrazzi e superfici di spianamento, e le loro diversità che non si spiegherebbero con i soli moti eustatici o di epirogenesi omogenea, si giustificano ammettendo tassi di sollevamento tettonico diversi tra i vari blocchi separati da faglie normali, o con rilevante componente normale nella dislocazione tettonica. Nelle aree di affioramento del substrato sedimentario neogenico, dove predominano termini a prevalente componente argillosa, sono diffusamente presenti fenomeni di dissesto che assumono la forma di frane, anche di grandi dimensioni, e/o di degradazione generalizzata per erosione diffusa di tipo calanchivo associata a frane superficiali. Nelle aree in cui dominano i fenomeni franosi, i versanti presentano un'acclività generalmente ridotta. I fondivalle dei vari corsi d'acqua, che provengono dalla Sila e dalle Serre, nei tratti terminali sono piatti e molto estesi in larghezza. Questa caratteristica è marcata soprattutto nella parte nord-occidentale della Stretta, dove sono presenti fenomeni franosi di probabile innesco sismico; i corsi d'acqua che provengono dai monti sboccano da gole profonde e hanno formato e tuttora formano ampie conoidi alluvionali nella parte occidentale della Stretta. Nella parte orientale e nella zona centrale troviamo solo alcune piccole conoidi lungo il versante destro del F. Fallaco, affluente di destra del F. Corace, e tre conoidi che interessano il fondovalle del T. Pesipe affluente del F. Amato. Questa diversità in numero, ampiezza e molteplicità di ordini delle conoidi, differenzia in modo molto evidente la morfologia delle due estremità della Stretta. Il motivo di tale differenza è evidentemente legato ad un maggior trasporto solido nei corsi d'acqua del versante tirrenico, e/o ad una loro minore capacità di trasporto, rispetto ai

torrenti del versante ionico, ma il motivo preciso non è stato finora individuato. La corrispondenza del maggior sviluppo delle conoidi con il maggior numero dei terrazzi indica il probabile effetto del diverso regime tettonico, più discontinuo ed intenso nel tratto occidentale, rispetto a quello più regolare e meno intenso nel tratto orientale. La tettonica rappresenta, quindi, il motivo principale della intensa morfodinamica del territorio della Stretta di Catanzaro, anche se è determinante l'assetto geologico strutturale (che controlla quello morfologico) e il carattere del clima, caratterizzato da forti contrasti stagionali ed eventi idrologici estremi.

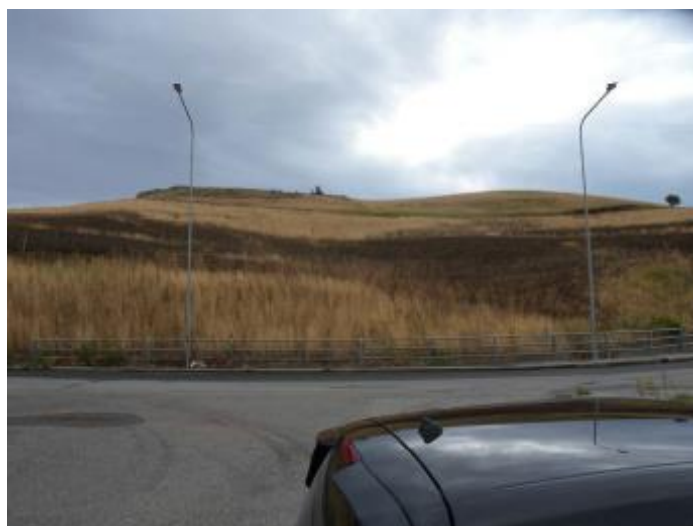
### **2.3.1 Contesto geomorfologico dell'area di studio**

Relativamente all'area esaminata ed in riferimento al Progetto Esecutivo, l'individuazione dei fenomeni geomorfologici significativi, oltre che dallo studio della documentazione bibliografica, è stata ottenuta confrontando foto aeree reperite presso il Centro Cartografico della Regione Calabria relative a periodi diversi. Tutti gli elementi individuati sono stati successivamente verificati in campagna mediante rilevamento di dettaglio. Durante i rilievi di campagna, eseguiti in corso di redazione del progetto esecutivo, sono stati inoltre censiti tutti quei fenomeni non individuati durante lo studio delle foto aeree perché successivi alla data delle foto o perché aventi dimensioni molto ridotte. Inoltre, nei sondaggi specificamente posizionati in corrispondenza di aree ritenute potenzialmente instabili, o prossime agli scavi principali, sono stati installati tubi inclinometrici la cui lettura ha permesso di integrare il quadro informativo disponibile.

La protrazione delle misure nella fase di corso d'opera, e nel post opera per almeno un anno permetterà, a fronte di un periodo di monitoraggio in ambito progettuale limitato a soli sei mesi, di verificare il modello geologico e geomorfologico di riferimento e l'effettiva interferenza fra le opere ed i terreni.

Il tracciato ferroviario in progetto attraversa un settore a morfologia prevalentemente collinare, con bassi rilievi scarsamente vegetati ed interposte spianate vallive, caratterizzato da prevalenti litologie limoso argillose plio-pleistoceniche. Le pendenze dei versanti, dipendenti dalle locali caratteristiche geotecniche e dalla spiccata alterabilità della formazione argillosa di base, sono impostate sugli angoli di riposo dei terreni; risultano pertanto generalmente modeste, attorno ad un valore di 22° ed aumentano repentinamente

laddove si riscontrano formazioni, facies o intercalazioni più competenti. Nel complesso l'intero settore attraversato dalla linea C interessa un sistema collinare poco pronunciato con morfologie dolci e dai profili arrotondati, come si può verificare dalla foto riportata in Figura 2.11, con quote medie variabili da 10 ai 200 m s.l.m., impostato per lo più su un substrato sedimentario plio-pleistocenico a granulometria prevalentemente argillosa e subordinatamente (a quote superiori a quelle d'intervento) sabbioso-conglomeratica. Le condizioni stratigrafiche (prevalenza di terreni argillosi) e climatiche fanno sì che il territorio sia, per propria natura, predisposto al dissesto idrogeologico. La franosità è rappresentata per lo più da colate, creep superficiali, scorrimenti e frane complesse (scorrimenti che evolvono in colamenti). Normalmente i fenomeni di dissesto lungo i versanti sono evidenti durante o immediatamente dopo la stagione umida, mentre in quella arida generalmente si arrestano venendo poi in parte, o completamente, occultati dalle lavorazioni agricole, dalla ricrescita della vegetazione e/o da un susseguirsi di annate particolarmente aride. È quindi evidente come in tale contesto un monitoraggio inclinometrico, qualora impostato in un periodo non particolarmente piovoso e/o sufficientemente esteso, possa fornire riscontri oggettivi non del tutto rappresentativi della effettiva situazione in essere. I dissesti censiti in corrispondenza e nell'intorno dell'asse progettuale sono per lo più riconducibili a fenomeni quiescenti, secondariamente attivi, generalmente superficiali e più raramente poco profondi.



**Figura 2.11** Rilievi collinari argillosi a debole pendenza nella zona del campus universitario, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).

### 2.3.2 Processi gravitativi

I processi rilevati e cartografati risultano essere quelli che, di fatto, condizionano in termini di pericolosità il territorio e, laddove interferenti, l'asse progettuale.

Relativamente allo stato di attività si sono distinti fenomeni:

- attivi, attualmente in movimento o comunque con indizi di movimento entro l'ultimo ciclo stagionale;
- quiescenti, attualmente non in movimento, ma per le quali comunque potenzialmente permangono le condizioni naturali che li hanno originati;

Secondo le nomenclature maggiormente utilizzate (Cruden & Varnes, 1996; Dikau & al., 1996; UNESCO, 1993; Servizio Geologico d'Italia, 1996), i movimenti franosi rilevati e riconosciuti possono essere distinti in:

- **Scorrimenti**, frana di scorrimento osservabile o deducibile da indizi morfologici e/o strumentali. Il movimento è di tipo rototraslazionale ed avviene lungo una superficie di taglio di neoformazione. La direzione del movimento è, generalmente, lungo le linee di massima pendenza. Il fenomeno può avere decorso stagionale.
- **Colamenti**, consistono nello spostamento rapido o lento di masse più o meno viscosi per progressivo aumento del contenuto d'acqua della massa argillosa. Il fenomeno ha decorso stagionale e si esplica a seguito di eventi meteorici molto intensi ed a carattere eccezionale.
- **Frane complesse**, caratterizzano in genere i terreni argillosi e consistono in movimenti complessi di tipo scorrimento-colata, ovvero scorrimenti che evolvono in colamenti.
- **Zona soggetta a deformazione superficiale lenta**, zona soggetta a movimenti molto lenti a carattere areale (soil creep) che non necessitano di pendenze particolarmente elevate. Si esauriscono a profondità modeste (generalmente entro 1÷2 m) e sono diffusi lungo i versanti impostati nei depositi argillosi e nelle coltri eluvio-detritico-colluviali. Questo fenomeno, caratterizzato da una marcata stagionalità.
- **Zona franosa profonda**, zone caratterizzate da movimenti che interessano significative aree di un versante. In genere si tratta di scorrimenti con profondità

dell'ordine di circa 5÷10 m ai quali possono associarsi scorrimenti superficiali che talvolta evolvono in colamenti.

- **Zona franosa superficiale:** zone caratterizzate da fenomeni deformativi superficiali diffusi, spesso non delimitabili singolarmente. Si tratta di fenomeni di erosione superficiale e creep cui possono associarsi frane di scorrimento e complesse con profondità massime nell'ordine di pochi metri. Interessano versanti argillosi ed hanno decorso stagionale.

I principali fenomeni gravitativi individuati sono ubicati lungo la strada della Mula e nella parte centrale della linea C, fra la zona universitaria e la galleria naturale. In tale contesto i dissesti lungo strada della Mula sono riconducibili a diffusi fenomeni di creep e zone franose prevalentemente superficiali.

Particolare attenzione merita invece la tratta posta fra il campus universitario e l'imbocco Germaneto della galleria naturale, dove i rilievi di superficie e le foto aeree hanno messo in luce la presenza di alcuni fenomeni quiescenti, e più limitatamente attivi, al piede, a monte o in asse al tracciato ferroviario. Le misure inclinometriche, disponibili fin dai primi rilievi effettuati su strumenti appositamente installati nel corso della campagna di indagini del Progetto Esecutivo lungo la linea C e la strada della Mula, non hanno evidenziato fenomeni deformativi rilevanti ad eccezione di possibili creep e deformazioni superficiali, di cui si è comunque tenuto conto nella definizione del modello stratigrafico e geotecnico di riferimento. Questi elementi sono in accordo con i riscontri di superficie effettuati sino all'estate del 2015 e con le stratigrafie dei sondaggi. In ogni caso le evidenze di superficie, quelle strumentali e le caratteristiche dei terreni individuano come area potenzialmente critica, dal punto di vista geomorfologico, quella posta lungo la linea C fra campus universitario e galleria naturale, nonché lungo strada della Mula. Particolare attenzione è richiesta nell'ambito della progettazione e realizzazione delle opere, in quanto gli scavi potranno aggravare le condizioni di stabilità dei versanti. In tale contesto oltre a specifici accorgimenti progettuali si è ritenuto opportuno prevedere la prosecuzione del monitoraggio inclinometrico nella fase di corso d'opera, e per un ciclo stagionale nel post operam, al fine di verificare l'effettiva interazione fra le opere, i terreni e le dinamiche geomorfologiche. Qualora nel corso dei lavori gli inclinometri sarebbero stati danneggiati era già stata prevista in fase di Progetto Esecutivo la necessità di sostituirli prontamente

effettuando una nuova misura di zero. In tale contesto per l'attraversamento di queste aree gli scavi dovranno essere contenuti mediante l'adozione di opportune opere di sostegno; in particolare in progetto è stato previsto l'impiego di paratie di pali di grande diametro in approccio ed a cavallo delle gallerie artificiali. Al fine di ridurre le pressioni neutre a tergo delle opere di sostegno, sul fronte delle paratie saranno eseguiti drenaggi di lunghezza non inferiore a 6 m con maglia 2.5m x 2.5m. È inoltre necessario assicurare l'intercettazione ed allontanamento delle acque meteoriche e ruscellanti prevedendo un'adeguata rete di fossi di guardia. Particolare cura dovrà essere data, inoltre, nella rivegetazione delle scarpate al fine di evitare fenomeni di erosione ed alterazione del substrato argilloso; per favorire l'attecchimento della vegetazione si farà uso di geostuoie ed idrosemia. Nel post opera una periodica manutenzione dovrà assicurare la massima riuscita delle opere a verde lungo i pendii, e l'efficienza di fossi di guardia e della rete di smaltimento delle acque meteoriche.

#### **2.4 Inquadramento idrogeologico generale e caratteristiche idrogeologiche dell'area di studio**

La zona di studio ricade in due bacini idrografici principali: l'Amato e il Corace, che drenano la quasi totalità delle acque del versante meridionale della Sila e delle Serre Settentrionali (t. Pesipe e t. Fallaco). La Sella di Marcellinara rappresenta lo spartiacque naturale che devia i due corsi d'acqua suddetti e precisamente il Corace verso lo Jonio e l'Amato verso il golfo di S. Eufemia. Il bacino idrografico del F. Amato ha una superficie di 467,6 km<sup>2</sup>, l'asta fluviale ha una lunghezza di 56,2 km e una pendenza del 1,65 %. Il bacino del Corace ha una superficie di 178 km<sup>2</sup>, la sua asta fluviale ha una lunghezza di 46 km e una pendenza del 5,41%.

L'area in studio è caratterizzata da un tipico clima mediterraneo, con precipitazioni piuttosto modeste e temperature alte nel semestre caldo, e precipitazioni medio-alte con temperature basse nel semestre freddo. Per quanto concerne gli apporti meteorici il regime pluviometrico è caratterizzato da una marcata stagione arida estiva e da un periodo piovoso autunno-invernale, con un brusco avvio delle precipitazioni a ottobre. Per entrambe le stazioni considerate il valore di precipitazione massima mensile si ha a novembre con valori pari a 157 mm e 145 mm, rispettivamente per la stazione di Catanzaro e Catanzaro Lido; il valore

minimo si registra a luglio per la stazione di Catanzaro, con 16 mm, e ad agosto per la stazione di Catanzaro Lido con 12 mm. I dati rilevati sono riassunti all'interno della Tabella 2.1.

DATI PLUVIOMETRICI DISPONIBILI PER IL TERRITORIO DI INTERESSE														
Stazione		Media mensile												Media annuale
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	
Catanzaro (343 m s.l.m.)	mm	148	112	112	66	44	25	16	19	54	111	157	151	1015
	gp <sup>+</sup>	13	10	10	8	6	3	1	2	5	9	11	13	92
Stazione		Media mensile												Media annuale
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	
Catanzaro Lido (3m s.l.m.)	mm	121	89	82	47	33	16	13	12	50	116	145	136	860
	gp <sup>+</sup>	12	10	9	7	5	2	1	2	5	9	9	11	82

**Tabella 2.1** Dati pluviometrici relativi alle Stazioni di Catanzaro, Catanzaro Lido e Caraffa, gp=giorni piovosi, (VIANINI LAVORI S.p.A.; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).

Per una caratterizzazione idrogeologica dei terreni affioranti nell'area in studio le formazioni presenti sono state raggruppate in complessi idrogeologici aventi grado di permeabilità omogeneo. I fattori che condizionano la circolazione idrica sotterranea sono molteplici, ma tutti riconducibili alle caratteristiche idrologiche dei terreni. Queste ultime sono stimate in fase di rilevamento in maniera qualitativa, ed integrate sulla base dei riscontri delle prove in sito effettuate nel corso delle indagini geognostiche mediante prove Lefranc. Com'è noto le proprietà idrogeologiche dei terreni valutabili qualitativamente durante le fasi di rilevamento di campagna sono: il tipo di permeabilità, identificabile nella natura genetica dei meati, primaria o per porosità, e secondaria o per fessurazione, ed il grado di permeabilità relativa definibile in prima analisi attraverso le categorie elevato, medio, scarso e impermeabile a cui sono associabili ampi intervalli di variazione del valore della conducibilità idraulica, (Civita, 1973; William & Warne, 1985; Celico, 1988).

Nel territorio in esame la circolazione idrica sotterranea è influenzata dalla successione di terreni caratterizzati da valori di permeabilità molto variabili. Bassi valori di permeabilità si hanno in corrispondenza dei depositi colluviali aventi composizione prevalentemente fine nonché del substrato pliocenico argilloso-siltoso. Una parziale infiltrazione/circolazione delle acque meteoriche può interessare al massimo i primi metri della colonna di terreno,

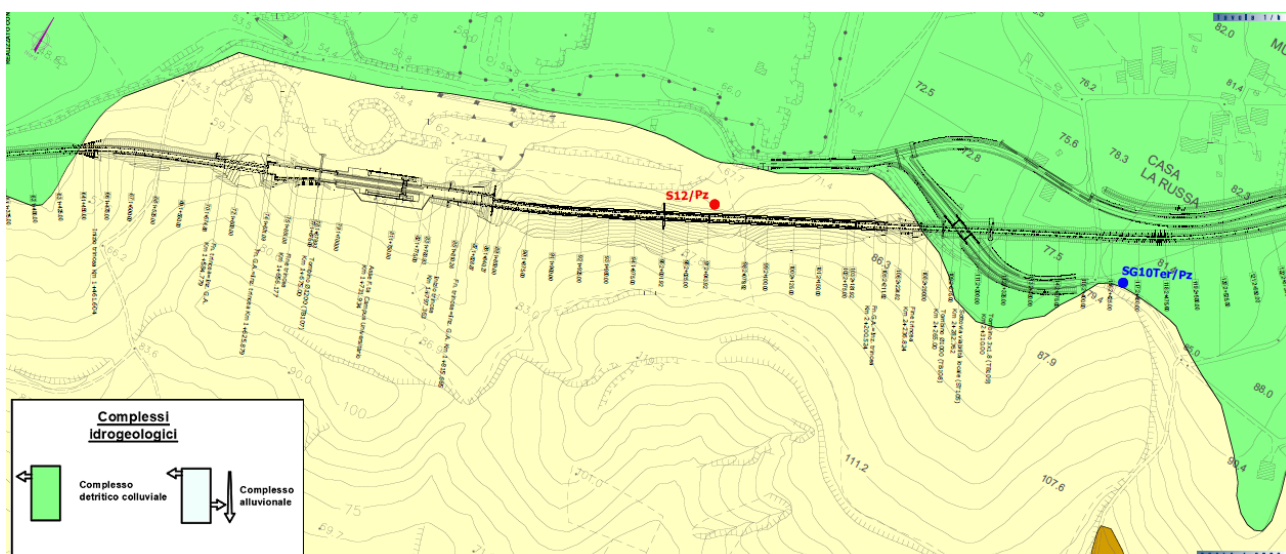
degradati e fessurati, instaurando una modesta e temporanea circolazione idrica sub-sotterranea delimitata alla base dal substrato argilloso-siltoso compatto.

Per quanto riguarda il complesso detritico-colluviale, esso comprende i depositi di natura detritico-colluviale caratterizzati da un grado di permeabilità basso, essendo costituiti da sedimenti prevalentemente limoso-argillosi. Il complesso argilloso-siltoso, che è costituito dalle sequenze argilloso siltose plio-pleistoceniche, è caratterizzato da una porosità primaria alta e da una permeabilità molto bassa. Dunque, l'infiltrazione delle acque di precipitazione in questo complesso è bassa e le acque di ruscellamento tendono a scorrere in superficie favorendo i fenomeni di erosione. A seguito degli eventi meteorici più importanti una ridotta, limitata e locale circolazione superficiale può instaurarsi nei primi metri della colonna di terreno, in prossimità del contatto fra coltri colluviali e/o coltre di alterazione e substrato alterato. Si tratta in ogni caso di falde effimere scarsamente o non alimentate di entità e potenza estremamente limitata.

Lungo la linea C la situazione idrogeologica, mostrata nello stralcio della carta idrogeologica in Figura 2.12, è più eterogenea. Infatti, nei comparti di fondovalle (alle due estremità del tracciato) la falda è ospitata nei depositi alluvionali ad una profondità di alcuni metri da p.c. A causa della bassa permeabilità dei terreni, da valutazioni eseguite in fase di progettazione esecutiva, non ci aspetteremo portate drenate o abbassamenti della falda importanti, potendo quindi approssimativamente escludere una sostanziale interferenza tra i lavori e la falda.

Trattasi in tutti i casi di una falda di entità assai modesta, probabilmente effimera, contenuta in terreni dalla permeabilità bassa o molto bassa. Sulle opere di sostegno è prevista la sistematica posa di drenaggi. Nel tratto in galleria eventuali presenze idriche potranno essere rinvenute in corrispondenza di intercalazioni sabbiose e siltoso-sabbiose puntualmente riscontrate nel corso dei sondaggi all'interno del substrato plio-pleistocenico; eventuali venute saranno comunque modeste e facilmente gestibili. L'elevata alterabilità dei terreni impone che tali acque siano immediatamente allontanate dagli scavi.





**Figura 2.12** Stralcio della carta idrogeologica, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016)

Il sistema idrografico dell'area di studio è caratterizzato da due corsi d'acqua principali che sono, rispettivamente, il Fiume Corace che interessa la parte iniziale della linea C ed il Torrente Fiumarella lungo le linee A e B. In essi drenano due estesi bacini idrografici il cui spartiacque coincide con la zona collinare interposta tra l'area urbana di Catanzaro e la zona di Germaneto, ovvero con i rilievi che saranno attraversati dalla galleria della linea C. In tale contesto le aree maggiormente vulnerabili nei confronti dei fenomeni legati alla circolazione idrica superficiale, ed ai fenomeni d'instabilità, coincide con i rilievi collinari impostati nelle successioni argilloso-siltose plio-pleistoceniche, ovvero con i settori attraversati dalla linea C. Di conseguenza l'attraversamento di questo tratto di territorio pone in primo piano l'attenta progettazione delle opere di captazione e regimazione idraulica, nonché di piantumazione e ripiantumazione dei pendii naturali ed artificiali, al fine di garantirne la stabilità delle opere nelle condizioni di medio e lungo termine.

## 2.5 Caratterizzazione geotecnica

Le indagini geologiche, idrogeologiche e geotecniche previste dal PEA sono state eseguite allo scopo di verificare/integrare il modello geologico e geotecnico alla base della progettazione ed installare la strumentazione per il monitoraggio idrogeologico e geomorfologico dei terreni. Le indagini sono basate su n° 26 sondaggi a carotaggio continuo

per complessivi 635 m lineari a carotaggio continuo, e 65 m a distruzione di nucleo (quest'ultimi limitati ai tratti in galleria a maggiore copertura). Le relative profondità sono comprese fra un minimo di 15 m ed un massimo di 65 m. La quasi totalità dei sondaggi è strumentata. In particolare, sono stati installati n. 19 piezometri a tubo aperto per la verifica dei livelli di falda e n.6 con tubi inclinometrici per il riscontro di eventuali fenomeni deformativi in atto lungo i versanti. Nel corso dei sondaggi sono state eseguite sistematiche prove in sito fra cui n. 60 prove penetrometriche standard tipo SPT (Standard Penetration Test), n. 11 prove di permeabilità di tipo Lefranc (LF), n. 16 prove pressiometriche tipo Menard (MPM). Si è inoltre provveduto al prelievo di campioni geotecnici e campioni ambientali.

Ad integrazione dei sondaggi sono state eseguite inoltre n. 10 prove penetrometriche dinamiche continue superpesanti (DPSH) per complessivi 270 m e n. 9 traverse sismiche a rifrazione (SR) per 1.050 m di stendimento e n. 12 indagini sismiche di tipo M.A.S.W. (MW) per complessivi 900 m di stendimento;

Sulla base dei risultati delle campagne di indagini geognostiche precedentemente descritte, e del rilevamento litotecnico di campagna, è stata predisposta la caratterizzazione geotecnica dei terreni attesi in corrispondenza delle opere e lungo il tracciato ferroviario in progetto, opportunamente accorpati in unità geotecniche distinte dalle sigle A0 – A1 – A2– A3 ed A4. In riferimento all'area oggetto del presente studio sono state riscontrate le unità geotecniche di seguito riportate:

- **Unità geotecnica A0 (unità geologica Dc) - Depositi colluviali**, l'unità, costituita dalle coltri eluvio-colluviali di versante e depositi colluviali di fondovalle a granulometria da argilloso-limosa a limoso-argilloso-sabbiosa, viene mostrata nella foto della cassetta catalogatrice del sondaggio riportata alla Figura 2.13. Nel complesso si tratta di materiali da poco a moderatamente consistenti, da poco plastici a mediamente plastici. L'unità assume rilevante importanza da un punto di vista progettuale poiché il tracciato ferroviario la attraversa lungo estesi tratti della linea C. Lo spessore massimo è dell'ordine di alcuni metri lungo i versanti, e raggiunge i 15-20 m nelle zone di fondovalle. Per quanto riguarda la classifica AASHTO (CNR UNI 10006), sono terreni riconducibili ai gruppi A6 e A7 (sottogruppo A7-6), ovvero "materiali limosi e argillosi".



**Figura 2.13** Depositi colluviali intercettati lungo il sondaggio SG13 (cassetta da 0 a 5 m), (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).

Trattasi di terreni dalle caratteristiche mediocri o scadenti impiegabili tal quale solo per riempimenti e più in generale opere non strutturali. Lungo i versanti i terreni di questa unità sono in più punti soggetti a fenomeni di dissesto (frane di scivolamento rotazionale per superficie di neoformazione e creep), che alla luce delle evidenze di campagna costituiscono fenomeni limitati ai primi 2÷3 m. Per tale motivo in corrispondenza delle opere di sostegno è prevista la realizzazione di drenaggi aventi lo scopo di ridurre le pressioni neutre a carico dei terreni attraversati, opere di ingegneria naturalistica e di captazione ed allontanamento delle acque superficiali. La permeabilità è bassa (5e-8 m/s), anche se può aumentare, a luoghi, in corrispondenza degli intervalli relativamente più ricchi in sabbia e la resistenza all'erosione è scarsa. I parametri geotecnici di riferimento, come riportati nella Relazione Geotecnica di PEA, sono riepilogati nella Tabella 2.2.

Unità	Descrizione	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$c'$ kPa	$\phi'$ °	E MPa	$\nu$
A0	Depositi colluviali	19	5-10	21° in superficie, crescente fino a 23° in profondità	10 MPa in superficie, 25 MPa in profondità, a 20m dal p.c., ovvero in prossimità del contatto con le argille A3 sottostanti	0.30

**Tabella 2.2** Parametrizzazione geotecnica di riferimento dell'unità A0, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).

- **Unità A3 (Unità geologica As) - Argille siltose (plio-pleistoceniche):** l'unità è costituita dai depositi argilloso-limosi e limoso-argillosi plio-pleistocenici, per lo più da mediamente a molto plastici, da consistenti a molto consistenti ed a bassissimo grado di permeabilità relativa. L'unità in esame, attraversata dal sondaggio SG10 la cui cassetta catalogatrice viene riportata in Figura 2.14, sarà interessata in maniera significativa dalla realizzazione delle opere in progetto poiché costituisce il rilievo collinare attraversato dalla galleria naturale e dai tratti in scavo e galleria artificiale lungo la linea C. Diversamente le caratteristiche divengono discrete procedendo man mano in profondità contestualmente ad un evidente variazione di colore (da bruno giallastro a grigio azzurro) ed aumento del grado di consistenza. In tale contesto l'unità è stata suddivisa nelle sotto unità A3a (formazione alterata), A3b (formazione sana) e A3c (formazione sana molto consistente).



*Figura 2.14 Argille-siltose plio-pleistoceniche intercettate lungo il sondaggio SG10 (cassetta da 0 a 5 m), da notare il passaggio tra la coltre alteritica bruno-giallastra (sotto unità A3a) presente nei primi due metri e le sottostanti argille grigie (sotto unità A3b), (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).*

I parametri geotecnici di riferimento così come riportati nella Relazione Geotecnica di PEA sono riassunti all'interno della Tabella 2.3.

Unità	Descrizione	Profondità media da p.c. (m)	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$c_u$ kPa	$c'$ kPa	$c'_{res}$ kPa	$\phi'$ °	$\phi'_{res}$ °	E MPa	$\nu$
A3a	argille-limose da poco a moderatamente consistenti (coltre di alterazione)	0-3	19.5	80-100	8	0	23	21	15-20	0.35
A3b	Argille limose da moderatamente a molto consistenti	3-30	20	150-200	15-20	0	25	23	30-40	0.30
A3c	Argille limose da molto a estremamente consistenti	30-70	20	220-280	20-30	0	27-28	25	50-65	0.35

**Tabella 2.3 Parametrizzazione geotecnica di riferimento dell'unità A3, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2016).**

Il tratto dalla pk 1430 alla pk 2245, che riguarda la porzione di Linea C interessata dal movimento franoso in esame, si snoda per 815 m attraverso la parte inferiore di un versante orientato SW-NE ed impostato nei terreni argilloso-siltosi della formazione plio-pleistocenica che costituiscono l'unità geotecnica A3; questa dal punto di vista litotecnico e stratigrafico è suddivisa nelle seguenti sotto unità aventi caratteristiche, parametri geotecnici e grado di consistenza crescenti con la profondità:

- A3a, che rappresenta il substrato in facies alterata ed allentata dal caratteristico colore bruno giallastro;
- A3b, che rappresenta il substrato in facies sana dal caratteristico colore grigio azzurro;
- A3c che rappresenta ancora lo stesso substrato in facies molto consistente e posto alle profondità maggiori.

Ai luoghi in superficie sono presenti sottili coltri di natura eluvio-colluviale riconducibili all'unità geotecnica A0. Lungo il tratto in esame, dove il progetto prevede la realizzazione di tratti in trincea e galleria artificiale, oltre alla fermata campus, si riscontrano condizioni di criticità e pericolosità geomorfologica. I terreni affioranti, costituiti dalla coltre colluviale e/o coltre di alterazione, sono in più punti soggetti a fenomeni di creep e dissesto superficiale a decorso stagionale. A monte dell'asse progettuale sono inoltre osservabili i coronamenti di due frane di scorrimento quiescenti il cui piede lambisce l'area di intervento. È in ogni caso evidente che questa tratta attraversa un settore caratterizzato da condizioni di stabilità potenzialmente critiche, che peraltro peggiorano ulteriormente durante la stagione umida, dove le evidenze strumentali disponibili sono in linea con le osservazioni di campagna e da foto aeree. In tale contesto a partire dalla progressiva 1+600 gli scavi dovranno essere contenuti mediante opere di sostegno costituite da paratie di pali di grande diametro

tirantate o contrastate su più ordini. Al fine di ridurre le pressioni neutre, ed incrementare le pressioni efficaci, al fronte delle opere dovranno essere previsti drenaggi di lunghezza non inferiore a 6 m con maglia 2.5 m x 2.5 m, disposti a quinconce.

## **3 Movimento gravitativo e monitoraggio dei corpi di frana**

### **3.1 Introduzione**

Scopo del presente capitolo è quello di illustrare l'esito del monitoraggio dei versanti interagenti con la galleria artificiale TG2 tra le progressive 2+002.52 e 2+200.52 circa, nonché di valutare le attuali condizioni di stabilità dei due corpi di frana identificati. La prima parte del presente capitolo richiama la sintesi degli eventi più significativi rilevati a partire da luglio 2018 ed il conseguente piano di monitoraggio successivamente definito. È rappresentata, quindi, l'ubicazione e la descrizione della strumentazione di monitoraggio installata, oltre che i risultati emersi dalla campagna geognostica e di laboratorio eseguita per la caratterizzazione del fenomeno gravitativo. Nella seconda parte sono illustrati sinteticamente i principali risultati emersi dall'acquisizione delle letture topografiche, delle misure inclinometriche e piezometriche, con riferimento al Corpo di Frana 2 oggi ancora attivo, ed al Corpo 1, oggetto di temporanea, parziale instabilità nel recente passato.

### **3.2 Breve cronistoria e descrizione degli eventi**

Le fasi di studio che hanno portato all'individuazione del fenomeno gravitativo in atto ed alla conseguente stesura del Piano di Monitoraggio Integrativo (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2018) possono essere schematizzate secondo la successione temporale di seguito riportata.

#### **3.2.1 Analisi delle letture sugli inclinometri SOTT03 e SOTT04**

È stata in primo luogo realizzata l'analisi delle letture eseguite sugli inclinometri con codifica SOTT03 e SOTT04; questi ultimi, disposti in opera, rispettivamente, nei fori di sondaggio SG10/bis e SG12 e rappresentati nelle Figure 3.1 e 3.2., costituiscono i punti di monitoraggio della componente sottosuolo individuati in fase di redazione del Piano di Monitoraggio Ambientale (PMA) previsto da Progetto Esecutivo. L'inclinometro SOTT03, installato presso l'inizio galleria artificiale alla p.k. 1+850.00 di lunghezza pari a 34.5 m, è collocato nella porzione bassa del pendio a valle delle aree di scavo, in corrispondenza di quello che in seguito verrà definito Corpo di Frana 1. La colonna inclinometrica SOTT04, ubicata nel tratto

finale della galleria artificiale alla p.k. 2+200.14, di lunghezza pari a 24 m, si trova anch'essa nella porzione bassa del pendio a valle delle aree di scavo ed è collocata in corrispondenza di quello che in seguito verrà definito Corpo di Frana 2.

In generale, l'attività di monitoraggio ambientale in Corso d'Opera (CO) sui ricettori in oggetto è finalizzata alla definizione dell'evoluzione delle dinamiche di versante durante l'esecuzione dei lavori da confrontarsi con quanto rilevato in fase Ante Operam. In particolare, la valutazione in Corso d'Opera nel trimestre aprile-luglio 2018 è stata effettuata confrontando i dati acquisiti dalla campagna di rilievi in cantiere con i dati rilevati nel periodo Ante Operam compreso tra giugno e settembre 2017.

Per l'inclinometro SOTT03 le letture eseguite dall'apertura del cantiere hanno registrato quanto segue:

- la presenza di una discontinuità nella distribuzione degli spostamenti con la profondità collocata a circa 3 m dal p.c., indicativa di scorrimenti superficiali;
- la presenza di esigui spostamenti con un'accennata discontinuità alla profondità di circa 11 m dal p.c.;
- l'interruzione di tutte le letture alla profondità di circa 17 m, nonostante la lunghezza ben maggiore del tubo inclinometrico. Tale difformità del tubo inclinometrico, tra i rilievi del PE e quanto eseguito nel PMA, è stata approfondita, nell'agosto 2018, attraverso una dettagliata video-ispezione del tubo stesso. Il dato acquisito ha permesso di identificare un'ostruzione/tranciamento del tubo proprio alla profondità di 17 m circa.

Le letture eseguite sull'inclinometro SOTT04 dall'apertura del cantiere riportano quanto segue:

- la presenza di una discontinuità nella distribuzione degli spostamenti con la profondità, collocata a circa 13 m dal p.c.;
- l'accumulo di spostamenti nella porzione di terreno in frana pari a circa 45 mm.



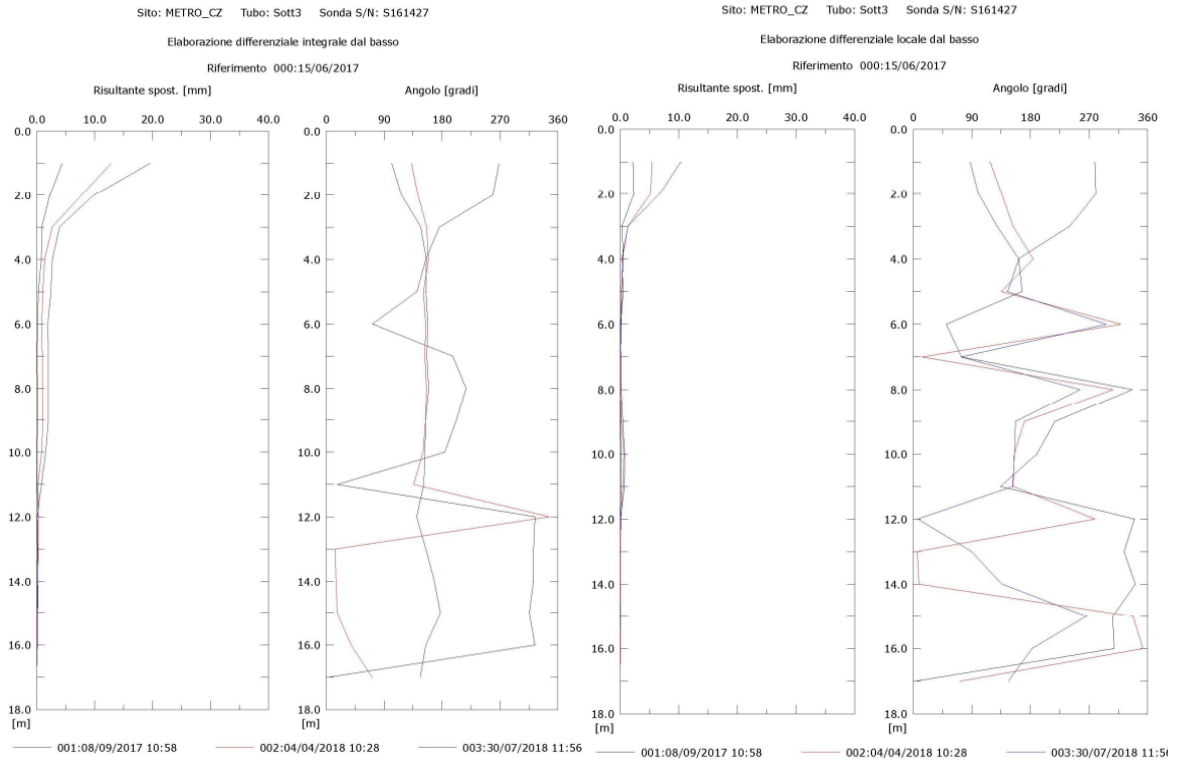


*Figura 3.1 Stralcio aereo fotogrammetrico inclinometro SOTT03, (HYpro, 2018).*

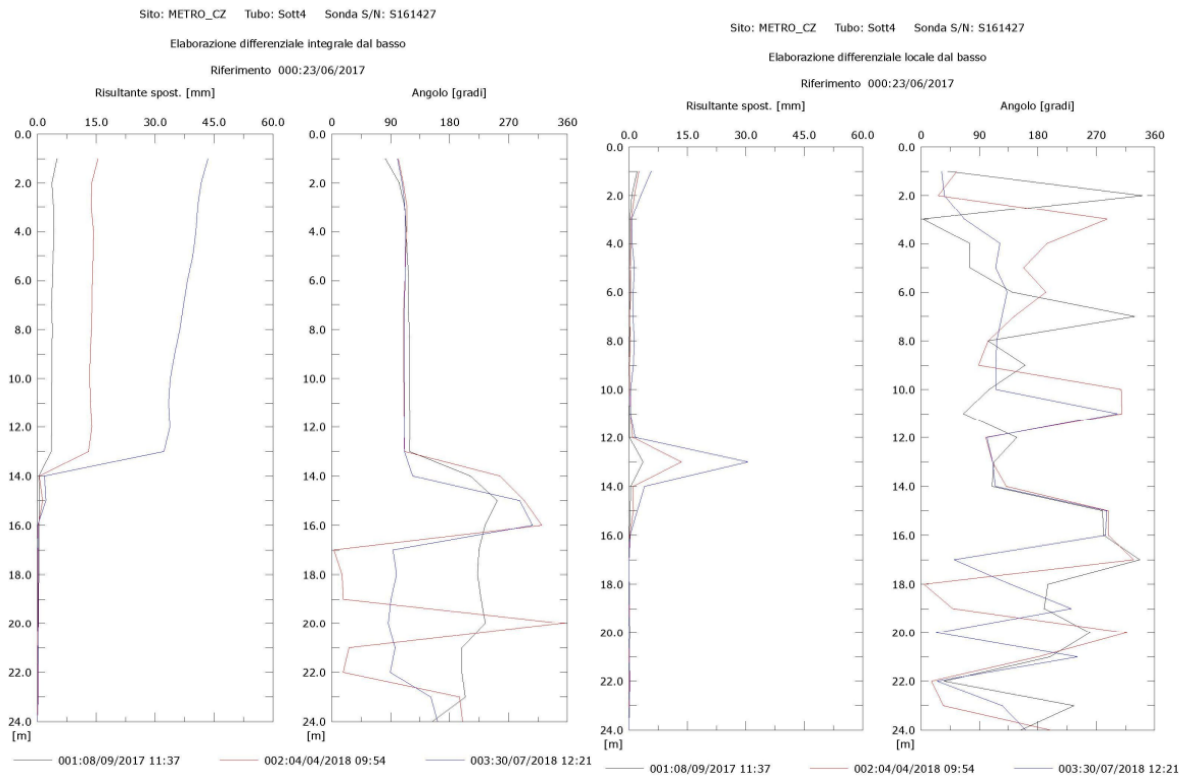


*Figura 3.2 Stralcio fotogrammetria aerea inclinometro SOTT04, (HYpro, 2018).*

L'andamento delle deformate appena descritte sono meglio rappresentate, per l'inclinometro SOTT03 nella Figura 3.3, mentre per il SOTT04 all'interno della Figura 3.4;



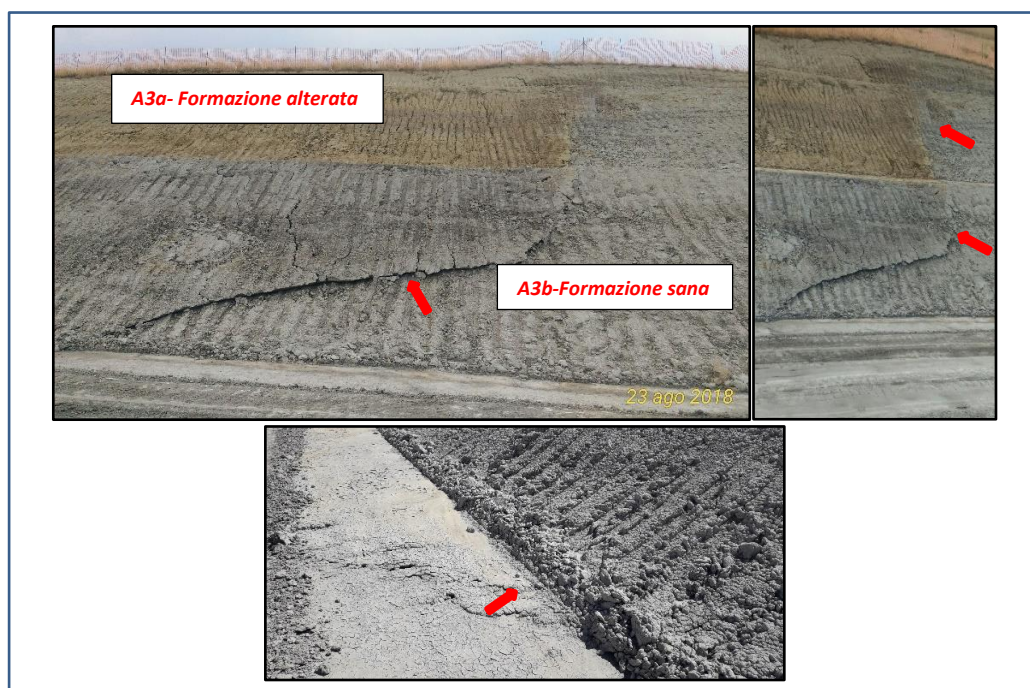
**Figura 3.3 Letture inclinometriche SOTT03, (HYpro, 2018).**



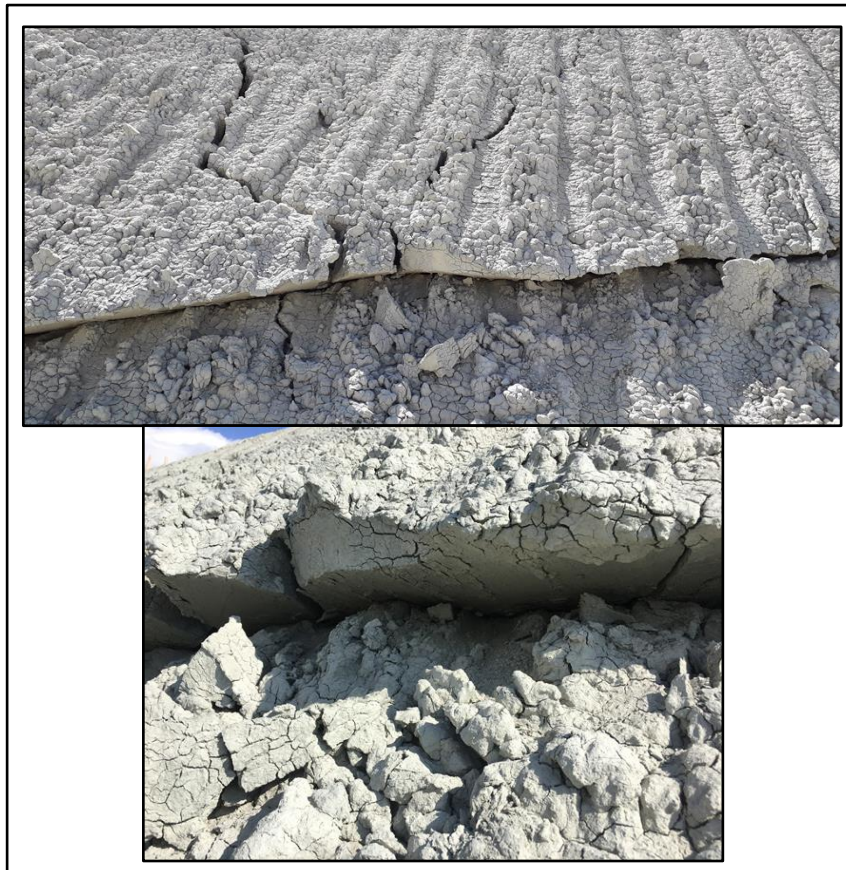
**Figura 3.4 Letture inclinometriche SOTT04, (HYpro, 2018).**

### 3.2.2 Sopralluogo geologico-geomorfologico di dettaglio

Il sopralluogo geologico-geomorfologico di dettaglio è stato realizzato lungo l'intera tratta della Galleria Artificiale tra le Pk. 1+975 e 2+250, esteso sul versante posto a monte delle aree di scavo e nelle aree immediatamente a valle. Il suddetto sopralluogo ha evidenziato, nella porzione superficiale dell'area di scavo compresa tra le Pk. 2+100 e 2+125, un taglio netto e una dislocazione a forma di L, con estensione verso monte e con prosecuzione sul versante. Il taglio suddetto, impostato nell'Unità Geologica As-argille siltose plio-pleistoceniche, interessa in parte l'Unità Geotecnica A3a-formazione alterata e in parte l'Unità Geotecnica A3b- formazione sana (Figura 3.5), ed evidenzia l'avvenuto scorrimento della porzione di terreno soprastante con un rigetto locale di circa 15 cm, come mostrato in Figura 3.6. La dislocazione rilevata si estende fino alla quota del piano di scavo, dove è possibile osservare un leggero rigonfiamento del terreno, indice della probabile prosecuzione della superficie di scorrimento in profondità. Procedendo sul versante posto a monte delle aree di scavo, il rilievo geologico-geomorfologico di dettaglio, supportato da accurato rilievo topografico, ha rimarcato la presenza di una serie di linee di frattura (Figure 3.8, 3.9), la cui distribuzione ed estensione hanno permesso di ricostruire e cartografare l'andamento delle corone principali dei due corpi di frana;



**Figura 3.5** In alto a sinistra è visibile la dislocazione a forma di L sulla parete di scavo nel tratto compreso tra le Pk. 2+100 e 2+125. Si osservi il netto passaggio litologico tra le 2 unità geotecniche A3a e A3b. In alto a destra si può vedere l'estensione verso monte e prosecuzione sul versante della dislocazione. In basso viene mostrato rigonfiamento del terreno in corrispondenza della linea di dislocazione, (Geol. Merenda, agosto 2018).



**Figura 3.6** Particolare della dislocazione rilevata sul fronte di scavo tra le Pk. 2+100 e 2+125 con evidenza del rigetto locale pari a 15 cm circa (Geol. Merenda, agosto 2018).



**Figura 3.7** Linee di frattura rappresentative dell'area di coronamento dei corpi di frana, (Geol. Merenda, agosto 2018).



*Figura 3.8 Linee di frattura rilevate in corrispondenza delle corone dei corpi di frana, (Geol. Merenda, agosto 2018).*



*Figura 3.9 Linee di frattura rilevate all'interno dei corpi di frana, (Geol. Merenda, agosto 2018).*

### **3.2.3 Consultazione foto da drone**

La consultazione delle foto ottenute dalla ripresa aerea con drone riguarda tutta l'area di cantiere nel mese di luglio 2018. La suddetta analisi ha confermato la presenza delle linee di frattura, sia sulla superficie di scavo che lungo il versante, emerse dal rilievo geologico-geomorfologico di campagna (Figura 3.10).



Figura 3.10 Foto della ripresa aerea con drone realizzata nel mese di luglio 2018.

### 3.2.4 Realizzazione rete topografica

È stata successivamente realizzata la predisposizione di una serie di target topografici disposti in adiacenza alle linee di frattura rilevate sia all'interno che all'esterno dei corpi di frana individuati e cartografati; questa operazione si è resa necessaria per la misura e l'evoluzione nel tempo degli spostamenti superficiali, i cui risultati saranno oggetto di un paragrafo dedicato all'interno del presente lavoro di tesi (Figura 3.11).

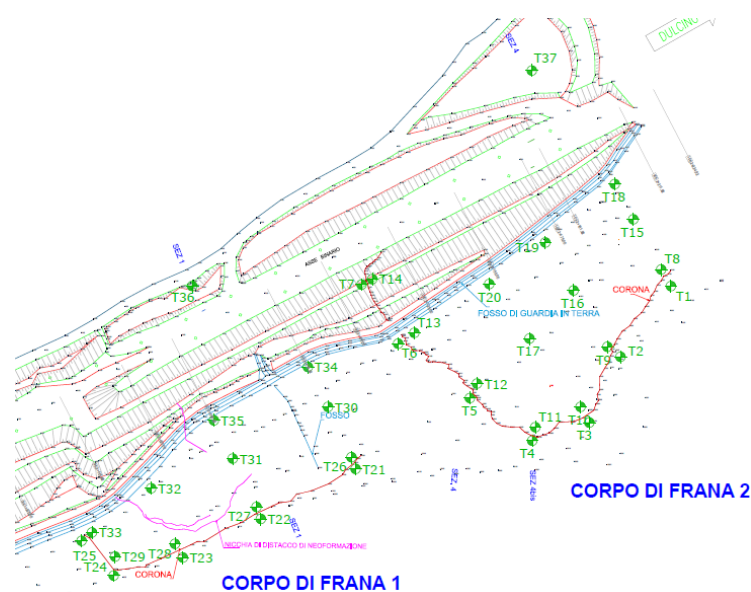


Figura 3.11 Rappresentazione planimetrica della distribuzione dei target topografici per il monitoraggio superficiale dei corpi di frana, 2018 (str92-Studio Tecnico d'Ingegneria, 2018).

### **3.2.5 Ricognizione vecchia strumentazione, installazione di un inclinometro ex novo, e stesura di un Piano di Monitoraggio Integrativo**

È stata realizzata la ricognizione dei piezometri già installati nell'area di esame e verifica del loro funzionamento e sutura temporanea delle linee di frattura identificate sui versanti, in modo da impedire che esse costituissero vie preferenziali di alimentazione della falda idrica sottostante in caso di intensi eventi meteorici.

Inoltre, è risultata necessaria la realizzazione ex-novo di un apposito inclinometro, lungo 26 m installato nei pressi ed in sostituzione del SOTT03 e l'esecuzione di relative letture inclinometriche; ciò al fine di acquisire le letture al di sotto del punto di interruzione del precedente inclinometro (posto a 17 m di profondità) per verificare, confermare e monitorare l'eventuale, ipotetica superficie di scorrimento posta in corrispondenza del suddetto punto. In corso di esecuzione del sondaggio per l'installazione del tubo inclinometrico è stato, inoltre, prelevato n. 1 campione indisturbato di terreno per la definizione delle sue proprietà fisiche, meccaniche e di stato, ed in particolare per la determinazione dei parametri di resistenza di picco e di quelli residui. Nel seguito, nel paragrafo 3.5 dedicato ai risultati delle indagini geognostiche eseguite, è riportata la tabella riassuntiva dei risultati delle analisi di laboratorio.

Infine, è stata effettuata la stesura dettagliata di un Piano di Monitoraggio Integrativo, volto ad acquisire gli spostamenti del terreno ed il regime delle pressioni interstiziali ipotizzati in fase preliminare, mediante l'installazione di un'opportuna rete inclinometrica e piezometrica.

L'acquisizione e l'attenta analisi delle informazioni descritte nei sotto paragrafi precedenti hanno permesso, seppur in via del tutto preliminare, di ipotizzare la presenza di due distinti corpi di frana sul tratto di versante esposto a nord posto a monte delle aree di scavo, compreso tra le Pk. 2+000 e 2+250, caratterizzato dalla presenza di una serie di tagli allineati di ampiezza variabile e locali rigonfiamenti. In particolare, il Corpo di Frana 1, compreso tra le Pk. 2+000 e 2+080 è delimitato da linee di frattura estese limitatamente all'area di cresta, mentre il Corpo di Frana 2 presenta linee di fratture di maggiore ampiezza sia in corrispondenza dell'area di cresta che in corrispondenza dei relativi fianchi laterali. Il processo di instabilità del versante, alla luce del dato inclinometro disponibile, può essere

imputabile ad un fenomeno gravitativo principalmente di tipo roto-traslato, con superfici di scorrimento localizzate a profondità superiori ai 10 metri dal p.c. e a carattere composito per la presenza di componenti più superficiali. Dal punto di vista litologico le unità coinvolte nel processo gravitativo riguardano sia la porzione più superficiale dell'argilla (Unità A3a), caratterizzata da una minore consistenza e da una tipica colorazione brunastra, oltre che da un maggiore contenuto in frazione limosa, sia l'argilla pliocenica più consistente e dal tipico colore grigiastro (A3b). È il caso di sottolineare come il rilievo geologico-geomorfologico di superficie eseguito in più fasi abbia evidenziato una netta definizione della zona di coronamento, mentre nella zona posta a valle dell'area di studio non è emersa alcuna evidenza di zone di accumulo di materiale o porzioni riconducibili all'unghia o al piede di frana.

### **3.3 Piano di Monitoraggio Integrativo**

Il monitoraggio, che si descrive in dettaglio, è finalizzato non solo alla verifica delle ipotesi interpretative scaturite dai dati precedentemente discussi, ma anche alla ricostruzione della geometria dei corpi di frana, sia in superficie che in profondità, ed al rilievo del regime delle pressioni interstiziali che caratterizza i pendii in questione. A tal fine, il piano di monitoraggio ha previsto l'installazione di nuovi strumenti la cui profondità di installazione è stata definita considerando lo scenario peggiore scaturito dalle indicazioni strumentali e morfologiche fino a quel momento disponibili. I dati inclinometrici e piezometrici utilizzati nel presente lavoro si riferiscono alle letture acquisite ed elaborate dalla Società Lagic S.r.l. su incarico della Regione Calabria. Le suddette letture previste dal Piano di Monitoraggio sono state realizzate su 11 sondaggi geotecnici appositamente attrezzati con tubi inclinometrici, di cui in numero di 9 di nuova realizzazione denominati con il prefisso NI, e numero 2 già esistenti, denominati con il prefisso SOTT. Contestualmente alle misure lungo le verticali inclinometriche, è stato eseguito un monitoraggio dei livelli piezometrici attraverso numero 6 fori di sondaggi strumentati con piezometri tipo Casagrande e con piezometri elettrici, denominati con il prefisso NPZ. In fase di installazione della strumentazione è stata, inoltre, eseguita la caratterizzazione geotecnica dei litotipi mediante l'esecuzione di tratti di perforazione a carotaggio continuo e relativa elaborazione dei log stratigrafici, il prelievo di campioni di terreno indisturbato nel corso delle perforazioni e prove di laboratorio mirate alla definizione dei principali parametri geotecnici. È importante precisare che l'ubicazione degli



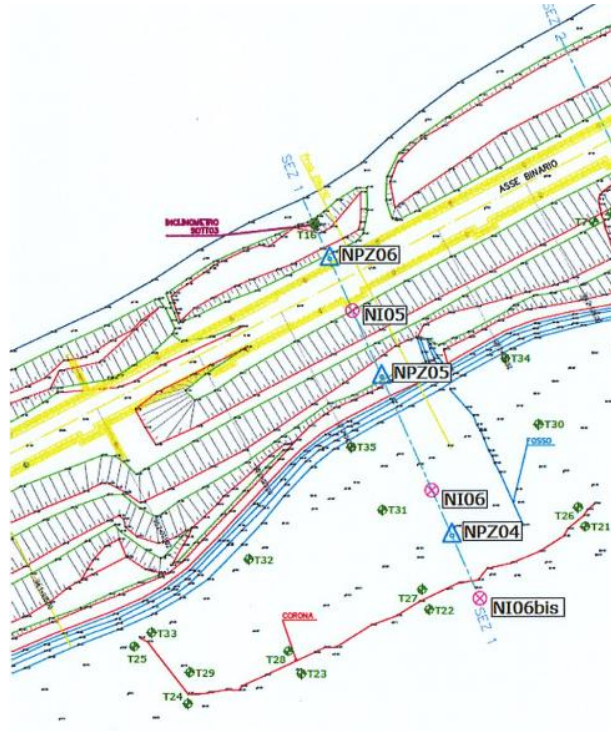
inclinometri in pianta (Figura 3.12 e 3.13) è stata definita tenendo conto della geometria dei corpi di frana scaturita dai rilievi di campo. In funzione della distanza dalla nicchia principale di distacco gli inclinometri sono stati, quindi, posizionati secondo quanto indicato all'interno della Tabella 3.1 di sintesi da cui si evince, per i due corpi di frana, quanto segue:

#### *Corpo di Frana 1*

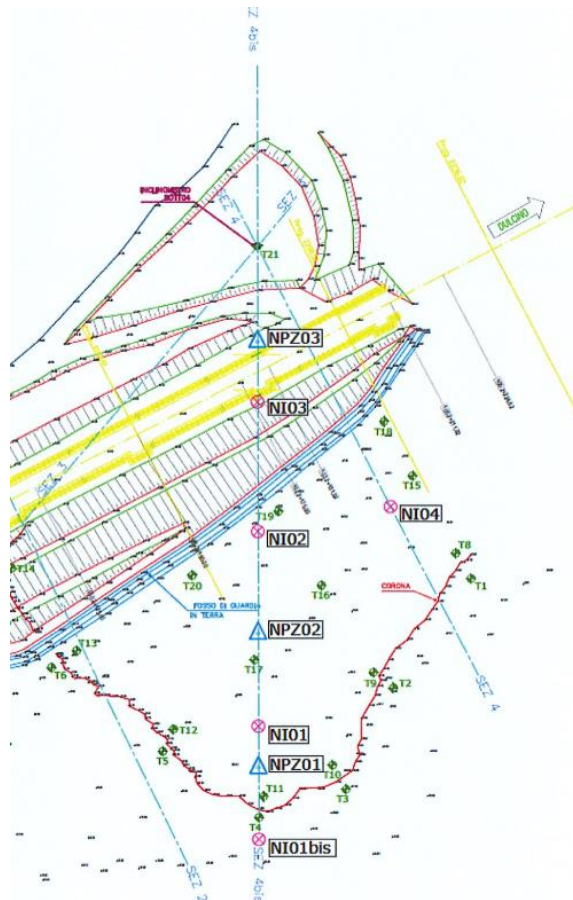
- NI06 in corrispondenza della porzione sommitale del Corpo di Frana;
- NI06bis all'esterno dell'area di cresta per il monitoraggio di eventuali evoluzioni retrogressive e arretramenti della corona di frana;
- NI05 in corrispondenza della Galleria Artificiale Campus TG2;
- SOTT03 già posizionato nella porzione più bassa del versante e a valle della Galleria Artificiale Campus TG2.

#### *Corpo di Frana 2*

- NI01 in corrispondenza della porzione sommitale del Corpo di Frana;
- NI01bis all'esterno dell'area di cresta per il monitoraggio di eventuali evoluzioni retrogressive ed arretramenti della corona di frana;
- NI02 in posizione pressoché centrale del Corpo di Frana e a monte della Galleria Artificiale Campus TG2;
- NI03 in corrispondenza della Galleria Artificiale Campus TG2;
- NI04 in corrispondenza del fianco destro del Corpo di Frana;
- SOTT04 già posizionato nella porzione più bassa del versante e a valle della Galleria Artificiale TG2.



**Figura 3.12** Planimetria ubicazione della strumentazione prevista dal Piano di Monitoraggio Integrativo- Corpo di Frana 1, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2018).



**Figura 3.13** Planimetria ubicazione della strumentazione prevista dal Piano di Monitoraggio Integrativo-Corpo di Frana 2, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2018).

Corpo di frana	Strumento	Posizione in pianta	Lunghezza (m)
2	NI01	Sez.4bis; 18m dalla cresta	35
2	NI02	Sez.4bis, 60m dalla cresta	50
2	NI03	Sez.4bis; 88m dalla cresta	40
2	NI04	Sez.4; 22.5m dalla cresta	40
2	NI01bis	Sez.4; a monte della cresta	20
1	NI05	Sez.1; 60m dalla cresta	40
1	NI06	Sez.1; 20m dalla cresta	40
1	NI06bis	Sez.1; a monte della cresta	20

**Tabella 3.1** Tabella di sintesi posizione-lunghezza degli inclinometri di installazione per il Copro di Frana 1 ed il Corpo di Frana 2 previsti dal Piano di Monitoraggio Integrativo, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2018).

Relativamente al tipo, alla disposizione ed alla profondità di installazione dei piezometri si è tenuto conto sia delle caratteristiche litologiche dei terreni, ed in particolar modo della loro bassa permeabilità, sia della vicinanza alle ipotetiche superfici di scorrimento. Tali caratteristiche sono riportate nella Tabella 3.2 di sintesi riportata in seguito.

Corpo di frana	Strumento	Posizione in pianta	Profondità di installazione (m dal p.c.)
2	NPZ01-corda vibrante	Sez.4bis; 9m dalla cresta	20
2	NPZ02-corda vibrante	Sez.4bis, 38m dalla cresta	30
2	NPZ03-Casagrande	Sez.4bis; 101m dalla cresta	25
1	NPZ04-Casagrande	Sez.1; 10m dalla cresta	15
1	NPZ05-corda vibrante	Sez.1; 46m dalla cresta	25
1	NPZ06-Casagrande	Sez.1; 71m dalla cresta	18

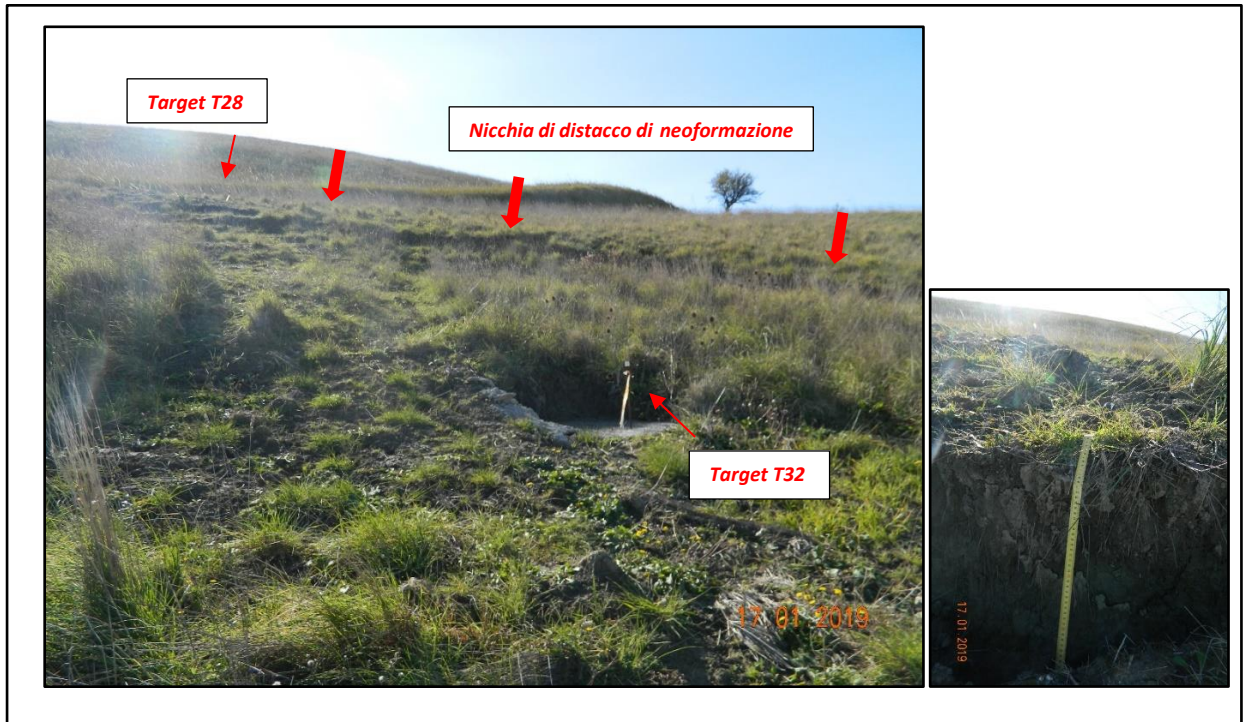
**Tabella 3.2** Tabella di sintesi tipo-posizione-lunghezza celle piezometriche di installazione per il Corpo di Frana 1 e il Corpo di Frana 2 previsti dal Piano di Monitoraggio Integrativo, (VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L., 2018).

È opportuno a questo punto precisare che nell'arco temporale compreso fra i primi sopralluoghi effettuati e l'acquisizione dei dati relativi il primo anno di lettura degli strumenti, si è assistito ad un'evoluzione del fenomeno nel suo complesso, tale da integrare lo stesso piano mediante l'installazione ex-novo di ulteriore strumentazione, in sostituzione o a completamento di quella prevista. In particolare, nel mese di gennaio 2019 nel tratto di Galleria Artificiale compreso tra le Pk. 2+000 e 2+050, già sottoposto a locali dislocazioni ed intensi fenomeni erosivi a partire dalla data di novembre 2018 (Figura 3.14), a causa del protrarsi delle intense precipitazioni meteoriche come mostrato all'interno del grafico in Figura 3.16, è stato rilevato un sostanziale cambiamento dello stato dei luoghi evidenziato dalla presenza di una nicchia di distacco di neoformazione di altezza variabile da 30 a 60 cm e da una serie di linee di frattura di larghezza media pari circa a 15 cm. La suddetta nicchia di distacco, visibile nelle foto in Figura 3.15, appare delimitata dai target topografici T28-T31-T35 e T32 e mostra una geometria ben definita. Essa è localizzata al di sotto della corona di frana principale precedentemente rilevata, si estende in continuità sul fosso di guardia e sulle scarpate poste immediatamente a valle, con completo distacco di materiale. Tale situazione ha comportato la necessità di installare in questa porzione di versante, e quindi in corrispondenza del Corpo di Frana 1, un inclinometro aggiuntivo con codifica NI07, della lunghezza di circa 40 m, al fine di escludere i cinematismi profondi facilmente rilevabili dalla sequenza di inclinometri già previsti. Il repentino incremento degli spostamenti in profondità ha, inoltre, provocato il danneggiamento dell'inclinometro SOTT04 che è risultato fuori uso sin dalla data di lettura di zero, avvenuta il 21/02/2019 e che è stato successivamente sostituito (in data 23/05/2019) dall'installazione, nelle immediate adiacenze, dell'inclinometro NI08. Nella stessa data, inoltre, visti gli spostamenti emersi dalle letture eseguite sull'inclinometro NI04 posizionato sul fianco destro del Corpo di Frana 2, è stato installato in posizione simmetrica ad esso, e quindi sul fianco sinistro del Corpo di Frana 2, un ulteriore inclinometro avente codifica NI09. A causa dell'incipiente movimento il punto di investigazione NI02 è risultato fuori uso a partire dalla lettura di esercizio del 23 maggio 2019 e l'inclinometro NI01 non si è reso più utilizzabile sin dalla lettura del 27 giugno 2019. A far data dal 18 luglio e dal 29 agosto 2019, gli inclinometri NI04 ed NI09 sono entrati in disuso per eccessivo restringimento del tubo alle profondità rispettive di 9 e 15 m; si è proceduto, quindi, con la posa in opera di opportune sonde inclinometriche fisse in corrispondenza delle succitate profondità, al fine di correlare gli spostamenti rilevati e dare

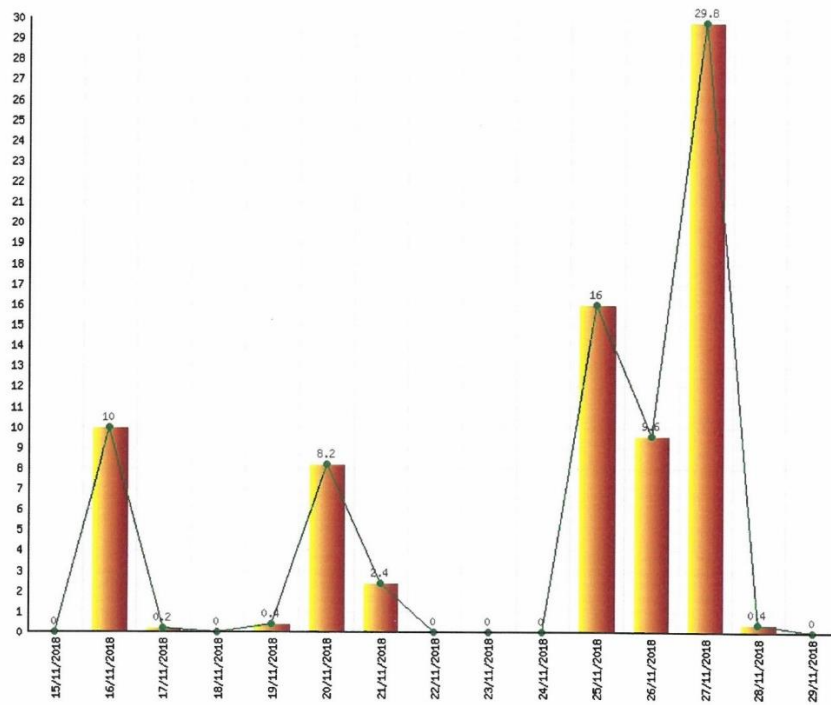
continuità al monitoraggio in corso. L'aggiornamento della planimetria con l'ubicazione della strumentazione per i singoli corpi di frana ad oggi monitorata è riportata in Figura 3.17 e in Figura 3.18.



**Figura 3.14** In alto e al centro è mostrata la dislocazione tra le pk 2+025 e 2+043 al 19/11/2018. In basso a destra l'evoluzione del dissesto sul fronte di scavo tra le pk 2+000 e 2+050 al 28/11/2018 di cui si riporta un particolare della frattura nella foto in basso a sinistra, (Geol. Merenda, 2018).



**Figura 3.15** Nicchia di distacco di neoformazione e particolare della linea di frattura della nicchia, (Geol. Merenda, gennaio 2019).



**Figura 3.16** Grafico delle precipitazioni (mm) degli ultimi 15 giorni di novembre 2018, (ARPACAL, 2020).

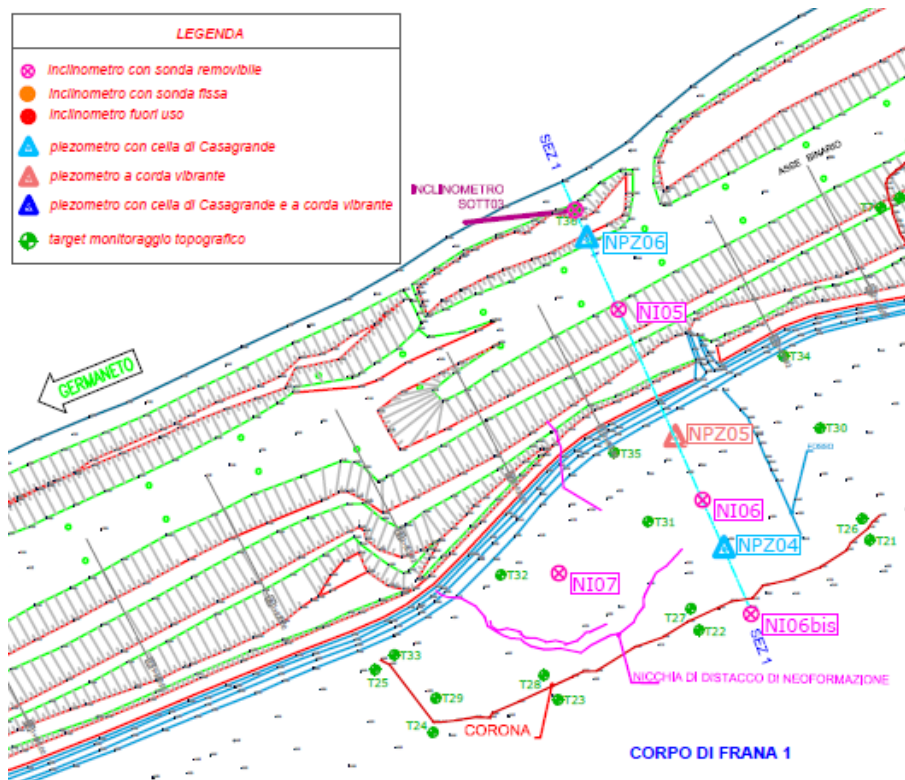


Figura 3.17 Planimetria di ubicazione della strumentazione attualmente attiva nel Corpo di Frana 1, (2020).

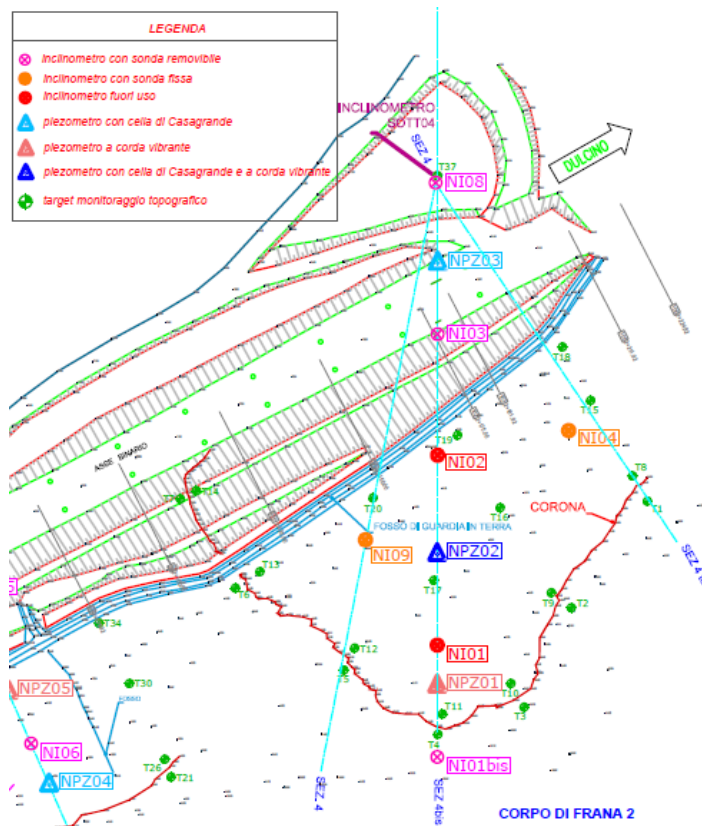


Figura 3.18 Planimetria di ubicazione della strumentazione attualmente attiva nel Corpo di Frana 2, (2020).

### 3.4 Descrizione della strumentazione installata

#### 3.4.1 Inclinometri

Per quanto riguarda le misure inclinometriche sono stati messi inizialmente in opera 11 inclinometri di cui si riportano i nomi e le relative letture di zero in Tabella 3.3 e la rappresentazione planimetrica in Figura 3.18 e 3.19. Le misure sono state eseguite mediante strumentazione di precisione, composta da: sonda inclinometrica Slope Indicator, cavo multipolare da 50.00 metri e scheda National Instruments del tipo PCMCIA con acquisizione delle misure direttamente da computer portatile. La sonda inclinometrica è accessoriata con doppio servoaccelerometro, di elevata precisione, che permette la misura dell'inclinazione in due piani mutuamente ortogonali. La costante strumentale, che determina la risoluzione della misura, per il sistema nel suo insieme è pari a  $65536 \sin \alpha$ , con  $\alpha$  angolo, rispetto alla verticale, alle varie posizioni di misura della sonda. In sintesi, il segnale in uscita viene amplificato di un fattore 65536 per essere meglio apprezzato. Le caratteristiche principali dello strumento sono riassunte in Tabella 3.4.

Sondaggio	Data di Installazione gg-mm-aa	Profondità m	Tipologia tubo	Altezza boccaforo cm	Passo di lettura m	Profondità prima lettura m	Azimut guida principale °
NI01	01-02-2019	31.00	ABS	23.0	1.00	30.00	28
NI01bis	02-02-2019	21.00	ABS	33.0	1.00	20.00	15
NI02	31-01-2019	50.00	ABS	30.0	1.00	49.00	15
NI03	23-01-2019	41.00	ABS	20.0	1.00	40.00	340
NI04	30-01-2019	41.00	ABS	20.0	1.00	40.00	30
NI05	26-01-2019	41.00	ABS	30.0	1.00	40.00	10
NI06	07-02-2019	40.00	ABS	30.0	1.00	39.00	330
NI06bis	06-02-2019	21.00	ABS	30.0	1.00	20.00	315
NI07	09-02-2019	42.00	Alluminio	18.0	1.00	41.00	25
SOT03	10-09-2018	26.00	ABS	30.0	1.00	25.00	335
SOT04*	30-04-2015	25.00	ABS	--	--	--	--

*Nota \* durante la verifica effettuata prima della lettura di zero, con al sonda testimone la stessa si è fermata ad una profondità di 13.00 m.*

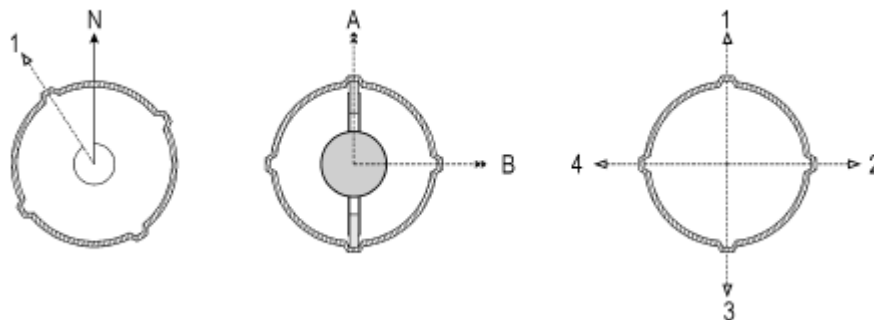
Tabella 3.3 Tabella riassuntiva della strumentazione installata al 21/02/2019, (Lagic S.R.L., 2019).

Passo minimo di lettura	500 mm
Approssimazione di misura	$\pm 0^{\circ} 0' 10''$
Spostamento apprezzabile	0.05 mm
Tolleranza strumentale	0.2 mm/m
Massima inclinazione misurabile rispetto alla verticale	$\pm 30^{\circ}$

Tabella 3.4 Caratteristiche strumentazione, (Lagic S.R.L., 2019).



Le misure in questione sono state eseguite portando a fondo foro la sonda e facendo letture in risalita con passo di 1.00 metro. Si è scelta la prima guida di riferimento, facendo attenzione che la stessa sia quella più prossima alla direzione di movimento aspettata, e si è misurato l'azimut della stessa rispetto al Nord. Questa guida verrà denominata **guida 1**; le altre verranno denominate da **2 a 4** in senso orario. Il sensore giacente sul piano contenente le rotelline verrà denominato **A**, mentre quello giacente sul piano ad esso ortogonale verrà denominato **B**, come mostrato in Figura 3.19. Le due serie di rotelline avranno una rotellina rivolta verso l'alto e una verso il basso, quella rivolta verso l'alto indicherà il verso positivo del sensore A. Il verso positivo del sensore B si trova a 90° in senso orario a partire dal verso positivo del sensore A, come in un riferimento ortogonale cartesiano. Per ogni misura sono state eseguite numero 4 letture posizionando il verso positivo del sensore **A** in ognuna delle quattro guide. I valori sono stati quindi opportunamente mediati. Per verificare la corretta esecuzione delle misure è stato determinato il checksum ad ogni profondità di misura lungo le guide **1-3** e **2-4**. In telecomunicazioni e informatica il checksum (lett. "somma di controllo") è una sequenza di bit che, associata al pacchetto trasmesso, viene utilizzata per verificare l'integrità di un dato o di un messaggio che può subire alterazioni durante la trasmissione sul canale di comunicazione



**Figura 3.19** Sezione del tubo inclinometrico, della sonda e de nominazione delle linee guida (1-3 e 2-4) e dei sensori (A e B), (Logic S.R.L., 2019).

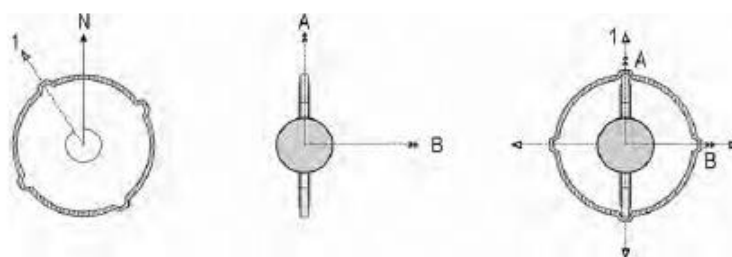
Per l'attendibilità delle misure risulta determinante che il tubo sia ammorso alla base nella formazione "stabile". Le misure vengono elaborate rispetto al punto "fisso" di base, sommando allo zero iniziale i diversi contributi, alle varie profondità, in modo da definire la deformata assunta dalla tubazione alla data della misura (misura di esercizio) rispetto alla posizione iniziale (misura di zero o di riferimento). È da precisare che, pur trattandosi di

sonda di elevata precisione, le misure possono comunque essere affette da “tolleranza strumentale”, che nel caso della sonda utilizzata è dell’ordine di 0.2 mm/metro. Tale imprecisione, anche se relativamente contenuta, può portare ad una valutazione “inesatta” degli spostamenti. In pratica l’entità dello spostamento dovuto alla “tolleranza strumentale” in un tubo inclinometrico della profondità di 20 metri è dell’ordine di 4 mm. Non è praticamente possibile eliminare questo tipo di errore, si può cercare solo di isolarlo, valutando gli spostamenti punto per punto, alle diverse profondità e basandosi sull’andamento dell’azimut. I risultati delle misure, come già detto in precedenza, vengono riportati in forma di tabella ed in forma grafica. Per ogni misura viene fornito l’andamento con la profondità della verticalità per punti, della verticalità cumulata, dell’azimut e del checksum per le coppie di guide. Viene inoltre fornito il diagramma polare. Ogni misura, successiva alla prima, viene messa in relazione con la misura di riferimento in modo da definire l’evoluzione di tutte le misure eseguite alla data di elaborazione. Unitamente ai grafici già detti vengono forniti quindi i diagrammi con la profondità dello spostamento per punti e dello spostamento cumulato.

Le sonde inclinometriche fisse presentano le caratteristiche riassunte in Tabella 3.4. Per l’elaborazione del dato acquisito lo schema di misura ed il procedimento è analogo alle precedenti con la differenza che si effettua una sola lettura rispettivamente per il sensore A e per il sensore B, come mostrato in Figura 3.21.

Sondaggio	Data	Profondità	Boccaforo		Passo
	di Installazione	di installazione	Altezza	Quota	di lettura
	gg-mm-aa	m	cm	m	m
NI04	18-07-2019	9.00	20.0	88.142	0.50
NI09	29-08-2019	15.0	40.0		1.00

**Tabella 3.5** Caratteristiche sonde inclinometriche fisse, (Logic S.R.L., 2019).



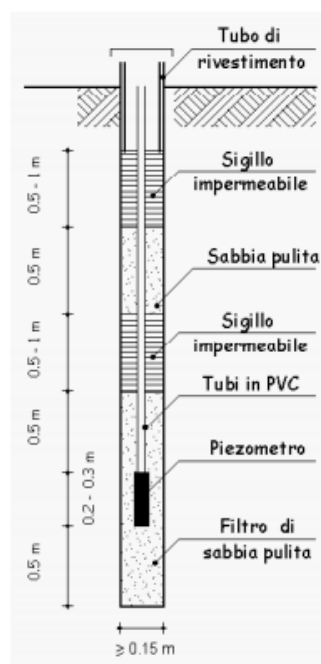
**Figura 3.20** Sezione del tubo inclinometrico con installazione della sonda inclinometrica fissa e denominazione dei sensori, (Logic S.R.L., 2019).

### 3.4.2 Piezometri

Per quanto riguarda le misure piezometriche, i piezometri installati al 21/02/2019 sono riassunti in Tabella 3.6. I piezometri utilizzati sono di due tipologie: piezometri elettrici e celle di Casagrande. Per ottenere una risposta più rapida, in terreni con permeabilità minore a  $10^{-6}$  m/s si impiega il piezometro di Casagrande, schematicamente riportato in Figura 3.2. Questo tipo di strumentazione è finalizzata alla misura della pressione neutra dell'acqua in particolari intervalli di profondità. La cella piezometrica è composta da un filtro a candela, da un telaio, da un tubo di misura da 1/2" ed uno di spurgo in PVC. L'installazione del piezometro ha previsto le seguenti fasi operative:

- preliminare saturazione del filtro poroso ottenuta lasciando lo stesso in acqua per 24 ore prima del suo utilizzo;
- a perforazione completata si è verificato il fondo foro con idoneo scandaglio;
- riempimento del foro con malta di cemento-bentonite-acqua fino alla quota di 1.50 m al di sotto di quella prevista per l'installazione del piezometro;
- posa di un tappo impermeabile costituito da palline di bentonite preconfezionate, costipate con pestello, per lo spessore di 1 metro;
- lavaggio accurato del foro di sondaggio con abbondante acqua pulita immessa dal fondo;
- controllo della profondità del foro;
- posa di uno strato di spessore di 0.5 metri di materiale granulare pulito uniforme e saturo con ritiro dei rivestimenti;
- controllo della profondità del foro;
- discesa a quota del piezometro preventivamente saturato (mantenuto fino a quel momento in acqua pulita) collegando i tubi in andata e ritorno, assicurandosi della perfetta tenuta dei giunti mediante sigillanti idraulici;
- posa di sabbia pulita attorno e sopra il piezometro (0.5 m) con ritiro della colonna di rivestimento e controllo che il piezometro non risalga insieme ai rivestimenti;
- posa di un tappo impermeabile di palline bentonitiche di circa 15 cm costipate con pestello e ritiro progressivo del rivestimento;
- posa di uno strato di ghiaia di 15 cm compattata con pestello;

- realizzazione di un ulteriore strato di 15 cm con palle bentonitiche compattate tramite pestello;
- cementazione del tratto di foro rimanente fino alla sommità con ritiro graduale della colonna di rivestimento;
- spurgo della cella con aria a pressione;
- protezione dell'estremità dei tubi con apposito tappo;
- sistemazione e protezione del piezometro con la creazione di pozzetto in acciaio, ben cementato nel terreno e munito di coperchio con lucchetto e chiavi.



**Figura 3.21 Piezometro di Casagrande, (Università degli Studi di Firenze, 2004).**

I piezometri a corda vibrante, il cui schema è rappresentato in Figura 3.22, sono invece trasduttori di pressione assoluti progettati ed ingegnerizzati per misurare pressioni interstiziali o livelli idraulici (con compensazione atmosferica) che hanno un diaframma metallico che separa l'acqua interstiziale dal sistema di misura. Un filtro metallico tensionato è attaccato a un punto medio del diaframma, la deflessione del diaframma causa cambiamenti nella tensione del filo. Dato che la frequenza di oscillazione del filo varia con la sua tensione, pizzicando il filo nel punto medio con un elettromagnete e misurando con un'altra bobina la frequenza di oscillazione si determina la tensione nel filo e quindi la pressione interstiziale. I vantaggi offerti da questa tipologia di strumento sono:

- la facilità di lettura;
- la brevità dei tempi di risposta;
- l'assenza di problemi di sovrappressione al momento di effettuare la misura presenti invece nel modello elettropneumatico;
- l'assenza di problemi di congelamento;
- l'indipendenza della quota di lettura da quella in cui è posizionato il piezometro;
- la possibilità di misurare le pressioni negative.

I principali limiti sono:

- i problemi di corrosione del diaframma e della corda vibrante;
- la possibile staratura dello strumento nel tempo;
- la necessità di avere una protezione dai fulmini.

I piezometri a corda vibrante installati vengono utilizzati per il monitoraggio di pressioni in terreni saturi, sovrappressioni interstiziali a lungo termine. L'installazione è avvenuta nei modi già indicati per la cella di Casagrande. Le caratteristiche dei piezometri a corda vibrante installati sono le seguenti:

- piezometri a corda vibrante modello VWP-300 (G51-104) Geosens con termistore. Filtro LAE in acciaio. Per pressioni fino a 345 kPa. Costituito da un cilindro in acciaio inox 316 (diametro 20mm – lunghezza 140 mm). Con filtro in acciaio inox sinterizzato con diametro medio dei pori di 50 micron. Bassa resistenza all'ingresso d'aria. Precisione <math><0.25\% \text{ FSO}</math>. Temperatura operativa da

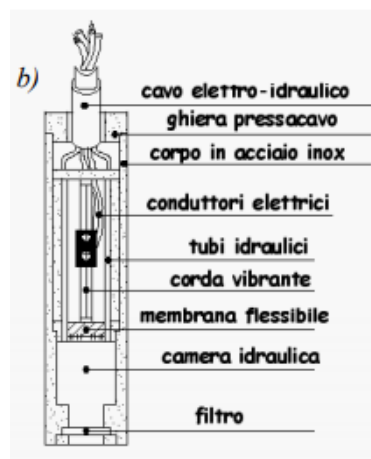


Figura 3.22 Piezometro elettrico a corda vibrante, (Università degli Studi di Firenze, 2004).

### 3.5 Esecuzione e risultati campagna indagini geognostiche e prove di laboratorio

Le attività di monitoraggio previste sono state integrate da un'opportuna caratterizzazione geologico-geotecnica dei corpi di frana; a tale fine sono stati eseguiti, durante l'installazione della strumentazione adottata, una serie di sondaggi a carotaggio continuo alternati ad altre perforazioni a distruzione di nucleo, terebrati a diverse profondità e completati da opportuni prelievi di campioni indisturbati su cui sono state realizzate mirate prove di laboratorio (Figura 3.23). Le operazioni eseguite, realizzate da Idrogeo S.r.l. sono schematizzate nei rapporti di installazione per ogni tubo realizzato, di cui si riportano come esempio quelli riferiti all'inclinometro NI01 in Figura 3.24 e al piezometro NPZ01 in Figura 3.25, in quanto sono stati utilizzati per la ricostruzione della sezione geotecnica riportata successivamente. Da essi si evince l'ubicazione in pianta dei punti di indagine con relativa quota e coordinate geografiche, il tipo di strumentazione installata, il tipo e la profondità di perforazione eseguita, un'accurata documentazione fotografica che riporta sia le diverse fasi di installazione che le carote estratte durante la perforazione.

RIEPILOGO INSTALLAZIONE INCLINOMETRI E PIEZOMETRI					
CODIFICA	Data esecuzione	TIPO DI STRUMENTAZIONE	TIPO DI PERFORAZIONE	PROFONDITA' INSTALLAZIONI [m]	PRELIEVO CAMPIONI INDISTURBATI
NI03	Dal 23_01 al 23_01_2019	INCLINOMETRO	DISTRUZIONE DI NUCLEO	40,80	
NI05	Dal 26_01 al 26_01_2019	INCLINOMETRO	DISTRUZIONE DI NUCLEO	41,00	
NPZ06	Dal 26_01 al 28_01_2019	n.1 PIEZOMETRO CASAGRANDE a 21,5m	DISTRUZIONE DI NUCLEO da 0 a 12m a CAROTAGGIO da 12 a 22m	21,50	C1=12 m. C2=19 m.
NPZ03	Dal 28_01 al 29_01_2019	N.2 PIEZOMETRI CASAGRANDE a 15 e a 25m	DISTRUZIONE DI NUCLEO da 0 a 15m a CAROTAGGIO da 15 a 25m	15 e 25	C1=15 m. C2=20 m.
NI04	Dal 29_01 al 30_01_2019	INCLINOMETRO	DISTRUZIONE DI NUCLEO	40,70	
NI02	Dal 30_01 al 31_01_2019	INCLINOMETRO	DISTRUZIONE DI NUCLEO	50,80	
NPZ02	Dal 31_01 al 01_02_2019	PIEZOMETRO CORDA VIBRANTE A 30 m e Cella Casagrande a 7m	CAROTAGGIO CONTINUO DA 0 A 30,0	30,00	C1=7 m. C2=11.50 m. C3=17 m.
NI01	Dal 01_02 al 02_02_2019	INCLINOMETRO	DISTRUZIONE DI NUCLEO	35,60	
NPZ01	Dal 02_02 al 02_02_2019	PIEZOMETRO CORDA VIBRANTE A 10 m	DISTRUZIONE DI NUCLEO	10,00	
NI01BIS	Dal 02_02 al 02_02_2019	INCLINOMETRO	DISTRUZIONE DI NUCLEO	20,70	
NI06BIS	Dal 06_02 al 06_02_2019	INCLINOMETRO	DISTRUZIONE DI NUCLEO	20,70	
NPZ04	Dal 06_02 al 06_02_2019	PIEZOMETRO CASAGRANDE a 10 m	DISTRUZIONE DI NUCLEO	10,00	
NI06	Dal 07_02 al 07_02_2019	INCLINOMETRO	CAROTAGGIO da 0 a 30 m A DISTRUZIONE DA 30 A 40m	40,00	C1=6,5 m. C2=13 m. C3=17,5 m.
NPZ05	Dal 08_02 al 08_02_2019	PIEZOMETRO CORDA VIBRANTE 16 m	DISTRUZIONE DI NUCLEO	16,00	
NI07	Dal 09_02 al 09_02_2019	INCLINOMETRO	DISTRUZIONE DI NUCLEO	41,00	

RIEPILOGO INSTALLAZIONE INCLINOMETRI					
CODIFICA	Data esecuzione	TIPO DI STRUMENTAZIONE	TIPO DI PERFORAZIONE	PROFONDITA' INSTALLAZIONI [m]	PRELIEVO CAMPIONI INDISTURBATI
NI08	Dal 08_05 al 08_05_2019	INCLINOMETRO	CAROTAGGIO CONTINUO da 0.00 a 20.50 m	20.50	
NI09	Dal 09_05 al 09_05_2019	INCLINOMETRO	CAROTAGGIO CONTINUO da 0.00 a 21.50 m a DISTRUZIONE DA 21.50 a 30.00 m	30.00	

Figura 3.23 Riepilogo installazione degli inclinometri e dei piezometri, (idrogeo S.r.l., 2019).

Metrofc S.C.a.r.l.		Progetto di Monitoraggio dei corpi di frana interagenti con la Galleria Artificiale tra le progressive 2+000 e 2+250 REPORT INSTALLAZIONE INCLINOMETRI E PIEZOMETRI			
Servizio Ferroviario Metropolitan Area di Catanzaro		DATA ESEC.	12.02.2019	CODIFICA	NI01
COMMESSA	Servizio Ferroviario Metropolitan Area di Catanzaro	TIPOLOGIA	INCLINOMETRO	ESECUTORE	IDROGEO S.r.l
UNITA' FISICA	LINEA C	MOTIVAZIONE INSTALLAZIONE			
PARTE D'OPERA	GALLERIA ARTIFICIALE TG2	Monitoraggio corpo frana 2			
PROGRESSIVA	PK 2+145	DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA- Principali fasi di installazione del tubo e lettura di zero -			
DATA DI PERFORAZIONE	01-02.2019				
TIPO DI PERFORAZIONE	DISTRUZIONE				
PRELIEVO CAMPIONI E PROVE LABORATORIO	NO				
LUNGHEZZA TUBO (m)	35				
RIVESTIMENTO (m)	SI 7.50				
COORDINATE RETTILINEE	Ascissa: 637334,636 Ordinata: 4303192,858				
QUOTA ASSOLUTA (m s.l.m.)	97				
STRALCIO PLANIMETRICO					

Figura 3.24 Report di installazione dell'inclinometro NI01, (Metrofc S.C.a.r.l., 2019).

Metrofc S.C.a.r.l.		Progetto di Monitoraggio dei corpi di frana interagenti con la Galleria Artificiale tra le progressive 2+000 e 2+250 REPORT INSTALLAZIONE INCLINOMETRI E PIEZOMETRI			
Servizio Ferroviario Metropolitan Area di Catanzaro		DATA ESEC.	12.02.2019	CODIFICA	NP201
COMMESSA	Servizio Ferroviario Metropolitan Area di Catanzaro	TIPOLOGIA	PIEZOMETRO A CORDA VIBRANTE	ESECUTORE	IDROGEO S.r.l
UNITA' FISICA	LINEA C	MOTIVAZIONE INSTALLAZIONE			
PARTE D'OPERA	GALLERIA ARTIFICIALE TG2	Monitoraggio corpo frana 2			
PROGRESSIVA	PK 2+140	DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA- Principali fasi di installazione del tubo e lettura di zero -			
DATA DI PERFORAZIONE	02.02.2019				
TIPO DI PERFORAZIONE	DISTRUZIONE				
PRELIEVO CAMPIONI E PROVE LABORATORIO	NO				
PROFONDITA' INSTALLAZIONE CELLA (m)	10				
RIVESTIMENTO (m)	SI 3.00				
COORDINATE RETTILINEE	Ascissa: 637334,785 Ordinata: 4303183,253				
QUOTA ASSOLUTA (m s.l.m.)	100				
STRALCIO PLANIMETRICO					

Figura 3.25 Report di installazione del piezometro NP201, (Metrofc S.C.a.r.l., 2019).

L'esecuzione di un'adeguata campagna di indagini di laboratorio ha permesso di ottenere una dettagliata caratterizzazione geotecnica dei litotipi interessati dal movimento franoso. I risultati delle prove eseguite dai Laboratori Lagic S.r.l. e C.m.g. testing S.r.l. sono schematizzati nelle Tabelle 3.6 e 3.7, sia per il Corpo di Frana 1 che per il Corpo di Frana 2.

Tabella riassuntiva prove di laboratorio						
sondaggio	NPZ06	NPZ06	NI06	NI06	NI06	
campione	C1	C2	C1	C2	C3	
prof. (m)	12,0-12,4	19,0-19,25	6,5-7,0	13,0-13,4	17,5-17,85	
<b>Caratteristiche fisiche generali</b>						
Peso specifico dei graniti:	kN/m <sup>3</sup>	26,41	26,44	26,62	26,51	26,36
Peso di volume:	kN/m <sup>3</sup>	19,49	19,57	20,35	20,10	19,36
Contenuto naturale In acqua:	%	23,28	22,80	21,23	22,61	19,98
Peso di volume secco:	kN/m <sup>3</sup>	15,81	15,94	16,79	16,39	16,14
Indice dei vuoti:		0,67	0,66	0,59	0,62	0,63
Porosità:	%	40,14	39,72	36,93	38,18	38,78
Grado di saturazione:	%	93,49	93,28	98,42	98,96	84,80
<b>Granulometria</b>						
Ghiala :	%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sabbia :	%	4,2	3,4	7,8	9,3	1,6
Limo :	%	43,3	37,5	43,0	43,2	47,6
Argilla :	%	52,5	59,1	49,2	47,5	50,8
<b>Limiti di Atterberg</b>						
Limite Liquido :	%	57,0	59,3	45,9	38,6	62,2
Limite Plastico :	%	27,8	33,4	28,6	25,0	35,6
Limite di Ritiro :	%	***	***	***	***	***
Indice Liquido:		-0,2	-0,4	-0,4	-0,2	-0,6
Indice Plastico :	%	29,2	25,9	17,2	13,5	26,6
Indice di Consistenza:		1,2	1,4	1,4	1,2	1,6
<b>Prova di taglio diretto</b>						
<b>Parametri di picco</b>						
Coesione c' :	kPa	20,1	23,2	20,6	13,0	21,8
Angolo d'attrito interno $\phi'$ :	(°)	20,9	20,4	21,3	24,2	22,3
<b>Parametri residuo</b>						
Coesione c' :	kPa	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Angolo d'attrito interno $\phi'$ :	(°)	15,5	16,3	15,8	16,6	16,9
<b>Prova edometrica</b>						
$\sigma$ (KPa)						
50	Mpa					
100	Mpa	8,3	8,6		3,7	7,8
200	Mpa	9,1	9,6		5,9	8,9
400	Mpa	10,2	11,8		8,6	9,9
800	Mpa	14,2	17,5		10,8	16,6
1600	Mpa	22,1	25,5		18,9	25,3
3200	Mpa	36,8	37,6		34,3	37,7
6400	Mpa	62,8	58,2		63,5	51,4
<b>Torvane</b>						
	KPa	> 200	> 200	> 200	100	> 200
<b>Resistenza a pocket penetrometro</b>						
	KPa	500	600	450	180	600

Tabella 3.6 Tabella di sintesi dei risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni indisturbati relativi al Copro di Frana 1, (C.m.g. Testing S.r.l., 2019).



Tabella riepilogativa dati prove geotecniche di laboratorio																						
Sondaggio	Campione	Profondità		Peso Specifico $\gamma_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Peso dei volumi di volumi $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Contenuto naturale d'acqua w	Analisi Granulometrica [%]				Limiti di Atterberg		Prova di taglio diretto (CD)						Compressione edometrica			
		da m	da m				Ghiaia	Sabbia	Limo	Argilla	W <sub>L</sub> [%]	W <sub>p</sub> [%]	Picco		Volume costante		Residuo		$\sigma'_p$ [kPa]	C <sub>c</sub>	C <sub>s</sub>	E <sub>ed</sub> [MPa]
2	1	7,00	7,50	27,63	19,70	0,261		20,0	46,9	33,1	46,8	19,7	30,54	18,68	14,33	18,16	2,47	15,59	725	0,281	0,078	13,3 - 43,9
2	2	11,50	12,10	27,60	19,91	0,250		8,1	55,1	36,8	44,9	20,0	19,32	23,36	9,37	23,36	1,56	20,41	627	0,251	0,065	5,9 - 48,0
2	3	17,10	17,45	28,07	20,67	0,225		5,4	47,7	46,9	57,9	20,9	29,79	17,91	17,65	15,83	0,04	13,98	895	0,186	0,090	25,1 - 65,0
3	1 PA	15,00	15,30	27,82	20,66	0,217		1,4	39,3	59,3	57,9	22,4	23,21	19,34	12,92	18,00	0,02	15,27	442	0,203	0,092	12,4 - 39,9
	590																		0,170	0,081	17,5 - 68,8	
3	2	20,00	20,35	27,95	20,87	0,202		12,2	50,7	37,1	46,3	19,5	30,40	31,47	3,81	25,99	2,82	19,24	842	0,114	0,051	32,1 - 103,3

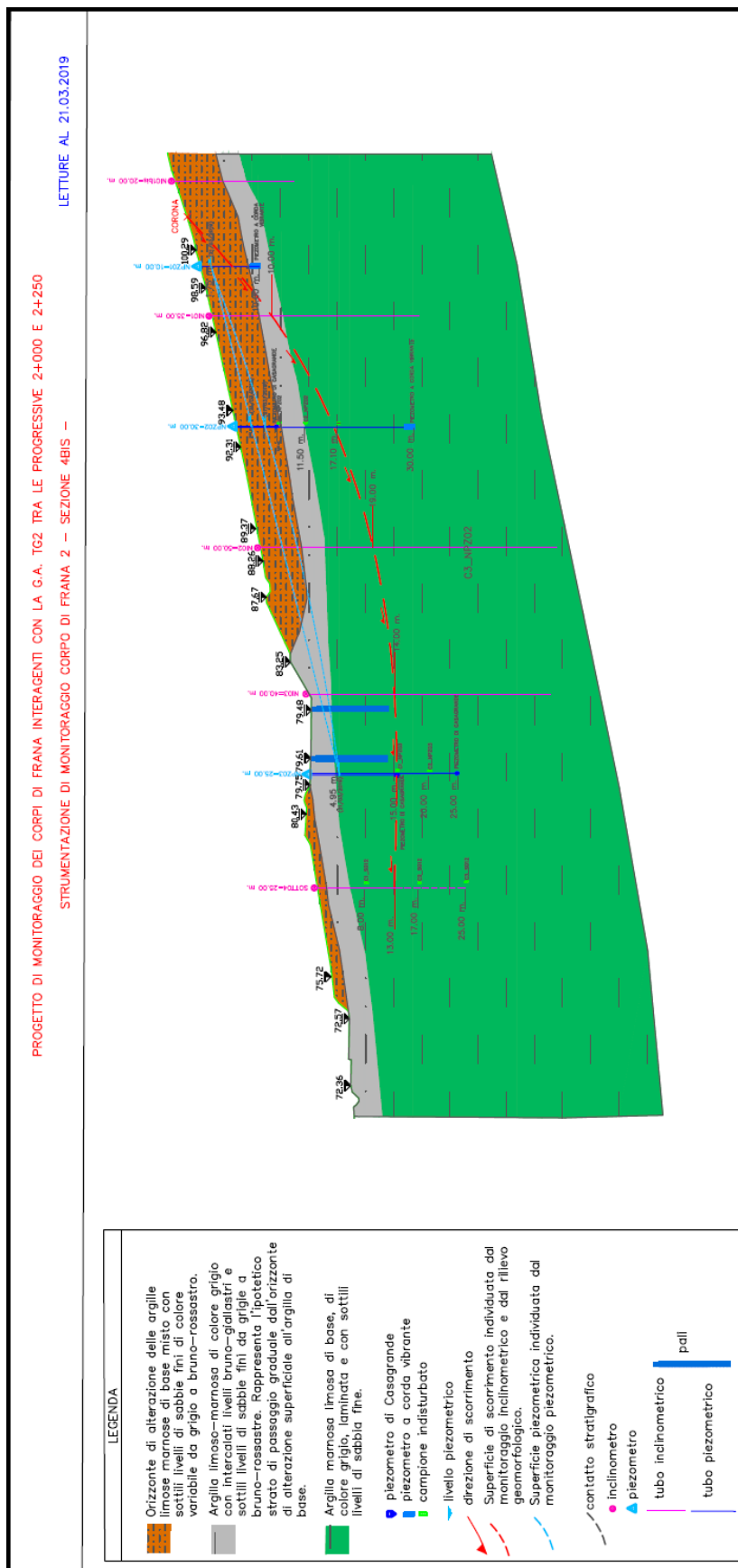
**Tabella 3.7 Tabella di sintesi dei risultati di prove di laboratorio eseguite su campioni indisturbati relativi al Corpo di Frana 2 (Lagic S.R.L., 2019).**

Sono inoltre raccolte le risultanze dei carotaggi sintetizzate in opportuni Log stratigrafici, da cui si possono estrapolare informazioni sulla successione litologica riscontrata in fase di perforazione e su prove speditive sullo stato di consistenza del materiale attraverso prove eseguite con il pocket penetrometer su porzioni di carota estratte. Si è scelto, anche in questo caso, di riportare come esempio il log riferito del piezometro NPZ03, installato sempre sul Corpo di Frana 2 attualmente in movimento (Figura 3.26 e 3.27), di cui è stata costruita una sezione geotecnica rappresentativa.

Dai risultati emersi dalla campagna geognostica eseguita e dall'andamento topografico esistente al momento del dissesto ho ricostruito una Sezione Geotecnica Schematica per il Corpo di Frana 2, attualmente in movimento, in particolare lungo la sezione 4bis, sezione mostrata in pianta in Figura 3.18, orientata secondo la massima pendenza del versante, è stata inserita inoltre la strumentazione realizzata, la successione stratigrafica dei litotipi riscontrati e i relativi contatti, la ricostruzione dell'andamento della superficie e della direzione di scorrimento e la profondità di prelievo dei campioni indisturbati (Figura 3.28).





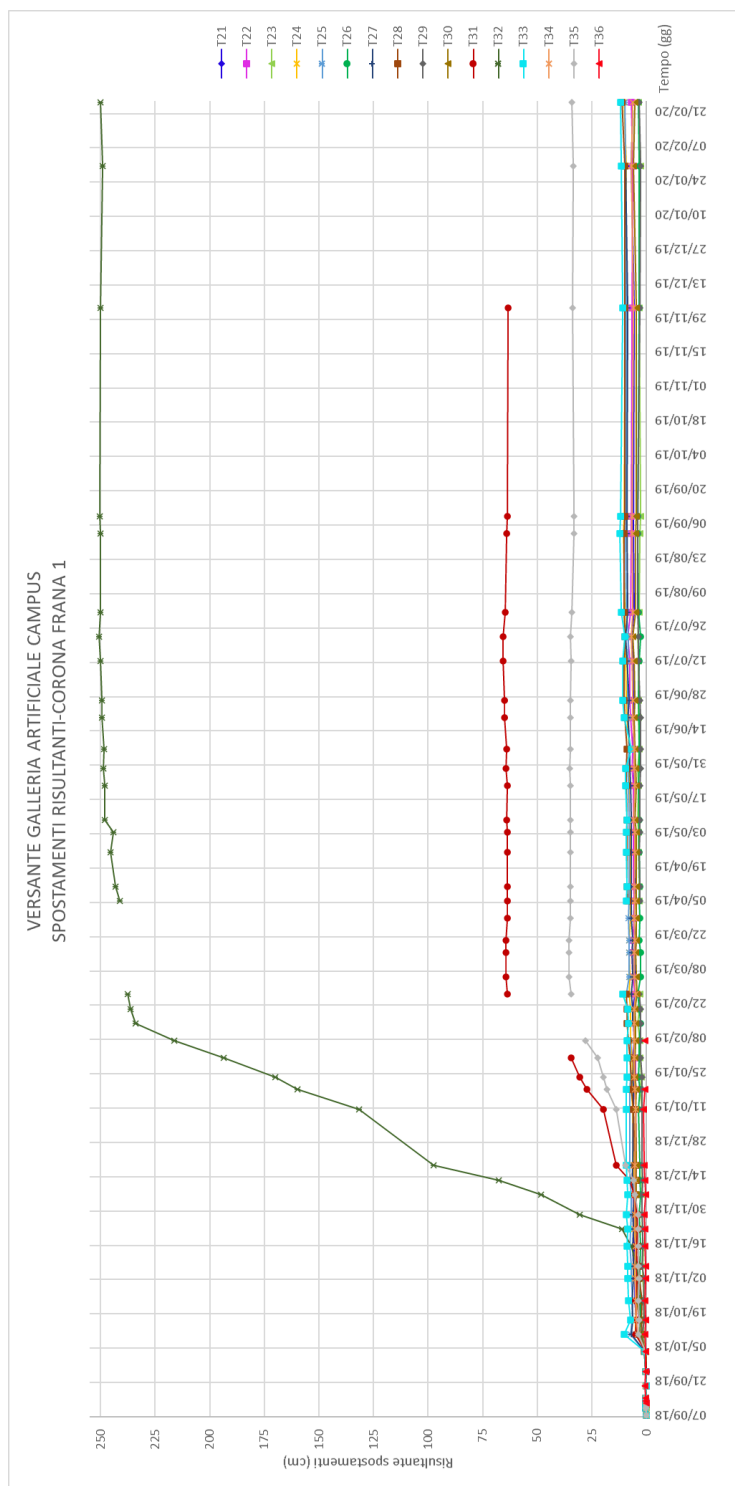


### **3.6 Cronologia del monitoraggio ed elaborazione dell'interpretazione dei dati acquisiti nel primo anno di misure (21/02/2019-02/03/2020)**

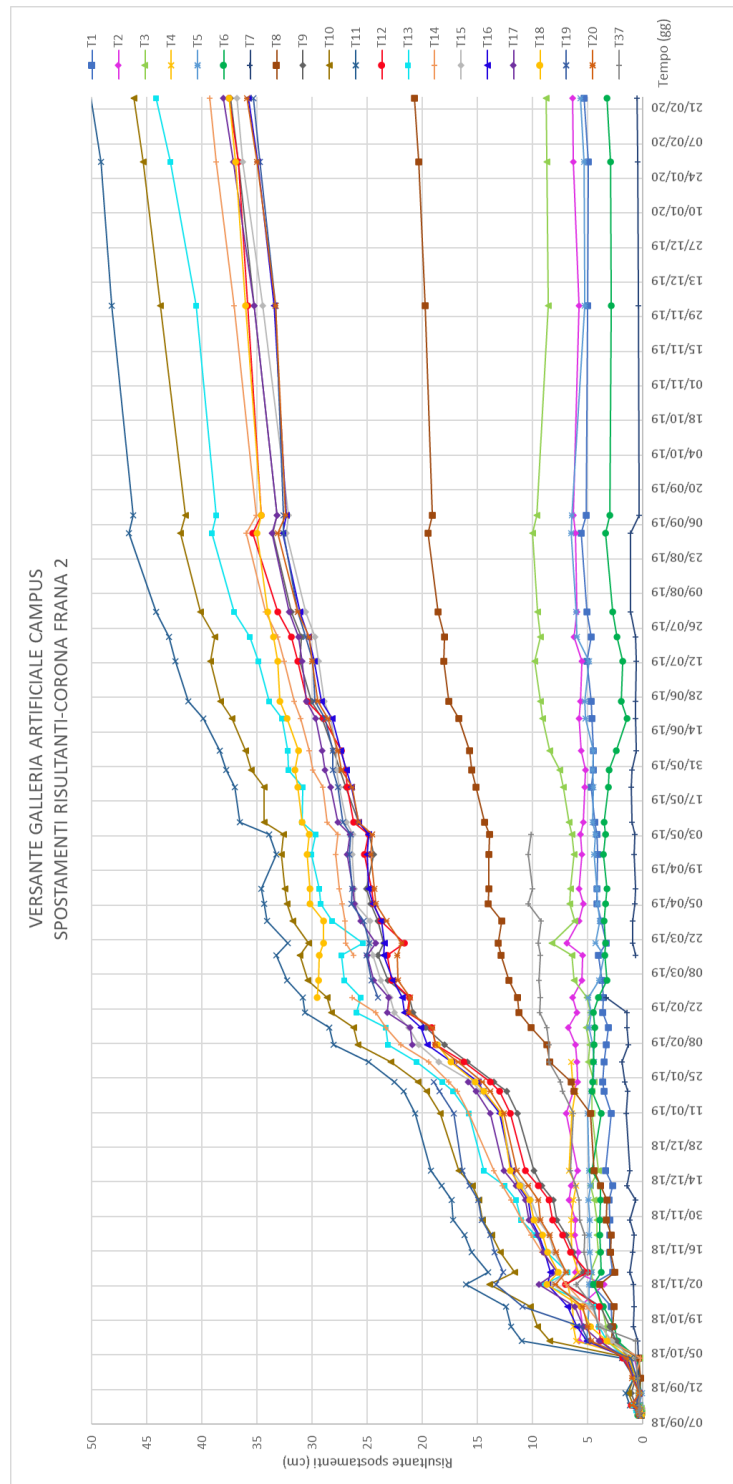
#### **3.6.1 Letture target topografici**

Il monitoraggio topografico è stato realizzato in seguito alle informazioni ottenute dal Piano di Monitoraggio Ambientale che ha evidenziato gli spostamenti precedentemente descritti per gli inclinometri denominati SOTT03 e SOTT04. Prima dell'installazione della strumentazione topografica è stato effettuato un rilievo geologico e geomorfologico di superficie realizzato anche mediante l'ausilio di foto da drone. Per avviare il monitoraggio topografico, tramite rilievi planimetrici e altimetrici di dettaglio, unitamente alla materializzazione di diversi caposaldi di precisione, sono stati posizionati n° 37 target riflettenti su piastrina in acciaio saldata su un tondino, anch'esso di acciaio, di diametro di 16 mm inglobato nel getto di fondazione. La lettura di zero dei 37 target, mostrati nella planimetria in Figura 3.11, è stata eseguita il 07/09/2018, dal 10/09/2018 fino al 14/09/2018 sono state eseguite letture giornaliere per verificare eventuali spostamenti; dal 15/09/2018 la frequenza delle letture è stata di una volta a settimana ad eccezione dei mesi di dicembre e gennaio in cui c'è stato un fermo delle letture di circa 23 giorni. Nei primi mesi del 2019 le letture sono state eseguite con cadenza sempre settimanale mentre dal mese di luglio fino all'ultima lettura disponibile del 25/02/2020 il monitoraggio topografico è stato più sporadico. Si è preferito ridurre il numero di letture in quanto a supporto del monitoraggio, a partire dal mese di febbraio 2019, sono state inserite le letture inclinometriche e piezometriche realizzate con cadenza mensile. Le misure ottiche sono state eseguite tramite una stazione totale motorizzata Trimble S8, con la precisione di 1 secondo. I dati sono stati gestiti tramite un foglio Excel suddiviso in due parti, una per la corona n°1 in cui sono installati i target dal n° 21 al n° 36, e una per la corona n° 2 in cui si fa riferimento ai target dal n°1 al n°20 più il target n° 37. Nel foglio sono riportate la lettura di zero e la lettura del giorno con il delta tra le coordinate rettilinee, Nord-Est-Quota, del sistema utilizzato per la realizzazione dell'opera. Non sempre è stato possibile riportare i delta per tutti i target in quanto a volte la mira è saltata o risultata non leggibile. Sulla base delle letture ottenute è stata condotta un'analisi che ha portato ad evidenziare gli spostamenti che si sono verificati nel tempo per ogni target e le relative velocità di spostamento. Per ogni target è stata calcolata la risultante degli spostamenti in cm, in quanto ritenuti più significativi, a partire

dai delta misurati in direzione Nord ed Est ed in quota, riportati invece in mm. Per ogni target, sia della corona di frana n°1 che per la corona n° 2, sono stati costruiti 37 grafici, uno per ogni target, che hanno mostrato l'andamento delle risultate degli spostamenti in funzione del tempo. Il tutto è stato riassunto in due grafici finali che sono stati riportati rispettivamente in Figura 3.29 per il Corpo di Frana 1 in Figura 3.30 per il Corpo di Frana 2.



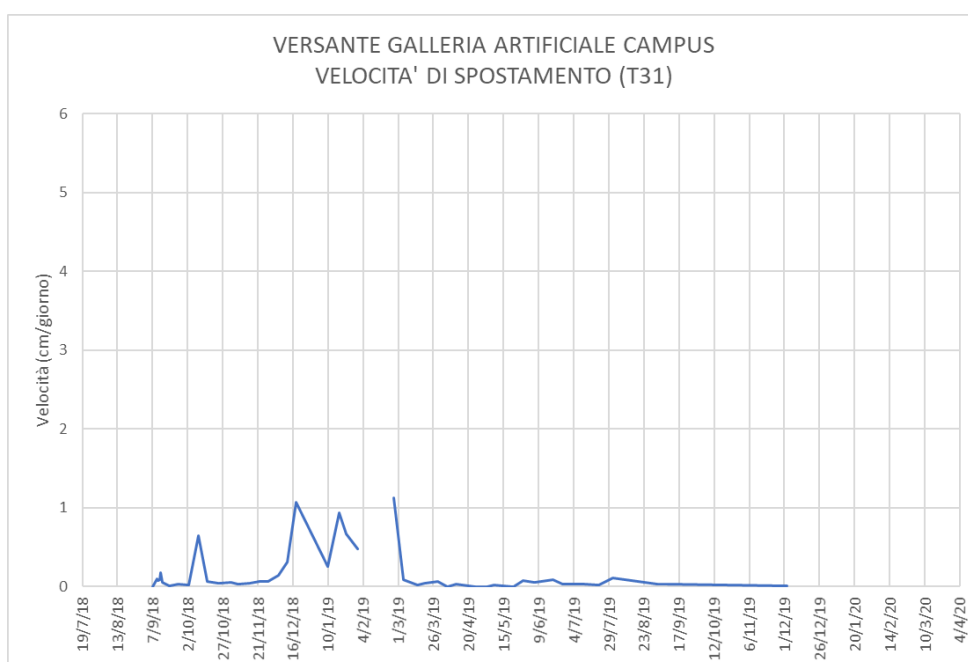
**Figura 3.29** Spostamenti risultanti corona frana 1, (2020).



**Figura 3.30** Spostamenti risultanti corona di frana 2, (2020).

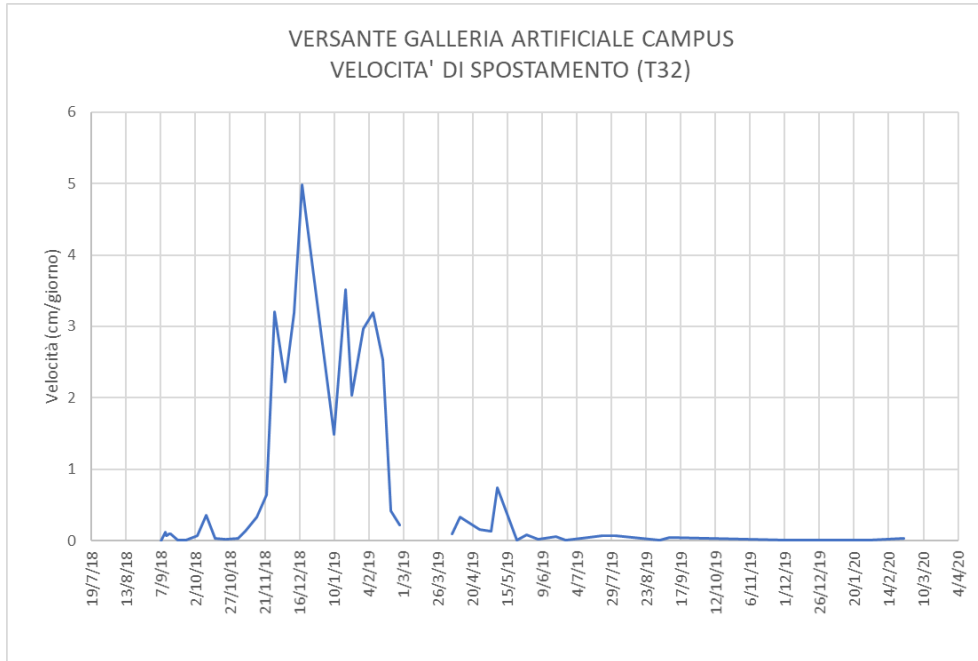
Dai risultati ottenuti per il Corpo di Frana 1 si può notare un picco degli spostamenti nelle letture effettuate a partire dal mese di novembre 2018 fino al mese di febbraio dell'anno successivo. Il dato più importante riguarda il target T32 che ha registrato a partire dalla lettura del 07/02/2019 degli spostamenti oltre i 200 cm, fino ad arrivare ad un valore di 250.6 cm alla lettura del 22/07/2019. In corrispondenza del seguente target è stata infatti rilevata,

successivamente alle due corone iniziali, una nicchia di distacco di neoformazione interna al Corpo di Frana 1, è visibile anch'essa all'interno della planimetria riportata in Figura 3.17. Si è verificata un'erosione verso monte del fosso di guardia ad opera delle acque di circolazione che ha provocato il crollo di parte della scarpata portando così alla richiesta dell'installazione dell'inclinometro NI07 situato all'interno della nicchia stessa, come si può evincere sempre dalla Figura 3.17. Per lo stesso motivo si registrano degli spostamenti rilevanti, anche se meno intensi rispetto al target T32, per i target T31 situato anch'esso nei pressi della nicchia, in cui si raggiungono spostamenti di 65.8 cm e per il target T35 i cui spostamenti arrivano a 35.2 cm. A sostegno di quanto appena detto si è scelto di realizzare anche dei grafici relativi alla velocità di spostamento, sempre in funzione del tempo, per i tre target che hanno registrato dei picchi maggiori, ovvero T31, T32 e T35. La velocità è stata calcolata rapportando la variazione della risultante degli spostamenti tra due giorni di misura consecutivi con il tempo, facendo attenzione ai giorni in cui la mira non era leggibile modificando la formula per calcolare i valori tra le ultime due misure disponibili. Le velocità ottenute in cm/giorno sono mostrate nelle Figure 3.31 per il target T31, nella Figura 3.32 per il T32 e infine nella Figura 3.33 per il T35. Le velocità di spostamento che vengono raggiunte sono più elevate in prossimità del target T32, a conferma degli elevati spostamenti misurati, e raggiungono valori fino a 5 cm/giorno a differenza degli altri due target in cui le velocità si aggirano intorno a 1 cm/giorno per il target T31 e 0.8 cm/giorno per il target T35.

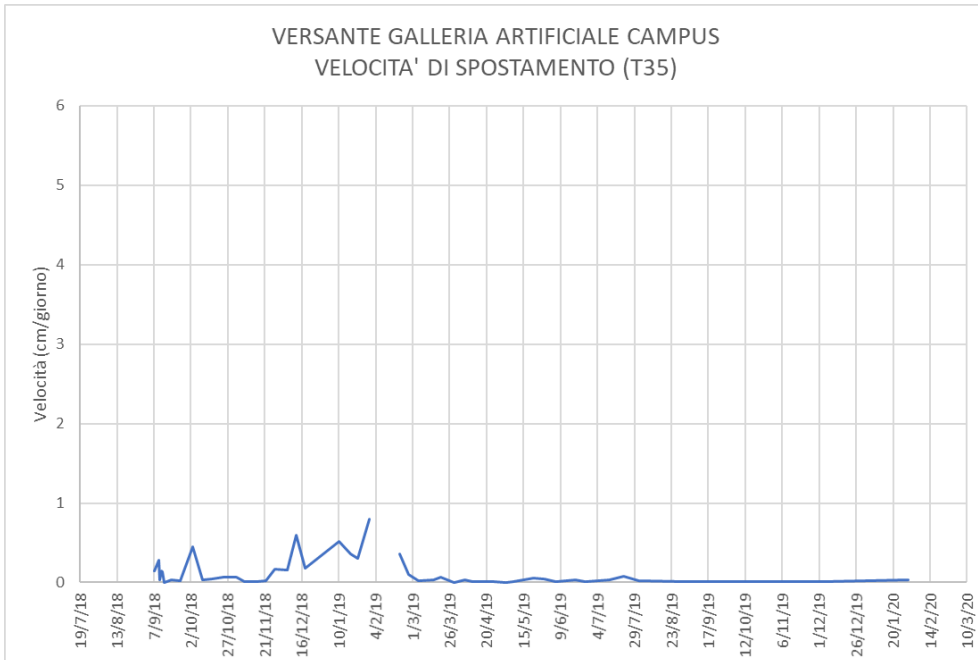


**Figura 3.31 Velocità di spostamento target T31, (2020).**



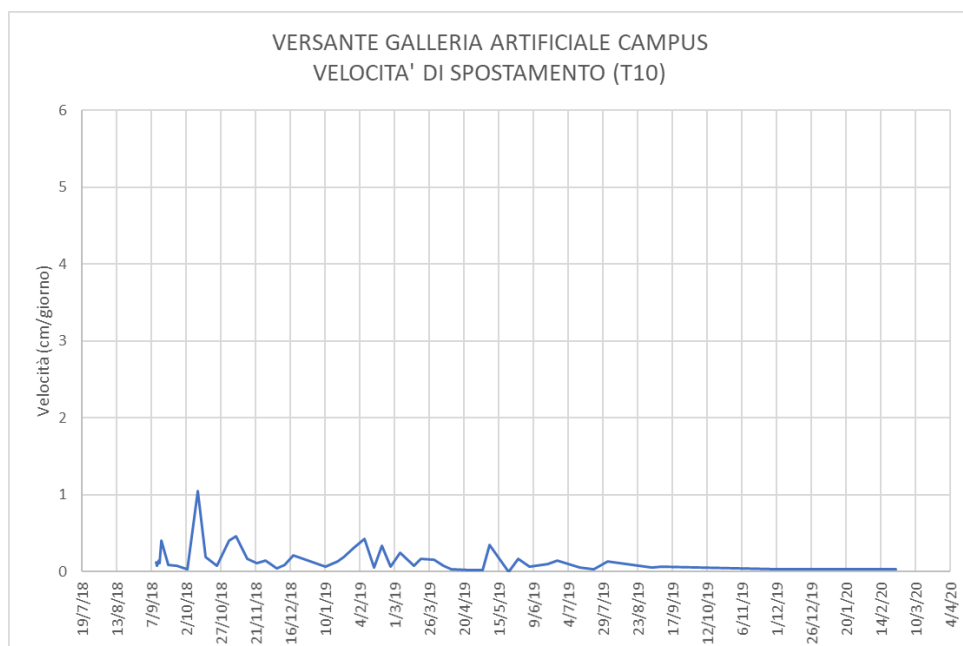


**Figura 3.32** Velocità di spostamento target T32, (2020).

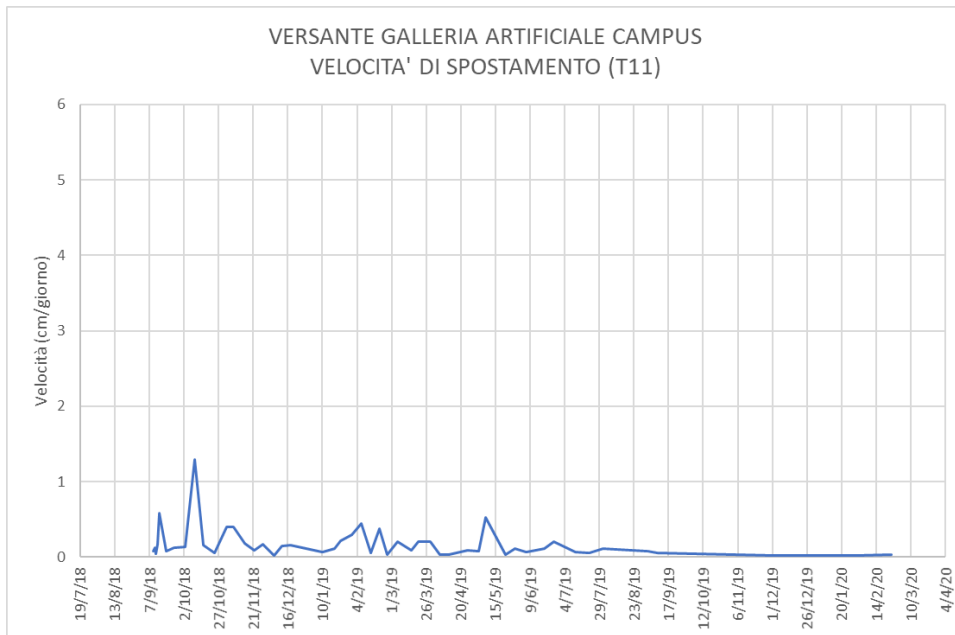


**Figura 3.33** Velocità di spostamento target T35, (2020).

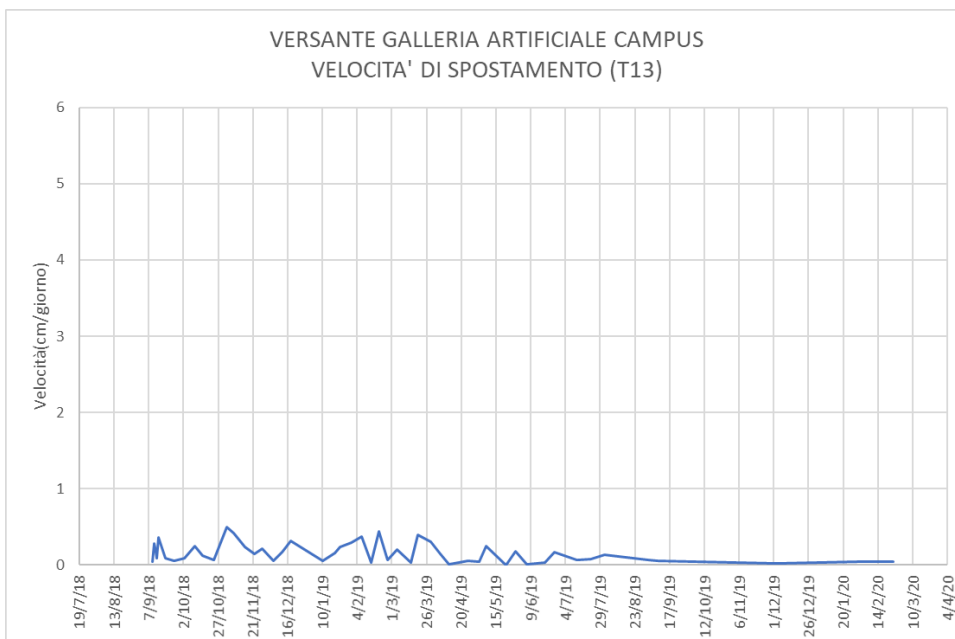
Le stesse analisi sono state realizzate separatamente per il Corpo di Frana 2 in cui la risultante degli spostamenti, espressa sempre in cm, in funzione del tempo, espresso in giorni, presenta un andamento più omogeneo per i vari target. Gli spostamenti maggiori si sono registrati per i target T11, T10 e T13. Infatti, il target T11, in cui lo spostamento ha raggiunto valori pari a circa 50.11 cm, è situato in testa alla corona di frana, ed il target T10 i cui spostamenti risultati si aggirano intorno ai 46.21 cm, è adiacente al precedente. Invece il target T13 è situato al piede del Corpo di Frana e registra spostamenti massimi di 44.17 cm. I valori delle velocità calcolati nel medesimo modo utilizzato per la Corona di Frana 1 hanno fornito i risultati esposti all'interno delle Figure 3.34, 3.35 e 3.36, in cui a differenza del Corpo di Frana precedente vengono individuate delle velocità minori per tutti e tre i target descritti, che raggiungono valori massimi pari a 1.30 cm/giorno, velocità riferita al target T11, confermando che le velocità maggiori si registrano in prossimità dei target che hanno misurato spostamenti maggiori. Per i target T10 e T13 le velocità massime registrate sono rispettivamente di 1.05 cm/giorno e 0.49 cm/giorno.



**Figura 3.34 Velocità di spostamento target T10, (2020).**



**Figura 3.35 Velocità di spostamento target T11, (2020).**



**Figura 3.36 Velocità di spostamento target T13, (2020).**

### 3.6.2 Letture inclinometriche

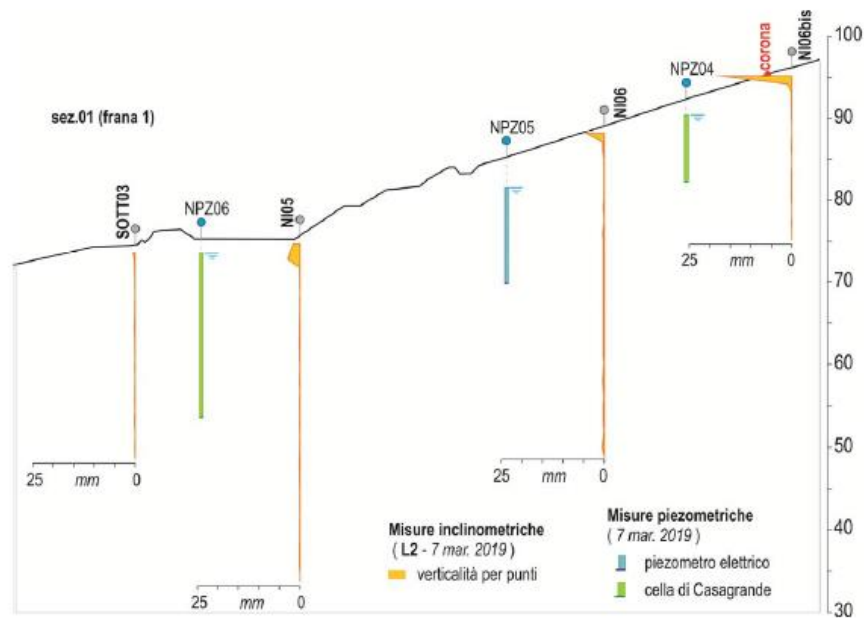
Per tutti gli strumenti installati si è proposto di effettuare, dopo la lettura di zero, letture inizialmente con cadenza settimanale per i primi tre mesi per poi procedere per i successivi nove mesi con letture mensili. Le letture strumentali, alla proposta iniziale erano state definite per almeno un anno a partire dalla misura di zero, proposta che poi è stata prorogata per un altro anno a partire da marzo 2020. La lettura che ha concluso il primo anno di monitoraggio è stata effettuata il 02/03/2020, le cui considerazioni conclusive sono riportate nella parte finale del paragrafo. Si è ritenuto che i dati raccolti dopo i primi tre mesi di misure siano stati significativi al fine di ricostruire le condizioni di stabilità dei versanti, sebbene tali dati possano esser stati affetti da variazioni stagionali il cui ruolo può essere valutato solo dopo aver condotto il monitoraggio per almeno un anno. Per quanto riguarda le prime due letture, denominate L0 e L1, sono state realizzate rispettivamente in data 21/02/2019 e 28/02/19. Anche per la seconda lettura, la prima di esercizio con esecuzione prevista solo su due guide, si è ritenuto opportuno eseguirla sulle quattro guide solo per una approfondita verifica di validità della misura di zero. Trattandosi di misure temporalmente ravvicinate e considerato anche il breve periodo di tempo trascorso dall'installazione delle verticali inclinometriche, la scelta di eseguire anche la misura in questione sulle quattro guide ha permesso di avere un confronto diretto, con la misura dello zero, per valutare così che la presa della cementazione si fosse positivamente verificata. Dall'esame delle misure effettuate non si è riscontrata nessuna anomalia dovuta alla cementazione, il che ha consentito che le misure successive siano state eseguite solo su due guide, utilizzando la scanalatura posta lungo la guida principale, orientata verso la possibile direttrice di movimento presa a riferimento, riservando la possibilità di utilizzare le altre due guide solo nel caso di impercorribilità dovuta alla possibile ostruzione della guida principale, e/o per un controllo nel caso si evidenziassero, rispetto ad una tendenza omogenea di segnali di profondità, una loro variazione. Passando ora ad una loro prima analisi, le misure inclinometriche di esercizio (L1) hanno fatto emergere tre considerazioni:

1. tutti gli inclinometri risentono di uno spostamento superficiale dovuto alla risagomatura del versante per la sistemazione delle piazzole di lavoro per l'installazione della strumentazione di monitoraggio geotecnico;
2. il corpo frana numero 1 non sembra aver dato spostamenti significativi;

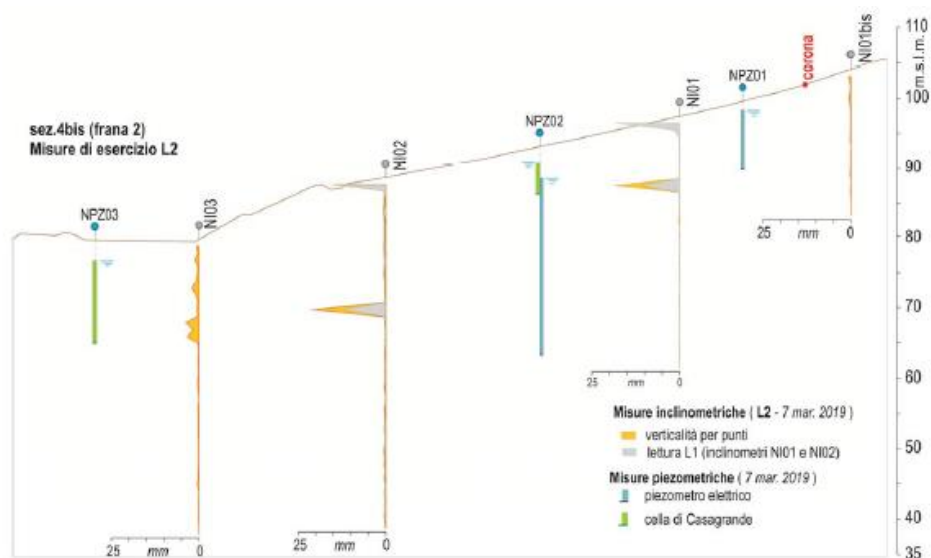
3. il corpo frana numero 2 presenta alcuni punti di attenzione lungo le diverse verticali installate:

- NI01 – 10.00 m;
- NI02 – 19.00 m;
- NI03 – 7.00 m – 12.00 m – 14.00 m;
- NI04 – 9.00 m.

Tali considerazioni, con le successive misure, sono state poste a confronto, per una loro tendenziale conferma e/o variazione di comportamento, legate a possibili zone di movimento per i versanti di interesse. L'analisi delle misure inclinometriche di esercizio (L2), effettuate in data 07/03/2019 confrontate con le considerazioni scaturite dalla prima lettura di esercizio (L1) conferma nelle linee generali quanto era emerso in precedenza, come si può verificare graficamente dalle sezioni mostrate in Figura 3.37 per il Corpo di Frana 1 e in Figura 3.38 per il Corpo di Frana 2, in cui vengono mostrati anche i risultati ottenuti dalle misure piezometriche, cui si farà riferimento nel sotto paragrafo successivo. Per le sezioni si fa riferimento a quelle visibili in pianta nella Figura 3.17 per il corpo di frana 1 e 3.18 per il Corpo di Frana 2.



**Figura 3.37 Sezione Corpo di Frana 1 in relazione alle misure inclinometriche e piezometriche L1, L2 ed L3, (Logic S.R.L., 2019).**



**Figura 3.38 Sezione Corpo di Frana 2 in relazione alle misure inclinometriche e piezometriche L1, L2 ed L3, (Logic S.R.L., 2019)**

Nella lettura di esercizio L5, effettuata in data 29/03/2019, analizzando le verticali inclinometriche NI03 ed NI04 si riscontra una modesta evoluzione degli spostamenti per punti, pari a 8.89 mm-4.14 mm per l'NI03 a 12m e a 7m con azimuth di 327°, confermando l'ulteriore picco a 14m. Fino alla lettura L12, eseguita in data 17/05/2019, i picchi registrati continuano ad essere confermati con un aumento degli spostamenti registrati relativamente agli inclinometri NI01 ed NI02: questi denotano infatti una evoluzione degli spostamenti, lungo i piani di taglio già riscontrati in profondità (10.00 m per NI01 ed a 19.00 m per NI02) con spostamenti per punto rispettivamente di 74.677 mm e 79.327 mm e azimuth con direzione di 354° e 299°. È opportuno segnalare la continua variazione dell'azimut di direzione spostamento che si riscontra per l'inclinometro NI02, tanto che alla lettura successiva avvenuta in data 23/05/2019 il tubo inclinometrico NI02, dalla verifica effettuata con la sonda testimone, risulta fuori uso alla profondità di 19.00 m non riuscendo a far avanzare la stessa sonda, e di conseguenza l'utilizzo della sonda di misura. Nella stessa lettura viene effettuata la lettura di zero del nuovo inclinometro NI08 che sostituisce l'ex SOTTO4 risultato fuori uso sin dalla lettura di zero, che però non segnala alcuna evidenza di movimento. Nella lettura successiva viene installato il nuovo inclinometro NI09 che mostra uno spostamento per punti pari a 3.595 mm con azimuth di 325° alla profondità di 15.00 m. Alle letture L15 ed L2 (NI09 e NI08) effettuata il 06/06/2019 che hanno interessato solo gli

inclinometri della frana n.2, messe in relazione con tutte le misure precedenti si possono trarre le seguenti considerazioni:

- relativamente all' inclinometro NI01, si denota una moderata evoluzione degli spostamenti, lungo il piano di taglio riscontrato alla profondità di 10.00 m, con spostamento per punto che passano da 59.646 a 61.509 mm con azimut pari a 343°;
- passando ad analizzare la verticale inclinometrica NI03 si riscontra una stabilizzazione degli spostamenti per punti, pari a
  - a) 18.778 mm con azimut pari a 325° alla profondità di 12.00 m;
  - b) 8.715 mm con azimut pari a 328° alla profondità di 7.00 m;
  - c) 14.758 mm con azimut pari a 319° alla profondità di 14.00m;
- per l'inclinometro NI04 l'attuale misura segnala solo una piccola variazione dello stesso, con spostamento lungo il piano di taglio presente a 9m pari a 37.722 mm e azimut di 296°;
- il tubo inclinometrico NI09, di nuova installazione, mostra uno spostamento per punti pari a 6.004 mm con azimut di 332° alla profondità di 15.00 m;
- infine, il restante tubo inclinometrico NI08 non segnala nessuna evidenza di possibili movimenti, e rimane tale fino alla lettura L4 del 20/06/2019 in cui si registra un uno spostamento per punti pari a 1.916 mm con azimut di 346°, alla profondità di 14.00m.

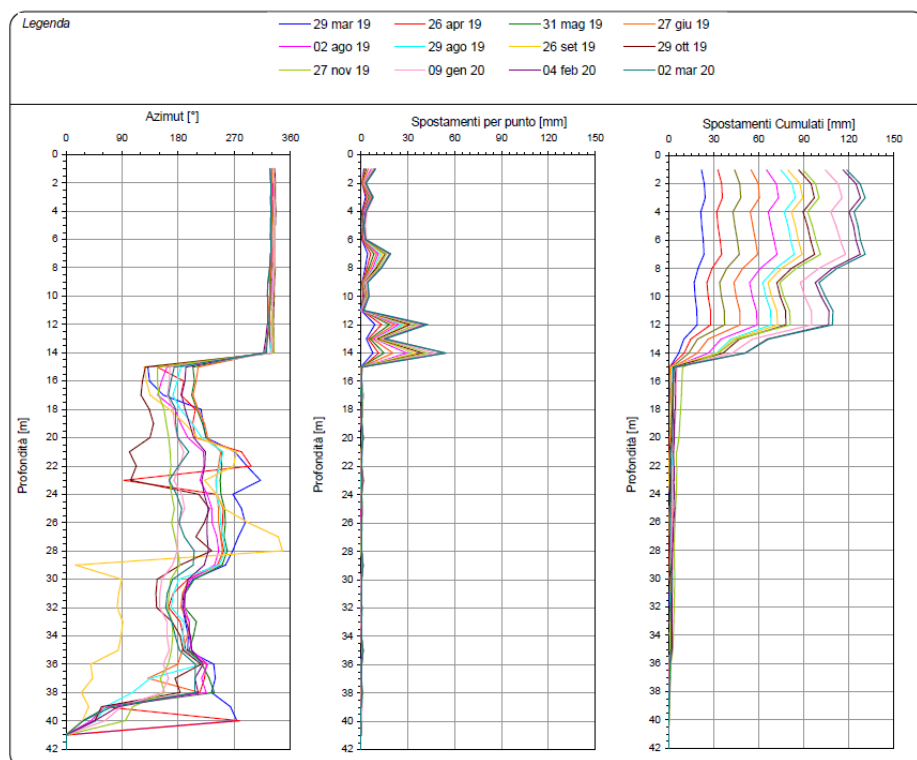
L'inclinometro NI01 è risultato fuori uso alla lettura L18 del 27/06/2019 in quanto la sonda non scendeva oltre la profondità di 10.00 m. Per quanto riguarda invece l'inclinometro NI04 è andato fuori uso alla lettura del 02/08/2019 tanto da portare all'installazione della sonda fissa. Stessa cosa è stata evidenziata e realizzata per l'inclinometro NI09 anch'esso sostituito da una sonda fissa. Entrambi, all'installazione della sonda fissa, hanno confermato gli stessi spostamenti registrati ai 9 m per NI04 e ai 14 m per NI09.

Dall'ultima campagna di misure effettuate in data 02/03/2020 che ha concluso l'anno di monitoraggio, si evincono risultati simili a quelli riportati in precedenza. In particolare, dall'analisi delle misure inclinometriche di esercizio eseguite, messe in relazione con tutte le misure precedenti, si possono trarre le seguenti considerazioni:

- nella verticale inclinometrica NI03 si riscontrano spostamenti, mostrati in Figura 3.39 per punti, pari a:

- a) 19.041 mm con azimut pari a 328° alla profondità di 7.00 m;
- b) 42.772 mm con azimut pari a 325° alla profondità di 12.00 m;
- c) 54.246 mm con azimut pari a 321° alla profondità di 14.00 m;
- il tubo inclinometrico NI08 mostra uno spostamento per punti pari a 11.688 mm e azimut pari a 335°, alla profondità di 14.00 m (Figura 3.40);
- negli inclinometri fissi si riscontrano i seguenti spostamenti
  - a) 28.774 mm con azimut pari a 263° alla profondità di 9.00 m, per il sondaggio NI04 (Figura 3.41);
  - b) 29.537 mm con azimut pari a 345° alla profondità di 15.00 m, per il sondaggio NI09 (Figura 3.42);
- non risultano movimenti apprezzabili per quel che riguarda il Corpo di Frana n. 1.

Si riportano infine le sezioni schematiche con sintesi delle misure inclinometriche e piezometriche relative al Corpo di Frana n. 2 eseguite in data 02/03/2020, mostrate in Figura 3.43 con riferimento alle sezioni A-A e 4bis visibili in pianta in Figura 3.44. Nella planimetria inoltre sono visibili gli spostamenti principali mediante una rappresentazione realizzata con vettori di spostamento.



**Figura 3.39** Spostamenti relativi all'inclinometro NI03-Misura inclinometrica "L29", (Logic S.R.L., 2020)).



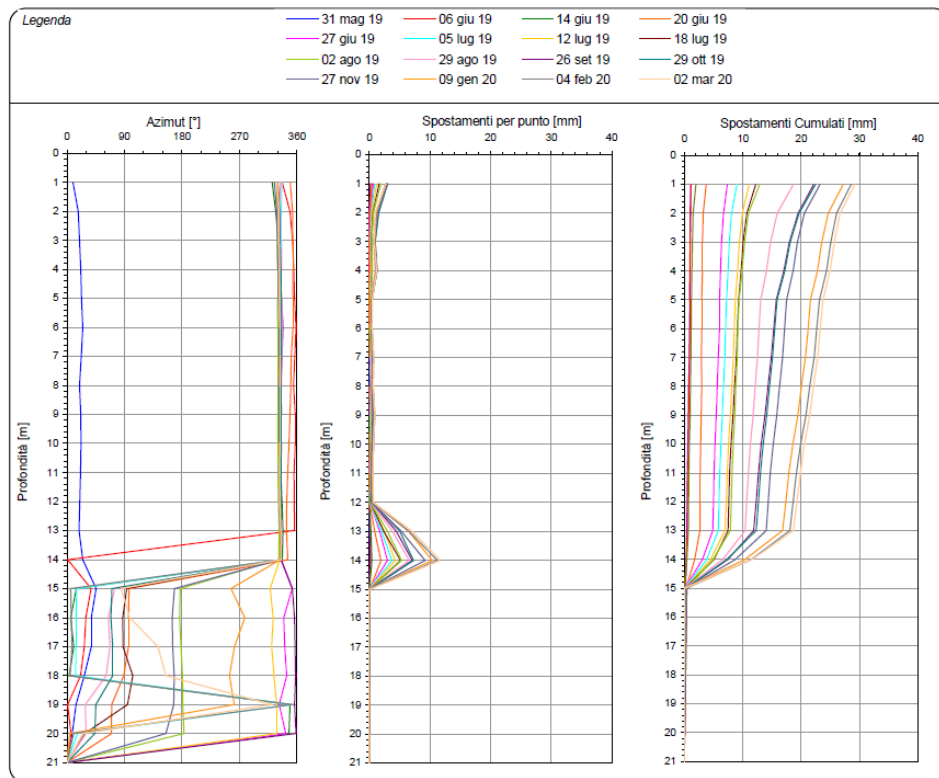


Figura 3.40 Spostamenti relativi all'inclinometro NI08-Misura inclinometrica "L16", (Lagic S.R.L., 2020).

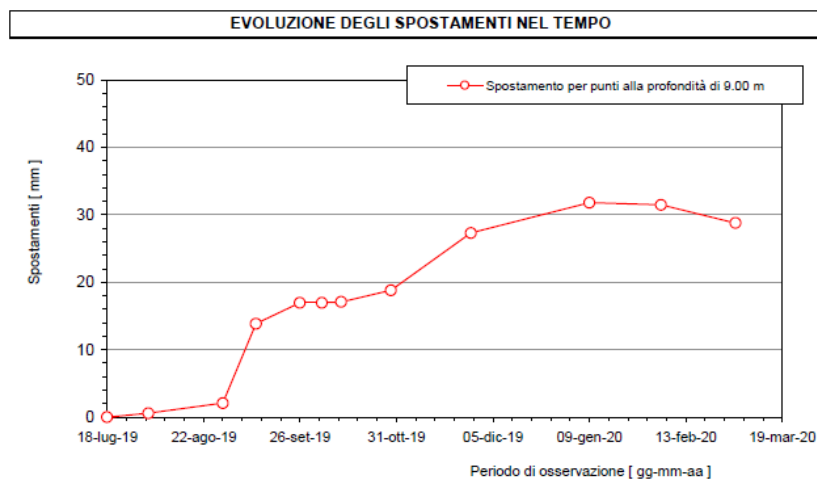
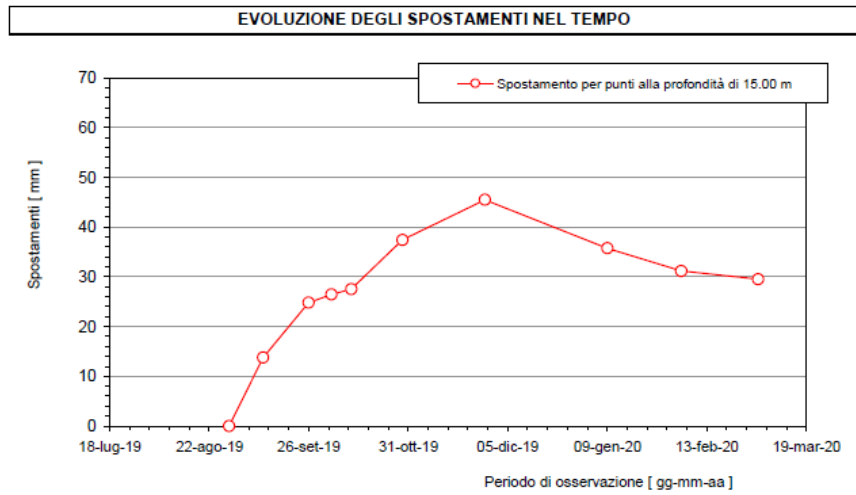
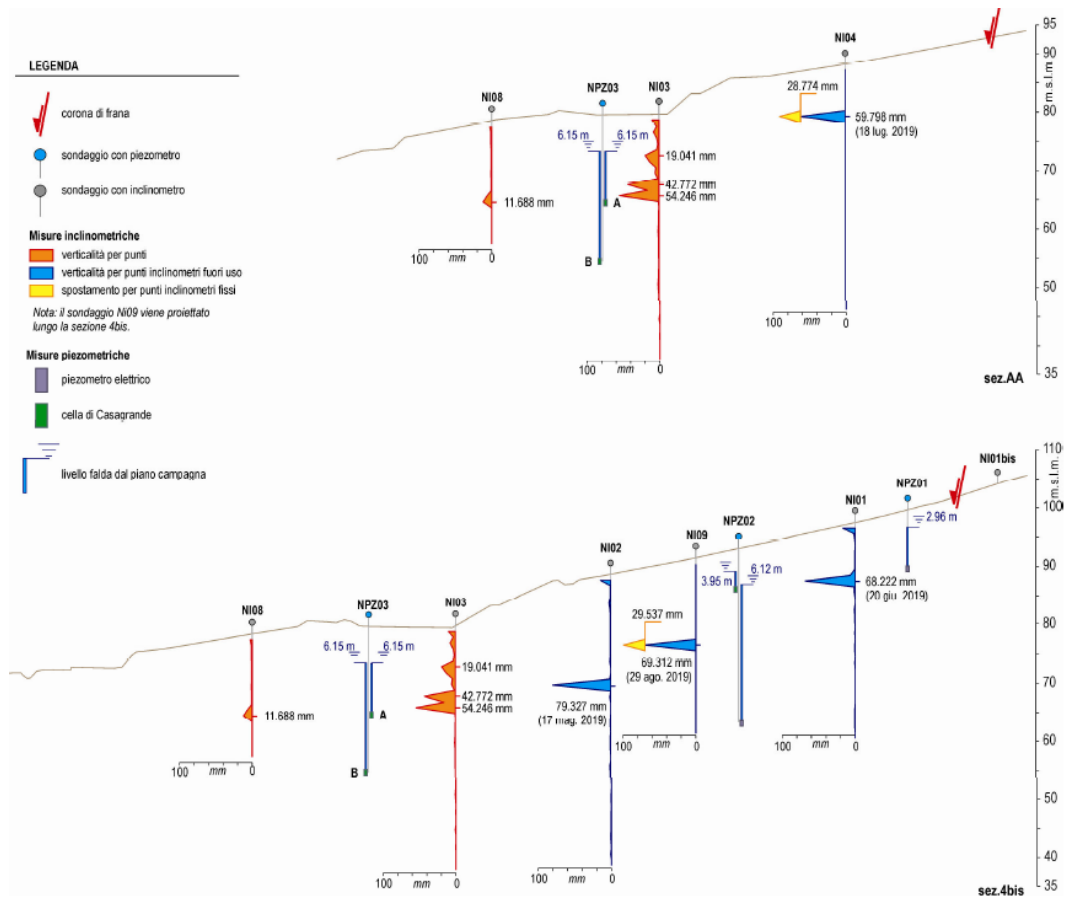


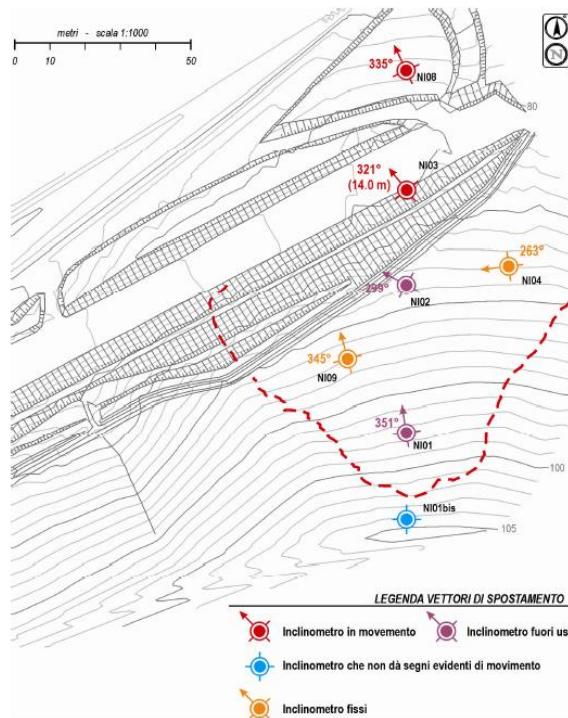
Figura 3.41 Evoluzione degli spostamenti nel tempo inclinometro fisso NI04, (Lagic S.R.L., 2020).



**Figura 3.42** Evoluzione degli spostamenti nel tempo inclinometro fisso NI09, (Lagic S.R.L., 2020).



**Figura 3.43** Sezioni schematiche con sintesi delle misure inclinometriche e piezometriche relative al Corpo di Frana 2 eseguite in data 02 marzo 2020, (Lagic S.R.L., 2020).



**Figura 3.44** Planimetria con sintesi degli spostamenti principali relativi al Corpo di Frana 2 misurati in data 02 marzo 2020, (Logic S.R.L., 2020).

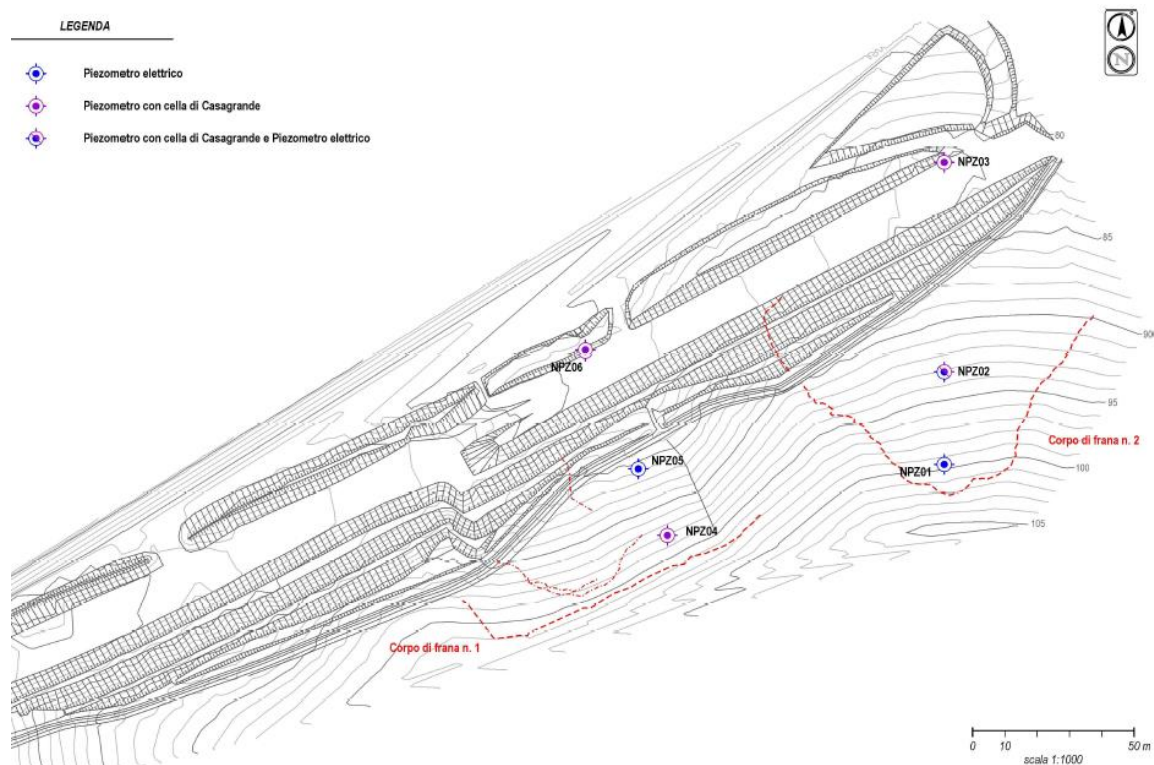
### 3.6.3 Letture piezometriche

Contestualmente alle misure lungo le verticali inclinometriche è stato eseguito un monitoraggio dei livelli piezometrici attraverso misure eseguite su numero 6 sondaggi geotecnici, denominati con il prefisso NPZ, strumentati con piezometri tipo Casagrande e con piezometri elettrici, come riassunto nella Tabella 3.8.

sondaggio	NPZ01	NPZ02		NPZ03		NPZ04	NPZ05	NPZ06
Tipo di piezometro	E	PC	E	PC	PC	PC	E	PC
serial	348187		348188				348185	
Profondità [ m ]	10.00	7.00	30.00	15.00	25.00	10.00	16.00	22.00
Altezza boc. [ cm ]	23.00	20.00		22.00		25.00	24.00	30.00
Data installazione	01-02-19	01-02-2019		24-01-2019		07-02-19	08-02-19	28-01-19
<i>E – piezometro elettrico</i>								
<i>PC – cella di Casagrande</i>								

**Tabella 3.8** Elenco dei sondaggi piezometrici, (Logic S.R.L., 2019).

I piezometri elettrici sono sensori *model VWP-3000* della GEO SENSE e vengono letti con una centralina OTR *model GV-2416*. Lo schema planimetrico dell'ubicazione della strumentazione piezometrica in cui vengono distinte le diverse tipologie di piezometri è riportato in Figura 3.45.



**Figura 3.45 Schema planimetrico con ubicazione della strumentazione piezometrica, (Lagic S.R.L., 2019).**

Le prime letture piezometriche sono state effettuate il 09/02/2019 e le successive con cadenze ravvicinate il 18/02/2019, successivamente il 21/02/2019 ed il 28/02/2019, i cui risultati sono riassunti nelle Tabelle 3.9 per i piezometri elettrici e 3.10 per quelli con cella di Casagrande.

Data	NPZ01-E			NPZ02-E			NPZ05-E		
	Profondità cella	<i>m</i>	10.00	Profondità cella	<i>m</i>	30.00	Profondità cella	<i>m</i>	16.00
	<i>digit</i>	°	<i>m</i>	<i>digit</i>	°	<i>m</i>	<i>digit</i>	°	<i>m</i>
9-feb-19	8513.00	16.9	0.78	7131.40	16.6	7.64	7978.00	16.6	2.67
18-feb-19	8544.00	16.9	1.16	6911.00	16.6	5.25			
21-feb-19	8549.10	16.9	1.22	6859.30	16.6	4.69	8103.07	16.6	4.22
28-feb-19	8566.90	16.9	1.44	6858.60	16.6	4.68	8111.30	16.6	4.32

**Tabella 3.9** *Tabella delle misure piezometriche dei piezometri elettrici, (Lagic S.R.L., 2019).*

Piezometro		NPZ02-C	NPZ03-CA	NPZ03-CB	NPZ04-C	NPZ06-C
Profondità cella	<i>m</i>	7.00	15.00	25.00	10.00	22.00
Data		<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>
9-feb-19		2.35	9.60	10.40		
18-feb-19						
21-feb-19		2.35	9.60	10.40	1.75	2.05
28-feb-19		2.40	5.45	5.55	1.70	2.13

**Tabella 3.10** *Tabella misure piezometriche dei piezometri con cella di Casagrande (Lagic S.R.L., 2019).*

Le misure piezometriche, mostrate in Tabella 3.11 e 3.12, sono seguite con la stessa cadenza definita precedente per i mesi di marzo, aprile e maggio del 2019, a partire dal mese di giugno la cadenza delle misure è stata ridotta ad una sola volta al mese fino alla lettura conclusiva del primo anno di monitoraggio del 02/03/2020, fatta eccezione del mese di agosto in cui sono state effettuate due letture una il 02/08/2019 e l'altra il 29/02/2019. Solo due mesi risultano privi di letture piezometriche, ovvero il mese di luglio e di dicembre del 2019. I piezometri installati all'inizio dell'attività di monitoraggio sono rimati invariati, sia in numero che in tipologia.

Data	NPZ01-E				NPZ02-E				NPZ05-E			
	digit	Temp °	Prof. m (da p.c.)	Quota m (s.l.m.)	digit	Temp °	Prof. m (da p.c.)	Quota m (s.l.m.)	digit	Temp °	Prof. m (da p.c.)	Quota m (s.l.m.)
9-feb-19	8513.0	16.9	0.78	99.10	7131.4	16.6	7.64	85.65	7978.0	16.6	2.67	83.18
18-feb-19	8544.0	16.9	1.16	98.72	6911.0	16.6	5.25	88.04				
21-feb-19	8549.1	16.9	1.22	98.66	6859.3	16.6	4.69	88.60	8103.0	16.6	4.22	81.63
28-feb-19	8566.9	16.9	1.44	98.44	6858.6	16.6	4.68	88.61	8111.3	16.6	4.32	81.52
7-mar-19	8578.5	16.9	1.58	98.30	6860.6	16.6	4.70	88.59	8112.2	16.9	4.33	81.52
14-mar-19	8592.5	16.9	1.75	98.13	6872.1	16.6	4.83	88.46	8121.7	16.6	4.45	81.40
21-mar-19	8592.0	16.9	1.75	98.14	6863.8	16.6	4.74	88.55	8125.8	16.2	4.51	81.33
29-mar-19	8598.1	16.9	1.82	98.06	6858.6	16.6	4.74	88.55	8135.1	16.9	4.61	81.24
4-apr-19	8611.5	16.9	1.98	97.90	6874.5	16.6	4.86	88.43	8146.3	16.6	4.76	81.09
11-apr-19	8610.7	16.9	1.98	97.91	6869.2	16.6	4.80	88.49	8161.9	16.6	4.95	80.90
18-apr-19	8604.4	17.2	1.89	98.00	6858.6	16.9	4.67	88.62	8152.3	16.9	4.83	81.02
26-apr-19	8612.2	17.2	1.98	97.90	6862.8	16.9	4.72	88.57	8184.3	17.2	5.22	80.63
2-mag-19	8616.5	16.9	2.05	97.84	6868.5	16.9	4.78	88.51	8203.5	16.9	5.46	80.39
9-mag-19	8622.0	16.9	2.11	97.77	6872.5	15.6	4.87	88.42	8168.4	16.9	5.03	80.82
17-mag-19	8622.1	16.9	2.11	97.77	6871.6	16.9	4.81	88.48	8174.9	16.9	5.11	80.74
23-mag-19	8621.8	16.9	2.11	97.77	6869.4	16.9	4.79	88.50	8170.5	16.9	5.05	80.80
31-mag-19	8621.6	16.9	2.11	97.78	6869.2	16.9	4.79	88.50	8174.5	16.9	5.10	80.75
27-giu-19	8633.2	17.2	2.24	97.65	6889.8	17.2	5.00	88.29	8189.9	17.2	5.29	80.56
2-ago-19	8641.1	16.9	2.35	97.54	6909.4	16.9	5.22	88.07	8245.5	16.9	5.98	79.86
29-ago-19	8645.4	16.9	2.40	97.49	6923.0	16.9	5.37	87.92	8220.5	17.2	5.67	80.18
26-set-19	8649.0	16.9	2.44	97.44	6937.6	16.9	5.53	87.76	8194.4	16.9	5.35	80.50
29-ott-19	8661.5	16.9	2.60	97.29	6955.0	16.9	5.72	87.57	8168.6	16.9	5.03	80.82
27-nov-19	8661.5	16.9	2.60	97.29	6955.0	16.9	5.72	87.57	8168.6	16.9	5.03	80.82
9-gen-20	8606.9	16.9	1.93	97.96	6929.4	16.6	5.45	87.84	8124.2	16.9	4.48	81.37
04-feb-20	8674.5	16.9	2.75	97.13	6958.7	16.6	5.77	87.52	8148.1	16.9	4.77	81.07
02-mar-20	8691.4	16.9	2.96	96.92	6991.8	16.9	6.12	87.17	8295.2	16.9	6.60	79.25

**Tabella 3.11 Tabella delle misure piezometriche dei piezometri elettrici fino a marzo 2020, (Lagic S.R.L., 2020).**

Piezometro	NPZ02-PC		NPZ03-PCA		NPZ03-PCB		NPZ04-PC		NPZ06-PC	
	Prof. m (da p.c.)	Quota m (s.l.m.)	Prof. m (da p.c.)	Quota m (s.l.m.)	Prof. m (da p.c.)	Quota m (s.l.m.)	Prof. m (da p.c.)	Quota m (s.l.m.)	Prof. m (da p.c.)	Quota m (s.l.m.)
9-feb-19	2.35	90.94	9.60	70.31	10.40	69.51				
18-feb-19										
21-feb-19	2.35	90.94	9.60	70.31	10.40	69.51	1.75	90.49	2.05	73.62
28-feb-19	2.40	90.89	5.45	74.46	5.55	74.36	1.70	90.54	2.13	73.54
7-mar-19	2.50	90.79	5.03	74.88	5.05	74.86	1.77	90.47	2.10	73.57
14-mar-19	2.50	90.79	4.93	74.98	4.94	74.97	1.80	90.44	2.30	73.37
21-mar-19	2.63	90.66	4.94	74.97	4.95	74.96	1.90	90.34	2.16	73.51
29-mar-19	2.63	90.89	4.30	75.61	4.23	75.68	1.93	90.31	2.20	73.47
4-apr-19	2.67	90.62	4.35	75.56	4.33	75.58	1.93	90.31	2.21	73.46
11-apr-19	2.67	90.62	4.53	75.38	4.54	75.37	1.98	90.26	2.15	73.52
18-apr-19	3.10	90.19	4.70	75.21	4.70	75.21	2.04	90.20	2.12	73.55
26-apr-19	3.10	90.19	4.70	75.21	4.70	75.21	2.04	90.20	2.12	73.55
2-mag-19	2.69	90.60	4.90	75.01	4.90	75.01	2.02	90.22	2.16	73.51
9-mag-19	2.70	90.59	5.04	74.87	5.04	74.87	2.05	90.19	2.18	73.49
17-mag-19	1.20	92.09	5.10	74.81	5.10	74.81	1.90	90.34	2.00	73.67
23-mag-19	2.68	90.61	5.21	74.70	5.21	74.70	2.00	90.24	2.20	73.47
31-mag-19	2.81	90.48	5.30	74.61	5.30	74.61	2.05	90.19	2.20	73.47
27-giu-19	2.95	90.34	5.90	74.01	5.55	74.36	1.95	90.29	2.25	73.42
2-ago-19	3.05	90.24	5.60	74.31	5.60	74.31	2.05	90.19	2.35	73.32
29-ago-19	3.30	89.99	5.80	74.11	5.77	74.14	2.15	90.09	2.50	73.17
26-set-19	3.60	89.69	5.80	74.11	5.80	74.11	2.20	90.04	2.40	73.27
29-ott-19	3.80	89.49	5.98	73.93	5.96	73.95	2.25	89.99	2.50	73.17
27-nov-19	3.80	89.49	5.96	73.95	5.94	73.97	0.80	91.44	1.80	73.87
9-gen-20	3.35	89.94	6.00	73.91	6.00	73.91	1.40	90.84	2.10	73.57
04-feb-20	3.70	89.59	6.10	73.81	6.10	73.81	2.30	89.94	2.30	73.37
02-mar-20	3.95	89.34	6.15	73.76	6.15	73.76	2.60	89.64	2.70	72.97

**Tabella 3.12 Tabella delle misure piezometriche dei piezometri con cella di Casagrande fino a marzo 2020, (Lagic S.R.L., 2020).**

I risultati finali ottenuti, riportati in Figura 3.46, mostrano la profondità e la quota piezometrica in funzione del periodo di osservazione per ogni piezometro.

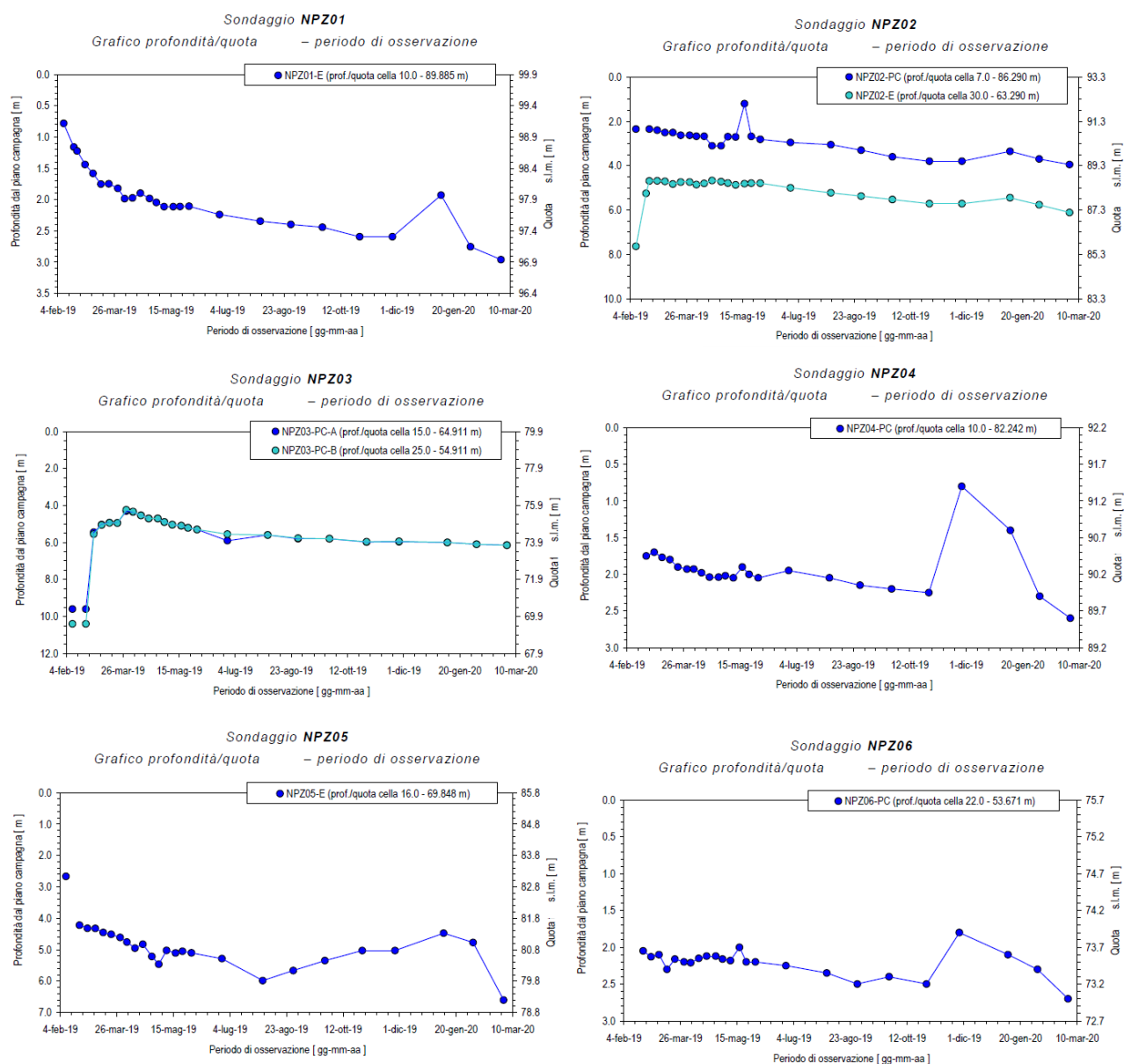


Figura 3.46 Profondità e quota in funzione del periodo di osservazione, (Lagic S.R.L., 2020).

### **3.7 Esiti del monitoraggio: Corpo di Frana 1 e Corpo di Frana 2**

Il presente paragrafo conclusivo ha lo scopo di illustrare l'esito del monitoraggio, effettuato tra i mesi di febbraio e luglio 2019, dei versanti interagenti con la galleria artificiale TG2 tra le progressive 2+000 e 2+250 circa, nonché di valutare le attuali condizioni di stabilità dei due corpi di frana identificati. È stata condotta un'analisi dell'efficacia dell'intervento di stabilizzazione proposto, consistente nella modifica dello schema previsto in progetto per la galleria artificiale, allo scopo di rendere la stessa funzionale anche alla stabilizzazione attuale e futura dei pendii in frana. La stabilità dei due corpi di frana è stata analizzata mediante l'approccio all'equilibrio limite (Morgenstern & Price, 1965) sia con riferimento alle condizioni attuali, sia in condizioni sismiche, adottando per quest'ultimo scenario le relative ipotesi assunte nel progetto esecutivo dell'opera. Si è infine proceduto alla valutazione di differenti possibili strategie di stabilizzazione, giungendo alla conclusione che quella di tipo strutturale fosse la più efficace e praticabile, dal momento che, attraverso una opportuna modifica dello schema strutturale della galleria artificiale, risulta possibile assicurare la stabilità di entrambi i corpi di frana, anche in presenza dell'intenso scenario sismico che caratterizza lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) dell'opera.

#### **3.7.1 Conclusioni relative ai corpi di frana**

Per quanto riguarda il Corpo di Frana 2 si tratta di una frana attiva, definibile come lenta, in quanto caratterizzata da velocità comprese tra 20÷100 mm/anno, a carattere rotazionale. La superficie di scorrimento si estende dalla zona di cresta, sino al piede del pendio, raggiungendo una profondità massima di circa 20 m dal piano campagna: da ciò il movimento è classificabile come intermedio secondo Cruden e Varnes (Cruden & Varnes, 1996). Il meccanismo si sviluppa interamente nella formazione delle argille azzurre. Le misure piezometriche indicano quote comprese tra circa 1 e 4 m dal piano campagna. È opportuno osservare che il quadro che emerge dalle indagini condotte sul Corpo di Frana 2 è coerente con quanto già evincibile alla luce delle sole indicazioni preliminarmente fornite dall'inclinometro SOTT04: il movimento in atto nel settembre del 2017 è, infatti, lo stesso ancora oggi attivo. È ragionevole immaginare che, lungo la superficie di scorrimento, gli spostamenti relativi occorsi abbiano portato il terreno alle sue condizioni residue in termini di resistenza.



Il Corpo di Frana 1, invece, si riferisce ad un volume di terreno attualmente interessato da scorrimenti superficiali a carattere roto-traslattivo, con profondità delle superfici di scorrimento comprese tra 2 e 4 m dal piano campagna. Per avere invece un quadro completo delle condizioni di stabilità del Corpo di Frana 1, appare essenziale quanto osservato in corrispondenza dell'inclinometro SOTT03, disposto alla base del pendio, tra il settembre 2017 e il luglio 2018: come già descritto, le letture lungo tale verticale non indicano solo la presenza di un movimento superficiale, analogo a quanto osservato nella campagna di monitoraggio più recente, ma evidenziano la presenza di una discontinuità nel profilo degli spostamenti alla profondità di circa 11 m dal piano campagna e, cosa ancora più rilevante, il tranciamento del tubo inclinometrico a 17 m dal piano campagna. Tali indicazioni sono inequivocabilmente attribuibili alla formazione di una o più superfici di discontinuità a tali profondità, che potrebbero non essersi propagate verso monte sino alla completa emersione in superficie, in ragione delle mutate condizioni al contorno occorse nel tempo nell'area. Tale ipotesi interpretativa giustifica l'attuale condizione di stabilità del pendio con riferimento a superfici intermedie o profonde, ma pone in risalto la potenziale propensione dello stesso a sviluppare retrogressivamente le superfici di scorrimento identificate dal SOTT03, sino al completo sviluppo di un meccanismo analogo a quello che ha interessato il Corpo 2. Tale progressiva propagazione della discontinuità, tipica delle argille consistenti, potrebbe essere innescata da condizioni al contorno più critiche di quelle attuali, quali, ad esempio, quelle indotte da un evento sismico intenso, come quello previsto in progetto per lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV). Tali considerazioni sono supportate quantitativamente dalle analisi proposte nei paragrafi successivi.

### **3.7.2 Corpo di Frana 2: analisi di stabilità a ritrovo e analisi dell'intervento di stabilizzazione.**

Sulla base delle indicazioni fornite dai quattro inclinometri relativi alla Sezione 4 bis e sulla base della posizione della corona è stato possibile individuare la superficie di scorrimento. Le informazioni che derivano dall'interpretazione delle letture inclinometriche sono state riportate in Tabella 3.13, mentre il regime delle pressioni interstiziali è stato ricostruito a partire dalle misure di risalita d'acqua nei tre piezometri riportate in Tabella 3.14. In Figura 3.47 si riporta la geometria della Sezione 4 bis insieme alla posizione della superficie piezometrica e delle possibili superfici di scorrimento, di cui sono state ipotizzate 4 possibili

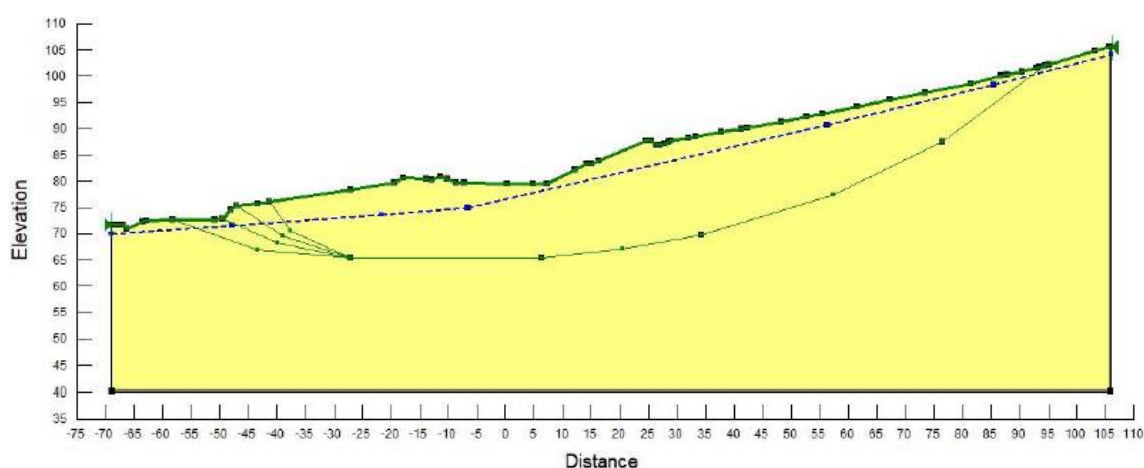
configurazioni nella zona a valle, in mancanza di specifiche informazioni relative al piede della frana. La superficie piezometrica è stata tracciata in base alle tre letture disponibili e nella zona più a valle è stata ipotizzata all'incirca parallela al piano di campagna.

INCLIN.	Progressive	Quote p.c.	Prof. sds	Quota sds
	(m)	(m)	(m)	(m)
NI01	76.409	97.47	10	87.47
NI02	34.408	88.70	19	69.70
NI03	6.403	79.45	13	65.45
SOTT04	-27.175	78.40	13	65.40

**Tabella 3.13** Misure inclinometriche Corpo di Frana 2, (Amorosi & Boldini , 2019)

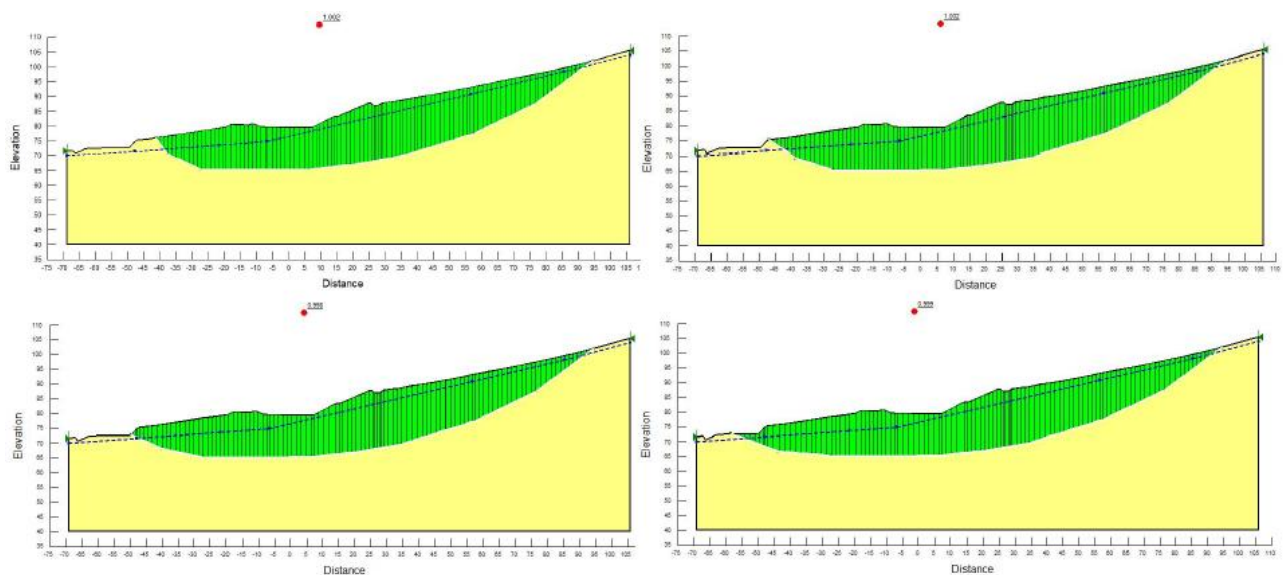
Piezometro	Progressive	Quote pc	Quote falda
	(m)	(m)	(m)
NPZ01	85.409	99.62	98.3
NPZ02	56.409	93.10	90.8
NPZ03	-6.599	79.65	74.9

**Tabella 3.14** Misure piezometriche Corpo di Frana 2, (Amorosi & Boldini , 2019).



**Figura 3.47** Sezione 4bis, (Amorosi & Boldini , 2019).

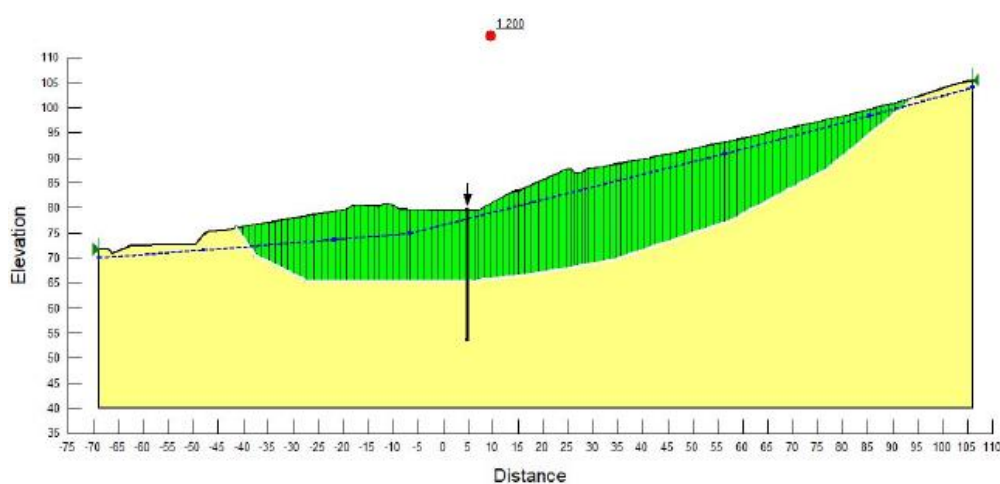
Le analisi di stabilità sono state eseguite con il metodo delle strisce (Morgenstern & Price, 1965) discretizzando la porzione di terreno instabile in 100 strisce. Il pendio è costituito da un'argilla omogenea, con peso dell'unità di volume  $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ . Sono state eseguite delle analisi a ritroso per determinare il valore dell'angolo di resistenza a taglio in condizioni di incipiente collasso (coefficiente di sicurezza  $F = 1$ ) per le 4 superfici di scorrimento considerate (Figura 3.48). La coesione efficace  $c'$  è stata posta pari a 0, come appropriato in corrispondenza della mobilitazione della resistenza residua nel materiale. La superficie di scorrimento più critica è la 1, per la quale risulta mobilitato un angolo di attrito efficace pari a  $14.9^\circ$ , molto prossimo al valore di resistenza residua determinato sperimentalmente.



**Figura 3.48 Sezione 4bis, condizione di incipiente collasso per le superfici di scorrimento 1,2,3,4, (Amorosi & Boldini, 2019).**

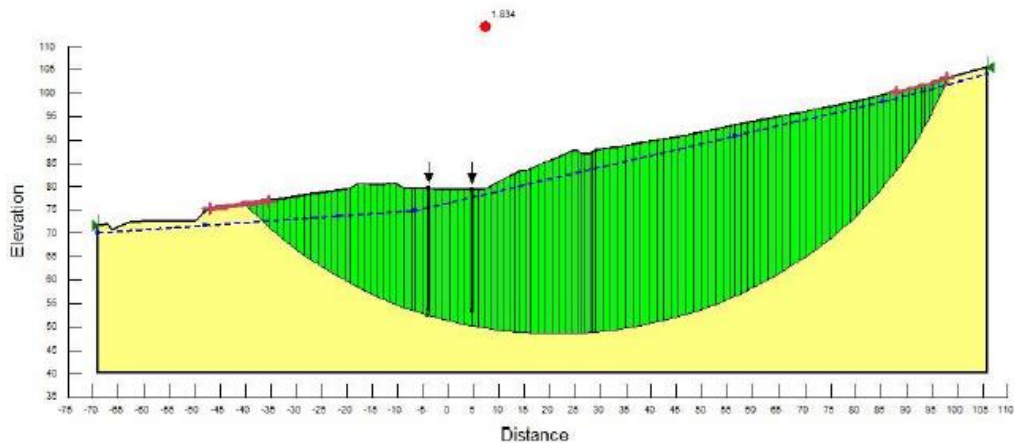
Per quanto riguarda l'analisi dell'intervento di stabilizzazione il nuovo schema della galleria artificiale prevede l'estensione della lunghezza dei pali, che da 13 m divengono lunghi 26 m, la modifica della loro geometria, passando da pali di diametro  $D$  pari a 1 m e interasse  $i = 1.2$  m a pali di diametro pari a 1.5 m e interasse 1.7 m, nonché l'introduzione di due allineamenti aggiuntivi di pali, che hanno inizio a partire dall'intradosso della soletta di base della galleria e si estendono per 19 m, anch'essi caratterizzati da  $D = 1.5$  m e  $i = 1.7$  m. Anche per le solette

di base e di sommità della galleria artificiale si propone un irrobustimento, aumentandone lo spessore a 1.5 m. Le analisi di stabilità eseguite considerano la superficie di scorrimento 1 lungo la Sezione 4bis. Per il terreno si considera coesione efficace nulla e l'angolo di resistenza a taglio  $\varphi=14.9^\circ$  ottenuto dalle precedenti back-analysis per la superficie di scorrimento considerata. Nell'analisi all'equilibrio limite del problema in esame, si tiene conto della presenza della sola paratia posta nella zona di monte rispetto alla galleria artificiale e si valuta il contributo della forza di taglio per metro lineare agente sulla fila di pali in corrispondenza della superficie di scorrimento affinché il coefficiente di sicurezza del pendio risulti pari a  $F = 1.2$ , il cui schema è riportato in Figura 3.49.



**Figura 3.49 Sezione 4bis, intervento con elementi strutturali, (Amorosi & Boldini, 2019).**

La forza per unità di lunghezza cui deve essere soggetta la paratia per garantire la condizione  $F = 1.2$  è pari a  $S = 953 \text{ kN/m}$ . Per verificare che in seguito alla realizzazione della galleria artificiale non si inneschi un fenomeno di instabilità globale caratterizzato da scorrimenti più profondi, è stato valutato il coefficiente di sicurezza per una serie di superfici di scorrimento passanti poco al di sotto del piede delle paratie. Sono state studiate superfici di scorrimento circolari di neoformazione, ipotizzando due zone che individuano la corona e il piede delle superfici. Le analisi sono state effettuate adottando i parametri di resistenza nelle condizioni di post picco, caratterizzati da un angolo di resistenza a taglio  $\varphi' = 23^\circ$  e coesione efficace nulla, appropriati ad un meccanismo di primo distacco. In questa configurazione, in corrispondenza della superficie di scorrimento più critica riportata in Figura 3.50, si ottiene un coefficiente di sicurezza  $F = 1.834$ .



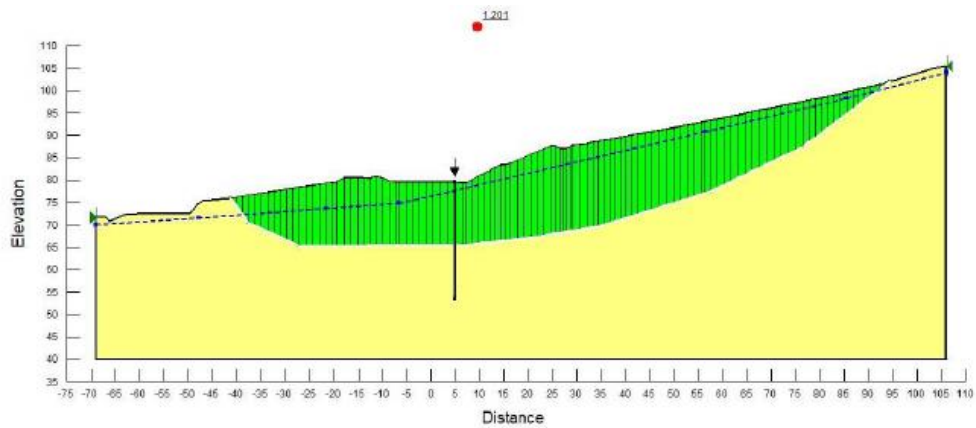
**Figura 3.50 Sezione 4bis, verifica di instabilità per meccanismo profondo, (Amorosi & Boldini , 2019).**

È stata, infine, valutata l'efficacia dell'intervento di stabilizzazione in condizioni sismiche. L'azione sismica è schematizzata attraverso una forza statica equivalente agente sul volume di terreno potenzialmente instabile secondo quanto previsto nel § 7.11.3.5.2 delle NTC18 nell'ambito della stabilità dei pendii naturali (Norme Tecniche per le Costruzioni , 2018). Come da PE, per la valutazione dell'azione sismica si considera una categoria di sottosuolo di tipo C e uno Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) con un tempo di ritorno di 475 anni. Nelle analisi all'equilibrio limite ogni striscia è soggetta a una forza aggiuntiva destabilizzante le cui componenti orizzontale e verticale sono proporzionali al peso della striscia attraverso i coefficienti sismici orizzontale e verticale. Tutti i parametri sono riportati nella Tabella 3.15 di seguito riportata. In Figura 3.51 si riporta lo schema di analisi in presenza della singola fila di pali posta nella zona di monte della galleria artificiale. Analogamente a quanto fatto in condizioni statiche, si valuta il contributo della forza di taglio richiesta dall'allineamento di pali affiancati per ottenere un determinato coefficiente di sicurezza. La componente verticale dell'azione sismica si considera rivolta verso l'alto in quanto rappresenta la configurazione di analisi più gravosa. La forza per unità di lunghezza cui deve essere soggetta la paratia per garantire la condizione  $F = 1.2$  è pari a  $S = 3835.3$  kN/m. Si verifica, infine, che anche in condizioni sismiche non si inneschi un fenomeno di instabilità globale caratterizzato da scorrimenti profondi. Analogamente a quanto visto in condizioni statiche, sono state studiate superfici di scorrimento circolari di neoformazione adottando i parametri di resistenza nelle condizioni di post picco ( $\varphi' = 23^\circ$ ,  $c' = 0$ ). Anche in questa

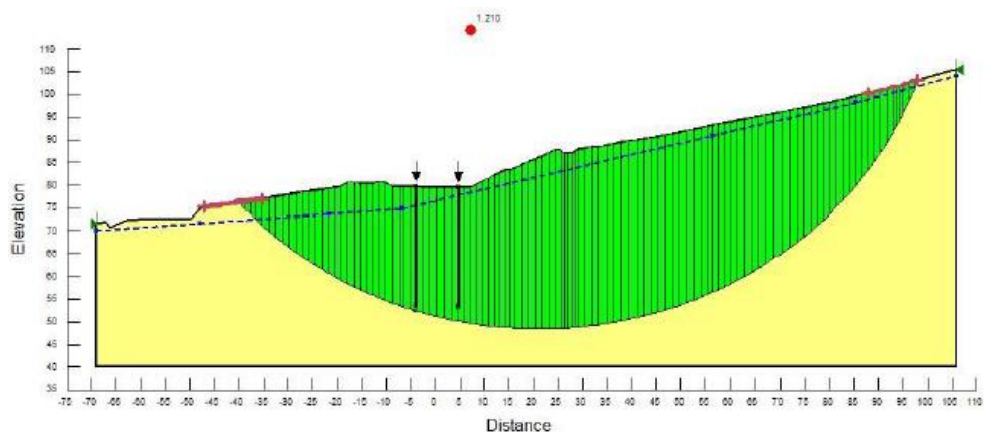
configurazione il pendio è stabile e il coefficiente di sicurezza che si ottiene è pari a  $F = 1.21$  (Figura 3.52).

$a_g$ (g)	0.24
$F_0$	2.418
$S_S$	1.352
$S_T$	1
$\beta_s$	0.28
$a_{max}$ (g)	0.324
$k_h$	0.0908
$k_v$	0.0454

**Tabella 3.15 Parametri di analisi per lo SLV Corpo di Frana 2, (Amorosi & Boldini, 2019).**



**Figura 3.51 Sezione 4bis, intervento con elementi strutturali: analisi pseudostatica, (Amorosi & Boldini, 2019).**



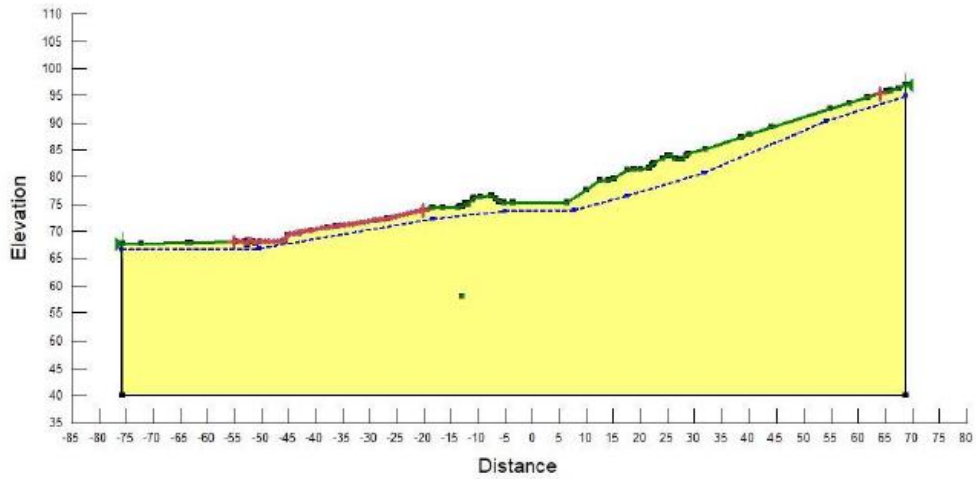
**Figura 3.52 Sezione 4bis, verifica di stabilità per meccanismo profondo: analisi pseudostatica, (Amorosi & Boldini, 2019).**

### 3.7.3 Corpo di Frana 1: analisi di stabilità attuale e analisi dell'intervento di stabilizzazione

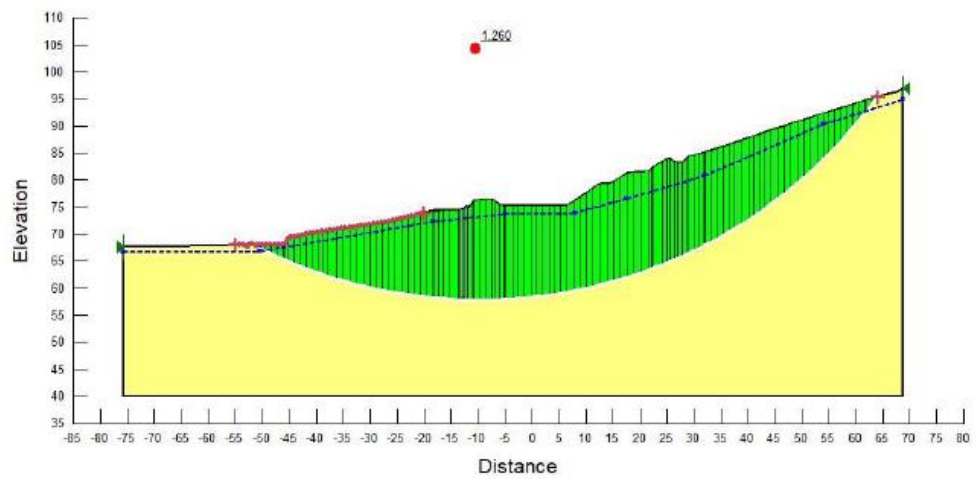
Si è fatto riferimento al possibile meccanismo in via di propagazione identificato dalle misure iniziali dell'inclinometro SOTT03, in base alle quali si è assunto che la superficie di scorrimento dovesse passare attraverso quella verticale alla profondità di 17 m dal piano campagna. Sono, dunque, stati valutati i valori dei coefficienti di sicurezza relativi a un numero elevato di superfici di scorrimento passanti per tale punto, identificando quella più critica. Dal momento che, a superficie interamente propagata, si tratterebbe di un primo distacco, le analisi sono state effettuate con riferimento ai parametri di resistenza a taglio di post-picco. Per le superfici di scorrimento individuate il regime delle pressioni interstiziali è stato ricostruito a partire dalle misure di risalita d'acqua nei tre piezometri riportate in Tabella 3.16. In Figura 3.53 si riporta la geometria della sezione 1 insieme alla posizione della superficie piezometrica, che è stata tracciata in base alle tre letture disponibili e ipotizzata all'incirca parallela al piano di campagna nella zona più a valle. Le superfici di scorrimento sono state tracciate attraverso archi di circonferenza, imponendo il passaggio per il punto in corona e per il punto a 17 m di profondità dal piano campagna in corrispondenza del sondaggio SOTT03 e ipotizzando una fascia (in rosso) che delimita la porzione di uscita della superficie. Le analisi di stabilità sono state eseguite dapprima in condizioni statiche con il metodo delle strisce (Morgenstern & Price, 1965) discretizzando la porzione di terreno instabile in 100 strisce. Il pendio è caratterizzato dalla stessa argilla omogenea del Corpo 2, che ha un peso dell'unità di volume  $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ . Per la scelta delle proprietà meccaniche del materiale si fa riferimento, come detto, alle condizioni di post-picco, caratterizzate da coesione efficace nulla e da angolo di attrito efficace pari a  $\varphi' = 23^\circ$ . La Figura 3.54 riporta la superficie di scorrimento più critica, caratterizzata dal minore coefficiente di sicurezza, pari a  $F = 1.26$ . In Figura 3.55, invece, si illustra la distribuzione del coefficiente di sicurezza per tutte le superfici di scorrimento studiate.

Piezometro	Progressive	Quote pc	Quote falda
	(m)	(m)	(m)
NPZ04	54.02	92.37	90.3
NPZ05	31.79	85.07	80.8
NPZ06	-4.98	75.82	73.7

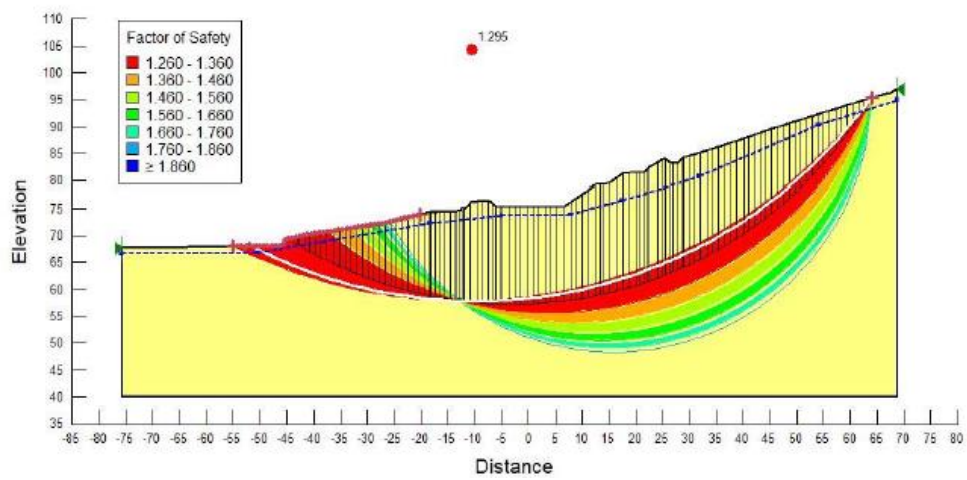
Tabella 3.16 Misure piezometriche corpo 1, (Amorosi & Boldini, 2019).



**Figura 3.53 Sezione 1, (Amorosi & Boldini , 2019).**



**Figura 3.54 Sezione 1, superficie di scorrimento più critica, (Amorosi & Boldini , 2019).**



**Figura 3.55 Sezione 1, coefficiente di sicurezza per tutte le superfici studiate, (Amorosi & Boldini , 2019).**

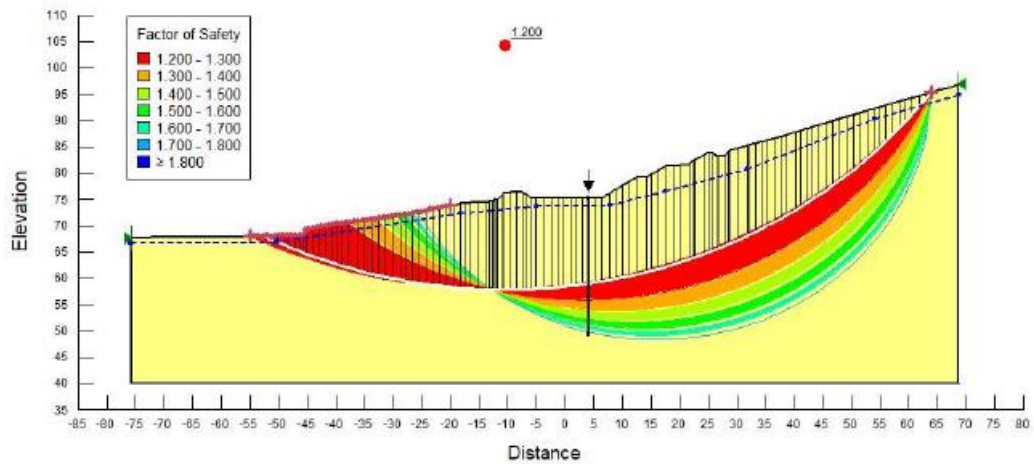


L'analisi di stabilità del pendio è stata poi ripetuta nel caso di presenza di azioni sismiche. Le analisi sono eseguite in condizioni pseudo statiche nell'ambito dell'equilibrio limite. L'azione sismica è schematizzata attraverso una forza statica equivalente agente sul volume di terreno potenzialmente instabile secondo quanto previsto nel § 7.11.3.5.2 delle NTC18 nell'ambito della stabilità dei pendii naturali (Norme Tecniche per le Costruzioni, 2018). Per la valutazione dell'azione sismica si considera allo stesso modo del Corpo di Frana 2, una categoria di sottosuolo di tipo C uno Stato limite di salvaguardia della Vita (SLV) con un tempo di ritorno di 475 anni. Così come già discusso con riferimento al Corpo 2, nelle analisi all'equilibrio limite ogni striscia è soggetta a una forza aggiuntiva destabilizzante le cui componenti orizzontale e verticale sono proporzionali al peso della striscia attraverso i coefficienti sismici orizzontale e verticale. I parametri sono riassunti all'interno della Tabella 3.17.

La componente verticale dell'azione sismica si considera rivolta verso l'alto in quanto rappresenta la configurazione di analisi più gravosa. La Figura 3.56 riporta la distribuzione del coefficiente di sicurezza per tutte le superfici di scorrimento studiate. La superficie di scorrimento più critica è caratterizzata da un coefficiente di sicurezza  $F = 0.848$ . Ciò evidenzia che, in presenza dell'intenso evento sismico di scenario, il pendio passerebbe da condizioni inizialmente stabili al collasso secondo un meccanismo profondo, con inevitabili e gravi conseguenze anche sull'opera in progetto.

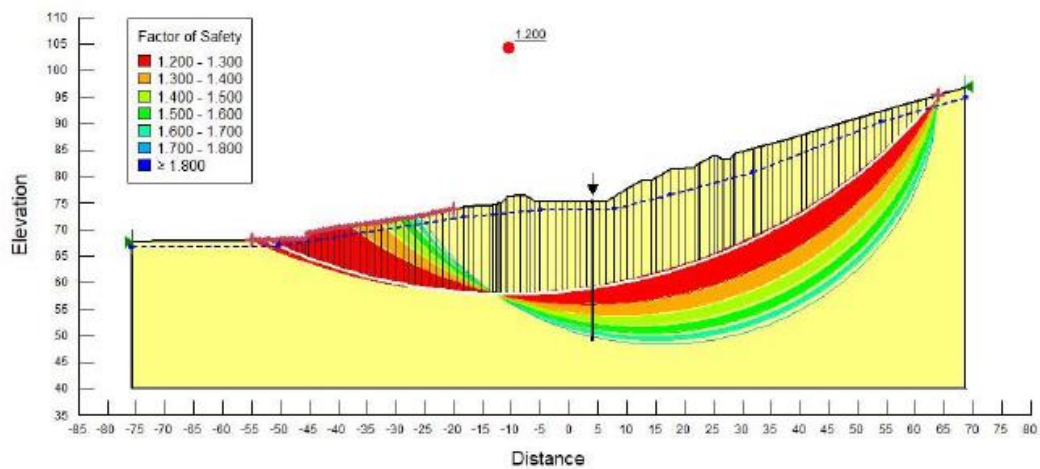
$a_g$ (g)	0.24
$F_0$	2.418
$S_S$	1.352
$S_T$	1
$\beta_s$	0.28
$a_{max}$ (g)	0.324
$k_h$	0.0908
$k_v$	0.0454

**Tabella 3.17 Parametri di analisi per lo SLV Corpo di Frana 1, (Amorosi & Boldini, 2019).**



**Figura 3.56 Sezione 1, coefficienti di sicurezza dell'analisi pseudo statica, (Amorosi & Boldini, 2019).**

Si procede, infine, con la valutazione delle condizioni di stabilità del pendio a seguito dell'installazione di un elemento strutturale che simuli la presenza delle file di pali di lunghezza  $L = 26$  m previste per la realizzazione della galleria secondo il nuovo schema prima descritto. In dettaglio si valuta la sollecitazione di taglio per unità di lunghezza cui deve essere soggetto l'elemento strutturale affinché il coefficiente di sicurezza per la superficie di scorrimento più critica in condizioni pseudostatiche sia pari a  $F = 1.2$ . La sollecitazione di taglio assorbita dall'elemento strutturale è pari a  $S = 2200$  kN/m. In Figura 3.57 si riporta la distribuzione dei coefficienti di sicurezza a valle dell'intervento per le diverse superfici di scorrimento studiate.



**Figura 3.57 Sezione 1, coefficienti di sicurezza dall'analisi pseudo statica in presenza dei pali, (Amorosi & Boldini, 2019).**

## **4 Analisi dei dati pluviometrici e correlazione con i dati di monitoraggio**

### **4.1 Introduzione**

Nel capitolo terminale del seguente elaborato di tesi si è scelto di analizzare la relazione tra i dati di monitoraggio e i dati pluviometrici, discutendo la forte correlazione tra il regime delle precipitazioni, i livelli piezometrici e il tasso dei movimenti monitorato sia tramite strumentazione inclinometriche che tramite livellazioni topografiche, già precedentemente descritte. In una prima parte del capitolo verrà descritto l'inquadramento climatico della Regione Calabria, per poi passare ad una descrizione più dettagliata dell'assetto idrologico e del clima dell'area in esame, ponendo l'attenzione anche sul centro di racconto dei dati pluviometrici, ovvero Arpacal-Centro Funzionale Multirischi (ARPACAL, 2020). Dopo aver affrontato la descrizione del rapporto di un evento significativo dell'ottobre 2018, che ha influenzato in maniera evidente lo sviluppo del movimento franoso, nella seconda parte verrà trattata la correlazione dei dati di monitoraggio con i dati pluviometrici, mediante la rappresentazione di grafici esplicativi costruiti per confermare la correlazione proposta.

### **4.2 Inquadramento climatico della Regione Calabria**

Il territorio calabrese possiede caratteri fisici e climatici anomali rispetto al resto dell'Italia meridionale. Il sistema orografico risulta infatti complesso e caratterizzato da un'energia di rilievo abbastanza notevole, a causa dell'evoluzione geologico- strutturale, dell'intensa attività neotettonica, nonché delle litologie ivi affioranti. A ciò bisogna aggiungere le caratteristiche climatiche, variabili da una zona all'altra della regione, che hanno determinato gli intensi processi morfogenetici, attualmente riscontrabili nel territorio calabrese. Sulla base dei lineamenti fisici e climatici la Calabria può essere suddivisa in tre fasce principali (Critelli & Gabriele, 1991), ognuna caratterizzata da una dinamica morfologica diversa per modalità ed intensità. In particolare, si distinguono:

1. fascia ionica, contraddistinta da un regime pluviometrico di tipo impulsivo, dove a lunghi periodi siccitosi seguono brevi ma intense piogge (Versace & al., 1989). Tale regime provoca l'insorgere di fenomeni di instabilità superficiale dei versanti con rapida erosione, dilavamento e fenomeni di colamento;
2. fascia tirrenica, che presenta un clima umido con periodi piovosi doppi rispetto alla fascia ionica, ma di minore intensità. Tale fascia è contraddistinta da una minore franosità rispetto alla precedente, sia per il regime pluviometrico, sia per la geologia caratterizzata dalla sovrapposizione di litotipi a comportamento meccanico differente, da un forte tasso di sollevamento con un sistema strutturale degradante verso il mare;
3. fascia centrale, che si sviluppa dal bacino del fiume Crati a quello del fiume Mesima, contraddistinta da caratteri climatici e geologici intermedi rispetto ai precedenti. Dal punto di vista geologico è costituita per la maggior parte da sedimenti quaternari scarsamente litificati e da intensi fenomeni franosi.

La Calabria si colloca in una zona con clima temperato ed estate secca denominato "mediterraneo". Le zone litoranee ed i versanti sul mare sono caratterizzati da un clima con inverni miti ed estati calde e siccitose, a differenza delle zone più interne distinte da un clima definito montano – mediterraneo con inverni più freddi e piovosi ed estati meno calde con probabili precipitazioni. In particolare, i caratteri climatici della Calabria sono fortemente influenzati dalla presenza di catene montuose a sviluppo prevalentemente lineare, che si innalzano rapidamente dal livello del mare fino a quote medie di 1.000÷1.500 m. Tali catene provocano la rapida ascensione delle masse d'aria umide che precipitano sotto forma di piogge di intensità variabile in funzione della quota, e nello stesso tempo fungono da ostacolo per le zone sottovento che vedono limitati gli effetti delle perturbazioni. La distribuzione spaziale delle piogge è influenzata a nord e a sud della regione rispettivamente dalla presenza del massiccio del Pollino, che si salda ad ovest con la catena Costiera, e dalla catena montuosa delle Serre, che si estende dalla stretta di Catanzaro fino al massiccio dell'Aspromonte. Gli effetti che tali sistemi di catene hanno sulle precipitazioni sono complessi. In particolare, la distribuzione delle piogge medie annue oscilla dai circa 2.000 mm per le stazioni poste in vetta alla Catena Costiera ai 600 mm per le stazioni installate sulla costa ionica (Critelli & Gabriele, 1991). Le conseguenze degli effetti orografici a sud sono più complesse, in quanto la catena delle Serre risente sia delle perturbazioni provenienti dal

Tirreno, che di quelle provenienti dallo Ionio. Poiché i venti occidentali sono più carichi di umidità di quelli orientali e dal momento che il versante tirrenico della Catena Costiera ha una pendenza maggiore del versante ionico delle Serre, si hanno su quest'ultimo piogge brevi ed intense, mentre sul Tirreno piogge frequenti e di minore intensità. L'orografia influenza in maniera significativa le precipitazioni contrassegnando pianure costiere aride e zone montuose con piogge tra le più abbondanti della penisola. In particolare, in modo abbastanza netto si contrappongono il versante tirrenico con piogge abbondanti ed un versante ionico più arido, come visibile all'interno carta riportata in Figura 4.1.

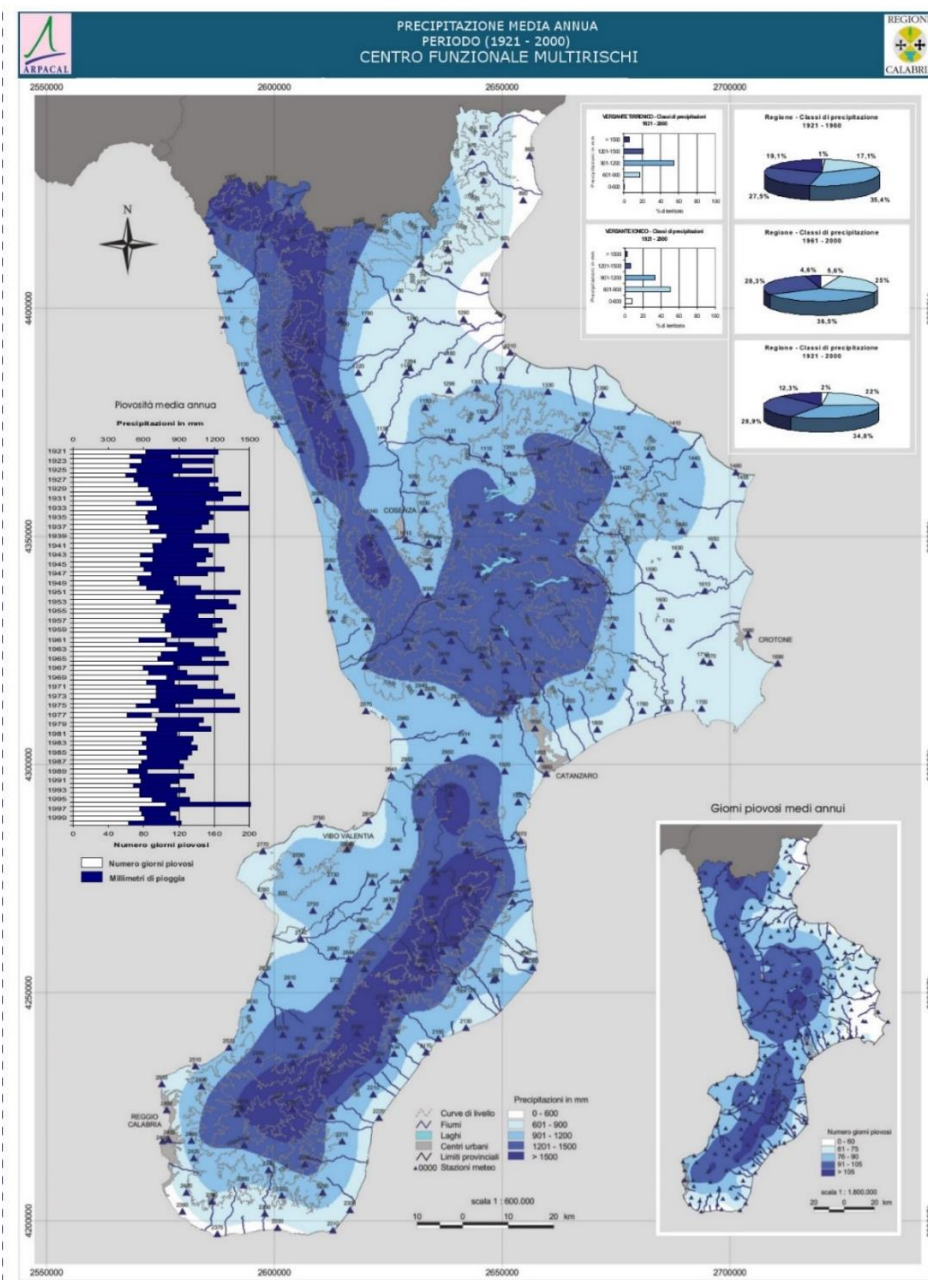


Figura 4.1 Precipitazione media mensile annua Regione Calabria, (ARPACAL, 2020).

I picchi più elevati superano i 2.000÷2.200 mm di pioggia e si registrano ovviamente sulle alture volte al mar Tirreno, che esercitano una determinante azione di cattura delle correnti umide di origine atlantica; i minimi storici appartengono alle fasce costiere con alcune zone, quali la piana di Sibari, il Marchesato e l'estremo versante meridionale dell'Aspromonte, che non raggiungono i 600 mm annui di piovosità. Tali zone, infatti, risultano protette dalle perturbazioni provenienti in genere da Nord – Nord Ovest in inverno rispettivamente dal Massiccio del Pollino, dall'Altopiano della Sila e dai Monti Peloritani della Sicilia.

### **4.3 Assetto idrologico e clima dell'area di esame**

#### **4.3.1 Caratteristiche climatiche del sito e dati pluviometrici**

L'area in esame ricade in zona a clima variabile con caratteristico clima mediterraneo evidenziato da massime concentrazioni delle precipitazioni e da valori bassi delle temperature nel periodo invernale e precipitazioni scarse e temperature alte nel periodo estivo; ovvero, come già precedentemente descritto, ci troviamo in quella che è definita fascia ionica.

La valutazione quantitativa delle precipitazioni atmosferiche per la porzione di territorio esaminato è stata eseguita analizzando i dati della *Regione Calabria – ARPACAL CENTRO FUNZIONALE MULTIRISCHI - Banca Dati Meteo-idrologici dal 1916 al 2019* - registrati nella Stazione di Catanzaro cod. 1850 (ARPACAL, 2020) (Figura 4.2).

Nelle Tabella 4.1 e 4.2 sono riportati i dati storici delle piogge mensili registrate nella stazione pluviometrica di Catanzaro (Cod. 1850) negli ultimi 104 anni disponibili (dal 1916 al 2020). Analizzando i valori medi mensili annuali delle precipitazioni si evidenzia, in linea generale, che nel periodo compreso tra gennaio-marzo e ottobre-dicembre ricade, con andamento piuttosto uniforme, circa il 75% delle precipitazioni annue. Da un'analisi più approfondita del dato, si evince che in coincidenza dell'anno 2018 (periodo di riferimento per la riattivazione del movimento gravitativo) si riscontra il dato pluviometrico annuale più elevato degli ultimi 104 anni; dalle misurazioni eseguite si registra, infatti, un valore pari a 1588.8 mm superiore al valore storico più elevato misurato nell'anno 1933 pari a 1444.6 mm.

REGIONE CALABRIA

CENTRO FUNZIONALE MULTIRISCHI

Monografia della stazione termopluviometrica di **Catanzaro**

Caratteristiche			
Codice	<b>1850</b>	Nome	<b>Catanzaro</b>
	Sensori presenti		<b>P, T</b>
	Stato		<b>Attiva in Telemisura</b>
Localizzazione			
Comune	<b>Catanzaro</b>	Provincia	<b>CZ</b>

Legenda sensori:	P= pluviometro, T= termometro, N= nivometro, Ig= igrometro R= radiometro, DV= direzione del vento, VV = velocità del vento, I= idrometro, B= barometro
------------------	---



*Figura 4.2 Stazione termo-pluviometrica di Catanzaro COD. 1850, (ARPACAL, 2020).*

Prendendo in considerazione gli eventi pluviometrici per l'anno 2018, riportati in Tabella 4.3 ed in Figura 4.3, in cui le precipitazioni sono espresse in millimetri e cumulate tra le ore 0 e le ore 24, riferite all'ora solare, si osserva, inoltre, che il mese più piovoso è stato ottobre, con un quantitativo di 479.4 mm. pari circa al 30% del totale. I valori più bassi si riscontrano nei

mesi di aprile, maggio, luglio e settembre (con minimo ad aprile pari solo a 3.4 mm), mentre valori in linea con il periodo autunnale ed invernale si registrano nel mese di giugno e agosto (151.0 mm. e 116.2 mm.). L'evento significativo, come si può vedere dalla tabella, è avvenuto dal 2 al 2 ottobre 2018 e verrà trattato in un sotto paragrafo all'interno del capitolo. Dunque, per quanto concerne gli apporti meteorici il regime pluviometrico è caratterizzato da una marcata stagione arida estiva e da un periodo piovoso autunno-invernale, con un brusco avvio delle precipitazioni a ottobre.

REGIONE CALABRIA - BANCA DATI METEOROLOGICI													
Stazione di Catanzaro (cod. 1850) - Piogge mensili													
Anno	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
1916	67.5	39.6	118.8	170.1	-	10.5	6.1	-	45.2	38.5	204.0	83.8	784.1
1917	183.2	163.6	79.3	33.2	45.4	-	0.5	-	-	93.4	76.4	162.1	837.1
1918	25.0	63.5	115.5	55.0	52.3	19.8	9.3	14.2	2.0	241.5	54.0	86.5	738.6
1919	261.0	252.6	62.5	147.8	68.0	6.2	9.5	13.5	42.6	110.0	120.7	74.0	1,168.4
1920	59.5	207.0	24.0	32.0	28.0	39.2	-	7.0	22.0	203.3	262.0	225.3	1,109.3
1921	84.0	102.2	239.4	94.5	49.6	73.0	30.2	14.7	39.1	85.4	122.5	198.0	1,132.6
1922	193.1	207.0	61.6	52.5	21.4	10.1	0.6	2.7	5.1	79.6	109.2	30.2	773.1
1923	230.1	121.5	81.7	86.0	25.0	24.5	22.9	10.3	38.9	23.1	142.8	280.2	1,087.0
1924	92.3	125.2	78.4	54.2	16.8	61.2	29.0	17.8	0.5	113.4	178.3	48.6	815.7
1925	3.8	48.5	121.9	102.1	83.8	14.1	-	-	121.7	193.5	219.4	141.5	1,050.3
1926	78.8	28.7	46.1	56.4	64.1	94.0	-	9.5	15.3	33.1	168.7	194.3	789.0
1927	209.9	32.3	91.5	40.5	15.2	4.2	-	22.6	40.7	150.3	128.4	280.5	1,016.1
1928	123.2	84.6	202.0	57.1	65.3	-	2.9	-	9.3	47.8	177.0	116.9	886.1
1929	157.5	84.4	70.3	44.2	47.2	43.7	-	57.2	169.0	80.0	128.6	63.4	945.5
1930	185.5	289.4	68.8	86.2	24.9	38.6	22.2	0.6	29.2	128.5	53.2	337.7	1,264.8
1931	221.2	350.1	145.8	120.8	13.8	3.4	-	0.4	41.6	30.2	126.2	106.4	1,159.9
1932	154.0	58.0	316.0	70.0	10.0	29.0	26.2	8.0	92.6	18.7	419.7	115.6	1,317.8
1933	179.8	130.4	117.0	54.6	56.1	62.4	11.4	25.4	62.2	86.5	318.0	340.8	1,444.6
1934	166.8	157.8	118.0	59.4	79.6	24.8	1.0	24.4	40.4	208.4	93.0	79.2	1,052.8
1935	151.6	112.6	152.8	5.2	7.6	6.8	17.2	1.8	21.4	157.2	456.4	216.6	1,307.2
1936	62.4	63.4	91.6	67.2	37.6	17.0	-	12.8	77.6	118.0	282.6	202.4	1,032.6
1937	60.6	168.2	100.2	108.0	47.0	7.2	32.2	52.8	48.4	39.0	134.0	182.6	980.2
1938	141.8	120.8	14.6	77.2	96.8	2.0	0.6	27.5	30.6	42.2	75.5	356.1	985.7
1939	59.2	180.2	58.0	90.4	68.8	24.0	-	15.4	344.4	62.4	62.8	128.8	1,094.4
1940	240.8	92.9	18.2	110.8	30.8	106.5	-	13.0	33.2	136.0	30.5	142.6	955.3
1941	98.0	91.9	4.1	95.1	62.1	11.8	23.4	-	50.9	70.6	185.5	17.8	711.2
1942	237.2	169.0	322.8	8.0	5.4	47.8	1.6	5.2	34.4	11.2	124.6	155.2	1,122.4
1943	95.0	142.8	319.4	24.0	68.6	35.0	0.4	0.4	18.4	99.0	186.6	94.6	1,084.2
1944	58.6	125.0	112.8	27.6	5.0	1.8	-	36.8	19.2	138.6	87.0	122.8	735.2
1945	201.4	9.4	38.0	13.7	5.8	3.6	-	33.6	155.0	28.6	250.9	129.6	869.6
1946	418.7	38.2	63.2	29.6	13.0	-	5.0	-	-	75.1	90.7	362.2	1,095.7
1947	196.4	160.2	27.0	76.6	68.6	13.2	60.2	10.4	44.8	183.2	103.4	125.0	1,069.0
1948	92.8	88.6	-	67.4	65.2	34.6	1.0	11.2	117.2	124.4	158.0	25.0	785.4
1949	125.6	36.6	118.6	9.4	35.0	21.4	21.2	22.5	26.4	109.9	171.2	43.2	741.0
1950	229.4	58.2	78.9	29.8	15.6	6.0	6.0	45.4	21.0	77.6	113.7	226.4	908.0
1951	158.2	65.2	150.2	12.8	95.4	10.0	8.6	3.2	95.4	271.7	92.8	75.2	1,038.7
1952	104.3	147.4	67.2	50.6	90.6	5.8	43.8	-	10.8	45.8	113.0	139.8	819.1
1953	88.6	96.0	33.0	90.8	96.0	50.4	2.3	8.2	28.8	416.9	168.3	77.4	1,156.7
1954	146.6	202.9	162.8	95.0	111.4	1.6	-	3.6	4.6	120.6	174.7	120.7	1,144.5
1955	225.0	57.0	130.0	70.6	-	12.6	116.8	55.2	98.0	67.0	42.8	56.4	931.4
1956	57.2	210.7	128.5	24.8	52.0	22.0	17.0	3.2	21.4	43.0	115.6	88.2	783.6
1957	171.1	34.2	65.7	84.8	24.4	13.2	-	21.6	17.0	160.6	257.8	99.4	949.8
1958	98.4	41.8	154.4	62.6	23.0	7.0	3.6	-	27.8	34.6	480.8	130.6	1,064.6
1959	157.6	36.4	46.6	71.8	33.8	62.8	21.4	34.2	37.4	53.9	441.1	126.1	1,123.1
1960	132.8	86.6	147.2	137.0	84.8	16.4	0.4	-	56.2	63.0	51.1	233.1	1,008.6
1961	130.4	80.4	11.2	60.6	44.8	1.8	16.2	3.2	8.8	76.0	90.0	71.2	594.6
1962	103.0	92.4	158.4	45.2	20.8	23.8	7.0	-	47.4	72.6	135.0	124.0	829.6

Tabella 4.1 Piogge mensili dal 1916 al 1962, (ARPACAL, 2020).



1963	92.1	103.8	63.0	68.6	61.6	17.9	18.8	17.8	30.0	68.4	18.0	193.6	753.6
1964	154.0	97.1	151.5	27.2	17.4	27.3	14.3	11.8	92.5	131.5	191.4	234.0	1,150.0
1965	185.4	85.5	37.9	117.8	27.2	4.0	-	78.2	146.6	103.1	159.0	153.8	1,098.5
1966	169.0	51.6	97.0	37.8	45.2	24.0	0.8	11.8	88.3	253.8	200.8	173.4	1,153.5
1967	87.2	160.8	18.2	113.0	22.6	12.4	45.0	23.8	27.4	22.8	75.0	194.2	802.4
1968	190.6	87.6	61.6	10.2	14.6	58.9	0.2	84.6	13.4	12.6	123.3	124.8	782.4
1969	84.8	106.0	190.1	25.6	89.3	9.6	14.8	123.4	28.6	119.9	75.6	254.0	1,121.7
1970	126.9	137.7	83.8	17.4	21.5	44.4	1.4	0.6	21.0	131.9	61.3	44.3	692.2
1971	151.2	93.0	166.5	90.2	10.0	7.4	160.4	12.8	141.9	119.4	95.9	108.0	1,156.7
1972	239.7	175.4	69.0	33.5	40.8	0.6	19.6	25.4	64.8	185.9	37.5	381.7	1,273.9
1973	442.0	127.4	383.4	111.8	10.6	30.6	81.4	9.5	»	171.6	111.4	119.2	»
1974	51.8	123.0	89.8	192.0	74.8	10.8	-	21.0	118.6	262.0	210.0	65.2	1,219.0
1975	18.2	137.4	107.4	42.4	56.0	14.2	0.6	54.6	1.6	128.0	103.6	84.4	748.4
1976	50.7	122.6	139.3	56.1	38.6	80.6	14.6	6.2	9.8	173.4	383.0	272.8	1,347.7
1977	101.6	57.6	74.2	87.4	4.0	6.8	-	0.6	37.2	30.0	169.4	81.8	650.6
1978	250.4	130.4	168.2	153.4	69.6	17.4	23.0	11.8	44.8	332.4	24.2	68.8	1,294.4
1979	148.2	222.4	62.4	103.2	46.8	32.2	15.6	14.4	46.6	124.0	128.4	98.2	1,042.4
1980	202.6	51.4	193.8	47.2	94.4	54.4	-	19.0	22.2	110.6	175.3	217.8	1,188.7
1981	169.0	127.0	16.6	37.0	75.4	3.0	-	46.6	39.0	48.6	95.2	265.6	923.0
1982	88.0	121.0	137.4	49.8	17.8	5.4	5.6	18.6	64.0	182.4	107.2	100.6	897.8
1983	36.0	110.6	82.8	36.6	9.6	21.4	16.4	7.8	123.4	103.6	129.2	104.8	782.2
1984	64.8	110.8	138.0	116.2	1.4	5.2	-	37.6	59.2	71.0	180.6	209.6	994.4
1985	244.8	74.2	212.4	80.6	20.2	-	8.6	-	61.6	63.4	70.2	12.4	848.4
1986	141.0	135.6	156.4	14.2	14.6	16.6	18.2	20.4	12.4	75.4	15.8	88.2	708.8
1987	75.2	181.6	105.0	24.6	68.4	41.6	7.2	5.2	35.2	83.8	370.0	57.2	1,055.0
1988	124.8	95.2	246.4	32.4	1.4	0.8	6.8	15.8	89.4	81.4	119.6	85.2	899.2
1989	6.0	78.0	81.8	58.2	25.4	43.8	21.0	-	41.0	136.4	50.6	46.0	588.2
1990	131.8	94.2	11.0	83.0	29.0	0.2	-	50.0	50.2	60.0	198.0	487.4	1,194.8
1991	64.0	155.0	56.8	72.6	58.0	6.2	86.2	39.8	11.8	50.2	67.0	56.0	723.6
1992	71.4	10.6	56.6	79.6	38.2	29.2	38.4	-	29.6	97.2	42.2	218.6	711.6
1993	160.6	76.0	114.6	»	»	»	»	0.4	20.6	97.4	206.8	94.8	»
1994	116.2	155.6	0.2	72.8	25.8	11.8	15.0	15.6	26.2	201.0	55.4	90.8	786.4
1995	72.0	63.0	83.6	54.0	18.4	6.4	15.8	154.8	20.6	6.2	154.8	348.2	997.8
1996	233.0	129.2	205.2	110.2	64.0	11.6	10.2	51.0	78.2	234.8	130.2	152.4	1,410.0
1997	65.8	26.4	66.6	»	»	1.4	13.6	25.2	123.4	124.2	183.0	114.2	»
1998	53.2	74.2	112.6	37.2	100.6	9.6	3.6	1.2	71.4	53.4	95.4	95.6	708.0
1999	154.6	78.0	44.6	60.0	16.2	20.8	34.6	28.2	93.0	28.4	113.6	142.0	814.0
2000	69.4	67.4	20.8	68.2	9.0	1.6	31.0	30.6	209.2	60.4	101.0	129.8	798.4
2001	193.4	117.6	92.6	36.8	54.8	5.4	10.2	0.8	78.6	51.8	93.0	131.2	866.2
2002	39.2	43.8	54.4	81.6	129.0	2.6	15.4	162.8	177.0	104.2	122.2	154.2	1,086.4
2003	176.4	72.8	45.2	187.8	32.2	3.6	20.8	31.6	33.6	123.2	188.4	171.8	1,087.4
2004	150.4	32.8	192.0	114.4	44.4	17.8	24.6	21.6	68.6	17.2	222.6	239.4	1,145.8
2005	91.6	139.6	54.8	88.4	82.2	74.8	16.0	28.8	86.4	31.0	97.8	217.0	1,008.4
2006	95.0	123.6	77.8	37.2	1.0	59.0	119.0	33.2	60.0	60.0	49.0	113.6	828.4
2007	36.2	133.0	86.0	81.0	41.8	15.0	-	-	42.0	90.0	151.8	134.2	811.0
2008	40.4	5.8	167.8	60.4	23.6	11.0	40.4	5.4	69.8	23.2	317.0	207.6	972.4
2009	283.2	141.2	183.4	100.2	8.2	75.2	4.6	14.8	265.8	93.0	65.2	152.0	1,386.8
2010	240.4	303.0	158.0	38.0	46.8	54.4	7.0	4.0	113.4	153.2	179.4	129.4	1,427.0
2011	188.6	120.6	118.4	149.2	74.6	3.8	1.6	2.8	69.0	67.8	284.0	100.0	1,180.4
2012	109.4	275.8	17.2	123.0	45.4	1.6	5.0	4.6	54.4	95.2	130.2	213.4	1,075.2
2013	219.0	152.4	191.8	43.6	75.6	19.6	26.2	18.0	38.2	41.0	362.6	127.4	1,315.4
2014	117.4	193.0	127.8	97.6	57.2	4.4	29.4	-	80.0	45.8	190.0	90.8	1,033.4
2015	105.4	250.8	233.4	33.0	30.8	29.4	-	61.0	93.4	324.6	90.0	8.4	1,260.2
2016	98.6	68.0	186.2	33.6	103.4	11.6	-	43.2	130.2	100.6	205.6	61.2	1,042.2
2017	347.6	72.8	29.6	40.6	33.8	2.2	1.4	10.8	93.4	36.4	116.4	55.0	840.0
2018	159.4	178.0	113.8	3.4	27.2	151.0	34.4	116.2	73.6	479.4	142.8	109.6	1,588.8
2019	116.8	20.4	55.0	76.8	59.6	9.0	43.0	-	57.4	33.4	266.4	115.8	853.6
2020	24.4	59.0	177.8	70.8	»	»	»	»	»	»	»	»	»
1243 mesi disponibili			» = dati non disponibili										
105 anni disponibili													
<b>Valori medi mensili ed annuale</b>													
<b>Gen</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Apr</b>	<b>Mag</b>	<b>Giu</b>	<b>Lug</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Ott</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Tot</b>	
137.5	113.3	108.6	67.8	43.0	23.0	16.7	22.0	60.1	107.5	152.7	145.6	997.7	

Tabella 4.2 Piogge mensili dal 1963 al 2020 e valori medi mensili ed annuali, (ARPACAL, 2020).

REGIONE CALABRIA - BANCA DATI METEOROLOGICI												
Stazione di Catanzaro (cod. 1850) - Piogge giornaliere 2018												
GIORNO	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
1	0.4	-	0.6	2.6	-	-	-	-	-	-	18.2	4.4
2	20.4	5.2	1.2	-	5.2	-	-	-	-	23.4	0.8	-
3	42.8	6.8	0.4	-	13.0	-	-	49.8	-	65.6	-	-
4	6.0	0.2	-	-	0.4	-	-	5.2	-	53.6	28.8	2.0
5	3.4	-	14.4	-	-	-	-	-	-	74.2	4.0	-
6	-	2.8	0.6	-	-	-	-	-	-	12.8	-	-
7	-	3.8	1.8	-	-	-	-	-	-	-	3.2	-
8	-	1.8	8.2	-	2.2	-	-	-	-	-	-	5.8
9	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	2.6	-	17.6
10	1.8	1.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.6
11	-	-	-	-	-	-	-	1.0	-	-	10.8	-
12	1.8	6.6	2.8	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2
13	3.2	13.4	1.8	-	-	-	-	-	0.8	-	-	11.0
14	2.0	4.8	5.6	-	-	3.8	-	-	-	56.2	-	27.2
15	2.2	-	-	-	0.4	18.2	-	8.8	71.2	36.8	-	5.4
16	8.8	-	-	0.8	-	-	-	0.6	0.4	2.6	10.0	-
17	22.6	-	0.2	-	-	101.2	-	5.2	-	10.0	0.2	9.2
18	-	-	-	-	3.2	12.8	-	39.4	-	-	-	-
19	-	-	4.2	-	-	-	-	1.2	-	-	0.4	-
20	0.4	7.6	9.4	-	-	0.2	-	-	0.6	-	8.2	-
21	42.8	9.4	0.2	-	-	-	-	-	-	19.4	2.4	-
22	0.2	7.8	27.8	-	-	-	-	1.2	-	25.4	-	-
23	0.4	33.2	6.8	-	1.6	-	-	-	-	11.8	-	-
24	-	29.0	7.2	-	1.2	-	3.0	0.8	-	-	-	0.2
25	-	24.2	12.0	-	-	0.2	-	0.2	0.6	-	16.0	9.8
26	-	12.0	8.6	-	-	0.8	31.4	-	-	-	9.6	-
27	-	2.8	-	-	-	13.6	-	2.8	-	4.6	29.8	-
28	-	5.2	-	-	-	0.2	-	-	-	68.0	0.4	-
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.2	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.2
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.2	-	-
TOT	159.4	178.0	113.8	3.4	27.2	151.0	34.4	116.2	73.6	479.4	142.8	109.6

Tabella 4.3 Piogge giornaliere anno 2018, (ARPACAL, 2020).

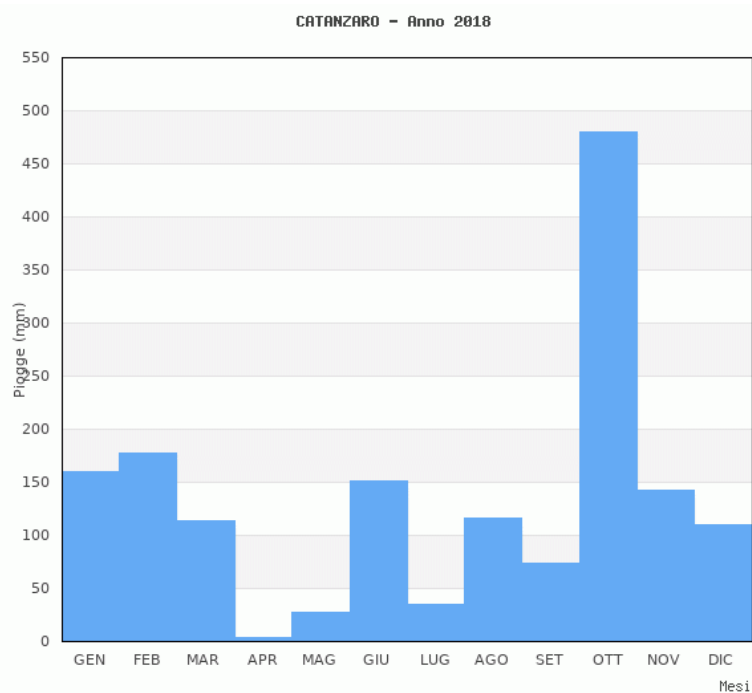


Figura 4.3 Istogramma piogge mensili 2018, (ARPACAL, 2020).

#### **4.3.2 ARPACAL - Centro Funzione Multirischi**

La rete dei Centri funzionali è costituita dal Centro funzionale centrale, presso il Dipartimento della Protezione Civile, e dai Centri funzionali decentrati presso le Regioni e le Province autonome. Ogni Centro funzionale svolge attività di previsione, monitoraggio e sorveglianza in tempo reale dei fenomeni meteorologici con la conseguente valutazione degli effetti previsti su persone e cose in un determinato territorio, concorrendo, insieme al Dipartimento della Protezione civile e alle Regioni, alla gestione del Sistema di allertamento nazionale. Ogni centro funzionale ha il compito di raccogliere e condividere con l'intera rete dei Centri una serie di dati ed informazioni provenienti da diverse piattaforme tecnologiche e da una fitta rete di sensori disposta sul territorio nazionale. Nello specifico:

- i dati rilevati dalle reti meteo-idro-pluviometriche, dalla Rete radar meteorologica nazionale e dalle diverse piattaforme satellitari disponibili per l'osservazione della terra;
- i dati territoriali idrologici, geologici, geomorfologici e quelli derivanti dal sistema di monitoraggio delle frane;
- le modellazioni meteorologiche, idrologiche, idrogeologiche e idrauliche.

Sulla base di questi dati e modellazioni, i Centri funzionali elaborano gli scenari probabilisticamente attesi, anche attraverso l'utilizzo di modelli previsionali degli effetti sul territorio. In base a queste valutazioni, i Centri funzionali emettono bollettini ed avvisi in cui vengono riportati sia l'evoluzione dei fenomeni sia i livelli di criticità attesi sul territorio.

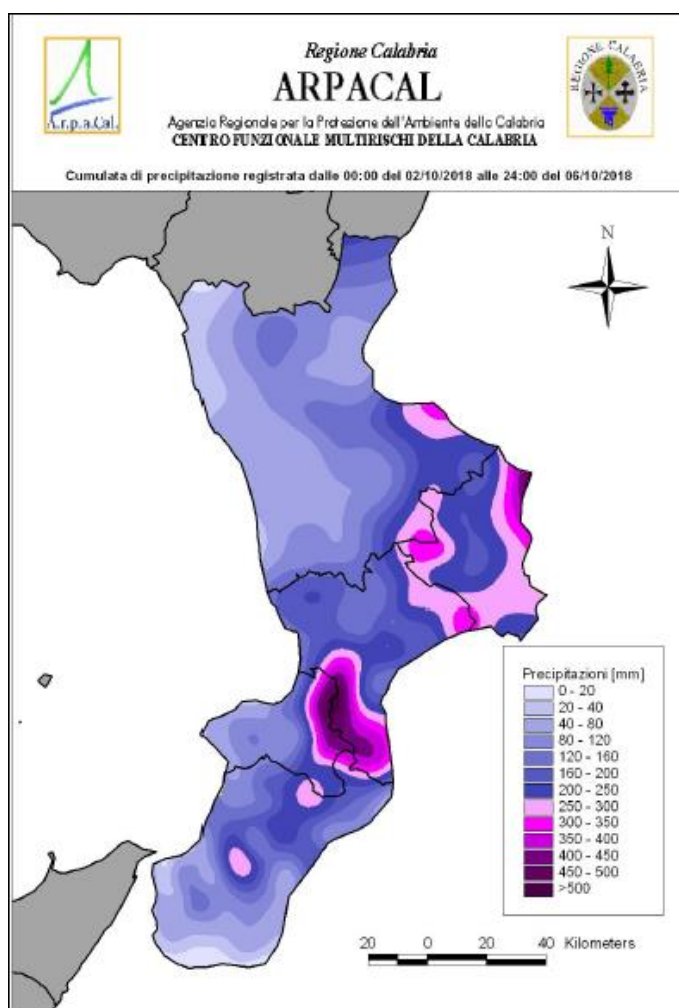
Il Centro funzionale centrale si trova presso la sede operativa del Dipartimento della Protezione Civile, ed è attraverso di esso che il Dipartimento, insieme alle Regioni, garantisce il coordinamento del sistema di allertamento nazionale. Inoltre, coerentemente con il principio di sussidiarietà, nei casi in cui i Centri funzionali decentrati non siano attivi o siano temporaneamente non operativi, il Centro funzionale centrale svolge tutti i compiti operativi loro assegnati. Il Centro funzionale è una struttura dell'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente (*ARPACAL*) che ha raccolto in Calabria l'eredità del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (la cui competenza è stata trasferita dallo stato alle Regioni con il D.L.vo n. 112 del 31.3.1998). Il Centro ha come compito principale il rilevamento sistematico, su tutto il territorio regionale, delle grandezze relative al clima terrestre. Esso effettua anche

la validazione dei dati, tutti rilevati in stretta osservanza degli standard nazionali ed internazionali, e provvede alla pubblicazione degli stessi sul WEB, oltre che alla fornitura a tutti coloro che ne abbiano interesse. Il Centro Funzionale fornisce anche un essenziale supporto al sistema nazionale e regionale di protezione civile. Esso infatti gestisce il nodo calabrese della rete dei centri funzionali, coordinata dal Dipartimento Nazionale della Protezione Civile, svolgendo i compiti previsti dalla Direttiva del Presidente del Consiglio del 27 febbraio 2004 e dalla Direttiva sul Sistema di allertamento per il rischio idrogeologico ed idraulico in Calabria. Inoltre, effettua costantemente il monitoraggio delle precipitazioni e degli altri fenomeni in atto: la struttura è infatti operativa tutti i giorni dell'anno, ed in caso di allerta meteo opera in H24. Qualora rilevi valori superiori alle soglie di allertamento o ravvisi situazioni che possano avere effetti rilevanti sulle attività umane o mettere in pericolo la vita stessa dei cittadini che si trovano nell' area interessata, il Centro Funzionale avvisa la sala operativa regionale di protezione civile ai fini del successivo allertamento delle strutture comunali e delle altre componenti del sistema di protezione civile. In caso di istituzione di unità di crisi o di centro coordinamento soccorsi per la gestione di emergenze in atto, il Centro Funzionale gestisce la funzione tecnico-scientifica (funzione n. 1 prevista dal metodo Augustus, attualmente utilizzato in Italia per la gestione delle emergenze di protezione civile), fornendo informazioni continue, necessarie ai fini del coordinamento degli interventi per la gestione delle emergenze verificatesi sul possibile evolversi degli eventi in atto.

#### **4.3.3 Rapporto evento ottobre 2018**

Nel periodo compreso tra il 2 e il 6 ottobre del 2018 un evento pluviometrico di forte intensità ha interessato gran parte del territorio calabrese facendo registrare precipitazioni diffuse che in alcuni casi hanno raggiunto valori molto elevati. Le piogge più abbondanti sono state registrate sulla Calabria centro-meridionale, con picchi registrati sulle Serre ed uno sconfinamento significativo e molto intenso sul Lamentino. Viene di seguito presentata una breve descrizione dell'evoluzione delle giornate dal 2 al 6 ottobre corredate da alcune immagini riportate in Figura 4.4 dove è mostrata la mappa delle precipitazioni cumulate nel periodo. Nella giornata del 2 ottobre la previsione sinottica sulla Penisola evidenzia un minimo depressionario posizionato sul Tirreno che determina attività temporalesca al Centro-Sud e sul Nord-Est, con precipitazioni sparse, anche a carattere di rovescio o

temporale, sulla Calabria meridionale e ionica; nella giornata del 3 ottobre l'Italia continua ad essere sotto l'influenza di un'ampia e profonda depressione, centrata tra la Tunisia e le nostre due isole maggiori, che determina la persistenza di tempo instabile, con temporali sulle regioni meridionali, situazione che si protrae anche nella giornata del 4 ottobre, in particolar modo sul lato ionico; il 5 ottobre si evidenzia un minimo depressionario che dallo stretto di Sicilia tende a risalire verso il Tirreno centrale e determina precipitazioni su buona parte del Meridione e sulle due Isole maggiori, anche a carattere temporalesco, specie sui settori ionici, con venti forti dai quadranti meridionali; infine, nella giornata del 6 ottobre si evidenzia una struttura depressionaria che avvolge tutta l'Italia determinando, anche per la giornata odierna, precipitazioni diffuse sul territorio, specie su regioni tirreniche, Triveneto e Puglia, nonché sparse, anche a carattere di rovescio o temporale, sulla Calabria ionica centrale, con quantitativi cumulati generalmente moderati.



**Figura 4.4** Mappa delle precipitazioni cumulate dal 02/10/2018 al 06/10/2018, (ARPACAL, 2020)

Il Centro Funzionale Multirischi, attivato in regime di H24 durante l'intero sviluppo dell'evento, ha emesso una serie di Avvisi di Criticità per evento in atto, individuando i comuni per i quali venivano superate le soglie di criticità pluviometrica, ai sensi della Direttiva sul Sistema di Allertamento regionale per il rischio idrogeologico e idraulico in Calabria adottata con D.G.R n.172 del 29 marzo 2007. Di seguito si riporta, in mappa in Figura 4.5 ed in Tabella 4.4, l'elenco di alcuni dei comuni allertati corredato dal relativo livello di attivazione della fase operativa comunale minima. Durante l'evento sono stati allertati 70 comuni di livello 1, 71 di livello 2 e 260 di livello 3, tra cui il comune di Catanzaro, in particolare il livello 1 attiva la fase comunale di *attenzione*, il livello 2 di *preallarme* e il livello 3 di *allarme*.

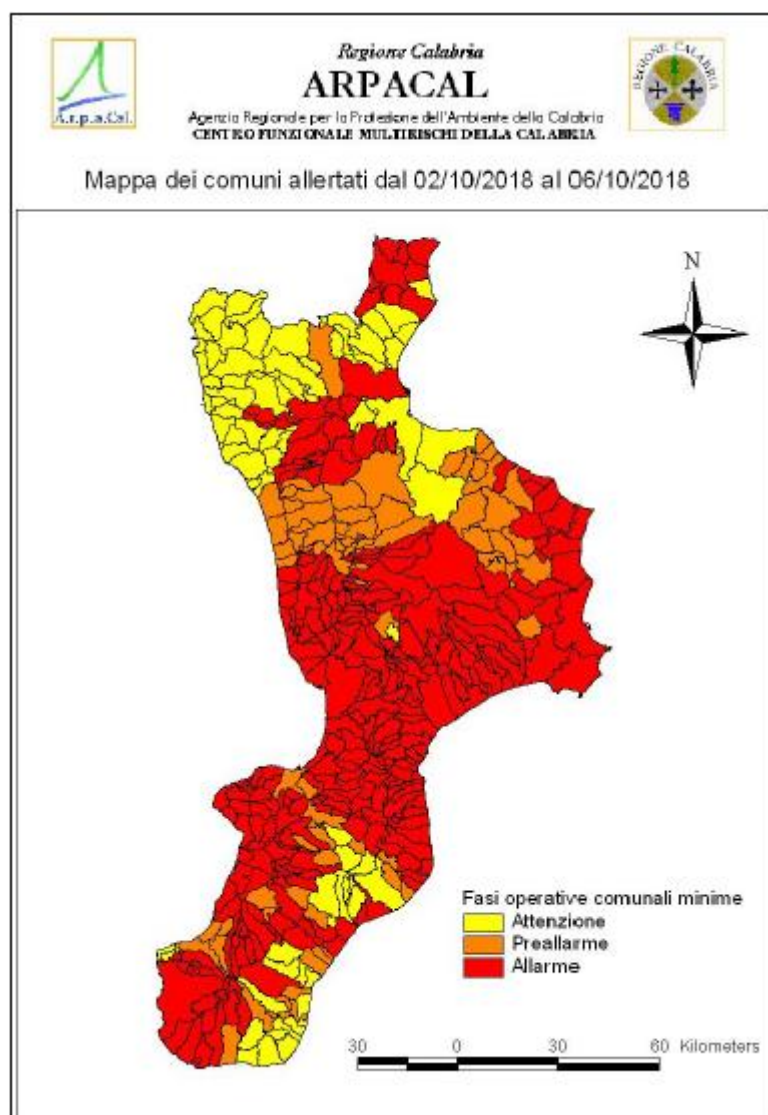
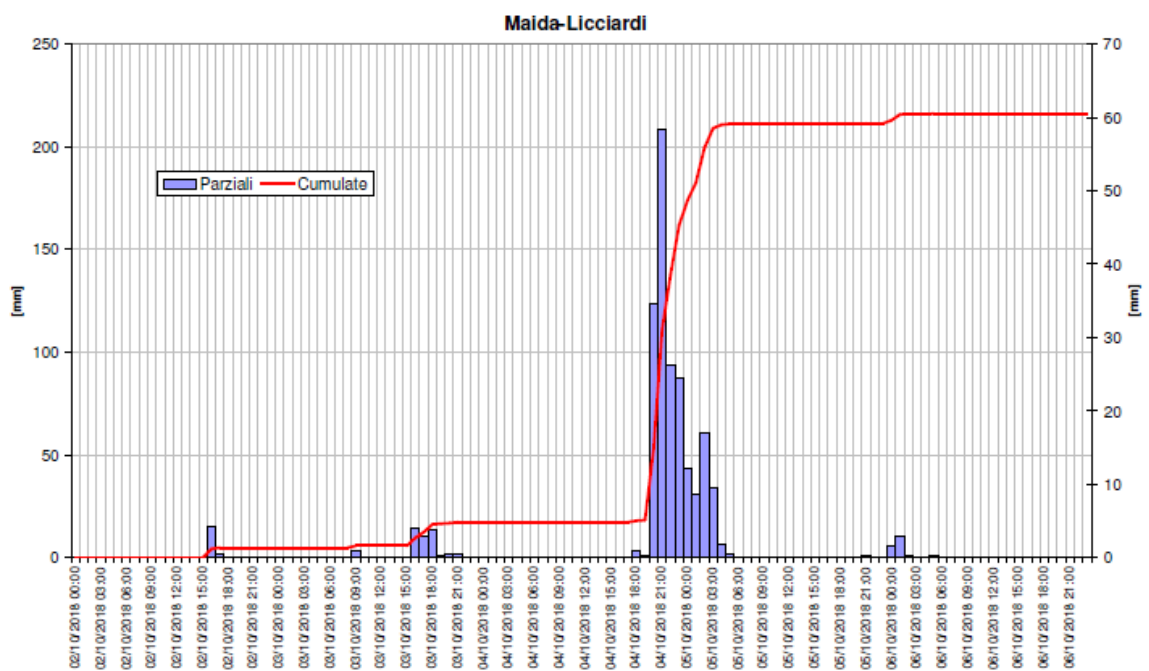


Figura 4.5 Mappa dei comuni allertati durante l'evento che va dal 02/10/2018 al 06/10/2018, (ARPACAL, 2020)

Comune	Livello
CALANNA	3
CALOPEZZATI	2
CALOVETO	2
CAMINI	3
CAMPANA	2
CAMPO CALABRO	1
CANDIDONI	3
CANNA	3
CANOLO	2
CAPISTRANO	3
CARAFFA DEL BIANCO	2
CARAFFA DI CATANZARO	3
CARDETO	3
CARDINALE	3
CARERI	1
CARFIZZI	3
CARIATI	3
CARLOPOLI	3
CAROLEI	3
CARPANZANO	3
CASABONA	2
CASALI DEL MANCO	3
CASIGNANA	2
CASSANO ALLO IONIO	3
CASTEL SILANO	2
CASTIGLIONE COSENTINO	2
CASTROLIBERO	2
CASTROREGIO	3
CASTROVILLARI	2
CATANZARO	3
CAULONIA	1

**Tabella 4.4** Elenco di alcuni dei comuni allertati durante l'evento che va al 02/10/2018 al 06/10/2018, (ARPACAL, 2020)

Infine, in Figura 4.7 viene riportato il diagramma pluviometrico relativo alla stazione di Maida, che si trova nei pressi della stazione più vicina, ovvero quella di Catanzaro, in cui sono state registrate le precipitazioni cumulate più intense.



**Figura 4.6** Diagramma pluviometrico relativo al periodo che va dal 02/10/2018 al 06/10/2018, (ARPACAL, 2020).

#### **4.4 Influenza del regime delle piogge nel movimento franoso**

In questo paragrafo finale viene discussa la forte correlazione tra il regime delle precipitazioni, il tasso dei movimenti, sia superficiali che profondi, ed i livelli piezometrici. In una prima parte verranno correlate le misure inclinometriche con i dati pluviometrici, mentre successivamente si passerà alla correlazione con gli spostamenti superficiali registrati tramite i target topografici, infine, si andrà ad evidenziare la forte correlazione tra il regime delle piogge e i livelli piezometrici misurati su entrambi i corpi di frana. I dati pluviometrici sono stati cumulati a 7, a 15 e a 30 giorni per verificare le diverse correlazioni con i diversi dati del monitoraggio. Per quanto riguarda i dati inclinometrici sono stati correlati con le piogge cumulate a 7 giorni, mentre per i dati topografici vi è stato un riscontro maggiore con le piogge non cumulate ma giornaliere. Nell'analisi dei livelli piezometrici si è scelto, invece, di riportare i grafici con le piogge cumulate a 7 a 15 e a 30 giorni per avere un confronto tra le diverse tipologie di piezometri e dati pluviometrici e capire di conseguenza come meglio si correlano.

##### **4.4.1 Correlazione tra le misure inclinometriche ed i dati pluviometrici**

Per quanto riguarda i dati inclinometrici è stata analizzata la correlazione con i dati pluviometrici sulla superficie di scorrimento, di conseguenza è stata realizzata la relazione solo per il Corpo di Frana 2, ovvero quello attualmente attivo di cui si è individuata una chiara superficie di scorrimento profonda, a differenza del Corpo di Frana 1 che è attualmente fermo e ha registrato movimenti più superficiali.

La superficie di scorrimento individuata, denominata sezione 4bis, già rappresentata nella sezione geotecnica all'interno del precedente capitolo in Figura 3.28, coinvolge quattro inclinometri: l'NI01, l'NI02, l'NI03 e l'NI08. Essa passa rispettivamente alle profondità di 10 m, 19 m, 14 m e 14 m. L'NI03 presentava tre picchi di spostamento a 3 profondità diverse: 7 m, 12 m e 14 m. In un'analisi iniziale il picco ai 12 m presentava degli spostamenti maggiori rispetto agli altri, procedendo però con le letture si è verificato che il picco ai 14 m in realtà era quello che sviluppava degli spostamenti maggiori, per questo si è scelto di interpretare il passaggio della superficie di scorrimento a 14 m, facendola poi proseguire alla stessa profondità fino all'inclinometro NI08 al piede del corpo di frana.



Nella relazione con i dati pluviometrici sono stati considerati i dati cumulati a 7 giorni che presentano un riscontro maggiore con tutti e quattro gli inclinometri, dove al picco delle piogge viene correlato un aumento dello spostamento (mm), come mostrato dalle frecce indicate in Figura 4.7. Il picco di piogge che si è registrato nelle due settimane dal 04/05/2019 al 17/05/2019 ha portato alla strozzatura dell'inclinometro NI02, mentre gli eventi pluviometrici avvenuti tra il 02/11/2019 e il 27/12/2019, rappresentati da una serie di picchi consecutivi evidenziati all'interno del cerchio verde, hanno condotto ad un aumento degli spostamenti di entrambi gli inclinometri ancora in funzione, ovvero NI03 ed NI08.

I picchi più intensi sono stati registrati dal sito dell'Arpacal in due eventi principali, il primo che va dall'11/11/2019 al 13/11/2019 ed il secondo che va dal 23/11/2019 al 25/11/2019. L'evento meteorologico che ha interessato la regione dall'11 al 13 novembre 2019 è stato caratterizzato da precipitazioni intense e venti molto sostenuti. Le piogge si sono manifestate in modo prevalente sul versante jonico, con le precipitazioni più elevate nel bacino del Tacina, tra le province di Catanzaro, Cosenza e Crotona. Inoltre, il vento, prevalentemente meridionale, è stato molto forte su tutto il territorio regionale, facendo registrare, in alcune stazioni, valori della velocità di raffica superiori a 100 km/h. Il secondo evento meteorologico che ha interessato la regione dal 23 al 25 novembre 2019 è stato caratterizzato, analogamente a quello che si è verificato circa 2 settimane prima, da precipitazioni intense e venti molto sostenuti. Anche in questo caso, in alcune stazioni anemometriche sono stati registrati valori della velocità di raffica superiori a 100 km/h.

Si evidenziano solo due picchi di pioggia, per gli inclinometri NI03 ed NI08, dove lo spostamento risulta essere solo minimo, tra cui quello che va dal 31/08/2019 al 06/09/2019 in cui si sono registrati 50.4 mm di pioggia caduti, e quello che va dal 22/02/2020 al 28/02/2020 con 40.6 mm di pioggia caduti. Ad entrambi viene comunque associato uno spostamento seppur minimo. Per l'inclinometro NI01 invece in prossimità dello spostamento che ha portato alla strozzatura dello stesso si registra un picco di pioggia leggero, in cui la correlazione sembra non esserci. In realtà la strozzatura dello strumento viene giustificata dagli elevati spostamenti registrati nelle letture precedenti che risultano essere strettamente correlati ai mm di pioggia caduti.

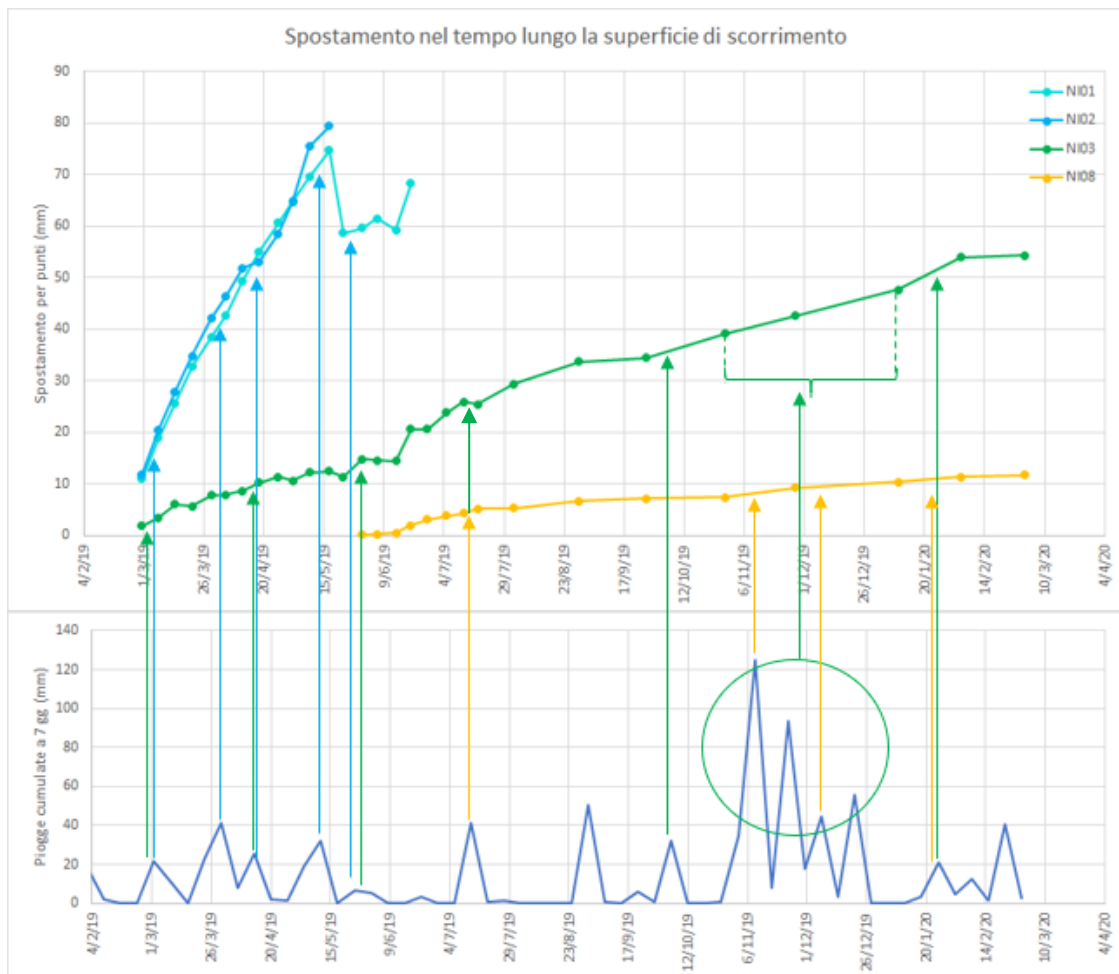


Figura 4.7 Correlazione tra il regime delle piogge e gli spostamenti sulla superficie di scorrimento, (2020).

#### 4.4.2 Correlazione tra le misure topografiche ed i dati pluviometrici

Per le livellazioni topografiche è stato ipotizzato che, trattandosi di un'analisi dei dati degli spostamenti più superficiali, fosse più appropriato correlare le misure con i dati pluviometrici giornalieri e non cumulati, mostrati nell'istogramma in Figura 4.8. I dati riportati nell'istogramma, raccolti dal sito dell'Arpacal (ARPACAL, 2020), vanno dal 07/09/2018 al 25/02/2020 data dell'ultima misura topografica disponibile.

È importante ricordare che a partire dalla data di novembre 2018, a causa del protrarsi delle intense precipitazioni meteoriche, come mostrato all'interno del grafico già riportato in Figura 3.16, è stato rilevato un sostanziale cambiamento dello stato dei luoghi evidenziato dalla presenza di una nicchia di distacco di neoformazione di altezza variabile da 30 a 60 cm e da una serie di linee di frattura di larghezza media pari circa a 15 cm, come già riportato

nei report fotografici nelle Figure 3.14 e 3.15. La suddetta nicchia di distacco, appartenente al Corpo di Frana 1, appare delimitata dai target topografici T31-T35 e T32, indicati con le frecce verdi nel grafico in Figura 4.9, e mostra una geometria ben definita.

Sia all'interno del Corpo di Frana 1 che all'interno del Corpo di Frana 2, in Figura 4.10, sono stati evidenziati in verde gli eventi pluviometrici più intensi che trovano un riscontro con gli spostamenti misurati tramite i target topografici. In particolare, sul Corpo di Frana 2 in corrispondenza degli eventi di pioggia si riscontra un aumento degli spostamenti uniforme su quasi tutti i target.

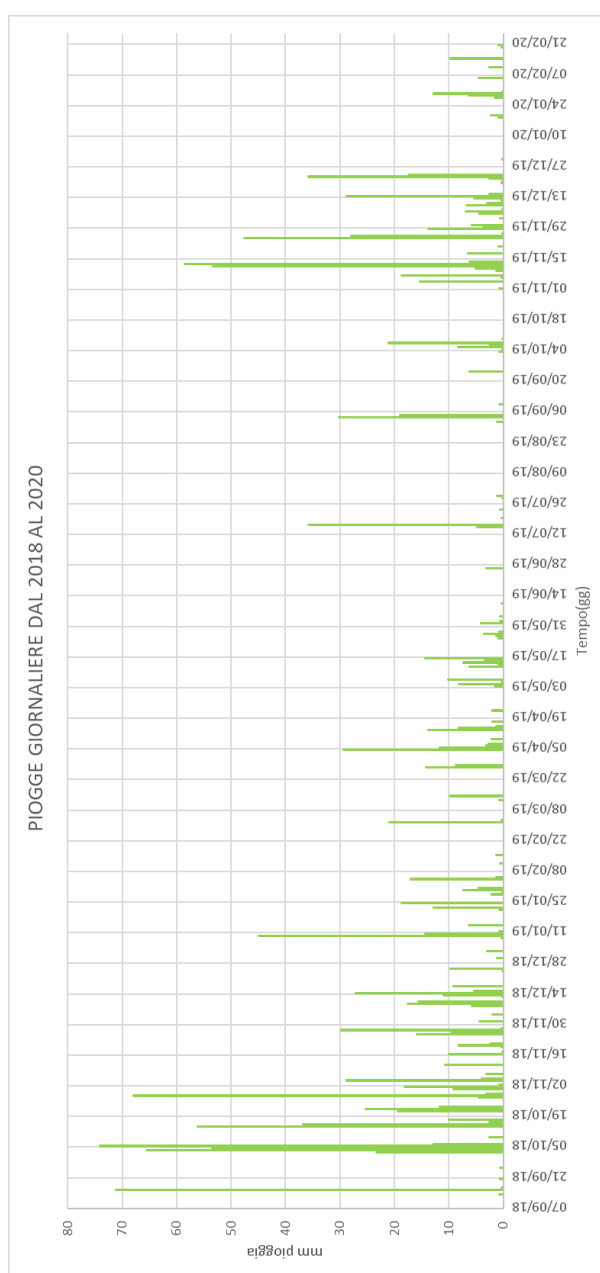
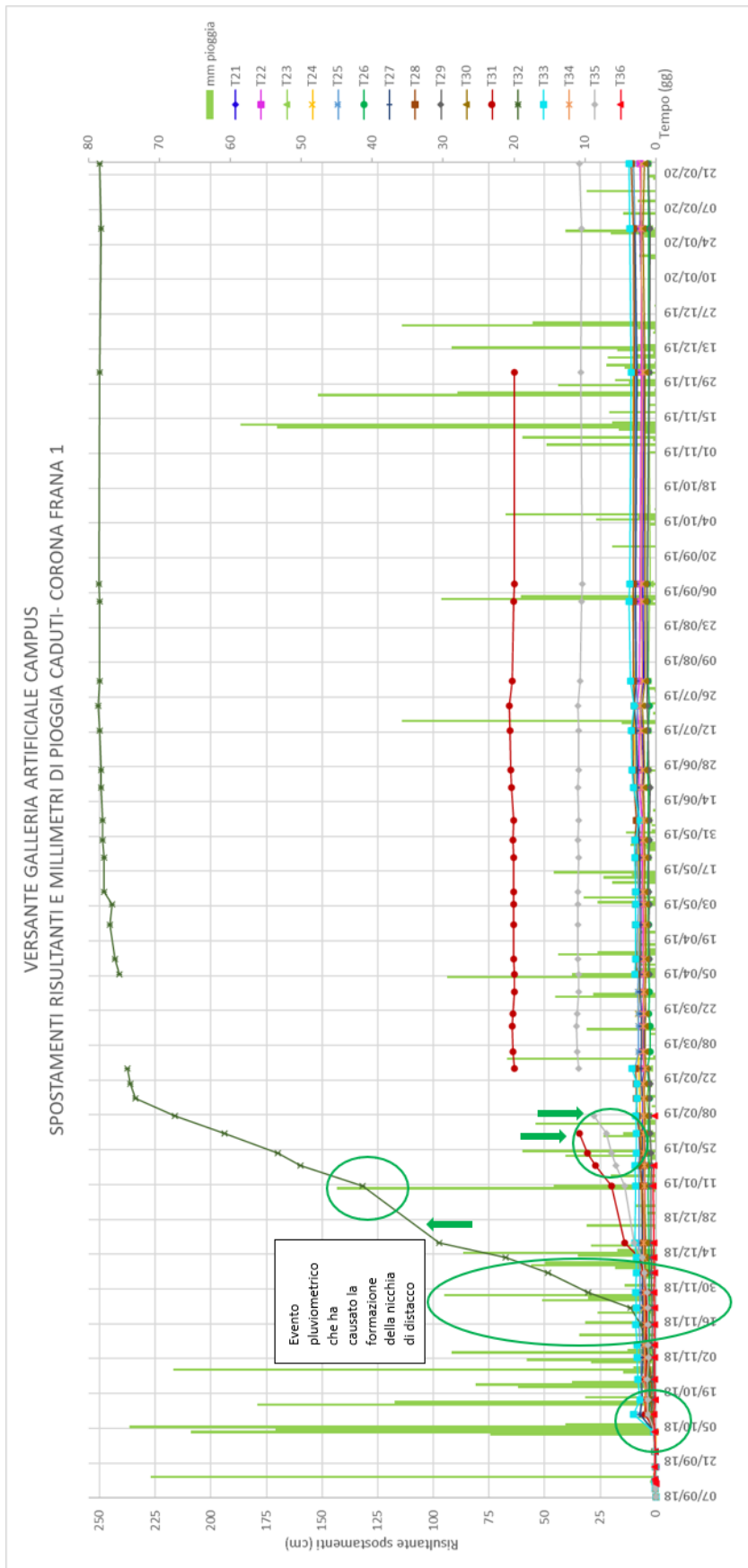


Figura 4.8 Piogge giornaliere dal 07/09/2018 al 25/02/2020, (2020).



**Figura 4.9** Spostamenti risultanti e millimetri di pioggia caduta- Corona di Frana 1, (2020).

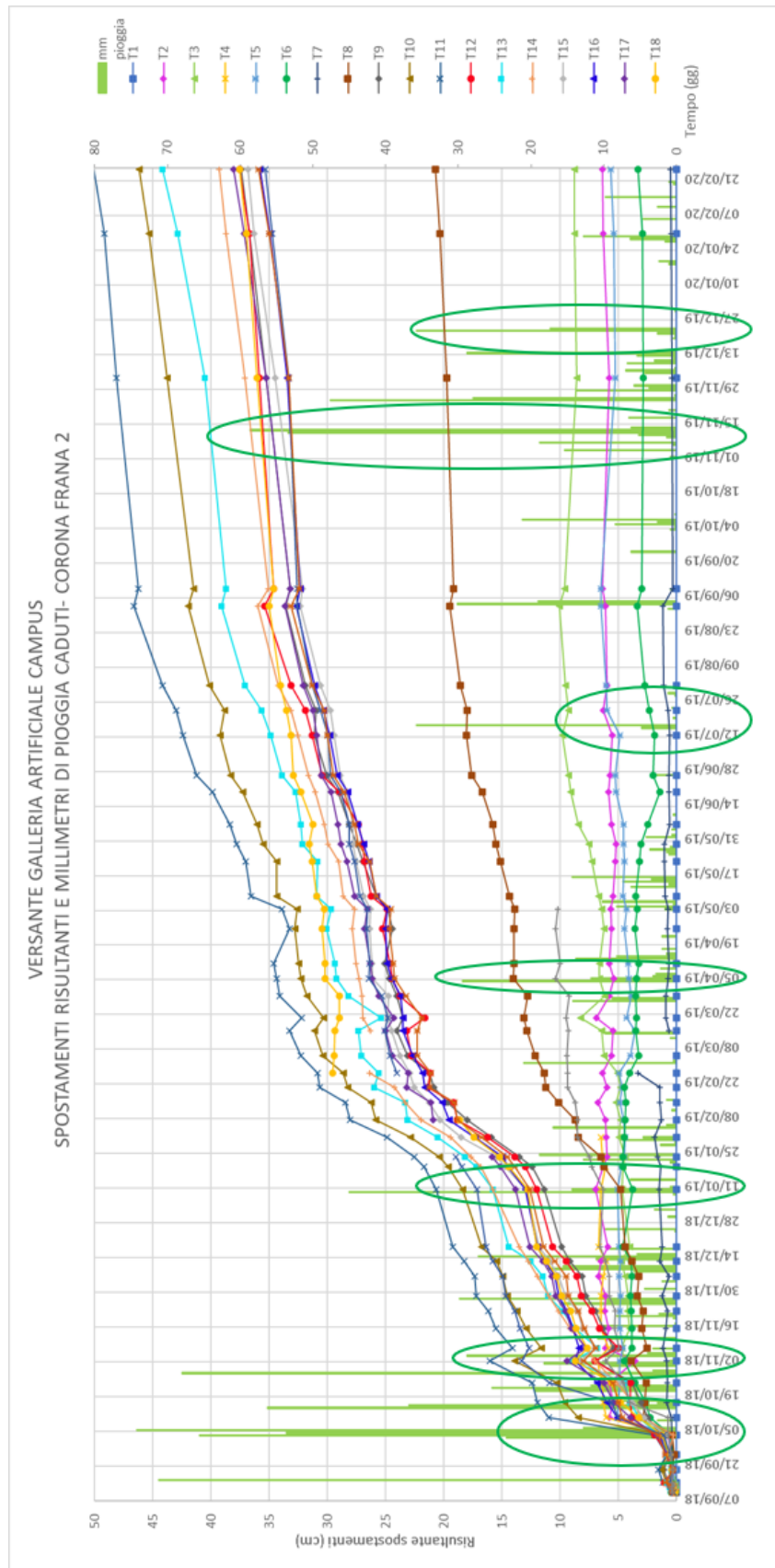


Figura 4.10 Spostamenti risultanti e millimetri di pioggia caduti-Corona di Frana 2, (2020).

#### 4.4.3 Correlazione tra le misure piezometriche ed i dati pluviometrici

I dati piezometrici solitamente vengono utilizzati per sviluppare un modello quantitativo delle condizioni idrauliche dei pendii. Per analizzare la possibile correlazione tra le misure piezometriche ed i dati pluviometrici si è proceduto distinguendo i piezometri appartenenti al Corpo di Frana 1 e quelli appartenenti al Corpo di Frana 2. I piezometri di Casagrande, che presentano un apprezzabile ritardo idrodinamico, sono stati considerati efficaci nel misurare le variazioni molto lente della pressione dei pori nel corso degli anni, a condizione che i tubi siano sigillati accuratamente ed il pozzo fosse riempito di materiale argilloso per tutta la sua lunghezza. I ritardi temporali dei piezometri di tipo Casagrande associati a permeabilità di  $10^{-9}$ ,  $10^{-10}$  e  $10^{-11}$  m/s sono rispettivamente da 1, 4, e 30 giorni (Terzaghi & Peck, 1967).

##### *Corpo di Frana 1*

- **NPZ-04** Piezometro di Casagrande (Profondità cella: 10 m / Quota cella 82.242 m).

Le misure piezometriche, considerando il ritardo idrodinamico tipico di questa tipologia di piezometri, si correlano meglio con le piogge cumulate a 15 giorni. Vengono di seguito riportate le relazioni con i dati pluviometrici cumulati sia a 7 che a 15 e 30 giorni, rispettivamente nelle Figure 4.11, 4.12 e 4.13, per avere un confronto e mostrare come i dati cumulati a 15 giorni si correlino meglio. Possiamo notare come a causa del ritardo idrodinamico, i picchi di pioggia cumulata a 7 giorni risultino leggermente spostati rispetto ai picchi piezometrici, come indicato con le frecce in rosso all'interno del primo grafico. Invece, nel confronto con i dati pluviometrici cumulati ai 15 giorni si riscontra una correlazione maggiore, indicata con le frecce in verde, soprattutto per quanto riguarda il periodo di piogge dal 02/11/2019 al 27/12/2019. I livelli piezometrici raggiungono un massimo infatti tra novembre e dicembre 2019 ed un minimo a febbraio e marzo 2020.

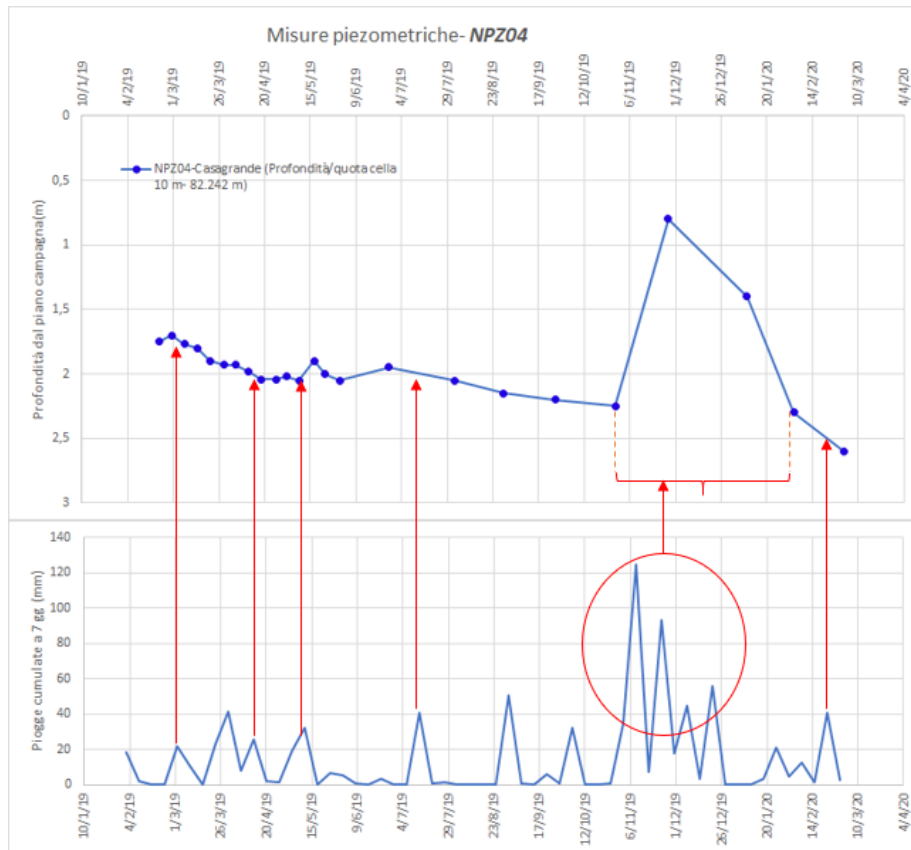


Figura 4.11 NPZ04-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 7 giorni, (2020).

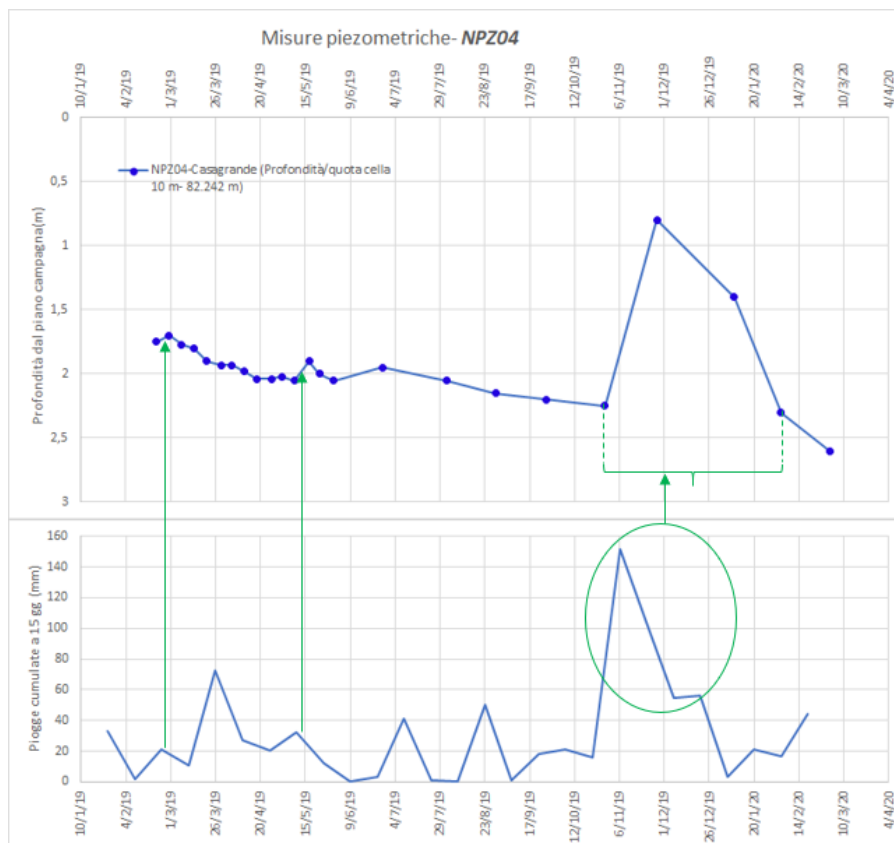
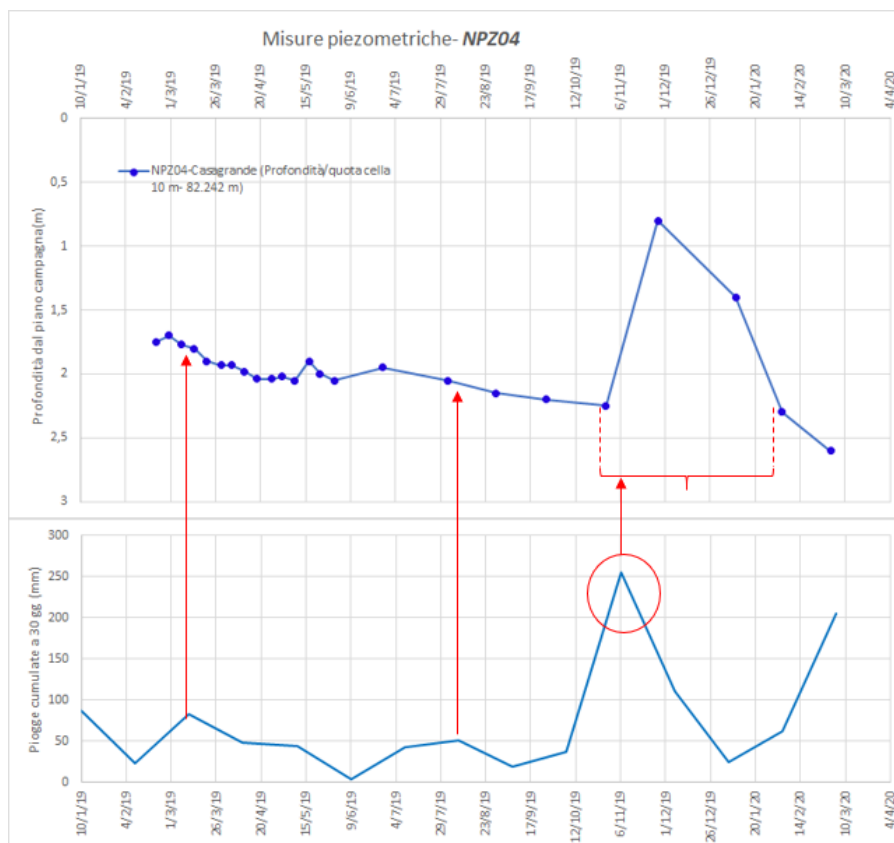


Figura 4.12 NPZ04-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 15 giorni, (2020).



**Figura 4.13 NPZ04-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulate a 30 giorni, (2020).**

- **NPZ-05** Piezometro Elettrico (Profondità cella: 16 m / Quota cella 69.848 m).

Per quest'altra tipologia di piezometro si è riscontrato una correlazione maggiore con le piogge cumulate a 7 giorni, essendo un piezometro che non presenta un apprezzabile ritardo idrodinamico tipico del tipo Casagrande. A conferma di ciò vengono mostrate le correlazioni a 7 giorni, 15 giorni e 30 giorni, rispettivamente in Figura 4.14, 4.15 e 4.16, dove nel primo grafico con le frecce verdi sono indicate le correlazioni con le piogge, mentre nel secondo e nel terzo con le frecce rosse sono indicati i picchi che non riscontrano alcuna correlazione. Ne consegue che solo dopo brevi periodi di pioggia l'aumento della prevalenza idraulica produce un sensibile aumento della pressione dei pori in profondità e che esiste un ritardo minimo tra i due processi. I livelli piezometrici raggiungono un valore massimo a dicembre 2019 ed un valore minimo a marzo 2020.



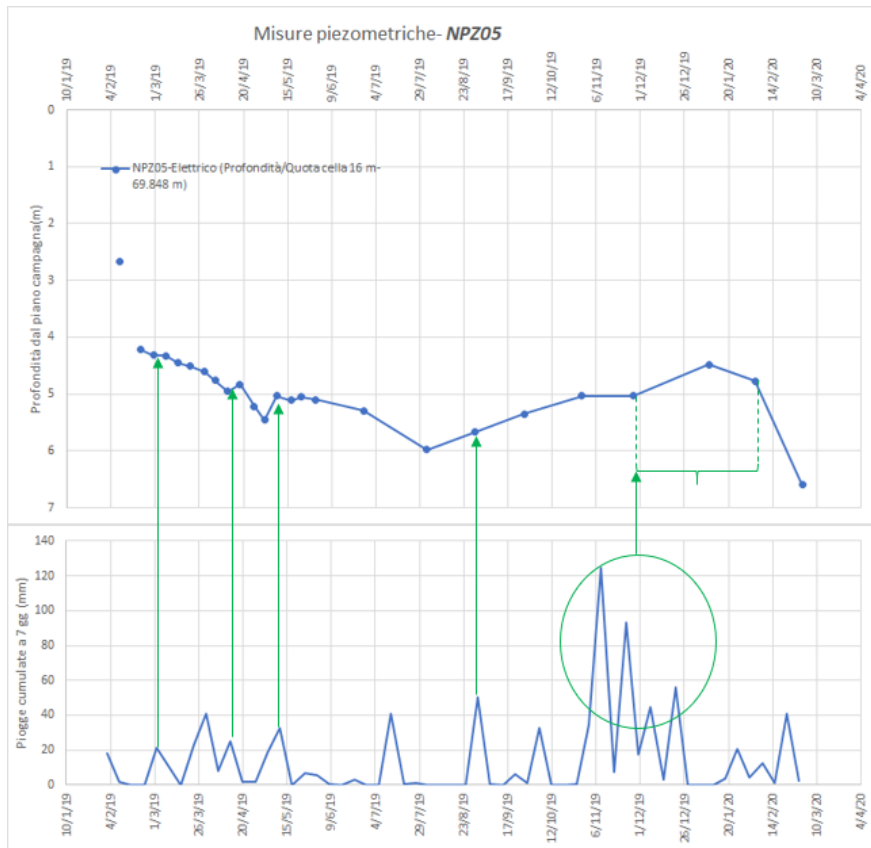


Figura 4.14 NPZ05-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 7 giorni, (2020).

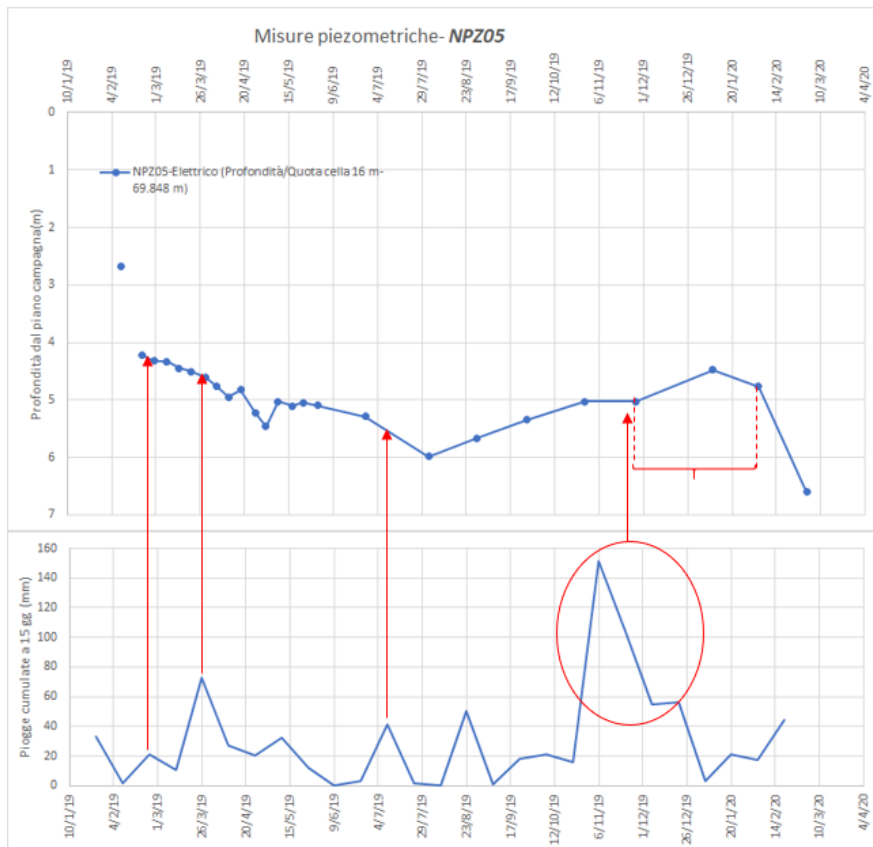
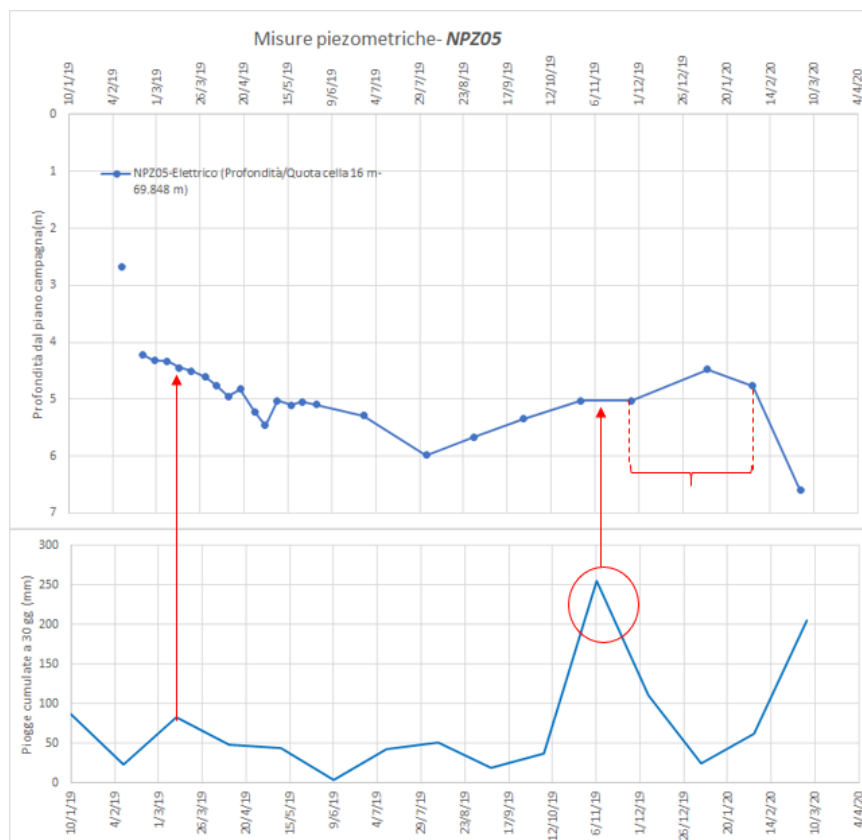


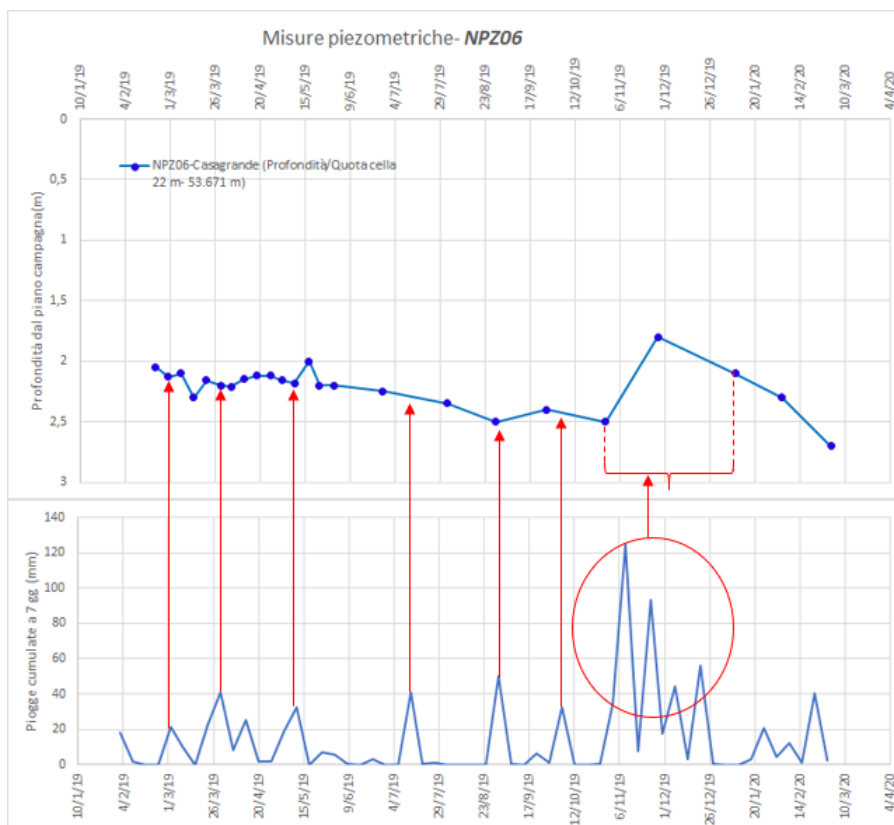
Figura 4.15 NPZ05-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 15 giorni, (2020).



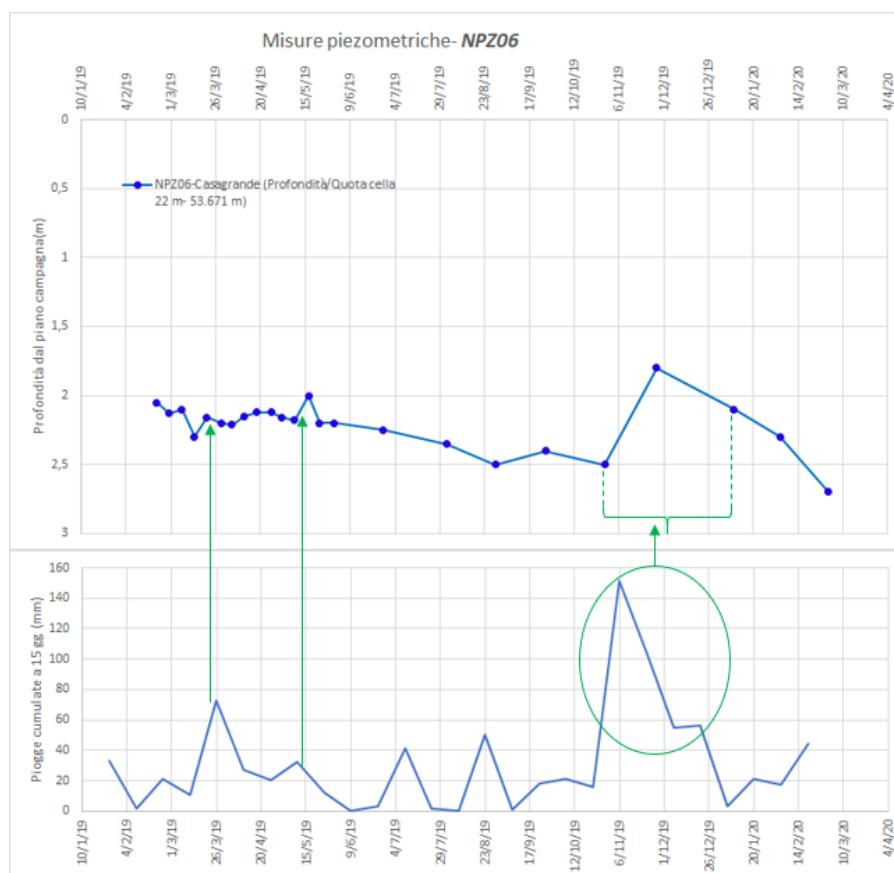
**Figura 4.16 NPZ05-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 30 giorni, (2020).**

- **NPZ-06** Piezometro di Casagrande (Profondità cella: 21.50 m / Quota cella 53.671 m).

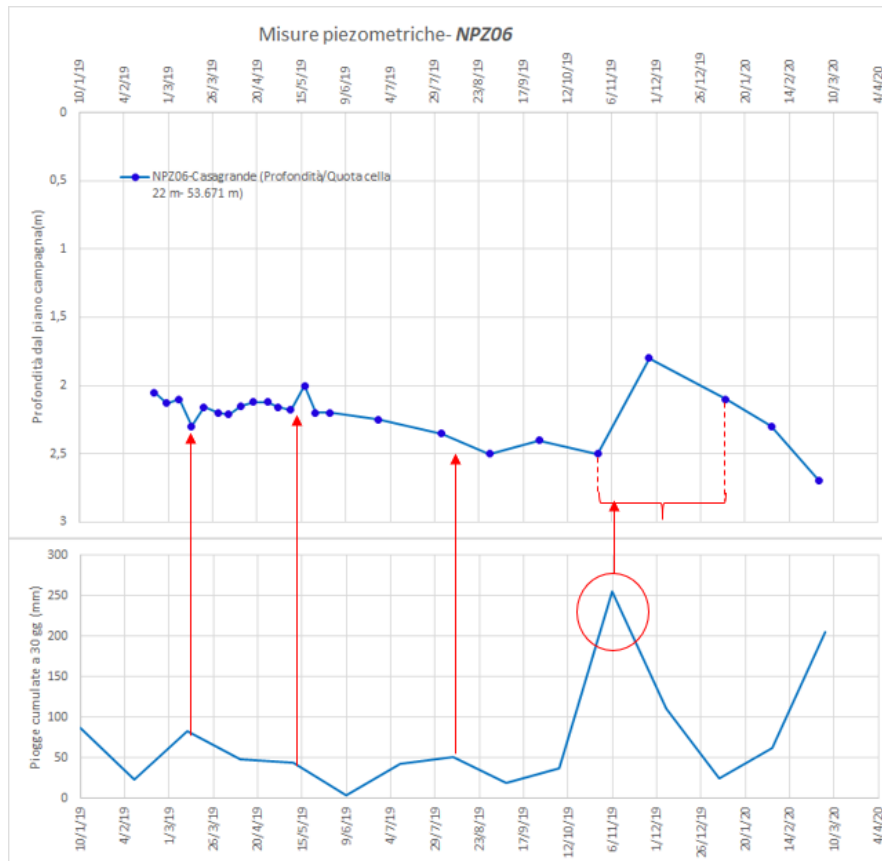
Anche in questo caso trattandosi di un piezometro di tipo Casagrande, come già definito per il piezometro NPZ04, considerando il ritardo idrodinamico presenta una correlazione maggiore con le piogge cumulate a 15 giorni. Per un confronto chiaro delle analisi effettuate si riportano i grafici relativi alle correlazioni con le piogge cumulate a 7 a 15 e a 30 giorni, rispettivamente in Figura 4.17, 4.18 e 4.19. In questo caso viene confermato che i livelli piezometrici raggiungono un massimo tra novembre e dicembre 2019, in accordo con gli eventi pluviometrici che hanno caratterizzato quel periodo, ed un minimo sempre tra febbraio e marzo 2020.



**Figura 4.17 NPZ06-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 7 giorni, (2020).**



**Figura 4.18 NPZ06-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 15 giorni, (2020).**

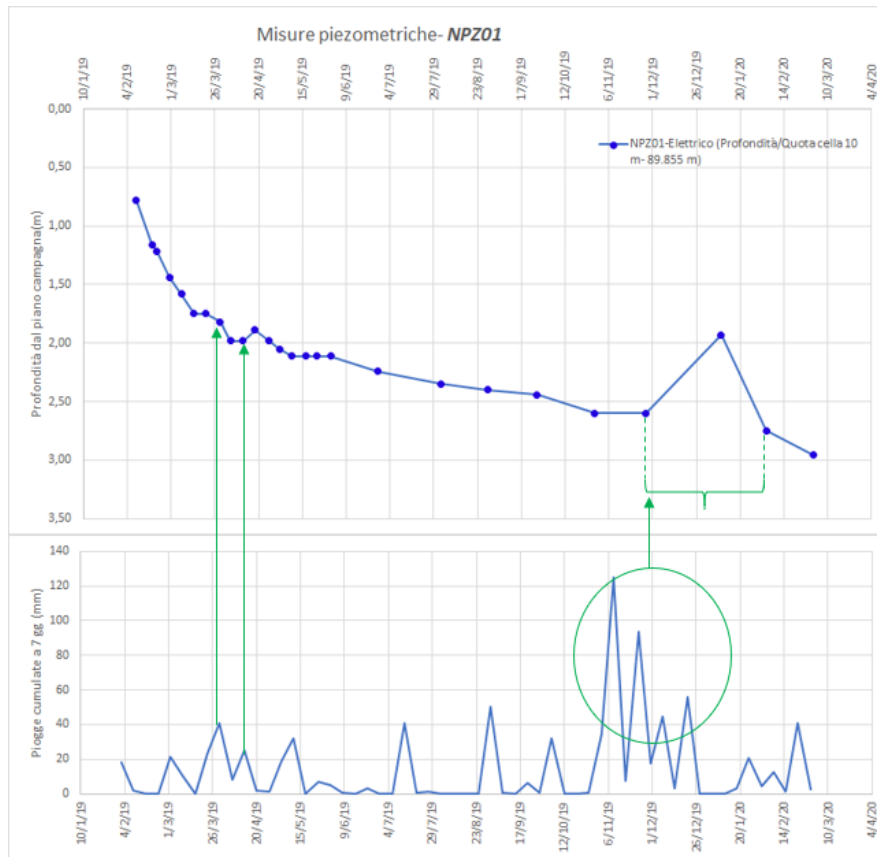


**Figura 4.19 NPZ06-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 30 giorni, (2020).**

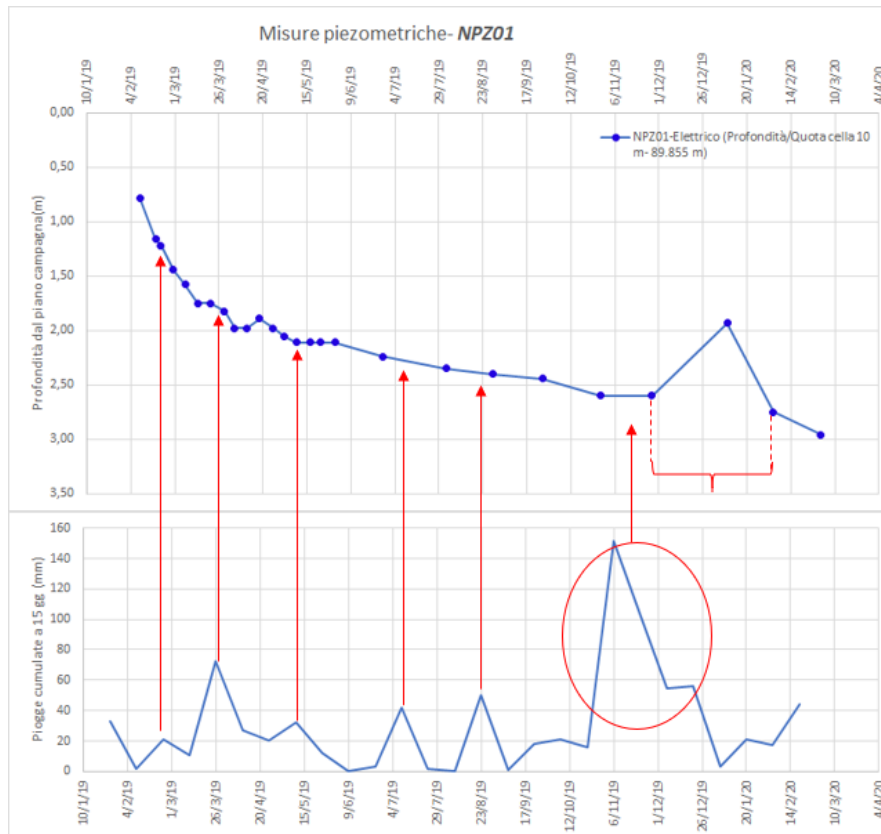
### Corpo di Frana 2

- **NPZ-01** Piezometro Elettrico (Profondità cella: 10 m / Quota cella 89.855 m).

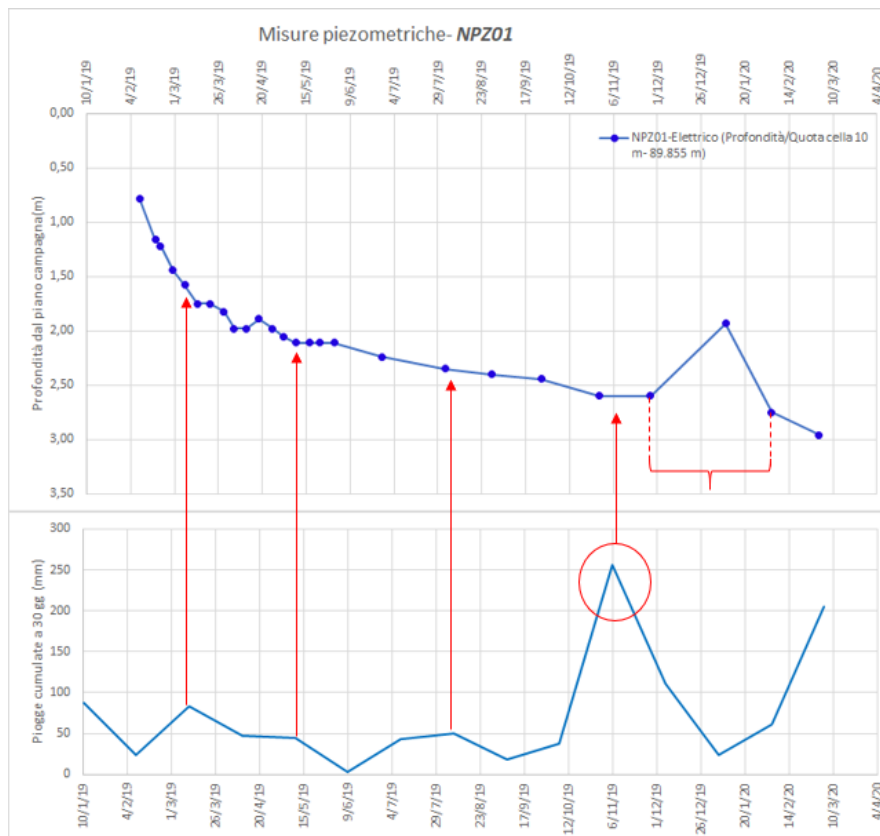
Allo stesso modo del piezometro elettrico del Corpo di Frana 1 le misure piezometriche si correlano meglio con le piogge cumulate a 7 giorni, si riportano per un confronto le piogge cumulate anche a 15 e a 30 giorni, rispettivamente all'interno delle Figure 4.20, 4.21 e 4.22. Rimane comunque un ritardo per quanto riguarda le piogge cumulate nel periodo di novembre 2019 in quanto il picco piezometrico risulta slittato alle misure effettuate tra dicembre 2019 e gennaio 2020, probabilmente a causa della posizione del piezometro che si trova proprio in testa al corpo di frana. Si registra dunque un massimo del livello piezometrico a febbraio 2019 e a gennaio 2020, mentre si registra un minimo sempre nel mese di marzo 2020.



**Figura 4.20 NPZ01-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 7 giorni, (2020).**



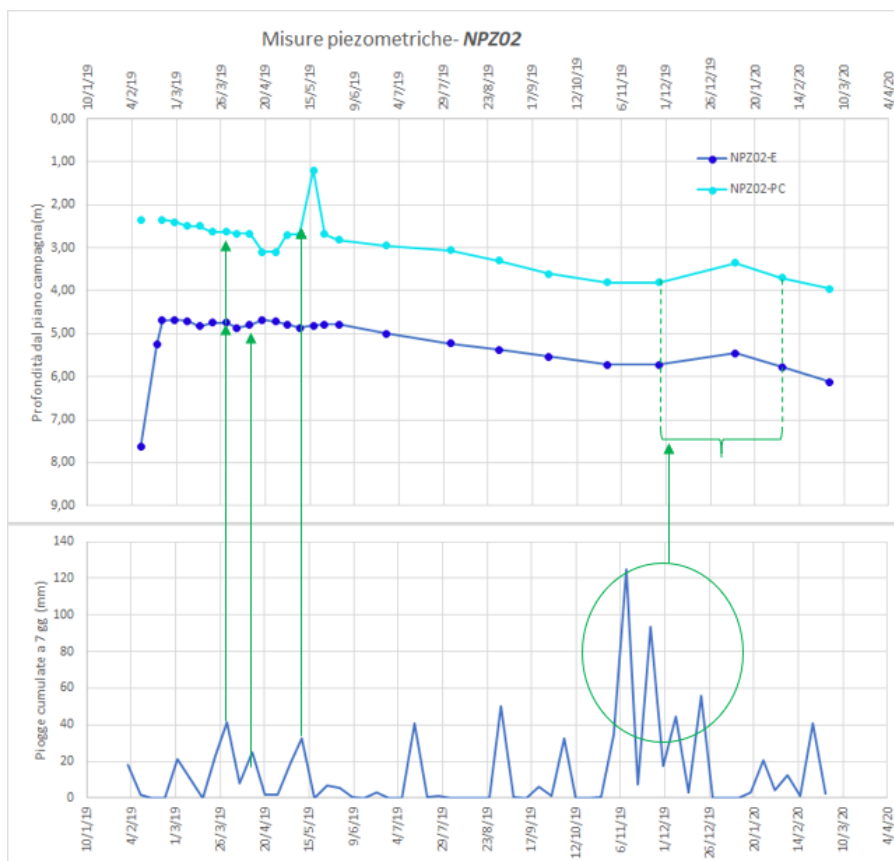
**Figura 4.21 NPZ01-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 15 giorni, (2020).**



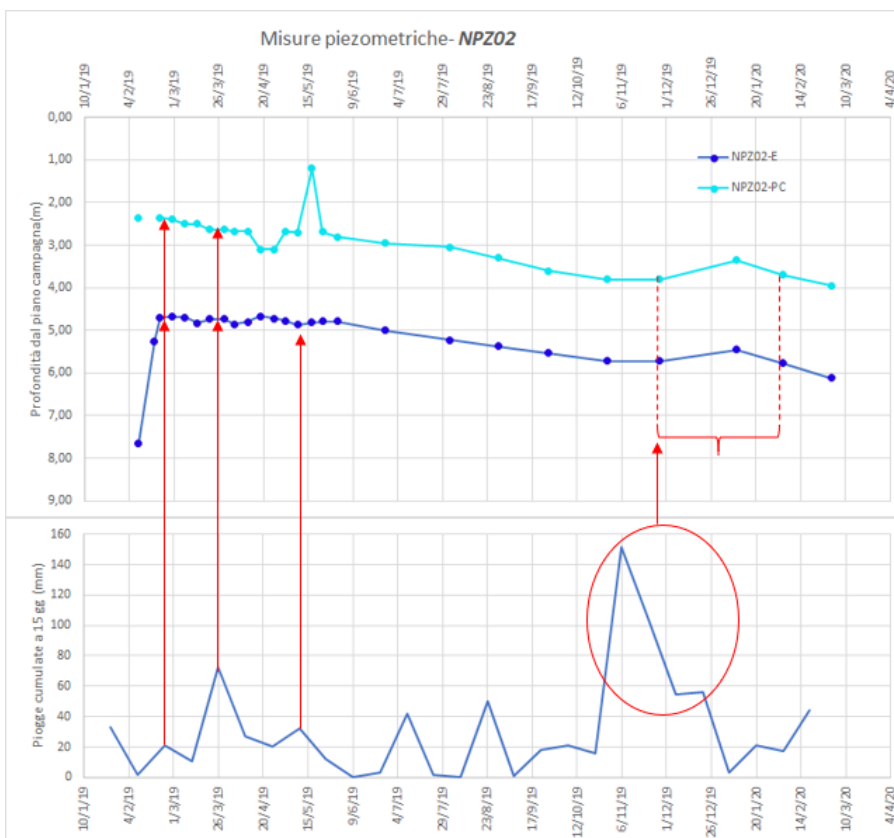
**Figura 4.22 NPZ01-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 30 giorni, (2020).**

- **NPZ-02** Piezometro di Casagrande (Profondità cella: 7 m / Quota cella 86.290 m).  
Piezometro Elettrico (Profondità cella: 30 m/ Quota cella: 63.290 m).

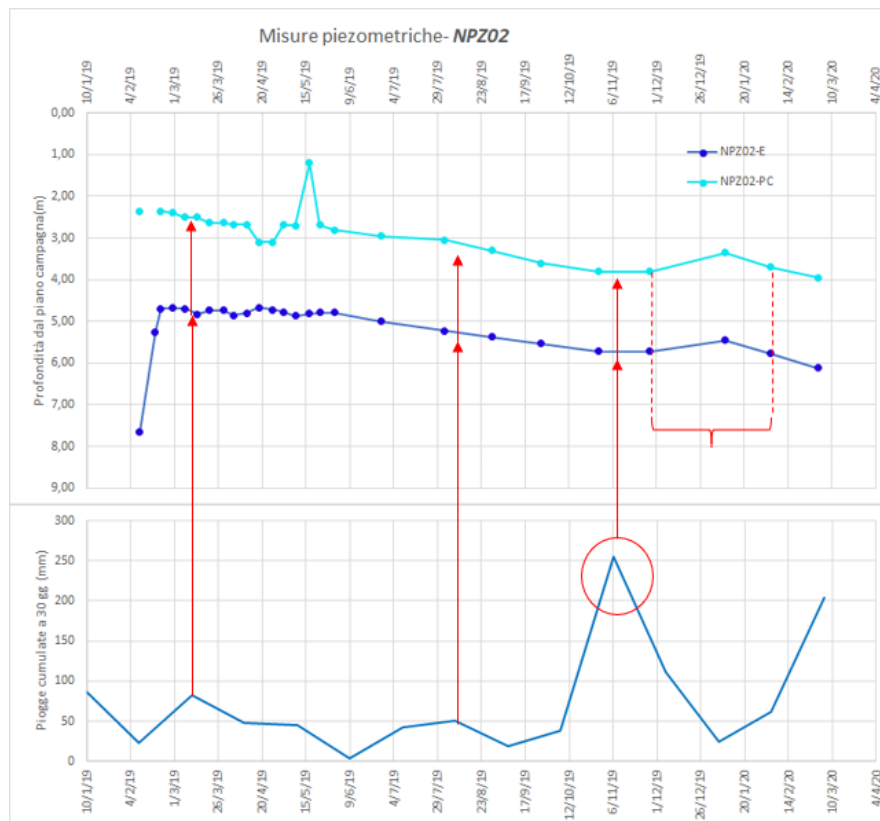
In questo tubo sono installate due celle a diverse profondità, una di Casagrande ed una di tipo elettrico, come si può vedere anche all'interno della sezione geotecnica riportata in Figura 3.28. I grafici riportati in Figura 4.23, 4.24 e 4.25 sono con le piogge cumulate a 7 giorni, 15 giorni e 30 giorni. Si può notare una correlazione maggiore con le piogge cumulate a 7 giorni, coerente con il fatto che il piezometro di Casagrande è posizionato a soli 7 m dal piano campagna e che quindi il ritardo idrodinamico possa considerarsi e confrontabile con quello del piezometro elettrico che si trova alla profondità di 30 m.



**Figura 4.23 NPZ02-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 7 giorni, (2020).**



**Figura 4.24 NPZ02-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 15 giorni, (2020).**

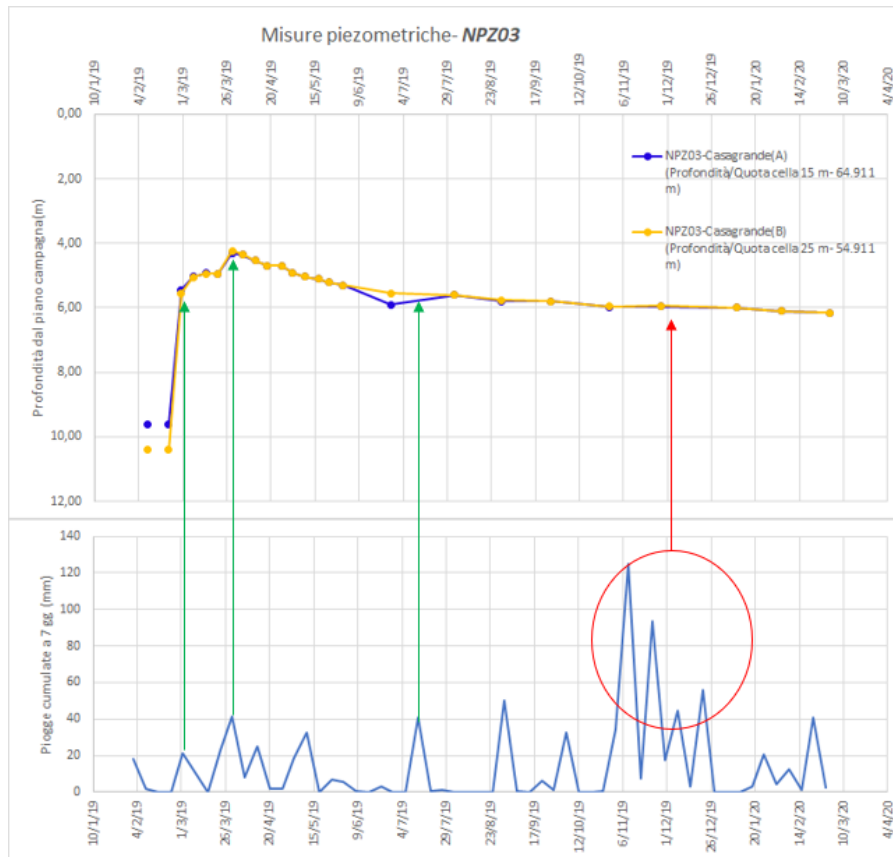


**Figura 4.25 NPZ02-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 30 giorni, (2020).**

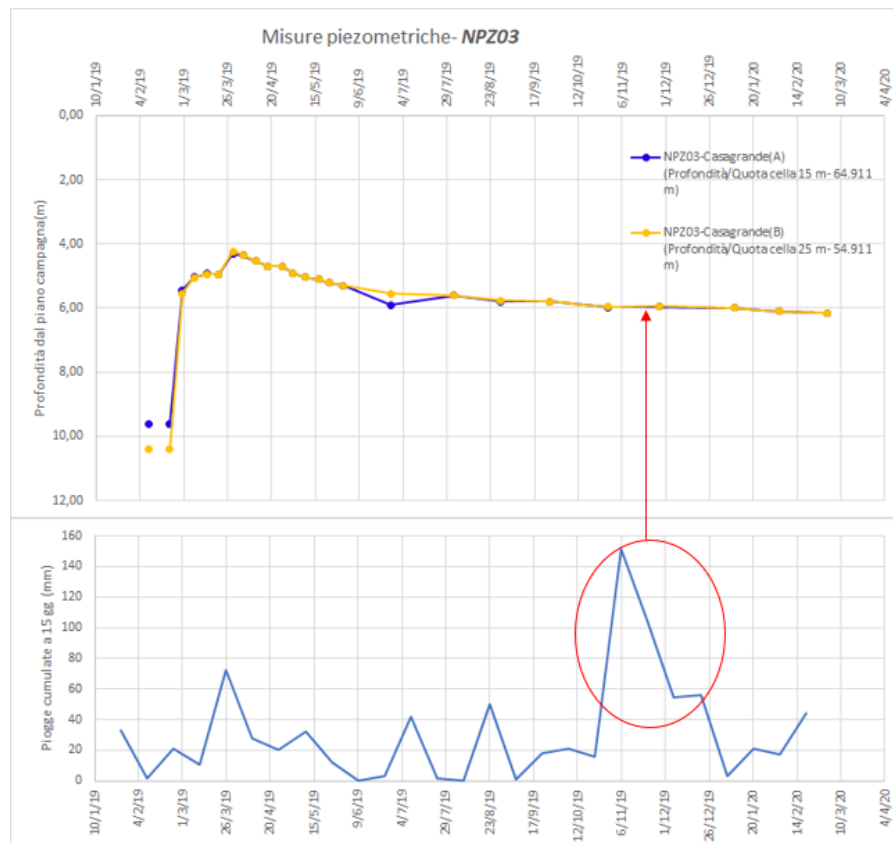
- **NPZ-03** Piezometro di Casagrande (A) (Profondità cella: 15 m / Quota cella 64.911 m).  
Piezometro di Casagrande (B) (Profondità cella: 25 m/ Quota cella: 54.911 m).

Per questo piezometro sono state installate 2 celle di Casagrande a due profondità diverse, come si può verificare dalla sezione geologica riportata in Figura 3.28. I livelli piezometrici si correlano meglio in quanto prima parte delle misure con la pioggia cumulata a 7 giorni, rimane comunque il problema che in tutti e tre i casi non vi è alcuna correlazione con il picco di pioggia registrato nei mesi di novembre e dicembre, quando il livello piezometrico risulta costante e piatto, come si può vedere nelle Figure 4.26, 4.27 e 4.28. Dopo aver effettuato, a conferma delle analisi riscontrate, il controllo di entrambi i tubicini del piezometro per verificare la corretta saturazione dello stesso si è riscontrato che il funzionamento del piezometro è corretto e che questo andamento, diverso dagli altri, viene giustificato dal fatto che lo strumento si trova al piede del corpo di frana e che per la morfologia del versante si è probabilmente raggiunto il livello piezometrico di equilibrio. Inoltre, il livello piezometrico presenta un andamento coerente con tutte le letture precedenti in quanto sin dall'inizio questo piezometro non ha mostrato grandi variazioni rispetto al regime delle piogge ma si è mantenuto costante.

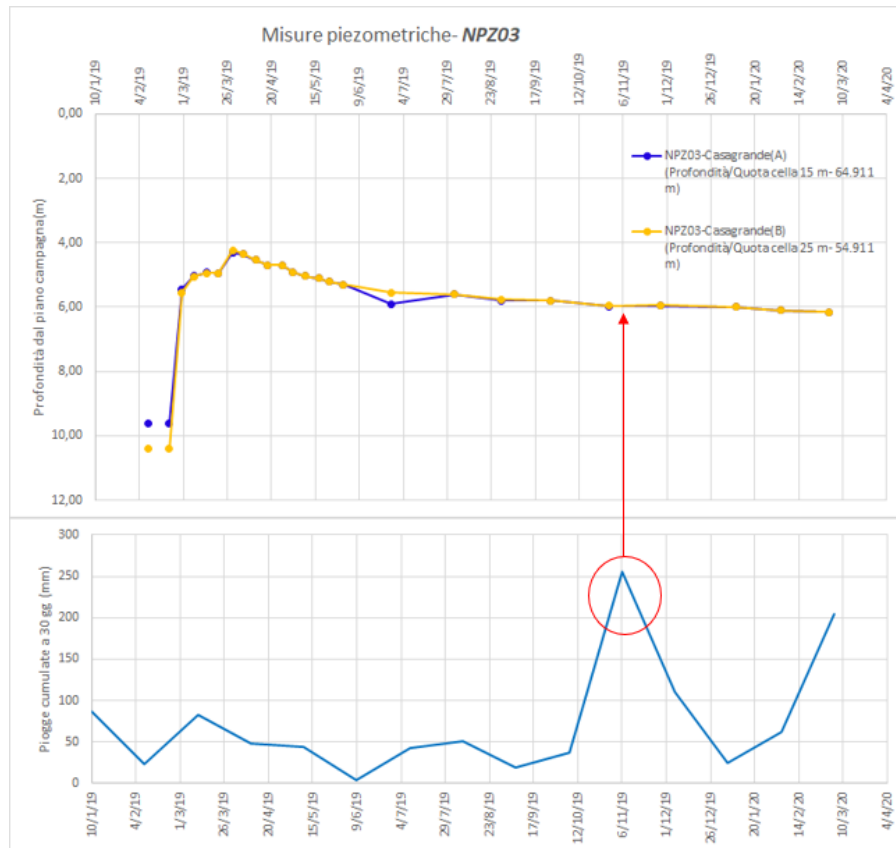




**Figura 4.26 NPZ03-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 7 giorni, (2020).**



**Figura 4.27 NPZ03-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 15 giorni, (2020).**



**Figura 4.28 NPZ03-Misure piezometriche-dati pluviometrici cumulati a 30 giorni, (2020).**

## 5 Conclusioni

All'interno dell'elaborato di tesi presentato si è proposta un'analisi dei dati di monitoraggio che è stata condotta in seguito ai movimenti franosi che si sono verificati durante lo scavo della galleria artificiale Campus del nuovo collegamento metropolitano ferroviario dell'area di Catanzaro. L'analisi dei dati di monitoraggio è stata realizzata anche con la finalità di identificare l'intervento di stabilizzazione più adeguato.

I sopralluoghi in sito e successivamente le misure strumentali hanno identificato due corpi di frana denominati Corpo di Frana 1 e Corpo di Frana 2. Per quanto riguarda il Corpo di Frana 2 si tratta di una frana attiva, definibile come lenta, in quanto caratterizzata da velocità comprese tra 20÷100 mm/anno, a carattere rotazionale. La superficie di scorrimento si estende dalla zona di cresta, sino al piede del pendio, raggiungendo una profondità massima di circa 20 m dal piano campagna: da ciò il movimento è classificabile come intermedio secondo Cruden e Varnes (Cruden & Varnes, 1996). Il meccanismo si sviluppa interamente nella formazione delle argille azzurre. Le misure piezometriche indicano quote comprese tra circa 1 e 4 m dal piano campagna, influenzate dal regime delle piogge. Il Corpo di Frana 1, invece, si riferisce ad un volume di terreno attualmente interessato da scorrimenti superficiali a carattere roto-traslativo, con profondità delle superfici di scorrimento comprese tra 2 e 4 m dal piano campagna.

L'interpretazione dei dati di monitoraggio è risultata fondamentale per procedere alla valutazione di differenti possibili strategie di stabilizzazione, giungendo alla conclusione che quella di tipo strutturale fosse la più efficace e praticabile essendo la frana profonda e difficilmente stabilizzabile con dei drenaggi. Infatti, attraverso una opportuna modifica dello schema strutturale della galleria artificiale, risulta possibile assicurare la stabilità di entrambi i corpi di frana, anche in presenza dell'intenso scenario sismico che caratterizza lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) dell'opera.

Nel capitolo terminale del seguente elaborato di tesi si è analizzata la relazione tra i dati di monitoraggio e i dati pluviometrici, discutendo la forte correlazione tra il regime delle precipitazioni, i livelli piezometrici e il tasso dei movimenti monitorato sia tramite strumentazione inclinometriche che tramite livellazioni topografiche. Le analisi condotte sono risultate efficaci per capire che l'instaurarsi del movimento franoso a seguito dello

scavo della galleria artificiale Campus è stato causato anche dal verificarsi di un evento piovoso intenso nel mese di ottobre 2018. Infatti, dopo un'accurata ricerca negli annali storici del sito dell'Arpacal (ARPACAL, 2020), si è riscontrato che il mese precedente al verificarsi dell'evento franoso è stato il più piovoso dal 1934, che presentava 208.4 mm di pioggia registrati, a fronte dei 479.4 mm di pioggia caduti nel 2018.

Le relazioni dei dati pluviometrici con le misure inclinometriche, piezometriche e topografiche hanno confermato come esista una forte correlazione tra il regime pluviometrico e gli spostamenti registrati, sia superficiali che profondi, e tra gli stessi e l'innalzamento del livello piezometrico. Per quanto riguarda i dati inclinometrici è stata analizzata la correlazione dei dati pluviometrici con gli spostamenti in corrispondenza della superficie di scorrimento, di conseguenza è stata realizzata solo per il Corpo di Frana 2, ovvero quello attualmente attivo di cui si è individuata una chiara superficie di scorrimento profonda, a differenza del Corpo di Frana 1 che è attualmente fermo e ha registrato movimenti più superficiali. Nella relazione con i dati pluviometrici sono stati considerati i dati cumulati a 7 giorni in quanto presentano un riscontro maggiore con tutti e quattro gli inclinometri, dove al picco delle piogge viene correlato un aumento dello spostamento (mm).

Per le livellazioni topografiche è stato ipotizzato che, trattandosi di un'analisi dei dati degli spostamenti più superficiali, fosse più appropriato correlare le misure con i dati pluviometrici giornalieri e non cumulati, che vanno dal 07/09/2018 al 25/02/2020 data dell'ultima misura topografica disponibile (ARPACAL, 2020). Sia all'interno del Corpo di Frana 1 che all'interno del Corpo di Frana 2, sono state evidenziate delle correlazioni tra gli eventi pluviometrici più intensi e gli spostamenti misurati tramite i target topografici. In particolare, sul Corpo di Frana 2 in corrispondenza degli eventi di pioggia si riscontra un aumento degli spostamenti uniforme su quasi tutti i target. Per quanto riguarda il Corpo di Frana 1 invece è stato evidenziato che a partire dalla data di novembre 2018, a causa del protrarsi delle intense precipitazioni meteoriche, è stato rilevato un sostanziale cambiamento dello stato dei luoghi evidenziato dalla presenza di una nicchia di distacco di neoformazione di altezza variabile da 30 a 60 cm e da una serie di linee di frattura di larghezza media pari circa a 15 cm.

Infine, per analizzare la possibile correlazione tra le misure piezometriche ed i dati pluviometrici si è proceduto distinguendo i piezometri appartenenti al Corpo di Frana 1 e quelli appartenenti al Corpo di Frana 2. I piezometri di Casagrande, che presentano un

apprezzabile ritardo idrodinamico anche in relazione alla bassa permeabilità dei terreni, sono stati considerati efficaci nel misurare le variazioni molto lente della pressione dei pori nel corso degli anni, a condizione che i tubi siano sigillati accuratamente ed il pozzo fosse riempito di materiale argilloso per tutta la sua lunghezza. Per questa tipologia di strumenti si è riscontrata una correlazione maggiore con le piogge cumulate a 15 giorni, fatta eccezione per i piezometri NPZ02 ed NPZ03, in cui per entrambi si è riscontrata una correlazione maggiore con le piogge cumulate a 7 giorni. Quanto riscontrato per l'NPZ02 è coerente con il fatto che il piezometro di Casagrande è posizionato a soli 7 m dal piano campagna. Per il secondo invece l'andamento, diverso dagli altri, viene giustificato dal fatto che lo strumento si trova al piede del corpo di frana e che per la morfologia del versante si è probabilmente raggiunto il livello piezometrico di equilibrio. Per i piezometri elettrici si è riscontrato una correlazione maggiore con le piogge cumulate a 7 giorni, essendo un piezometro che non presenta il ritardo idrodinamico tipico del tipo Casagrande.

Ringrazio in primo luogo la professoressa Daniela Boldini che mi ha proposto di svolgere il tirocinio all'interno dell'azienda Metrofc S.C.a.r.l., dandomi la possibilità di apprendere non solo in relazione al mio elaborato finale di tesi, ma anche in relazione ai diversi lavori che vengono sviluppati all'interno dell'intera opera. Ringrazio dunque anche l'azienda Metrofc S.C.a.r.l. che mi ha accolto nel migliore dei modi, dandomi la possibilità di apprendere, anche in campo, quanto più possibile nei mesi che mi sono stati concessi. Un ringraziamento particolare va anche ai miei correlatori Natascia Merenda e Gustavo Ciancio che mi hanno affiancato sia per tutto il periodo dell'esperienza lavorativa e formativa, sia durante la stesura del seguente elaborato di tesi e tutte le analisi dietro al seguente elaborato.



## 6 Ringraziamenti

Sono sempre stata brava con le parole, l'arte della parola è una di quelle poche arti che mi appartiene, ma ora che sono qui dopo aver concluso un percorso così lungo e pieno di ostacoli è come se le parole non riuscissi a metterle insieme. Sono tante per persone che ho avuto accanto in questo percorso e che devo ringraziare quindi direi che è il caso di iniziare.

Ringrazio per prima cosa la mia famiglia, mia mamma i miei fratelli e le mie cognate che mi hanno permesso di poter partire e allontanarmi da casa per poter terminare questo percorso, abbracciandomi quel primo giorno e dicendomi "Vai che ci pensiamo noi qui!". Ringrazio le mie nipotine che con un solo sorriso ed un "Ben tornata Zia!" hanno reso tutto più bello.

Ringrazio le mie amiche che anche se lontane non mi hanno mai lasciato: Ilaria e la sua saggezza, da una vita al mio fianco; Martina B. e la sua costante presenza che non mi ha fatto mai sentire sola; Eleonora e la sua infinita allegria e voglia di ridere; Martina F. ed il nostro capirci al volo anche solo con uno sguardo.

Ringrazio le mie compagne di avventura che hanno reso questi due anni speciali, e senza le quali questo percorso non sarebbe stato lo stesso. Un'amicizia che andrà oltre le distanze. Ringrazio Francesca per le sue sedute da psicologa sul mio letto a passare i sabati sera prima degli esami.

Ringrazio la mia "coincuigina" che è stata per me una sorella, un'amica ed una coinquilina. La ringrazio per tutte quelle volte che è stata lì ad ascoltarmi ripetere qualsiasi materia prima degli esami, che una laurea ad honorem se la meriterebbe anche lei.

Infine, ringrazio il mio ragazzo, è arrivato alla fine del mio percorso e per questo lo ringrazio alla fine, ma non per questo è meno importante, anzi! Ha reso questi ultimi mesi meno difficili, mi è stato vicino quando sembrava quasi impossibile arrivare a questo giorno, mi è stato vicino quando in preda al panico pensavo di non riuscire ad affrontare tutto. Che dire, se fosse arrivato prima questo percorso sarebbe stato ancora più bello!

Vedi papà molte persone mi sono state accanto in questo percorso, tranquillo le ringrazio io per te, anche se il mio grazie più grande va proprio a te, sulla prima e sull'ultima pagina della mia tesi, perché si è giusto così. Grazie Papà.



## 7 Bibliografia

- Amodio-Morelli. (1976). L'Arco calabro-peloritano nell'orogene appenninico-maghrebide. *Memorie della società geologica italiana*, 17(1-60).
- Amorosi , A., & Boldini , D. (2019). *Studio di variante, Esito del monitoraggio, valutazione delle attuali condizioni di stabilità e analisi dell'intervento di stabilizzazione*. Catanzaro.
- ARPACAL. (2020). *Centro Funzionale Multirischi*. Tratto da Progetto Centro Funzionale Multirischi 2.0: [www.cdf.calabria.it](http://www.cdf.calabria.it)
- Ben Avraham, Z., Boccaletti, M., Grasso , M., Lentini , L., & Tortorici, L. (1990). Principali domini strutturali originatisi dalla collisione continentale neogenico-quadernaria nel Mediterraneo centrale. *Mem. Soc. Geol. It.*, 45, 453-462.
- Biagi, & al. (1989-2000).
- Boschi , E., & al. (1997). Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1990. *ING & SGA*, 644.
- C.m.g. Testing S.r.l. (2019). *Tabella riassuntiva prove di laboratorio*. Catanzaro.
- Celico, P. (1988). *Prospezioni idrogeologiche*. Liguori.
- Civita , M. (1973). Schematizzazione idrogeologica delle sorgenti normali e delle relative opere di presa. *Memorie e Note Ist. Geol. Appl.*, 12.
- Critelli, S., & Gabriele, S. (1991). Lineamenti fisici e climatici della Calabria. (L. Antronico, S. Critelli, S. Gabriele, & P. Versace, A cura di) *Indagine a scala regionale sul dissesto idrogeologico in Calabria provocato dalle piogge dell'inverno 1990*, 9-49.
- Cruden , D., & Varnes, D. (1996). Landslide types and processes. In *Landslides: Investigation and Mitigations. Special Report*, 247, 36-75.
- De Jonge M.R., W. M. (1994). Regional scale tectonic evolution and the seismic velocity structure of the lithosphere and upper mantle: Mediterranean region. *J. Geophys. Res.* , 99(12091-12108).
- Dikau, R., & al. (1996). Landslide recognition: identification, movement and causes. *International Association of Geomorphologists*, 251.

- Galadini, F., & al. (2001). Major active faults in Italy: available surficial data. *Netherlands Journal of Geosciences*, 80(3-4), 273-296.
- Gerasimov, I. (1946). Attempt at a geomorphological interpretation of a general scheme oh the geological structure of the USSR. *izv. Aad. Nauk SSSR*, 12, 33.
- HYpro. (2018). *Rapporto Corso d'Opera*. Catanzaro.
- idrogeo S.r.l. (2019). *Installazione di strumentazione di monitoraggio dei corpi di frana interagenti con la galleria artificiale tra le progressive 2+000 e 2+250*. Catanzaro.
- Lagic S.R.L. (2019). *Indagini e prove in sito*. Catanzaro.
- Lagic S.R.L. (2020). *Indagini e prove in sito*. Catanzaro.
- Metrofc S.C.a.r.l. (2019). *Report di installazione inclinometri e piezometri*. Catanzaro.
- Monaco, C., & al. (1996). From collisional to rifted basins: an exam-ple from the southern Calabrian Arc (Italy). *Tectonophysics*, 266, 233-249.
- Monaco, C., & Tortorici, L. (2000). Active faulting in the Calabrian Arc and eastern Sicily. *J. Geodyn*, 29, 407-424.
- Moretti, A., & al. (1997). Tettonica dal Messiniano ad oggi in Calabria: Implicazioni sulla geodinamica del sistema Tirreno-Arco Calabro. *Bollettino Soc. Geol. Italiana*, 116, 125-142.
- Morgenstern , & Price. (1965).
- Norme Tecniche per le Costruzioni* . (2018).
- Postpischl, D. (1985). Catalogo dei terremoti italiani dall'anno 1000 al 1980. *P.F. Geodinamica*, 239.
- Servizio Geologico d'Italia. (1996). *C.N.R.* Tratto da [www.cnr.it](http://www.cnr.it).
- Sorriso, Valvo, M., & Tansi, C. (1996). Grandi frane e deformazioni gravitative profonde di versante della Calabria. Note illustrative della carta al 250.000. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 19, 395-408.
- str92-Studio Tecnico d'Ingegneria. (2018). *Monitoraggio scarpata WBS TG-2 (Descrizione lavorazioni)*. Catanzaro.

- Tansi, C., & al. (1998). Mass movements and geologic structure of the Pizzotto-Greci slope (Lago, Calabria, Italy). *Geomorphology*, 30, 147-163.
- Tansi, C., Muto, F., Critelli, S., & Iovine, G. (2007). Neogene-Quaternary strike-slip tectonics in the central Calabrian Arc (southern Italy). *Journal of Geodynamics*, 43(3), 393-414.
- Terzaghi, K., & Peck, R. (1967). *Soils mechanics in engineering practice*. New York: John Wiley & Sons.
- Tortorici, L., & al. (1995). Recent and active tectonics in the Calabrian Arc (southern Italy). *Tectonophysics*, 243, 37-55.
- UNESCO. (1993).
- Università degli Studi di Firenze. (2004). *STRUMENTAZIONE GEOTECNICA DI CONTROLLO DELLE PRESSIONI E DEI MOVIMENTI*. Firenze.
- Versace, P., & al. (1989). Valutazione delle piene in Calabria. *CNR-IRPI-GEODATA*, 30.
- VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L. (2016). *Progetto Esecutivo di Dettaglio, Corpo stradale ferroviario linea C, Galleria artificiale Campus*. Catanzaro.
- VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L. (2016). *Progetto Esecutivo, Corpo stradale ferroviario linea C, Galleria artificiale Campus, Relazione di calcolo*. Catanzaro.
- VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L. (2016). *Progetto Esecutivo, Elaborati Generali, Corpo Ferroviario*. Catanzaro.
- VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L. (2016). *Progetto Esecutivo, Elaborati Generali, Relazione Generale*. Catanzaro.
- VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L. (2016). *Progetto esecutivo, studi ed indagini, Geologia*. Catanzaro.
- VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L. (2016). *Progetto Esecutivo, Studi ed Indagini, Geologia, Relazione geologica, Idrogeologica e geomorfologica*. Catanzaro.
- VIANINI LAVORI S.p.A. ; ARES S.p.A.; CO.GE.FOR S.R.L. (2018). *Progetto Esecutivo di Dettaglio, Corpo Stradale Ferroviario Linea C, Piano di monitoraggio integrativo dei versanti interessati dai movimenti franosi*. Catanzaro.

Westway, R. (1993). Quaternary uplift of southern Italy. *J. Geophys. Res.*(98).

William , & Warne. (1985). *Bureau of Reclamation*. Routledge.

Wortel, M., & Spackman , W. (1993). Investigation of coupling between surface processes and induced flow in the lower continental crust as a cause of intraplate seismicity. *31*(1480-1509).