



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI PADOVA

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Geoscienze  
Direttore Prof. ssa Cristina Stefani

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

IN

GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

Comportamento geotecnico di un versante a seguito  
della realizzazione di pali trivellati per la costruzione  
di un garage interrato in Cortina D'Ampezzo.

Relatore: Prof. ssa Simonetta Cola

Correlatore: Dott. Alberto Bisson

Laureando: Luca Alberto Manfrin

ANNO ACCADEMICO 2015 / 2016



## INDICE

1. Riassunto	pag. 5
2. Introduzione	pag. 5
3. Premessa	pag. 7
3.1 Inquadramento Geomorfologico	pag. 7
3.1.1 Introduzione	pag. 7
3.1.2 Evoluzione geomorfologica della vallata	pag. 9
3.2 Tecnica di costruzione Top-Down	pag. 10
4. Osservazione e valutazione del monitoraggio eseguito in cantiere	pag. 13
4.1 Prima frazione dei lavori	pag. 13
4.2 Successiva frazione dei lavori	pag. 14
5. Analisi di laboratorio sui campioni prelevati dopo l'inizio dei lavori	pag. 25
5.1 Introduzione	pag. 25
5.2 Campionatura	pag. 26
5.3 Preparativa	pag. 27
5.4 Risultati	pag. 29
6. Monitoraggio	pag. 33
6.1 Introduzione	pag. 33
6.2 Acquisizione dati	pag. 33
6.3 Elaborazione dati	pag. 34
6.4 Risultati	pag. 36

7. Analisi numerica	pag. 37
7.1 introduzione	pag. 37
7.2 Procedimento	pag. 38
7.3 Elaborazione dati	pag. 39
7.4 Risultati	pag. 40
8. Conclusioni	pag. 51
9. Ringraziamenti	pag. 53
10. Bibliografia	pag. 55

## **1- RIASSUNTO**

La presente tesi ha come oggetto lo studio del comportamento di un versante a Cortina d'Ampezzo (BL) durante la costruzione di un garage interrato. In particolare, lo studio condotto si prefigge di utilizzare le informazioni raccolte con un monitoraggio in corso d'opera per avere chiare indicazioni sul comportamento geotecnico del terreno del sito durante le lavorazioni e poter così prendere le dovute correzioni in caso di necessità. Grazie ai piezometri, agli assestimetri e agli altri strumenti utilizzati nel monitoraggio è stato possibile comprendere come l'esecuzione dei pali trivellati di sostegno del garage hanno influenzato la falda e gli spostamenti del versante. Lo studio è stato poi integrato con un'analisi mediante modello agli elementi finiti che riprende fedelmente la geometria e le caratteristiche geologico-tecniche del versante reale, al fine di valutare le deformazioni per consolidazione indotte dalle variazioni di falda e le condizioni di stabilità del terreno durante la fase di trivellazione per l'installazione di pali profondi di sostegno.

## **2- INTRODUZIONE**

Il progetto di realizzazione di un garage interrato è iniziato sulla base di un bando di gara indetto da parte della committenza, la società Formula Ampezzana Iniziative Turistiche S.r.l. (FAIT), con sede a Cortina d'Ampezzo (BL). I lavori sono stati assegnati alla ditta Oberosler Cav. Pietro S.r.l. All'inizio dei lavori si è provveduto all'installazione delle apparecchiature per il monitoraggio dei parametri del terreno durante le fasi di lavorazione, monitoraggio eseguito dalla ditta Elmarx di Trento. Inoltre, in data 29/10/2015, la società FAIT ha incaricato il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA) dell'Università degli Studi di Padova di eseguire una valutazione in corso d'opera del comportamento del versante sulla base dei dati raccolti da Elmarx. Nell'ambito di questa convenzione tra Dipartimento ICEA e FAIT s.r.l. ho potuto sviluppare questo studio, con la possibilità di utilizzare tutte le informazioni emerse durante i lavori tutt'ora in atto.



## 3- PREMESSA

### 3.1- Inquadramento Geomorfologico

#### 3.1.1- Introduzione:

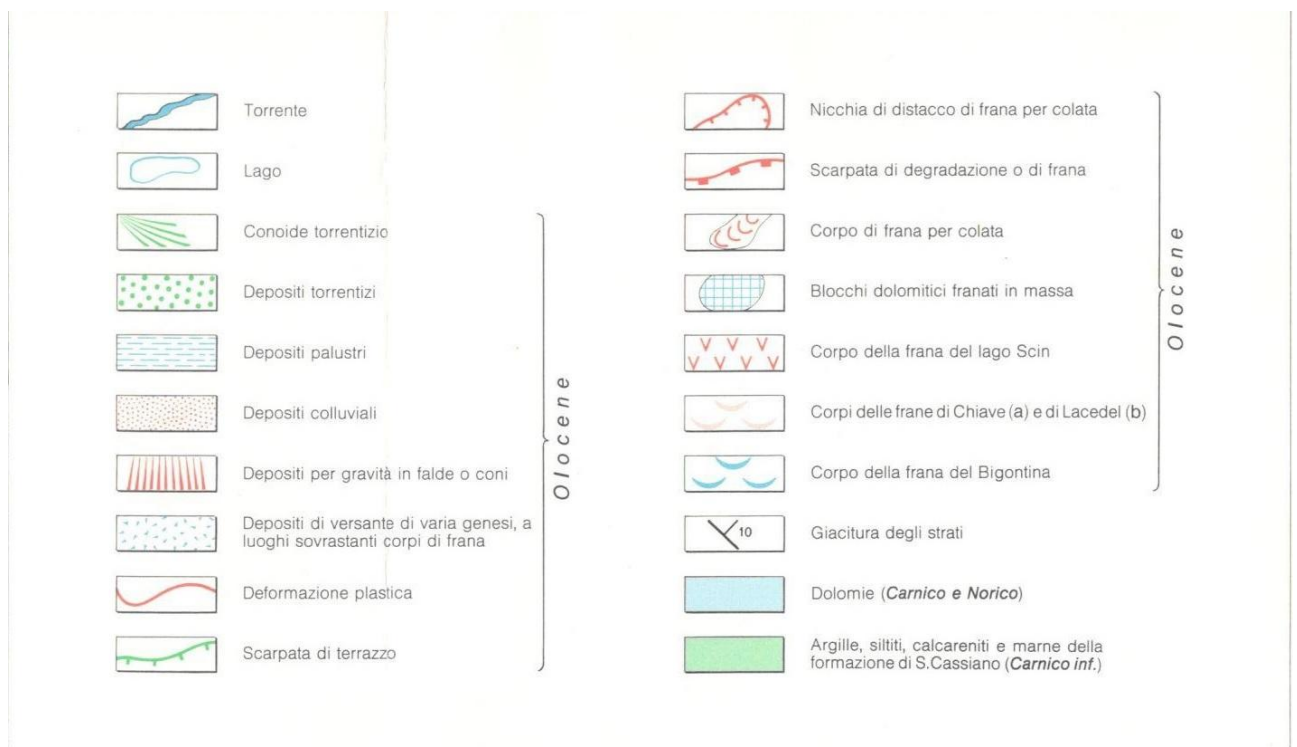
Tenendo presente le notizie bibliografiche negli archivi storici e gli studi a carattere paleogeografici e geomorfologici effettuati sul territorio (*Mario Panizza et al. 1986*), è possibile fare una ricostruzione dell'evoluzione geomorfologica



(Fig. 3.1) Dettaglio della carta geomorfologica di Cortina D'Ampezzo raffigurante la zona della città di Cortina con evidenziata l'area di cantierizzazione e di studio della seguente tesi.

almeno per quanto concerne gli ultimi millenni della storia geologica nella regione di interesse di studio ovvero la valle di Cortina D'Ampezzo. Il territorio di Cortina d'Ampezzo presenta numerose aree di frana, in particolare quella che interessa maggiormente al presente studio è la "frana del Begontina" che si estende dalle pendici sottostanti il passo Tre Croci fino all'abitato del centro di

Cortina, come si può osservare nell'immagine che segue (Fig. 3.1) con allegata successivamente la figura contenente la legenda (Fig 3.2).



(Fig.3.2) immagine contenente la legenda della carta geomorfologica di Cortina D'Ampezzo

Analisi radiometriche col metodo del Carbonio 14 utilizzate su dei resti lignei ritrovati durante degli scavi in centro a Cortina, ha permesso di datare l'evento franoso al V- VI secolo dopo Cristo. Un ulteriore conferma della veridicità delle analisi condotte è la prova inequivocabile che i reperti arborei studiati furono coinvolti nel fenomeno franoso, supposizione che trova conferma dallo studio della profondità, dalla posizione di ritrovamento e dall'assenza di rimaneggiamento del suddetto materiale ligneo. Il corpo di frana è suddiviso in due zone con morfologia differente. La parte più a monte presenta una morfologia irregolare con tipiche gobbe, rughe e depressioni ed è interessata da nuovi e ricorrenti fenomeni di dissesto. La parte più a valle, ove sorge il centro abitato, ha una forma a ripiani con alcune contropendenze e una serie di scarpate situate in corrispondenza della parte terminale del rio Begontina e alla sua confluenza nel torrente Boite. Queste scarpate, situate in corrispondenza del sito studiato, testimoniano chiaramente l'intasamento della valle, ad opera del corpo di frana, e la successiva incisione in terrazzo. Il materiale di frana è tipicamente



incoerente e caotico, è costituito da una matrice marnosa e argillosa, di chiara origine da rocce cassiane e raibliane, inglobante materiale vario di arenarie, siltiti, calcari e grossi massi di dolomia cassiana. Tra le cause attribuibili all'evento franoso prevale la componente litologica del materiale; la componente argillosa e marnosa delle formazioni cassiane e raibliane che sono più sensibili a precipitazioni, infiltrazione di acque di sorgente o di fusione di ghiacciai.

### **3.1.2- Evoluzione geomorfologica della vallata**

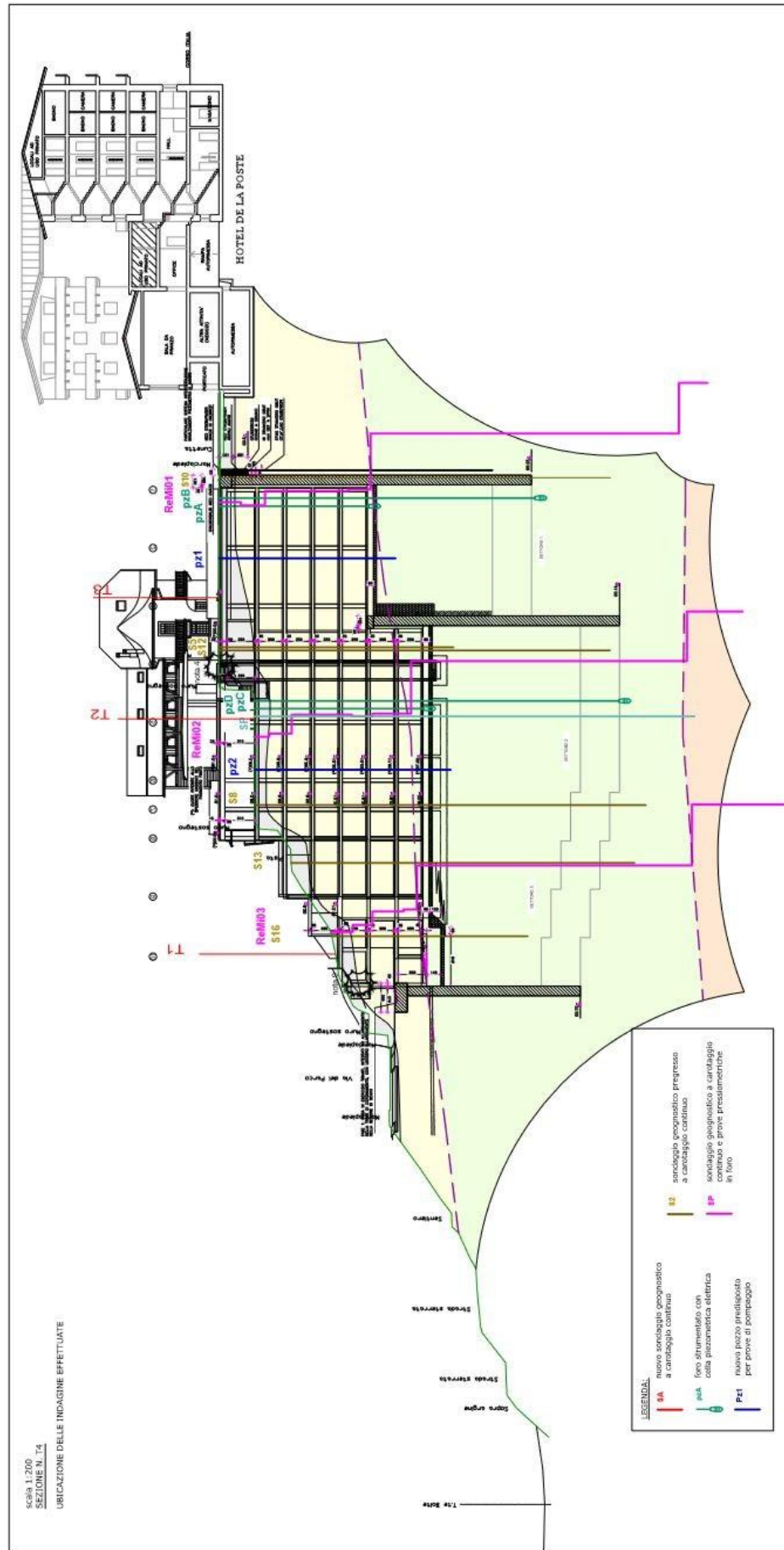
Per avviare una ricostruzione paleogeografica nella zona alpina durante il quaternario, ci si deve affidare allo studio dei dati geomorfologici riguardanti i depositi detritici, legati direttamente o indirettamente al clima e agli agenti del modellamento del rilievo, contenenti le informazioni, più o meno conservate, ad esempio di erosioni glaciali, interglaciali o periglaciali. Nella zona in studio la scarsità di dati geomorfologici precedenti l'ultimo periodo glaciale avvenuto nelle Alpi circa 75000 B.P. ed un incremento di dati successivo via via più abbondante, favoriscono la ricostruzione a periodi più vicini ai tempi odierni in particolare l'Olocene (8500 B.P.). Nel caso particolare dell'area studiata si può ricostruire la seguente successione di eventi; Dopo la massima espansione glaciale Würmiana, si assiste ad un progressivo ritiro, intervallato da temporanee riprese delle lingue glaciali. Queste episodiche pulsazioni sono testimoniate dalla messa in posto di depositi morenici detti "stadiali". All'inizio dell'Olocene avvengono due grossi episodi di frana: quello del Faloria a Zuel e quello delle Tofane al Col Droscié. Entrambi hanno provocato lo sbarramento della valle del Boite, come testimoniano ritrovamenti di depositi torrentizi e palustri rilevati in corrispondenza dell'intersezione dei due corpi di frana; la maggior causa di innesco ad essi attribuita è l'effetto "glacioppressione", ovvero una progressiva spinta meccanica da parte del fronte dei ghiacciai, i quali confluendo tra loro per stretti percorsi vallivi, collidono tra loro e provocano deformazioni soprattutto su superfici di discontinuità strutturale producendo o accentuando la sconnessione delle masse rocciose a contatto tra loro. Successivamente sono avvenute molte altre frane che sono testimoniate dal ritrovamento di depositi torrentizi e palustri, da scarpate di terrazzo e dall'identificazione di paleoalvei e alla conservazione di

materiale di natura organica utilizzato per datazioni con il carbonio 14. Infine l'evento più recente e vistoso è senz'altro la frana del Begontina su cui poggia la città odierna di Cortina D'Ampezzo.

### **3.2- Tecnica Top-Down**

È una terminologia per indicare una metodica tecnico-costruttiva, attuata nel sottosuolo, partendo dalle parti superiori dell'opera e scendendo progressivamente a quelle inferiori, operando in modo contrario a quanto avviene normalmente. Risponde in maniera efficace alle numerose problematiche poste dalla costruzione dei parcheggi sotterranei laddove gli spazi di intervento siano molto ristretti. Le necessità che portano alla decisione di utilizzo di tale tecnica costruttiva sono essenzialmente le seguenti; minimizzare i disagi ai residenti, completare l'opera nel minor tempo possibile e ridurre l'impatto ambientale della stessa. I motivi, invece, che portano alla decisione di utilizzo di questo sistema costruttivo sono in sintesi: la fattibilità dell'opera, per sbancamenti più profondi di 10 m sono necessarie opere di contenimento del terreno statisticamente più performanti come diaframmi a T o paratie precomprese dai costi molto elevati, inoltre nei centri fittamente abitati risulta molto complicato l'inserimento di tiranti. La sicurezza, le opere di contenimento sono subito puntellate dando così una minore componente deformante alla struttura e quindi si riducono i possibili risentimenti ai fabbricati esistenti nelle vicinanze. Di tipo economico, si impiegano minori quantità di calcestruzzo di cemento e acciaio con notevoli diminuzione dei costi. Di carattere logistico, l'area in superficie potrebbe essere consegnata al libero utilizzo prima del completamento dell'opera. Tutte queste caratteristiche sono state prese in considerazione per la scelta della suddetta tecnica per la realizzazione del garage sotterraneo di cui si occupa questo studio. Nell'immagine che segue (*Fig. 3.2.1*) concessaci per gentile concessione dello studio tecnico competente sull'opera, risulta evidente come tale tecnica si sviluppi in maniera verticale e quindi risulti come una delle migliori candidate per delle condizioni di costruzione così particolari e specifiche. Nell'immagine sono riportate anche le posizioni delle

indagini svolte dallo studio geologico atte alla stesura della relazione finale geologico-tecnica.



(Fig. 3.2.1) Tavola in sezione raffigurante la struttura del progetto in esecuzione di lavori e le ubicazioni delle indagini effettuate in situ.

## **4- OSSERVAZIONE E VALUTAZIONE DEL MONITORAGGIO ESEGUITO IN CANTIERE**

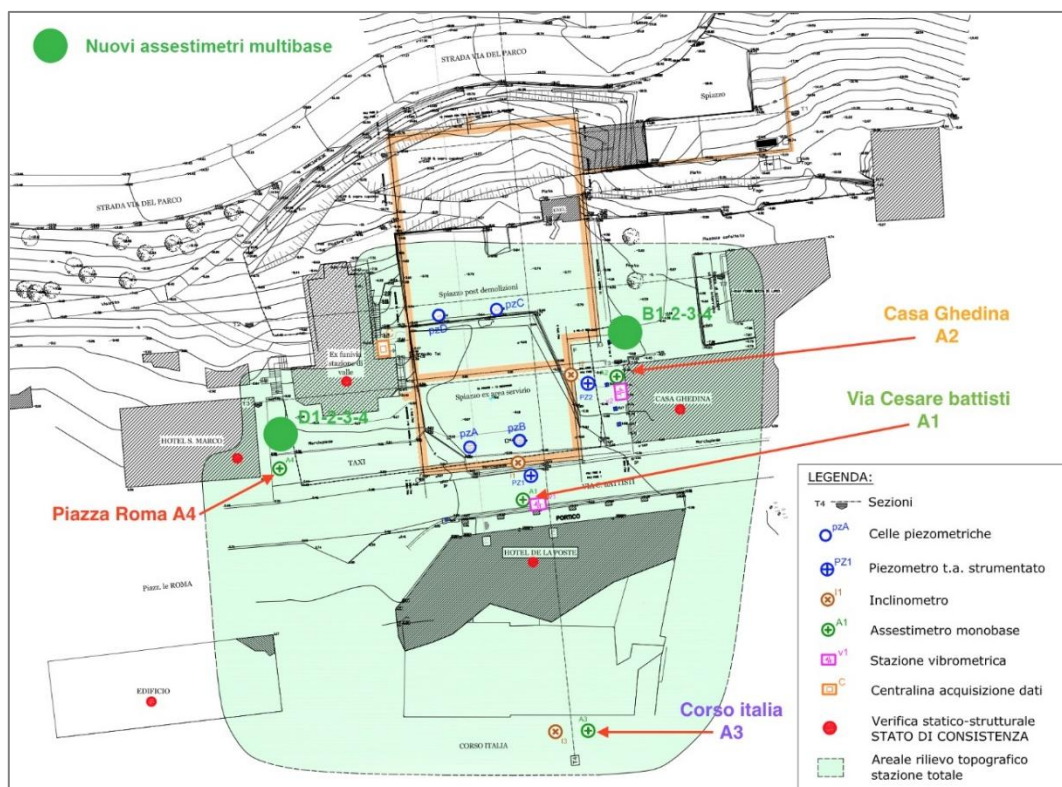
### **4.1- Prima frazione dei lavori**

Durante la prima fase dei lavori (ottobre-dicembre 2015) sono emerse delle problematiche a cui si è cercato subito di rimediare. Il monitoraggio eseguito durante la trivellazione e la realizzazione dei pali, operazione eseguita senza installazione della camicia o di fanghi per il sostegno del foro, ha da subito evidenziato dei cedimenti del piano campagna di alcuni millimetri. A dicembre un ordine di servizio del Direttore dei lavori ha imposto di eseguire la trivellazione mediante l'impiego di camicia di acciaio fino a fondo foro e di operare il getto di cls. in concomitanza con il ritiro della camicia. Tutto questo al fine di evitare il rilassamento del terreno attorno al foro e un eventuale suo franamento nel foro stesso. Gli assestimetri, posizionati uno davanti e uno lateralmente al fronte di scavo (Casa Ghedina e Corso C.Battisti), mostravano cedimenti da 1 a 5 mm di spostamento. Successivamente allo scavo, il foro viene lasciato aperto e libero per circa un giorno, questo fa sì che ci sia una naturale tendenza di convergenza che rischia di destabilizzare il foro, lo scavo risulta più critico, per ovviare a questo si è scelto di optare per scendere in maniera incamiciata e con il polimero, dando così stabilità al palo ed evitando un aumento esponenziale della risposta del terreno. Si pondera sulla decisione di allontanare i lavori dall'attuale fronte di scavo per attendere la diminuzione della velocità di deformazione, attuare uno spostamento dei macchinari provvisorio in un'area opposta al fronte attuale ovvero a ridosso del percorso stradale. I tempi di perforazione si aggirano sui 2-3 giorni a palo con tecnologia rotator, tempi dilatati dove invece teoricamente la tecnica utilizzata garantirebbe tempi di un solo giorno. Riguardo al monitoraggio tramite inclinometri, le prime letture non danno informazioni utilizzabili, si pensa ad installarne un paio direttamente sul palo, questo porterebbe all'acquisizione di dati più "puliti" e quindi informazioni più chiare sul suo andamento; all'interno del palo avrebbe il vantaggio di calcolare lo spostamento in fase di scavo. Il monitoraggio tramite Vibrometri, ha evidenziato come si è sotto la soglia che

prevede la normativa (3 mm/s -5 mm/s), lo strumento rileva un valore sotto i 3 mm/s e si attesta a quel valore, per tanto il valore di fondo è conosciuto. Un problema a cui non si può più operare è la mancanza di dati rilevati antecedenti all'inizio del cantiere, informazioni su inclinazione e spostamenti naturali, ad esempio un ciclo solare per avere su un edificio, limitrofo alla zona di cantierizzazione, informazioni sulla variazione giornaliera e/o stagionale. Si sarebbe potuto ottenerli con l'installazione di inclinometri bidimensionali sulla parete dell'edificio. Un'ulteriore decisione presa è l'installazione di un monitoraggio topografico che, tramite dei sensori laser, valuta e monitora la distanza tra i punti selezionati, in questo caso si pensa all'albergo adiacente al fronte di scavo e a casa Ghedina che è posta lateralmente al fronte; questa decisione ci darà maggiore consapevolezza della situazione e maggior capacità di valutazione. Oltre verrà installato un pluviometro e costruiti dei pozzetti puntuali, con piezometro incorporato, paralleli al fronte di scavo per il monitoraggio del livello di infiltrazione d'acqua.

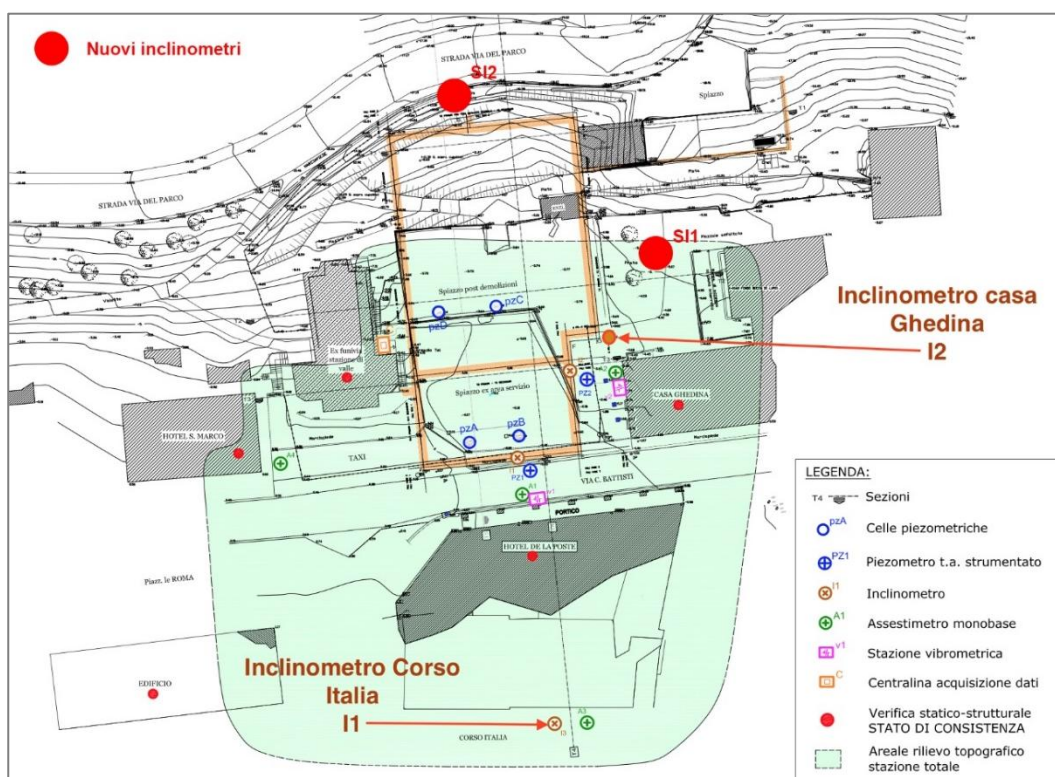
#### 4.2- Successiva frazione dei lavori

Durante il successivo periodo di operatività del cantiere, corrispondente al periodo



(Fig. (4.1) disposizione planimetrica degli assesti metri e dei piezometri.

temporale che va dalla ripresa dei lavori dopo la sospensione delle vacanze natalizie al 10 giugno 2016, gli aggiornamenti ricavati sono stati consegnati all'ICEA tramite la ditta Elmarx s.r.l., incaricata del monitoraggio in corso d'opera del suddetto cantiere. Da essi il Dipartimento di ingegneria ha potuto erigere una relazione a cui questo capitolo fa fede, mentre per le elaborazioni (Fig.

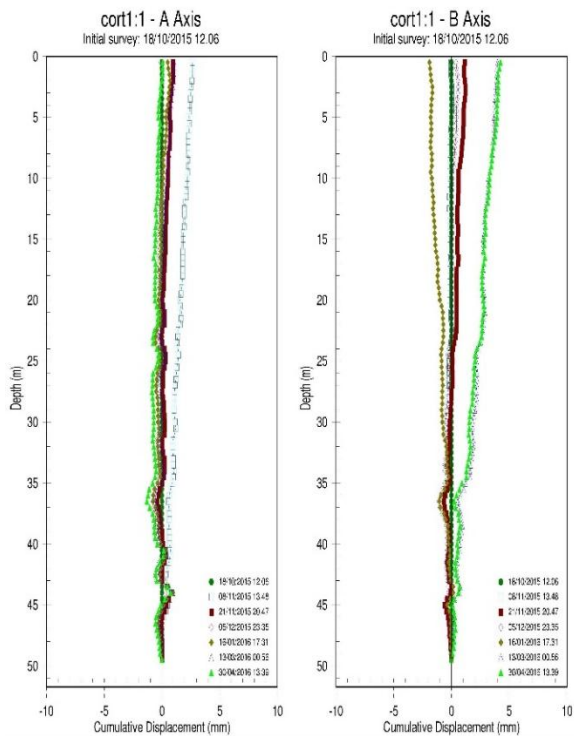


4.2) disposizione planimetrica degli inclinometri.

grafiche si devono alla Elmarx s.r.l.. Durante questo periodo c'è da constatare un ritardo generale dovuto alla rescissione del contratto da parte della azienda incaricata e ricerca tramite bando della candidata ereditaria. In data 18 marzo 2016 è avvenuto il trasferimento ufficiale di consegne ed è entrata operativa la seconda azienda. Durante questo periodo di lavorazione, tra quelle proposte e approvate dal primo direttivo di valutazione dei lavori effettuato in data 13/11/2015, sono state introdotte alcune migliorie per l'acquisizione in maniera più dettagliata e precisa dei dati di monitoraggio. Si menziona la creazione di due quaterne di assestimetri monobase ad interasse mutuo di 1.00 m, posti rispettivamente in prossimità degli assestimenti profondi di Casa Ghedina e Hotel De la Poste (Fig. 4.1), e degli Inclinometri SI1 e SI2 resi operativi in data 22/02/2016 (Fig. 4.2). In particolar modo si menziona l'installazione della

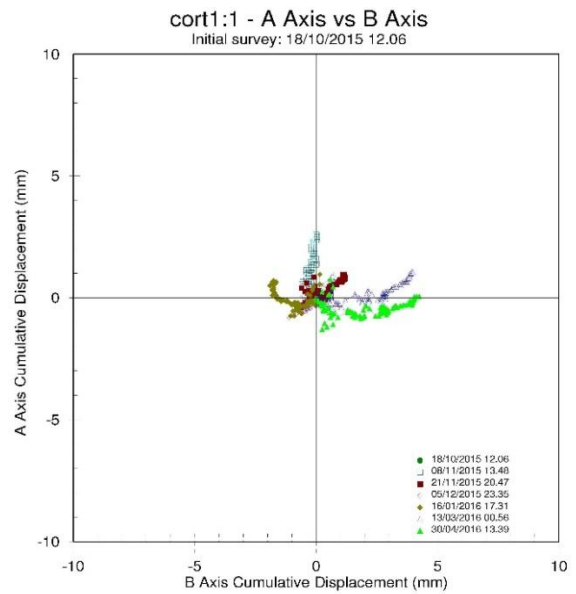
stazione totale con puntamento laser per il monitoraggio topografico (attiva dal giorno 14/02/2016). Lo stato di avanzamento dei lavori ad oggi procede mantenendo una continuità stabile, da sottolineare l'avanzamento dei lavori nella porzione inferiore del cantiere con un ritmo di 1,5 pali al giorno. Analizzando nel dettaglio le informazioni ricavate dai monitoraggi si evince una situazione di movimento orientata in direzione sud-sudovest ovvero verso il torrente Boite, tale movimento risulta attivo da tutte le apparecchiature presenti. Nello specifico si evidenziano gli sviluppi del monitoraggio e l'andamento rispetto ai risultati ottenuti dai precedenti sopralluoghi antecedenti lo stop natalizio. Per quanto riguarda il monitoraggio piezometrico per la stima sul lungo periodo si considerano solo le celle piezometriche C e D, dato che per le celle A e B un troncamento durante i lavori dei cavi di alimentazione, avvenuto ad ottobre 2015, ha compromesso la possibilità di confronto. Si nota un generale abbassamento della falda totale, già evidenziato dai precedenti risultati e quantificabile approssimativamente in; per la cella C di circa -2.00 m ( posizionato nell'unità geologica 1 A) mentre per la cella D di circa -8.00 m ( posizionato nell'unità geologica 1 B). Il monitoraggio inclinometrico è attualmente attivo su 4 inclinometri posti al di fuori del perimetro di cantiere (*Fig. 4.2*). l'inclinometro I1 (*Fig. 4.3*) si trova in Corso Italia, l'I2 (*Fig. 4.4*) è posto in prossimità di Casa Ghedina , l'SI1 (*Fig. 4.5*) a monte della berlinese a protezione di Casa Ghedina, l'SI2 (*Fig. 4.6*) a valle del cantiere in prossimità di Via del Parco.



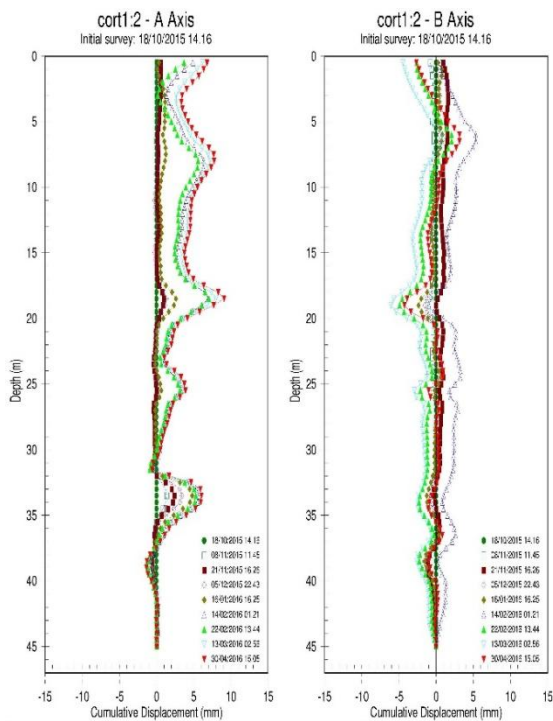


(a)

(b)

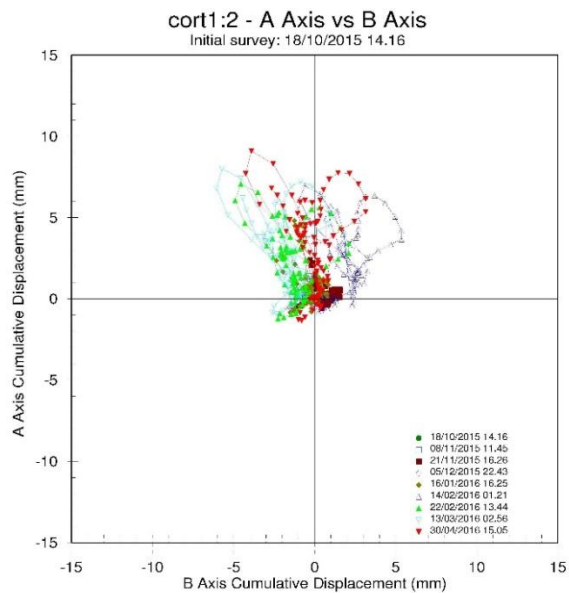


(Fig.4.3 a b). Profilo degli spostamenti totali cumulati dall'inclinometro I1 (Corso Italia) e relativo diagramma polare nel periodo 18/10/2015 – 30/04/2016. Lo spostamento è calcolato sulla base della lettura di zero eseguita in data 18/10/2015.

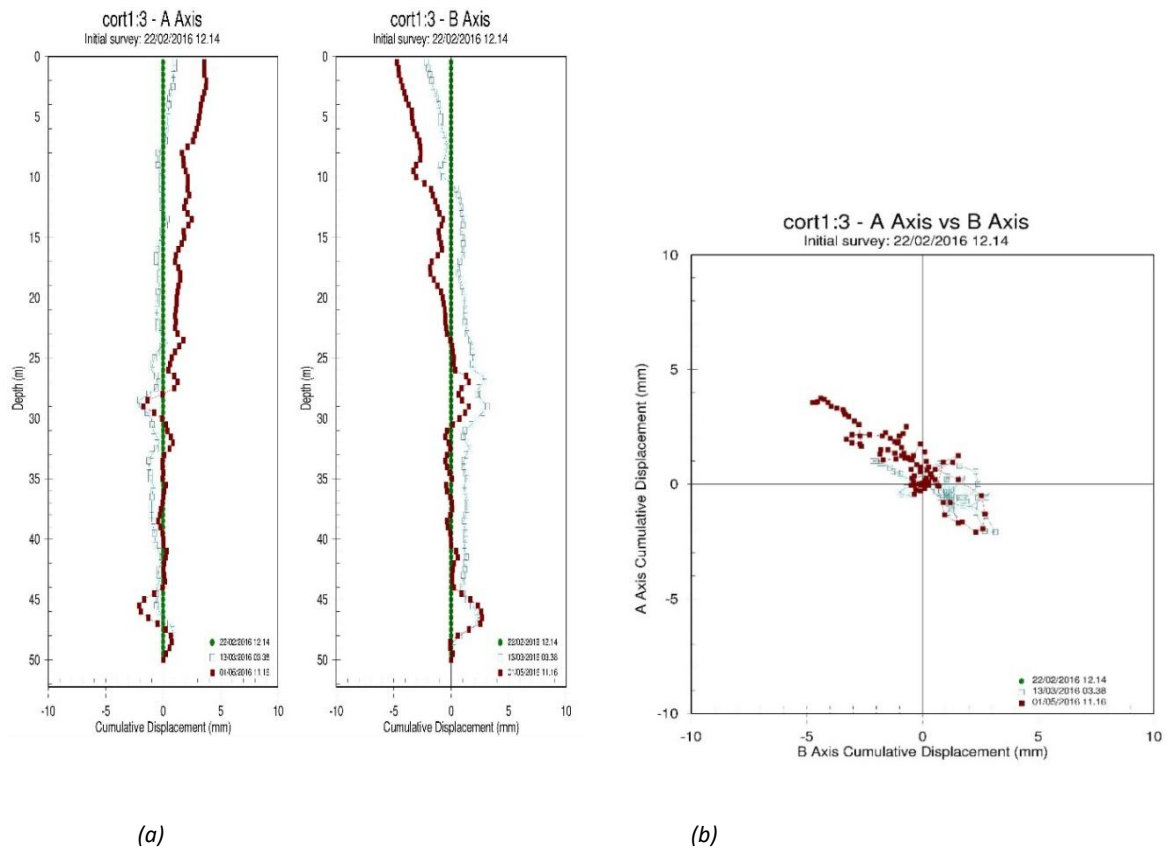


(a)

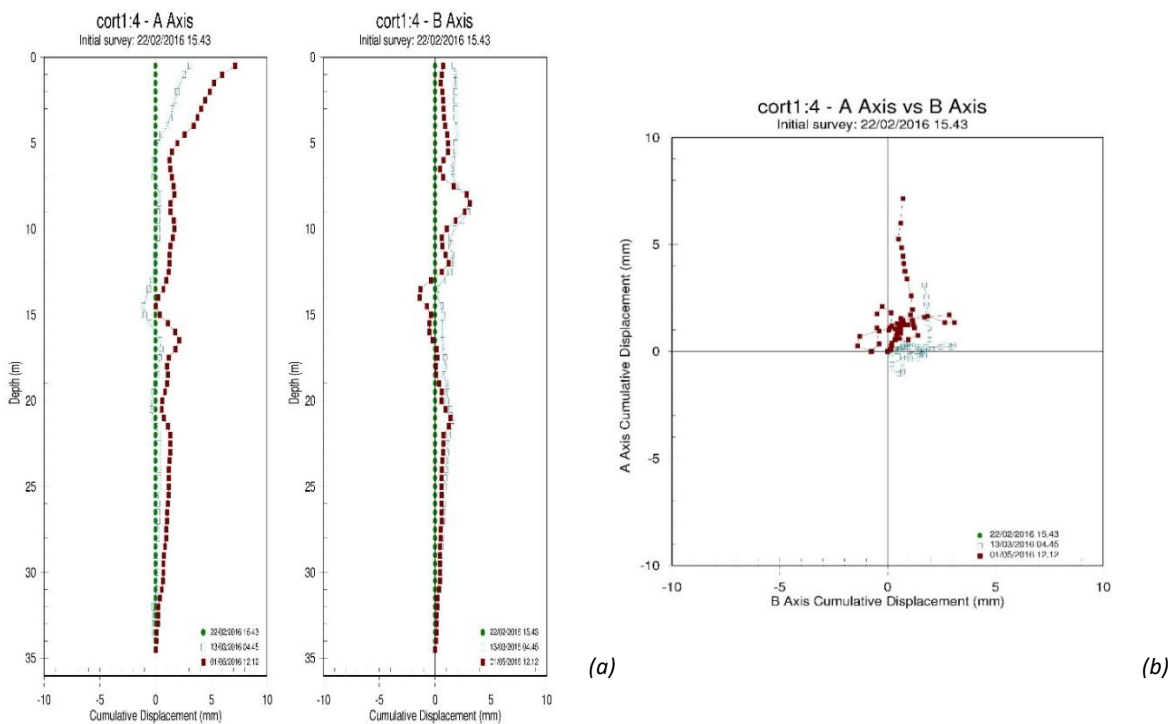
(b)



(Fig.4.4 a b) . Profilo degli spostamenti totali cumulati dall'inclinometro I2 (Casa Ghedina) e relativo diagramma polare nel periodo 18/10/2015 – 30/04/2016. Lo spostamento è calcolato sulla base della lettura di zero eseguita in data 18/10/2015.



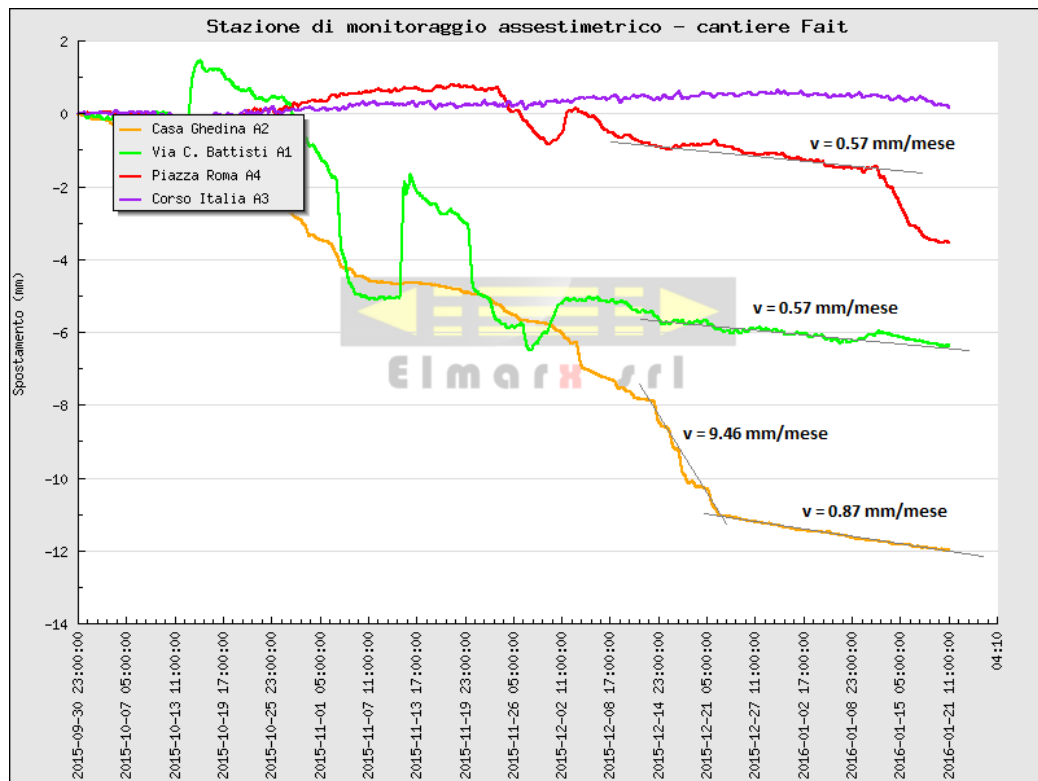
(Fig.4.5). Profilo degli spostamenti totali cumulati dall'inclinometro SI1 (berlinese Casa Ghedina) e relativo diagramma polare nel periodo 22/02/2016 – 01/05/2016. Lo spostamento è calcolato sulla base della lettura di zero eseguita in data 22/02/2016.



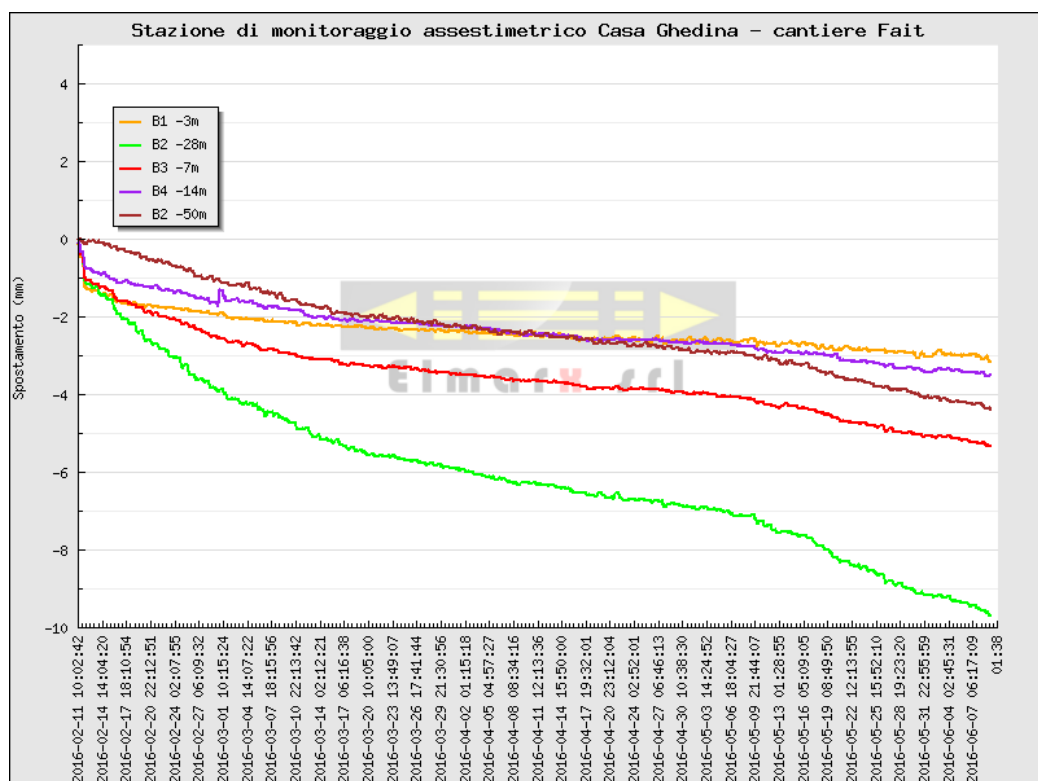
(Fig. 4.6) Profilo degli spostamenti totali cumulati dall'inclinometro SI2 (Via del Parco) e relativo diagramma polare nel periodo 22/02/2016 – 01/05/2016. Lo spostamento è calcolato sulla base della lettura di zero eseguita in data 22/02/2016.

Nelle figure soprastanti sono riportati i profili verticali dello spostamento cumulato lungo gli assi A e B e riferito alle 2 misure eseguite negli inclinometri. Nell'ultimo periodo si riscontrano leggeri incrementi di spostamento negli inclinometri I1, I2 e SI1 e l'inclinometro SI2 mostra uno spostamento orizzontale non trascurabile nei primi 5 m di profondità, maturato in un tempo relativamente breve. Dalle misure sembrerebbe emergere una leggera tendenza, anche se di piccola entità, in direzione verso il torrente Boite, in particolare per l'inclinometro SI2. Si osserva che, pur essendo in corso le lavorazioni di esecuzione dei pali nella parte bassa dell'area, non sono disponibili ulteriori misure di confronto. Inoltre, come evidenziato nella precedente relazione, il profilo degli spostamenti degli inclinometri I1 e I2 risulta particolare in quanto caratterizzato dalla presenza nella parte bassa di alcune curve che sembrano accentuarsi nel tempo. Pur essendo certamente legate alla curvatura del tubo inclinometrico e alla non perfetta verticalità del foro, la loro evoluzione nel tempo sembra essere interpretabile con un effetto di schiacciamento verticale degli strati di terreno, schiacciamento al quale il tubo, più rigido del terreno, deve adattarsi piegandosi. Tali curve potrebbero essere correlate ai cedimenti registrati dagli assestimetri monobase. In ogni caso, sono necessarie ulteriori misure inclinometriche a conferma delle osservazioni precedentemente espresse. Il monitoraggio assestimetrico è attualmente attivo su 4 punti posti al di fuori del perimetro di cantiere e attrezzati con sensori a lettura in continuo. Nelle figure successive si riportano gli andamenti degli spostamenti verticali rilevati. Si sottolinea che i dati riportati nei grafici delle diverse figure sono gli spostamenti cumulati solamente nel periodo al quale si riferisce il grafico e sono calcolati per differenza tra il valore misurato in un certo istante e il valore misurato alla data iniziale del periodo di riferimento del grafico. Tale operazione è eseguita direttamente dalla ditta Elmarx, senza possibilità di analisi dei dati sorgente da parte degli scriventi, analisi che sarebbe necessaria per avere una interpretazione più accurata del comportamento osservato. Le informazioni estratte portano alle seguenti osservazioni; L'assestimetro che evidenzia i maggiori movimenti è l'A2 di Casa Ghedina (*Fig.*

4.7 e Fig. 4.8) che ha registrato circa 12 mm di spostamento nei primi 3 mesi (dall'30/09/2015 al 21/01/2016) e altri 4 mm circa nei successivi 4 mesi (dall'11/02/2016 al 09/06/2016).



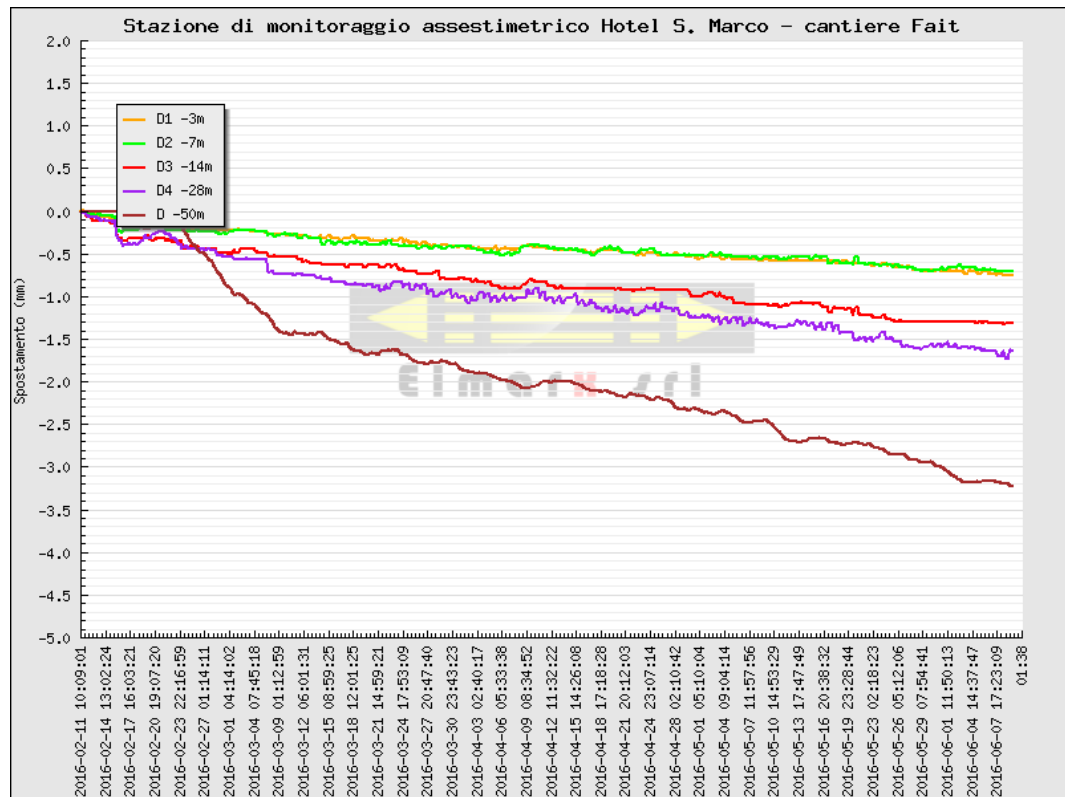
(Fig. 4.7) Spostamenti cumulati agli assestimetri A1, A2, A3 e A4 dal 30/09/2015 al 22/01/2016 (grafico scaricato in data 22/01/2016 da sito Elmarx e poi successivamente elaborato per calcolo delle velocità).



(Fig. 4.8) *Spostamenti cumulati agli assestimetri B1, B2, B3, B4 e A2 (indicato come "B2 -50 m" in legenda) posti presso Casa Ghedina dal 02/11/2016 al 09/06/2016 (grafico scaricato in data 09/06/2016 da sito Elmarx).*

L'andamento è chiaramente influenzato dai lavori nella prima fase, ma il cedimento ha continuato ad aumentare anche nei periodi in cui le lavorazioni erano ferme. Attualmente la velocità di cedimento è di circa 1.25 mm/mese. L'assestimetro A4 presso l'Hotel San Marco presenta un cedimento massimo di circa 3.2 mm in 4 mesi di misurazioni (dall'11/02/2016 al 09/06/2016). La velocità di avanzamento del cedimento è ora di circa 0.6 mm/mese. L'assestimetro A1 di Via Cesare Battisti presenta un andamento altalenante, attualmente con un'apparente tendenza al rigonfiamento per un totale di circa 6 mm di risalita rispetto all'inizio delle lavorazioni. L'assestimetro A3 di Corso Italia appare praticamente fermo. Eseguendo per l'assestimetro di Casa Ghedina un confronto con il periodo precedente all'installazione degli assestimetri multibase (Fig. 4.7), si osserva che l'attuale velocità di cedimento pur essendo molto inferiore al massimo valore di 9.6 mm/mese raggiunto nel dicembre 2015, risulta un 40% più alta del valore registrato durante il fermo cantiere del periodo natalizio e circa 5 volte del minimo valore raggiunto nell'aprile 2016. Per quanto riguarda i cedimenti misurati con gli altri assestimetri posti a diverse profondità di Casa Ghedina (Fig. 4.8) rispettivamente -3.00 m (B1) e -7.00 (B4), installati a Febbraio 2016, gli andamenti appaiono non molto congruenti tra loro: ad esempio, infatti, l'assestimetro a -7m indica un cedimento maggiore di quello misurato dagli assestimetri vincolati a -28m e -50m. Tale comportamento è giustificabile solo pensando che sia in atto una rotazione rigida della piastra che collega i pozzetti di misura, rotazione che influenza le misure alle aste assestimeriche. Si ritiene che tale situazione debba essere seguita con attenzione rimandando ulteriori considerazioni alle prossime osservazioni. Comunque una generale variazione della velocità è stata osservata nel mese di maggio per tutti gli strumenti di tale postazione e tale comportamento potrebbe essere collegato con lo spostamento orizzontale rilevato nei primi metri 20m dall'inclinometro SI1. I cedimenti misurati dagli assestimetri D1-D4 alla postazione A4 (Piazzale Roma)

sembrano essere più congruenti tra loro con valori di cedimento proporzionali alla profondità della base di ancoraggio. Le velocità di cedimento in questa zona si mantengono sempre relativamente più contenute di quelle osservate all'altro lato del cantiere (Fig. 4.9).



(Fig. 4.9) Spostamenti cumulati agli assestimetri D1, D2, D3, D4 e A4 (indicato come "D -50 m" in legenda) posti presso l'Hotel De la Poste-Piazza Roma dal 02/11/2016 al 09/06/2016 (grafico scaricato in data 09/06/2016 da sito Elmarx).

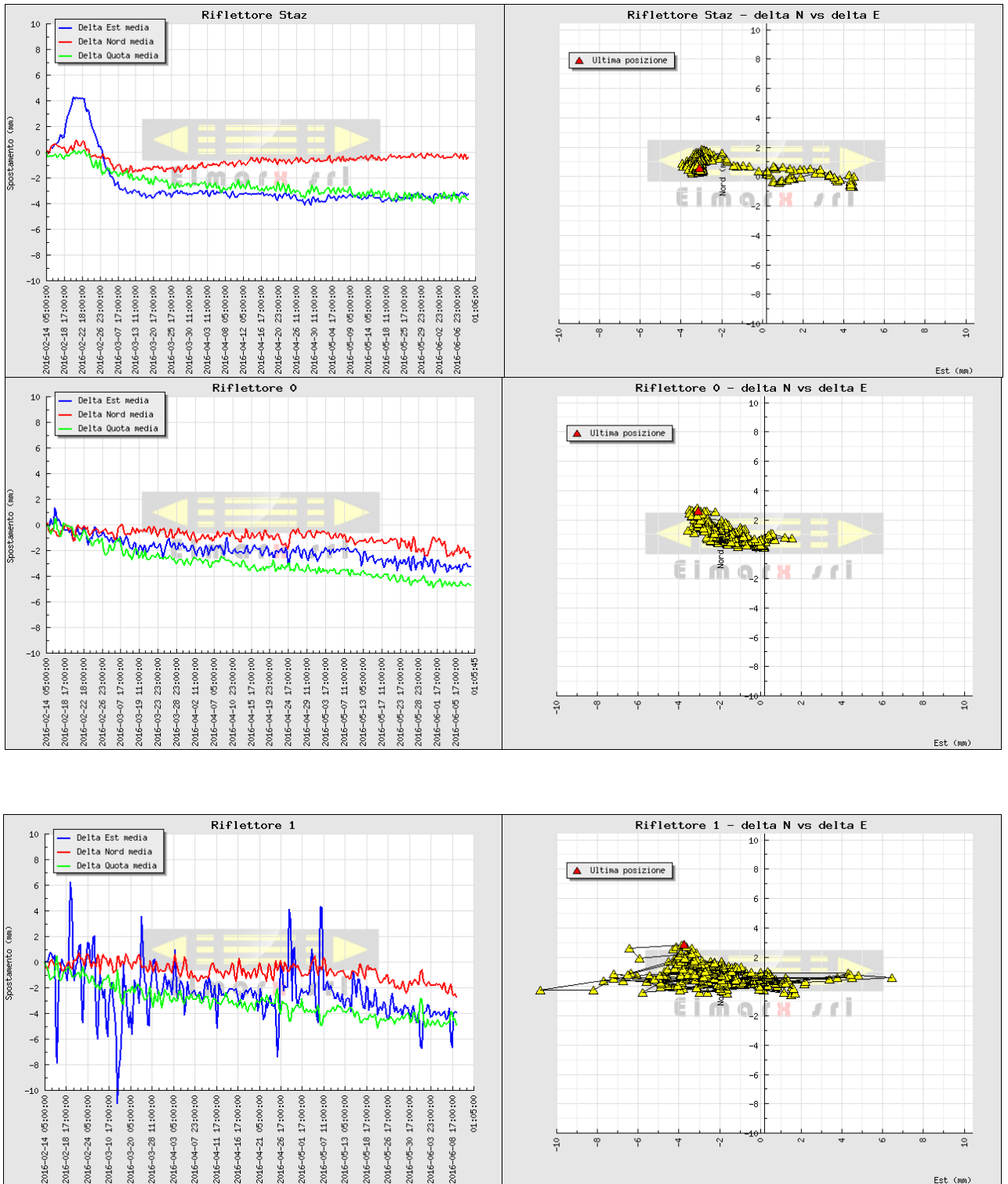
La stazione totale, costruita per il monitoraggio topografico, è divenuta operativa dal giorno 14/02/2016 con 20 punti di misura posizionati negli edifici limitrofi l'area di cantiere (Fig. 4.10). Nelle Figure sottostanti (Fig. 4.11, Fig. 4.12, Fig. 4.13) si riportano l'evoluzione nel tempo degli spostamenti in direzione Est e Nord e dei cedimenti verticali (variazioni di quota) rilevati nel periodo dal 14/02/2016 al 09/06/2016 nei riflettori installati sugli edifici limitrofi in cui si è rilevato uno spostamento più significativo. Il primo riflettore, denominato Staz., è

quello della stazione totale, il cui movimento è riferito a caposaldi ritenuti stabili individuati all'esterno dell'area del cantiere. Dall'esame dei dati sembrerebbe delinearsi un leggero spostamento verso Ovest (e.g. sia del caposaldo Staz che dei capisaldi 0, 1, 2, e 3 di casa Ghedina e 5, 6, 10 e 11 dell'Hotel Posta). Lo spostamento è di entità modesta ma comunque in linea con la leggera tendenza del versante a muoversi verso valle, come evidenziato dalle letture inclinometriche al piede del versante.



(Fig. 4.10) Immagini raffiguranti gli edifici in cui sono stati posizionati alcuni dei punti di misura (rispettivamente Hotel San Marco e Casa Ghedina)





(Fig. 4.11, Fig. 4.12, Fig. 4.13) Spostamenti cumulati in direzione Est e Nord e cedimenti rilevati con la stazione totale nel periodo dal 14/02/2016 al 09/06/2016 per i riflettori "staz", 0 e 1 (grafici scaricati dal sito Elmarx in data 09/06/2016).



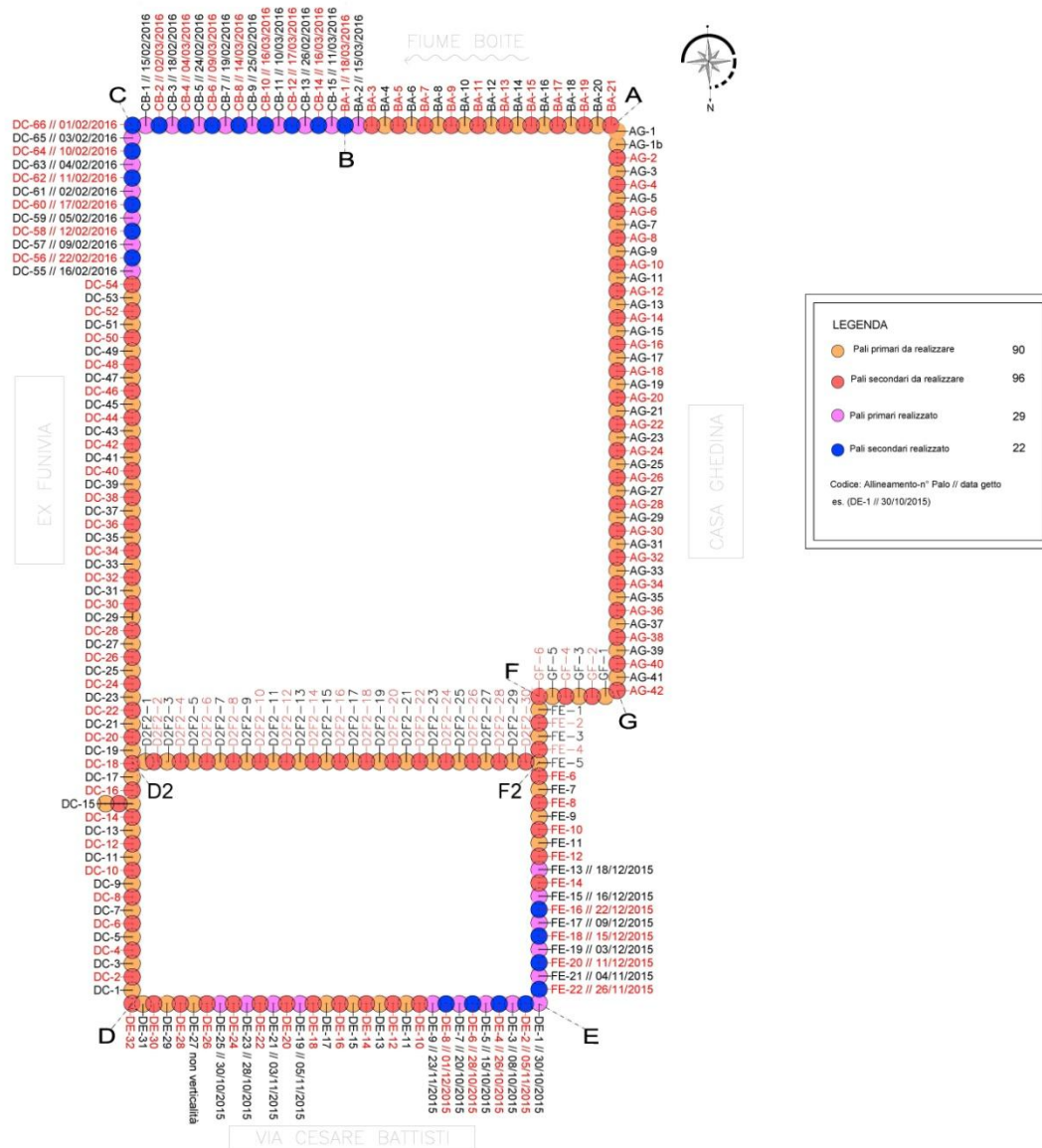
Dalle osservazioni fatte si è arrivati alla conclusione che, dai dati misurati e resi disponibili fino ad ora si nota l'occorrenza di un andamento di abbassamento generale dell'area di cantiere, con velocità in generale riduzione ma con alcuni distinguo e ancora significative. Le cause sembrerebbero essere imputabili alla variazione del regime di pressioni dell'acqua causate dall'esecuzione dei pali (oltre che al rilascio tensionale locale legato alla trivellazione e allo scavo, anche se sostenuto, dei pali) che indurrebbero un processo di consolidazione negli strati argillosi anche a grande profondità, come è stato rilevato sia dagli assestimetri superficiali che profondi. Dalle letture di alcuni caposaldi e dei dati inclinometrici sembrerebbe emergere una tendenza generale del versante, anche se per il momento di lieve entità, a spostarsi verso il corso d'acqua di fondo valle. Un leggero incremento nella velocità spostamento sembra essersi verificata in base agli strumenti di Casa Ghedina. Tale situazione deve essere tenuta sotto controllo in quanto, come si è evidenziato anche con le risultanze dei sondaggi, i terreni presenti in questa zona sono più deformabili di quanto previsto nel progetto.

## **5- ANALISI DI LABORATORIO SUI CAMPIONI PRELEVATI DOPO L'INIZIO DEI LAVORI**

### **5.1- Campionatura**

Durante un sopralluogo è stato effettuato un campionamento allo scopo di avere un riscontro diretto con i valori determinati dalle analisi effettuate per il progetto esecutivo ovvero per la relazione geologico-tecnica. I campioni sono stati prelevati subito dopo l'estrazione del materiale da parte della macchina perforatrice SR-30 con bucket ad una quota ognuna differente, presi a profondità che rappresentassero le varie caratteristiche evidenziate dal profilo lito-stratigrafico. Ovvero a Z 12 m (ED 25), 16 m (ED 21) e 28 m (ED 04) a cui, successivamente, sono state eseguite analisi specifiche per la determinazione della curva granulometrica, contenuto d'acqua e indice di plasticità. Il materiale è stato prelevato durante la trivellazione per la costruzione dei pali di sostegno lungo il

fronte di scavo nei punti indicati (*Fig. 5.1*) . Il materiale si presenta di bassa qualità di indagine essendo disturbato e rimaneggiato (Q3), idoneo solo per le analisi sopra elencate. I campioni sono stati scelti per rappresentare tre zone della colonna stratigrafica di dettaglio differenziate essenzialmente su base sedimentologica/geomorfologica, ovvero l'ED 25 proviene dall'Unità 1 A descritta come corpo caotico eterogeneo da colate di frana con un grado di sovraconsolidazione debole. Il secondo provino (ED 21) proviene da una quota di transizione con l'unità sottostante; transizione tra le unità con interdigitazione. Il terzo campione (ED 04) rappresenta l'unità 1 B descritta come corpo caotico eterogeneo legato al ritiro glaciale stadiale con grado di sovraconsolidazione moderato.



(Fig. 5.1) planimetria di progetto dell'ubicazione dei pali di sostegno scavo effettuati e da effettuare.

### 5.3- Preparativa

Le analisi in laboratorio avvengono con la preparazione del materiale e il suo frazionamento, con lo scopo di consentire il suo utilizzo in diverse analisi tra cui la determinazione del contenuto d'acqua presente e per le prove di vagliatura e di aerometria utili alla costruzione della curva granulometrica. Il contenuto d'acqua viene determinato facendo una sottrazione tra il peso umido del provino e il peso dello stesso dopo essere stato seccato in un forno ad una temperatura standard di 105° C per almeno 24 h consecutive. Nel secondo giorno di laboratorio si sono ottenuti i valori della prova granulometrica, solo la vagliatura meccanica per la componente a grana grossa ma, data l'alta concentrazione di materiale fine, agli scopi dell'indagine ha più peso la prova sui materiali fini che tratteremo

successivamente. Per la vagliatura meccanica si utilizzano dei setacci standardizzati dall'ASTM (*American Society for Testing Material*).

Un problema riscontrato durante la preparazione dei campioni è la scarsità di materiale per il provino (ED 25) data la sua componente fine predominante per poter operare un tale studio servirebbero circa 5 Kg di materiale, sarebbe l'unico modo per avere informazioni sulla parte superiore della curva granulometrica. Dato che le informazioni cercate riguardano prevalentemente la componente fine si procede allo studio solo di quest'ultima. Nella preparazione dei provini per l'analisi dei limiti di Attemberg, il materiale precedentemente seccato viene fatto attraversare il vaglio 40, ovvero di diametro 0.425 mm, raggiunta una determinata quantità viene macinato così da renderlo omogeneo e poi leggermente inumidito. Da esso a seconda del grado di acqua aggiunto, ci si ricava i valori di limite liquido (WL) tramite la prova del cucchiaio di Casagrande, e il limite plastico (WP) dalla preparazione di bastoncini di diametro di 3.2 mm senza crepe. Da questi due termini ci si ricava tramite l'equazione sotto mostrata (*Fig. 5.2*) l'indice di plasticità (IP).

$$I_P = L_L - L_P$$

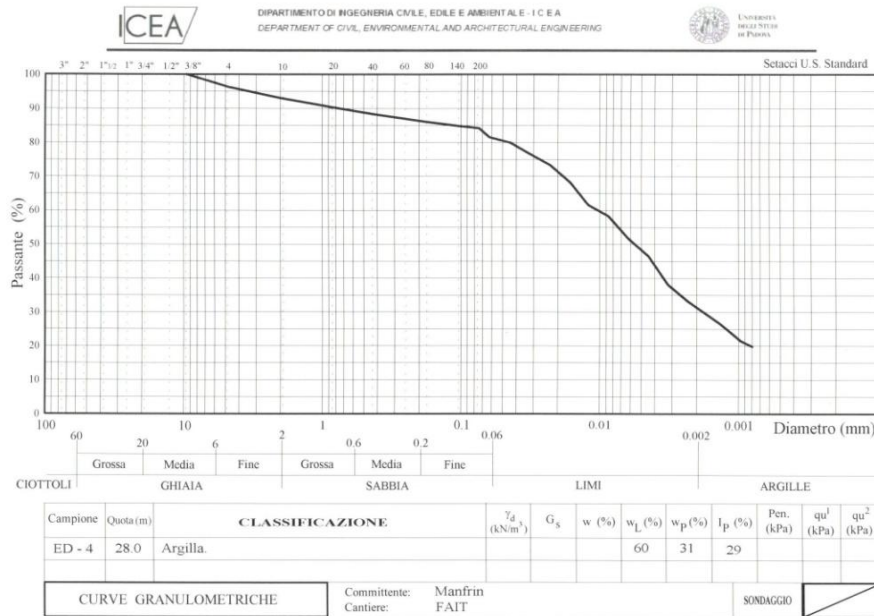
Un altro parametro ricavabile è l'indice di Attività esplicitato dall'equazione di seguito mostrata (*Fig. 5.3*) l'indice di attività (A) è uguale al rapporto tra l'indice di plasticità (IP) e la frazione argillosa presente nel campione (CF).

$$A = \frac{I_P}{C_F}$$

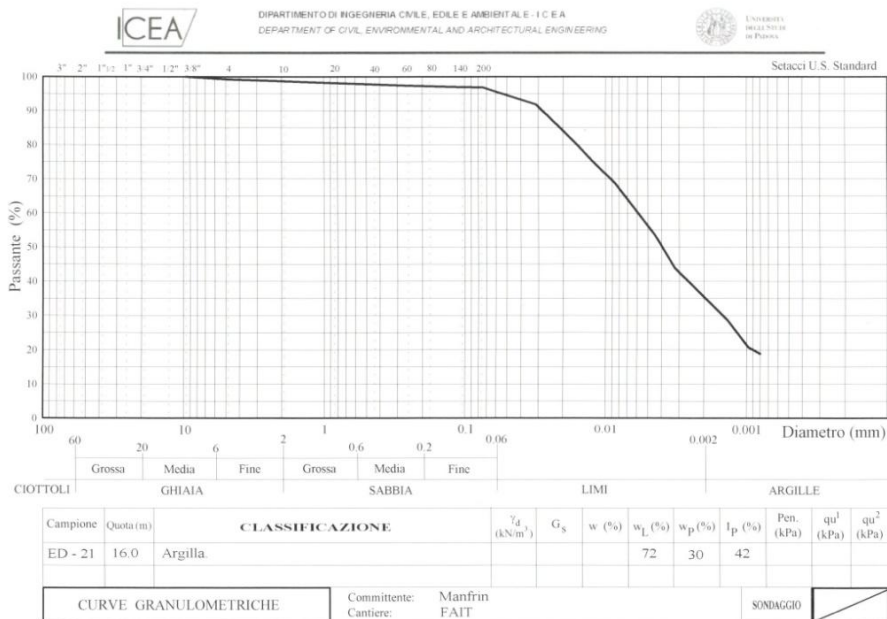
Per l'effettuazione della prova per la componente fine del campione (aerometria) si preleva una quantità nota di materiale secco e polverizzato che abbia attraversato il vaglio n. 200 dell'ASTM, ovvero che sia inferiore al diametro di 0.075 mm. Introducendo il materiale all'interno di un recipiente pieno d'acqua si misura nel tempo la densità di una sospensione e quindi ci si ricava la percentuale della quantità e delle dimensioni delle particelle presenti.

## 5.4- Risultati

La determinazione della distribuzione granulometrica dei terreni ha come scopo l'identificazione della curva granulometrica (Fig. 5.4.1) (Fig. 5.4.1).



(Fig. 5.4.1) Curva granulometrica corrispondente al campione analizzato ED-04.



(Fig. 5.4.1) Curva granulometrica corrispondente al campione analizzato ED- 21.

Quest'ultima è un diagramma ottenuto tramite prove in laboratorio di setacciatura del materiale campione. Dalla sperimentazione si ricava un diagramma in scala ordinaria e logaritmica, dove in ordinata può essere indicata la percentuale passante del materiale più fine del setaccio che attraversa, in scala ordinaria, mentre in ascissa il corrispondente diametro dei grani espresso in mm, in scala logaritmica a base decimale. Dal vaglio #200 la curva è costituita dai valori rilevati dall'analisi con aerometro. Un dato che si può ricavare da questo diagramma è il grado di uniformità di un terreno in quanto più la curva è verticale tanto meno si ha nel terreno in esame omogeneità. Nel caso specifico, i campioni presi in esame riscontrano un andamento della curva dolce, indicante un terreno eterogeneo con forte componente limoso-argillosa (in percentuale dell'80% nel campione (ED-04), addirittura più del 90% per il provino ED-21. Questi risultati portano ad una considerazione di maggior peso per le analisi sugli indici di consolidazione ovvero l'indice di plasticità e attività che rappresentano una misura indiretta della mineralogia dei terreni a grana fine. L'indice di plasticità è l'intervallo all'interno del quale il materiale possiede un comportamento plastico ovvero può subire deformazioni e essere rimaneggiato senza che si creino fessurazioni e cambi di volume; tale indice dipende dal tipo di argilla presente e dalla sua percentuale all'interno del terreno studiato.

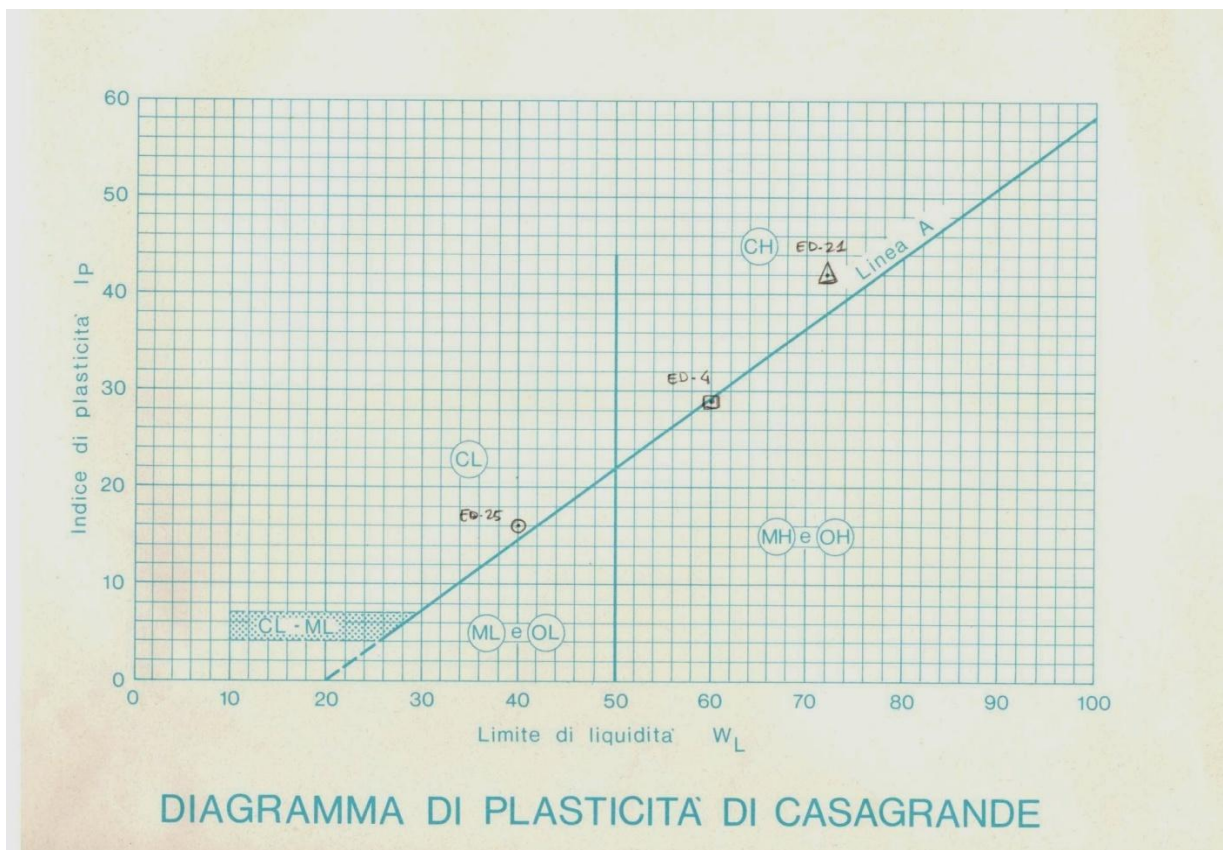
campioni	ED- 04	ED- 21	ED- 25
IP	29	42	16

(Tab. 5.4.1) Valori dell'Indice di Plasticità risultanti dalle analisi di laboratorio.

Nel caso specifico per l'Ip si è ottenuto un valore per ogni campione molto differente (Tab. 5.4.1), chiaro riferimento alla eterogeneità riscontrata nella sezione stratigrafica. Sul provino ED-25 abbiamo il valore più basso, valore che consideriamo rappresentativo dell'unità 1A. Il provino ED-04 risulta invece con un valore di plasticità media, mentre l'ED-21, proveniente dalla zona di transizione delle due unità principali, mostra un valore molto alto. Per le rocce a granulometria fine come quelle in studio, esiste una classificazione detta Carta di Casagrande. Tale Carta contiene efficaci definizioni del terreno e ne rileva la maggior compressibilità al crescere dell'indice liquido (WL) e la diminuzione col

crescere dell'indice plastico (WP), cioè l'attività, e quindi della coesione reale. Si vede che quanto più il punto caratteristico di una roccia cade verso la parte destra, tanto più il punto caratteristico di una roccia cade verso la parte destra, tanto più la roccia è cedevole, e quindi poco adatta a sopportare carichi di fondazione, ovvero ad essere utilizzata come materiale in opere in terra.

Dall'immagine sottostante (Fig. 5.4.3) si può osservare come i campioni di terreno si assestino vicino alla "retta A" che è la retta che sperimentalmente rappresenta il luogo dei punti medi caratteristici di argille poco sensitive. Un riscontro a tale affermazione lo si è avuto dall'indice di attività (A), in cui si testimonia, con valori che oscillano tra il 0.906 del provino ED-04 e il 1.2 del provino ED-21, un comportamento del terreno mediamente attivo.



(Fig. 5.4.3) Grafico contenente i risultati ottenuti dall'analisi sui provini ED-25, ED-04 ed ED-21.





## **6- MONITORAGGIO**

### **6.1- Introduzione**

Lo studio principale della seguente tesi è l'analisi dei dati acquisiti nel monitoraggio attuato durante la costruzione della struttura. Essi sono stati rilevati anche in tempo precedente l'inizio dei lavori, lo scopo è avere un confronto diretto sulla variabilità dei dati e scoprire, successivamente, con più facilità le cause di disturbo o anomalie. Graficando i dati acquisiti si vuole ricavare più informazioni riguardo le cause di determinate situazioni, correlando lo spostamento ricavato dai piezometri e le precipitazioni orarie, in funzione del tempo, si capisce se la falda è dipendente dalle piogge o invece dalle vibrazioni generate dalle macchine scavatrici. Quindi, per la fase di progettazione esecutiva, si è avviato all'installazione di strumenti adeguati, al fine di perseguire i seguenti obiettivi: buona misurazione in termini di tempo di risposta che di puntualità del dato e di continuità della registrazione.

### **6.2- Acquisizione dati**

Nel cantiere, durante le fasi iniziali, sono stati installate 4 celle piezometriche elettriche collocate in fori strumentati, due sono stati posizionati sulla linea frontale di trivellazione a ridosso della strada, rispettivamente i piezometri A e B; il primo ad una quota di operatività corrispondente al livello di interdigitazione tra le unità stratigrafiche 1 A e 1B ovvero a -16.5 metri dalla quota 0.0 di progetto, il secondo piezometro considerato è stato posizionato ad una quota di -33.5 metri. I restanti due piezometri, denominati C e D, sono stati collocati in posizione più centrale nel cantiere e sono rispettivamente posizionati ad una quota di -18.5 m e -38.5 m considerando però che il foro è stato eseguito, per entrambi, ad una altezza di -3.65 m rispetto alla quota 0.0 di progetto. Le perforazioni per la messa in posa della strumentazione qui sopra descritta, sono state effettuate per i piezometri più superficiali A e C con la tecnica del carotaggio continuo, mentre per B e D,

posizionati a quote inferiori con la tecnica di distruzione nucleo. La scelta di tale azione va ricercata nella differente litologia trovata durante la perforazione. Le misure con le celle piezometriche sono disponibili a partire dal 29 Dicembre 2014. La loro registrazione è continua durante tutta la fase di realizzazione degli scavi. Per essere graficati sono stati portati alla quota di riferimento 0.0 di progetto posizionato sul piano strada via C. Battisti

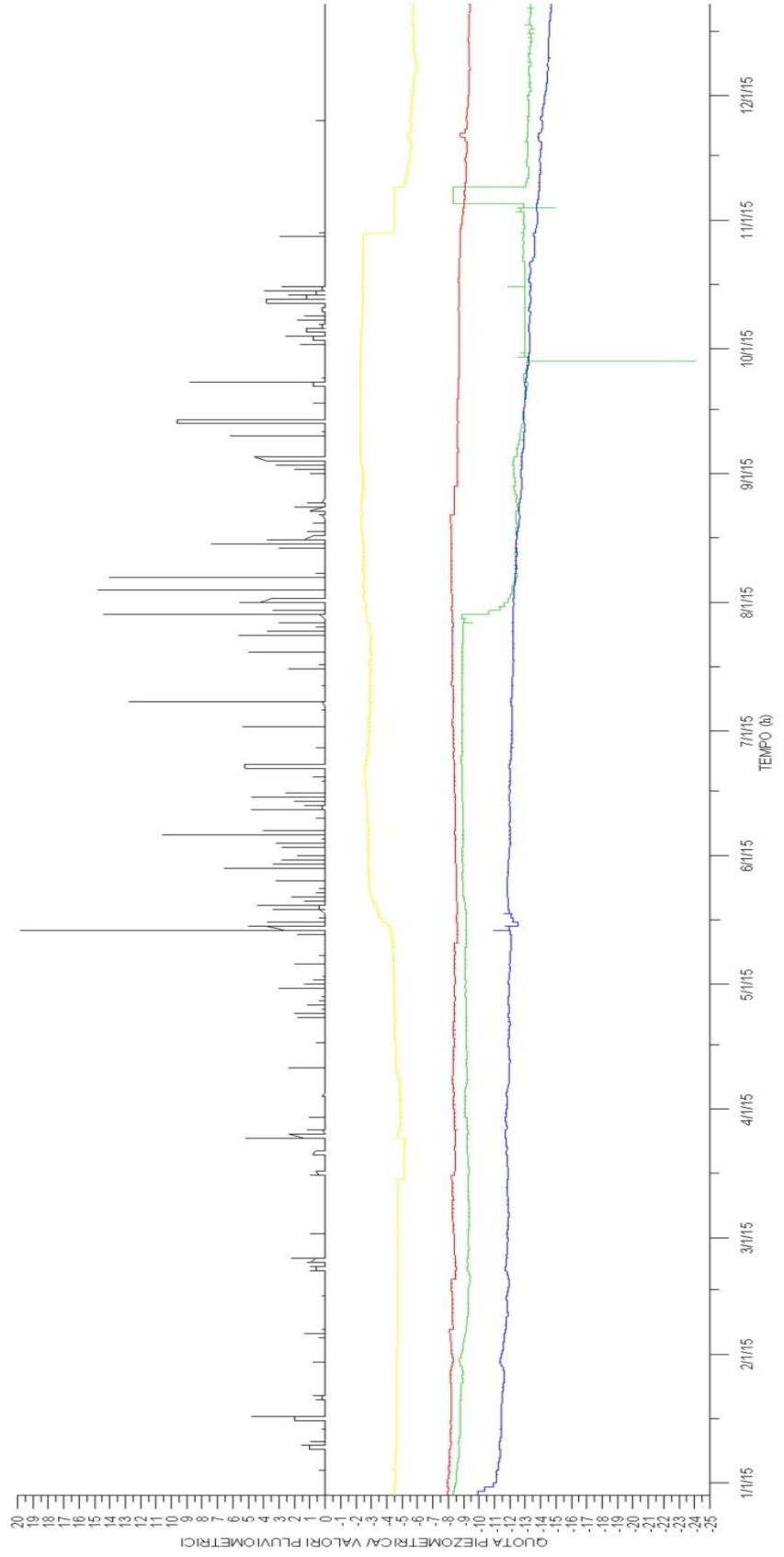
### **6.3- Elaborazione dati**

Dalle valori grezzi ottenute dai rilevamenti in corso d'opera ricavate in situ, si è potuto ricavare informazioni utilizzabili ai fini perseguiti da questo studio, ovvero la verifica tramite monitoraggio, delle condizioni dei parametri considerati. I dati sono stati raccolti tramite una centralina di acquisizione continua dei dati con trasmissione in remoto. Successivamente l'acquisizione dei valori in stato grezzo, nello specifico per i valori dei piezometri, si è ottemperato a trasformare le altezze piezometriche rispetto alla quota 0.0 di progetto per tutti e quattro gli strumenti, in modo da avere i valori confrontabili.

Nel contempo sono stati acquisiti anche i valori pluviometrici partendo dalla stessa data dei valori disponibili delle celle piezometriche. Per renderli confrontabili sono stati unificati con lo stesso periodo temporale, essendo i primi registrati ogni 15 minuti mentre i valori pluviometrici ogni ora.

Graficando insieme i valori si è correlato i valori della quota piezometrica e i dati pluviometrici, posizionati sull'asse delle ordinate, e il periodo temporale d'acquisizione, posizionato sull'asse delle ascisse (*Fig. 6.3.1*). Si osservano quindi le variazioni delle falde acquifere grazie alla risposta registrata dai piezometri in relazione nel tempo alle precipitazioni avvenute nella zona del sito.

*(Graf. 6.3.1) Grafico che mostra la correlazione delle quote piezometriche registrate nel tempo ai valori pluviometrici delle precipitazioni registrate nel tempo (valori pluviometrici espressi in cm mentre la quota piezometrica, riferita al piano campagna, è espressa in m)*



LEGENDA

- Piezometro A (-16,5 m da quota 0,0 di progetto)
- Piezometro B (-33,5 m da quota 0,0 di progetto)
- Piezometro C (-22,5 m da quota 0,0 di progetto)
- Piezometro D (-42,15 m da quota 0,0 di progetto)

#### 6.4- Risultati

Dalla correlazione effettuata, risulta evidente come le celle piezometriche non abbiano lo stesso comportamento e che ci sia una tendenza generale di abbassamento del livello piezometrico, nell'arco temporale considerato di un anno, si è verificato un abbassamento corrispondente al piezometro A (-16.5 m) di -2.00 m, per il piezometro B (-33.5 m) di -1.00 m, mentre per i piezometri C (-22.5 m) e D (-42.15) rispettivamente -3.00 m e -4.00 m. Da sottolineare l'abbassamento al piezometro C (-22.5 m) è stato registrato tutto nel mese di Agosto 2015. Potrebbe essere attribuibile alla teoria del collegamento di falde tramite la perforazione effettuata in fase di lavorazione. La cella piezometrica A posizionata ad una quota minore rispetto alle altre celle (-16.5 m rispetto alla quota 0.0 di progetto) risente maggiormente delle variazioni imposte dal maggior afflusso di precipitazioni, si osserva come nel periodo appena successivo alla metà di Maggio, dopo una precipitazione consistente superiore ai 15 mm/h, ci sia una reazione incrementale immediata del livello di falda. La cella piezometrica A si trova ad una quota all'interno dell'unità 1 A. Da osservare come non si riscontri una risposta simile dalle altre celle, esse però sono posizionate all'interno dell'unità 1 B. Il comportamento della cella A evidenzia un comportamento più indipendente che, sulla base di prove di permeabilità eseguite (*Siges srl et al. 2015*), a scala ampia costituiscono acquitardi con valori medi di conducibilità dell'ordine dei  $10^{-7} m/s$ ; l'unità inferiore 1B costituisce il livello di base con permeabilità bassissima tanto da essere praticamente impermeabile ovvero acquiclude. Da constatare la presenza discontinua di micro falde sospese non o poco comunicanti. Quello che si osserva è una condizione di circolazione idrica verticalmente discontinua, all'interno di un sistema dotato complessivamente di trasmissività molto bassa e con forte anisotropia verticale e laterale. Dai risultati ottenuti, comparandoli con la tavola rappresentante la stratigrafia determinata dalle indagini diagnostiche (*Fig. 3.2.1*) si può ricostruire, in maniera schematizzata, la circolazione idrica ipogea. Si ottiene una suddivisione in due regimi di circolazione di falda idraulicamente indipendenti; Quello più

superficiale riferito all'unità 1A di tipo freatico, e quello più profondo relativo all'unità 1B con falda di tipologia semi-confinata.

## **7- ANALISI NUMERICA**

### **7.1- Introduzione**

Utilizzando un approccio da modello inverso, ovvero partendo da valori ricavati in situ ed utilizzati per l'elaborazione di un modello di terreno, l'obiettivo dello studio è quello di simulare il comportamento del terreno in caso di abbassamento di falda con tutte le condizioni al contorno note per farlo si utilizza un software specifico di nome MIDAS GTS NX che utilizza la tecnica dei metodi numerici agli elementi finiti, che sono utilizzati di solito per soluzioni 2-D o 3-D. L'analisi con il MIDAS per lo studio dei cedimenti, non è uno studio sempre sfruttato anzi, spesso risulta sottovalutato e quindi non svolto. Nel caso specifico del cantiere Fait invece, durante la trivellazione è sorto un problema di cedimento dovuto alla consolidazione sia durante i lavori ma anche quando il cantiere era fermo. Tramite questo studio, conoscendo le caratteristiche geo-meccaniche del terreno si andrà, in maniera approssimativa, a simulare il cedimento per avere un'idea sulle velocità che si potrebbero verificare nel breve e nel lungo periodo. La regione è successivamente discretizzata in celle (elementi) con nodi che ne definiscono gli angoli. Il metodo agli elementi finiti è un approccio più recente, oggi ben consolidato; l'analisi comincia con l'approssimazione della regione da studiare, suddividendola in un numero di elementi finiti non uniformemente distribuiti nello spazio, che vengono correlati con i nodi a loro associati. All'interno di ogni elemento, la variazione spaziale della variabile dipendente viene approssimata con una funzione d'interpolazione che è definita rispetto ai valori che la variabile dipendente assume nei nodi associati all'elemento. Il problema originale è quindi sostituito con una sorta di sistema integrale equivalente. Successivamente le suddette funzioni di interpolazione sono sostituite nella forma integrale, vengono integrate e combinate con i risultati ricavati dagli altri elementi. Si ottengono così le equazioni algebriche che definiscono il problema e che devono essere risolte

rispetto alla variabile dipendente ad ogni nodo. La discretizzazione è funzione delle informazioni che si hanno riguardo la zona indagata, maggiore sarà la quantità di dati utilizzabili più i poligoni saranno piccoli, ovvero il modello sarà più dettagliato; La possibilità di poter scegliere larghezze diverse per ogni maglia nel metodo degli elementi finiti permette di ottenere simultaneamente rappresentazioni dettagliate in alcune zone del modello, assieme a rappresentazioni meno dettagliate in altre zone laddove è minore l'interesse di dettaglio, ovvero il contenuto specifico d'informazione. Questo è possibile con la formulazione standard del metodo degli elementi finiti.

## **7.2- Procedimento**

Si prende di base la struttura geometrica corrispondente all'inizio dei lavori (Geometria 1), ovvero del versante con già avviato il processo di cantierizzazione, costruita precedentemente per altre tipologie di studi. Quindi si adatta la geometria alle nostre esigenze, eliminando le strutture del cantiere che devono essere ancora costruite e lasciando solo i livelli delle unità principali e le strutture preesistenti in superficie. Nella sezione Mash si attribuisce alle aree delimitate dalla geometria un significato più specifico, ovvero gli si attribuisce i parametri che rappresentano il comportamento meccanico dei terreni che riscontriamo in cantiere con analisi geognostiche. I valori assegnati alle singole unità stratigrafiche sono valori ottenuti con una media, un valore rappresentativo dell'unità considerata. Il modello è stato suddiviso in 4 unità, rispettivamente unità 0 composta dal materiale più superficiale denominato "di riporto" con un valore di resistenza a rottura di 20 MPa, per l'unità successiva la 1A si è inserito un valore di 6 MPa ed, per le unità 1B e 1C, rispettivamente i valori 15 MPa e 50 MPa; questi dati sono stati elaborati e successivamente forniti dallo studio tecnico che si fa carico della costruzione del garage interrato. Ad ogni unità esistente gli viene assegnato un comportamento di risposta alle sollecitazioni, nel caso specifico dello studio tutte le unità stratigrafiche sono state impostate sulla modalità "modified Mohr-Coulomb", quindi con un comportamento di risposta simulato elasto-plastico. In questo modo il modello, al momento della

simulazione, farà sì che il terreno risponda alle sollecitazioni imposte in un determinato modo, ovvero come le unità si comporterebbero teoricamente nella realtà. Successivamente si è operato alla creazione del livello di falda iniziale e degli abbassamenti ipotetici presi in esame rispettivamente a -2.00 m e -4.00 m per l'osservazione, in una fase successiva, del comportamento del terreno. Si è poi variato i parametri del modulo elastico all'interno della mesh che ha implicato un comportamento diverso da parte del terreno, con l'intento da parte nostra di osservare il comportamento meccanico del terreno; sempre osservando l'andamento della consolidazione per abbassamenti di -2.00 e -4.00 m.. I moduli elastici inseriti per il secondo studio sono rispettivamente; per l'Unità 0 14 MPa, per l'Unità 1 A si è inserito un valore di 4.9 MPa mentre per le Unità litologiche 1 B e 1 C, rispettivamente 9.5 MPa e 40 MPa.

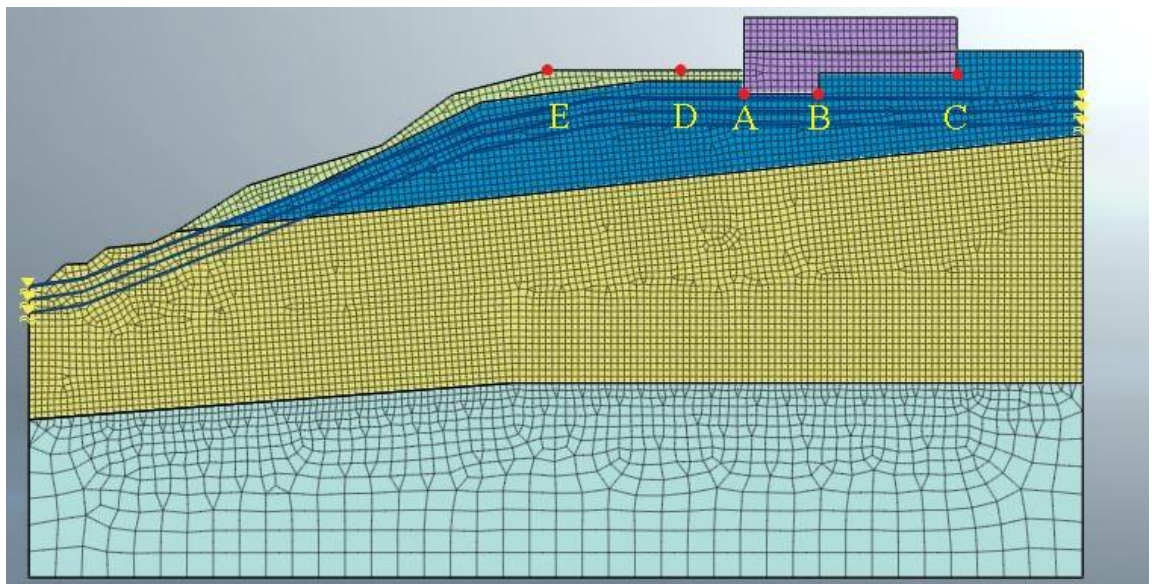
### **7.3- Elaborazione dati**

Dopo aver apportato tutte le condizioni tali da poter simulare il più realisticamente possibile il comportamento dello specifico terreno in studio, si è operato a far elaborare al software Midas le possibili situazioni che si sta cercando di studiare; nello specifico si è comunicato al programma, dopo numerosi tentativi per determinare la metodica corretta da utilizzare, un step temporale diviso in due parti principali. La prima parte corrisponde alla fase di abbassamento della falda dalla condizione iniziale a -2.00 m di profondità, il tempo impostato è di 365 giorni, ovvero il programma elaborerà che la falda impiegherà l'anno intero per raggiungere l'abbassamento richiesto. La seconda parte descrive solamente la consolidazione che avviene successivamente al livello piezometrico di -2.00 m o -4.00 m raggiunto, lo step temporale qui considerato arriva ai 100 anni. Vorrei ricordare che lo step temporale considerato deve essere concentrato tutto in un'unica volta ovvero comunicare al programma l'analisi del cedimento dal primo giorno fino ad un tempo molto lungo; se non si procede in questo modo il software per ogni elaborazione con step temporali differenti darà valori differenti e non connessi tra di loro rendendo così i valori non confrontabili. Si è operato prima determinando i valori dei cedimenti per un abbassamento di falda di -2.00 m. considerando un range temporale che va da un 1 giorno fino a 100 anni e successivamente lo stesso procedimento però abbassando la falda iniziale fino a -

4.00 m. Per la curva corrispondente all'analisi di consolidazione nei vari modelli elaborati, l'aspettativa è che abbia un comportamento in cui nella fase iniziale abbia un rapido abbassamento e via via nel tempo, e ci si sposta avanti nell'asse delle ascisse, un rallentamento fino a raggiungere una condizione di stazionarietà. In quel punto si è raggiunta la consolidazione per il determinato terreno.

#### 7.4- Risultati

Dai risultati ottenuti, per quanto concerne l'analisi di consolidazione per la geometria del versante in condizioni iniziali, antecedente alle opere di scavo, i valori ottenuti mostrano un andamento della consolidazione continuo e progressivo come evidenziato dai grafici rappresentanti degli spostamenti rispettivamente totali (*Fig. 7.4.2.*), in direzione X (*Fig. 7.4.3*) e in direzione Y (*Fig. 7.4.4*) per abbassamento di falda di -2.00 m. I grafici fanno riferimento a dei punti specifici presi in considerazione per l'osservazione dettagliata degli abbassamenti in zone strategiche (*Fig. 7.4.1*).

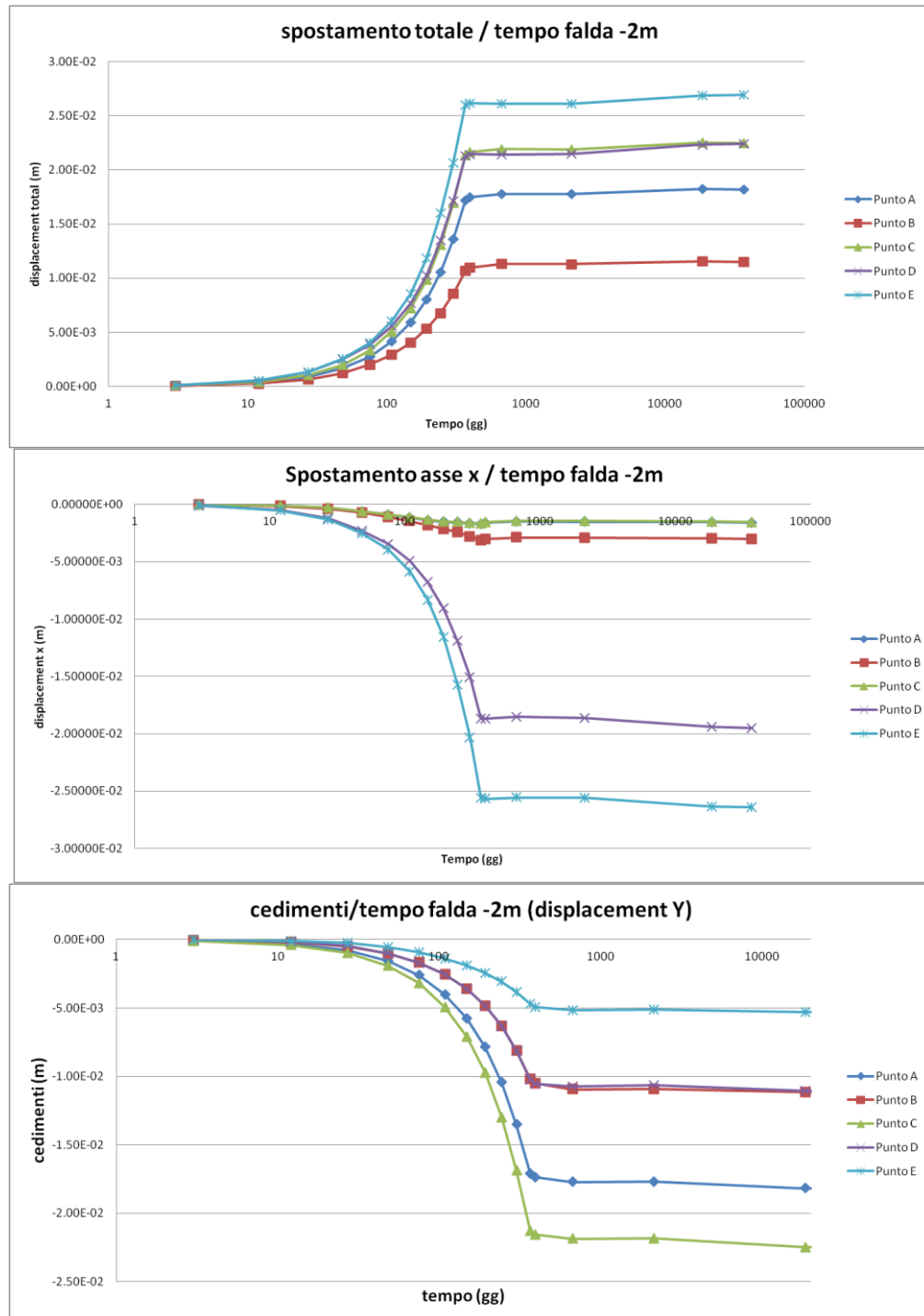


(*Fig. 7.4.1*) immagine rappresentativa dei punti considerati per l'osservazione dettagliata degli spostamenti.

I punti A, B e C rappresentano le fondazioni dell'edificio dinanzi al cantiere, ovvero l'Hotel De la Poste mentre il punto D rappresenta il luogo a livello della

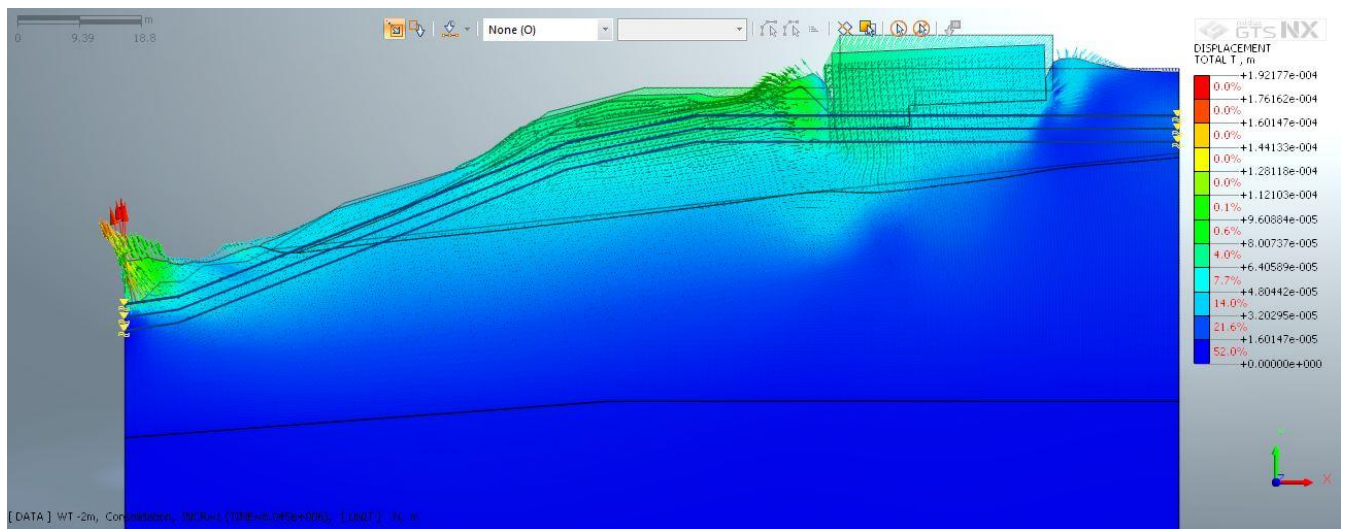


superficie in cui si inseriscono i pali di fondazione, ed infine, il punto E in cui inizia nella geometria considerata la pendenza del versante.



(Fig. 7.4.2, Fig. 7.4.3, Fig. 7.4.4) grafici spostamenti-tempo esemplificativi dei movimenti misurati nei punti A, B e C situati sotto l'Albergo San Marco mentre D ed E situati all'interno dell'area del cantiere, riferenti all'elaborazione -2.00 m.

Dalle curve emerse dai grafici si deduce uno spostamento più marcato, se consideriamo gli spostamenti totali a lungo termine (100 anni), sono i punti posti sulla superficie D ed E e rispettivamente di 2.20 cm e 2.66 cm, per quanto riguarda gli spostamenti sull'asse X lo spostamento maggiore risulta sempre appartenere ai punti D ed E con i valori ai 100 anni rispettivamente di 1.9 cm e 2.60 cm. Per gli spostamenti solo lungo l'asse Y notiamo che gli abbassamenti maggiori si osservano sotto l'edificio in particolare sulle estremità della fondazione, i punti A ed C con valori ai 100 anni di 1.80 cm ed 2.45 cm. Per

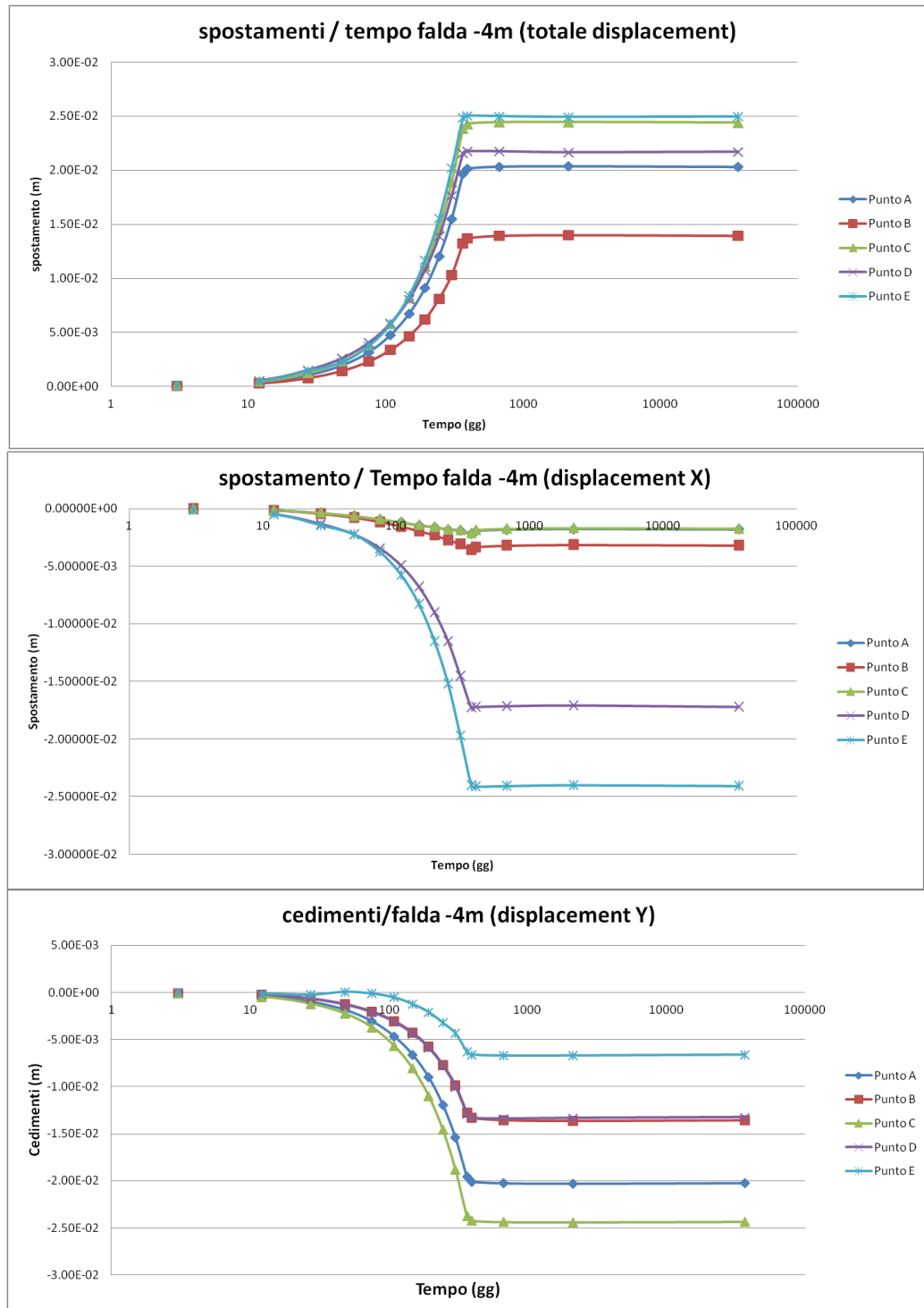


comprendere l'andamento generale sul modello nella figura sottostante (Fig. 7.4.5) viene mostrata la geometria con la direzione di abbassamento, in maniera enfaticata, che però è esemplificativa del comportamento elaborato.

(Fig. 7.4.5) immagine rappresentante l'andamento dei cedimenti dovuti ad abbassamento del livello piezometrico di -2.00 m, riferitosi al tempo 10 gg dopo l'inizio dell'elaborazione. Le frecce rosse con alta intensità sono da attribuire a piccoli errori dell'elaborato e non sono da considerarsi affidabili.

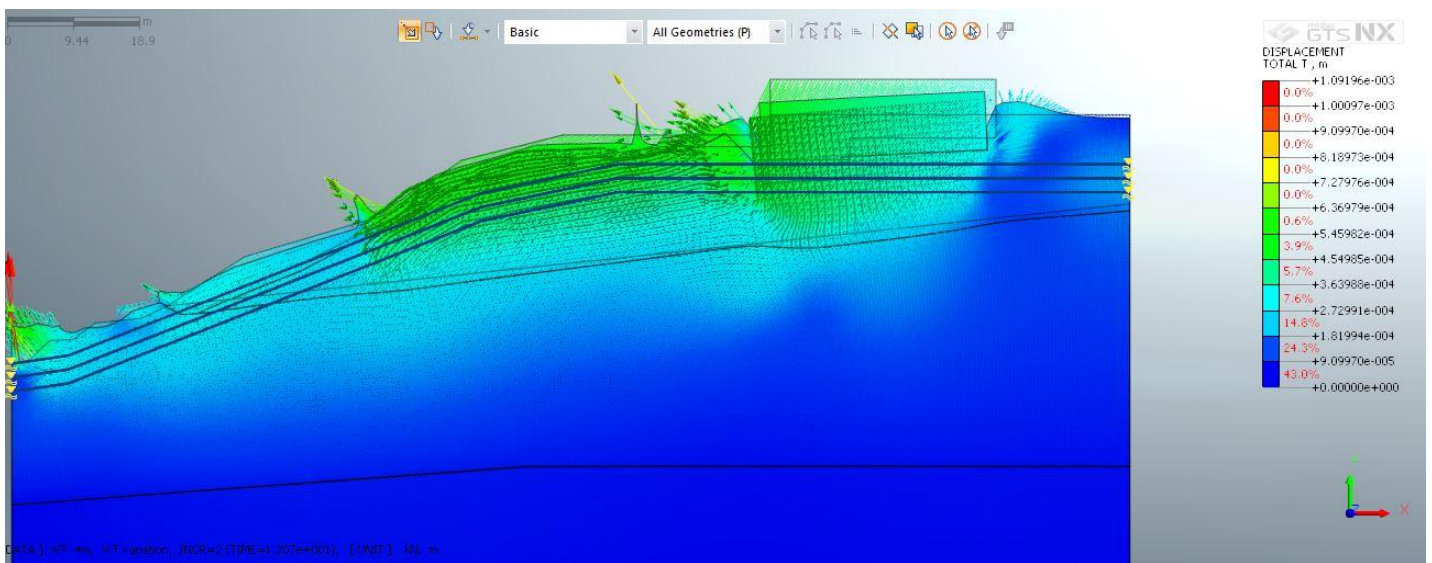
Le frecce indicano la direzione e l'intensità di spostamento per un abbassamento di falda di -2.00 m. Un abbassamento sostanzialmente concentrato nella zona a monte del versante e sviluppato ai margini dell'edificio Hotel De la Poste con andamento dei punti sotto l'edificio propensi allo spostamento lungo l'asse Y mentre i punti superficiali più a valle seguono la direzione dell'asse X. Lo stesso procedimento è stato effettuato per un incremento di abbassamento di -4.00 m il comportamento riscontrato dalle elaborazione descrive un andamento simile al

precedente, nel dettaglio gli spostamenti totali registrati (Fig. 7.4.6) mostrano un movimento più marcato nei punti E, D e C rispettivamente di 2.50 cm, 2.20 cm e 2.50 cm nel lungo periodo (100 anni).



(Fig. 7.4.6, Fig. 7.4.7, Fig. 7.4.8) grafici spostamenti-tempo esemplificativi dei movimenti misurati nei punti A, B e C situati sotto l'Albergo San Marco mentre D ed E situati all'interno dell'area del cantiere, riferenti dell'elaborazione -4.00 m.

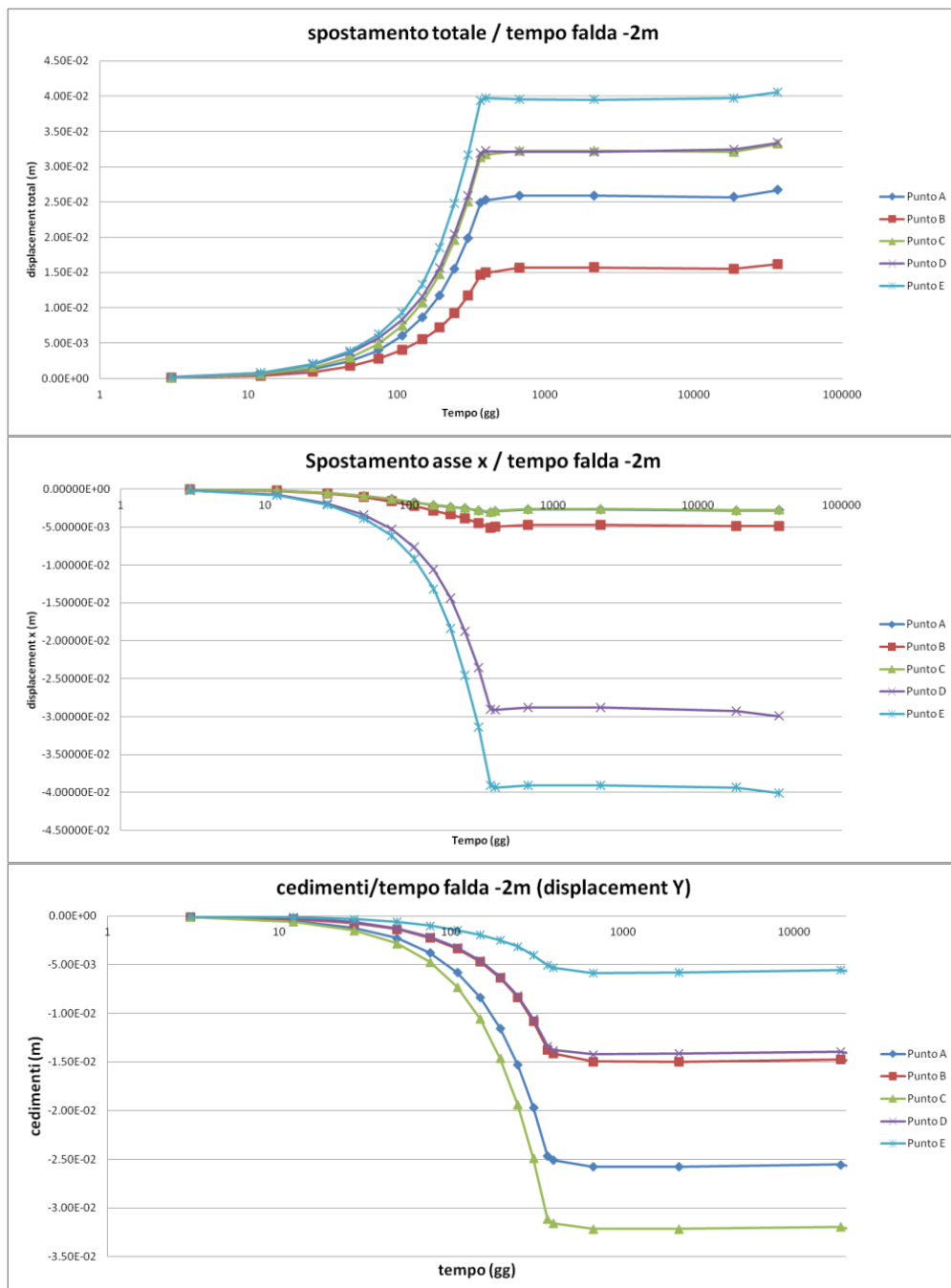
Per gli spostamenti lungo l'asse X in prevalenza si osservano i punti D ed E con rispettivamente 1.70 cm e 2.45 cm, gli altri punti si assestano su alcuni mm (Fig. 7.4.7). Per quanto concerne l'abbassamento analizzato lungo l'asse Y (Fig. 7.4.8), risulta evidente che i punti sottostanti la struttura risentano maggiormente dell'abbassamento prodotto dalla falda, con valori in A 2.00 cm ed in C di 2.50 cm. Anche per il secondo elaborato l'andamento osservato è un cedimento del terreno sotto la fondazione dell'albergo con un piccolo rialzamento della porzione situata di fronte al suddetto Hotel de la Poste ove è presente la strada (Fig. 7.4.9). I valori riscontrati sono pressoché identici tra i due livelli piezometrici considerati, anche se ci si aspettava un incremento più sostanzioso nel secondo step di analisi a -4.00 m.



(Fig. 7.4.9) immagine rappresentante l'andamento dei cedimenti dovuti ad abbassamento del livello piezometrico di -4.00 m, riferitosi al tempo 10 gg dopo l'inizio dell'elaborazione. Le frecce rosse con alta intensità sono da attribuire a piccoli errori dell'elaborato e non sono da considerarsi affidabili.

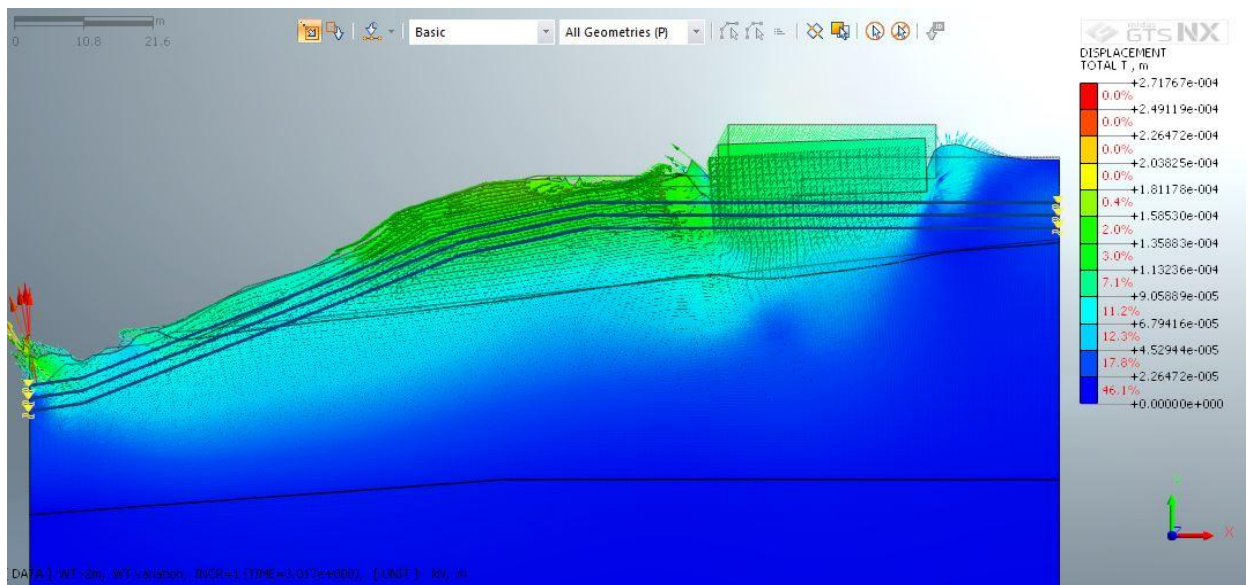
Considerando sempre la stessa geometria del versante ad uno stato antecedente l'inizio dei lavori, utilizzata per il precedente elaborato, si è andato a variare una delle proprietà inserite nella mesh introducendo dei nuovi valori di modulo elastico stimati sulla base delle informazioni osservate dalle prove di laboratorio svoltesi ad inizio lavorazioni e inserite nella relazione geologico-tecnica. I valori inseriti hanno un valore minore, quindi ci aspetteremo degli abbassamenti

maggiori da parte del modello. Con esse si è svolta una seconda elaborazione comprendente sempre i due abbassamenti -2.00 m e -4.00 m con lo scopo di confrontare la variabilità prodotta tramite un'analisi parametrica dei moduli elastici. Per il primo caso -2.00 m, i risultati ottenuti mostrano un andamento del tutto simile con la precedente elaborazione, nel dettaglio graficando i valori osservati per lo spostamento totale (Fig. 7.4.10) uno spostamento di tutti i punti considerati di almeno 1 cm in particolare i punti più sollecitati, ad un tempo di 100 anni sono il D ed E rispettivamente con 3.40 cm e 4.00 cm.



(Fig. 7.4.10, Fig. 7.4.11, Fig. 7.4.12) grafici spostamenti-tempo esemplificativi dei movimenti misurati nei punti A, B e C situati sotto l'Albergo San Marco mentre D ed E situati all'interno dell'area del cantiere, riferenti all'elaborazione -2.00 m.

Per il secondo grafico in ordine (Fig. 7.4.11) , che mostra gli spostamenti lungo l'asse X, abbiamo una netta differenza tra i punti sottostanti l'edificio e i punti posti in superficie, con i punti D ed E che raggiungono in 100 anni rispettivamente i valori di 3.00 cm e 4.00 cm. Nel grafico degli spostamenti sull'asse delle Y (Fig. 7.4.12) i punti sollecitati maggiormente sono i punti posti alle estremità della fondazione, A e C con valori che raggiungono, sempre nel tempo di 50 anni, rispettivamente 2.45 cm e 3.20 cm.

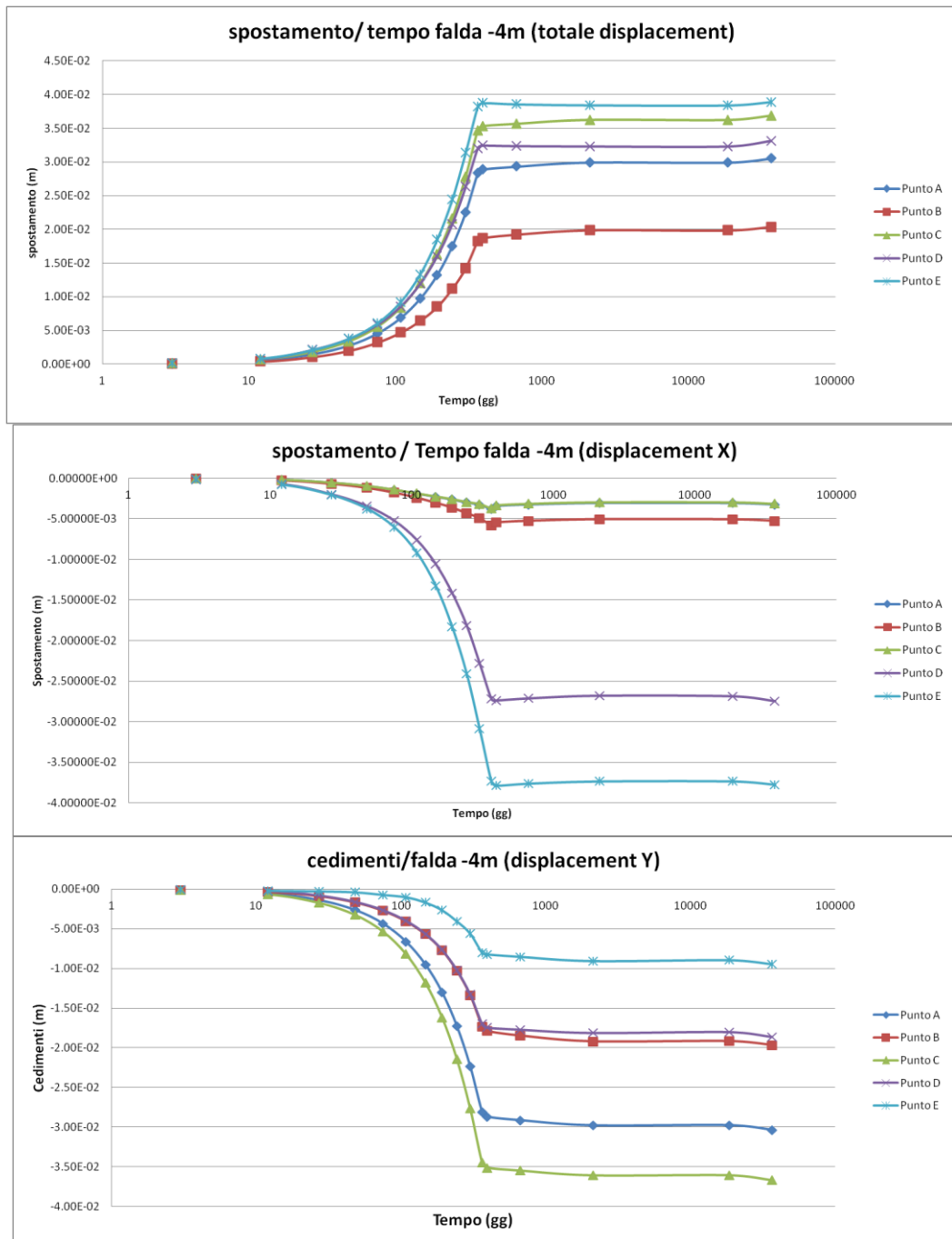


(Fig. 7.4.13) immagine rappresentativa dell'andamento dei cedimenti dovuti ad abbassamento del livello piezometrico di -2.00 m, riferitosi al tempo 10 gg dopo l'inizio dell'elaborazione. Le frecce rosse con alta intensità sono da attribuire a piccoli errori dell'elaborato e non sono da considerarsi affidabili.

L'andamento che emerge, (Fig.7.4.13) corrisponde ad un movimento composto da, un abbassamento verticale della struttura e un spostamento tendente orizzontale verso valle del terreno soprastante il versante. Nell'elaborato con

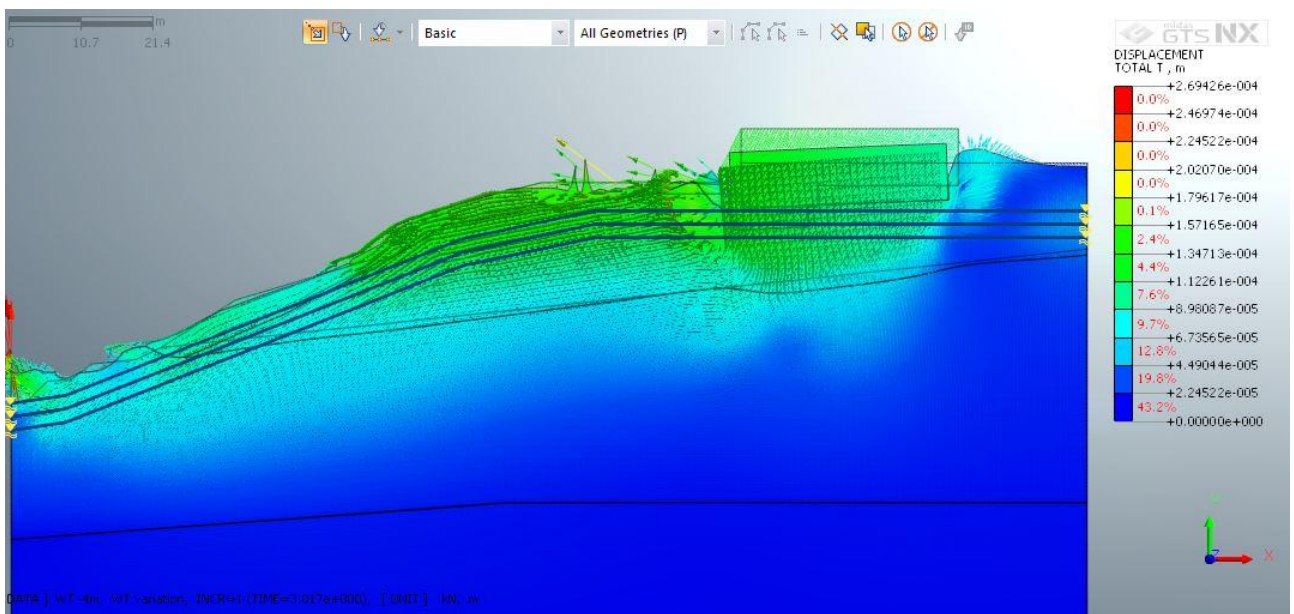


livello piezometrico portato a -4.00 m i risultati ottenuti esplicitano l'andamento ritrovato nei precedenti modelli, ovvero:



(Fig. 7.4.14, Fig. 7.4.15, Fig. 7.4.16) grafici spostamenti-tempo esemplificativi dei movimenti misurati nei punti A, B e C situati sotto l'Albergo San Marco mentre D ed E situati all'interno dell'area del cantiere, riferenti dell'elaborazione -4.00 m.

nel grafico raffigurante lo spostamento totale (Fig. 7.4.14), il punto E nel periodo temporale considerato di 100 anni, mostra un valore 3.90 cm. Nel grafico raffigurante lo spostamento sull'asse X nel tempo (Fig. 7.4.15), i punti D ed E mostrano il massimo valore raggiunto, rispettivamente di 2.70 cm e di 3.70 cm, mentre nel grafico riguardante gli spostamenti lungo l'asse Y il punto A e C mostrano il valore più alto, rispettivamente di 3.00 cm e 3.70 cm (Fig. 7.4.16). Nell'immagine raffigurante il comportamento analizzato per l'abbassamento di -4.00 si osserva lo stessa analoga situazione solo con un incremento degli spostamenti (Fig. 7.4.17).



(Fig. 7.4.17) immagine rappresentativa dell'andamento dei cedimenti dovuti ad abbassamento del livello piezometrico di -4.00 m, riferitosi al tempo 10 gg dopo l'inizio dell'elaborazione. Le frecce rosse con alta intensità sono da attribuire a piccoli errori dell'elaborato e non sono da considerarsi affidabili.

Facendo un confronto tra i due modelli della stessa elaborazione, si deduce che; nel primo caso si osserva una seppur piccola ma significativa differenza di incremento di spostamento prodotta dall'abbassamento della tavola d'acqua di ben -2.00 m, dal caso -2.00 m al caso -4.00 m, riscontrata lungo l'asse verticale (Y), rispettivamente di 0.20 cm per entrambi i punti A e C. Nel secondo elaborato, a colui che si è variati i parametri, si osserva una variazione che raggiunge nei punti A e C quasi il centimetro ovvero 0.80 cm.



Confrontando le due elaborazioni separatamente, si osserva che il modello con la modifica dei moduli elastici, presenta una condizione del tutto simile al precedente con la sola variante di un incremento degli abbassamenti osservati sull'asse Y nei punti A e C che corrispondono rispettivamente per i -2.00 m ad A 0.8 cm e C 1.10 cm, per i -4.00 m invece A 1.20 cm e C 1.30 cm, come ci si aspettava.



## 8- CONCLUSIONI

Dai risultati ottenuti quello che emerge è una situazione di cantierizzazione con materiale eterogeneo non perfettamente stabile. La litologia, come si è ottenuto dalle analisi condotte è complessa e non del tutto conosciuta, le informazioni idrologiche e geotecniche ottenute da questo studio ricalcano e confermano le informazioni ricavate dalle indagini geognostiche effettuate dalle aziende incaricate in merito alla stesura della relazione geologico tecnica. La prima fase di trivellazione per la creazione dei pali profondi di sostegno, ha portato ad una probabile interconnessione di livelli di falde differenti, di tipologia acquiclude con annesse sacche isolate, ed ad un abbassamento delle pressioni neutrali interne al pendio. Questo ha comportato ad un cedimento del terreno, un principio di consolidazione, osservata soprattutto durante il periodo di riposo del foro. Considerando gli abbassamenti avvenuti nella prima fase dei lavori (inverno 2015-16), è stato opportuno svolgere uno studio mirato per l'osservazione dell'andamento della consolidazione generale del pendio nel tempo. Le analisi condotte con il modello degli elementi finiti (FEM) hanno condotto a risultati soddisfacenti, i modelli possono ritenersi affidabili e utilizzabili per fare considerazioni. Quello che emerge è una situazione di instabilità della struttura dell'Hotel De la Poste e al manto stradale posto davanti ad essa, dovuto al fenomeno della consolidazione tuttora in atto. Gli spostamenti simulati dal modello non si avvicinano in tempi odierni agli spostamenti reali che avvengono nel cantiere ma confermano la loro presenza e il loro mutamento sempre maggiore nel lasso di tempo che verrà. Questo ci fa dedurre due ragionamenti; il primo è che, se il modello non ha calcolato gli stessi spostamenti che avvengono nella realtà dei lavori significa che ancora non si è a conoscenza dei reali parametri meccanici del suolo presente, anche se, essendo molto eterogeneo è pressoché impossibile poter prevedere il probabile comportamento nel suo complesso. Secondo l'importanza di poter avere un modello indicativo e previsionale delle zone critiche per programmare i lavori in sicurezza e senza successivi problemi legati all'instabilità. Quello che è emerso, in conclusione, ha permesso di ottenere informazioni molto utili che, saranno utilizzare dal personale competente che poi le utilizzeranno per effettuare le loro dovute considerazioni, così da prendere le corrette misure per tutte le successive fasi di lavorazione.



## **9- RINGRAZIAMENTI**

Un ringraziamento a tutti i collaboratori che, nonostante il loro lavoro, hanno trovato il tempo per svolgere la funzione di assistenza al mio progetto; un sentito ringraziamento va alle aziende operanti nel cantiere per la collaborazione di informazioni fornitemi, un particolare ringraziamento lo devo alla prof. ssa Simonetta Cola per avermi dato la possibilità di svolgere questo studio. Al dott. Alberto Bisson per la disponibilità e professionalità messa a disposizione. Ai responsabili tecnici per la parte sperimentale svoltasi in laboratorio. Infine, un particolare ringraziamento va alla mia famiglia per l'appoggio e il sostegno datomi.



## 10- BIBLIOGRAFIA

Panizza M., Spampani M., Zardini R., (1986) La grande frana su cui è sorta Cortina D'Ampezzo. Edizioni dolomiti cortina

Luis I. Gonzàles De Vallejo (2004) Geoingegneria. Pearson Prentice Hall ISBN 978-88-7192-094-8

Gasparetto P., Maceo G. A., Menotti R. M., Pasuto A., Silvano S., (1996) A visco-plastic model for slope analysis applied to a mudslide in Cortina d'Ampezzo, Italy. Quarterly journal of Engineering Geology, 29, 233-240

Siges srl, Geologia Applicata studio associato (2015) Relazione geologica sulle indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito