



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Edile

Mesh della Falesia di Ancona integrando tecniche geomatiche

Mesh of the Ancona cliff integrating geomatic techniques

Relatore:
Prof.ssa Eva Savina Malinverni

Tesi di Laurea di:
Valentina Pazzi

Anno Accademico 2019/2020

Indice

1. Introduzione	4
1.1 Stato dell'arte	4
1.2 Obiettivo e struttura della tesi.....	6
2. Caso studio	7
2.1 Caratteristiche geomorfologiche.....	9
3. Strumenti e tecniche di rilievo	14
3.1 Laser Scanning.....	14
3.1.1 Tipologie di Laser Scanner.....	15
4. Progettazione del rilievo	19
4.1 Primo Sopralluogo	19
4.2 Scelta dello strumento.....	22
4.3 Esecuzione del Rilievo.....	30
5. Processamento dei dati acquisiti	37
5.1 Software utilizzati	37
5.2 Creazione della <i>mesh</i>	39
Bibliografia.....	51
Sitografia	52

1. Introduzione

In questa tesi vedremo come l'uso integrato di tecniche geomatiche in campo geologico possa semplificare e velocizzare molto le operazioni di rilevamento e consenta l'elaborazione di modelli tridimensionali precisi, accurati e misurabili.

Negli ultimi anni la tecnica di digitalizzazione tridimensionale è andata progressivamente sviluppandosi, sia estendendo il proprio campo d'azione e sia migliorando le apparecchiature e i software necessari per il rilievo.

Tali nuove tecniche nel campo pratico hanno semplificato notevolmente le misurazioni poiché vengono effettuate dallo strumento senza la necessità di apporre sull'oggetto di studio alcun riflettore passivo, evitando così siti di difficile accesso e di una certa pericolosità. Questi strumenti geomatici (Sgrenzaroli M. et alii, 2007) consentono di ridurre i tempi di acquisizione in loco, di permettere il rilevamento di geometrie complesse, come in tale caso studio, e di ridurre la possibilità di errore o di dimenticanze durante il rilievo.

1.1 Stato dell'arte

Clerici et alii (2005) hanno affrontato in una loro pubblicazione come in ambito geologico-applicativo queste nuove migliorie possono permettere anche ad un geologo o ad una qualsiasi figura professionale di eseguire le misurazioni senza la presenza in fase di rilievo di un topografo esperto e di poter elaborare i dati con strumenti software di facile utilizzo.

Sempre in riferimento alle ricerche condotte da Clerici et alii (2005), grazie ai laser scanner 3D si possono indagare le principali caratteristiche geomorfologiche e geometriche dell'oggetto naturale e qualora di verificare e quantificare le variazioni che esso ha subito nel tempo.

Il rilievo geo-meccanico fornisce al geologo una serie di misure ed osservazioni geometriche, litologiche e tecniche dell'ammasso roccioso che consente la classificazione semantica di esso, necessaria da conoscere in qualsiasi problema applicativo. La tecnica del laser scanner consente di effettuare con velocità e con sufficiente precisione tutte le misure delle proprietà geometriche di un ammasso roccioso come la giacitura delle discontinuità, la spaziatura, l'intercetta, la forma delle discontinuità e il volume.

Tuttavia in alcuni casi come presenza di una notevole copertura vegetale il rilevamento laser va integrato con dati ottenuti da altri metodi di rilievo per ricoprire le zone ad esso non visibile.

Ad oggi questo metodo è stato impiegato in molti campi applicativi per quanto riguarda l'ambito geologico-applicativo:

- studio della caduta massi, sia per il rilievo delle condizioni geomeccaniche della parete rocciosa, sia per la simulazione delle traiettorie dei massi in caduta;
- nella conduzione dei rilievi geo-meccanici;
- rilevamento delle condizioni di gallerie, anche successivamente a dei crolli;
- nel rilievo di cave a cielo aperto, permettendo la quantificazione dei volumi estratti e la caratterizzazione degli ammassi da coltivare;
- negli studi glaciologici.

Nel caso del rilievo di scogliere sub-verticali questi sistemi risultano avere delle restrizioni tecniche come a causa del difficile accesso alla spiaggia, o dell'esposizione a nord che non permette una buona visibilità dei satelliti. Ossowski et alii (2018) affrontano nel loro articolo la possibilità di un nuovo approccio nel monitoraggio di una scogliera lungo la costa della Polonia, in particolare a Jastrzebia Gora. In questo studio hanno potuto registrare i dati 3D tramite TLS (Terrestrial Laser Scanner) dalla piattaforma di un watercraft in mezzo al mare, ciò ha permesso loro di creare un modello 3D della scogliera che poi hanno completare con le scansioni da terra. Una delle problematiche che hanno dovuto affrontare durante a scansione marittima è stata l'ondulazione del mare che se arriva ad un certo livello può avere effetti sfavorevoli sulla qualità dei risultati registrati; in questo tipo di scansioni le condizioni idrometeorologiche giocano un ruolo cruciale. Altro aspetto da tener in considerazione in questo tipo di lavoro è l'intensità della luce solare che durante il rilievo può incidere negativamente sulle scansioni di alcuni elementi dell'infrastruttura.

Lo stesso approccio è stato usato per monitorare l'instabilità delle alte scogliere in Normandia presso il comune di Dieppe; Michoud et alii (2014) hanno posizionato su di un peschereccio a largo dalla costa il sistema MLS (Mobile Laser Scanner) che è stato saldamente attaccato sulla nave in una posizione rilevante così da garantire una buona visibilità per le scansioni. La tecnologia MLS è risultata utile anche per effettuare un rilievo integrato nel completare la mappatura tridimensionale di una parete rocciosa sita a Cortes de Pallas, a Valencia (Di Stefano et alii, 2020), attraverso l'uso di un laser scanner montato su di un palo tenuto a mano e compiendo un percorso chiuso lungo la strada a ridosso della parete stessa.

Oltre al campo geologico-applicativo le nuove tecniche di rilevamento possono essere utilizzate anche in contesti antropici ad esempio per la digitalizzazione tridimensionale di siti del Patrimonio Culturale. Pierdicca et alii (2020) hanno dimostrato nello studio delle antiche mura urbane di San Ginesio (MC) come queste tecniche possano facilitare l'acquisizione di risultati molto accurati e completi per la modellazione 3D dell'oggetto in esame. I modelli 3D dell'oggetto di studio si sono rilevati molto utili per le future attività di analisi e restauro grazie alla loro precisione nell'acquisizione dei dettagli; dalla loro ricerca si evince che queste nuove tecniche possono aumentare l'efficienza delle strategie di conservazione e di monitoraggio.

1.2 *Obiettivo e struttura della tesi*

L'obiettivo di questa tesi si basa sul rilievo effettuato tramite laser scanner di una zona della falesia del Passetto (Ancona), soggetta a frequenti fenomeni di instabilità, per poi elaborare i dati acquisiti per la creazione di una *mesh* 3D. Tale rappresentazione tridimensionale sarà utile per analizzarne le caratteristiche geomeccaniche e i movimenti di versante che hanno interessato e tuttora interessano questa zona. Grazie a questo rilievo verrà quindi creata una *mesh* della porzione di parete di interesse della falesia che rappresenterà la base di lavoro di analisi geomeccanica da parte dei ricercatori del dipartimento SIMAU (UNIVPM).

La prima parte della tesi si è svolta con la ricerca della bibliografica necessaria per conoscere l'oggetto dello studio e la strumentazione che poi si andrà ad usare in loco per il rilievo mentre la seconda parte si è svolta in campagna attraverso due uscite: la prima per effettuare il sopralluogo e la seconda per eseguire il rilievo con l'attrezzatura prima descritta. In seguito, l'attività è proseguita in laboratorio dove grazie ad un software abbiamo potuto trattare le nuvole di punti 3D acquisite dal laser scanner per ottenere un modello tridimensionale dell'area in oggetto.

Il capitolo “Caso Studio” sarà dedicato alla descrizione della zona di interesse e delle sue caratteristiche geomorfologiche, derivate da uno studio approfondito della bibliografica raccolta; nei capitoli successivi verrà illustrata la strumentazione utilizzata in fase di rilievo, in primis il laser scanner con camera incorporata Riegl VZ-400i concesso dalla società MicroGeo srl e poi l'attrezzatura topografica (Stazione Totale e ricevitore GNSS) fornita dal dipartimento DICEA della Facoltà di Ingegneria (UNIVPM). Una volta ottenuti i dati del rilievo passerà alla fase di elaborazione dati che avverrà in laboratorio, dove una volta ottenute le nuvole di punti acquisiti dal laser scanner, grazie al software CloudCompare si potrà procedere con la creazione della *mesh* della Falesia del Passetto (Ancona).

2. Caso studio

Ancona è un comune italiano con più di 100 mila abitanti che si affaccia sul mar Adriatico e possiede uno dei maggiori porti italiani protetto dalla forma a “gomito piegato” del promontorio su cui la città sorge. L’aspetto caratterizzante di questo promontorio è rappresentato da questa alta costa rocciosa, definita come falesia, che separa il centro urbano dal mare. Tale falesia che si erge pressoché verticale e con quote dai 50 ai 100m slm, parte a sud dal promontorio del Monte Conero fino ad arrivare all’area portuale situata a nord. La zona di interesse, oggetto di tale lavoro di tesi, viene individuata nella porzione di falesia situata a ridosso del centro urbano in prossimità della zona costiera denominata “Grotta Azzurra” (Figura 1).

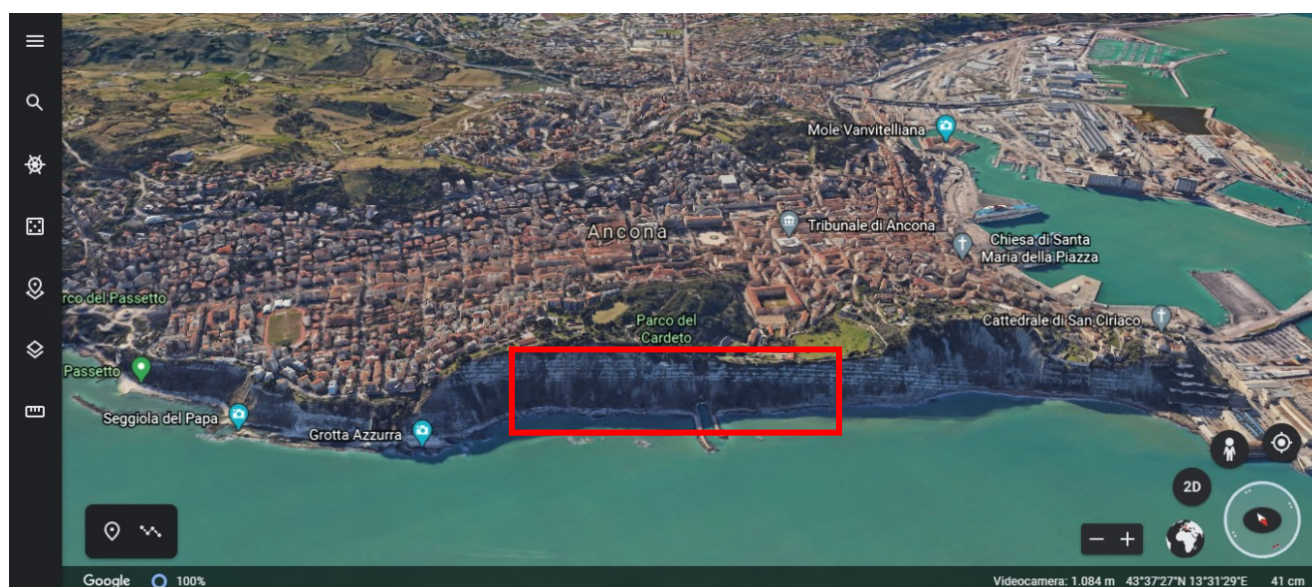


Figura 1 - Veduta aerea della città di Ancona e della sua falesia. Individuazione dell’area di interesse (Google Earth)

In Figura 1 possiamo individuare i luoghi di interesse del capoluogo marchigiano che sono situati in prossimità della scogliera:

- a sud il Passetto, monumento ai caduti della Prima guerra mondiale che si trova al termine del viale della Vittoria in Piazza IV Novembre ed è collegato alla spiaggia sottostante grazie ad un’ampia scalinata;
- il parco del Cardeto a picco sul mare è il più vasto parco della città, si estende in un’area di circa 35 ettari occupando le sommità dei colli Cappuccini e Cardeto. Comprende luoghi di valore storico tra cui il faro vecchio e il Bastione di San Paolo immersi nella natura.
- Il Duomo di San Ciriaco, chiesa medievale posizionata alla sommità del colle Guasco da dove domina tutta la città di Ancona e l’area portuale.

Spostando la nostra attenzione alla base della falesia possiamo notare la presenza opere di origine antropica, come il canale fognario delimitato dai due moli, alcuni stabilimenti balneari e zone costeggiate da siti privati chiamati “grotte” che si susseguono senza interruzione per un lungo tratto.



Figura 2 - Ingresso alla Grotta Azzurra, Parco Regionale del Conero, Ancona

Il sito in esame rientra nell’area protetta del Parco Regionale del Conero che prende il nome dall’omonimo monte attorno al quale si sviluppa per circa 6000 ettari comprendendo quasi tutto il suo promontorio, le aree verdi della città e si estende dal centro della città di Ancona fino alla foce del fiume Musone. È un’area naturale protetta istituita nel 1987 caratterizzata da ampi boschi sempreverdi, da scogliere a picco sul mare, da spiagge raggiungibili solo a nuoto o da impervi percorsi e da un’estesa zona collinare.

Inoltre il Parco del Conero racchiude al suo interno anche aree prettamente urbane, come i parchi pubblici all’interno del comune anconetano e di altri comuni limitrofi.

A nord comprende gran parte della fascia costiera del territorio comunale di Ancona, con il Passetto e le caratteristiche spiagge raggiungibili con ripidi sentieri come appunto quella della “Grotta Azzurra” mentre a sud il parco include l’intero massiccio del Monte Conero, sino ad arrivare a Sirolo e Numana. In Figura 2 viene mostrato il cartello che indica l’ultimo ingresso a mare nella parte nord della costiera del parco regionale, dove un percorso che costeggia la falesia scende fino alle famose grotte scavate nella roccia durante i secoli dai pescatori che abitavano in cima alla rupe (Figura 3).



Figura 3 - Panoramica della falesia in prossimità della Grotta Azzurra (Ancona)

2.1 Caratteristiche geomorfologiche

Il Monte Conero si presenta come una grande ellissoide, alto 572 m, con struttura asimmetrica: la morfologia del promontorio è strettamente legata alla tettonica; infatti si tratta di un'anticlinale, cioè una piega degli strati rocciosi con gli strati più antichi posizionati al nucleo, asimmetrica di direzione NW-SE. Il fianco orientale che scende ripidamente verso il mare è interessato da faglie e numerose superfici di discontinuità mentre il fianco occidentale del promontorio presenta una pendenza più dolce ed è interessato da una idrografia (Figura 4).

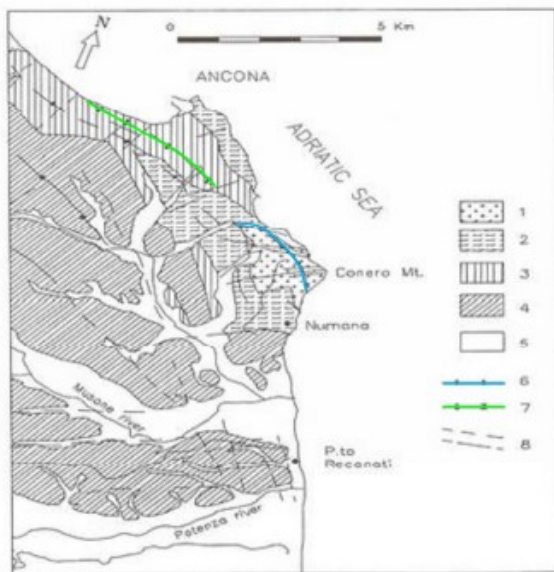


Figura 4 - Schema geologico del promontorio del Monte Conero

Schema geologico del M. Conero. 1) Formazioni cretacio-oligoceniche (dalla Maiolica alla Scaglia Cinerea); 2) Formazioni mioceniche (Schlier e Gessoso-Solfifera); 3) Depositi marnoso-argillosi e pelitico-arenacei del Pliocene medio ed inferiore; 4) Depositi marnoso-argillosi e sabbiosi del Pliocene superiore e Pleistocene; 5) Depositi continentali; 6) Anticlinali; 7) Sinclinali; 8) Faglie

Le unità litografiche che si possono individuare dal basso verso l'alto (Vivienne et alii, 2011) sono le seguenti:

- la Maiolica, le Marne a fuoidi e la Scaglia bianca appartenenti all'unità cronostratigrafica del Cretaceo; la Scaglia rosata all'Eocene; la Scaglia cinerea all'Oligocene;
- il Bisciario e lo *Schlier* appartenenti al Miocene;
- le Marne del Monte dei Corvi appartenenti al Miocene e al Pliocene inferiore; le Marne di Numana al Pliocene superiore;
- i depositi continentali recenti al Quaternario.

Il tratto di falesia preso in esame è caratterizzato da frequenti fenomeni di instabilità causati dalla scarsa resistenza della roccia presente, dall'elevata pendenza e anche dall'azione degli agenti atmosferici. Di conseguenza si possono notare lungo tutto il versante zone di distacco con successivo accumulo fino al livello del mare di materiale roccioso di grandi e piccole dimensioni.

Una delle cause principali di questi fenomeni franosi è la alta fragilità della roccia presente, lo *Schlier*. Questo tipo di roccia sedimentaria comprende calcari marnosi, marne e marne argillose grigie e bianche.

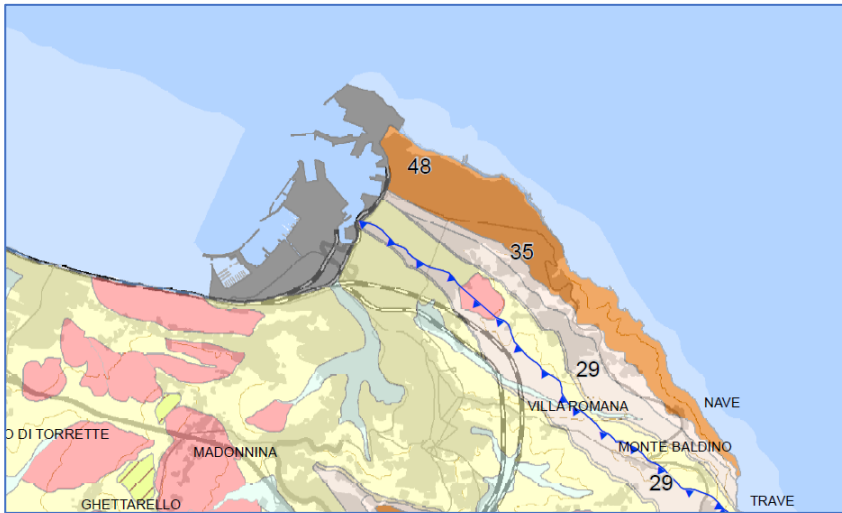
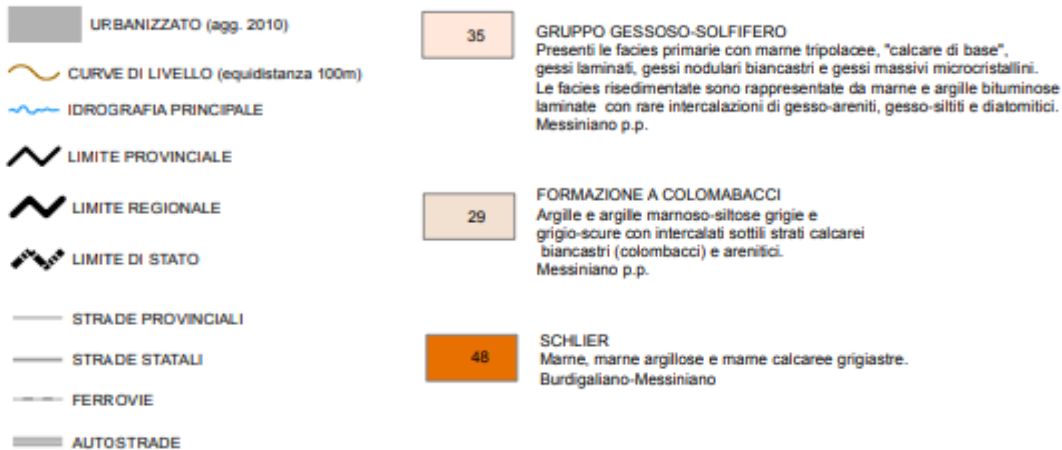


Figura 5 - Sezione geologica con corrispettiva legenda, estratta dalla Carta Geologica Regionale – sito Regione Marche

CARTOGRAFIA DI BASE



Nel dettaglio della cartina geologica delle Marche Nord (Figura 5) possiamo notare come la zona da noi osservata sia costituita soprattutto da rocce di tipo sedimentario come le Marne, in questo caso sia di tipo argilloso che calcareo.

Tutto il promontorio del Conero è interessato da fenomeni franosi; uno dei più famosi e che molti ritengono addirittura risalente alla preistoria è la frana nella maiolica, di svariati milioni di metri cubi, che ha determinato l'attuale configurazione della piana di Portonovo.

Il settore preso in esame è caratterizzato da una falesia piuttosto attiva, con coste rocciose a picco sul mare, al di sopra della quale si estende il vasto Parco del Cardeto. Negli anni lungo tutto il versante sono stati svolti numerosi studi della zona e sono state effettuate opere di consolidamento del versante anche perché ci troviamo in un'area interessata da frequenti eventi sismici.

I crolli di materiale lapideo hanno fatti sì che la parte superiore (che da una quota di 40m arriva a superare i 100m s.l.m.) abbia andamento pressoché verticale con un'inclinazione delle pareti di circa 70° mentre questa diminuisce nella parte inferiore a causa del formarsi di conoidi in cui si accumulano i detriti di frana e di erosione a granulometria più minuta.

La roccia alla base della falesia risulta facilmente erodibile per azione del mare che ne causa lo scalzamento al piede e l'innesco di fenomeni franosi di vario tipo. Insieme all'azione del mare anche le piogge intense ne favoriscono la progressiva instabilità a causa della mancanza di regimazione idraulica e dell'incoerenza del materiale di cui è composta.

Il motore principale di una frana è in primo luogo la forza di gravità ma altri fattori possono condizionare un pendio e predisporlo a fenomeni di instabilità e movimenti; infatti ruoli importanti li giocano gli agenti atmosferici le cui azioni possono portare alla saturazione del terreno o all'erosione superficiale, oppure le variazioni climatiche stagionali che possono indurre deformazioni e provocare fratture, la sismicità che può indebolire o fratturare la roccia, così come l'azione dell'uomo attraverso il disboscamento e l'agricoltura intensiva.

Per capire i fenomeni che interessano questo tratto di costa adriatica si può far riferimento alla classificazione delle frane di Varnes del 1978 (Tabella 1).

TIPOLOGIA DI MOVIMENTO		Tipo di materiale		
		terra (earth)	detrito (debris)	roccia (rock)
crolli (falls)		crolo di terra	crolo di detrito	crolo di roccia
ribaltamenti (topples)		ribaltamenti di terra	ribaltamenti di detrito	ribaltamenti di roccia
scivolamenti (slides)	rotazionali	scivolamenti rotazionali di terra	scivolamenti rotazionali di detrito	scivolamenti rotazionali di roccia
	traslativi	scivolamenti traslazionali di terra	scivolamenti traslazionali di detrito	scivolamenti traslazionali di roccia
espandimenti laterali (lateral spreads)		espandimenti laterali di terra	espandimenti laterali di detrito	espandimenti laterali di roccia
colamenti o flussi (flows)		colata di terra	colata di detrito	colata di roccia
frane complesse (complex)		combinazione di due o più tipo di movimento		

Tabella 1 - Classificazione delle frane di Varnes del 1978

Nelle Figure 6 e 7 si possono vedere alcuni esempi di frane presenti nel sito del rilievo:



Figura 6 - Distacco avvenuto in seguito ad una frana



Figura 7 - Zona franosa al di sopra dell'opera di fognatura

Un altro fenomeno da evidenziare che interessa la zona oggetto di studio è l'erosione (Figura 8), cioè l'asportazione di parte del suolo o della roccia a causa degli agenti atmosferici, come vento e acqua, o dei movimenti gravitativi o degli organismi viventi, per lo più vegetali, e in quest'ultimo caso si parla di bioerosione



Figura 8 - Esempi di bioerosione

Nella zona in esame si possono individuare anche delle fratture, si verifica quando la tensione supera la resistenza del corpo roccioso oltre il punto di rottura. Con il termine frattura si identifica una superficie lungo cui il materiale roccioso (o un qualsiasi materiale) ha perso di continuità.

Quando lungo una frattura non si ha il movimento delle due parti si parla di giunto o giunto di frattura, mentre se lungo una frattura si ha movimento dei due blocchi si ha una faglia.



Figura 9 - Famiglia di fratture sulla falesia al di sopra del canale

Nel dettaglio della Falesia (Figura 9) tra la vegetazione si possono vedere delle famiglie di fratture, rotture molto ravvicinate dove i blocchi rocciosi separati non sono interessati da spostamenti relativi. Qui si parla di litoclasti, distinta in diaclasi se le fratture sono di grandi dimensioni e in leptoclasti se invece la rottura risulta di modesta entità.



Figura 10 - Dettaglio della Falesia al di sopra del canale dove ci potrebbe essere una probabile faglia

Invece a destra della rete metallica (Figura 10) possiamo individuare una probabile faglia (Marini N., 2017) cioè una frattura dove i blocchi di roccia separati hanno subito un movimento relativo. Infatti il Monte Conero a causa di più fasi tettoniche (Aringoli D. et alii, 2014) è interessato lungo tutto il promontorio da faglie e fratture ad andamento oltre che appenninico, anche antiappenninico

3. Strumenti e tecniche di rilievo

La tecnica del laser scanning rappresenta un nuovo e valido metodo per la digitalizzazione e la modellazione tridimensionale di oggetti e di porzioni di territorio aventi qualsiasi forma e dimensione. L'uso di questi sistemi di rilievo geomatico permette di effettuare un'analisi veloce e precisa dello stato di fatto in vari campi di applicazione come architettura, archeologia, ingegneria, agricoltura, ambienti forestali e marini.

3.1 *Laser Scanning*

I laser scanner o laser 3D sono strumenti che consentono di acquisire in modo automatico e sistematico le coordinate spaziali di una data regione o della superficie di un oggetto. Questi strumenti trasformano l'energia (elettrica, ottica, chimica, termica o nucleare) in un fascio di radiazioni elettromagnetiche di intensità elevata; infatti il termine "L.A.S.E.R." è acronimo di: "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (Sgrenzaroli et alii, 2007).

Negli ultimi anni le applicazioni della tecnologia laser scanner hanno avuto una sperimentazione e uno sviluppo di grande interesse in campo geologico-tecnico; infatti attraverso strumenti informatici si possono indagare le principali caratteristiche geomorfologiche e geometriche dell'oggetto naturale ed eventualmente quantificare le variazioni geometriche occorse nel tempo.

Come primo risultato della misurazione si ottiene una descrizione dell'oggetto in esame tramite una nuvola tridimensionale di punti (*point cloud*) a cui, oltre alle coordinate spaziali di tali punti, viene in genere associato anche un valore di riflettanza. La riflettanza misura la capacità di riflettere parte del raggio laser incidente su una data superficie o materiale. Essendo il rapporto tra intensità del flusso radiante riflesso, e intensità del flusso radiante incidente, è una grandezza adimensionale il cui valore è legato alle caratteristiche del materiale di cui è costituita la superficie.

La registrazione dell'intensità dell'onda di ritorno della luce laser consente infatti di rilevare i valori di riflessività dei materiali, indicata con un coefficiente radiometrico (*Intensity at last pick point*), nonché di "leggere" anche le caratteristiche materiche di un oggetto, grazie alla differente risposta cromatica, in funzione della riflettanza dei singoli punti.

3.1.1 Tipologie di Laser Scanner

I vari laser scanner si differenziano in base alla tecnologia di emissione e ricezione di un raggio, di un fascio di luce o di un pattern luminoso. In base a ciò si distinguono due principali famiglie di scanner:

- Triangulation scanner

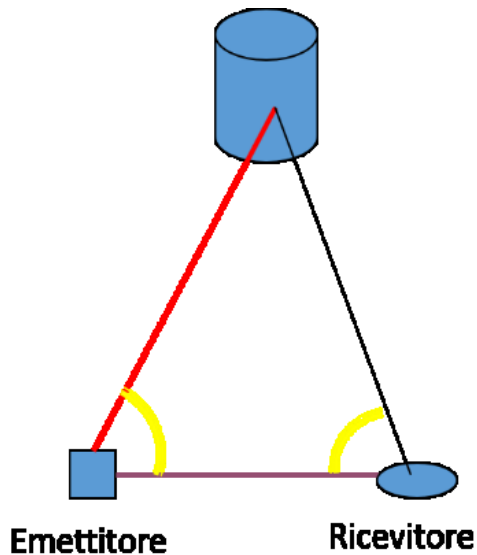


Figura 11- Principio intersezione triangolare

Il metodo risale al VI secolo a.C. (Talete). Noto un lato (x) e due angoli è possibile risolvere il triangolo e ricavare la distanza z : $z = x \cdot \tan \alpha$

Nei laser scanner a triangolazione il principio usato è quello di una intersezione triangolare tra emettitore-oggetto-ricevitore (Figura 11). Il dispositivo di emissione e quello di ricezione sono separati da una distanza fissa e calibrata e la posizione nello spazio di ogni punto rilevato, viene determinata grazie ad un calcolo trigonometrico. Poiché la distanza fra dispositivo di emissione e quello di ricezione è limitata, l'oggetto da rilevare deve essere posto a distanze molto piccole dallo strumento permettendo così una precisione sub millimetrica.

L'ambito di impiego di questa tecnologia è limitato a settori molto specifici e per manufatti di dimensioni non superiori a poche decine di centimetri come ad esempio la progettazione meccanica, oggettistica e la documentazione di piccoli manufatti (Figura 12).



Figura 12 - Esempio di applicazione laser scanner a triangolazione

- **Ranging scanner**

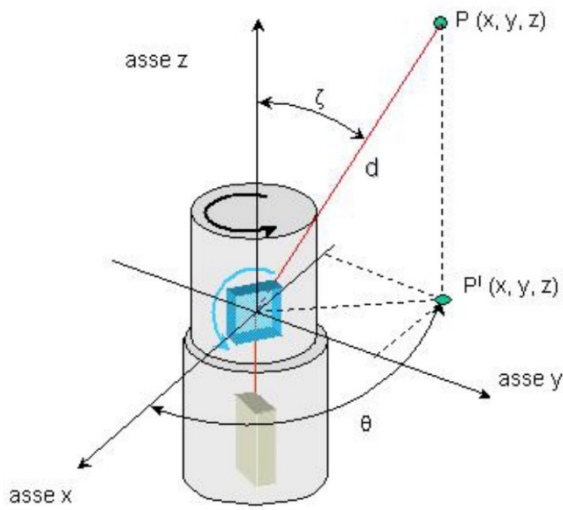


Figura 13 - La posizione del punto misurato è definita da coordinate polari, trasformate in coordinate cartesiane

Sono laser scanner distanziometrici che emettono un impulso laser verso l'oggetto (Figura 13). In questo caso la distanza tra trasmettitore e superficie riflettente è calcolata in base al tempo impiegato dal segnale tra l'emissione e la ricezione. Grazie alla tipologia di questi strumenti si possono raggiungere anche distanze elevate per effettuare un rilievo da un singolo oggetto ad una scena di grande scala come un contesto edilizio, urbano o ambientale. La precisione di questi dispositivi è di tipo sub centimetrica.

Questa tipologia di scanner si basa su due principi di funzionamento: TOF (*Time of Flight* - Tempo di Volo) o Differenza di Fase. Il metodo T.O.F (Figura 14) prevede dei raggi di luce estremamente corti emessi dallo strumento che, battendo contro l'oggetto del rilievo, ritornano all'origine. Calcolando la direzione angolare ad il tempo di ritorno del segnale, si ottiene la giusta coordinata del punto nello spazio.

La distanza tra emettitore e ricevitore si può calcolare con la formula:

$$\text{Distanza} = (\text{tempo di volo} \times \text{velocità della luce}) / 2$$

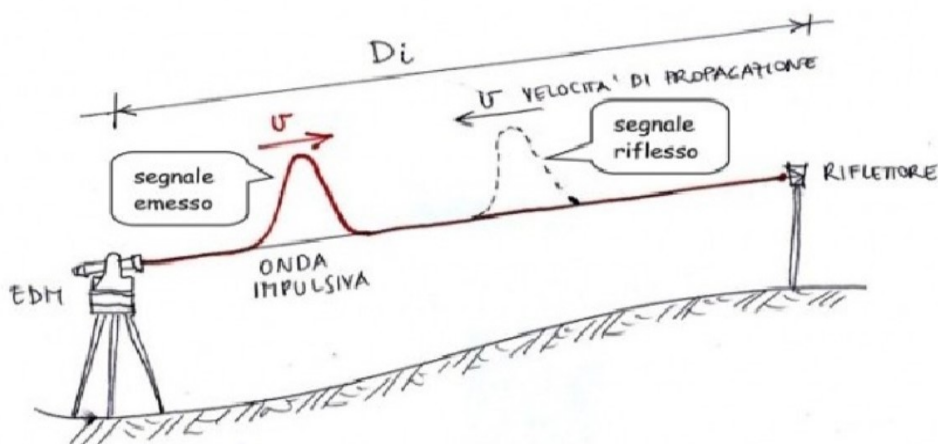


Figura 14 - Metodo Tempo di Volo

Rispetto ai distanziometri topografici gli scanner laser basati su TOF utilizzano sistemi per la deflessione del segnale che permettono piccolissime rotazioni ed utilizzano algoritmi semplificati per l'elaborazione del segnale di ritorno, questo però implica una minore accuratezza nel rilevamento.

Nei laser scanner a differenza (o modulazione) di fase il funzionamento si basa sull'emissione di una radiazione ottica con lunghezza d'onda corrispondente all'infrarosso vicino che viene modulata e trasmessa verso un prisma retro riflettore; quest'ultimo riflette una parte dell'onda verso l'apparecchio ricevente che calcola la distanza dall'oggetto come la differenza di fase tra l'onda emessa e quella ricevuta (Figura 15).

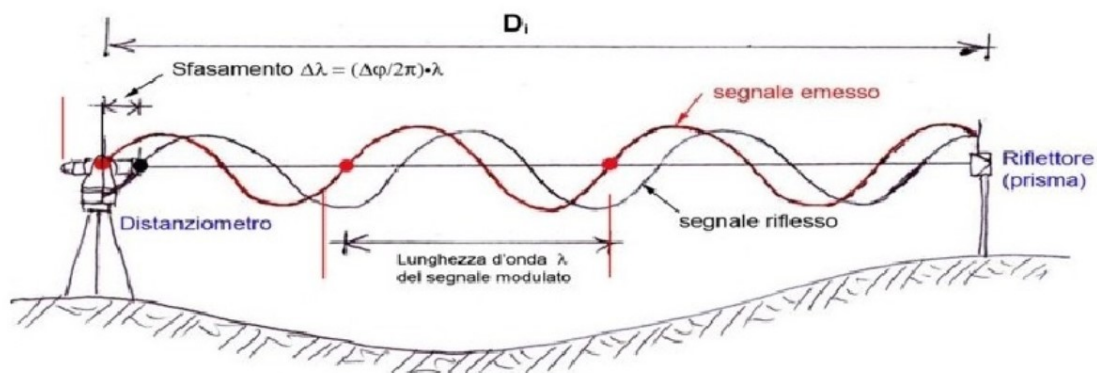


Figura 15 - Misurazione a modulazione di fase

Questo metodo permette di rilevare un oggetto con una maggiore velocità in proporzione al tempo impiegato per effettuare una scansione, ma il range di questi scanner ha una distanza limitata: arriva a un massimo di 60/80 metri.

La precisione nella definizione della distanza è maggiore rispetto ai laser scanner a tempo di volo, ma nel contempo la potenza del segnale luminoso di ritorno deve essere sufficientemente potente, caratteristica questa, che ne limita la portata.



Figura 16 – Esempio di Laser scanner a Tempo di Volo – Riegl VZ-400i



Figura 17 – Esempio di Laser scanner a differenza di fase – FARO CAM 2 Focus

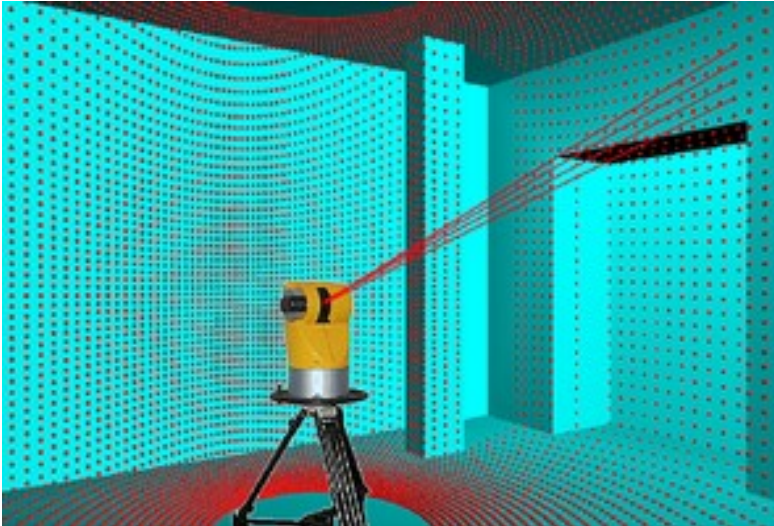


Figura 18 - Nuvola di Punti in fase di scansione

A seguito di una o più scansioni tramite laser scanner il risultato che si ottiene è una nuvola di punti (*point cloud*), cioè un insieme di punti che definiscono un modello tridimensionale dell'oggetto, o dell'ambiente rilevato, in cui sono note le coordinate di ciascun punto.

Più il tempo di acquisizione nella realizzazione della scansione è elevato, maggiore è la densità della nuvola che si ottiene, il numero dei punti e lo spazio presente tra i essi è proporzionale al tempo di acquisizione.

La nuvola dei punti è visibile tramite l'ausilio di un calcolatore elettronico che abbia un software che supporti i formati in cui viene salvata come *bin*, *e57*, *las*, *pts*, *ptx*, *txt*, *xyz* e *obj*.

I laser scanner terrestri (TLS), cioè che operano al livello del suolo si dividono in due gruppi: i laser scanner statici sono quelli che operano in una postazione fissa e sono suddivisi in base al range e i laser scanner dinamici che vengono usati in movimento.

I laser scanner dinamici quei laser scanner che consentono di realizzare nuvole di punti seguendo un tracciato o un percorso e di realizzare una mappatura continua e appunto in movimento che chiameremo *mobile mapping*. Dopo aver eseguito un rilievo in modalità «mobile» lo strumento laser scanner MLS memorizza in un'unica cartella di lavoro non solo la nuvola di punti totale realizzata, ma anche i punti che definiscono il tracciato effettuato per compiere tale rilievo in movimento.

Per quanto riguarda la precisione, stiamo parlando di laser scanner distanziometrici, quindi hanno entrambi una precisione sub centimetrica, ma un laser scanner statico garantisce l'ottenimento di una nuvola di punti più densa rispetto a quella di un laser scanner dinamico.

4. Progettazione del rilievo

4.1 *Primo Sopralluogo*

Con la parola sopralluogo si intende la visita o l'insieme di visite necessarie per esaminare l'oggetto di studio su cui poi si dovranno effettuare misure e rilievi necessari all'analisi o allo sviluppo di un progetto futuro.

In data 29 luglio 2020 è stato effettuato il primo sopralluogo nella zona di interesse per verificarne l'accessibilità e capire come poter effettuare il rilievo con il laser scanner e valutare la scelta della tipologia di *ranging* scanner da utilizzare. Il sito della “Grotta Azzurra” si trova ai piedi del Parco del Cardeto ed è accessibile a piedi, prendendo il sentiero che parte da via Panoramica, oppure via mare. Si accede tramite un percorso ripido che costeggia la falesia, fino a scendere alle famose grotte scavate nella roccia. Superate tutte le “grotte” tramite un piccolo sentiero (Figura 19) attraverso la vegetazione ci troviamo nel luogo oggetto di studio, dove è situata un'opera antropica di fognatura delimitata da due moli (Figura 20).

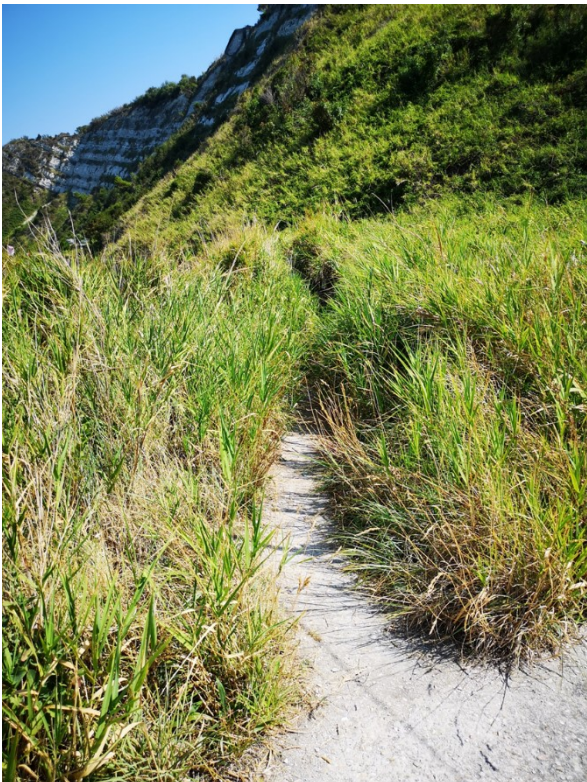


Figura 19 - Foto del sentiero che conduce alla zona di studio

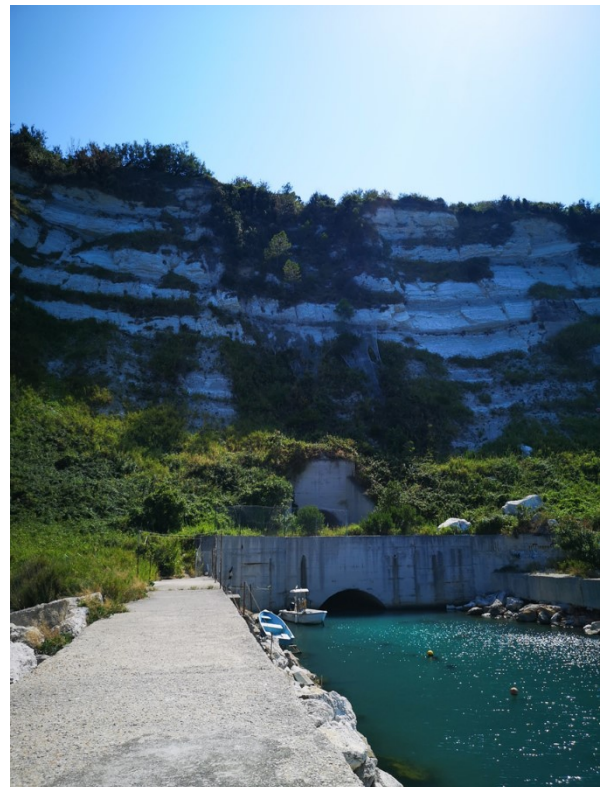


Figura 20 - Veduta dal molo del canale e della falesia sopra di esso

In questa prima indagine si è pensato di poter procedere con l'esecuzione del rilievo sfruttando i due moli come punti di postazione da cui poter effettuare il rilievo e le misurazioni con il laser scanner (Figura 21).

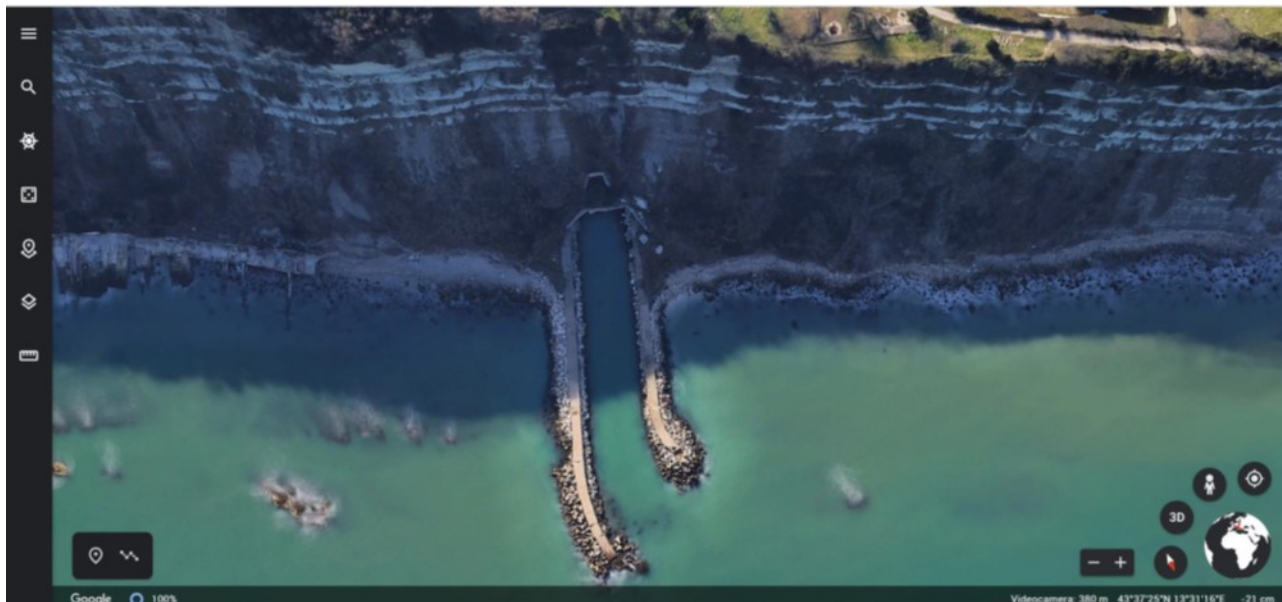


Figura 21 - Veduta dall'alto dei due moli

La scelta della postazione in cui verrà collocato il laser è importante per la buona riuscita della scansione; grazie ai moli in questo caso si può eseguire il rilievo 3D ad una certa distanza dalla scogliera per garantire maggior ampiezza e apertura nel coprire tutta la zona da rilevare.

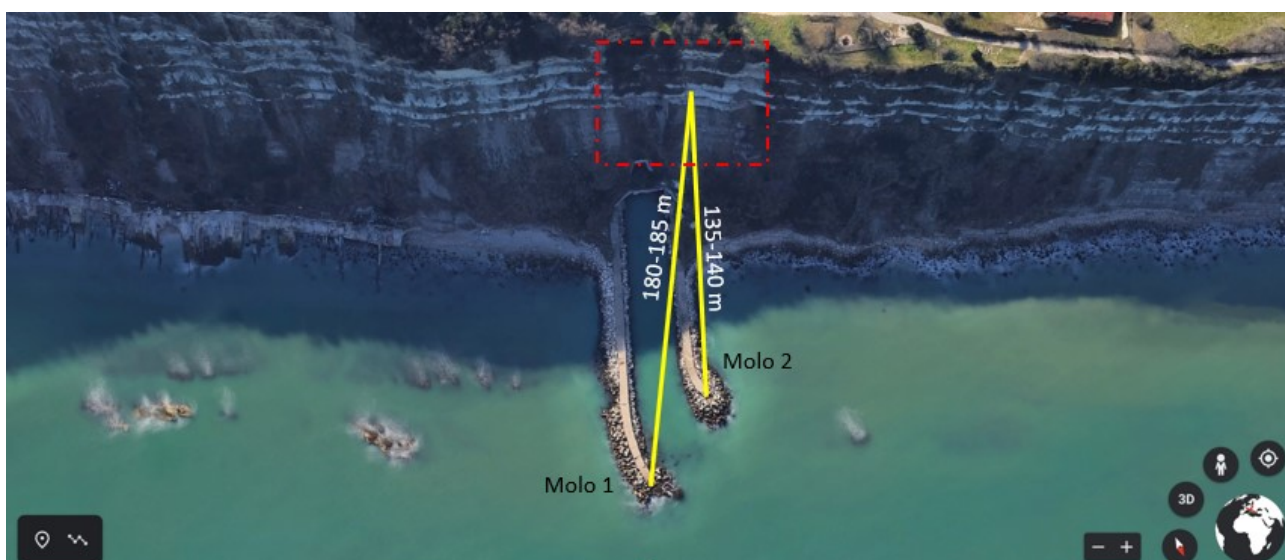


Figura 22 - Calcolo distanza tra le estremità dei moli e falesia

Calcolare la distanza dalle estremità dei moli alla falesia (Figura 22) è risultato molto importante per capire quale laser scanner utilizzare in fase di rilievo, poiché come abbiamo visto nel capitolo “[Tipologie di strumenti](#)” non tutti i sistemi ricoprono grandi distanze.



Figura 23 - Angolazione campo visivo

In Figura 23, in base alle possibili postazioni del laser scanner, sono state evidenziate le diverse angolazioni per capire il tipo di campo visivo che si dovrà impostare in fase di rilievo.

Durante questa operazione preliminare di analisi del sito è stata eseguita una documentazione fotografica che non solo illustri le superfici su cui poter appoggiare lo strumento di rilievo ma anche la descrizione del sito e le condizioni attuali della porzione della falesia soprastante l'opera antropica, oggetto di studio di questa tesi, caratterizzata da pareti molto ripide e da evidenti distaccamenti di roccia che sono arrivati fino alla zona balneare in prossimità del canale.

4.2 Scelta dello strumento

Ad oggi le diverse tipologie di laser scanner in commercio presentano differenze nelle accuratezze di misura, nella distanza nelle modalità di acquisizione, nella risoluzione della nuvola di punti.

Per questo la scelta dello strumento viene effettuata in base alle esigenze di utilizzo e facendo riferimento a molteplici caratteristiche, quali:

- *accuratezza*

Tale caratteristica fondamentale nel caso del rilievo architettonico o industriale, dove anche i piccoli dettagli sono importanti, per rilevamenti ambientali non risulta essere fattore determinante poiché la qualità nell'acquisizione della nuvola di punti è influenzata da caratteristiche intrinseche all'oggetto rilevato e dalle condizioni ambientali.

I laser scanner sono prodotti in serie piuttosto limitati, la stessa accuratezza può variare da strumento a strumento, a causa di differenze nell'eseguire la calibrazione iniziale in fase di produzione.

Accuratezza angolare: Attraverso la conoscenza degli angoli di rotazione nelle due direzioni (orizzontale e verticale) associata alla misura del range, si può risalire alla posizione del punto nello spazio.

Ogni deviazione angolare corrisponderà ad un errore di posizionamento.

Accuratezza nella misura delle distanze: In base al range di acquisizione, l'accuratezza nei *ranging scanner* varia in modo lineare invece nei *triangulation scanner* assume un andamento parabolico.

- *velocità di acquisizione*

Ogni singola scansione può durare da un minimo di qualche secondo fino ad alcune decine di minuti. Ciò dipende dal campo visivo di acquisizione, dal passo angolare, dal principio di misura del range dalla distanza dell'oggetto, dalla velocità dei sistemi meccanico-ottici di puntamento e deflessione.

- *range di misura*

Si intende la distanza massima a cui il sensore può effettuare la misura.

La portata dei laser scanner in commercio va attualmente da alcune decine di centimetri ad alcune centinaia di metri e dipende, dalle caratteristiche del segnale emesso, dalla direzione che segue il raggio laser per colpire la superficie dell'oggetto e, soprattutto, dalle caratteristiche di riflettività della superficie.

Durante le operazioni di rilievo possono presentarsi condizioni di disturbo e interferenze che possono ridurre o compromettere l'intensità del segnale di ritorno allo strumento, e questo può avvenire: in presenza di sorgenti luminose artificiali, luce solare e altre radiazioni luminose prodotte dal riflesso di oggetti vicini, come nel caso di materiali con elevato potere radio-assorbente.

Anche le condizioni d'umidità della superficie possono causare una forte dispersione del segnale e quindi la sua conseguente riduzione di intensità.

- *risoluzione*

Con questo termine si esprime la densità di punti di un range tridimensionale generato dallo strumento laser, e di conseguenza lo spazio che intercorre tra un punto misurato e quelli adiacenti in funzione della scelta dell'operatore e della distanza di acquisizione.

La risoluzione può quindi essere definita come la capacità di rilevare e rappresentare oggetti di dimensioni minime sull'oggetto analizzato e dipende dalle caratteristiche meccaniche e ottiche dello strumento.

- *campo visivo dello strumento*

Ad oggi i laser scanners in commercio possono essere suddivisi in 3 gruppi in base al campo visivo (figura 24) di cui sono dotati: Camera Scanner con un ridotto campo visivo sono pratici per utilizzi legati al rilevamento ambientale, e quindi per scansioni di superfici situate a lunga distanza; Panorama Scanner hanno una visuale sferica con campo visivo quasi sferico limitato unicamente dalla base dello strumento, si prestano molto bene alla scansione di ambienti interni di edifici; scanner ibridi che adottano una soluzione intermedia e possono compiere rotazioni complete solamente attorno ad uno degli assi mentre attorno al proprio asse sono limitate entro i 60-70 gradi.



Figura 24 - Campi visivi nelle diverse tipologie di laser scanner

- dotazione di camere digitali interne od esterne
- facilità di trasporto
- tipo di alimentazione
- qualità del software d'acquisizione

Tra le strumentazioni pensate inizialmente per questo rilievo c'erano il MLS KAARTA Stencil 2 e il TLS FARO CAM 2 Focus. A seguito del sopralluogo si è ritenuto opportuno scegliere della attrezzatura con una maggiore portata; per questo si è optato per il laser scanner RIEGL VZ-400i. Analizziamo gli aspetti di questi laser scanner per meglio spiegare la scelta dello strumento più idoneo al nostro contesto di rilievo.



Figura 25 - KAARTA Stencil 2

Il primo strumento si tratta del KAARTA Stencil 2 (figura 25) che è una piattaforma di mappatura mobile flessibile e operativo per una rapida scansione mobile; è dotato di un computer abbastanza piccolo da stare in mano ma abbastanza potente per elaborare e visualizzare tutti i dati che cattura.

Il KAARTA Stencil 2 ha una componente LIDAR che è rappresentata da un Velodyne dotato di un fascio di 16 raggi laser che opera in un campo visivo di tipo ibrido, 360° attorno all'asse y e con un'apertura azimutale di 30°.

Raggiunge una distanza di range di massimo 100 metri. L'accuratezza del laser varia di ± 30 mm, la sua velocità è elevata: di 300.000 punti al secondo. È capace di mappare e localizzare in tempo reale la scena rilevata in un sistema di riferimento locale senza l'uso di un GPS inoltre è dotato di un componente di tracciamento che registra il percorso effettuato durante un'operazione di rilievo (*loop-closure*) (Di Stefano et alii, 2020). Questo laser scanner mobile ha un peso leggero, di 700 grammi e questo consente di poter adottare qualsiasi tipo di piattaforma: su di un palo tenuto a mano, montato su un veicolo o integrato ad un sistema UAV (Unmanned Aerial Vehicle), cioè un drone. È usato principalmente per rilievi indoor, ma si è rivelato utile usarlo anche in luoghi all'aperto o di difficile accesso con gli altri strumenti come il laser scanner statici o droni. Grazie alla versatilità dello strumento è stato possibile effettuare rilievi complessi e di lungo tragitto come quello del rilievo delle facciate delle mura urbane di San Ginesio (MC) (Pierdicca et alii, 2020) o quello dell'Anfiteatro di Ancona (Malinverni et alii, 2018). In quest'ultimo caso il KAARTA è stato utile nel rilevare in poco tempo l'intera area interna ma ha permesso anche di acquisire anche gli accessi voltati all'arena. Un altro caso studio, citato in precedenza, è stato quello di effettuare una mappatura di parte del pendio roccioso ai piedi di un bacino idrico nei pressi di Cortes di Pallas, a Valencia (Di Stefano et alii, 2020) dove è stato possibile ottenere un modello 3D compiendo un percorso lungo la strada che costeggiava tale parete rocciosa.

Per questa tipologia di rilievo si era pensato di usarlo compiendo un percorso a piedi lungo l'arenile ai piedi della falesia stessa. Tale soluzione risultava ottimale nel poter rilevare l'intera falesia in poco tempo, ma alcune limitazioni hanno fatto declinare

questa opzione. La presenza di una fitta vegetazione ai piedi della falesia non avrebbe garantito un rilievo completo e dettagliato della parete rocciosa e inoltre il range operativo del KAARTA non avrebbe ricoperto in altezza l'intero oggetto da rilevare.



Figura 26 - FARO CAM 2

Il secondo strumento messo a disposizione è stato il FARO CAM2 Focus 70 (figura 26), un *ranging* scanner a modalità differenza di fase. Tale serie di Laser Scanner Focus offre la massima precisione e portata fino a 70 m, con un'accuratezza di ± 1 mm, al contrario delle versioni Focus 150 o Focus 350 che riescono a raggiungere rispettivamente fino a 150 m e 350 m. Documenta ogni scena o sito in pochi minuti, che sia all'interno o all'esterno, in pieno sole o al buio, fino a catturare 976.000 punti/secondo. Con un peso di soli 4,2 kg, il laser scanner Focus è estremamente mobile e portatile. Questo modello registra le immagini HDR, cioè *high*

dynamic range (elevata gamma dinamica) ed è una tecnica per acquisire immagini con più velocità di esposizione e fonderle in un unico livello di immagine HDR. Questo tipo di immagine fornisce dettagli aggiuntivi in aree scure o chiare, che sarebbero andati persi in un'immagine standard e vengono mappate sui dati delle nuvole di punti generati dal laser scanner.

Nonostante l'elevato numero di dati capace di acquisire, il basso raggio di azione di tale laser scanner non avrebbe soddisfatto i requisiti di distanza nel poter garantire una completa copertura della porzione di falesia. Le soluzioni Focus 150, o meglio quella Focus 350, sarebbero risultate più adatte al contesto come descritto nel caso studio dell'analisi di stabilità delle pareti rocciose in tufo (Torok e Lovas, 2016), dove lo strumento posto ad una distanza ravvicinata ha permesso di ottenere una rappresentazione dettagliata delle caratteristiche geometriche dei blocchi di pietra.

A seguito di questa analisi critica degli strumenti proposti appena descritti, si è optato per un laser scanner più potente che potesse raggiungere distanze elevate e garantire precisioni e accuratezza migliori per la rappresentazione tridimensionale della falesia: il Riegl VZ-400i.



Figura 27 - 3D Riegl VZ-400i

Il Riegl VZ-400i (Figura 27) è un sistema attivo a tempo di volo (TOF) che permette l'acquisizione dei dati, la georeferenziazione simultanea, il filtraggio e l'analisi in tempo reale. Questo modello è fornito di una camera incorporata, un sistema GNSS, modem 3G / 4G LTE integrato, Wi-Fi e hardware per comunicazioni Ethernet.

Viene fornito un flusso di dati in tempo reale attraverso due piattaforme di elaborazione: una si occupa di elaborazione dei dati di scansione e dati di immagine acquisiti in simultanea, di elaborazione delle forme d'onda e delle operazioni di sistema, e una seconda piattaforma di che consente la registrazione automatica a bordo, la georeferenziazione e l'analisi da eseguire in parallelo.

Il Riegl VZ-400i grazie al suo sensore di orientamento integrato può essere utilizzato in molti ambienti e orientamenti, inoltre offre un'ampia gamma di flessibilità grazie al supporto di numerose periferiche e accessori esterni tramite le sue porte USB integrate e punti di montaggio stabili.

Laser Pulse Repetition Rate PRR (peak)	100 kHz	300 kHz	600 kHz	1,200 kHz
Max. Effective Measurement Rate (meas./sec)	42,000	125,000	250,000	500,000
Max. Measurement Range ($\rho \geq 90\%$)	800 m	480 m	350 m	250 m
Max. Measurement Range ($\rho \geq 20\%$)	400 m	230 m	160 m	120 m
Minimum Range	1.5 m			
Accuracy / Precision	5 mm / 3 mm			
Field of View (FOV)	100° vertical / 360° horizontal			
Eye Safety Class	Laser Class 1 (eyesafe)			
Main Dimensions (width x height) / Weight	206 mm x 308 mm / 9.7 kg			

Figura 28 - Ulteriori caratteristiche che si possono trovare negli odierni Riegl VZ-400i

Tra le caratteristiche principali troviamo (Figura 28):

- Elevata frequenza di ripetizione degli impulsi laser fino a 1,2 MHz
- Acquisizione dati ad alta velocità fino a 500.000 misure/sec
- Ampio campo visivo, 100°x360°
- Portata fino a 800 m, precisione 3 mm
- Elevata accuratezza
- Alta precisione che varia in base alla digitalizzazione dell'eco, all'elaborazione online della forma d'onda e all'elaborazione multitempo intorno all'onda.

L'acquisizione delle scansioni può essere eseguita in remoto tramite interfacce LAN/WLAN oppure in loco comandata direttamente attraverso una tastiera ed un display integrati nello strumento, con la possibilità di memorizzare i dati nella memoria interna (8GB) oppure connettendo allo strumento un qualsiasi supporto di memoria (chiave USB).

In loco il Riegl VZ-400, il cui peso si aggira sui 13 kg, è stato posto su un treppiedi. Inoltre il sistema è dotato di fotocamera reflex agganciata sulla sommità del laser che consente l'acquisizione simultanea di immagini e dati di scansione, di un GPS mono frequenza interno per la georeferenziazione simultanea in tempo reale, di piattaforma inerziale che mi consente di calcolare rollio e beccheggio e di una bussola magnetica



Figura 29 - Software RiSCAN PRO

La stessa azienda produttrice Riegl ha inoltre sviluppato un software in dotazione al laser scanner chiamato RiSCAN PRO: un software per il controllo dello strumento e per la post elaborazione dei dati.

Tramite GPS, riflettori e bussola magnetica, RiSCAN PRO utilizza i più avanzati algoritmi per la georeferenziazione mentre per una visualizzazione ottimizzata e per l'estrazione delle informazioni dalla nuvola di punti 3D utilizza moduli VIEW/INSPECTOR. L'Interfacciamento è facilitato e diretto con i più comuni software di post elaborazione e l'archiviazione dati viene eseguita usando una ben documentata struttura ad albero in formato XML.



Figura 30 - Fotocamera posta sopra al laser scanner

Una fotocamera digitale metrica posizionata sopra il laser scanner (Figura 29) è uno strumento opzionale che fornisce immagini ad altissima risoluzione e in fase di rilievo nuvole di punti colorate aggiungendo agli altri parametri anche la componente RGB. Può essere di diverse aziende con sensori full frame da 12.2 Mpx o superiori aggiornabili; inoltre si ha la possibilità di cambiare l'obiettivo fotografico per avere migliori risultati a seconda delle applicazioni: si potrà utilizzare un 14 mm per le architetture o gli interni oppure un 85 mm per le scansioni a distanza di centinaia di metri in ambito geologico.

Il supporto per la fotocamera professionale consente un posizionamento molto accurato in asse con il sistema di riferimento dello scanner. Tramite i parametri di orientamento esterno della fotocamera, è possibile ottenere immagini georiferite in automatico sulla scansione.

Alcune attività di ricerca documentate in letteratura confermano l'ottima prestazione in qualità di distanza di acquisizione, precisione e accuratezza dei dati di questo laser scanner. Si vedano per esempio i risultati ottenuti nell'utilizzare il Riegl VZ-400i nel rilevare ambienti complessi e vasti sia sotterranei e indoor come quello delle Grotte di Castellana, in Puglia o contesti ambientali all'aperto, simili al caso studio, come quello della falesia in località Santa Caterina, nella costiera amalfitana (Pagano et alii, 2020).

Riassumendo tutte le caratteristiche dei tre laser scanner a disposizione sono state messe a confronto nella seguente tabella (Tabella 2)

Data	Riegl VZ 400i	KAARTA Stencil	FARO CAM2
Range	800m (100kHz)	100m	70m (max350m)
Campo Visivo	360°x100°	360°x30°	360°x300°
Precisione	±3mm	3 cm	± 1 mm
Tipo di dati	Punti + immagini	Punti	Punti+ immagini
Georeferenziazione	si	no	si
RGB	si	no	si
Real_time	no	si	no
Punti acquisiti	500k punti/s	300k punti/s	976k punti/s
Computation time	alto	basso	alto

Tabella 2- Differenze tra i diversi tipi di laser scanner

4.3 Esecuzione del Rilievo

In data 2 ottobre 2020 è stata effettuata l'uscita per il rilievo con tutta l'attrezzatura prevista. Abbiamo percorso lo stradello che inizia dal giardino pubblico in via Panoramica fino alla base della falesia.

Superate tutte le grotte private abbiamo raggiunto il primo molo dove grazie alla buona visibilità della falesia si è potuto montare il TLS Riegl VZ-400i (Figura 31) per effettuare la scansione a nuvole di punti 3D.



Figura 31 - Foto del laser scanner in fase di rilievo

Una volta individuata la porzione della falesia da rilevare sono stati posti 8 target ben visibili caratterizzati da cerchi biadesivi con un diametro di 5 cm, che hanno una riflettanza tale da essere riconosciuti dal laser scanner (Figura 32). La riflettanza è un parametro importante in una scansione laser poiché se maggiore sarà l'intensità del segnale riflesso dalla superficie colpita allora maggiore sarà la portata che il laser potrà avere.

Gli otto target sono stati posti in punti ben visibili al laser scanner, sei sul muretto e sui pali della rete metallica al di sopra del canalone mentre uno su una roccia situata sul secondo molo e l'ultimo vicino alle grotte dei pescatori.



Figura 32 - Dettaglio di un Target posto sulla recinzione al di sopra del canale

Il tecnico della società Microgeo che ha messo a disposizione, con la nostra supervisione, lo strumento, ha iniziato con una scansione veloce da 1200 kHz (*laser pulse repetition rate*) ad ampio raggio selezionando una zona ristretta per la fotocamera, seguita da un'altra scansione da 300 kHz di durata circa 13 minuti. Completato questo secondo rilievo si è deciso di rivolgere il laser scanner verso una zona specifica dove sono state riscontrate delle problematiche. In questo caso è stata impostata una scansione molto fitta e dettagliata di durata circa 19 minuti.

In corrispondenza dei target sono state effettuate delle scansioni locali ad alta risoluzione in modo che risultassero descritte da un numero elevato di punti e la posizione del centro fosse ben individuabile; nelle nuvole di punti rilevate i target verranno identificati come cerchi bianchi grazie all'elevato valore di riflettanza delle loro superfici.



Figura 33 - Postazioni del laser scanner Riegl in fase di rilievo

Successivamente il laser scanner è stato spostato in una seconda postazione dove sono state compiute scansioni plurime variando la risoluzione delle acquisizioni: in primo luogo, è stata eseguita una scansione a maglia larga al fine di ottenere un file facilmente gestibile ed un controllo immediato del campo di rilievo, e in seguito sono state compiute diverse scansioni a maglia progressivamente più fitta di zone di maggiore interesse.

Sono state effettuate due gruppi di scansione (Figura 33). Le nuvole ottenute da queste scansioni sono costituite da milioni di punti, in particolare:

- dalla prima postazione:

	n° di punti
Scansione a colori	8.949.094
Scansione laser scanner	15.969.493
Nuvola di punti densa del dettaglio	30.209.832

- dalla seconda postazione:

	n° di punti
Scansione a colori	8.044.651
Scansione laser scanner	14.800.397
Nuvola di punti densa del dettaglio	8.985.645

Rilievo Topografico

Oltre alle scansioni acquisite dal laser scanner, è stato effettuato un rilievo topografico per la georeferenziazione dei target. Questa operazione consente di geolocalizzare l'oggetto rilevato in un sistema di riferimento geografico noto.

Mentre il laser scanner effettuava le scansioni sono state installate le altre strumentazioni.

- **LA STAZIONE TOTALE “TOPCON GPT 7000”**

La **stazione totale**, evoluzione del teodolite integrato con un distanziometro, misura gli angoli azimutali o orizzontali, gli angoli zenitali o verticali e le distanze.

Il sistema presenta alla base tre viti calanti che rendono orizzontale il piano di rotazione dello strumento e le due livelle sferica, per approssimare l'orizzontalità del piano, e torica, per le regolazioni di precisioni.

Per stabilizzare la stazione totale al suolo viene installata su un treppiede in una posizione dove si ha una buona visuale; guardando dentro il cannocchiale con il mirino interno dello strumento si inquadra il punto da battere di cui il distanziometro registra la misura. La misura si può fare con o senza un prisma riflettente, un oggetto a specchio che riflette il raggio laser del distanziometro integrato. Per usare il prisma, mentre il topografo prende la misura dalla stazione totale, abbiamo bisogno della figura del “canneggiatore” che si sposta lungo la zona di studio con il prisma posto su un bastone graduato e lo posiziona sui punti da rilevare (Figure 34 e 35).

La stazione totale misura il tempo necessario al raggio emesso dal distanziometro per colpire il bersaglio e poi tornare indietro calcolando così la distanza. Usare il prisma permette misure più precise oltre che raggiungere distanze maggiori rispetto alle misure senza prisma.



Figura 35 – Target usato per il rilievo

Figura 34 - Foto della Stazione Totale

DATI TECNICI	GPT-7001	GPT-7002	GPT-7003	GPT-7005
CANNOCCHIALE				
Ingrandimenti			30x	
Campo visivo			1°30'	
Fuocamento minimo			1,3 m	
Illuminazione reticolo			Si	
MISURAZIONE DISTANZE (P)				
Con 1 Prisma			3000 m	
Precisione			±(2 mm + 2 ppm x D) s.q.m.	
Letture minima			Fine: 0,2 mm; Normale/Veloce: 1 mm; Tracciamento: 10 mm	
Tempo di misurazione			N. volte/Ripetizione/Singola: 1,2 sec.; Veloce: 0,5 sec.; Tracciamento: 0,3 sec.	
MISURAZIONE DISTANZE (NP)				
Portata			1 ~ 250m	
Precisione senza prisma			5mm	
Classe laser			1	
MISURAZIONE ANGOLI				
Precisione (DIN 18723)	1" (0,3mgon)	2" (0,6mgon)	3" (1,0mgon)	5" (1,5mgon)
Letture minima	0,5" (0,1mgon)			1" (0,2mgon)
COMPENSATORE				
Tipo			Bissiale	
Campo			±4'	
PIOMBO OTTICO				
Ingrandimenti			3x	
Campo visivo			4°	
DISPLAY				
LCD			Display grafico retroilluminato TFT a colori, 3,5"	
Posizione			Su 2 lati	Su 1 lato
ALTRO				
Memoria interna			128Mb	
Punto guida			Si	
Temperatura d'esercizio			-20° ~ +50°C	
Protezione ambientale			IP54	
Dimensioni in mm		343 (H) x 245 (La) x 219 (Lu)		199 (Lu)
Peso (batteria inclusa)		6,3 Kg		6,2 Kg
BATTERIA BT-61Q				
Durata (n. 2 in dotazione)			Misurazione continua in angoli e distanze: 5 ore cad.	
Carica batteria BC-30			Tempo di ricarica: 4 ore (funzione di scarica)	

Figura 36 - Caratteristiche tecniche GPT-7000

La serie GPT-7000 (Figura 36) è in grado di effettuare misure senza prisma con una portata di 250m ed è progettata per fornire misure precise ed affidabili anche in situazioni operative difficili come, ad esempio, pareti scure, rugose ed inclinate. Utilizza un laser invisibile di “Classe 1” (normativa IEC 60825-1) per la misurazione delle distanze, ed un puntatore laser visibile di “Classe 2” per identificare il punto da misurare.

- **Ricevitore GNSS TOPCON HiPer HR**

Un ricevitore GNSS (Global Navigation Satellite System) viene posizionato sul cavalletto e poi collegato ad una connessione dati; il topografo con il suo ricevitore GPS si sposta sul punto che vuole rilevare, registrando così la sua posizione poi si sposta sul punto successivo e di nuovo registra la sua collocazione.

Il GPS comunica con i satelliti nello spazio che trasmettono sotto forma di segnali radar la sua posizione sulla Terra e le coordinate dei punti rilevati vengono prese nel sistema di riferimento globale *WGS84*; in questo modo si conoscono latitudine, longitudine e quota di ogni coordinata rilevata.

Nel nostro caso abbiamo rilevato sia con la stazione totale che con il ricevitore GNSS (Figura 37 e 38) i punti in cui erano stati posizionati i target del laser scanner e tutta l'attrezzatura usata.



Figura 37 - Foto del ricevitore GNSS usato



Figura 38 - Foto dell'attrezzatura

Durante questo rilievo topografico la stazione totale e il GPS sono stati collocati sul primo molo (figura 39). Una volta agganciati i sistemi al treppiede sono state registrate le posizioni dei target usati e anche le postazioni dove è stato collocato il laser scanner durante le scansioni. Successivamente, acquisite le coordinate dei marker e delle strumentazioni, tramite il software [Meridiana](#) si proiettano i punti GPS sul fuso di riferimento 33N, mentre per le quote sul geoide di riferimento IGM 95, in modo da avere coordinate georiferite al nostro sito. Infine, utilizzando l'applicativo si esegue una rototraslazione del libretto celerimetrico, grazie alle coordinate note prese dal GPS.

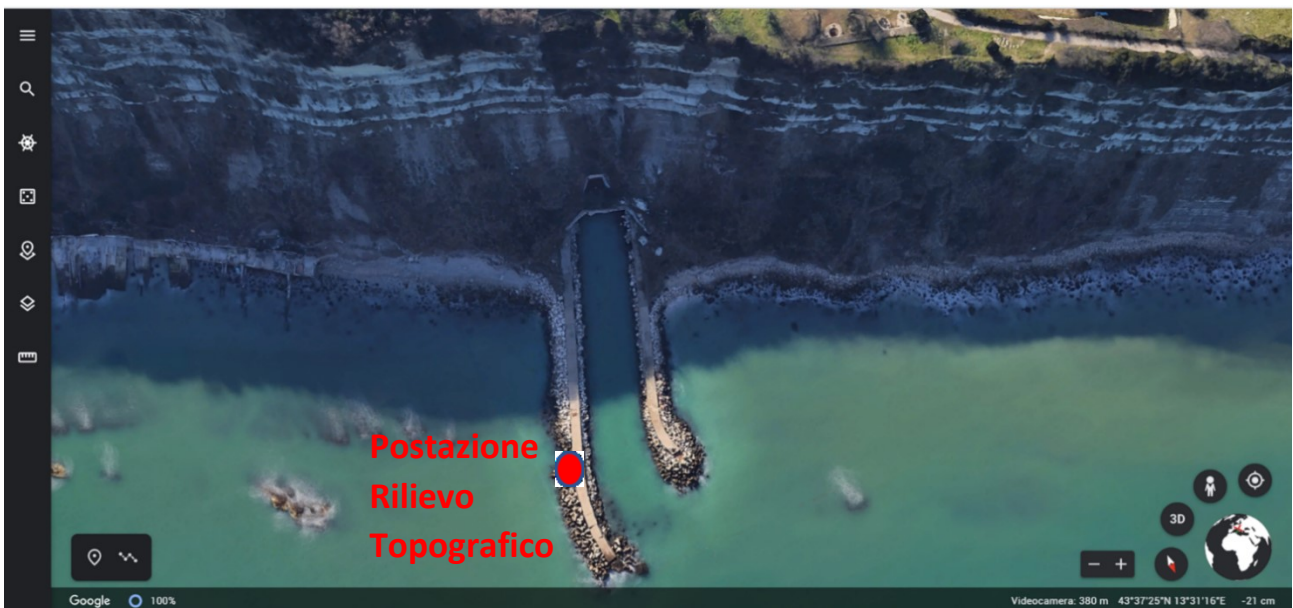


Figura 39 - Postazione Stazione Totale durante rilievo topografico

5. Processamento dei dati acquisiti

Questa seconda fase del lavoro di tesi si è svolta in laboratorio presso il dipartimento DICEA della Facoltà di Ingegneria (UNIVPM) dove ho potuto accedere ai dati rilevati dal laser scanner forniti dalla società MicroGeo srl.

5.1 *Software utilizzati*

Meridiana

Per il rilievo della zona in questione si è adottato il sistema di riferimento nazionale WGS84-UTM33N con quote ortometriche s.l.m. riferite al mareografo di Genova. Per il rilievo della zona in questione si è utilizzata un'unica rete topografica che è caratterizzata da una precisione intrinseca centimetrica. La realizzazione della rete topografica, è stata eseguita con un ricevitore satellitare GNSS (Global Navigation Satellite System) geodetico RTK (Real Time Kinematic) con doppia frequenza in modalità Post-Processing.

La compensazione ed elaborazione dei dati GNSS è stata eseguita utilizzando il software Meridiana vers. 2018.

Il riattacco al sistema di riferimento nazionale è stato possibile eseguendo un appoggio alla stazione permanente Netgeo, un servizio di posizione GPS+GLONASS ad uso topografico. La rete è inquadrata nel sistema di riferimento ETRF2000-RDN con la certificazione dell'Istituto Geografico Militare.

Contestualmente si sono posizionati n°9 target e un n°1 punto base per la stazione totale materializzato con chiodo topografico in acciaio disposto lungo il molo sud. Questa operazione di orientamento e georeferenziazione, è necessario per l'allineamento e georeferenziazione delle scansioni del laser scanner. Per la determinazione delle coordinate dei target si è eseguito uno stazionamento con ricevitore GNSS in modalità con tempi d'acquisizione di 3 secondi, così da andare spediti con l'acquisizione dei dati.

Scaricando i dati dal GNSS e dalla Stazione Totale, questi verranno visualizzati nel pannello dei layer, sotto il nome di Libretto Celerimetrico e Libretto GNSS. Bisognerà assegnare lo stesso nome ai punti che sono stati battuti sia dal GNSS che battuti dalla stazione totale e assegnato il codice che saranno considerati nel libretto celerimetrico, ossia OR (Orientamento) e QO (Quota). Ossia il primo è un punto di Orientamento e sarà utilizzato per l'orientamento della stazione da cui è stato visto, il secondo è un punto di quota e sarà utilizzato dal programma per quotare la Stazione da cui è stato visto.

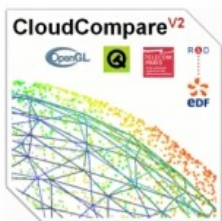
A questo punto si esegue il calcolo Celerimetrico e nella figura 40 sono riportate le coordinate geografiche in formato ASCII, per rendere agevole l'importazione durante l'elaborazione della nuvola dei punti.

```
nome,Nord, Est, Quota  
(nome, Y, X, Z)  
,100,,4831092.804,380745.131,3.126  
,1003,,4830997.806,380680.480,5.917  
,1010,,4830995.116,380705.638,5.884  
,1011,,4830992.510,380699.394,7.285  
,1012,,4830991.545,380696.782,7.697  
,1013,,4830993.529,380691.565,8.060  
,1014,,4830996.706,380683.430,5.751  
,1015,,4831012.436,380681.448,5.056  
,1016,,4830964.174,380800.015,2.148
```

Figura 40 - Tabella del file ASCII con le coordinate note dei target ottenute dal processamento

CloudCompare

Il programma utilizzato per l'elaborazione dei dati è CloudCompare v2.11.2 (Anoia) [64 bit], un software open source di elaborazione di nuvole di punti 3D che può anche gestire mesh triangolari e immagini calibrate.



5.2 Creazione della mesh

Come prima cosa si importano le nuvole di punti acquisite tramite laser scanner nel software CloudCompare, per poter procedere all'allineamento e alla pulizia delle nuvole di punti .

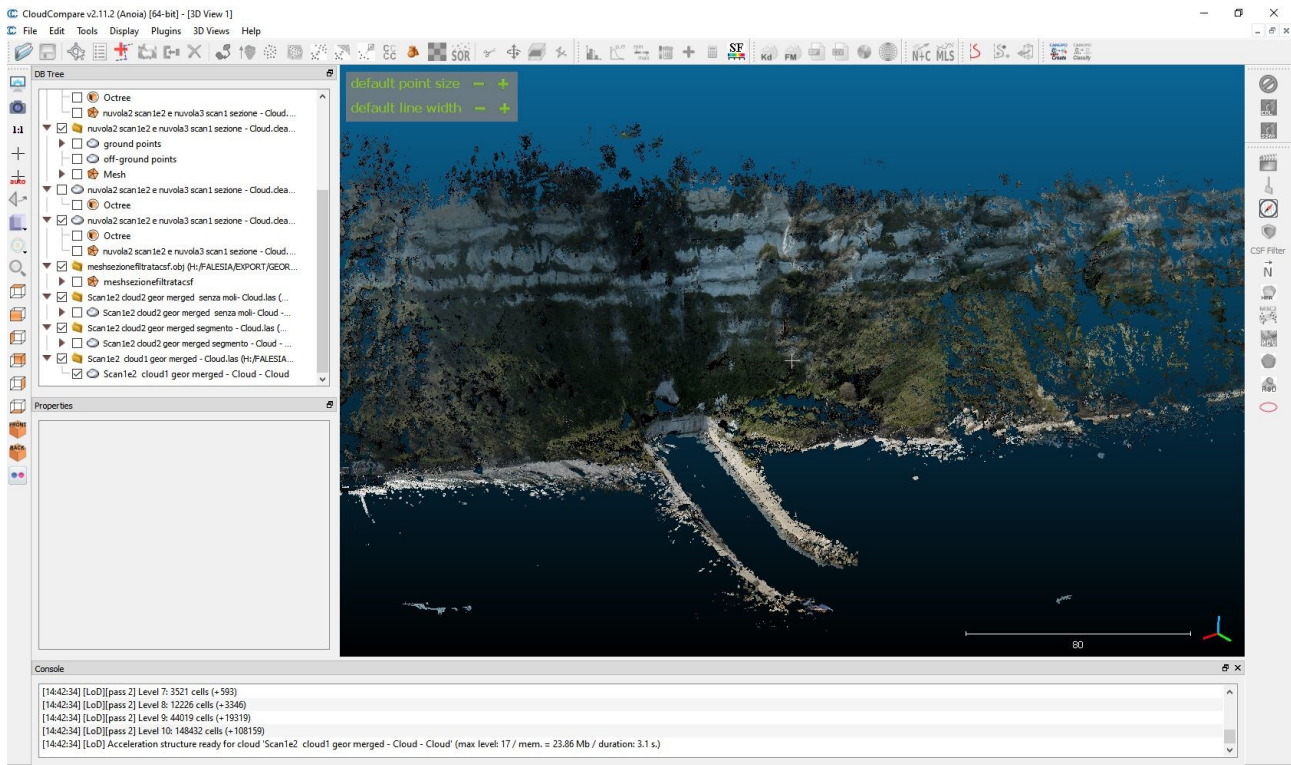



Figura 41 – Scansione a colori (RGB)

Come spiegato prima, sono state eseguite due gruppi di scansioni in base alle due postazioni di rilievo. Ciascuna scansione era composta da tre nuvole di punti. Ad ogni gruppo di scansioni viene associato un nuovo campo scalare con il comando *Add Constant SF* che possiamo trovare nella *Scalar Fields Toolbar* che consente di definire una nuova classe per poter raggruppare queste scansioni in un'unica nuvola di punti



Figura 42 - Scalar Fields Toolbar – In evidenza il comando “Add constant SF”

Definite queste due classi di scansioni si procede con il tasto  “Merge multiple clouds”, che troviamo nella *Main toolbar*, operazione che consente di unire le diverse scansioni laser ottenendo così un'unica nuvola di punti.

In questo modo si procede con la rototraslazione delle varie nuvole di punti acquisite.

Questa operazione di raggruppamento in “classi” è di primaria importanza, ed al fine di ottenere errori trascurabili e indispensabile unire le nuvole di punti attraverso target ad alta riflettanza, georiferiti (Figura 40) con l’ausilio di GPS e stazione totale di alta precisione.

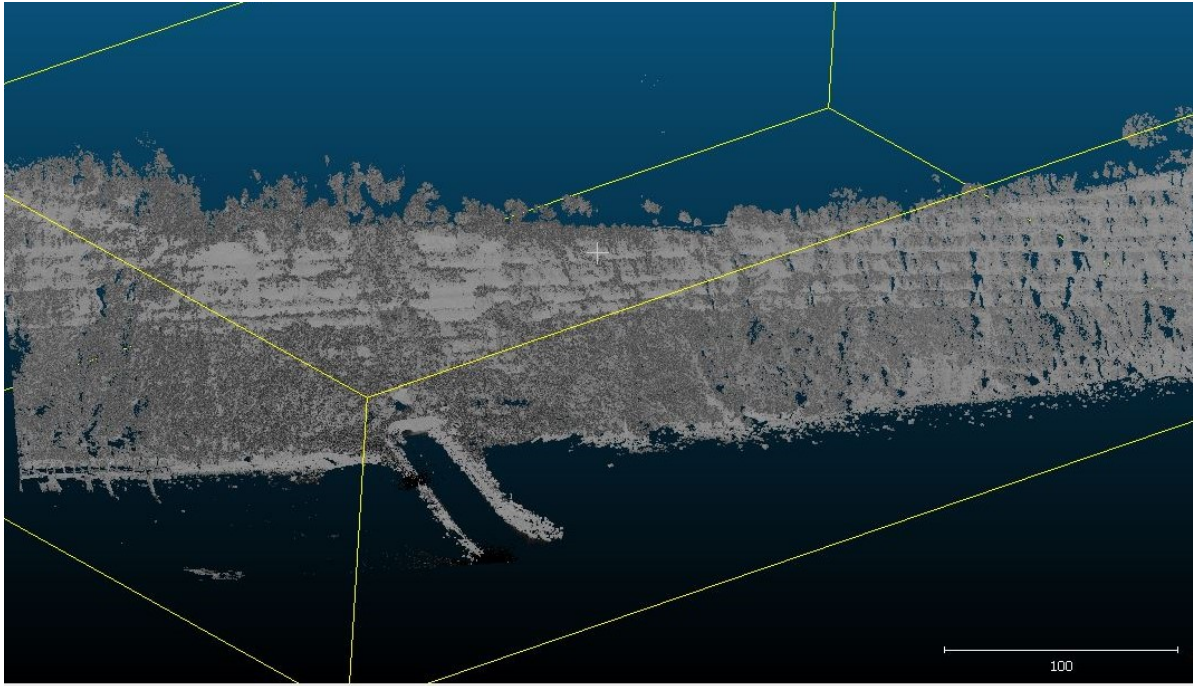



Figura 43 – Scansione laser scanner con Scalar Field “intensity”

Per effettuare questa operazione di rototraslazione si selezionano le nuvole che vogliamo allineare e si clicca il comando  “Align (point pairs picking)”. Tale comando ci farà scegliere quale nuvola di punti vogliamo che si sposti sovrapponendosi all’altra e ci permetterà di fare l’allineamento manuale selezionando punto dopo punto.

<input checked="" type="checkbox"/> show 'to align' entities					
	X	Y	Z	Error	
A0	76.415760	-76.468497	-2.534006	0.00653922	<input checked="" type="checkbox"/>
A1	-19.204998	-49.540751	1.202750	0.0221869	<input checked="" type="checkbox"/>
A2	-27.895763	-53.508750	3.026495	0.0128668	<input checked="" type="checkbox"/>
A3	-44.139751	-33.298999	0.365744	0.020143	<input checked="" type="checkbox"/>

<input checked="" type="checkbox"/> show 'reference' entities					
	X	Y	Z	Error	
R0	380800.0150...	4830964.174...	2.148000	0.00653922	<input checked="" type="checkbox"/>
R1	380705.6380...	4830995.116...	5.884000	0.0221869	<input checked="" type="checkbox"/>
R2	380696.7819...	4830991.545...	7.697000	0.0128668	<input checked="" type="checkbox"/>
R3	380681.4479...	4831012.436...	5.056000	0.020143	<input checked="" type="checkbox"/>

adjust scale Rotation Tx Ty Tz
 auto update zoom

Figura 44 - Tabella dei punti selezionati per l’allineamento manuale e con indicazione del valore dell’errore

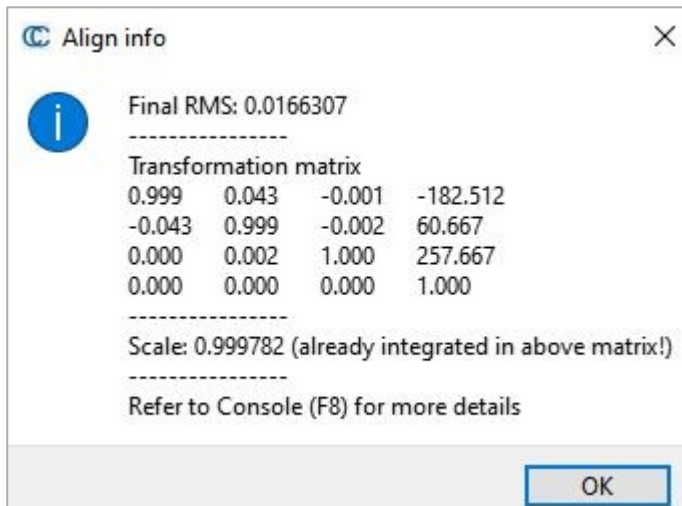



Figura 45 – Matrice di trasformazione del comando di allineamento

Nella tabella della Figura 44 si possono vedere nella prima colonna i punti selezionati (A sta per aligned, R per reference) mentre nelle colonne a seguire ad ogni punto sono associate le coordinate XYZ e nell'ultima colonna viene indicata in metri la precisione, o errore, con cui il punto è stato preso nell'allineamento manuale.

Una volta effettuata la georeferenziazione di tutte le nuvole di punti grazie all'operazione effettuata con il tool “Add constant SF” si procede con



“Filter Points by value” che, attraverso il comando *Split*, ci permette di separare le varie nuvole di punti, prima unite, attraverso il valore di range della nuova costante appositamente creata per il raggruppamento in classi.

Una volta georeferenziate tutte le nuvole di punti, con il comando  “Segment” si procede con la pulizia manuale e con il taglio della nuvola nella porzione di parete della falesia dove sono presenti dettagli più evidenti e utili per la successiva operazione di analisi e studio.

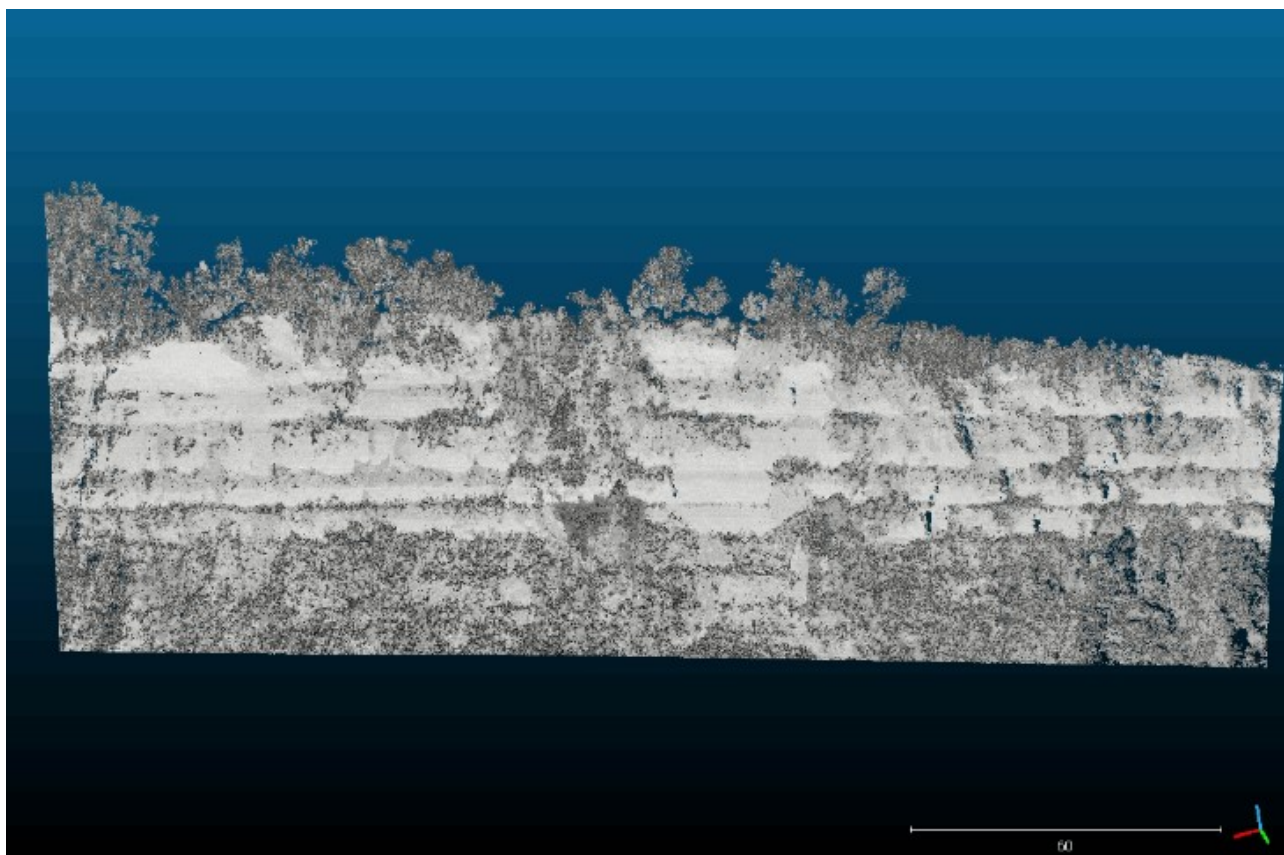


Figura 46 - Sezione segmentata della falesia

Property	State/Value
CC Object	
Name	sezione2 - Cloud
Visible	<input checked="" type="checkbox"/>
Show name (in 3D)	<input type="checkbox"/>
Colors	SF Scalar field
Box dimensions	X: 231.576 Y: 157.687 Z: 84.103
Shifted box center	X: 1167.38 Y: 282.579 Z: 64.0978
Global box center	X: 380663.382080 Y: 4830972.578735 Z: 57.877832
Info	Object ID: 333 - Children: 0
Current Display	3D View 1
Cloud	
Points	9,273,066
Global shift	(-379496.00; -4830690.00; 6.22)
Global scale	1.000000
Point size	Default
Scalar Fields	
Count	10
Active	Intensity
Color Scale	

Figura 47 - Proprietà della nuvola di punti segmentata, usata per creare la mesh

Ora con la sezione ottenuta si può creare la *mesh* usando tre tipologie diverse:

- La prima tipologia è basata sul calcolo delle normali.

Per calcolare le normali su una nuvola di punti, è necessario stimare la superficie locale rappresentata da un punto e dai suoi vicini. Il livello di rumore, il numero di punti e la distanza tra loro cambierà l'aspetto di questa superficie.

Cliccando in *Edit > Normals > Compute* avremo la finestra (Figura 48) in cui bisognerà scegliere un modello di superficie locale: “piano” è robusto al rumore ma pessimo con spigoli vivi e angoli, “triangolazione 2D” è invece debole al rumore ma buona con spigoli vivi e di tipo “quadrica” ottimo per superfici curve.

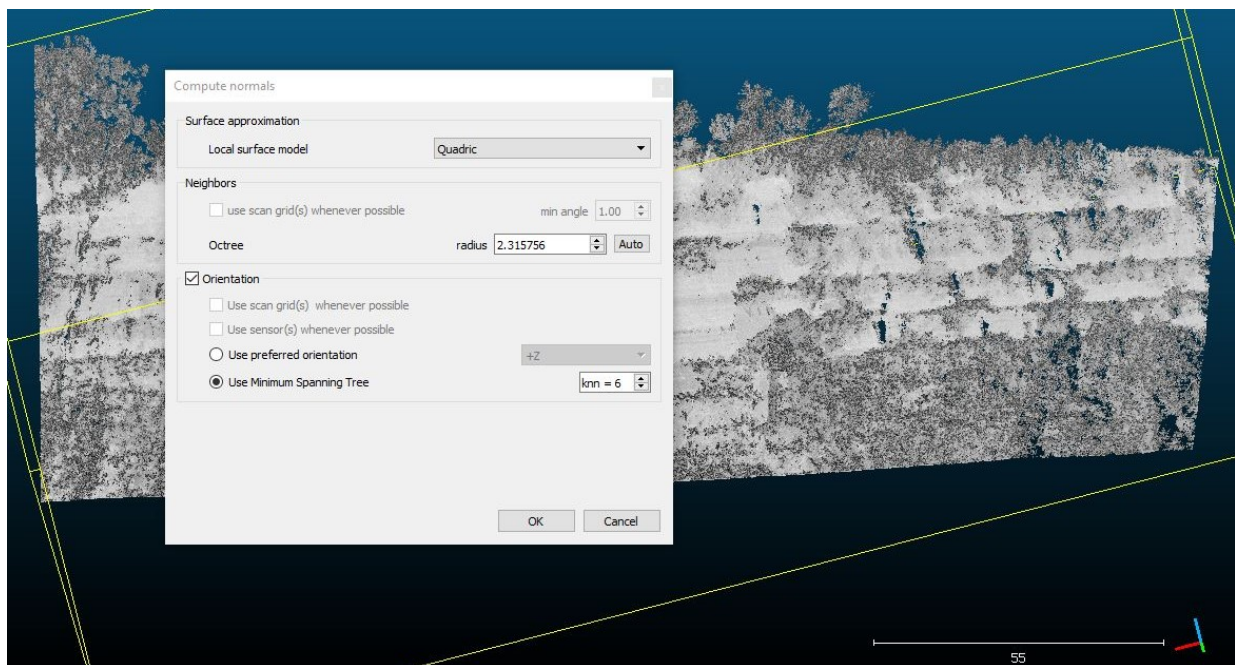


Figura 48 - "Compute normals"

Nel nostro caso la falesia ha andamento pressoché curvo per cui abbiamo impostato come parametro di approssimazione della superficie (Figura 48) su local surface model con “*Quadric*” e abbiamo lanciato le modifiche.

Selezioniamo la nuvola di punti ottenuta e ritorniamo in *Edit > Mesh > Delaunay 2.5D (best fit plane)*, dove nelle figure sottostanti (Figure 49 e 50) viene mostrato il risultato.

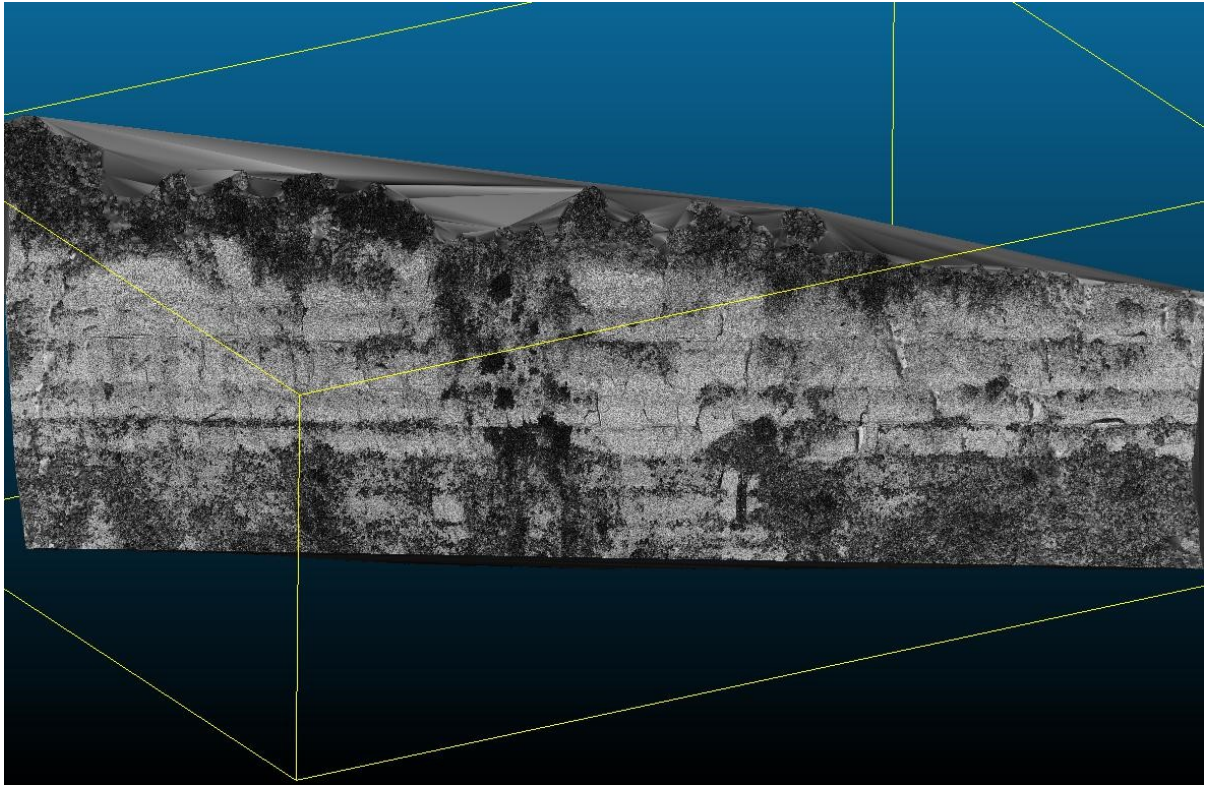


Figura 49 - Mesh con calcolo delle normali



Figura 50 - Zoom della mesh ottenuta con il calcolo delle normali

- La seconda metodologia prevede l'uso del *plugin* “CSF”

CFS “*Cloth Simulation Filter*” è basato su un algoritmo di computer grafica 3D, brevettato da un gruppo di ricercatori Zhang et alii (2016) per separare punti della nuvola di punti in misure di terreno e non-terreno al fine di creare DTMs (Digital Terrain Models).

Con questo approccio la nuvola di punti viene invertita e un “panno” (*cloth*) rigido viene posto per coprire, in gravità, la superficie invertita. Analizzando l'interazione tra i nodi del panno e i corrispondenti punti della nuvola, le posizioni dei nodi possono essere determinate generando un'approssimazione della superficie del terreno.

Impostando la tipologia di scena in “Steep slope” (Figura 51), ovvero pendio trattasi di una distribuzione verticale della superficie in esame, si passa poi a definire i parametri avanzati (Figura 52) che riguardano le caratteristiche di questo *cloth* che andremo a creare sottoforma di risoluzione ovvero la maglia che costituisce i nodi, i numero di iterazioni tra i punti della nuvola e i nodi del *cloth* e infine la soglia di classificazione per distinguere elementi terreno e non-terreno.

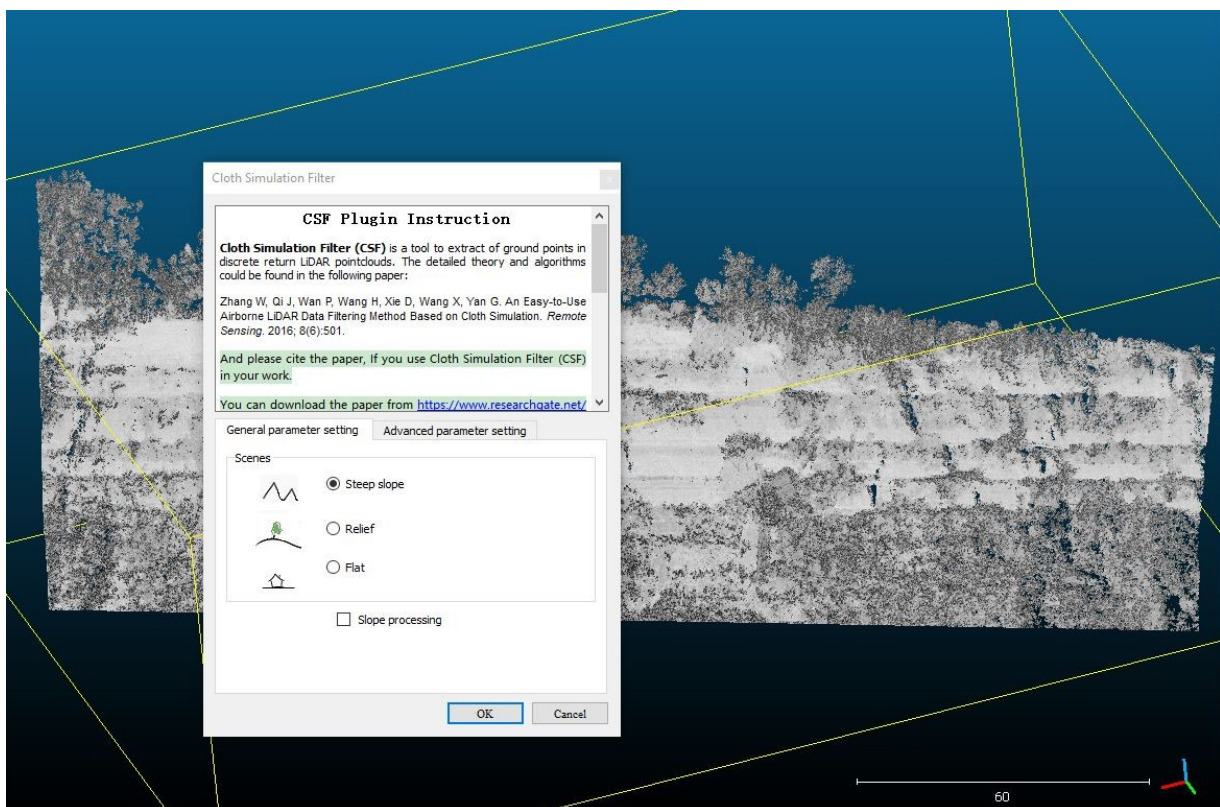


Figura 51 - Plugin CSF – General parameter setting

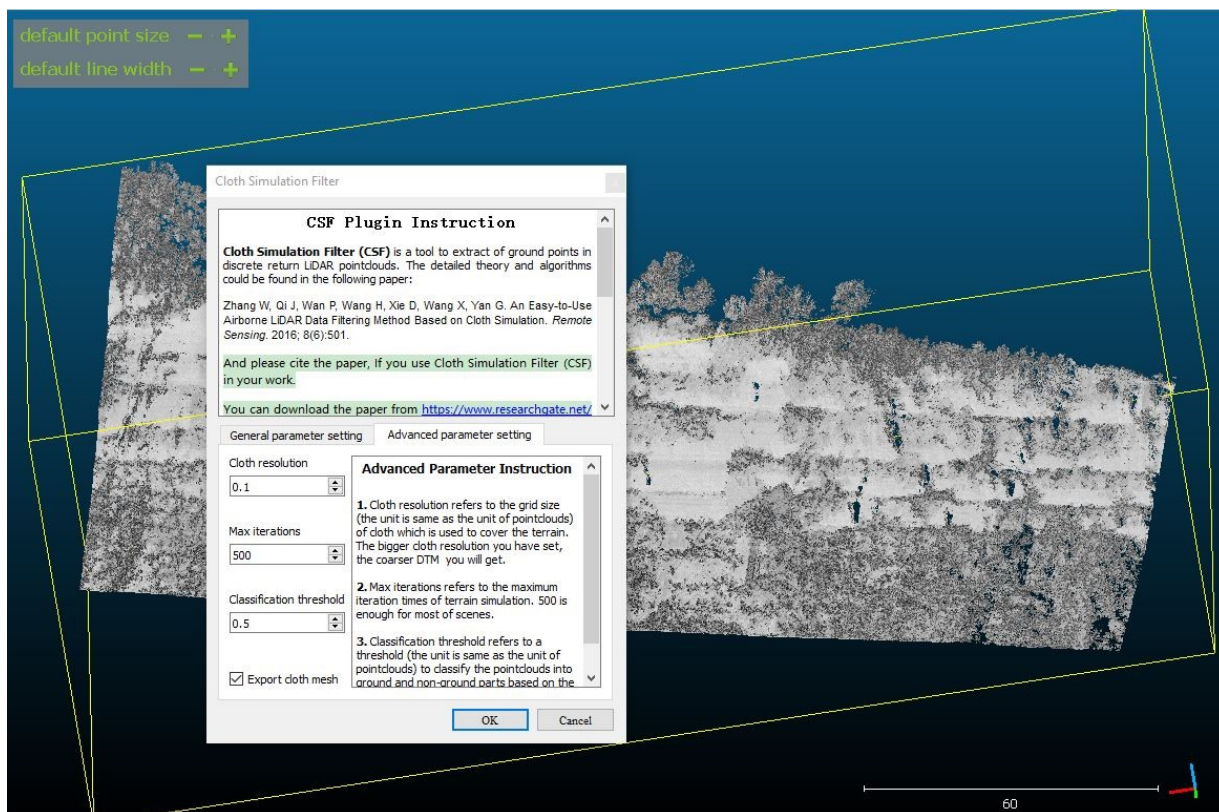


Figura 52 - Plugin CSF - Advanced parameter setting

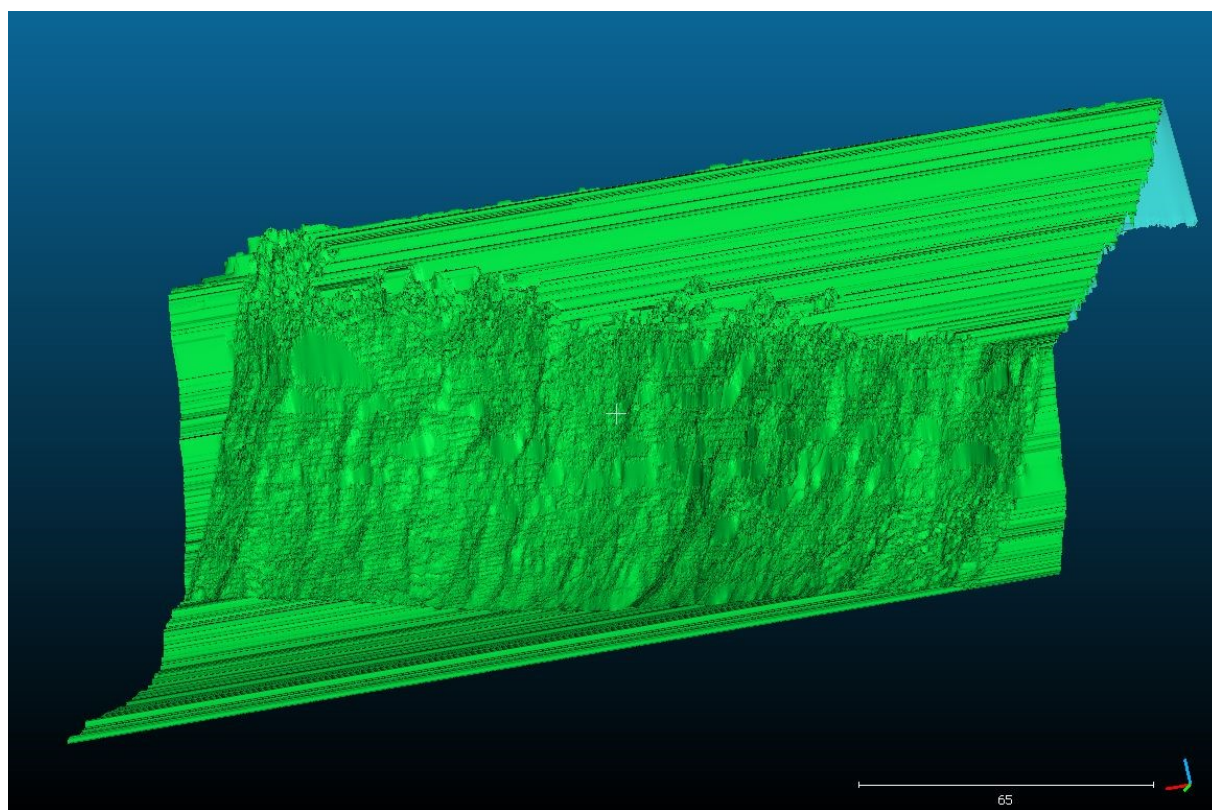


Figura 53 - Mesh con plugin CSF

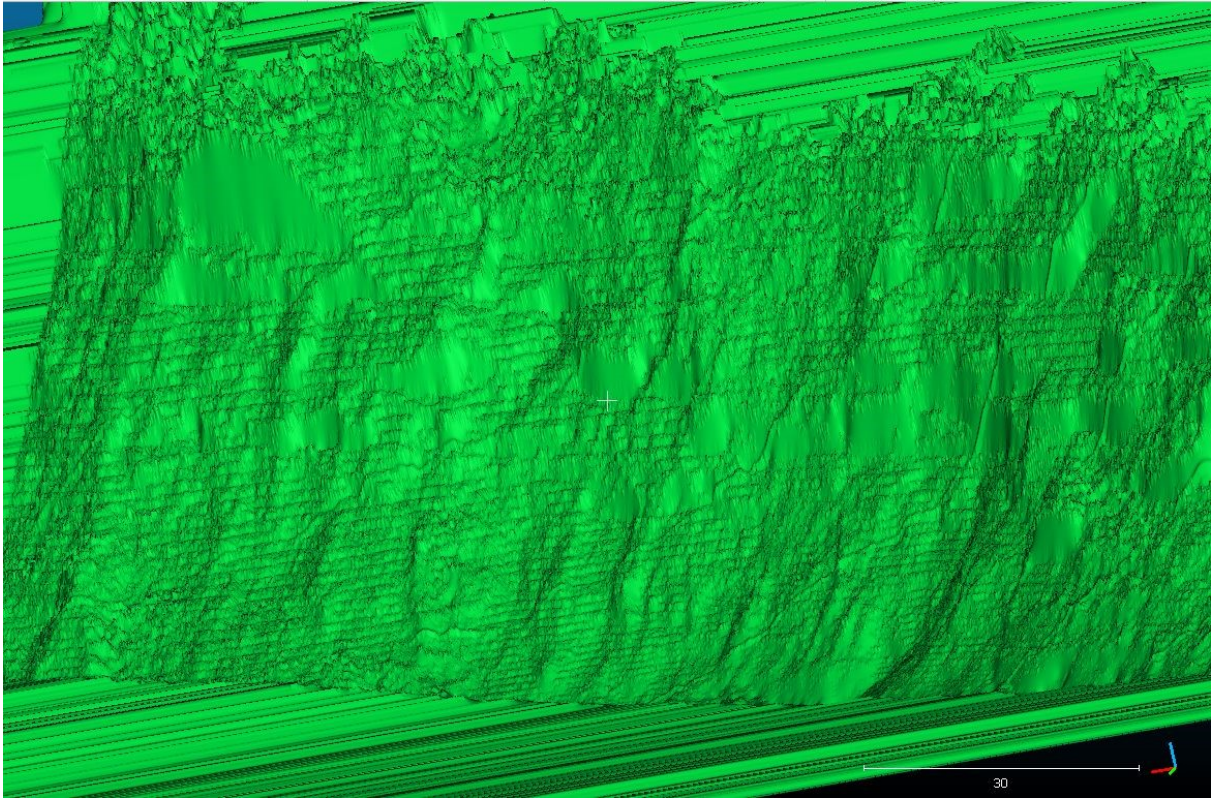


Figura 54 – Zoom della mesh ottenuta con CSF

- La terza metodologia prevede l'uso del tool “*Verticality*” che è accessibile tramite *Tools > Other > Compute geometric features* tramite il quale si possono differenziare gli elementi orizzontali e quelli verticali nella sezione in esame. Nella finestra che si apre spunteremo appunto la casella “*verticality*” impostando come parametro del “raggio della vicinanza locale” a 0,5 (Figura 55).

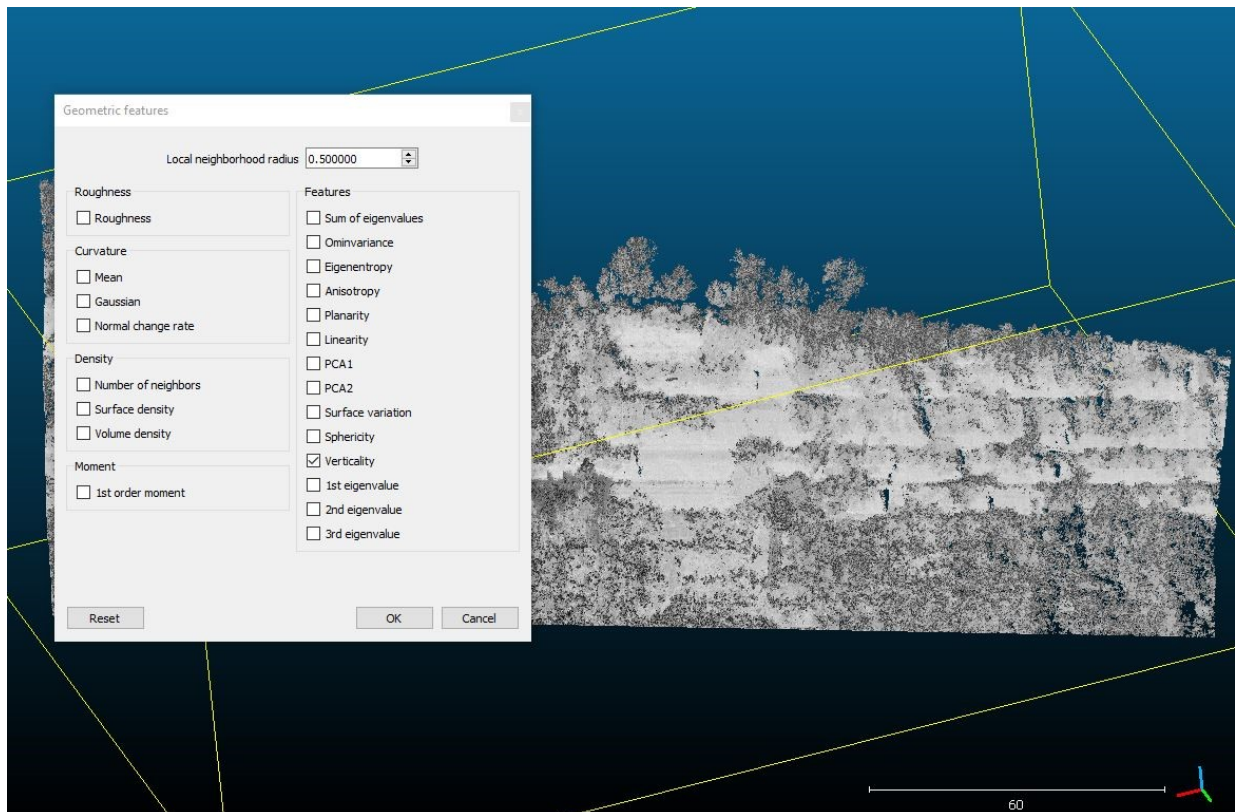


Figura 55 - Geometric features

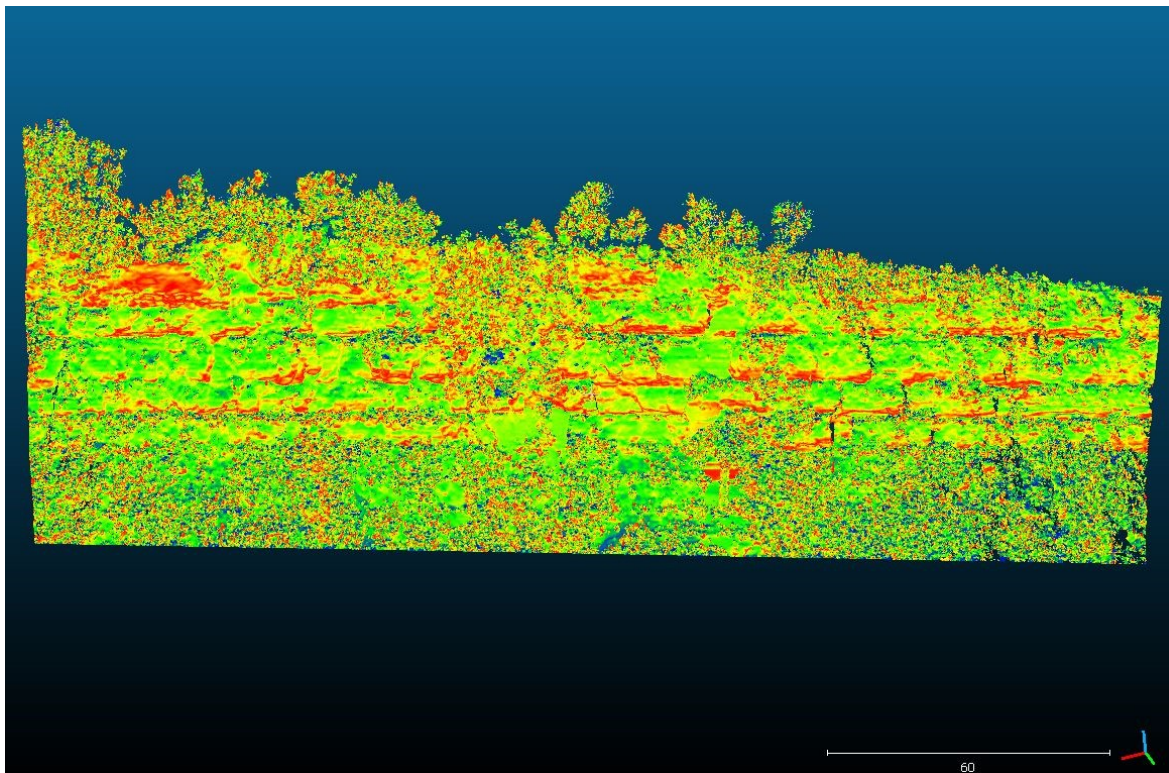


Figura 56 - Risultato in Scalar Field del tool Verticality

Poi una volta selezionata la nuvola di punti ottenuta (Figura 56), si procede con la creazione della mesh seguendo le istruzioni *Edit > Mesh > Delaunay 2.5D (best fit plane)*, mostrata nelle Figure 57 e 58.

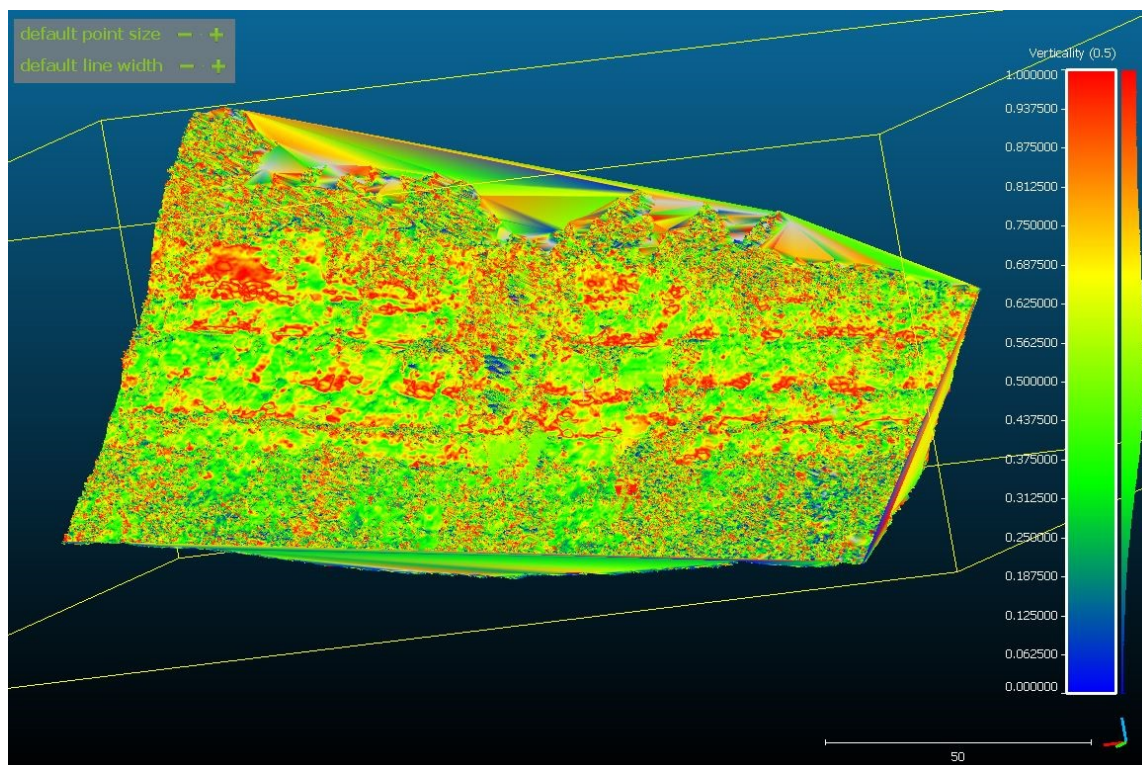


Figura 57 - Mesh ottenuta con il tool - Verticality

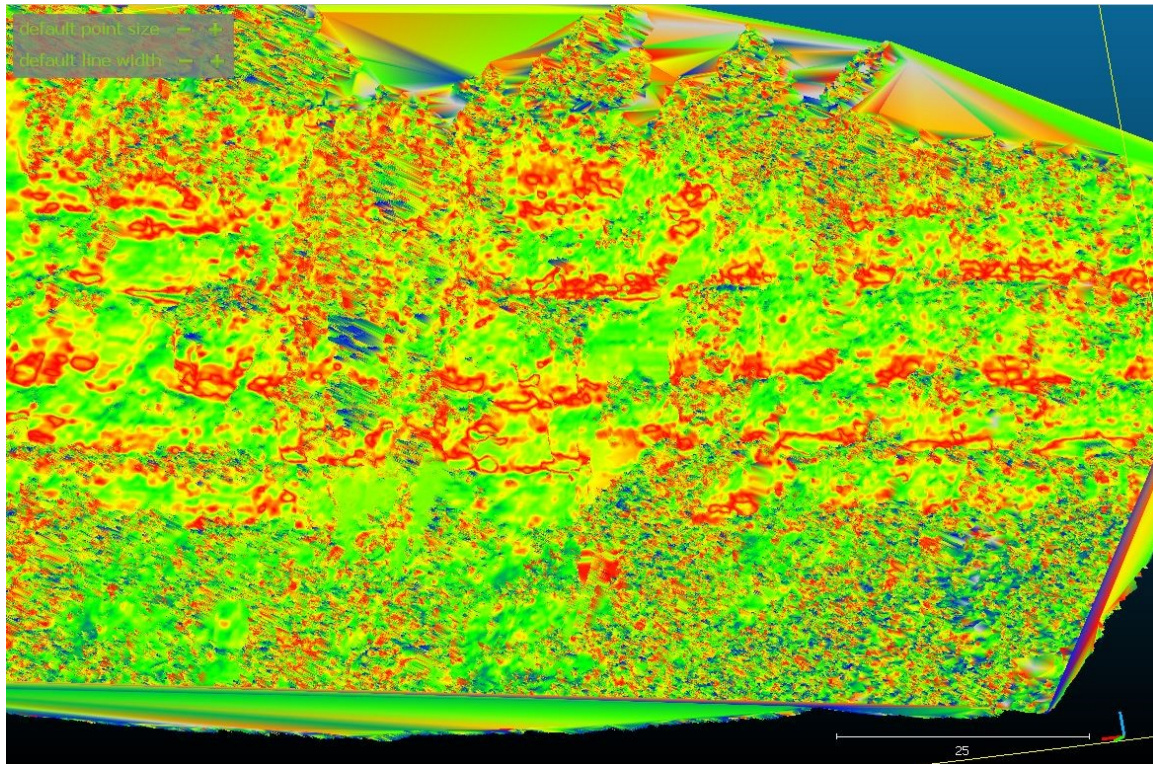


Figura 58 - Zoom della mesh ottenuta con il tool Vericality

Conclusioni

Dei tre risultati sopra proposti quello che meglio può essere usato in fase di analisi è la *mesh* creata con la metodologia basata sul tool “*verticality*”. In questa *mesh* si possono riconoscere i diversi strati orizzontali e le diverse angolazioni che le rocce hanno; soprattutto grazie al filtro utilizzato si possono riconoscere le zone più fragili, in rosso, che hanno una maggiore verticalità. Anche la *mesh* creata con l’approccio del calcolo delle normali può essere di aiuto nell’indagine dell’instabilità del versante oggetto di studio poiché le diverse fratture e le zone di distacco di materiale roccioso sono facilmente individuabili.

Al contrario il risultato ottenuto con il *plugin* CSF *Cloth Simulation Filter* non soddisfa poiché risultano delle parti di *mesh* non ben definite dove il *plugin* non riesce ad interpolare bene gli elementi terreno e non-terreno.

Le *mesh* ottenute saranno poi valutate e analizzate dal dipartimento SIMAU dell’Università Politecnica delle Marche per il monitoraggio dell’instabilità della falesia e per l’analisi delle zone più fragili.

Bibliografia

- Carta delle litologie della Regione Marche Zona Nord in scala 1:100.000
- Pierdicca R., Chiappini S., Di Stefano F., Piccinini F. (2020)– “Integration and Assessment between 3D data from different geomatics techniques. Case of study: the ancient urban walls of San Ginesio (MC)”, *Applied Geomatics*, *in press*
- Clerici, A., Gelmini, M., Ravelli, M., Sgrenzaroli, M., & Vassena, G. (2005). Applicazioni del laser scanner terrestre a temi geologico-tecnici. *Giornale di Geologia Applicata*, 2, 328-333.
- Vassena, G., & Sgrenzaroli, M. (2007). Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner, vol. 1.
- Fruzzetti, V. M., Segato, D., Ruggeri, P., Vita, A., Sakellariadi, E., & Scarpelli, G. (2011). Fenomeni di instabilità della falesia del Monte Conero: ruolo dell’assetto strutturale. *Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica*.
- Aringoli, D., Gentili, B., Materazzi, M., Pambianchi, G., & Farabollini, P. (2014). Il ruolo della gravità nell’evoluzione geomorfologica di un’area di falesia: il caso del Monte Conero (Mare Adriatico, Italia centrale). *Studi costieri*, 22, 19-32.
- Michoud, C., Carrea, D., Costa, S., Davidson, R., Delacourt, C., Derron, M. H., ... & Maquaire, O. (2014, February). Rockfall Detection and Landslide Monitoring Ability of Boat-based Mobile Laser Scanning along Dieppe Coastal Cliffs (Upper Normandy, France). In *Vertical Geology Conference 2014*.
- Ossowski, R., & Tysi c, P. (2018). A new approach of coastal cliff monitoring using mobile laser scanning. *Polish Maritime Research*.
- Di Stefano, F., Cabrelles, M., Garc a-Asenjo, L., Lerma, J. L., Malinverni, E. S., Baselga, S., ... & Pierdicca, R. (2020). Evaluation of Long-Range Mobile Mapping System (MMS) and Close-Range Photogrammetry for Deformation Monitoring. A Case Study of Cortes de Pall s in Valencia (Spain). *Applied Sciences*, 10(19), 6831.
- Malinverni, E. S., Pierdicca, R., Bozzi, C. A., & Bartolucci, D. (2018, October). Evaluating a Slam-Based Mobile Mapping System: a Methodological Comparison for 3D Heritage Scene Real-Time Reconstruction. In *2018 Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (MetroArchaeo)* (pp. 265-270). IEEE.
- T r k,  ., Barsi,  ., B g ly, G., Lovas, T., Somogyi,  ., & G r g, P. (2018). Slope stability and rockfall assessment of volcanic tuffs using RPAS with 2-D FEM slope modelling. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 18(2).
- Pagano, M., Palma, B., Ruocco, A., & Parise, M. (2020). Discontinuity Characterization of Rock Masses through Terrestrial Laser Scanner and Unmanned Aerial Vehicle Techniques Aimed at Slope Stability Assessment. *Applied Sciences*, 10(8), 2960.
- Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., & Yan, G. (2016). An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. *Remote Sensing*, 8(6), 501.
- Marini N., Vivalda M.P., Fronzi D. (2018). Studio della franosit  del tratto di costa anconetano compreso tra il passetto e l’area portuale. Dipartimento di Scienze ed Ingegneria della Materia, dell’Ambiente ed Urbanistica, Universit  Politecnica delle Marche, Ancona.

Sitografia

- Riviera del Conero - www.rivieradelconero.info
- Google Earth - <https://www.google.it/intl/it/earth/>
- Regione Marche - www.regione.marche.it/Regione-Utile/Paesaggio-Territorio-Urbanistica/Cartografia/Repertorio/Cartageologicaregionale10000
- KAARTA Stencil 2 - <https://www.kaartacom.com/products/stencil-2-for-rapid-long-range-mobile-mapping/>
- FARO CAM 2 Focus 350 - <https://www.faro.com/it-it/prodotti/costruzione-bim-cim/cam2-focus/>
- RieglVZ-400i-<https://www.microgeo.it/it/laser-scanner-full3d-multipletargets/laser-scanner-riegl-vz400i.aspx>
- TOPCON GPT 7000 - <http://www.topcon.com.sg/survey/gpt70.html>
- TOPCON HiPer HR - <https://www.topconpositioning.com/it/gnss-and-network-solutions/ricevitori-gnss-integrati/hiper-hr>
- Meridiana - <http://www.meridianaoffice.com/contenuti/meridiana/meridiana-home.html>
- CloudCompare - www.danielgm.net
- MicroGeo srl - www.microgeo.it
- 3DMETRICA - <https://3dmetrica.it/>