

UNIVERSITÀ DI SIENA 1240

Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente

Dottorato in Scienze e tecnologie ambientali, geologiche e polari

33° Ciclo

Coordinatore: Prof. Simone Bastianoni

Sensori distribuiti in fibra ottica e tecnologie geomatiche per il monitoraggio della stabilità dei fronti di cava

Settore scientifico disciplinare: GEO/05

Candidata Chiara Lanciano Centro di Geotecnologie dell'Università di Siena

Firma del candidato

Chies Lenches

Tutore **Prof. Riccardo Salvini** Università di Siena

Firma del tutore

Anno accademico di conseguimento del titolo di Dottore di ricerca 2019/2020

Università degli Studi di Siena Dottorato in Scienze e tecnologie ambientali, geologiche e polari 33° Ciclo

Data dell'esame finale 29 Marzo 2021

Commissione giudicatrice <u>Prof.ssa Cecilia Viti</u> <u>Prof.ssa Simonetta Cirilli</u> <u>Prof.ssa Monica Ghirotti</u>

Esperto/i

Supplenti Prof. Pier Lorenzo Fantozzi

Prefazione

L'idea della presente Tesi di Dottorato nasce nell'ambito del progetto di ricerca e sviluppo denominato "Monitoraggio in tempo reale delle pareti di cava mediante utilizzo di fibre ottiche - CAV_OTT" finanziato dal programma della Regione Toscana POR FESR 2014-2020 e realizzato nel periodo compreso tra Aprile 2017 e Febbraio 2019. Il progetto è stato incentrato sull'implementazione di un sistema di monitoraggio di ultima generazione basato sull'utilizzo di Sensori Distribuiti in Fibra Ottica (Distributed Optical Fiber Sensors DOFS), utilizzato per effettuare valutazioni sulle condizioni di stabilità di determinati fronti di estrazione del marmo ubicati nelle Alpi Apuane. Il progetto è stato sviluppato grazie alla collaborazione di diversi enti e società, tra cui tre cooperative di cavatori in qualità di enti gestori di tre cave di marmo selezionate ai fini della sperimentazione del sistema di monitoraggio. Nello specifico, il partenariato è stato costituito da: "Cooperativa Cavatori Lorano", ente gestore della Cava Lorano "I" nº22 (Lorano, Carrara) e coordinatore del progetto; "Centro di GeoTecnologie" (CGT) dell'Università di Siena; "Geo Explorer s.r.l", società start-up dell'Università di Siena appartenente al Distretto Regionale Tecnologico del Marmo; "Cooperativa Apuana Vagli di Sopra", ente gestore della Cava Piastra Bagnata (Vagli di Sopra, Lucca); "Cooperativa Levigliani", ente gestore della Cava del Piastraio di Sotto (Levigliani di Stazzema, Lucca).

Mi è doveroso dedicare uno spazio dell'elaborato alle persone che hanno contribuito, con il loro supporto, alla realizzazione dello stesso. In primis, un ringraziamento speciale al mio tutore, Prof. Riccardo Salvini, per la sua disponibilità, per i suoi preziosi consigli e per le conoscenze trasmesse durante tutto il percorso del dottorato. Ringrazio tutti gli amici e colleghi del Centro di GeoTecnologie per il supporto operativo, i suggerimenti e i momenti trascorsi insieme. Non posso non menzionare la mia famiglia che, da sempre, mi sostiene nella realizzazione dei miei progetti. Ringrazio Agostino, per l'amore che mi regala ogni giorno. Ringrazio, infine, tutti gli amici, per l'affetto e la vicinanza, in particolare, Francesca, Matt, Emanuela, Matteo, Massimo, Sauro, Massimiliano e tutti gli amici del Joshua.

Abstract

La presente Tesi di Dottorato è incentrata sull'applicazione integrata di tecnologie geomatiche e Sensori Distribuiti in Fibra Ottica (*Distributed Optical Fiber Sensors* DOFS) per lo sviluppo di un sistema innovativo di monitoraggio finalizzato alla verifica della stabilità dei fronti di estrazione di tre cave di marmo delle Alpi Apuane: la "Cava Lorano I n° 22" (Carrara, Massa-Carrara), la "Cava Piastra Bagnata" (Vagli di Sotto, Lucca) e la "Cava del Piastraio di Sotto" (Levigliani di Stazzema, Lucca). Mentre i primi due sono siti a cielo aperto, l'ultima è una cava di marmo in sotterraneo.

Tutti e tre i siti test sono stati studiati dal punto di vista geologico-strutturale, geotecnico e geomorfologico. Inoltre, con la duplice finalità di integrare i rilievi geomeccanici e rappresentare cartograficamente la traccia della fibra ottica disposta sui fronti da analizzare, sono stati effettuati rilievi geomatici con drone e laser scanner terrestre e, laddove necessario, rilievi topografici (mediante Stazione Totale e misure GPS differenziale).Il sistema di DOFS adottato, denominato "OSD-1" è stato fornito dall'azienda Optosensing s.r.l.. La strumentazione, basata sul fenomeno dello "scattering di Brillouin", consente di effettuare, lungo l'intera lunghezza dei cavi sensori in fibra ottica, il monitoraggio di alcuni parametri fisici di interesse, quali la temperatura e la deformazione (strain). Lo scattering di Brillouin (fenomeno di interazione tra la sorgente luminosa e il mezzo ottico), intrinsecamente dipendente dalla densità della fibra (a sua volta correlata a temperatura e deformazione), si verifica mediante vibrazioni acustiche stimolate nella fibra ottica. Tali vibrazioni producono un'onda contropropagante ("onda di scattering di Brillouin") che indebolisce l'impulso di input. Per soddisfare il requisito di conservazione dell'energia, si ottiene uno shift di frequenza tra l'onda di scattering di Brillouin e la frequenza dell'impulso di luce originario. Lo Shift di Frequenza di Brillouin (BFS, Brillouin Frequency Shift) varia a seconda della temperatura e delle condizioni di deformazione longitudinale, rendendo possibile l'individuazione e la misura di strain e temperatura lungo la fibra.

Presso i tre siti oggetto di analisi, sono state eseguite due diverse tipologie di misura: BOTDR (*Brillouin Optical Time Domain Reflectometer*), basata sullo *scattering* spontaneo di Brillouin, e BOTDA (*Brillouin Optical Time Domain Analysis*) facente riferimento alla condizione di *scattering* stimolato di Brillouin. In questo secondo caso, uno stimolo addizionale sulla generazione di fononi, ottenuto grazie all'utilizzo di luce incidente addizionale, potenzia o amplifica l'entità dello *scattering*. Le misure, inoltre, sono state eseguite secondo due diverse modalità: in maniera multitemporale presso le due cave situate a Vagli di Sotto e Levigliani di Stazzema, dove la centralina di misura è stata portata in loco nel momento in cui occorreva eseguire la misura (centralina mobile); in maniera continua nel sito di Lorano, dove, al contrario degli altri due siti, la centralina è stata posizionata in modo fisso per tutta la durata del progetto di ricerca.

Al fine di analizzare i dati di deformazione acquisiti mediante DOFS, sono stati realizzati diversi grafici che mostrano, al variare del tempo, la relazione tra la distanza lungo il percorso della fibra e le seguenti grandezze: BFS, *strain* e variazione di temperatura. Per ciascun profilo di deformazione, è stato quindi calcolato, statisticamente e tenendo conto delle caratteristiche geotecniche, un valore soglia di allarme delle deformazioni. Inoltre, per il caso studio di Lorano, è stato possibile confrontare i risultati dei DOFS con i dati di spostamento acquisiti dal sistema di monitoraggio topografico e geotecnico attivo presso il sito in questione a partire dall'anno 2012.

In seguito all'installazione dei DOFS, è stato necessario affrontare e risolvere alcune criticità di carattere tecnico che si sono presentate durante le attività di sperimentazione: problematiche legate alle batterie tampone della centralina preposta alle misure e fenomeni di recisione della fibra ottica, dovuti sia alla presenza delle asperità rocciose che al persistere del ghiaccio durante la stagione invernale. Tali inconvenienti, congiuntamente alla chiusura dei siti di estrazione durante i mesi invernali (in entrambe le stagioni 2017-2018 e 2018-2019), a causa delle avverse condizioni metereologiche, hanno portato ad avere, inevitabilmente, una limitazione dell'entità delle osservazioni acquisite.

Nonostante le difficoltà riscontrate, complessivamente, i risultati ottenuti indicano una buona potenziale abilità del sistema di monitoraggio DOFS di rilevare e localizzare eventuali fenomeni deformativi che possono verificarsi lungo il percorso della fibra, anche in ambienti decisamente ostili e poco ospitali come i siti di estrazione del marmo.

In futuro, il sistema potrebbe essere sviluppato al fine di realizzare attività di *smart-monitoring* e implementare veri e propri sistemi di preannuncio, contribuendo al miglioramento delle condizioni di sicurezza sui luoghi di lavoro e andando a costituire un valido supporto decisionale nell'ambito della pianificazione sul medio-lungo termine delle attività di escavazione.

Indice

PREFAZIONE	3
ABSTRACT	4
INDICE	6
ELENCO DEI PRINCIPALI ACRONIMI	10
CAPITOLO 1 - INTRODUZIONE	11
1. 1 Stato dell'arte sull'uso dei sensori in fibra ottica per il monitoraggio	11
1.2 Obiettivi della ricerca	
1.3 Metodologia	14
1.4 ARTICOLAZIONE DELLA TESI	15
CAPITOLO 2 - SENSORI DISTRIBUITI IN FIBRA OTTICA (DOFS)	17
2.1 Introduzione	17
2.2 SENSORI IN FIBRA OTTICA (OFS)	17
2.2.1 OFS intrinseci ed estrinseci	
2.3 DOFS	19
2.3.1 Fenomeni di scattering	
2.3.2 BFS nelle fibre ottiche monomodali	21
2.3.3 Tecnologia Time Domain Reflectometry (OTDR)	22
2.4 Metodologie BOTDR e BOTDA	
2.5 UNITÀ DI MISURA OSD-1 PER IL MONITORAGGIO DISTRIBUITO DI <i>STRAI</i> N E TEMPERATURA .	
2.6 DEFINIZIONE DEI VALORI SOGLIA DI ALLARME DELLE DEFORMAZIONI	
3.1 Introduzione	30
3.2 Analisi di stabilità cinematica	31
3.2.1 Scivolamento su un piano	32
3.2.2 Scivolamento di un cuneo	33
3.2.3 Ribaltamento	33
3.3 Analisi di stabilità dinamica	34
3.3.1 Analisi dinamica di scivolamento di blocchi	34
3.3.2 Applicazione di forze	35
3.3.3 Analisi dinamica di scivolamento di cunei	35
3.3.4 Analisi dinamica di ribaltamento	
CAPITOLO 4 - TECNOLOGIE GEOMATICHE PER IL RILIEVO GEOLOGICO E	20
4.1 INTRODUZIONE	
4.2 TERRESTRIAL LASER SCANNING (TLS)	
4.2.1 Inpologie di strumento	
4.2.2 Progettazione delle attivita e acquisizione dei dati	
4.5 KILLEVI UAV	
4.2.1 INHIOLINZIONE	/ 4 مر
4.).2 I'UUYTUMMUTUU UUYUUU	42 ۸ ۸
4331 Structure from Motion	44 44
4.3.3.2 Acquisizione delle immagini ed estrazione dei keypoint	
. 0 51	

4.3.3.3 Ricostruzione della scena 3D	46
4.3.3.4 Post-processing e generazione del DEM	46
4.4 IL RILIEVO TOPOGRAFICO MEDIANTE STAZIONE TOTALE (TS)	
4.5 IL SISTEMA GNSS	
4.5.1 Modalità di posizionamento	
4.5.2 Rilievi DGPS	
4.5.3 Rilievi GPS in modalità statica	
CAPITOLO 5 - CASO STUDIO N. 1: MONITORAGGIO DELLO <i>STRAIN</i> TRAMIT	E DOFS
IN UNA CAVA A CIELO APERTO	51
Contributo di C. Lanciano	51
5.1 Introduzione	51
5.2 LE ALPI APUANE: INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO	
5.3 LA "CAVA PIASTRA BAGNATA"	
5.4 Materiali e metodi	
5.4.1 Rilievo geologico-strutturale e geomeccanico	
5.4.2 Analisi petrografiche	
5.4.3 Classificazione dell'ammasso roccioso	61
5.4.4 Analisi di stabilità del versante	61
5.4.5 Rilievo DGPS e topografico	
5.4.5.1 Acquisizione dei dati	62
5.4.5.2 Elaborazione dei dati	67
5.4.6 Rilievo UAV	
5.4.6.1 Acquisizione dei dati	70
5.4.6.2 Elaborazione dei dati	71
5.4.7 Rilievi DOFS	
5.4.7.1 Progettazione e installazione del sistema di monitoraggio mediante DOFS	73
5.5 RISULTATI	75
5.5.1 Caratterizzazione geologico-strutturale	75
5.5.2 Caratterizzazione petrografica	75
5.5.3 Caratterizzazione geomeccanica e rappresentazione delle discontinuità	
5.5.4 Classificazione dell'ammasso roccioso	
5.5.5 Analisi di stabilità cinematica	
5.5.6 Analisi di stabilità dinamica	
5.5.6.1 Calcolo dei coefficienti sismici orizzontale e verticale	
5.5.6.2 Verifica della stabilità	84
5.5.7 Prodotti dei rilievi topografici e DGPS	
5.5.8 Prodotti fotogrammetrici	
5.5.9 Risultati delle acquisizioni DOFS	
5.6 DISCUSSIONE	
5.7 Conclusioni	
CAPITOLO 6 - CASO STUDIO N. 2: MONITORAGGIO DELLO STRAINE DELLA	۱.
TEMPERATURA IN UNA CAVA IN SOTTERRANEO	
Contributo di C. Lanciano	
ABSTRACT	
6.1 INTRODUZIONE	
6.2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO	
6.3 MATERIALI E METODI	
6.3.1 Rilievo geologico-strutturale e geomeccanico	
6.3.2 Analisi petrografiche	
6.3.3 Classificazione dell'ammasso roccioso	
6.3.4 Analisi di stabilità di versante	
6.3.5 Rilievo DGPS e topografico	
6.3.5.1 Acquisizione dei dati	
6.3.5.2 Elaborazione dei dati	

6.3.6 Terrestrial Laser Scanning	
6.3.6.1 Acquisizione dei dati	
6.3.6.2 Elaborazione dei dati in ambiente Trimble® Realworks	
6.3.7 Rilievi DOFS	
6.3.7.1 Progettazione e installazione del sistema di monitoraggio mediante DOFS	
6.4 RISULTATI	
6.4.1 Caratterizzazione geologico-strutturale	
6.4.2 Caratterizzazione petrografica	
6.4.3 Caratterizzazione geomeccanica e rappresentazione delle discontinuità	
6.4.4 Classificazione dell'ammasso roccioso	
6.4.5 Analisi di stabilità cinematica	
6.4.6 Analisi di stabilità dinamica	
6.4.6.1 Calcolo dei coefficienti sismici orizzontale e verticale	
6.4.6.2 Verifica della stabilità	
6.4.7 Prodotti dei rilievi topografici e DGPS	
6.4.8 Prodotti del TLS	
6.4.9 Risultati delle acquisizioni DOFS	
6.5 DISCUSSIONE	
6.6 CONCLUSIONI	

CAPITOLO 7 - CASO STUDIO N. 3: MONITORAGGIO DELLO *STRAIN* E DELLA TEMPERATURA IN UNA CAVA A CIELO APERTO E CONFRONTO CON CONTEMPORANEI DATI DI MONITORAGGIO TOPOGRAFICO E GEOTECNICO137

ABSTRACT	137 138 138 140 140 140 141
 7.1 INTRODUZIONE	138 138 140 140 140 141
7.2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO 7.3 MATERIALI E METODI	138 140 <i>140</i> <i>140</i> <i>141</i>
7.3 MATERIALI E METODI	140 140 140 141
731 Dilione geologice structurale e geomecoanice	140 140 141
7.9.1 Kuevo geologuo-sirullurule e geometlanuo	140 141
7.3.2 Analisi petrografiche	141
7.3.3 Classificazione dell'ammasso roccioso	
7.3.4 Analisi di stabilità di versante	141
7.3.5 Rilievo UAV	141
7.3.5.1 Acquisizione dei dati	141
7.3.5.2 Elaborazione dei dati	142
7.3.6 Sistema di monitoraggio topografico e geotecnico	144
7.3.6.1 Stazione Totale Robotizzata (RTS)	144
7.3.6.2 Sistema di monitoraggio geotecnico	146
7.3.7 Rilievi DOFS	148
7.3.7.1 Progettazione e installazione del sistema di monitoraggio mediante DOFS	148
7.4 RISULTATI	148
7.4.1 Caratterizzazione geologico-strutturale	148
7.4.2 Caratterizzazione petrografica	149
7.4.4 Classificazione dell'ammasso roccioso	153
7.4.5 Analisi di stabilità cinematica	154
7.4.6 Analisi di stabilità dinamica	155
7.4.6.1 Calcolo dei coefficienti sismici orizzontale e verticale	155
7.4.7 Prodotti fotogrammetrici	159
7.4.8 Risultati della RTS	165
7.4.9 Risultati del sistema di monitoraggio geotecnico	167
7.4.10 Risultati delle acquisizioni DOFS	169
7.5 DISCUSSIONE	175
7.6 CONCLUSIONI	181
ISCUSSIONE	183
ONCLUSIONI	186

BIBLIOGRAFIA	
ALLEGATI	
Allegato Nº 1: Dati della RTS	
ALLEGATO Nº 2: DATI DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO GEOTECNICO	

Elenco dei principali acronimi

BFS	Brillouin Frequency Shift
BOTDA	Brillouin Optical Time Domain Analysis
BOTDR	Brillouin Optical Time Domain Reflectometer
CL	Catodoluminescenza
СР	Check Point
CTR	Carta Tecnica Regionale
DB	Database
DOFS	Distributed Optical Fiber Sensors
FBG	Fiber Bragg Grating
GIS	Geographical Information Systems
GLONASS	GLObal NAvigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GCP	Ground Control Point
ISRM	International Society of Rock Mechanics
JCS	Joint Compressive Strength
JRC	Joint Roughness Coefficient
OFS	Optical Fiber Sensors
RQD	Rock Quality Designation
RMR	Rock Mass Rating
RTS	Robotic Total Station
SBS	Stimulated Brillouin Scattering
SEM-EDS	Microscopia Elettronica a Scansione
SfM	Structure from Motion
SWIR-NIR	Spettroscopia all'infrarosso
TLS	Terrestrial Laser Scanning
ТР	Tie Point
TS	Total Station
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
XRD	Diffrattometria a raggi X

Capitolo 1 - Introduzione

1. 1 Stato dell'arte sull'uso dei sensori in fibra ottica per il monitoraggio

Nata negli anni Settanta nel campo delle telecomunicazioni su lunga distanza, la tecnologia della fibra ottica è stata caratterizzata da una forte evoluzione nel corso degli ultimi decenni. Uno *spin-off* di tale scienza tecnologica è rappresentato dalle applicazioni di rilevamento (*sensing*), oggi sempre più utilizzate per finalità di monitoraggio in campo strutturale e geotecnico.

Esempi di sensoristica largamente diffusa sono: la tecnologia Fiber Bragg Grating (FBG), di tipo single e multi-point, in cui le regioni di rilevamento possono essere distanziate da pochi millimetri a diversi metri; con i Sensori Distribuiti in Fibra Ottica (DOFS) l'intera lunghezza della fibra (fino a 150/200 km) può essere utilizzata per rilevare uno o più parametri fisici ad essa esterni. In particolare, numerosi studi di monitoraggio di geostrutture sono stati realizzati utilizzando i DOFS (Yun & Min, 2011; Bhalla et al., 2005; Schallert et al., 2007; Grattan, et al., 2009). Tra le metodologie di acquisizione dati pertinenti a tale categoria occorre menzionare le metodologie Brillouin Optical Time Domain Reflectometer (BOTDR) e Brillouin Optical Time-Domain Analysis (BOTDA), entrambe basate sullo Shift di Frequenza di Brillouin (Brillouin Frequency Shift, BFS). I sistemi di monitoraggio basati su tali tecniche sono generalmente costituiti da tre componenti principali: sensori in fibra ottica distribuiti (e montati sulle strutture oggetto di analisi) atti alle misure di strain (deformazione) e temperatura, sistemi di acquisizione dati (acquisizione, trasmissione e memorizzazione dei dati) e, infine, sistemi di valutazione dello stato di salute della struttura monitorata (Li et al., 2004; Iten et al., 2012; Hong et al., 2017).

Nel contesto del monitoraggio dei siti di estrazione, la recente letteratura tratta l'applicazione di reti in fibra ottica volte alla sorveglianza di integrità strutturale, sicurezza ambientale e parametri di produzione. Nell'ottica della prevenzione di incidenti e realizzazione di attività di *early warning*, ad esempio, la fibra ottica risulta essere idonea per il monitoraggio di *strain*, eventi sismici, pressione di estrazione, gas metano, temperatura e pressione dell'acqua.

Moffat et al. (2015) presentano tre diverse applicazioni di fibre ottiche BOTDR per il monitoraggio di strutture sotterranee. Nello specifico, si tratta della misura dello *strain* di tre diverse tipologie di elementi: un tubo strumentato in PVC progettato per essere fissato, in qualità di sensore, alla parete laterale e al soffitto del tunnel monitorato; bulloni da roccia (*rock bolts*); un rivestimento in calcestruzzo sotto carico. Kumar (2010) presenta due tipologie di sensori applicabili al contesto dei siti di estrazione: un sensore in fibra ottica ad onde evanescenti per il rilevamento di gas metano nell'intervallo 0-10% e un sensore di deformazione basato sulla tecnologia FBG per il monitoraggio delle condizioni di funi d'acciaio. In Ho et al. (2017) si propone una piastra di ancoraggio intelligente che utilizza un sensore FBG per monitorare il livello di carico dei bulloni impiegati per rinforzare le masse rocciose di gallerie minerarie e strutture sotterranee di scavo. Valley et al. (2012) presentano un sistema BOTDA, con risoluzione spaziale di 10 cm, testato in laboratorio e installato in cinque fori di perforazione; i dati acquisiti dal sistema sono poi stati validati con successo mediante confronto con i risultati dell'estensimetro.

Nosenzo et al. (2013) illustrano l'applicazione di sensori FBG per il monitoraggio delle deformazioni della pavimentazione stradale di un'autostrada determinate dalla subsidenza del terreno indotta dalle attività estrattive svolte in miniere di carbone sotterranee (New South Wales, Australia). In particolare, sono stati installati 840 sensori di deformazione e temperatura nella pavimentazione autostradale mediante *array* FBG incapsulati in cavi compositi in fibra di vetro. I sensori e le apparecchiature di demodulazione associate forniscono misurazioni continue della deformazione lungo il marciapiede, consentendo il monitoraggio continuo degli effetti della subsidenza mineraria sul marciapiede e l'implementazione tempestiva delle misure di mitigazione e risposta pianificate per garantire la sicurezza e la manutenzione dell'autostrada durante il periodo di estrazione.

Molto interessante è il sistema per il monitoraggio *real-time* di miniere sotterranee basato su sensori in fibra ottica (Raman, Brillouin, Fabery–Perot e Bragg) e reti di sensori *wireless* implementato da Zrelli ed Ezzedine (2018); il sistema risulta essere in grado di rilevare e localizzare deformazioni e variazioni di temperatura e umidità.

Liu et al. (2018) descrivono un sistema in fibra ottica finalizzato al monitoraggio della sicurezza di miniere di carbone sotterranee in Cina. Naruse et al. (2007) presentano l'installazione, presso la miniera di El Teniente (Cile), di un sistema di monitoraggio in sotterraneo basato sulle fibre ottiche e finalizzato al monitoraggio della deformazione legata alle attività di escavazione. Il sistema consiste in sensori in fibra ottica ancorati al soffitto e alle pareti laterali dei tunnel tramite bulloni da roccia. Wang et al. (2014) illustrano un sistema di monitoraggio interamente in fibra ottica finalizzato al controllo della sicurezza della miniera di carbone di Linzi Coal Mine (Shandong, Cina); tale sistema è costituito da sensori sismici e sensori in grado di misurare gas metano, pressione di estrazione, pressione dell'acqua e temperatura.

Il lavoro di Bin e Hua (2018) presenta un'applicazione della tecnica BOTDR basata su sensori installati in pozzi per monitorare la deformazione della roccia all'interno di una carreggiata scavata nella miniera di carbone di Zhangji (Cina). Zhao et al. (2015) hanno proposto una metodologia di monitoraggio della deformazione di strati rocciosi sovrastanti un giacimento di carbone nel sito estrattivo di Zhu Xian-Zhuang (Cina) basata sui sensori di spostamento FBG. Cheng et al. (2015) presentano un lavoro sullo studio della deformazione di strati sovrapposti di carbone applicando la tecnologia BOTDR. Zhigang et al. (2018) hanno realizzato uno studio sperimentale sfruttando sensori in fibra ottica per il monitoraggio della deformazione negli strati superficiali di roccia di scarto del processo di estrazione nella miniera di ferro a cielo aperto di Nanfe (Cina). Arzu et al. (2015) hanno costruito un laboratorio sperimentale contenente un sistema in fibra ottica per simulare fenomeni franosi e registrare i relativi movimenti.

In Italia, Matano et al. (2016) descrivono l'implementazione di un sistema integrato finalizzato al controllo della stabilità di un versante roccioso della scogliera di tufo di Coroglio, situata nell'area costiera di Napoli ai margini della caldera vulcanica attiva dei Campi Flegrei. Schenato et al. (2017), infine, presentano un modello fisico, che riproduce una frana superficiale indotta da precipitazione, dotato di un sistema DOFS per il rilevamento dello *strain*. I risultati DOFS sono stati confrontati con quelli di sensori convenzionali installati in determinate posizioni lungo il pendio artificiale. Nel complesso, il sistema ottico è risultato essere uno strumento senza precedenti per il monitoraggio e la caratterizzazione degli eventi franosi.

1.2 Obiettivi della ricerca

Grazie alle peculiarità di carattere geologico della penisola italiana, i siti di estrazione sono abbastanza diffusi in tutte le regioni (Istat, 2017). In particolare, la Regione Toscana è contraddistinta dalla presenza delle cave di marmo, le quali, producendo 4 milioni di tonnellate di marmo ogni anno, con 13'000 persone coinvolte, rappresentano una forte attività economica dell'area. Il mercato nel suo complesso, infatti, vale oltre 1,1 miliardi di dollari (Business Insider, 2019).

Nonostante la loro indiscutibile rilevanza di ordine economico, i siti di estrazione del marmo sono ambienti pericolosi in cui si verificano frequentemente eventi come crolli di roccia e, di conseguenza, incidenti spesso mortali. Le attività di cava, infatti, vengono svolte, generalmente, in aree ristrette e adiacenti alle pareti oggetto di coltivazione, per cui, spesso, la rapidità dei fenomeni di crollo non consente di avere utili tempi di evacuazione. Poiché molti lavoratori operano in tali siti, affrontare la questione della sicurezza sui luoghi di lavoro si presenta come una questione di fondamentale importanza. L'applicazione di moderne tecnologie e l'esecuzione di appropriate analisi di stabilità degli ammassi rocciosi possono contribuire al miglioramento delle condizioni di sicurezza sul lavoro. Al fine di ricavare utili informazioni sullo stato dell'ammasso roccioso, occorre rilevare dati che caratterizzino il sito oggetto di analisi, come, ad esempio, le proprietà dell'ammasso in roccia e dei sistemi di fratturazione. Esistono diversi metodi per acquisire questa tipologia di dato; i più diffusi sono basati su indagini geologiche e geomeccaniche, sensori geotecnici, interferometria radar terrestre e misure topografiche con Global Navigation Satellite System (GNSS) e stazione totale robotizzata. Ognuno di questi metodi presenta sia vantaggi che limitazioni, per cui spesso risulta essere necessario applicarli in maniera integrata e complementare. Le principali limitazioni consistono nella difficoltà di previsione degli spostamenti degli ammassi rocciosi e di rilevamento delle microdeformazioni.

Una tecnologia a prezzi accessibili che possa colmare le lacune delle varie metodologie potrebbe aiutare a cogliere segnali di eventuali cedimenti in tempi utili per consentire la sicurezza dei lavoratori e la preservazione dei beni materiali. Ragionando in quest'ottica, si è pensato di testare i DOFS, tecnologia di recente generazione in grado di fornire, in tempo reale, misure infinitamente accurate (a livello sub-millimetrico) di eventuali movimenti degli ammassi rocciosi in aree estese ed in modo spazialmente continuo. Inoltre, installando un sistema in fibra ottica dall'elevata risoluzione spaziale (10-20 cm) è possibile ottenere importanti informazioni aggiuntive sui processi di deformazione della massa rocciosa (rispetto a quelle ricavabili dalle tradizionali metodologie).

In particolare, il presente elaborato di tesi si propone di rispondere a due domande: se il monitoraggio DOFS, già applicato in campo strutturale, possa essere sperimentato anche nell'ambito di versanti artificiali morfologicamente complessi e dalle condizioni climatiche estremamente variabili come le cave di marmo delle Alpi Apuane; se tale metodologia consenta, attraverso l'installazione di centinaia di metri di sensoristica in fibra ottica, di superare un monitoraggio di tipo puntuale, come quello geotecnico o topografico, in favore di una tecnica di tipo areale, ma a costi contenuti e con ulteriori vantaggi rispetto alle altre tecniche di tipo areale. Ad esempio, una tecnica areale valida e dalle precisioni elevate per il monitoraggio delle deformazioni è rappresentata dall'interferometria radar terrestre (Casagli, Catani, Del Ventisette, & Luzi, 2010; Monserrat, Crosetto, & Luzi, 2014; Rouyet, et al., 2017). Tuttavia, se paragonata ai DOFS, tale tecnologia presenta alcune limitazioni: i) costi abbastanza elevati; ii) necessità di ampi piazzali in relazione alle altezze

dei fronti da monitorare per garantirne la totale visibilità; iii) maggiore complessità del *data processing*, con un conseguente aumento dei tempi necessari per l'analisi dei dati.

L'idea di base del presente elaborato di tesi consiste nella progettazione e nell'implementazione di un sistema di monitoraggio sperimentale di fronti di siti di estrazione del marmo potenzialmente instabili mediante DOFS dotati di un idoneo apparato di misura e trasmissione dati.

Sebbene siano già stati testati in contesti minerari (Cheng et al., 2015; Zhao, et al., 2015; Ho et al., 2017; Bin & Hua, 2018; Liu, et al., 2018; Zhigang et al., 2018; Zrelli & Ezzedine, 2018), la sperimentazione dei sensori in fibra ottica all'interno delle cave di marmo delle Alpi Apuane costituisce un elemento di assoluta novità. Inoltre, le caratteristiche peculiari di tali siti di estrazione, come versanti e pareti sub-verticali, spesso aggettanti, e gallerie, li rendono luoghi ideali per lo sviluppo sperimentale del sistema di monitoraggio mediante fibre ottiche.

Il sistema DOFS è stato supportato dall'applicazione di tradizionali tecniche di rilevamento geologico e geomeccanico e di moderne tecnologie geomatiche (drone, laser scanner terrestre, strumentazione GNSS e stazione totale), metodologie dalle quali non si può prescindere in toto, sia ai fini di un'esauriente caratterizzazione e rappresentazione cartografica dei siti oggetto di analisi sia per avere dati di diversa origine da confrontare e validare. Lo scopo della ricerca, quindi, è anche quello di collaborare allo sviluppo di un sistema di monitoraggio basato sull'applicazione integrata di più tecniche per la verifica della stabilità di fronti di siti di estrazione del marmo, sia in sotterraneo che a cielo aperto. Un sistema più efficiente e meglio distribuito dal punto di vista spaziale, se paragonato ai tradizionali sistemi di sorveglianza di tipo puntuale, è in grado, in caso di movimenti dell'ammasso roccioso, di inviare segnali di allerta e fornire indicatori di eventuali variazioni delle condizioni di stabilità e sorgenti di potenziale rischio. Uno strumento di questo tipo, in grado di rilevare in tempo reale gli eventuali spostamenti degli ammassi rocciosi, potrebbe in futuro essere adottato da ulteriori cave, al fine di, garantire un adeguato livello di sicurezza sui luoghi di lavoro e pianificare sul medio-lungo termine le operazioni di estrazione del marmo, sia nell'ottica della tutela della salute dei lavoratori che nell'interesse delle attività produttive.

1.3 Metodologia

La metodologia adottata, come detto, prevede l'applicazione integrata di tradizionali tecniche per il rilevamento geologico e geomeccanico con moderne tecnologie geomatiche e DOFS basati sullo *Shift* di Frequenza di Brillouin. Mentre i rilievi tradizionali consentono di effettuare la caratterizzazione geologico-strutturale e geomeccanica dei siti, le tecnologie geomatiche utilizzate (sistemi GNSS, rilievi topografici, drone e *laser scanning* terrestre) permettono sia di rilevare sistemi di discontinuità in zone inaccessibili sia di georeferenziare e mappare la posizione dei cavi sensori in fibra ottica. Mediante i DOFS è possibile acquisire dati distribuiti sia di temperatura che di *strain*. Questi ultimi sono di fondamentale importanza al fine di ottenere grafici dell'andamento delle deformazioni e seguire nel corso del tempo l'evoluzione di eventuali fratture o discontinuità presenti nelle pareti o pilastri di marmo sottoposti a monitoraggio.

Di seguito si riporta una breve descrizione delle metodologie applicate per ciascuno dei tre siti.

- <u>Cava Piastra Bagnata</u>: rilievo geologico-strutturale e geomeccanico; analisi petrografiche; rappresentazione delle discontinuità; analisi di stabilità dei versanti cinematica e dinamica; rilievo *Differential Global Positioning System* (DGPS); rilievo topografico mediante stazione totale; rilievo fotogrammetrico con drone; installazione e rilievi DOFS di tipo BOTDR; elaborazione, rappresentazione e interpretazione dei dati geologici, geomatici e da fibra ottica; definizione del valore soglia di allarme per lo *strain*.
- <u>Cava del Piastraio di Sotto</u>: rilievo geologico-strutturale e geomeccanico; analisi petrografiche; rappresentazione delle discontinuità; analisi di stabilità cinematica e dinamica; Rilievo DGPS; rilievo topografico mediante stazione totale; rilievo *laser scanning* terrestre; installazione e rilievi DOFS di tipo BOTDA e BOTDR; elaborazione, rappresentazione e interpretazione dei dati geologici, geomatici e da fibra ottica; definizione del valore soglia di allarme per lo *strain*.
- <u>Cava Lorano "I" n°22</u>: rilievo geologico-strutturale e geomeccanico; analisi petrografiche; rappresentazione delle discontinuità; analisi di stabilità dei versanti cinematica e dinamica; rilievo fotogrammetrico con drone; installazione e rilievi DOFS di tipo BOTDA; elaborazione, rappresentazione e interpretazione dei dati geologici, geomatici e da fibra ottica; definizione del valore soglia di allarme per lo *strain*; confronto tra dati DOFS e dati provenienti dal sistema di monitoraggio topografico e geotecnico già esistente.

1.4 Articolazione della tesi

La Tesi di Dottorato è suddivisa in sette Capitoli. Il presente capitolo (n. 1) è dedicato all'introduzione, ovvero alla descrizione di idea, motivazioni, obiettivi e metodologia dell'attività di ricerca. I capitoli immediatamente successivi (n. 2, 3 e 4) si riferiscono alle diverse tecnologie adottate ai fini dell'acquisizione dei dati e al loro stato dell'arte. Nello specifico, il Capitolo 2 è focalizzato sui DOFS, in particolare sui sensori basati sul metodo BFS. Nello specifico, in tale sezione vengono descritte le due metodologie adottate nelle cave oggetto di studio, ovvero le tecniche BOTDR e BOTDA, e presentato il sistema di acquisizione dei dati di *strain* e temperatura adottato, denominato "OSD-1" (Optosensing s.r.l). In seguito, il Capitolo 3 affronta la caratterizzazione e le analisi di stabilità, sia cinematica che dinamica, dei versanti rocciosi. Il Capitolo 4 descrive le tecniche geomatiche applicate nel presente lavoro: rilievi *Terrestrial Laser Scanning* (TLS), riprese con *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) e, infine, rilievi topografici mediante stazione totale e GNSS.

I Capitoli 5, 6 e 7 illustrano i tre diversi casi studio cui sono state applicate le metodologie precedentemente citate. Il primo caso studio (Capitolo 5) riguarda il monitoraggio dello *strain* di una parete di una cava a cielo aperto, la Cava Piastra Bagnata (Comune di Vagli di Sotto, Lucca). Il fronte estrattivo selezionato è caratterizzato dalla presenza di fratture che si sviluppano per lunghezze variabili da decimetriche a decametriche penetrando verso l'interno per spessori difficilmente stimabili (spesso la loro persistenza supera il metro di lunghezza). L'intersezione tra i vari sistemi di fratturazione e la superficie del versante genera blocchi e cunei rocciosi, di dimensioni variabili, che possono essere soggetti ad eventuali fenomeni di instabilità gravitativa. Di conseguenza, si tratta di una parete adatta per il monitoraggio mediante DOFS e rilievi geomatici.

Il secondo caso studio (Capitolo 6) presenta il monitoraggio dello *strain* e della temperatura di due pilastri di una cava in sotterraneo, la Cava del Piastraio di Sotto (Levigliani, Comune di Stazzema, Lucca). Essendo le due strutture caratterizzate dalla presenza di sistemi di discontinuità, in virtù della necessità di esercitare l'attività estrattiva in condizioni di sicurezza, la cava si presta al monitoraggio mediante DOFS e tecnologie geomatiche. Tale sito, inoltre, sviluppandosi in sotterraneo, rappresenta una particolarità rispetto agli altri due casi studio.

Il terzo caso studio (Capitolo 7) tratta il monitoraggio dello *strain* e della temperatura di un contrafforte residuo di precedenti escavazioni (Tecchia di Pradetto) appartenente alla Cava Lorano I n° 22 (Carrara, Massa-Carrara) e il confronto con contemporanei dati di monitoraggio topografico e geotecnico. A partire dall'anno 2012, infatti, tale contrafforte viene costantemente tenuto sotto osservazione mediante un sistema di monitoraggio topografico e geotecnico costituito da Stazione Totale Robotizzata (RTS) e sensori geotecnici (estensimetri, fessurimetri e inclinometri). Pertanto, la peculiarità di questo caso studio consiste nella possibilità di effettuare anche un confronto tra dati rilevati da strumentazione di diverso tipo.

Seguono, infine, la discussione dei risultati ottenuti, le conclusioni finali, i riferimenti bibliografici e gli allegati.

Capitolo 2 - Sensori Distribuiti in Fibra Ottica (DOFS)

2.1 Introduzione

Dopo aver introdotto i sensori in fibra ottica, nel presente Capitolo saranno passate in rassegna modalità di funzionamento, tipologie e caratteristiche dei DOFS. Particolare attenzione verrà posta sul BFS nelle fibre ottiche monomodali e su due tecniche di acquisizione dei dati, ovvero le metodologie BOTDR e BOTDA. Mentre la prima si basa sullo *scattering* spontaneo di Brillouin, la seconda è incentrata sullo *scattering* stimolato che consente di ottenere un intervallo di rilevamento più esteso e una maggiore risoluzione spaziale. Nell'ambito del presente progetto di ricerca, entrambe le tecnologie sono state adottate ai fini del rilevamento dei dati di *strain* e temperatura presso i siti di estrazione del marmo oggetto di studio. Nella parte conclusiva del Capitolo, infine, viene presentato il sistema di monitoraggio "OSD-1" fornito dalla società Optosensing s.r.l. (società *spin-off* della Seconda Università di Napoli) nell'ambito della collaborazione nel progetto di ricerca e sviluppo "CAV_OTT – Monitoraggio in tempo reale delle pareti di cava mediante utilizzo di fibre ottiche". In particolare, verranno illustrate le caratteristiche di tale sistema di monitoraggio, focalizzando l'attenzione sulla centralina preposta all'acquisizione dei dati e sui componenti del cavo sensore.

2.2 Sensori in Fibra Ottica (OFS)

Nell'ambito delle telecomunicazioni, al fine di realizzare la migliore comunicazione possibile, le fibre vengono isolate per mezzo di tecniche di cablaggio. Tuttavia, poiché le perturbazioni esterne modificano le proprietà della luce che viaggia nella guida d'onda, è possibile usare la fibra ottica per rilevare, monitorare e persino misurare tali perturbazioni in un formato integrale o distribuito. Un dispositivo in grado di rilevare, misurare e riprodurre fedelmente una determinata variabile fisica nel dominio elettrico è definito come "sensore." Se tale dispositivo è basato sull'utilizzo della luce e il misurando è in grado di modificare alcune delle proprietà della luce, si avrà un "sensore fotonico" oppure un "sensore ottico". Nell'ambito dei sensori ottici, per sensore in fibra ottica (Optical Fiber Sensors, OFS) si intende l'insieme costituito dalla fibra ottica e dalla tecnologia implementata intorno ad essa. In particolare, i sensori distribuiti in fibra ottica (DOFS) sono in grado di rilevare e misurare variabili lungo l'intera estensione della fibra che, pertanto, funge sia da trasduttore distribuito che da canale ottico (Raju, 2017). I sensori in fibra ottica presentano molti vantaggi rispetto ai sensori elettronici tradizionali: i) leggerezza, dimensioni contenute e facilità di installazione; ii) elevata precisione; insensibilità ai campi elettromagnetici; iii) resistenza alle alte temperature, a corrosione metallica e antideflagranza; iv) possibilità di rilievo di aree normalmente inaccessibili; v) possibilità di interfacciarsi con i sistemi di comunicazione dei dati, trasmissione sicura dei dati. Inoltre, la sensoristica in fibra ottica consente di effettuare misure su grandi distanze (dell'ordine chilometrico), sfruttando un coefficiente di attenuazione molto basso e la possibilità di implementare molteplici sensori in una singola fibra.

2.2.1 OFS intrinseci ed estrinseci

In base alla caratteristica considerata, come processi di modulazione e demodulazione, applicazione, punti di misura, ecc., esistono diversi modi per classificare gli OFS. Prendendo in considerazione la modulazione, a seconda che la variazione di alcune proprietà della luce convogliata sia prodotta all'interno o all'esterno (ovvero in un altro mezzo) della fibra ottica, è possibile distinguere due diversi tipi di OFS (Figura 2.1): sensori intrinseci (la modulazione avviene direttamente nella fibra) ed estrinseci (la modulazione viene realizzata per mezzo di un trasduttore esterno). In particolare, questi ultimi sono dotati di un dispositivo separato in cui la luce viene alterata (o modulata). Il fascio luminoso esce dalla fibra ed entra nell'ambiente di misura in cui viene modificato per poi essere raccolto dalla stessa fibra o da un'altra. Tale tecnologia è largamente applicata per misurazioni in ambito chimico e biochimico (Irrera & Porcari, 2014).

I sensori intrinseci, invece, utilizzano parte della fibra in qualità di sensore. Le perturbazioni agenti sulla fibra modificano alcune caratteristiche della luce che si propaga al suo interno ed è possibile risalire all'entità delle stesse perturbazioni che hanno modificato la propagazione del fascio luminoso. Questo, però, significa poter misurare solo fenomeni esterni alla fibra che, in qualche modo, modificano la propagazione della luce. Poiché nei sensori intrinseci la luce non lascia mai la fibra, vengono eliminate le interferenze tra la fibra e la zona di modulazione e, di conseguenza, la misura risulta essere di buona qualità. I sensori di tipo intrinseco sono spesso utilizzati per effettuare rilevamenti in ambito fisico (Irrera & Porcari, 2014).

I sensori intrinseci, a loro volta, possono essere classificati in (Figura 2.2): i) *single point*, nei quali la porzione della fibra dedicata al rilevamento è localizzata alla sua estremità; misurano parametri singoli o multipli in corrispondenza di un determinato punto spaziale; ii) *multi-point* (sensori quasi distribuiti), costituiti da due o più regioni di rilevamento lungo la lunghezza della fibra, ognuna delle quali può acquisire lo stesso parametro oppure una grandezza diversa. La tecnologia *Fiber Bragg Grating* (FBG) è un esempio di sensoristica *single point* e *multi-point* in cui le regioni di rilevamento possono essere distanziate da pochi millimetri a diversi metri; iii) DOFS (sensori distribuiti), tali che l'intera lunghezza della fibra (fino a 150/200 km) può essere usata per rilevare uno o più parametri esterni.



Figura 2.1. Schema rappresentativo delle due tipologie di sensori: intrinseci (a) ed estrinseci (b). Immagine adattata da Irrera e Porcari, 2014.



Figura 2.2. Classificazione dei sensori intrinseci: sensori single point, multi-point e distribuiti (Krohn, 2015).

2.3 DOFS

I DOFS rappresentano una tecnologia specializzata che consente di misurare un parametro lungo una regione spazialmente continua utilizzando esclusivamente una scatola optoelettronica e un cavo sensibile in fibra ottica (a differenza dei sensori discreti che richiedono un elevato numero di cavi di connessione). Questa metodologia è in grado di eseguire misurazioni altrimenti impossibili, impraticabili o estremamente costose da eseguire. Rispetto ai sensori puntuali quelli distribuiti sono più versatili e potenti in quanto non richiedono una conoscenza a priori del comportamento strutturale da analizzare. In un sensore distribuito la stessa fibra ottica diventa un sensore e, dal momento che le misurazioni vengono eseguite lungo l'intera fibra collegata ai dispositivi di lettura, non è più necessario implementare le posizioni previste del sensore come nel caso dei sensori quasi-distribuiti.

Ne deriva la maggior efficienza dei DOFS rispetto agli altri tipi di sensori e la possibilità di monitorare "in continuo", nello spazio e nel tempo, strutture ed elementi di diverso tipo. Le applicazioni di questa sensoristica sono molteplici e adattabili ai più svariati settori: dalla misura di temperatura e deformazione di grandi opere, quali dighe, viadotti, gallerie, ecc., oltre che di grandezze da esse derivate, come grado di umidità e stati tensionali, ad applicazioni in ambito industriale (misura di carichi distribuiti, gradiente termico, ecc.). Esistono inoltre applicazioni destinate alla diagnostica di infrastrutture asservite alla distribuzione di acqua, gas e petrolio così come al controllo del territorio (es. studio, monitoraggio e prevenzione di fenomeni franosi e di eventi sismici, studio dei gradienti termici nel sottosuolo nell'ambito di aree vulcaniche). Il monitoraggio strutturale è emerso recentemente come un potente strumento per la valutazione delle condizioni di "salute" delle infrastrutture. Con la diffusione delle moderne tecnologie di telecomunicazione basate su fibra ottica, le strutture possono essere monitorate periodicamente, oppure in continuo, da una stazione centrale posta a diversi chilometri di distanza. Un sistema di monitoraggio permanente in fibra ottica consente di individuare rapidamente l'insorgere di eventuali danni, in modo tale che siano adottate le azioni necessarie per ridurre il rischio.

Una particolare applicazione consiste nell'utilizzazione delle fibre ottiche come indicatore delle deformazioni di pendii soggetti a movimenti rapidi, ai fini della messa in opera di sistemi di allerta preventiva che potrebbero essere attivati nel momento in cui esse superino una soglia prestabilita.

Con la tecnologia DOFS, le fibre vengono ancorate alla superficie o incorporate all'interno del materiale. Quando deformazioni e variazioni di temperatura vengono trasferite alla fibra ottica, il segnale disperso all'interno della fibra è modulato da questi parametri fisici. Misurando la variazione di tale segnale modulato, si ottiene il rilevamento o *sensing*.

Rispetto agli altri sistemi di misura, il grande problema dei DOFS è costituito dalla necessità di determinare continuamente il valore del misurando come funzione della posizione lungo il percorso della fibra ottica e con definibili risoluzione spaziale e sensibilità. Ciò significa che ciascuna misura deve essere in qualche modo associata ad una determinata sezione della fibra la cui posizione deve essere nota. Nei casi in cui sia importante mantenere le caratteristiche della fibra come mezzo dielettrico passivo, non sarà possibile identificare la posizione per mezzo di un trasmettitore codificato attivo. L'identificazione deve essere effettuata a partire dall'una o dall'altra estremità della fibra; in alcuni casi occorre utilizzare entrambe le estremità (Rogers , 1999).

I principali parametri comunemente usati per caratterizzare i DOFS sono di seguito elencati: i) risoluzione spaziale, la più piccola lunghezza della fibra sulla quale è possibile rilevare la variazione spaziale della grandezza osservata; ii) sensibilità, la variazione della potenza ottica del rivelatore, prodotta da una modifica dell'unità del campo di misura per unità di lunghezza della fibra; iii) accuratezza, ovvero l'accuratezza con cui la potenza di uscita del rivelatore può essere misurata rispetto ai livelli di rumore del sistema; iv) gamma dinamica, il rapporto tra i valori massimi e minimi del campo di misura che consente di effettuare il rilievo con l'accuratezza richiesta; v) larghezza di banda di misura, la larghezza di banda su cui possono essere misurate le variazioni nel campo di misura per l'intera lunghezza della fibra.

2.3.1 Fenomeni di scattering

Quando un'onda elettromagnetica viene lanciata in una fibra ottica, la sua propagazione attraverso il mezzo interagisce con atomi e molecole e il campo elettrico induce un dipolo di polarizzazione dipendente dal tempo. Il dipolo indotto genera un'onda elettromagnetica secondaria: questo fenomeno è noto come dispersione o scattering della luce (Bao & Chen, 2012; Barrias et al., 2016). Quando il mezzo in cui si verifica la dispersione è omogeneo, è consentito lo scattering di un solo fascio luminoso in avanti. Tuttavia, la fibra ottica, a causa delle sue variazioni di densità e composizione, è un mezzo disomogeneo, per cui alcuni fotoni ritornano verso la sorgente luminosa, dando luogo al fenomeno del *backscattering*. La luce contropropagante può essere, quindi, utilizzata per ricavare informazioni sulle proprietà della fibra e, di conseguenza, degli effetti ambientali a cui essa è sottoposta.

Per un'onda di luce incidente monocromatica, il *backscattering* della luce proveniente dal segmento di fibra ottica senza difetti o caratteristiche anomale viene decomposto spettralmente in tre picchi distinti corrispondenti a tre diversi fenomeni, ovvero gli *scattering* di Rayleigh, Raman e Brillouin (Raju, 2017; Boyd, 2008; Barrias et al., 2016) (Figura 2.3).



Figura 2.3. Spettri della luce diffusa (Irrera & Porcari, 2014).

Mentre lo *scattering* di Rayleigh è un fenomeno elastico che nasce dall'interazione tra l'onda elettromagnetica e le impurità della silice, lo *scattering* di Raman è un fenomeno di dispersione anelastica che ha origine quando i fotoni della luce incidente interagiscono con le vibrazioni termiche della molecola di silice (fononi termici). Un ulteriore fenomeno inelastico è rappresentato dallo *scattering* di Brillouin, il quale si verifica quando un fotone di luce incidente interagisce con onde acustiche termicamente eccitate dando origine a componenti di *shift* di frequenza. Rispetto alla frequenza ottica della luce originale, i segnali luminosi diffusi di Raman e di Brillouin presentano una differenza di frequenza rispettivamente di $\pm 10^{-13}$ THz e $\pm 10^{-3}$ GHz. La stragrande maggioranza delle tecnologie DOFS si basa su uno o più degli effetti di *scattering* di Rayleigh, Raman e Brillouin. Il rilevamento si realizza utilizzando un appropriato interrogatore che trasmette il segnale ottico nella fibra e raccoglie la radiazione retrodiffusa originata da uno o più dei tre fenomeni. In ogni cella di risoluzione lungo la fibra, il misurando viene dedotto tramite un'elaborazione dedicata.

2.3.2 BFS nelle fibre ottiche monomodali

Il processo di "*scattering* di Brillouin", introdotto al precedente paragrafo, è stato descritto teoricamente per la prima volta da Leon Brillouin nel 1910. Tale fenomeno di *scattering* può essere spontaneo oppure stimolato.

Lo *scattering* spontaneo della luce, principalmente causato da eccitazione termica del mezzo, è proporzionale all'intensità della luce incidente. D'altra parte, il processo di dispersione diventa stimolato se le fluttuazioni nel mezzo sono stimolate dalla presenza di un'altra onda elettromagnetica che rafforza lo *scattering* spontaneo.

Il processo di *scattering* può essere stimolato, a condizione che l'intensità della luce di input abbia un valore superiore ad un livello noto come valore soglia, che è inferiore alla soglia del regime spontaneo. Lo *scattering* stimolato è facilmente osservabile quando l'intensità della luce raggiunge un intervallo compreso tra 106 e 109 Wcm⁻² ed è in grado di modificare le proprietà ottiche del mezzo.

Il fenomeno di *scattering* di Brillouin stimolato (SBS) può essere ottenuto usando due onde ottiche luminose. Oltre all'impulso ottico (*pump*), un'onda continua (*Continuous Wave*, CW), nota come *probe signal*, viene utilizzata per determinare il profilo di frequenza Brillouin della fibra. Una stimolazione dello *scattering* di Brillouin si verifica quando la differenza di frequenza tra l'impulso e il segnale CW corrisponde allo *shift* di Brillouin e a condizione che entrambi i segnali ottici siano contropropagati nella fibra. L'interazione porta ad una

maggiore efficienza di *scattering*, con conseguente trasferimento di energia al *probe signal* e amplificazione dello stesso. L'interazione stimolata di Brillouin nelle fibre a modalità singola può essere modellata dalle equazioni transitorie a tre onde per l'onda di *pump* (pedice *p*) e di Stokes (pedice *s*) con le ampiezze di campo $E_{p,s}(z, t)$ che interagiscono con l'onda acustica $E_a(z, t)$ (nel tempo *t* e in corrispondenza della posizione *z* lungo il fibra):

$$\frac{\partial E_{p}}{\partial z} - \frac{n_{f}}{c} \frac{\partial E_{p}}{\partial t} = E_{a} E_{s}$$

$$(2.1)$$

$$\frac{\partial E_s}{\partial z} + \frac{n_f}{c} \frac{\partial E_s}{\partial t} = E_a E_p$$
(2.2)

$$\frac{\partial E_a}{\partial z} + \Gamma E_a = \frac{1}{2} \Gamma_1 g_B E_p E_a \tag{2.3}$$

$$\Gamma = \Gamma_1 + i\Gamma_2 \tag{2.4}$$

dove n_f è l'indice di rifrazione della fibra, *c* indica la velocità di luce nel vuoto, g_B il fattore di guadagno Brillouin, Γ la costante di attenuazione dell'onda acustica, Γ_I il tempo di smorzamento del fonone, Γ_2 la frequenza angolare di *detuning* data da $\Gamma_2 = 2\pi (v - v_B)$ e, infine, *v* indica la frequenza di *beat* tra l'onda di *probe* e l'onda di *pump*.

2.3.3 Tecnologia Time Domain Reflectometry (OTDR)

I DOFS possono essere basati su differenti tecniche e principi, tra cui particolare importanza riveste la metodologia OTDR (*Time Domain Reflectometry*), sviluppata agli inizi degli anni Ottanta al fine di testare cavi ottici nel campo dell'industria delle telecomunicazioni. Lanciando nella fibra un impulso ottico breve, man mano che il fascio si propaga lungo la fibra, un fotorilevatore elabora la quantità di luce sottoposta a *backscattering*. In questo processo, a causa dello *scattering* di Rayleigh (in conseguenza delle variazioni microscopiche casuali dell'indice di rifrazione del nucleo), si verificano delle perdite.

Il monitoraggio delle variazioni dell'intensità del segnale di Rayleigh di *backscattering* consente il rilevamento delle variazioni spaziali del coefficiente di *scattering* della fibra, vale a dire dell'attenuazione. Se la fibra ottica non è affetta da fenomeni esterni, tale attenuazione decade esponenzialmente con il tempo. Dall'altra parte, quando una fibra ottica soggetta a test (FUT, *Fiber Under Test*) subisce una perturbazione esterna, l'attenuazione presenta una variazione localizzata sulla perturbazione.

La risoluzione spaziale di uno strumento OTDR rappresenta la minima distanza tra due *scatters* che può essere risolta. Essendo *c* la velocità della luce, *n* l'indice di rifrazione della fibra e τ la larghezza di impulso, la risoluzione spaziale è data dall'equazione $\Delta Z_{min} = \frac{c\tau}{2n}$. Essendo la velocità della luce $c = 3 \cdot 10^8 m/s$, per uno strumento OTDR caratterizzato da $\tau = 10 ns$ e n = 1,5, si ottiene una risoluzione spaziale di 1 m.

Per aumentare tale valore occorrerebbe ridurre il valore di 7, ovvero sarebbe necessario ridurre l'impulso di input, diminuendo anche il segnale di luce rilevato e, di conseguenza, indebolendo il *signal-to-noise ratio*. Ciò è problematico, soprattutto per applicazioni su lunghe distanze; ne deriva che un compromesso di base tra la risoluzione spaziale e l'intervallo di rilevamento si presenti come inevitabile, richiedendo l'ottimizzazione della larghezza e dell'energia di impulso sulla base delle caratteristiche di ciascuna applicazione.

2.4 Metodologie BOTDR e BOTDA

La tecnica BOTDR (*Brillouin Time Domain Reflectometry*) è un metodo di rilevamento coerente basato sull'impiego di luce pulsata, la quale viene lanciata nella fibra ottica per generare un fenomeno di *scattering* spontaneo di Brillouin. La luce propagata all'indietro viene misurata con un ricevitore coerente miscelando il segnale di *scattering* con quello proveniente da un oscillatore locale. Poiché la potenza nel segnale retrodiffuso è limitata, l'attenuazione della fibra può indurre un effetto negativo sulla qualità della misurazione. Per compensare tale inconveniente, viene attualmente utilizzato un rilevamento coerente. Con il metodo BOTDR, quindi, la luce retrodiffusa, generata dall'onda di *pump* lanciata in una fibra viene combinata con un oscillatore locale. Tuttavia, la sua gamma dinamica diminuisce con la lunghezza della fibra. Altri svantaggi di questo metodo sono rappresentati dalla limitata risoluzione spaziale e dalla dipendenza dello spostamento di frequenza sia dalla temperatura sia dalla deformazione longitudinale (da cui deriva la necessità del filtraggio elettrico per eliminare il segnale di Rayleigh).

Poiché il BFS è funzione di temperatura e *strain*, non esiste un modo per misurare univocamente ciascuna variabile, a meno che i loro effetti possano essere separati. Tuttavia, il rapporto tra le intensità della luce retrodiffusa Rayleigh e Brillouin, noto come Rapporto Landau-Placzek (LPR), dipende solo dalla temperatura e, di conseguenza, può essere utilizzato per ottenere un profilo di temperatura distribuito da una fibra indipendentemente dalla distribuzione della deformazione. La tecnica standard OTDR viene utilizzata per determinare il profilo di perdita della fibra in funzione della posizione, successivamente viene sottratto dalle misurazioni dell'intensità effettuate con il sistema BOTDR e le misurazioni dell'intensità vengono eliminate dall'attenuazione della fibra e da qualsiasi forma di perdita della fibra (Galindez-Jamioy & López-Higuera, 2012).

La tecnica BOTDR (Figura 2.4), normalmente capace di rilevamento distribuito su lunga distanza con una sensibilità di 5 µɛ, è adatta per applicazioni su larga scala di monitoraggio geotecnico e strutturale.

Il sistema BOTDA (Figura 2.5) si basa sulla spettroscopia a guadagno (o perdita) di Brillouin in cui un'onda ottica pulsata (*pump*) e una luce contropropagante (*probe*/Stokes), di solito un'onda continua, vengono iniettate in una fibra ottica. Quando la differenza di frequenza tra la luce pulsata e quella continua ($\nu - \nu_B$) viene sintonizzata sulla frequenza Brillouin ν_B della fibra, la luce continua viene amplificata attraverso il processo di *scattering* di Brillouin stimolato: la luce continua crescente viene misurata in funzione del tempo, come nel caso della tecnologia OTDR.

Il segnale rilevato utilizzando la tecnica BOTDA è superiore alla potenza di retrodiffusione di Rayleigh; ad esempio, lanciando una potenza di luce continua in fibre standard di circa 0,1 mW, il *backscattering* può essere cento volte più elevato di quello di Rayleigh. I segnali di *pump* e *probe* vengono lanciati in corrispondenza delle estremità opposte della fibra al fine di migliorare il processo di *scattering*: lo spettro di guadagno di Brillouin è rappresentato da ciascun valore della differenza di frequenza Δv . Gli effetti della tecnica *pump-probe* sono stati ampiamente studiati, come la riflessione di Fresnel, gli effetti di modulazione o gli effetti di forma del polso.



Nella metodologia BOTDA basata sul *pulse pumping*, a causa della durata di vita del fonone finito, la risoluzione spaziale è limitata ad *1 m*. Per superare questo limite, sono state proposte diverse tecniche che includono variazioni sull'onda di *probe*. Negli schemi *timedomain pumping*, i metodi più significativi sono il *prepumping*, coppie di larghezza dell'impulso differenziale (DPP-BOTDA) con o senza sfasamento, impulsi scuri (con questi metodi è stata dimostrata la risoluzione spaziale in scala, cm o anche mm) e le griglie dinamiche di Brillouin (*Dynamic Brillouin Grid*, DBG) (Galindez-Jamioy e López-Higuera, 2012).



Figura 2.5. Tipica configurazione BOTDA (da Barrias et al., 2016).

La Tabella 2.1 mostra un confronto tra alcune caratteristiche (*range*, risoluzione spaziale, ecc.) delle principali tecnologie di rilevamento distribuite e quasi-distribuite.

Tecnologia	Tipo di trasduttore	Range	Risoluzione Spaziale	Tipo di misura
R <i>aman</i> OTDR	Distribuito	1 km 37 km	1 cm 17 m	Temperatura
BOTDR	Distribuito	20-50 km	≈1 m	Temperatura e deformazione
BOTDA	Distribuito	150-200 km	2 cm (2 km) 2 m (150 km)	Temperatura e deformazione
Rayleigh OFDR/OBR	Distribuito	50-70 m	≈1 mm	Temperatura e deformazione
FBG	Quasi- Distribuito	≈100 canali	2 mm (Bragg length)	Temperatura, deformazione e spostamento

 Tabella 2.1. Confronto tra le caratteristiche delle tecniche di rilevamento distribuite e quasi-distribuite (adattata da Barrias et al., 2016).

2.5 Unità di misura OSD-1 per il monitoraggio distribuito di *strain* e temperatura

Nell'ambito del presente progetto di ricerca, l'esecuzione dei rilievi DOFS è stata effettuata grazie alla collaborazione con la società Optosensing s.r.l. Nata nel 2013 in qualità di *spin-off* universitario della Seconda Università di Napoli, l'azienda si propone di produrre e commercializzare sistemi dedicati alla misura in continuo di deformazioni e di temperatura attraverso l'utilizzo di fibre ottiche. L'utilizzo del sistema di misura OSD-1 (sviluppato da Optosensing s.r.l.) (Tabella 2.2 e Figura 2.6 a) ha consentito di realizzare l'acquisizione dei dati ottici: sfruttando il fenomeno fisico dello *scattering* di Brillouin, infatti, sono state effettuate misure di *strain* e temperatura, sia periodicamente che in continuo.

Tramite un pacchetto *software* proprietario, OSD-1 è in grado di gestire letture con frequenza di acquisizione fino a 200 Hz. Inoltre, il sistema di misura è contraddistinto dalle proprietà descritte in Tabella 2.2.

Tipo di fibra ottica	Standard single-mode		
Connettori ottici	E-2000/APC o FC/APC		
Configurazione della		laat	
sensoristica		toop	
Intervallo di distanza (fiber	25 km		
loop)	ZJ KII		
Risoluzione spaziale		0 , 20 m	
Accuratezza spaziale	0,05 m		
Parametri misurabili	BFS, temperatura, <i>strain</i>		
	Parametro	Accuratezza	Intervallo
	Strain	<4 με	[-3, +3] %
Accuratezza e intervallo	Temperatura	<0.2 °C	[-273, +1000] °C
Accuratezza e intervalio	BFS	<200 kHz	[10, 12] GHz
Tipico tempo di acquisizione	<5 min		
Interfaccia di comunicazione	Ethernet		
Formato di esportazione dei dati	ASCII		
Modalità di misura	Misure singole <i>on demand,</i> monitoraggio in continuo, misure dinamiche		
Temperatura operativa	[5-40] °C		
Dimensioni	466 x 423 x 257 mm		
Peso	18 kg		
Consumo di energia	90 W		

Tabella 2.2. Caratteristiche del sistema OSD-1 (<u>https://www.optosensing.it/</u>).

Al fine di ricavare le misure di *strain* presso i tre siti test, sono state effettuate misure con fibra ottica applicando sia la metodologia BOTDR che la tecnica BOTDA, in modalità multitemporale presso la "Cava Piastra Bagnata" e la "Cava del Piastraio di Sotto" e in continuo presso la "Cava Lorano "I" n°22". Il profilo di deformazione tra due misure consecutive è dato dalla relazione (2.5).

$$S(z) = (BFS_t - BFS_0) \cdot C_s [\mu \varepsilon]$$
(2.5)

essendo:

- *S(z)* la deformazione (*strain*) in corrispondenza dell'ascissa *z*,
- BFS_{θ} il profilo di *shift* di frequenza Brillouin acquisito al tempo θ ;
- BFS_t il profilo di *shift* di frequenza Brillouin acquisito al tempo *t*;
- C_s il coefficiente di trasduzione della fibra ottica, pari a 20000 μ e/GHz;
- $\mu \varepsilon$ (*microstrain*) l'unità di misura della deformazione, con ($\mu \varepsilon = \varepsilon \cdot 10^{\circ}$).

Risultati sperimentali mostrano linearità nella dipendenza dello *shift* da *strain* e temperatura (Minardo et al., 2018). La relazione tra le variazioni di *strain* ($\Delta \varepsilon$), temperatura (ΔT) e BFS (Δv_B) viene descritta da Lalam et al. (2016) secondo l'equazione 2.6:

$$\Delta \nu_B(\varepsilon / T) = C_T \Delta T + C_\varepsilon \Delta \varepsilon \tag{2.6}$$

con $C_T = (1,26 \text{ MHz/}°C)$ e $C_{\varepsilon} = (0,06 \text{ MHz/}\mu\varepsilon)$, rispettivamente i coefficienti di temperatura e *strain* a 1550 nm per una fibra *single mode* in vetro (Lalam et al., 2016 - i valori dei coefficienti variano leggermente in base ai diversi tipi di fibra *single mode*). In particolare, la fibra usata nella presente ricerca è stata prima analizzata in laboratorio per ottenere i seguenti coefficienti di calibrazione: $C_T = 1 \text{ MHz/}°C$ e $C_{\varepsilon} = 0,05 \text{ MHz/}\mu\varepsilon$ (Raju, 2017; Lanciano & Salvini, 2020). Il cavo sensore installato (Figura 2.6 b), procedendo dall'interno verso l'esterno, è costituito da: i) una fibra di vetro con un diametro totale di 125 µm, ii) un rivestimento primario in poliammide che porta il diametro a 250 µm, e iii) un rivestimento esterno in PVC (polivinilcloruro) che porta ad avere un diametro complessivo di 900 µm (Lanciano & Salvini, 2020).



Figura 2.6. (a) Unità di misura OSD-1. (b) Sezione trasversale del sensore in fibra ottica installato con i tre differenti strati: *glass fiber* (fibra in vetro), *primary polyamide coating* (rivestimento primario in poliammide) e *PVC coating* (rivestimento esterno in PVC) e le loro dimensioni (Lanciano & Salvini, 2020).

La percentuale di *strain* dell'ammasso roccioso trasferito al sensore in fibra ottica varia in base alla resina utilizzata, al rivestimento protettivo e alla lunghezza di incollaggio. Studi parametrici (Her & Huang, 2011; Zhenglin et al., 2019) dimostrano che maggiore è la lunghezza di incollaggio e la rigidezza di rivestimento e incollante, maggiore sarà la percentuale di strain trasferita al sensore. In questo lavoro, gli effetti di questi materiali sul trasferimento della deformazione dall'esterno verso la fibra sensibile non sono stati valutati in quanto, come già anticipato, si è scelto di far riferimento al coefficiente di calibrazione dello *strain* C_e = 0,05 MHz/µε determinato da prove di laboratorio (Raju, 2017; Lanciano & Salvini, 2020). Tuttavia, una serie di azioni è stata intrapresa per minimizzare gli effetti dei materiali sul trasferimento della deformazione di dello deformazione, tra le quali: i) utilizzo di polimeri standard ampiamente testati (poliammide e PVC per i rivestimenti e poliuretano per la resina); ii) realizzazione di rivestimenti più sottili possibile; iii) applicazione di un collante contraddistinto da un idoneo valore del modulo elastico e iv) implementazione di un forte legame tra ammasso roccioso e cavo sensore.

Per effettuare la discriminazione della temperatura dallo *strain*, sono stati installati due cavi indipendenti, l'uno contiguo all'altro. Il cavo per la misura dello *strain* è stato rinforzato con trefoli di acciaio inossidabile 316, con un diametro di 0,5 mm, e incollato alle pareti di cava. Il cavo per la compensazione della temperatura consiste di un tubo contenente la

fibra e un idoneo gel per favorire lo scambio di calore. Questo cavo è disposto parallelamente a quello per la misurazione della deformazione e fornisce il solo profilo di temperatura (la fibra all'interno di questo secondo cavo non è vincolata) (Lanciano & Salvini, 2020).

La posizione della fibra ottica nelle tre cave è stata progettata cercando di intercettare il maggior numero possibile di discontinuità degli ammassi rocciosi e seguendo la presenza di eventuale strumentazione eventualmente già presente sulle pareti oggetto di monitoraggio.

Due differenti fasi, preinstallazione e installazione definitiva del cavo sensore sono state eseguite da "tecchiaioli", operai specializzati nell'arrampicata che lavorano nelle cave di marmo apuane sorvegliandone fronti e cigli. La preinstallazione è avvenuta fissando dei tasselli metallici (Figura 2.24 a) a cui è stato agganciato un filo testimone.



Figura 2.7. a) Tasselli metallici e strato di resina adesiva applicata sui fronti rocciosi lungo il percorso progettato per i DOFS. b) Posizionamento del cavo sensore sullo strato di collante (Lanciano & Salvini, 2020).

In seguito, il filo testimone è stato rimosso e uno strato di "Sikaflex[®]-11 FC+" (Figura 2.7 b), resina adesiva a base di poliuretano caratterizzata da un Modulo di Elasticità Secante di ~0.60 N/mm² (dopo 28 giorni, +23 °C, ISO 8339), è stato applicato con una speciale pistola ad aria compressa. Gli adesivi in poliuretano sono collanti strutturali che possono essere utilizzati per unire tipi diversi di materiali con un legame forte e duraturo. Nello specifico, "Sikaflex[®]-11 FC+" è una resina comunemente e ampiamente usata in diversi lavori sulle fibre ottiche (Kister et al., 2007; Hong et al., 2016).

Il cavo sensore è stato posizionato sullo strato di collante, assicurato a tasselli metallici (Figura 2.7 b) e ricoperto di collante per favorire l'aderenza alla superficie e proteggere il sensore da eventi meteorologici e raggi UV. Poiché l'installazione dei DOFS non può essere caratterizzata da angoli retti o più piccoli, in zone contraddistinte da tagli di roccia artificiali e fratturazione, è stato necessario adottare alcuni accorgimenti, ovvero utilizzare idonei elementi artificiali di rinforzo e supporto descritti più avanti nel testo nei capitoli dedicati ai singoli casi di studio.

2.6 Definizione dei valori soglia di allarme delle deformazioni

Ai fini dell'analisi dei dati acquisiti mediante l'unità OSD-1, sono stati realizzati grafici dell'andamento temporale di BFS, *strain* e temperatura. Laddove presenti, tali dati sono stati confrontati con misure acquisite da diversa strumentazione (caso studio di Lorano, Capitolo 7).

Nell'ottica di verificare se, nell'arco temporale della campagna di monitoraggio, si siano verificati valori anomali delle deformazioni e, conseguentemente, di gettare le basi per la futura implementazione di un sistema di *smart-monitoring* (Sony et al., 2019), risulta essere di fondamentale importanza la definizione di opportuni valori soglia di allarme.

Per ciascun profilo di deformazione, è stato quindi quantificato, statisticamente e tenendo conto delle caratteristiche geotecniche dell'ammasso roccioso, un valore soglia di allarme dello *strain*, S_{max} .

Come suggerito dalla letteratura (Burr et al., 2013), si è scelto di calcolare il valore soglia di allarme per lo *strain*, S_{max} , come multiplo (secondo un determinato coefficiente *n*) della deviazione standard *SD* degli stessi valori di deformazione (espressione 2.7).

$$S_{max}\left(\mu\varepsilon\right) = n \cdot SD \tag{2.7}$$

Presso il Laboratorio di Meccanica delle Rocce del CGT, campioni di marmo dei siti oggetto di studio sono stati sottoposti a prove di resistenza a compressione. Tra i risultati di queste analisi vi sono il modulo di elasticità E e la resistenza a compressione σ_u . In particolare, il modulo di elasticità interviene nella formula per la determinazione del valore tensionale corrispondente al valore soglia di allarme per lo *strain*, σ_{calc} , data dalla relazione 2.8.

$$\sigma_{calc}(MPa) = S_{max}(\mu\varepsilon) \cdot 10^{-6} \cdot E \tag{2.8}$$

Nel caso in cui risulti $\sigma_{calc} < \sigma_u$, il valore di S_{max} può essere considerato come un valore soglia di allarme adatto e precauzionale per le deformazioni del fronte di cava analizzato (Lanciano & Salvini, 2020).

Capitolo 3 - Caratterizzazione e analisi di stabilità degli ammassi rocciosi

3.1 Introduzione

In questo capitolo verranno descritte le principali metodologie per la caratterizzazione e l'analisi di stabilità degli ammassi rocciosi. In particolare, dopo brevi cenni su tecniche e classificazioni geomeccaniche, l'attenzione sarà focalizzata sulle tecniche di analisi di stabilità dei versanti in roccia, in termini sia cinematici che dinamici.

Il primo approccio di indagine di un ammasso roccioso è costituito dall'esecuzione dei rilievi di carattere geologico-strutturale e geomeccanico. Le modalità di rilievo geomeccanico, uniformate a livello internazionale dalle norme ISRM (*International Society of Rock Mechanics*), si basano sull'esecuzione di "*scan lines*", ovvero analisi effettuate lungo una cordella metrica centimetrata di lunghezza adeguata posto sull'affioramento per un'estensione di almeno 10 m o 10 volte la spaziatura stimata tra le famiglie di discontinuità. I principali parametri che consentono di effettuare la caratterizzazione delle discontinuità sono: distanza progressiva, spaziatura, lunghezza, tipo, persistenza, orientamento, apertura, scabrezza, riempimento, alterazioni, condizioni idrauliche.

Prima di effettuare le analisi di stabilità, è opportuno applicare una classificazione geomeccanica, procedura che mira a fornire l'indicazione di valori quantitativi che possano permettere di prevedere il comportamento di un ammasso roccioso mediante la determinazione di alcuni caratteri facilmente acquisibili. Esistono diverse tipologie di classificazione degli ammassi rocciosi; nel presente lavoro di tesi si è scelto di applicare la classificazione *Rock Mass Rating* (RMR), la quale permette di caratterizzare un ammasso roccioso tramite: i) resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta; indice *Rock Quality Designation* (RQD); ii) spaziatura delle discontinuità; iii) condizioni delle discontinuità; iv) condizioni idrogeologiche; v) orientamento delle discontinuità. La somma algebrica degli indici parziali dei singoli parametri (determinati mediante le tabelle di Bieniawski del 1976 considerando la famiglia di discontinuità più sfavorevole per la stabilità generale) permette di ricavare l'indice di base *Basic Rock Mass Rating* (RMR_b) dell'ammasso roccioso.

Le analisi di stabilità di pendio vengono generalmente effettuate per valutare la sicurezza e la progettazione funzionale dei versanti oggetto di scavo (cave a cielo aperto, tagli stradali, ecc.) e/o le condizioni di equilibrio di pendii naturali (Eberhardt, 2003). La scelta della tecnica da applicare varia in base alle condizioni del sito e alla potenziale modalità di cedimento, ovviamente tenendo conto dei punti di forza e di debolezza che caratterizzano ciascuna metodologia. Gli obiettivi delle analisi di stabilità di pendio sono: valutare le condizioni di stabilità del versante; studiare i potenziali meccanismi di cedimento; determinare la suscettibilità del pendio ai differenti meccanismi di innesco; testare diverse opzioni di stabilizzazione; ottimizzare la progettazione delle eventuali attività antropiche, ad esempio di scavo, non solo dal punto di vista economico, ma anche in termini di affidabilità e sicurezza.

Al fine di ricavare una rappresentazione degli elementi geologici e delle discontinuità che costituiscono i dati di input per effettuare le analisi, gli studi di stabilità devono essere preceduti da analisi *in situ* (Eberhardt, 2003). La raccolta dati include la caratterizzazione

degli ammassi rocciosi e il campionamento di materiale roccioso per le analisi di laboratorio (determinazione della resistenza e del comportamento costitutivo ad esempio), osservazioni sul campo e indagini *in situ* (Eberhardt, 2003). Le tradizionali metodologie per l'analisi di stabilità dei versanti possono essere suddivise in due categorie, ovvero analisi cinematica e tecniche dinamiche all'equilibrio limite.

3.2 Analisi di stabilità cinematica

I metodi cinematici si focalizzano sulla possibilità che eventuali cedimenti, come scorrimenti traslazionali e ribaltamenti, si possano generare a causa della formazione di cunei o piani; tale determinazione si basa sulla valutazione dettagliata della struttura rocciosa e sulla geometria di set di discontinuità esistenti che possono contribuire ad innescare l'instabilità. Nello specifico, l'analisi cinematica studia la stabilità di blocchi e cunei senza tenere conto delle forze che ne determinano l'equilibrio o che ne potrebbero determinare il cedimento, prendendo in considerazione soltanto l'orientazione dei piani di discontinuità rispetto a quella del versante naturale e l'angolo di attrito degli stessi. La resistenza al taglio delle rocce è talmente elevata che i cedimenti dovuti alla sola forza di gravità sono possibili soltanto se discontinuità preesistenti permettono lo spostamento di blocchi discreti. Solo mediante l'analisi dinamica, che prende in considerazione anche le forze, risulta possibile valutare la probabilità di cedimento, il fattore di sicurezza ed eventuali rimedi. Il modello cinematico, al contrario, a valle della disponibilità del modello digitale del versante di dettaglio e dei dati misurati sulla fratturazione, viene analizzato esclusivamente per effettuare una previsione delle eventuali più probabili modalità di cedimento. L'analisi cinematica delle condizioni di stabilità è basata sul test di Markland (1972), tecnica stereografica descritta in Hoek & Bray (1981) che fornisce un'indicazione qualitativa della stabilità di blocchi e cunei in funzione del loro orientamento nello spazio e della resistenza al taglio mobilitabile lungo i piani di possibile scorrimento. In tale tipo di analisi, gli elementi presi in considerazione sono, pertanto, la geometria del versante, la geometria delle discontinuità e, infine, l'angolo di attrito. In particolare, si tiene conto dell'angolo di attrito medio delle discontinuità meccaniche. Il test analizza le seguenti tipologie di cedimento in pendii rocciosi (Figura 3.1): scivolamento planare di blocchi, scivolamento di cunei, ribaltamento diretto e, infine, ribaltamento flessurale.



Figura 3.1. Modalità di cedimento in roccia e proiezioni stereografiche delle condizioni strutturali che danno luogo a tali cedimenti (sfera di proiezione inferiore); immagine tratta da Salvini, 2017.

3.2.1 Scivolamento su un piano

Uno scivolamento su un piano sotto l'azione della sola forza di gravità (Figura 3.1 A) può avere luogo solo quando il blocco poggia su un piano di discontinuità inclinato che "viene a giorno" lungo il versante. Affinché si verifichi il cedimento, la resistenza al movimento deve essere superata sia lungo la superficie di base che lungo i margini laterali del blocco. Nel caso di rocce tenere (ad esempio le argilliti), se la base di scivolamento è molto più inclinata dell'angolo di resistenza al taglio sulla stessa superficie, la resistenza ai lati può essere superata per rottura della roccia. Nel caso di rocce resistenti, invece, lo scivolamento secondo un certo piano si può verificare solo in presenza di altre discontinuità o, considerando versanti naturali, valli trasversali in grado di liberare i blocchi lateralmente. In sintesi, per valutare la possibilità di scivolamento di blocchi e individuare potenziali blocchi e superfici di discontinuità interessati dal fenomeno, occorre verificare se le superfici di discontinuità sono sufficientemente inclinate per dare luogo allo scivolamento e determinare i rapporti tra le direzioni di scivolamento e la giacitura del versante. Considerato il vettore di una potenziale superficie di scivolamento, in proiezione stereografica è possibile ricavare l'angolo di sicurezza limite per quella superficie di scivolamento e per una determinata direzione del versante (ad esempio, un fronte di cava). Nello specifico, l'angolo di sicurezza limite rappresenta l'inclinazione massima che un pendio con una certa direzione può assumere senza che si verifichi lo scivolamento di blocchi.

3.2.2 Scivolamento di un cuneo

Due piani di debolezza che si intersecano verso il basso delimitando un blocco tetraedrico con la superficie del pendio, invece, individuano i cosiddetti cunei di scivolamento (Figura 3.1 B). Se la linea di intersezione delle due fratture "viene a giorno" sul versante, il movimento può realizzarsi senza ulteriori vincoli di tipo strutturale o topografico. La possibilità della formazione dei cunei dipende dalla struttura della roccia: rocce contraddistinte da foliazione o da sistemi di giunti ben sviluppati che tagliano la stratificazione o un'altra foliazione sono tipiche situazioni in cui tale modalità di cedimento può avere luogo. I tipi litologici maggiormente interessati da questo fenomeno sono argilliti, siltiti ben stratificate, calcari stratificati e filladi, con la dimensione dei cunei variabile da alcuni a migliaia di metri cubi. Il cuneo può scivolare verso il basso sulle due superfici di discontinuità lungo la loro linea di intersezione oppure su una sola delle due lungo la sua direzione di massima pendenza. Il caso più frequente è lo scivolamento su due discontinuità, il quale si verifica se: la linea di intersezione tra le due superfici di discontinuità è sufficientemente inclinata, ovvero inclinata di un angolo maggiore dell'angolo di attrito; se le due superfici sono caratterizzate da coefficienti di attrito molto differenti tra loro, occorre considerare la media dei due coefficienti; la linea di intersezione immerge nella direzione del versante e ha inclinazione minore dell'inclinazione del pendio, ossia "viene a giorno" sul versante.

Per quanto riguarda l'angolo di sicurezza limite del pendio nel caso di scivolamento di un cuneo, vale quanto già enunciato per lo scivolamento su un piano: in questo caso, infatti, l'angolo di sicurezza limite del versante costituisce la massima inclinazione che un pendio di una data direzione può assumere senza che si verifichi scivolamento di cunei.

In alcune situazioni, è possibile che un cuneo scivoli verso il basso secondo la direzione di massima pendenza di tale superficie di una sola delle due superfici. Perché ciò avvenga, è necessario che la linea di intersezione tra le due superfici di discontinuità sia sufficientemente inclinata e che "venga a giorno" sul versante. Se, oltre a queste due condizioni, la direzione di scivolamento di uno dei due piani di discontinuità è compresa tra la direzione di immersione della linea intersezione dei due piani e la direzione di massima pendenza del versante, si avrà scivolamento su tale superficie di discontinuità secondo la sua direzione di massima pendenza.

3.2.3 Ribaltamento

Il fenomeno del ribaltamento legato alla gravità (Figura 3.1 C) può verificarsi in rocce interessate da superfici di discontinuità planari e parallele tra loro con direzione circa parallela a quella del pendio e immersione opposta al versante (reggipoggio). Le superfici di discontinuità individuano blocchi stratiformi o colonnari (se sono presenti altri giunti di frattura) che possono ruotare e ribaltarsi verso il basso. Il ribaltamento può avere luogo in rocce sottilmente stratificate ma anche in ammassi rocciosi con stratificazione molto spaziata, se sono presenti giunti ortogonali alla stratificazione. Se, invece, sono presenti sistemi di giunti tra loro ortogonali e un sistema di giunti è a reggipoggio rispetto al versante, il ribaltamento può interessare anche rocce non stratificate (graniti, basalti, ecc.). Perché si verifichi ribaltamento, occorre che il centro di gravità dello strato cada al di fuori della sua base.

Il ribaltamento produce movimenti significativi in prossimità del versante alla base dello strato, mentre i movimenti sono molto più limitati in profondità. Per ottenere tali movimenti, è necessario avere scivolamenti strato su strato e lungo le superfici di discontinuità. I ribaltamenti, in genere, sono dovuti a fenomeni di erosione, attività di escavazione alla base di pareti oppure all'aumento del contenuto d'acqua all'interno dell'ammasso roccioso. Le condizioni perché si abbia ribaltamento sono le seguenti: i) le superfici di discontinuità sono sufficientemente inclinate per dare luogo a scivolamento, ovvero le discontinuità devono avere un'inclinazione superiore rispetto all'angolo di resistenza al taglio; ii) le superfici di discontinuità presentano la stessa direzione del versante o ne differiscono di $\pm 30^{\circ}$; iii) le superfici di discontinuità sono a reggipoggio, vale a dire sono contraddistinte da direzione di immersione opposta a quella del versante; iv) il pendio risulta essere sufficientemente inclinato. Il ribaltamento viene distinto in flessurale (coinvolgente larghe porzioni di roccia, evento non molto frequente) diretto con ribaltamento di colonne con alla base un piano di discontinuità. Per quest'ultimo le caratteristiche predisponenti risultano essere oltre alla presenza di svincoli laterali nell'ammasso roccioso, la presenza di un giunto dietro con inclinazione sufficiente a generare sforzi di taglio lungo il piano, ovvero con inclinazione maggiore della somma tra angolo d'attrito ed angolo complementare all'inclinazione del versante.

3.3 Analisi di stabilità dinamica

In meccanica delle rocce è necessario considerare gli effetti delle forze che agiscono su un determinato volume di roccia, dove per forza si intende una quantità vettoriale che può essere espressa dall'intensità e dalla sua direzione di applicazione, rappresentata dai valori di immersione e inclinazione.

I metodi all'equilibrio limite condividono un approccio comune basato sul confronto, mediante tecniche probabilistiche (es. Rocplane, Swedge e Roctopple della RocscienceTM Inc.), tra forze/momenti resistenti e forze/momenti mobilitanti.

3.3.1 Analisi dinamica di scivolamento di blocchi

Un blocco situato su una superficie piana resterà fermo se la risultante delle forze che agiscono sul blocco sono inclinate rispetto alla normale alla superficie di un angolo inferiore all'angolo di attrito. Se il blocco è libero di muoversi in ogni direzione, il problema sarà di natura tridimensionale e il blocco sarà in equilibrio se la risultante delle forze applicate sarà contenuta all'interno del "cono di attrito", ovvero un cono con angolo di apertura pari a due volte l'angolo di attrito e centrato sul polo del piano. Se su un blocco agisce la sola forza peso, la risultante delle forze sarà verticale; se, invece, sono presenti ulteriori forze come pressione dell'acqua, tiranti, azione di blocchi adiacenti, ecc., la risultante sarà inclinata rispetto alla verticale. La superficie di discontinuità alla base di un blocco (Figura 3.2) su cui agisca la risultante delle forze \mathbf{r} (caratterizzata da componente ortogonale alla superficie \mathbf{n} e componente parallela alla superficie \mathbf{s}) rimarrà stabile fino a quando: la coppia di forze normali $\mathbf{n} \in -\mathbf{n}$ formano una coppia compressiva; la componente di taglio \mathbf{s} è minore di \mathbf{n} tan φ , essendo φ l'angolo di attrito per la superficie.



Figura 3.2. Forze agenti su un blocco al di sopra di una superficie di discontinuità (Conti P., Carmignani, Disperati, & Massa, 2010).

Il fattore di sicurezza di un blocco potenzialmente in grado di scivolare su una superficie di discontinuità è definito come il rapporto tra la forza resistente F_r e la risultante delle forze mobilitanti F_m che tendono a farlo scivolare verso il basso (espressione 3.1).

$$F = \frac{F_r}{F_m} = \frac{n \tan \Phi_{disposnibile}}{\Phi_{mobilitato}}$$
(3.1)

Dall'espressione 3.1 si evince che, nel calcolo del fattore di sicurezza, intervengono due diversi angoli di attrito: $\Phi_{disponibile}$, ossia l'angolo di attrito determinato in laboratorio o presunto, comunque sia assunto come dato di progetto, e $\Phi_{mobilitato}$, l'angolo di attrito corrispondente alle condizioni di equilibrio nell'ambito di un determinato sistema di forze. Per un blocco situato su una superficie, l'angolo $\Phi_{mobilitato}$ può essere calcolato mediante proiezione stereografica come angolo di apertura del cerchio di attrito che passa per la risultante delle forze applicate al blocco.

Per quanto riguarda il valore assunto dal fattore di sicurezza: nella condizione di equilibrio limite, esso vale 1 ($F_r = F_m$); in condizioni di sicurezza, risulta essere maggiore dell'unità ($F_r > F_m$); infine, si verifica scivolamento quando si ha F < 1 (ovvero $F_r < F_m$).

3.3.2 Applicazione di forze

Le forze che possono entrare nel calcolo della stabilità di un blocco sono le seguenti: peso proprio del blocco; carichi dei blocchi adiacenti; pressione dell'acqua; forze sismiche; forze esercitate da sostegni. In particolare, la forza sismica, di interesse nei casi studio affrontati nella presente tesi, può essere considerata come una forza pseudostatica con una costante di accelerazione $\mathbf{a} = Kg$. La forza inerziale sarà allora data da $F_i =$ Kg(|W|/g) = K|W|, dove K è una grandezza adimensionale e con direzione opposta all'accelerazione sismica. Dal momento che tale direzione è raramente nota, in genere, si assume la direzione più critica.

3.3.3 Analisi dinamica di scivolamento di cunei

Un cuneo con due piani di contatto roccia-roccia può scivolare sulla prima o sulla seconda superficie oppure sulle due superfici contemporaneamente nella direzione della loro intersezione. Mentre nelle due aree che in proiezione stereografica rappresentano lo scivolamento di un cuneo secondo uno dei due piani, il fattore di sicurezza può essere definito e usato come in precedenza, alcune precisazioni sono invece necessarie per il concetto di fattore di sicurezza nel caso di scivolamento di un cuneo secondo la linea di intersezione. Per determinare il fattore di sicurezza, occorre ricavare $\Phi_{mobilitato}$, ovvero l'angolo di apertura del cerchio di attrito che passa per la risultante **r** delle forze applicate al blocco. Nel caso di movimento del cuneo lungo la linea di intersezione, la risultante si troverà tra due grandi cerchi e per un singolo cuneo si potrà avere un infinito numero di fattori di sicurezza. Per ovviare a tale problema, risulta conveniente realizzare un grafico che rappresenti l'andamento di $\Phi_{1mobilitato}$ in funzione di $\Phi_{2mobilitato}$ per una certa orientazione della risultante delle forze. Per ciascuna delle coppie di tali valori angolari, è possibile calcolare due fattori di sicurezza, uno relativo al primo piano e uno relativo al secondo piano.

3.3.4 Analisi dinamica di ribaltamento

Esistono strumenti per analizzare i fenomeni sia di ribaltamento diretto che flessurale. L'analisi dinamica all'equilibrio limite per *direct toppling* deve considerare sia la possibilità di ribaltamento che di scivolamento. La Figura 3.13 mostra le forze agenti e le condizioni di equilibrio limite per *toppling* e *sliding* di un singolo blocco 2D su una base a gradini. Le procedure, come quelle delineate da Hoek & Bray (1991), sono poi state estese per considerare la condizione di equilibrio dell'intero sistema di blocchi. Questi ultimi, in genere, mostrano una serie di blocchi scorrevoli nella zona della punta, blocchi stabili nella parte superiore e un insieme di blocchi ribaltanti in mezzo. Tali equazioni sono facilmente programmabili e consentono sia di effettuare rapidi calcoli che di visualizzare o scivolamento e il ribaltamento potenziale (figure 3.3 e 3.4).



Figura 3.3. Condizioni di stabilità per *sliding* e *toppling* di un blocco su piano inclinato (Hoek & Bray, 1991).


Figura 3.4. Condizioni all'equilibrio limite per toppling e sliding (Hoek & Bray, 1991).

Capitolo 4 - Tecnologie geomatiche per il rilievo geologico e morfologico

4.1 Introduzione

Il presente capitolo illustra le tecnologie geomatiche per il rilievo geologico e morfologico applicate in questo lavoro con una duplice finalità: affiancare il tradizionale rilievo geologico-strutturale e geomeccanico, consentendo di ricavare informazioni sulle famiglie di discontinuità nelle zone inaccessibili, e, al contempo, georeferenziare e rappresentare cartograficamente il percorso dei DOFS installati sulle pareti di cava oggetto di studio. Tale metodologia consente, pertanto, di risolvere un fondamentale problema dei DOFS, introdotto nel Capitolo 2, costituito dalla necessità di determinare continuamente il valore dei misurandi (*strain* e temperatura in questo caso) come funzione della posizione lungo il percorso della fibra ottica e con definibili risoluzione spaziale e sensibilità.

I prodotti dei rilievi geomatici, soprattutto le nuvole di punti 3D e i modelli tridimensionali di tipo *mesh*, infatti, permettono di associare ciascuna misura DOFS ad una determinata sezione del cavo sensore in fibra ottica dalla posizione spaziale nota.

Il capitolo illustra in primis la tecnologia TLS, applicata presso il sito in sotterraneo, ovvero la Cava del Piastraio di Sotto (Levigliani di Stazzema), per proseguire con la metodologia UAV, adottata presso gli altri due siti a cielo aperto, ovvero la Cava Piastra Bagnata (Vagli di Sotto) e la Cava Lorano "I" nº 22 (Lorano).

Nella seconda parte del capitolo vengono affrontate due ulteriori metodologie che hanno supportato i rilievi TLS e UAV: il GNSS, in particolar modo mediante rilievi DGPS, e, infine, i rilievi topografici mediante Stazione Totale (*Total Station*, TS). Tali indagini hanno consentito di determinare, per i casi studio di Vagli di Sotto e Levigliani, un certo numero di *Ground Control Point* (GCP) utilizzati per effettuare la georeferenziazione dei prodotti ottenuti rispettivamente dai rilievi UAV e TLS. Per il caso di Lorano, invece, non è stato necessario applicare le metodologie GNSS e TS in quanto, in qualità di GCP, sono stati utilizzati punti di coordinate note tratti da precedenti lavori effettuati dal CGT presso il medesimo sito.

4.2 Terrestrial Laser Scanning (TLS)

Nell'accezione moderna, l'espressione "scansione *laser*" indica il puntamento controllato dei raggi *laser* verso un determinato *target* (mira) seguito dalla misura della distanza tra lo strumento e il bersaglio in ogni direzione di puntamento. Questo metodo, noto come "scansione di oggetti 3D" o "scansione *laser* 3D", viene utilizzato per acquisire rapidamente forme di oggetti, edifici e paesaggi.

Il motivo per cui si parla di scansione o *scanner* è da ricercare nel fatto che l'acquisizione avviene secondo criteri di organizzazione dei dati raccolti analoghi a quelli dei tradizionali strumenti di scansione (Sgrenzaroli e Vassena, 2007), come, ad esempio la capacità di operare in maniera sistematica e automatica, la possibilità di avere accesso ai dati in *real-time* e, infine, la velocità di rilevamento (milioni di punti al secondo).

Tra le diverse tecniche di rilevamento esistenti, la tecnologia TLS è particolarmente significativa, in quanto consente di ricavare informazioni complete con elevati livelli di

precisione, automazione e produttività (Gomarasca, 2009). Partendo da una sorgente *laser* ground-based, fissa o in movimento, tramite il rilevamento polare di un elevato numero di punti che circondano la sorgente *laser* e la misura radiometrica degli stessi, risulta possibile ricreare, quasi in maniera continua, l'immagine 3D dell'oggetto o della superficie di interesse.

Il principio su cui si basa il funzionamento di tale strumento è, in molti casi, il calcolo del tempo di volo (*time-of-flight*) di un impulso *laser*. L'impulso elettrico prodotto dal generatore, collimato da un diodo *laser* trasmittente, crea un raggio di luce infrarossa; il segnale degli echi riflessi dall'oggetto colpito (di differente intensità in base alla riflettanza di quest'ultimo) viene captato da un fotodiodo ricevitore, il quale produce un segnale elettrico di ricezione (Accademia di Architettura, 2017). Il *time-of-flight*, ovvero l'intervallo di tempo che intercorre tra l'impulso trasmesso e l'impulso ricevuto, calcolato tramite un orologio al quarzo con frequenza stabilizzata, consente di determinare la distanza di ogni singolo punto rilevato. La rotazione di due specchi attorno agli assi x e z (mentre l'asse y è associato alla distanza, l'asse z rappresenta la verticale) consente di associare al calcolo del tempo di volo una misura angolare di precisione. In funzione della risoluzione angolare impostata dall'operatore per la scansione, tale rotazione dello specchio produce la spaziatura tra i differenti punti rilevati sul *target* e genera la nuvola di punti rilevando l'oggetto analizzato (Accademia di Architettura, 2017).

I diversi *laser scanner* esistenti si dividono in due principali famiglie: *ranging scanner* (a misura diretta della distanza), nei quali la posizione dell'emettitore *laser* e del ricevitore coincidono, e *triangulation scanner* (a triangolazione), tali che emettitore e ricevitore sono separati da una distanza nota a priori (*base line*) sulla quale si basa il principio della triangolazione. In particolare, i *ranging scanner* sono caratterizzati dal metodo di funzionamento del già citato *time of flight*, per cui la distanza tra il trasmettitore e la superficie riflettente viene calcolata sulla base del tempo impiegato dal segnale tra l'emissione e la ricezione, come nel caso delle stazioni totali topografiche ad impulso. I TLS, utilizzando sistemi per la deflessione del segnale che consentono piccole rotazioni, presentano una deviazione standard sulle misure delle distanze maggiore di alcuni millimetri rispetto alle stazioni totali. Tuttavia, un altro metodo di funzionamento, ovvero quello di comparazione della fase (la distanza viene calcolata comparando la differenza di fase tra l'onda inviata e l'onda ricevuta), sfruttando particolari algoritmi di elaborazione del segnale, permette di raggiungere risultati di elevata accuratezza (Sgrenzaroli e Vassena, 2007).

4.2.1 Tipologie di strumento

I diversi tipi di TLS si differenziano per accuratezza della misura, distanza nella modalità di acquisizione, e, infine, nella risoluzione della nuvola di punti. Attualmente non esiste uno strumento che sia capace di soddisfare allo stesso tempo tutte queste differenti esigenze. La scelta dello strumento deve essere effettuata sulla base dei seguenti parametri: accuratezza, velocità di acquisizione, *range* di misura, lunghezza d'onda del segnale in base alle possibili sorgenti di rumore esterno (luce solare, umidità) e delle proprietà di riflettività delle superfici esterne, campo visivo dello strumento, dotazione di camere digitali interne o esterne, facilità di trasporto, tipo di alimentazione, qualità del *software* di acquisizione. Dal punto di vista del campo visivo di acquisizione, è possibile distinguere *camera scanner*, *panorama scanner* e *scanner* ibridi, ossia contraddistinti da una soluzione intermedia (Figura 4.1). Mentre i primi hanno un campo visivo quasi sferico e limitato unicamente dalla base dello strumento. Il terzo gruppo, infine, è composto da sistemi che possono compiere

rotazioni complete solo attorno ad uno degli assi con la rotazione intorno al secondo asse limitata entro 60°-70°.



Figura 4.1. a) Camera scanner. b) Panorama scanner. c) Scanner di tipo ibrido.

L'acquisizione delle immagini fotografiche, necessarie per la produzione del modello triangolato mappato con la *texture*, può avvenire in tre diversi modi. La fotocamera può essere interna allo *scanner*, esterna ma integrata al sistema *laser* oppure esterna e usata direttamente dall'operatore. Nel caso di fotocamera interna, l'immagine digitale viene acquisita dal CCD (*Charge Coupled Device*) interno allo strumento in contemporanea alla scansione. Generalmente, in queste situazioni, l'immagine acquisita presenta, a causa della limitatezza dell'apparecchiatura fotografica, una qualità piuttosto limitata. Un'ottima soluzione è invece quella di montare solidamente alla testa dello *scanner* una fotocamera di cui siano noti i parametri interni.

La praticità e la semplicità di trasporto dello strumento risultano essere fattori determinanti nel caso in cui si debbano realizzare scansioni di zone difficilmente raggiungibili con adeguati mezzi di trasporto. Le principali caratteristiche di cui tener conto sono peso e dimensioni dello strumento, resistenza ad urti e vibrazioni, qualità della custodia. L'utilizzo dello strumento necessita di un'appropriata interfaccia *software* installata su PC. La sua qualità può essere valutata considerando le proprietà di intuitività dell'interfaccia grafica e della scelta delle funzioni, nonché dalla serie di controlli che permette di effettuare sull'*hardware*, sulla base della possibilità di: avere una *preview* delle scansioni, avere una stima del tempo di scansione, lavorare contemporaneamente su finestre di prese a differente risoluzione, acquisizione automatica dei *target*.

4.2.2 Progettazione delle attività e acquisizione dei dati

La semplicità della modalità di rilevamento offerta dallo strumento TLS non deve far sì che si trascurino alcuni aspetti molto importanti, ovvero una fase di progettazione delle prese con *laser scanner*, un'adeguata acquisizione di immagini fotografiche e la corretta disposizione di eventuali *target*. In primo luogo, occorre definire il tipo di oggetto/superficie da rilevare, prevedendo i luoghi dove posizionare la strumentazione, e la tipologia di prodotto finale desiderato. Stabiliti questi punti, si può procedere alle fasi di progettazione del lavoro di scansione. Gli accorgimenti da adottare riguardano: scansioni *laser* da molteplici posizioni; coordinate dei *target* posizionati all'interno dell'area rilevata per effettuare la georeferenziazione dei dati o per consentire la loro unione; immagini fotografiche digitali, nel caso in cui sia necessario ottenere informazioni di colore sulla geometria tridimensionale.

La progettazione delle scansioni è legata alla tipologia di oggetto da rilevare e all'angolo di vista dello strumento *laser* e deve prevedere un sopralluogo dell'area da analizzare.

Sebbene ciascun rilevamento sia contraddistinto da aspetti particolari da affrontare volta per volta, alcune indicazioni generali possono riguardare: i) riduzione di ombre e occlusioni: scelta della posizione dello strumento cercando di massimizzare la visibilità dell'area da rilevare; ii) angolo di acquisizione: la qualità dei punti 3D rilevati dipende anche dall'angolo con cui il raggio *laser* incide sulla superficie da misurare; iii) buona sovrapposizione tra le diverse scansioni; iv) risoluzione omogenea delle scansioni, al fine di ottenere un'omogeneità geometrica del rilievo *laser scanning*, sia in termini di accuratezza nella misura della distanza che di densità della nuvola di punti 3D; v) visibilità dei *target* da utilizzare per la georeferenziazione o l'unione delle differenti scansioni. Qualora si decida di unificare i dati in base ad un univoco sistema di riferimento, da ciascun punto di scansione dovranno essere visibili almeno tre diversi *target*. Se, invece, si scegliesse di unire le scansioni senza ricorrere ai *target* e utilizzare a posteriori le coordinate dei *target* per la georeferenziazione, si dovrà comunque garantire la visibilità di almeno tre *target* dall'insieme delle varie viste.

La possibilità di applicare immagini 2D alla geometria 3D rilevata con TLS permette di incrementare il contenuto informativo del rilievo, migliorando la visualizzazione dei dati, aggiungendo informazioni di carattere tematico, consentendo di ricavare viste ortografiche 2D e, infine, permettendo di dedurre informazioni di tipo spettrale e di produrre modelli 3D fotorealistici (Sgrenzaroli e Vassena, 2007). Per raggiungere questi obiettivi, risultano essere di fondamentale rilevanza una buona qualità delle immagini, la lunghezza focale della fotocamera e il campo di vista dell'inquadratura fotografica.

Per quanto riguarda i *target*, i costruttori generalmente suggeriscono alcuni tipi di *target* artificiali specificandone forma, materiale e dimensioni, proprietà che garantiscono il loro riconoscimento automatico da parte dei *software* di acquisizione ed elaborazione dei dati TLS. Se non è possibile usare *target* artificiali, si potranno usare elementi riconoscibili all'interno delle scansioni. In entrambi i casi, occorre determinare con precisione la posizione dei *target* mediante rilievo topografico tradizionale. La progettazione del rilievo in campagna, pertanto, deve considerare il corretto posizionamento dei *target* secondo la visibilità delle varie stazioni di scansione e di rilievo con strumentazione topografica, la creazione di una rete topografica oppure il collegamento ad una rete preesistente e la produzione delle monografie della posizione dei *target* per facilitare le successive fasi di elaborazione dei dati.

4.3 Rilievi UAV

4.3.1 Introduzione

L'adozione di metodologie di rilievo fotogrammetrico di prossimità e restituzione basate sull'impiego di UAV o droni consente di generare, in tempi rapidi e con investimenti economici ridotti, i dati necessari per la generazione di prodotti metrici utilizzabili come strumento di conoscenza specialistica. Tale tecnologia, che si riferisce ad una classe di velivoli in grado di volare senza la presenza del pilota a bordo, consente di eseguire riprese aeree manuali e/o programmate come con un normale aeromobile, ma con in più notevoli vantaggi quali l'elevata velocità di esecuzione del rilievo e l'elevato dettaglio delle immagini ottenute.

Attualmente le piattaforme UAV sono largamente utilizzate nell'ambito di lavori di monitoraggio, cartografia e modellazione tridimensionale. Esse, infatti, se dotate di opportuni sensori, consentono di rilevare e catalogare agevolmente ampie zone di territorio. In particolare, gli UAV, rotanti o ad ala fissa, equipaggiati con fotocamere digitali, sono in grado di eseguire l'acquisizione di dati fotogrammetrici volando in modalità manuale, semi-automatizzata oppure autonoma.

Nello specifico, per "Fotogrammetria" si intende la scienza finalizzata ad ottenere informazioni valide circa gli oggetti fisici e l'ambiente attraverso i processi di raccolta, misura e interpretazione delle immagini (fotografiche o digitali) e rappresentazione analogica o digitale dei modelli di energia elettromagnetica derivati dai sistemi di indagine (camere fotografiche o sistemi di scansione), senza che si verifichi contatto con gli stessi oggetti.

I principi basilari della fotogrammetria sono strettamente connessi alla stereoscopia artificiale, facilmente ottenibile dall'acquisizione di coppie di immagini dello stesso oggetto da differenti punti di osservazione (Gomarasca, 2009). A seconda della modalità di acquisizione e rappresentazione dei dati, è possibile distinguere tra: i) fotogrammetria analogica (tradizionale), se l'immagine viene acquisita da una tradizionale camera fotogrammetrica e fornita al processo fotogrammetrico su supporto fotografico (film, diapositiva o stampa); ii) fotogrammetria digitale, se l'immagine viene rilevata da una moderna fotocamera digitale ed elaborata in formato digitale. Inoltre, occorre differenziare tra fotogrammetria terrestre oppure aerea. Mentre la prima si basa su immagini che si riferiscono ad oggetti situati sulla superficie terrestre (indagini su palazzi, edifici, monitoraggio di frane) e si realizza mediante fotocamere posizionate al livello del suolo o nelle immediate vicinanze, la seconda prevede l'acquisizione de fotogrammi dall'alto ed è usata solitamente per applicazioni topografiche e di rilievo e studio del territorio. Quando la distanza tra sensore e oggetto è inferiore a 300 m, si ha a che fare con la Close Range Photogrammetry, ovvero fotogrammetria a distanza ravvicinata (Wolf & Dewitt, 2000).

Seguendo, nella fase di *data processing*, un tipico *workflow* fotogrammetrico, è possibile ottenere prodotti tridimensionali utili ai fini delle analisi territoriali come, ad esempio, nuvole di punti (*Point Clouds*), *Digital Surface Models* (DSMs), *Digital Terrain Models* (DTMs), modelli 3D del tipo *mesh*, isoipse e immagini ortorettificate e georeferenziate (*i.e.* ortofoto).

4.3.2 Fotogrammetria digitale

La fotogrammetria si definisce digitale nei casi in cui il *processing* può essere effettuato da un *computer*. Le immagini possono derivare direttamente da sistemi di acquisizione digitali (sensori) o dalla digitalizzazione, tramite *scanner*, di immagini in formato analogico (cartaceo o tradizionale). Sfruttando gli strumenti di registrazione operanti in modalità digitale, è possibile ricavare immagini in cui la relazione geometrica che collega immagine e oggetto è rappresentata dalla prospettiva centrale (*frame acquisition*) o da qualcosa di più complesso della tradizionale prospettiva centrale, in generale una prospettiva centrale multipla (sistemi a scansione *pushbroom* e *whiskbroom*).

Analizzando le principali differenze tra una camera fotografica tradizionale e una fotocamera digitale (Figura 4.2), in primo luogo occorre menzionare la modalità di acquisizione delle immagini: essa, infatti, si basa sull'utilizzo della pellicola fotosensibile (*film*) nel primo caso e sull'applicazione di particolari sensori nel secondo. Inoltre, mentre il processo fotografico classico si sviluppa in fasi operative successive, con l'acquisizione digitale si ottengono immagini in tempo reale (*real time*), per cui risulta possibile effettuare immediatamente valutazioni sulla qualità dell'acquisizione. Un ulteriore punto fa riferimento al fatto che, al contrario dei sistemi classici, caratterizzati da fasi di

elaborazione e stampa abbastanza lunghe, complesse e costose, nel caso delle immagini digitali, l'operatore ha sempre il controllo totale e immediato della procedura.

Un segnale elettrico analogico, trasformato in *pixel* da un convertitore analogico-digitale (CCD) attraverso un processo di campionamento, consente la formazione dell'immagine digitale. Tre diversi valori di numero digitale (*Digital Number*, DN), corrispondenti ai colori rosso (R), verde (G) e blu (B), vengono assegnati ai *pixel*: lo schermo di un processore utilizza i valori RGB per riprodurre il colore di ciascun *pixel*.

Un'immagine digitale è costituita da una sequenza numerica ordinata per valore in maniera tale da consentire una fedele riproduzione dell'immagine (*raster*) che rappresenta. La struttura dei dati dipende da alcune regole che determinano il formato di archiviazione dell'immagine: risparmio di spazio; compressione dei dati; possibilità di mantenere la radiometria originale; uso gratuito. Nel dominio fotogrammetrico vengono adottati due formati principali: TIFF (*Tag Image Format File*) e JPEG (*Joint Photographic Experts Group*).



Figura 4.2. Processo analogico (a) e digitale (b) dell'acquisizione dell'immagine (adattata da Gomarasca, 2009).

I sistemi fotogrammetrici digitali (Figura 4.3) sono costituiti da due principali componenti, l'unità di acquisizione e quella di restituzione. La prima è il modulo per l'acquisizione dell'immagine: ogni cella deve essere associata alle coordinate di sistema fiduciali corrette dagli errori sistematici. L'acquisizione può essere diretta, se l'immagine è acquisita da una camera digitale, oppure indiretta, se l'immagine deriva dalla scannerizzazione di fotogrammi. L'unità di restituzione, invece, consiste nel modulo finalizzato all'elaborazione fotogrammetrica, articolato in: orientamento, triangolazione, restituzione, generazione del DEM (*Digital Elevation Model*), ortofotoproiezione.

I vantaggi del digitale rispetto al processo fotografico analogico possono essere sintetizzati nei seguenti punti fondamentali: alta risoluzione spaziale, radiometrica e spettrale; disponibilità più rapida dell'immagine a parità di tempo di acquisizione; accessibilità all'elaborazione digitale; riproduzione rapida, economica e identica all'originale; possibilità di creare modelli 3D a nuvole di punti, DEM e ortofoto, possibilità di inserimento nei sistemi informativi e di gestione.



Figura 4.3. Unità di acquisizione di un sistema fotogrammetrico digitale (adattata da Gomarasca, 2009).

4.3.3 Sviluppi tecnologici: metodologie "*Structure from Motion*" e "*Stereo Multi-View*"

Negli ultimi anni, lo sviluppo tecnologico ha portato alla definizione delle metodologie "Structure from Motion" e "Stereo Multi-View", le quali hanno consentito di ottenere consistenti miglioramenti in termini di economicità, rapidità di elaborazione ed efficacia nella creazione dei modelli tridimensionali. La principale novità introdotta da tali tecniche è il rilievo automatico dei parametri di orientamento relativo. Mentre la SfM sfrutta gli algoritmi di Computer Vision per estrarre i punti omologhi (tie point), allineare le immagini, stimare la posizione delle camere ed estrarre una nuvola di punti sparsi (sparse cloud), la fotogrammetria Stereo Multi-view sfrutta il lavoro svolto dalla SfM per effettuare un matching denso tra i fotogrammi orientati e generare sia la nuvola di punti densa (dense point cloud) che la mesh (rete poligonale costituita da vertici, spigoli e facce che rappresenta un determinato oggetto nello spazio).

4.3.3.1 Structure from Motion

La tecnica *Structure from Motion (SfM)*, ideale per lavori e ricerche dal limitato *budget* economico e l'applicazione in aree remote (Westoby et al., 2012), si è sviluppata prevalentemente negli anni '90, traendo la propria origine nell'ambito della cosiddetta *Computer Vision* (Spetsakis & Aloimonos, 1991; Boufama et al., 1993; Szeliski & Kang, 1994) e nello sviluppo di algoritmi di *feature-matching* (Förstner, 1986; Harris & Stephens, 1988).

La SfM opera secondo gli stessi principi di base della fotogrammetria stereoscopica: la struttura 3D può essere ottenuta da una serie di immagini sovrapposte. Tuttavia, essa

differisce dalla fotogrammetria convenzionale in quanto la geometria della scena, le posizioni e l'orientamento della fotocamera vengono risolti automaticamente e senza la necessità di specificare a priori una rete di target dalle posizioni 3D note. Nello specifico, essi vengono risolti simultaneamente utilizzando una procedura iterativa di bundle adjustement basata su un database di caratteristiche estratte automaticamente da un set di immagini multiple sovrapposte (Snavely et al., 2008). L'approccio è adatto a gruppi di immagini con un elevato grado di sovrapposizione che catturano la struttura tridimensionale completa della scena vista da una vasta gamma di posizioni o, come suggerisce il nome stesso della metodologia, immagini derivate da un sensore in movimento. L'approccio SfM richiede che nessuno degli elementi precedenti sia noto prima della ricostruzione della scena. La posizione della camera e la geometria della scena, infatti, vengono ricostruite simultaneamente attraverso l'identificazione automatica delle caratteristiche omologhe in diverse immagini. Tali elementi peculiari vengono tracciati da un'immagine all'altra, consentendo stime iniziali delle posizioni della camera e delle coordinate oggetto, le quali vengono poi affinate in maniera iterativa applicando la minimizzazione dei minimi quadrati non lineari.

Le nuvole di punti 3D sono generate in un sistema relativo di coordinate "spazioimmagine" che deve essere allineato ad un sistema di coordinate "spazio-oggetto" del mondo reale per risolvere i problemi di mancanza di scala e orientamento. Nella maggior parte dei casi, la trasformazione delle coordinate dello spazio immagine in un sistema di coordinate assolute può essere realizzata usando una trasformazione di somiglianza 3D basata su un numero limitato di punti di controllo a terra (GCP) con coordinate spaziooggetto note. Nella pratica, prima di effettuare l'acquisizione delle immagini, è conveniente distribuire sulla superficie oggetto di studio *target* contraddistinti da un elevato contrasto visivo e da un centroide ben definito.

4.3.3.2 Acquisizione delle immagini ed estrazione dei keypoint

Il problema chiave affrontato dalla SfM è la determinazione della posizione 3D di caratteristiche corrispondenti in più fotografie. L'iniziale fase di elaborazione consiste nell'identificazione delle caratteristiche all'interno di singole immagini: una soluzione a tale questione viene fornita dall'algoritmo Scale Invariant Feature Transform (SIFT) (Westoby, 2012; Snavely, 2008), implementato in SFMToolkit3 attraverso l'integrazione dell'algoritmo SiftGPU (Westoby, 2012; Lowe, 1999; 2004). L'algoritmo identifica in ogni immagine le caratteristiche che sono invarianti al ridimensionamento e alla rotazione dell'immagine e parzialmente invarianti ai cambiamenti delle condizioni di illuminazione e del punto di vista della camera 3D (Westoby, 2012; Lowe, 2004). In seguito all'identificazione automatica dei punti di interesse (key point) in ogni immagine, viene creato un descrittore di caratteristiche, calcolato trasformando i gradienti locali di immagine in una rappresentazione in gran parte insensibile alle variazioni di illuminazione e orientamento (Westoby, 2012; Lowe, 2004). Questi descrittori sono abbastanza unici da consentire la corrispondenza delle caratteristiche in set di dati di grandi dimensioni. Il numero finale di key point in un'immagine dipenderà principalmente da texture e risoluzione dell'immagine.

4.3.3.3 Ricostruzione della scena 3D

In seguito all'identificazione dei key point e all'assegnazione del descrittore, il sistema bundle adjustment "Bundler" (Lourakis e Argyros, 2009; Snavely et al., 2008) viene utilizzato per stimare la posizione della fotocamera ed estrarre una nuvola di punti 3D sparsa, ovvero a bassa densità. Applicando gli algoritmi "Approximate Nearest Neighbour" (Arya et al., 1998) e "Random Sample Consensus" (RANSAC; Fischler & Bolles, 1987), vengono stabilite delle tracce che collegano specifici keypoint in una serie di immagini. Ai fini della ricostruzione della nuvola di punti, vengono impiegate le tracce che comprendono un minimo di due keypoint e tre immagini; quelle che non soddisfano i criteri appena descritti vengono automaticamente scartate (Snavely et al., 2006). Usando questo metodo, gli elementi in movimento, ad esempio le persone e le automobili che si spostano attraverso le aree di interesse, vengono automaticamente rimossi dal set di dati prima dell'inizio della ricostruzione 3D. Le corrispondenze dei keypoint pongono vincoli sull'orientamento dell'assetto della fotocamera, il quale viene ricostruito usando una trasformazione di somiglianza, mentre la minimizzazione degli errori è ottenuta usando una soluzione dei minimi quadrati non lineari (Szeliski e Kang, 1994; Nocedal & Wright, 1999). Infine, la triangolazione viene utilizzata per stimare le posizioni dei punti 3D e ricostruire in modo incrementale la geometria della scena fissata in un sistema di coordinate relativo. L'automazione completa di questo processo, dall'estrazione dei keypoint alla ricostruzione accurata della geometria della scena, è un chiaro vantaggio del metodo SfM rispetto agli altri approcci fotogrammetrici digitali basati sino a questo momento sull'image matching anziché sulla restituzione vettoriale stereoscopica.

Se il "Bundler" produce la sparse cloud, è possibile derivare una nuvola di punti di densità potenziata (Dense Point Cloud) implementando gli algoritmi "Clustering View for Multi-view Stereo (CMVS)" (Furukawa & Ponce, 2007; Furukawa et al., 2010) e "Patch-based Multi-view Stereo (PMVS2)" (Furukawa e Ponce, 2007). Nell'ambito di questo processo, le camera positions che derivano dal "Bundler" vengono utilizzate come dato di input. Mentre CMVS decompone le immagini di input sovrapposte in sottoinsiemi o cluster di dimensioni gestibili, PMVS2 ricostruisce in modo indipendente i dati 3D di questi singoli cluster (Furukawa e Ponce, 2007).

4.3.3.4 Post-processing e generazione del DEM

La trasformazione da un sistema di coordinate relative ad uno di coordinate assolute è ottenuta attraverso l'identificazione manuale dei GCP nella nuvola di punti e il calcolo di un'appropriata trasformazione.

Per agevolare la gestione dei dati e fornire un modello di elevazione del terreno del primo ordine, la nuvola di punti grezza viene decimata secondo una procedura a griglia regolare sviluppata da Rychkov et al. (2012). Questa semplice ma computazionalmente efficiente procedura consente una facile estrazione di modelli di terreno basati, ad esempio, sull'altezza minima locale della griglia, pur conservando le informazioni sulla complessità dell'elevazione della sotto-griglia per le analisi successive. Inoltre, la visualizzazione delle statistiche sulle celle della griglia permette di effettuare l'analisi spaziale della variabilità nella densità dei punti attraverso l'intero modello.

4.4 Il rilievo topografico mediante Stazione Totale (TS)

La topografia, dal greco *topos* (luogo) e *graphos* (grafia), è una disciplina che ha per oggetto lo studio dei metodi, dei procedimenti applicativi, dei modelli di calcolo e degli strumenti finalizzati al rilievo di una porzione limitata della superficie terrestre sufficientemente piccola da poterne trascurare la sfericità o curvatura. Il rilievo topografico può essere considerato un rilievo indiretto e strumentale, in quanto le misure non vengono prese direttamente sull'oggetto di interesse, bensì attraverso strumenti dalle proprietà tecnologiche medio-alte che ne permettono l'acquisizione.

In particolare, le misure angolari e di distanza possono essere effettuate con un unico strumento elettronico ottico detto Stazione Totale (Total Station, TS), il quale integra teodolite e distanziometro elettronici. La TS, infatti, combinando un certo numero di tecnologie avanzate, al fine di raggiungere un elevato grado di accuratezza e affidabilità (MacKinnon & Murphy, 2004), rappresenta l'evoluzione del teodolite. Tramite tale strumento è possibile effettuare la misura di angoli orizzontali e verticali e, tramite il distanziometro, dislivelli e distanze inclinate (Figura 4.4). Nello specifico, la TS calcola la distanza dopo aver misurato il tempo necessario al raggio emesso dal distanziometro per colpire il target e tornare indietro. I rilievi effettuati con la TS, noti come rilievi celerimetrici (da celerimensura), forniscono informazioni plano-altimetriche rispetto all'origine delle misure. Il topografo posiziona la TS su un punto denominato "stazione" ed effettua la misura delle posizioni dei punti di interesse collimandoli con il cannocchiale (guardando dentro il cannocchiale dello strumento, infatti, si inquadra il punto da rilevare e si registra la misura). Il rilievo può essere realizzato con o senza un prisma riflettente, ovvero un oggetto a specchio (specchio sagomato a spigolo di cubo) che riflette il raggio laser del distanziometro integrato. Se si utilizza il prisma, sarà necessaria la posizione di un secondo operatore che si muoverà nell'area oggetto di acquisizione trasportando il prisma su un bastone graduato e ponendolo sui punti da rilevare. Risulta possibile lavorare anche senza prisma mirando direttamente all'oggetto da analizzare (uno spigolo, ad esempio). Ovviamente l'uso del prisma permette misure più precise oltre che il raggiungimento di distanze maggiori rispetto alle misure realizzate senza l'ausilio di tale supporto.



Figura 4.4. Utilizzo della TS per la definizione delle coordinate di un determinato punto in un sistema di coordinate locali (Feng et al., 2001).

4.5 Il sistema GNSS

Per Global Navigation Satellite System (GNSS) si intende un sistema di geo-localizzazione e navigazione terrestre, marittima o aerea, che utilizza una rete di satelliti artificiali in orbita e pseudoliti. Le costellazioni di satelliti, dallo spazio, trasmettono dati di posizionamento e temporizzazione ad appositi ricevitori elettronici, i quali utilizzano questi segnali per determinare la loro stessa posizione in termini di coordinate geografiche (longitudine, latitudine e altitudine). Per definizione, il sistema GNSS fornisce una copertura globale. Esempi di GNSS includono i sistemi europeo "Galileo" (operativo dal 2016), statunitense NAVSTAR GPS (*NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System*) (operativo dal 1978 e disponibile per tutto il mondo dal 1994), e il sistema russo GLONASS (*GLObal NAvigation Satellite System*), pienamente operativo dal 2011.

Nei sistemi attuali, il satellite trasmette un segnale contente posizione del satellite e ora di trasmissione del segnale stesso, ricavata, al fine di mantenere la sincronizzazione con gli altri satelliti della costellazione, da un orologio atomico. Il ricevitore confronta il tempo della trasmissione con quello misurato da un proprio orologio interno, ricavando il tempo impiegato dal segnale per arrivare dal satellite. Diverse misure possono essere effettuate contemporaneamente con satelliti differenti, ricavando così il posizionamento in *real-time*. Ogni misura di distanza individua una sfera avente per centro un satellite; dall'intersezione di tali sfere si ottiene il posizionamento. Tuttavia, nel caso di ricevitori in movimento rapido, la posizione del ricevitore si modifica mentre i segnali vengono ricevuti. In più, i segnali radio ritardano leggermente, secondo l'angolo tra ricevitore e satellite, attraversando la ionosfera. Il calcolo di base tenta così di trovare la linea diretta più corta tangente a quattro sfere centrate su quattro satelliti. I ricevitori riducono gli errori usando combinazioni di segnali da più satelliti e applicando tecniche, come, ad esempio, il filtro di Kalman, per unire i dati affetti da rumore, parziali e costantemente variabili in una singola stima di posizione, tempo e velocità.

Una generica struttura GNSS è costituita da tre sottosistemi definiti segmenti (Figura 4.5): il segmento spaziale, rappresentato dalla costellazione dei satelliti; segmento di controllo, ovvero l'insieme delle stazioni a terra che gestiscono il sistema; infine, il segmento di utilizzo, inteso come l'insieme degli utenti militari e civili che utilizzano i ricevitori.



Figura 4.5. Segmenti del sistema GNSS (da Franco e Lo Brutto, 2004).

4.5.1 Modalità di posizionamento

Il posizionamento GNSS può essere effettuato secondo diverse modalità: posizionamento assoluto, in cui le coordinate di un punto vengono calcolate in tempo reale in un sistema di riferimento globale (navigazione); posizionamento relativo, basato

sulla determinazione delle componenti della *baseline*, ovvero del vettore che unisce due vertici, essendo nota la posizione di uno dei due; posizionamento differenziale, ovvero misura DGPS, simile a quello assoluto ma realizzato correggendo le distanze satellitericevitore con una correzione differenziale calcolata da una stazione base e trasmessa al ricevitore in tempo reale.

Il posizionamento può essere effettuato in *real-time*, per cui le coordinate del punto sono disponibili direttamente al momento del rilievo, o in *post-processing*, elaborando i dati dopo l'acquisizione. Le misure, inoltre, possono essere: statiche (ricevitore fisso sul punto per un certo periodo di tempo) o cinematiche (ricevitore in continuo movimento); di codice (componente impulsiva del segnale) o di fase (componente portante). La precisione delle misure GPS dipende dalla precisione con cui possono essere ottenute le distanze tra satellite e ricevitore. Nello specifico, questo tipo di misure sono affette da errori di diverso tipo, ovvero errori accidentali di misura, errori sistematici (orologio, orbita, rifrazione troposferica e ionosferica) ed errori vari di osservazione (*multipath*, variazione della posizione del centro di fase dell'antenna, interferenze elettromagnetiche).

4.5.2 Rilievi DGPS

Poiché le tecniche di posizionamento assoluto sono affette da errori di varia natura, le precisioni raggiungibili mediante tali metodologie risultano non essere adeguate agli scopi topografici. Al fine di ottenere precisioni elevate, occorre usare in contemporanea due ricevitori ed effettuare differenze di posizione per eliminare o ridurre di molto gli errori comuni alle due diverse stazioni. Come anticipato nel precedente paragrafo, le metodologie che consentono di differenziare le posizioni sono le tecniche relative e le tecniche differenziali, le quali consentono di raggiungere precisioni pari a 10⁻⁶ e 10⁻⁸ rispetto alla lunghezza della base. Dal confronto dei propri dati con quelli registrati nello stesso intervallo temporale da uno (o più) ricevitori posizionati su punti di coordinate note, la tecnica di posizionamento differenziale permette ai ricevitori di migliorare la precisione finale della geo-localizzazione. Per giungere alla massima precisione possibile (millimetrica), vi sono delle postazioni fisse la cui posizione è stata determinata per via geodetica e/o con altri metodi. Esse ricevono il segnale GNSS e, essendo state appunto misurate con elevata precisione tramite altri strumenti, determinano dell'errore della posizione calcolata tramite il GNSS. Tale errore viene comunicato via radio o telefonia cellulare o satellite geostazionario ad altri apparecchi GNSS che potranno così correggere l'errore originario della misura effettuata tramite i soli satelliti visibili. Per realizzare il posizionamento differenziale si utilizzano quindi 2 o più ricevitori: uno (master) posizionato su un vertice di riferimento di posizione nota e uno, solitamente in movimento (rover), sui punti da rilevare (Figura 4.6). Il master calcola le correzioni di range (satellite-ricevitore) e le loro variazioni nel tempo e le trasmette in tempo reale al rover. Quest'ultimo, applicando le correzioni ricevute alle sue misure di pseudoranges, calcola la posizione migliorando la precisione nella determinazione delle coordinate.

Il posizionamento differenziale può essere effettuato con misure di codice o fase. In questo secondo caso, la precisione passa da metrica a centimetrica. Il DGPS con misure di fase viene impiegato per applicazioni cinematiche di precisione in tempo reale e viene indicato con l'acronimo RTK (*Real Time Kinematic*).



Figura 4.6. Rappresentazione del posizionamento differenziale.

4.5.3 Rilievi GPS in modalità statica

Il rilievo GPS in modalità statica, tecnica di posizionamento relativo, permettendo di raggiungere elevati livelli precisione e affidabilità, risulta essere particolarmente adatto per la creazione di reti di inquadramento o per il raffittimento di reti già esistenti. Il metodo si attua sistemando un ricevitore su un punto di coordinate note e un altro (o gli altri, nel caso in cui si utilizzino più ricevitori) volta per volta sui punti incogniti. Nello specifico, la procedura consiste nella registrazione di almeno quattro satelliti contemporaneamente da due punti su cui posizionare i ricevitori che restano fermi per l'intera durata della sessione di misura. Quest'ultima è l'intervallo temporale necessario per registrare i satelliti al fine di determinare la posizione relativa dei due ricevitori e la lunghezza della baseline (le due stazioni costituiscono gli estremi della baseline determinata a seguito delle osservazioni). La durata di tale periodo, mediamente variabile tra 20 e 60 minuti, dipende sia dalla precisione che si vuole raggiungere che da numero e configurazione dei satelliti tracciati. In un rilievo di tipo statico i risultati non vengono ottenuti in tempo reale: al fine di conseguire un'elevata precisione, infatti, occorre che i dati siano elaborati in una fase successiva (*post-processing*). In particolare, utilizzando un *software* opportuno, come LeicaTM GeoOffice, si effettua una correzione differenziale dei dati acquisiti sulla base delle stazioni permanenti SmartNetItalPos presenti nell'area di interesse.

Capitolo 5 - Caso studio n. 1: Monitoraggio dello *strain* tramite DOFS in una cava a cielo aperto

Il presente capitolo viene presentato in forma di caso studio descritto in stile accademico.

Contributo di C. Lanciano

Sotto la supervisione del Tutore, C. Lanciano ha avuto modo di partecipare attivamente a tutte le fasi di rilievo e analisi. In fase di progettazione del sistema di monitoraggio, ha contribuito alla definizione del percorso dei DOFS e, in seguito, alla loro installazione sul fronte oggetto di analisi. Ha fatto parte del team del Laboratorio di Geomatica del Centro di Geotecnologie durante i rilievi fotogrammetrici mediante UAV, topografici e GNSS. Inoltre, ha effettuato la fase di *data processing*, articolata in: rappresentazione delle discontinuità; analisi di stabilità cinematica e dinamica; realizzazione di cartografia tematica; elaborazione dei dati GNSS, topografici e fotogrammetrici; elaborazioni in ambiente GIS. Infine, ha analizzato e interpretato i dati di *strain* derivati dalle misure BFS mediante DOFS.

5.1 Introduzione

I fenomeni di crolli di roccia costituiscono un rischio significativo in diversi tipi di ambiente, ad esempio nelle aree montane, nelle città caratterizzate da un'impervia topografia, nei tagli di strade e autostrade, ma soprattutto nelle cave e nelle miniere a cielo aperto. Recenti lavori (Alejano et al., 2012), infatti, riferiscono che oltre il 20% degli incidenti che avvengono nei siti di estrazione sono dovuti alla caduta massi. Ciò porta alla necessità di proporre metodologie che siano in grado di valutare e controllare i crolli degli amassi rocciosi all'interno delle cave (Alejano et al., 2007 & 2008) al fine di tutelare i beni materiali presenti e, soprattutto, la sicurezza e la salute dei lavoratori.

Un ruolo molto importante è rivestito dalle analisi di stabilità dei versanti, le quali consentono di effettuare l'individuazione delle aree pericolo, lo studio dei potenziali meccanismi di cedimento e la determinazione della sensibilità del pendio ai diversi meccanismi di innesco, la progettazione di pendii ottimali in termini economici, di sicurezza e affidabilità e, infine, la progettazione di eventuali opere di difesa (Nalgire et al., 2020). Tuttavia, nell'ambito dei siti di estrazione del marmo delle Alpi Apuane (Regione Toscana), a causa della dinamicità dell'ambiente, in continua evoluzione, questo tipo di analisi può rivelarsi insufficiente, o almeno non tempestiva, per poter intraprendere adeguate misure di prevenzione. Un valido supporto a questo tipo di analisi può essere costituito dall'implementazione di un sistema di monitoraggio che consenta di migliorare la conoscenza della stabilità dell'area di interesse e affinare la previsione di eventuali fenomeni di crollo.

Il presente caso studio mostra il sistema di monitoraggio sperimentale costituito da DOFS installato presso un fronte della Cava Piastra Bagnata (Comune di Vagli di Sopra, Provincia di Lucca). Si tratta di un sito di estrazione del marmo a cielo aperto nel quale l'intersezione tra i vari sistemi di fratturazione e la superficie del versante genera blocchi

e cunei rocciosi, di dimensioni variabili, che possono essere soggetti a fenomeni di instabilità gravitativa.

Il sito è stato completamente caratterizzato da un punto di vista geologico-strutturale, geomeccanico e petrografico mediante opportune indagini in situ e in laboratorio. A seguire sono state effettuate le analisi di stabilità cinematica e dinamica. Per raffinare il rilevamento geomeccanico e georeferenziare e cartografare la posizione dei DOFS, sono stati eseguiti rilievi UAV supportati da rilievi topografici mediante Stazione Totale e GNSS. Mediante il sistema OSD-1, sono state acquisite misure multitemporali di *strain* da DOFS. L'analisi dei dati è stata effettuata realizzando grafici degli andamenti temporali dello *strain* lungo la parete oggetto di studio definendo un opportuno valore soglia di allarme.

5.2 Le Alpi Apuane: inquadramento geografico e geologico

Catena montuosa situata nella parte Nord-Occidentale della Regione Toscana, le Alpi Apuane sono delimitate a Nord-Ovest dal Fiume Magra (Lunigiana), ad Est dal Fiume Serchio (Garfagnana, Mediavalle e Piana di Lucca) e a Sud-Ovest dalla Versilia e dalla Riviera Apuana, andando ad interessare parte del territorio delle province di Lucca, Massa-Carrara, La Spezia e Pisa. Dal 1985, una porzione del loro bacino costituisce il "Parco Naturale Regionale delle Alpi Apuane" (Figura 5.1) che, dal 2011, è entrato a far parte della rete dei Geoparchi tutelati dall'UNESCO (http://www.unesco.it/it/ItaliaNellUnesco/Detail/187). L'area tutelata, la cui estensione è circa 200 km², comprende una grande varietà di ambienti collinari e montani distribuita all'interno dei seguenti ambiti geografici: Garfagnana (territori appartenenti alla provincia di Lucca, nel versante interno delle Alpi Apuane), Massa Carrara (territori appartenenti alla omonima provincia) e, infine, Versilia (territori appartenenti alla provincia di Lucca, nel versante marittimo delle Alpi Apuane).



Figura 5.1. Zonizzazione dell'area del Parco Regionale delle Alpi Apuane e localizzazione delle cave oggetto di studio.

Dal punto di vista geologico, le Alpi Apuane sono parte dell'Appennino Settentrionale, catena a pieghe e sovrascorrimenti formatasi durante il Terziario a causa dello scontro tra la microplacca Apula (o Adria), relativa alla placca Africana, e la microplacca Briançonnais (massiccio Sardo-Corso), relativa alla placca Europea (Boccaletti et al., 1971; Scandone, 1979; Mantovani et al., 1985; Dercourt et al., 1986; Stampfli et al., 1991 & 2001) con la chiusura del settore ligure del Dominio Oceanico Ligure-Piemontese. Tale collisione ha dato origine ad un regime compressivo che man mano si è diffuso dai settori interni a quelli esterni, fino a raggiungere il Mare Adriatico. Dal Miocene Inferiore, mentre si assisteva all'apertura del Bacino Balearico e del Mar Tirreno settentrionale, le strutture compressive sono state interessate da una tettonica distensiva. La fase più importante di quest'ultima, realizzatasi nella parte meridionale della Toscana, ha prodotto faglie dirette a basso angolo e sovrapposizione di unità tettoniche più elevate dell'edificio a falde sui complessi metamorfici del margine continentale. Con la successiva formazione di horst e graben (Miocene-Pleistocene) prolungati a Nord verso la zona apuana, caratterizzata dal verificarsi di fenomeni vulcanici, si ha avuto la scomposizione delle precedenti strutture compressive e distensive. Mentre quest'ultime continuano ad essere presenti negli Appennini Settentrionali, le strutture compressive interessano il margine esterno della catena lungo il Mare Adriatico e la Pianura Padana (Carmignani et al., 2002).

Tre fenomeni a scala regionale hanno contraddistinto la fase compressiva: i) sovrascorrimenti dell'Unità Subligure e delle Liguri s.l. sul Dominio Toscano Interno; ii) individuazione della Falda Toscana e suo sovrascorrimento sul Dominio Toscano Esterno; iii) tettonizzazione del Dominio Toscano Esterno lungo una fascia di taglio ensialica NE-vergente e suo metamorfismo in facies di scisti verdi.

Dal Miocene inferiore, le unità del Dominio Toscano e le Liguridi s.l. hanno risentito degli effetti dell'inversione del regime tettonico, da compressivo a distensivo, andando a plasmare zone di taglio duttili nel Complesso Metamorfico e faglie dirette a basso angolo nelle unità toscane non metamorfiche. In seguito, la struttura è stata interessata anche da faglie dirette ad alto angolo che hanno sviluppato, dal Tortoniano superiore in poi, i graben della Toscana.

La prima rappresentazione del Complesso Metamorfico delle Alpi Apuane, proposta da Zaccagna (1932), individua le seguenti unità: i) Unità Apuana (ex Autoctono Auct.), affiorante nella zona centrale del Complesso meridionale e in tutte le Apuane centrali e settentrionali comprese tra la zona del Carrarese, la valle Turrite Secca e Minucciano; ii) Unità di Massa, che comprende le rocce del Paleozoico e del Triassico affioranti al margine sudoccidentale del massiccio; iii) Unità delle scaglie di Stazzema e Unità delle Panie, situate in corrispondenza dell'estremità sudorientale. Poiché tra le ultime due unità non vi sono differenze litostratigrafiche, il Complesso Metamorfico viene considerato come insieme delle due sole unità di Massa e Apuana: mentre la prima è ben caratterizzata come successione stratigrafica e confinata tra contatti tettonici di primo ordine, all'interno della seconda sono presenti sotto-unità contraddistinte da lievi variazioni stratigrafiche e confinate da contatti tettonici di ordine inferiore.

La Figura 5.2 mostra una rappresentazione dello schema tettonico dell'Appennino Settentrionale nelle Alpi Apuane. La Figura 5.3 mostra uno schema dei due eventi deformativi che hanno interessato le Alpi Apuane: la deformazione compressiva duttile D_1 , dovuta alla collisione continentale tra la placca Sardo-Corsa e la placca Africana e la deformazione distensiva duttile D_2 , la quale induce al riequilibro isostatico della crosta ispessita (Carmignani et al., 1980).

Il Complesso Metamorfico è costituito dal basamento paleozoico e dalla copertura alpina della Microplacca Adriatica, deformati e metamorfosati dall'Oligocene superiore all'interno di una fascia di taglio ensialica NE-vergente. Tali unità sono situate al di sotto dell'unità di copertura, la cosiddetta Falda Toscana, separate dal basamento continentale africano, e di unità che derivano dal Dominio Oceanico ligure-piemontese con ofioliti e relativa copertura sedimentaria (Complesso Ligure s.l.). L'esumazione della suddetta fascia di taglio ensialica è dovuta alla denudazione tettonica come conseguenza del sollevamento isostatico ed erosione, connesse alla tettonica di tipo distensivo del Miocene e più giovane, che ha portato alla creazione delle deformazioni duttili D_2 nel Complesso e da duttilifragili a fragili nelle sovrastanti unità anchi-metamorfiche. Mentre nelle Alpi Apuane settentrionali la struttura della tettonica compressiva D_1 è ben conservata, nella zona meridionale è difficile risalire a tale geometria, in quanto la tettonica distensiva è stata molto marcata (Carmignani et al., 2002).

La fase compressiva ha sviluppato accavallamenti di dimensioni chilometriche, pieghe isoclinali e una scistosità sin-metamorfica S1 che, nella maggioranza dei casi, traspone la stratificazione originaria. La scistosità è parallela al piano assiale delle pieghe isoclinali le cui cerniere sono ruotate sui relativi piani assiali, per cui si ottiene una geometria a guaina tale che gli assi sono sub-paralleli alla lineazione di estensione (Sanderson, 1973; Escher & Watterson, 1974; Cobbold & Quinquis, 1980; Ramsay, 1980; Coward & Potts, 1983; Ridley, 1986).



Figura 5.2. Schema tettonico con relativa sezione schematica interpretativa dell'area delle Alpi Apuane, Appennino Settentrionale (da Carmignani et al., 2006).



Figura 5.3. Schema evolutivo tettonico delle Alpi Apuane secondo Carmignani e Kligfield (1990).
A) Fase di pre-collisione con tracce restaurate dei principali accavallamenti. B) Sviluppo del "*duplex*" apuano (Oligocene Inferiore). C) Sviluppo di "*antiformal stack*" nel Complesso metamorfico delle Alpi Apuane e probabile inizio della tettonica distensiva (Miocene Inferiore). D) Individuazione del "*core complex*" apuano, il *thrust* di base della Falda Toscana viene riattivato come faglia normale, separando settori estesi in generale con faglie listriche e rotazione di blocchi (Falda Toscana e Unità Liguri) da settori estesi mediante zone di taglio duttile sin-metamorfiche (Unità di Massa e "Autoctono" Auct.) (Miocene Medio-Superiore). E) Esposizione delle metamorfiti per denudazione e sollevamento, relazionati all'ulteriore assottigliamento crostale (Pliocene-Pleistocene). 1) Tracce degli accavallamenti ricostruit. 2) Accavallamenti attivi e faglie dirette. 3) Accavallamenti inattivi. 4) Base del Macigno. 5) Evaporiti triassiche e brecce tettoniche. 6) Tetto del basamento ercinico. 7) Tetto di un supposto basamento cristallino. 8) Movimenti compressivi (frecce rosse) e distensivi (frecce nere). UM: Unità di Massa. A1 e A2: porzioni sud-occidentale e nord-orientale del Complesso Metamorfico. A3 e A4: porzioni più esterne sottoscorse (Substrato dell'Unità Cervarola); immagine tratta da Carmignani et al. (2007).

Di seguito vengono elencate e brevemente descritte le principali strutture di primo ordine con estensione regionale riconducibili alla fase D_1 presenti nel settore occidentale.

- Sinclinale di Carrara: è formata da un fianco dritto, il cui massimo spessore si registra presso il paese di Colonnata e da un fianco rovesciato dell'allineamento Miseglia-Torano. Delle dolomie confinano una struttura disarmonica che, a livello del contatto Marmi-Metacalcari selciferi, realizza una struttura che comprende: i) la sinclinale di Carrara s.s., con a nucleo Metacalcari selciferi e Scisti sericitici della zona di Campocecina; ii) l'anticlinale di Pianza con a nucleo la formazione dei Marmi; iii) le strutture di M. Sagro comprendenti due strette anticlinali di Marmo e iv) due sinclinali di Metacalcari selcifero ben esposte sul versante meridionale del M. Sagro.
- <u>Anticlinale di Vinca</u>: il fianco rovesciato di questa struttura si sviluppa per una lunghezza di quasi quindici chilometri, dall'altezza del paese di Vinca fino a sud di M. Altissimo. A nucleo affiorano le formazioni delle Filladi Inferiori, Porfiroidi e

Scisti Porfirici. Il contatto tra i Grezzoni e le filladi paleozoiche del fianco dritto è interessato da una fascia di taglio diretta che, da Sud verso Nord, taglia progressivamente la formazione dei Grezzoni, ridotta ad una decina di metri sulla trasversale del M. Sagro.

- <u>Sinclinale di Orto di Donna M. Altissimo</u>: la traccia del piano assiale di questa struttura può essere seguita per circa 20 km, da Orto di Donna fino a sud di M. Altissimo. Il nucleo della sinclinale costituita dai suoi termini cretacici affiora estesamente nella valle di Orto di Donna e nella parte più settentrionale comprende alcuni lembi di Pseudomacigno. In direzione Sud, il nucleo della struttura è costituito dalla formazione dei Marmi.
- Anticlinale del M. Tambura: il suo fianco dritto è costituito da tutte le formazioni dell'Unità tettonica dell''Autoctono'' Auct. ben conservate. La superficie assiale dell'anticlinale è testimoniata da un esiguo spessore di basamento paleozoico che si segue con direzione N-S dal M. Tambura fino al Torrente Renara. Più a Sud la struttura cambia progressivamente in direzione partecipando alla così detta "Virgazione di Arni".



Figura 5.4. Schema tettonico e relativa sezione delle Alpi Apuane con indicazione delle strutture. Legenda delle sezioni – gr: dolomie e calcari dolomitici norici (Grezzoni) – m: Marmo Dolomitico e Marmi s.s.; cs-pmg: Calcari Selciferi, metaradiolariti, filladi e metarenarie, Lias medio-Oligocene; Cv: cataclasiti derivate principalmente da dolomie del Trias superiore (Calcare Cavernoso); TL: Falda Toscana e Ligurdu s.l. (Carmignani et al, 1993 b).

Il Complesso Metamorfico Apuano è stato deformato in una zona di taglio al di sotto del contatto con la Falda Toscana e al di sopra del Dominio Toscano. Considerando la vergenza verso E-NE delle strutture plicative e le relazioni angolari tra il contatto di base della Falda Toscana e la scistosità S_1 della D_1 , si deduce che, durante la fase compressiva, la Falda proveniva da SW, a conferma della classica interpretazione della struttura Appenninica. Successivamente, la fase tettonica distensiva D2, determinata da distensione crostale (Carmignani & Kligfield, 1990), ha deformato le strutture del Complesso Metamorfico e della Falda Toscana, dando luogo alla formazione di un nuovo sistema di pieghe e una nuova scistosità S₂ che sono andati a sovrapporsi ai precedenti (Carmignani e Giglia, 1975a & 1977; Pertusati et al., 1977; Carmignani et al., 1991). Nel Complesso Metamorfico, la distensione è realizzata da zone di taglio duttili inclinate a SW lungo il fianco sud-occidentale con spostamento a SW e a NE su quello nord-orientale con spostamento a NE: ciò ha determinato un'estensione orizzontale accompagnata da assottigliamento crostale. Tali zone di taglio distensive si sono sovrapposte alle precedenti strutture del tipo compressivo. Inoltre, il loro sviluppo è controllato proprio dalle giaciture della S1 e degli accavallamenti nella generale struttura antiformale (antiformal stack) originata

dalla fase compressiva. In aggiunta, si sono formate strutture quali scistosità di crenulazione, pieghe e lineazioni di intersezioni orientate in genere NW-SE (Carmignani et al., 2002).

Dal punto di vista delle strutture derivate da tale tettonica distensiva, la piega D_2 , nel Carrarese, ha deformato la Sinclinale di Carrara (e tutte le pieghe minori ad essa associate e i contatti tra le unità tettoniche), rendendo la giacitura da poco inclinata verso NW nelle zone di Campo Cecina-M.Borla, fino ad inclinazioni più marcate verso SW nelle zone a quota minore (Torano-Miseglia-Bedizzano). Inoltre, tale struttura ripiega la sovrastante Falda Toscana. La piega in questione, nota come "Antiforme di Carrara", è anch'essa accompagnata da pieghe di secondo ordine, ma presenti solo nei Grezzoni, nei Calcari Selciferi e negli Scisti Sericitici. L'asse ha direzione media NW-SE ed inclinazione di 10-20° verso NW; il suo piano assiale non è facilmente riconoscibile in affioramento, al contrario della foliazione S₂ che mostra deboli inclinazione sia verso NE che verso SW-W. Tra le più significative pieghe minori vi è la piega chilometrica a ginocchio che ha deformato sia il nucleo che il fianco della Sinclinale di Carrara tra Morlungo e Canale d'Abbia, con fianco lungo superiore (Campo Cecina) e inferiore (M. Uccelliera) più o meno orizzontali e collegati ad un fianco corto assai inclinato verso SW (Carmignani et al., 2002).

Tra le strutture D_2 più note vi è quella di Arni (Carmignani et al., 1993), area in cui le principali strutture della fase D1 sono costituite da due sinclinali isoclinali principali a nucleo di Pseudomacigno: la Sinclinale di Arni e la Sinclinale del M. Fiocca, separate dall'Anticlinale a nucleo di marmi di Passo Sella. Esse, durante la fase D2, sono state ripiegate da una sinforme e un'antiforme chilometriche (Sinforme e Antiforme di Arni) che, viste da Sud, realizzano il classico profilo ad "S" caratteristico delle pieghe D2. La struttura di Arni si sviluppa dalla zona di San Viviano (vicino all'abitato di Vagli) fino sulla trasversale di Arni - M. Fiocca; in questo primo tratto, la linea di cerniera ha una direzione circa N-S e una debole immersione verso Nord. A partire dall'altezza di Arni, la direzione della struttura cambia gradualmente fino a disporsi NW-SE con leggera immersione verso SE, realizzando quella che è nota in letteratura come "Virgazione di Arni" (Giglia, 1967). Inoltre, la deformazione distensiva D2 ha sviluppato strutture quasi planari e assai persistenti con inclinazione verso SW, coincidenti con la foliazione S1 più pervasiva. Durante la fase D_2 , è possibile la riattivazione della S_1 , in una cinematica da faglia duttilefragile e/o duttile, che ha provocato spostamenti verso SW dei blocchi di tetto, di intesa con la vergenza delle pieghe coeve. Tali strutture sono accompagnate dai sistemi coevi di pieghe per permettere che, ove la struttura della D1 lo imponga, il movimento di spostamento delle masse a SW possa essere trasferito a livelli strutturali più elevati (Carmignani et al., 1993a).

Per quanto riguarda i sistemi di fratturazione, secondo Carmignani et al. (2002), sono presenti tre sistemi principali: i) un primo sistema parallelo ad S₁, pervasivo e ben sviluppato, con direzioni variabili da N120°E a N150°E e inclinazioni verso SW medioalte (Carmignani et al., 2002); ii) un secondo sistema con una direzione media antiappenninica variabile da N20-30°E a N80-90°E con inclinazioni sub-verticali e con valori di 50-60°, sia verso NW che SE (Carmignani et al., 2002); iii) un ultimo sistema caratterizzato da una direzione quasi coincidente a quella del primo, ma con immersioni delle sue fratture prevalentemente verso E NE e inclinazioni da medie ad elevate, oppure verso W e SW ma in minor misura, e comunque sempre con inclinazioni assai elevate (Carmignani et al., 2002).

Ottria e Molli (2000) mostrano come le suddette fratture si siano localmente evolute in faglie con modesti rigetti. Analizzando tali faglie da un punto di vista cinematico, è stata

ricostruita una cinematica di tipo trascorrente (destrale e sinistrale), anche con vari casi di trans-tensione. Poco rappresentate, invece, sono le faglie inverse o con una componente inversa di movimento. Lo studio, inoltre, afferma che movimenti di trascorrenza possono avere luogo lungo faglie sub-verticali con orientazione sia SW-NE che NW-SE, con movimenti rispettivamente di tipo sinistrale e destrale; in aggiunta, le faglie con un movimento normale sono orientate NNW-SSE e mostrano inclinazioni medio-alte sia verso i quadranti orientali che occidentali. Oltre alle due suddette tipologie di faglia, vi sono: faglie contraddistinte da una cinematica mista, normale e trascorrente, con direzioni WSW-ENE e NW-SE, con inclinazioni medio-alte; faglie normali aventi direzioni NW-SE e inclinazioni medio-basse verso SW coincidenti con la locale S₁. Tali sistemi di fratturazione e faglie sono riferibili ad una tettonica di tipo fragile, la quale si è sviluppata durante le ultime fasi del sollevamento apuano, più precisamente durante la formazione dei *graben* della Versilia a SW rispetto alle Alpi Apuane, della Lunigiana a NW, e della Garfagnana a NE.

Recentemente è stata proposta l'ipotesi dello sviluppo di una fase deformativa tardiva, denominata D_3 , responsabile dell'attivazione di zone di taglio duttili caratterizzate da cinematismi diretti e trascorrenti. Tali *shearzones*, che hanno ulteriormente complicato l'assetto strutturale del Complesso metamorfico, sembrano essere determinanti per la geometria finale attuale (Regione Toscana, 2018).

Per quanto riguarda i siti estrattivi oggetto di analisi nel presente lavoro: i) la "Cava Piastra Bagnata" si trova all'interno dell'anticlinale di prima fase del Monte Pallerina; ii) la "Cava del Piastraio di Sotto" è parte del basamento Paleozoico dell'Unità Apuana e dell'Unità di Massa; iii) la "Cava Lorano "I" n° 22" è situata sul fianco dritto dell'Anticlinale di Pianza tra la Sinclinale di Vallini, ad ENE, e la Sinclinale di Carrara, a WSW.

5.3 La "Cava Piastra Bagnata"

La "Cava Piastra Bagnata" (Figura 5.5), ubicata nel Comune Vagli di Sopra (LU), è un sito di estrazione appartenente al bacino estrattivo di Monte Pallerina che, collocato sul versante orografico destro della valle di Arnetola, interessa la formazione dei "marmi s.l." dell'Unità Metamorfica delle Apuane – "Autoctono". Si tratta della zona orientale del complesso montuoso apuano, dove la tettonica deformativa polifasata ha dato origine a strutture complesse caratterizzate dalla presenza di pieghe isoclinali, anticlinali e sinclinali. Di conseguenza, in affioramento si hanno forme chiuse con pieghe tipo *sheath folds*, la cui formazione è stata probabilmente controllata da eterogeneità laterali all'interno della successione stratigrafica (serie ridotte). L'elemento strutturale fondamentale è l'anticlinale di prima fase del Monte Pallerina a nucleo di marmo che, all'ingresso della valle di Arnetola, si immerge a *tête plongeante* verso NNE sotto le formazioni sovrastanti. In tale area il marmo raggiunge il suo massimo spessore, probabilmente anche per sovrapposizioni successive, mentre, verso Sud, si riduce progressivamente fino a scomparire al di sotto delle sovrastanti formazioni.

Nel sito oggetto di analisi, l'attività estrattiva è stata avviata all'inizio dello scorso secolo e, nel corso del tempo, ha portato all'apertura di diverse cave. Le tracce dell'attività antropica sono riscontrabili in diversi elementi che caratterizzano il paesaggio, quali fronti cava, ravaneti, strade, linee elettriche, acquedotti, edifici, opere che, complessivamente, hanno alterato nel profondo gli aspetti morfologici naturali della valle. Attualmente la cava più importante del bacino è quella della Piastra Bagnata (Figura 5.5), cava di versante localizzata nella parte settentrionale del bacino e posta a mezza costa sul versante occidentale del Monte Pallerina.

L'area estrattiva, esposta ad Ovest e compresa tra le quote 1020 m s.l.m. e 1174 m s.l.m., è contraddistinta dalla presenza di un esteso ravaneto che interessa il versante sottostante la cava da quota 1037 m s.l.m. fino al fondovalle di Arnetola. Il metodo di coltivazione della cava è a cielo aperto, mediante gradoni di altezza variabile da 4 m a 6 m, con tagli combinati a filo diamantato e segatrice a catena. Nella cava sono presenti quattro cantieri attivi, rispettivamente denominati: Cava Sesta, Cava Terza, Cava Quinta e, infine, Cava Seconda Alta. La parte dell'area estrattiva investigata nel presente lavoro appartiene a quest'ultimo cantiere ed è rappresentata da un unico fronte (Figura 5.5), orientato mediamente in direzione N-S, che si sviluppa per una lunghezza di circa 160 m e un'altezza media di circa 45 m, caratterizzato dalla presenza di un piazzale sito ad un'altitudine di circa 1160 m s.l.m.

Il fronte estrattivo è caratterizzato dalla presenza di fratture che si sviluppano per lunghezze variabili da decimetriche a decametriche e penetrano verso l'interno per spessori difficilmente stimabili (spesso superano il metro di profondità). L'intersezione tra i vari sistemi di fratturazione e la superficie del versante genera blocchi e cunei rocciosi, di dimensioni variabili, che possono essere soggetti ad eventuali fenomeni di instabilità gravitativa. Di conseguenza, si tratta di una parete adatta per il monitoraggio mediante DOFS.



Figura 5.5. Inquadramento geografico della Cava Piastra Bagnata; in basso a sinistra, una panoramica del fronte oggetto di monitoraggio.

5.4 Materiali e metodi

5.4.1 Rilievo geologico-strutturale e geomeccanico

Nell'area della Cava Piastra Bagnata è stato effettuato un rilievo geologico-strutturale finalizzato a: i) identificare le formazioni presenti; ii) riconoscere le principali caratteristiche geomorfologiche del sito; iii) descrivere gli elementi tettonici presenti; iv) raccogliere campioni di roccia; v) reperire qualsiasi altra informazione e/o materiale utile. Al fine di misurare e caratterizzare i sistemi di discontinuità presenti in cava, è stata condotta anche una campagna di rilevamento geomeccanico, come mostrato in Figura 5.6. Gli stendimenti sono stati localizzati nelle aree maggiormente significative e facilmente raggiungibili del fronte indagato. Le misure effettuate su ogni di discontinuità intercettata fanno riferimento alle seguenti caratteristiche: giacitura (direzione di immersione e inclinazione), persistenza, spaziatura, apertura, tipo di riempimento, rugosità (indice JRC), alterazione, contenuto d'acqua e indice di rimbalzo (R), utile per il calcolo della resistenza a compressione (indice JCS).



Figura 5.6. Fasi del rilievo geomeccanico presso la Cava Piastra Bagnata.

5.4.2 Analisi petrografiche

Una parte importante della caratterizzazione dell'ammasso roccioso è rappresentata dall'analisi petrografica, finalizzata alla completa definizione dei caratteri composizionali e strutturali dello stesso. La petrografia, attraverso la tradizionale analisi microscopica ottica e, ove appropriato, supportata da tecniche analitiche quali Microscopia Elettronica a Scansione (SEM-EDS), Catodoluminescenza (CL), Spettroscopia all'infrarosso (SWIR-NIR) e Diffrattometria a raggi X (XRD), consente di: i) conoscere con estremo dettaglio le impronte lasciate dall'alterazione durante e dopo la migrazione dei fluidi connessi con le mineralizzazioni di interesse economico; ii) disporre di un potente strumento nella cartografia e conseguente vettorizzazione delle ricerche sul terreno e, iii) generare un modello petrogenetico già nelle prime fasi dell'esplorazione mineraria.

Nell'ambito del presente lavoro di tesi, la caratterizzazione petrografica e fisico-meccanica dei marmi affioranti nelle tre diverse aree oggetto di studio è stata effettuata presso il "Laboratorio di Meccanica delle rocce e dei Materiali naturali da costruzione" del Centro di Geotecnologie dell'Università degli Studi di Siena.

5.4.3 Classificazione dell'ammasso roccioso

L'analisi dei dati misurati in campagna, relativi a tutte le aree di interesse, in modo uniforme e a differenti altezze, ha permesso di ottenere la caratterizzazione delle discontinuità e di definire la qualità dell'ammasso roccioso. Per rappresentare le caratteristiche geometriche dei piani di fratturazione misurati, è stata eseguita un'analisi statistica della loro distribuzione utilizzando la proiezione stereografica equiareale di Schmidt (emisfero inferiore), che consente di individuare le zone di massimo addensamento corrispondenti alle famiglie principali. L'analisi statistica dei dati è stata eseguita mediante il *software* Dips 7.0 (RocscienceTM Inc.). L'elaborazione dei dati raccolti ha consentito di calcolare l'indice caratteristico qualificante l'ammasso roccioso secondo il metodo *RMR*^{*b*} (Bieniawski, 1976) (vedi Capitolo 3).

5.4.4 Analisi di stabilità del versante

Essendo oggetto di monitoraggio un fronte di cava in continua evoluzione poiché soggetto a lavorazione, si è scelto di effettuare un'analisi delle condizioni di stabilità di tipo sia cinematico che dinamico. Brideau et al. (2011) sostengono che i risultati delle analisi di stabilità sono fortemente influenzati dalla topografia dell'area di indagine; per tale ragione sono state individuate e separate porzioni di fronte con direzione dei versanti differenti e rappresentative di ciascuna zona.

Le analisi di stabilità cinematica sono state svolte grazie all'utilizzo del software Dips 7.0, il quale consente la visualizzazione e la determinazione dei cinematismi dei pendii rocciosi utilizzando coni di attrito, inviluppi e analisi grafiche e statistiche delle proprietà delle discontinuità. Le tipologie di cedimento considerate sono: scivolamento planare, scivolamento di cunei, ribaltamento diretto e, infine, ribaltamento flessurale. I dati di partenza consistono in: giaciture medie dei principali sistemi di discontinuità, giaciture medie dei versanti e valori di angolo di attrito.

Le analisi di stabilità dinamica sono state eseguite mediante i software RocPlane, Swedge e RocTopple (RocscienceTM Inc.), basati sui metodi all'equilibrio limite, i quali consentono di valutare, rispettivamente, fenomeni di scorrimento planare, scivolamento di cunei e ribaltamento in versanti rocciosi. Preliminarmente allo svolgimento delle analisi, sono state effettuate le seguenti operazioni: i) individuazione dei bocchi potenzialmente instabili; ii) definizione della geometria dei blocchi da investigare e, conseguentemente, del peso; iii) definizione della presenza di acqua e forze sismiche; iv) scelta del modello di resistenza a taglio. Secondariamente, è stato necessario selezionare il metodo di analisi: i) deterministico: dati di input noti e calcolo di un singolo fattore di sicurezza (FS), definito dal rapporto tra le forze resistenti e quelle mobilizzanti; ii) probabilistico: incertezza nei dati di input e calcolo di un range di valori di FS da cui calcolare la probabilità di cedimento. Considerando la complessità geomeccanica, la grande varietà di possibili cinematismi innescabili (in termini di tipologia e dimensioni dei blocchi) e l'incertezza su alcuni dati di input (proprietà geomeccaniche delle singole discontinuità), si è deciso di adottare un approccio di tipo probabilistico. Attraverso tale procedura è stato possibile considerare una certa variabilità dei valori di input tramite l'assegnazione di una predefinita distribuzione statistica e ottenere, come risultato finale, una probabilità di cedimento. Il metodo probabilistico utilizzato è quello denominato "Latin Hypercube" (Startzman & Wattenbarger, 1985; Iman, 2014) basato su una selezione casuale dei valori di input (nei range di variabilità definiti dall'utente) per ogni elemento. Ciò permette di restituire risultati

comparabili con la tecnica "Monte Carlo", ma con un minor numero di simulazioni, 1000 contro 5000 (Hoek, 2007). Per il presente caso studio, sono state realizzate 10000 simulazioni per ogni analisi probabilistica (5000 per i ribaltamenti), in modo tale da ottenere risultati consistenti dal punto di vista statistico. Inoltre, sempre in considerazione delle incertezze sui dati di input, si è scelto di considerare, oltre al classico limite FS < 1, un FS di *design* pari a 1,3 come minimo ragionevole limite di sicurezza. Per quanto riguarda, invece, il criterio di rottura, si è scelto di fare riferimento a quello di Barton-Bandis (Barton, 1973; Barton 1976; Barton & Choubey, 1977; Barton & Bandis, 1990) in maniera tale da focalizzare l'attenzione sull'angolo di attrito residuo, che dipende da rugosità della superficie e caratteristiche geomeccaniche della discontinuità, piuttosto che sulla coesione:

$$\tau = \sigma_n \tan\left[JRC \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) + \varphi_r\right]$$
(5.1)

dove: σ_n è lo sforzo normale agente sulla superficie, JRC è il coefficiente di rugosità, JCS è la resistenza a compressione uniassiale sulla superficie di discontinuità, φ_r è l'angolo di attrito residuo.

In relazione alla definizione della forza sismica, come indicato dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M.17.01.2018), essa viene considerata secondo l'approccio pseudostatico, ovvero rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso proprio del blocco di roccia. A tal fine, vengono calcolati i valori dei coefficienti sismici orizzontale k_h e verticale k_r :

$$k_h = \beta_s \cdot \frac{a_{max}}{g} \tag{5.2}$$

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h \ (5.3) \tag{5.3}$$

dove: i) β_s indica il coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito, pari a 0.38 nelle verifiche dello stato limite ultimo (SLV – Stato Limite di Salvaguardia della Vita), al quale bisogna rifarsi per le verifiche di stabilità in condizioni pseudo-statiche di fronti di scavo; ii) a_{max} rappresenta l'accelerazione orizzontale massima attesa al sito, funzione di un coefficiente stratigrafico SS e di uno topografico ST; iii) gè l'accelerazione di gravità.

5.4.5 Rilievo DGPS e topografico

Nel processo di restituzione dei modelli geomatici (in particolare da fotogrammetria digitale e *laser scanning* terrestre), è importante avere a disposizione un certo numero di punti di riferimento dotati di coordinate note che consentano al *software* utilizzato di controllare le distorsioni geometriche delle immagini acquisite e di scalare e georiferire correttamente il modello finale. Per ricavare tali punti, è stato necessario effettuare un rilievo topografico supportato da misurazioni DGPS e con TS.

5.4.5.1 Acquisizione dei dati

Per eseguire il rilievo DGPS, sono stati utilizzati due ricevitori geodetici a doppia frequenza Leica[™] GS15 (figure 5.7 e 5.8 e Tabella 5.1), operanti in modalità statica, che

hanno acquisito i segnali trasmessi dalla costellazione satellitare con continuità e registrando i dati ad intervalli temporali di 5 secondi. Oggetto del rilievo DGPS sono stati il punto di origine delle misure effettuate con la TS e quello scelto come direzione zero (denominato "az0").



Figura 5.7. Ricevitore geodetico a doppia frequenza LeicaTMGS15 (<u>www.leica-geosystems.com</u>).

	Tecnologia	Tecnologia brevettata Leica SmartTrack+					
	Numero canali	120					
Prestazioni GNSS	Numero massimo di satelliti tracciati	60					
	Tracciamento satelliti	GPS, GLONASS, Galileo, Compass, SBAS					
	Misure GNSS	Misure di codice e di fase indipendenti in tutte le frequenze					
	Tempi di riacquisizione	< 1 s					
	Precision	e (rms) Differenziale di solo Codice con DGPS/RTCM					
	DGPS/RTCM	25 cm (rms)					
	Precisione (rms) in Real-Time (RTK)						
	Standard di conformità	ISO17123-8					
Precisioni	Statico rapido (fase)	Orizzontale: 5 mm + 0.5 ppm (rms)					
	Statico dopo inizializzazione	Verticale: 10 mm + 0.5 ppm (rms)					
	Cinematico	Orizzontale: 10 mm + 1 ppm (rms)					
	In movimento dopo inizializzazione	Verticale: 20 mm + 1 ppm (rms)					

	Precisione (RMS) in Post-elaborazione							
	Statico (fase)	Orizzontale: 3 mm + 0.5 ppm (rms)						
	Lunghe osservazioni	Verticale: 6 mm + 0.5 ppm (rms)						
	Statico e Statico rapido (fase)	Orizzontale: 5 mm + 0.5 ppm (rms) Verticale: 10 mm + 0.5 ppm (rms)						
	Cinematico (fase)	Orizzontale: 10 mm + 1 ppm (rms) Verticale: 20 mm + 1 ppm (rms)						
	Peso	1.34 Kg						
	Dimensioni	196 x 198 mm						
	Temperatura operativa	[-40, +65] °C						
Handwana	Tensione di alimentazione	12 V						
Haldwale	Consumo	3.2 W, 270 mA						
	Alimentazione interna	Batterie Li-Ion ricaricabili e removibili, 2.6 Ah/7.4 Volt						
	Durata delle batterie	10 h in ricezione RTK con radio standard						
	Alimentazione esterna	Batteria esterna ricaricabile NiMh da 9 Ah/12V						
Dati	Tipo	Dati grezzi GNSS Leica e Dati Rinex						
2011	Velocità di registrazione	Fino a 20 Hz						

 Tabella 5.1. Specifiche tecniche del ricevitore geodetico a doppia frequenza (LeicaTMGS15) tratte da www.leica-geosystems.com.



Figura 5.8. Ricevitore geodetico a doppia frequenza (LeicaTM GS15) operante in modalità statica presso la Cava Piastra Bagnata.

La Stazione Totale utilizzata, utile a misurare i punti di riferimento presenti sul fronte di cava investigato, è una LeicaTM Nova MS50 (figure 5.9 e 5.10 e Tabella 5.2).



Figura 5.9. Stazione Totale LeicaTM Nova MS50 (<u>www.leica-geosystems.com</u>).

Misure angolari							
Precisione Hz e V	1" (0.3 mgon)						
Misure di distanza							
Portata	Prisma Circolare	Da 1,5 m a > 10000 m					

	No Prisma / Qualsiasi superficie	Da 1,5 m a 2000 m		
Precisione / Tempo di	Singola (Prisma)	1 mm + 1.5 ppm / tip. 1.5 s		
Misura	Singola (Qualsiasi superficie)	2 mm + 2 ppm / tip. 1.5 s		
Tecnologia di Misura	Wave Form Digitising	Laser rosso visibile coassiale		
	Riconoscimento automatico del	prisma		
Portata ATR / Modo	Prisma Circolare	1000 m / 800 m		
Lock	Prisma 360°	800 m / 600 m		
Precisione / Tempo di Misura	Precisione degli Angoli Hz, V	1" (0.3 mgon) / tip. 2,5 s		
	Dati generali			
Autofocus	Ingrandimenti / Portata	30 x / 1,7 m all'infinito		
Alimentazione	Batteria agli Ioni di Litio intercambiabile con capacità di ricarica interna	Durata 7-9 ore		
Memorizzazione Dati	Memoria Interna / Memory Card	1 GB / Scheda SD da 1 GB o 8 GB		
Interfacce	RS232, USB, Bluetooth, WLAN			
Peso	Multistation batteria esclusa	7.6 kg		
	Temperatura operativa	[-20, +55] °C		
Specifiche Ambientali	Polvere / Acqua / Pioggia battente	IP65 / MIL-STD-810G, Metodo 506,5-I		
	Umidità	95% senza condensa		

Tabella 5.2. Specifiche tecniche della Multistation LeicaTM Nova MS50 (<u>www.leica-geosystems.com</u>).



Figura 5.10. Fasi di acquisizione della posizione dei punti in parete con TS presso la Cava Piastra Bagnata.

5.4.5.2 Elaborazione dei dati

Le coordinate dei diversi punti misurati (punto di origine delle misure effettuate con la TS, punto scelto come direzione zero e *target* in parete) sono state successivamente postprocessate attraverso l'utilizzo dei dati relativi alle stazioni permanenti ubicate in prossimità dell'area di studio, tratti dal sito ufficiale della rete di stazioni permanenti GNSS a copertura nazionale Leica SmartNetItalPos (<u>http://it.nrtk.eu/SpiderWeb/frmIndex.aspx</u>). In questo caso si è scelto di utilizzare i dati della sola stazione GPS Pieve Fosciana (PFOS) in considerazione della distanza dall'area di studio. La fase di *post-processing* è stata eseguita mediante il *software* LeicaTM Geo Office 8.4 (figure da 5.11 a 5.14).



Figura 5.11. Creazione di un nuovo progetto e importazione dei dati in ambiente LeicaTM Geo Office 8.4: a) impostazioni generali; b) sistema di coordinate; c) importazione dei dati grezzi; d) assegnazione dei dati al progetto; e) importazione delle effemeridi precise.

	difica Visualizza Strum	enti Punti	Esporta Finestra	7							
0 📽 🖉 🕰 🚇	@ @ Q Q Q	089		- 10- 57 BE	221255	1000 11 2	10 10 N? 84 /	R LOH	1C	- 07 1	E.
Apri documenti	ID punto	Classe punto	Sottoclasse punte	Data/ors /	Tipo di coordinate	Formato delle coordinate	Fonte XY delle coordin	sate Fonte Z de	elle coordinate	Latitudine	Longitudi
Vage, 2017022, share	97 PFOS 11 #80 12 GPS	Navigazione Navigazione Navigazione	Solo codice Solo codice Solo codice	10/13/2017 06:59.4 10/13/2017 10:28.3 10/13/2017 11:07:0	t Geodetiche 5 Geodetiche 7 Geodetiche	Latitudine, longitudine, Latitudine, longitudine, Latitudine, longitudine,	Fissato con GPS Fissato con GPS Fissato con GPS	Fissati Fissati Fissati	o con GPS o con GPS o con GPS	44° 07' 56.20207'' N 44° 06' 04.76251'' N 44° 06' 06.82233'' N	10° 24° 46.79336 10° 15° 24.74888 10° 15° 24.74888
oprietà punto		-		P 2							
Generale Valor stocar	elici Dati tematici Imm	agini				tEICA Geo Offic	ce - (Progetto Va	Apri percorso fi	le.		
ID punto:	PFOS	1	2 Attuato			File Importa	a Modifica Visualio	za Strumenti	GPS Elab E	isporta Finestra ?	
Classe del punto:	Controllo	•				0 📽 🖨 🛛) IB 🖻 😂 🖲	QQAN	Medifica	punto	9 E
Sotioclasse del punto:	Fisso per planimetris a	quota +				Apri docume	nti ID pu	Classe	Modifica	r intervallo	Durata
Tipo di coordinate:	geodeliche	e was	184 🔿 local			(T)	PFOS	Navigata 10	Cancella	intervalli	6h 59'
Formato coordinate:	Latitudine, longitudine.	quota	•				830	Navigata 10	DEsporta v	renso RINEX	2h 39'
Modaltà quota	@ elisoidca	() otometrica				viego journosa,	GPS	Navigata 10	Modalità	elaborazione	> 2h 04'
Lattudne	44' 7 56 20207' N	De	eviazione standard	0.0 m					Paramete	ri elaborazione	
Longitudine	10' 24' 46.79339' E	De	eviazone standard.	0.0 =		12			12 Baborati	ione	
Charles .	426.2667	m De	trebnets enoistive	0.0 #							
GLOUD.		- 10.0							Finestre		
SAULD:									Finestre		, c
UNITE:									Finestre		, c
									Finestre		, c
b			OK] [Ann	da Applica	,				Finestre		, c
b			ОК] [Ам	da Appica	,				Finestre		, c
b			ок] [Ат	da Applica Configura parametri	per elaborazione GPI		.0.	-	Finestre		, c
b			ок] [Am	da Applica Configura parametri Generate Batora	per elaborazione GPI				Finestre		, c
b			0K] [Ann	da Applea Configura parametri Generale (Balana	per elaboratione GPI		Seeka atta		Finestre		, c
b			0K] [Ann	Ja Applica Configura parametri Generale (Balana Argale a cat off	per elaboracione GPI torre naturatica		Satella atto		Finestre		, c
b			ок	da Appica Cenfigura parametri Generate Balana Argolo di cut off Diferendi	per elaborazione GPI torre aduratica	a.	2 001 × 7 000 × 7 000 ×		Finestre		, c
b			0K Am	da Appica Configura paravetri Generate Balance Argolo di cut off Bfenedic Tpo solucine	per elaboracione GPI tore adametica Matematica	8	Sector and 9,0000 9,0000 9,0000 9,000 9,000 9,000 9,000 9,000 9		Finestre		, c
b			0K] [Aw	An Applea Cenfigura parametr Generate (Balana Argole & cut off Biferend) Tipo solutione Teo GMSS	per daboracione GPI per aduratica Pencan Pencan Aduratica	8*	5000 ev 7,005 9,000 9,000 9,000 9,000 9,000 9,000 9,000 9,000		Finestre		, c
b			0K] [Am	da Applica Configura parametri Generativ <u>Balanca</u> Angolo di cui off Bfernandi Tipo solutore: Tipo GNSS	per elaboracione GP tore automotica Pessaa Adamatico Adamatico	2. E.	V 001 *		Finestre		, c
b			0K_] _Am	da Applea Configura parametri Generate <u>Balana</u> Argole di cut off Efferendi Tipo solutore: Tipo GNSS	per elaborazione GP nore autometica Pessan Adorestico Adorestico	8.	Comparison C		Finestre		c
b			OK Avro	de Applea Cenfigura parametri Gerente <u>Balane</u> Arquio di cui off Diferenti Tpo solutore Tpo GHSS	per elaboracione GPH torn automatica Pressa Astanutico Astanutico	8.	Control (Control (Contro) (Contro) (Contro) (Contro) (Contro) (Contro) (Contro) (Contro)		Finestre		, c
b			OK	da Agolea Configure parametri General Argole & cut off Blenend Top solutore Top Solutore	per elaboracione GP orre adamatica Pessa Adamatica Adamatica	1 1 1	Control (Control (Contro) (Contro) (Contro) (Contro) (Contro) (Contro) (Contro) (Contro)		Finestre		c

Figura 5.12. Operazioni preliminari all'elaborazione dei dati in ambiente LeicaTM Geo Office 8.4. a) Vista del progetto. b) Assegnazione della classe "punto di controllo" alla stazione permanente GNSS usata ai fini della correzione; i punti oggetto di rilievo GPS sono invece contraddistinti dalla classe "punto di navigazione". c) Avvio della schermata "parametri di elaborazione". d) Configurazione dei parametri di elaborazione.



Figura 5.13. Elaborazione dei dati in ambiente LeicaTM Geo Office 8.4. a) Assegnazione della classe
"riferimento" alla stazione PFOS (barra rossa) e della classe "rover" ai punti "az0" e "GPS" (barre verdi).
b) Avvio dell'elaborazione. c) Verifica dello stato di ambiguità. d) Operazioni di salvataggio.

Ivvio Questo wizard permette di trasformare le coordinate delle triplette che seguono. le stazioni TPS e le coordinate dei punti possono solo essere trasformate insieme.								
🕤 Immetti mar	nualmente o calcola	separatamer	nte					
Calcola med	diante punti comuni							
ID punto	Classe punto	Est	Nord	Quota ellis.	Quota ortogonale			
ST1	Controllo	500.0000	500.0000	-	500.000			
ST1	Riferimento	500.0000	500.0000	-	500.000			
T09	Misurata	529.3639	448.9759	-	507.319			
T08	Misurata	511.2246	479.2966	-	501.356			
T07	Misurata	513.6095	483.8639	-	499.781			
T06	Misurata	515.5461	486.7518	-	499.809			
T05	Misurata	517.8898	486.3714	-	499.821			
T04	Misurata	521.6511	485.0441	-	499.635			

Figura 5.14. LeicaTM Geo Office 8.4. Il comando "*Shift*/ruota/scala" consente di roto-traslare i punti rilevati con stazione totale rispetto ai punti GPS precedentemente corretti.

Inoltre, utilizzando il *software* ConveRgo (Conversioni di coordinate per le Regioni) che, per l'esecuzione dei calcoli di trasformazione utilizza i grigliati ufficiali dell'IGM (Istituto Geografico Militare), l'informazione di quota è stata trasferita dall'ellissoide WGS84 al livello del mare (Figura 5.15). L'elaborazione ha permesso di correggere le misure GPS, raggiungendo un'accuratezza sub-centimetrica per entrambi i punti rilevati.

Una volta note le coordinate assolute del punto di origine del rilievo topografico e la direzione di orientamento di quest'ultimo, data dalla *baseline* tra i due ricevitori GPS posti in cava, è stata effettuata la roto-traslazione del rilievo topografico con TS. Infine, per poter sovrapporre i prodotti geomatici finali alla Carta Tecnica Regionale (CTR) disponibile, le coordinate dei punti oggetto di rilievo sono state riferite al sistema di riferimento nazionale Gauss-Boaga, Roma40 Fuso Ovest.

	NPUT	Calazione Ba	Elmina unce	0.000		JUTPUT
Geografiche	Piane		Lana voce		Geografiche	Piane
ETRS89 7 C ETRF2000 C ETRF89	ETRS89 C UTM-ETRF2000 C UTM-ETRF89	File da trattare:	Svuota lista	Sistema catastale	ETRS89 [?] C ETRF2000 C ETRF89	ETRS89
C ROMA40 C ED50	C Gauss-Boaga C UTM-ED50				○ R0MA40○ ED50	Gauss-Boaga C UTM-ED50
SIST. CATASTAL	E 🦳 (Siena)				SIST. CATASTAL	E 🦳 (Siena)
QUOTA : Auto	 C Elissoidica E89 C Geoidica C Non modificare 				QUOTA	 C Elistoidica I Geoidica C Stessa di input
Fuso protezione	 № 32 ∩ 33 ∩ 34 ∩ Futo Italia 				Fuso proiezione	 C Est C 34 C Automatico
Origine longitudini	C Greenwich C Roma M.M.				Origine longitude	Gisenwich C Boma M.M
Formato file con liste di coordinate		C Altra cartella	Guttisso al nom	e Imposta	Formato file co	n liste di coordinate
Codice E	st Nord Quota	Geografiche: _E89	_E00_E50_R40 Pi	ane: _U89_U00_U5(Codice	Nord Est Quo

Figura 5.15. Interfaccia grafica del *software* ConveRgo. Per eseguire l'elaborazione è necessario: definire il tipo di coordinate di input e di output (geografiche/piane, quota ellissoidica/geoidica, fuso di proiezione) e il formato dei file contenenti le liste di coordinate di input e di output; selezionare i dati da convertire; lanciare il *processing* mediante il comando "Converti lista FILE".

5.4.6 Rilievo UAV

5.4.6.1 Acquisizione dei dati

Il rilievo fotogrammetrico della Cava Piastra Bagnata è stato realizzato utilizzando il drone multirotore AibotixTM X6 V1 (Figura 5.16) il quale presenta un'autonomia di circa 15 minuti ed è dotato di una fotocamera tipo Nikon Coolpix A (18,5 mm) in grado di operare nel range del visibile (400-700 nm) dello spettro elettromagnetico. L'equipaggiamento del mezzo è costituito da: i) sistema inerziale dotato di GPS, accelerometri e giroscopi; ii) videocamera per l'ispezione remota; iii) *software* di gestione del volo.

Il volo è stato manualmente acquisendo circa 500 foto digitali ad una distanza media dal fronte di 22,5 m dalla quale se ne ricava un *Ground Sample Distance* (GSD), ossia distanza tra i centri di pixel misurata sul terreno, di 5,58 mm/pix.





Figura 5.16. Rilievo fotogrammetrico UAV della Cava Piastra Bagnata: drone AibotixTM X6 V1 durante l'attività di rilievo della parete oggetto di studio (immagine in alto); vista dall'alto con indicate le posizioni della fotocamera (punti in nero) e il numero di immagini sovrapposte tramite legenda colorata (immagine in basso).

5.4.6.2 Elaborazione dei dati

La fase di *processing* dei dati fotogrammetrici è stata eseguita utilizzando la piattaforma software AgisoftTM Metashape Professional. La procedura di elaborazione delle foto è stata articolata nei seguenti punti: creazione di un nuovo progetto; caricamento delle foto; costruzione di una nuvola sparsa di punti 3D (*Sparse Cloud*); inserimento di *Control Point* e *Check Point* dal rilievo topografico; ottimizzazione; generazione di una nuvola densa di punti 3D (*Dense Point Cloud*); produzione del DEM; costruzione di un modello 3D poligonale di tipo *mesh*; generazione della *texture*; creazione dell'ortofotomosaico; esportazione dei prodotti. Le figure 5.17-5.19 mostrano le principali fasi delle elaborazioni effettuate.

Untitled — Agisoft Metashape Professional		Untitled — Agisoft Metashape	Professional
File Edit View Workflow Model Photo Orth	o Tools Help	Eile Edit View Workfle	ow Model Photo Qitho Iools Help
			◎ ▶ □·■·▲·ヘ·/ × 1 0 0 ÷ **·Ⅱ·◎·▲·◎
	- M - M - M	Workspace	Add Photos
Workspace 🗗 🗙 Mg	del Ortho	12 Workspace (1 chunks, 0 camera	n) O Volo 2 + 4 Cerce Volo 2 P
	rthographic	🖾 Chunk 1 (0 cameras)	Organizza 🕶 Nuova cartella 👘 🖬 🖗
Norkspace (1 chunks, 0 cameras)			* Prefenti
Chunk 1 (0 cameras)			Texash Decembri ≥ Incruspin 291 292 293 294 295
			Interve recenta States Interve recenta Grappe home 26 217 28 29 X0
a)			Computer Computer Computer Computer<
	l abel	Size Alian	ed Quality
		Size Alight	Quanty
	087.JPG	4928x3264 🗸	0.816726
	079.JPG	4928x3264 🗸	0.816309
	082.JPG	4928x3264 🗸	0.81568
	088.JPG	4928x3264 🗸	0.81493
	084.JPG	4928x3264	0.813898
	080.JPG	4928x3264 🗸	0.813501
	083.JPG	4928x3264 🗸	0.812602

Figura 5.17. Elaborazione delle foto da drone per la Cava Piastra Bagnata in ambiente AgisoftTM Metashape. a) Creazione di un nuovo progetto. b) Caricamento delle immagini. c) Valutazione della qualità delle fotografie (è consigliabile non inserire nella fase di *processing* le immagini caratterizzate da valori di qualità inferiori a 0,5).



Figura 5.18. Elaborazione delle foto da drone per la Cava Piastra Bagnata in ambiente AgisoftTM Metashape. La sezione "*Photos*", a sinistra, mostra le fotografie caricate nel progetto; a destra la sezione "*Model*" mostra la nuvola di punti sparsa costituita dai *tie point* ottenuta come risultato del processo di allineamento con sovrapposte le posizioni della fotocamera.


Figura 5.19. Elaborazione delle foto da drone per la Cava Piastra Bagnata in ambiente AgisoftTM Metashape. La sezione "*Reference*", a sinistra, mostra le coordinate dei *Control Point* (spunta verde) e dei *Check Point* (nessuna spunta) inseriti nel progetto; a destra, invece, la sezione "*Model*" mostra la nuvola di punti sparsa con sovrapposti tali punti.

5.4.7 Rilievi DOFS

5.4.7.1 Progettazione e installazione del sistema di monitoraggio mediante DOFS

Lo schema di disposizione della fibra ottica è stato progettato sulla base dell'esperienza dei ricercatori del CGT, dei geologi di cava e dei dati disponibili, ovvero dei dati geomeccanici, della documentazione fotografica, di una nuvola densa di punti 3D acquisita con *laser scanner* terrestre (Figura 5.20) nell'ambito di un precedente lavoro del CGT. In particolare, è stata scelta una configurazione tale da minimizzare l'incrocio del cavo sensore con le asperità presenti sul fronte (spigoli, ad esempio) e da massimizzare il numero di discontinuità intercettate.



Figura 5.20. Schema di disposizione dei sensori distribuiti in fibra ottica su base fotografica (a) e su nuvola di punti 3D acquisita con *laser scanner* terrestre (b).

In particolare, sul fronte oggetto di analisi sono stati posizionati 250 m lineari di DOFS. Il posizionamento dei sensori in fibra ottica sulla parete è stato effettuato grazie al contributo del personale tecnico della cooperativa di cavatori facente funzione o assistito da "tecchiaioli" specializzati. Optosensing s.r.l., inoltre, ha eseguito l'installazione della centralina elettronica e della sensoristica necessaria per l'acquisizione dei dati.



Figura 5.21. a) Installazione e verniciatura del cavo sensore lungo la parete della Cava Piastra Bagnata. b) Particolare: attività dei tecchiaioli in fase di posa del cavo. c) Verniciatura della fibra ottica in prossimità della centralina di misura.

5.5 Risultati

5.5.1 Caratterizzazione geologico-strutturale

Prodotto del rilievo geologico-strutturale è la "Carta geologico-strutturale con sezione interpretativa" (Figura 5.22), da cui si evince che la cava oggetto di analisi ricade all'interno della formazione dei "Marmi", ovvero: marmi bianchi, grigi, color avorio e giallo con sottili livelli di marmi a muscovite e, più raramente, di calcescisti grigio-verdastri; localmente livelli di filladi carbonatiche, dolomie e marmi dolomitici; brecce monogeniche metamorfiche a elementi marmorei da centimetrici a metrici.



Figura 5.22. Cava Piastra Bagnata, "Carta geologico-strutturale con sezione interpretativa".

5.5.2 Caratterizzazione petrografica

Dal rilievo geologico deriva anche la realizzazione della "Carta delle varietà merceologiche" (Figura 5.23), dalla quale è possibile osservare come il fronte oggetto di





Cordinate piane riferite al sistema sistema di riferimento cartografico Roma 40 - Gauss Boaga Fuso Ovest

Figura 5.23. Cava Piastra Bagnata. "Carta delle varietà merceologiche".

Inoltre, mirate analisi di laboratorio eseguite presso il Laboratorio di Meccanica delle Rocce del CGT hanno consentito di determinare le principali caratteristiche di tali tipologie di marmi di seguito riportate.

- <u>Breccia Rossa (Breccia Vagli Violetta) (Tabella 5.3 e Figura 5.24).</u> Metabreccia
 poligenica a prevalenti elementi marmorei e subordinate selci, in matrice a
 dominante composizione fillosilicatica di colore variabile dal verde scuro al rosso
 scuro, dal rosso violaceo al viola scuro. I clasti di marmo sono di vario tipo, da
 bianchi a grigio-chiari, da nocciola a rosati, spesso ricchi in frammenti e articoli di
 crinoidi e frammenti di belemniti. In generale questa metabreccia ha una struttura
 clasto-sostenuta anche se localmente la matrice può diventare la frazione più
 importante della roccia.
- <u>Marmo Grigio Vagli (Tabella 5.4 e Figura 5.25)</u>. Marmo a grana fine o media di colore grigio attraversato da vene grigie più chiare fino a biancastre. Litotipo molto eterogeneo e variegato dato da alternanze più o meno irregolari di livelli grigi e biancastri. Il colore scuro più o meno uniforme dell'insieme è dato da pirite

microcristallina e/o pigmento carbonioso. Non di rado sono presenti masse e/o strati dolomitici più o meno regolari e continui e livelli ocracei con pirite.

Caratteristica	U.M.	Valore medio
Carico di rottura a compressione	kg/cm ²	1317
Carico di rottura a compressione dopo cicli di gelività	kg/cm ²	1082
Carico unitario di rottura a flessione	kg/cm ²	86
Dilatazione lineare termica	10-6 per °C	7,4
Coefficiente d'imbibizione d'acqua	% in peso	0,2
Peso per unità di volume	kg/m ³	2679
Resistenza all'urto	cm	36,3
Modulo di elasticità lineare	kg/cm ²	443000
Resistenza all'abrasione	mm	8,8

Tabella 5.3. Proprietà fondamentali della varietà di marmo "Breccia Rossa (Breccia Vagli Violetta)".



Figura 5.24. Marmo "Breccia Rossa (Breccia Vagli Violetta)".

Nome	Descrizione	Caratteristica	U.M.	Valore medio
Marmo a g attraversa		Carico di rottura a compressione	kg/cm ²	1317
		Carico di rottura a compressione dopo cicli di gelività	kg/cm ²	1194
	Marmo a grana fine o media di colore grigio attraversato da vene grigie più chiare fino a biancostre. Litotino molto eterogeneo e varierato	Carico unitario di rottura a flessione	kg/cm ²	151
Grigio	Grigio Vagli dato da alternanze più o meno irregolari di livelli grigi e biancastri. Il colore scuro più o meno uniforme dell'insieme è dato da pirite microcristallina e/o pigmento carbonioso. Non di rado sono presenti masse e/o strati dolomitici più o meno regolari e continui e livelli ocracei con pirite.	Dilatazione lineare termica	10-6 per °C	8,1
Vagli		Coefficiente d'imbibizione d'acqua	% in peso	0,15
		Peso per unità di volume	kg/m ³	2688
		Resistenza all'urto	cm	33,8
		Modulo di elasticità lineare	kg/cm ²	649000
		Resistenza all'abrasione	mm	8,73

Tabella 5.4. Proprietà fondamentali della varietà di marmo "Grigio Vagli".



Figura 5.25. Marmo "Grigio Vagli".

5.5.3 Caratterizzazione geomeccanica e rappresentazione delle discontinuità

La Figura 5.26 mostra il risultato dell'analisi statistica della distribuzione dei poli delle discontinuità, mentre la Tabella 5.5 presenta i valori numerici delle giaciture medie e le altre proprietà fondamentali dei principali sistemi di fatturazione individuati.



Figura 5.26. Cava Piastra Bagnata: stereonet dei piani di fratturazione con evidenziati i principali sistemi.

Sistema	S1a	S1b	K1	K2	K3	K4
Inclinazione (<i>Dip</i>) (°)	42	55	85	54	85	55
Direzione d'immersione (<i>Dip</i> <i>Direction</i>) (°)	60	117	137	240	180	344
Spaziatura (cm)	1.5-2	1.5- 2	1.5-2	1.5-2	1.5-2	1.5-2
Persistenza (m)	>20	>20	>10	5	>20	>20
Apertura (mm)	10-20	-	-	10-20	10-100	1-100
Riempimento (mm, tipo)	>5, soffice	-	-	>5, soffice	>5, compatto	>5, soffice
JRC (Joint Roughness Coefficient)	7	7	11	7	9	9
Alterazione	Leggera alterazione	-	Leggera alterazi one	Leggera alterazione	Media alterazione	Media alterazi one
Umidità	Asciutta	-	Asciutt a	Umida	Umida	Umida

 Tabella 5.5. Cava Piastra Bagnata: valori di giacitura e caratteristiche delle diverse famiglie di discontinuità individuate.

Nella carta del rilievo geomeccanico (Figura 5.27), è possibile visualizzare i sistemi di discontinuità individuati mediante le attività di indagine sul campo.





Figura 5.27. Carta del rilievo geomeccanico della Cava Piastra Bagnata.

5.5.4 Classificazione dell'ammasso roccioso

Facendo riferimento alle tabelle relative alla qualità dell'ammasso roccioso proposte da Bieniawski (1976) (Tabelle 3.1-3.9), per la zona oggetto di studio, considerando il valore relativo alla famiglia più sfavorevole per la stabilità generale (in questo caso la famiglia K3), si giunge ai risultati riportati in Tabella 5.6.

Parametro	Valore	Indice
Resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta (MPa)	100-120	A1 = 12
RQD (%)	85-90	A2 = 17
Spaziatura (m)	1,5-2,0	A3 = 19
Condizione delle discontinuità	Persistenza > 20 m Apertura media > 5 mm Leggermente rugose Mediamente alterate Riempimento soffice	A4 = 8
Condizioni idrauliche	Umide	A5 = 10

Tabella 5.6. Cava Piastra Bagnata: caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso.

Poiché si ottiene un RMR_b pari a 66, l'ammasso roccioso ricade nella classe II (qualità buona). I parametri di resistenza al taglio dell'ammasso roccioso derivati empiricamente sono riportati in Tabella 5.7.

RMR _b	66
Classe	II
Qualità dell'ammasso roccioso	Buona
Coesione (MPa)	330
Angolo di attrito (°)	38
Modulo di deformazione (GPa)	32

Tabella 5.7. Cava Piastra Bagnata: qualità dell'ammasso roccioso.

Occorre specificare che i valori dei parametri riportati in Tabella 5.7 si riferiscono all'intero ammasso roccioso e che, derivando dall'applicazione di formule empiriche, forniscono solo un'indicazione di massima delle caratteristiche generali dello stesso. In via cautelativa, considerando l'assenza di specifiche prove e le indicazioni fornite da precedenti report tecnici realizzati sul medesimo sito, ai fini delle analisi di stabilità, si è stabilito di adottare un valore di angolo di attrito di 35°.

5.5.5 Analisi di stabilità cinematica

Poiché, come anticipato al Capitolo 3, i risultati dell'analisi di stabilità cinematica dipendono dalla topografia dell'area di indagine, sono state scelte 3 classi di direzione del versante rappresentative del fronte di cava in esame (Figura 5.28 e Tabella 5.8).



Figura 5.28. Cava Piastra Bagnata: suddivisione in domini omogenei del fronte di cava e individuazione di 3 classi di direzione del versante rispettivamente denominate V1, V2, V3 (visualizzazione in ambiente AgisoftTM Metashape Professional).

Versante	Inclinazione (°)	Direzione di immersione (°)
V1	85	240
V2	85	270
V3	85	300

Tabella 5.8. Cava Piastra Bagnata: suddivisione in classi di direzione del fronte di cava con indicazione dei valori di inclinazione e direzione di immersione.

L'analisi di stabilità cinematica è stata eseguita in ambiente Dips (RocscienceTM) per ogni classe di versante e per ciascuna tipologia di cedimento; inoltre, è stato determinato il valore dell'angolo limite. Si tratta di un angolo di sicurezza che rappresenta la massima pendenza raggiungibile dal versante senza avere possibili cedimenti in relazione a determinati sistemi di discontinuità. I risultati ottenuti sono mostrati nelle Tabelle 5.9 (scivolamento planare e su cunei) e 5.10 (ribaltamento diretto e flessurale).

	Scivola	mento planaro	e	Scivolamento di cunei		
Zona	Immersione versante (°)	Angolo limite (°)	Sistemi critici	Angolo limite (°)	Combinazioni critiche	
V1	240	53	K2	53	K1-K2/K2-K3/K2- K4/K2-S1b	
V2	270	57	K2/K4	42	K1-K2/K2-K3/K2-K4	
V3	300	63	K2/K4	41	K1-K2/K2-K3/K2-K4	

 Tabella 5.9. Cava Piastra Bagnata: risultati dell'analisi cinematica di stabilità sul fronte di cava per le ipotesi di scivolamento planare e di cunei.

-		Ribaltamento flessurale			
Zona	Immersione versante (°)	Angolo limite (°)	Combinazioni critiche	Angolo limite (°)	Sistemi critici
V1	240	48	S1a-S1b/S1a-K1/S1a-K4/S1B- K1/K1-K4 (piano basale K2)	82	S1a
V2	270	53	K3-S1b/K3-S1a/S1a-S1b (ribaltamento obliquo K1-K3) (piano basale K2)	73	S1b
V3	300	_	K3-S1b/K3-S1a (ribaltamento obliquo K1-K3) (manca piano basale K2)	40	K1/S1b

 Tabella 5.10. Cava Piastra Bagnata: risultati derivati dall'analisi cinematica di stabilità sul fronte di cava per le ipotesi di ribaltamento diretto e flessurale.

5.5.6 Analisi di stabilità dinamica

5.5.6.1 Calcolo dei coefficienti sismici orizzontale e verticale

In base alla classificazione sismica della Regione Toscana, il Comune di Vagli Sotto (LU) ricade in zona sismica 2 (Figura 5.29). Come si evince da Figura 5.30, gli eventi sismici ricorrenti nell'area del comune analizzato sono caratterizzati da intensità massima corrispondente a 9 gradi MCS (scala Mercalli-Cancani-Sieberg). Dalla tabella sulla suddivisione delle sottozone sismiche in relazione all'accelerazione di picco su terreno rigido si evince che, per il territorio del Comune di Vagli Sotto (zona sismica 2), ci si aspetta un'accelerazione compresa tra $0,15 \text{ ge} \ 0,25 \text{ g.}$ Per il calcolo di a_{max} , si considera:

• $a_g = 0.25 g$ (per zona sismica 2);

- *Ss* = 1 (per categoria di sottosuolo A vedi tabella);
- $S_T = 1.4$ (per categoria topografica T4 vedi tabella);
- $a_{\max} = 0.25 \text{ g} \cdot 1 \cdot 1.4 = 0.35 \text{ g}.$

Infine, si ottengono i seguenti valori dei coefficienti sismici orizzontale k_h e verticale k_V .

•
$$k_h = \beta_s \cdot \frac{a_{max}}{a} = 0.38 \cdot \frac{0.35 \, g}{1 \, a} = 0.133;$$

•
$$k_V = 0,133 \cdot 0,5 = 0,066.$$



Figura 5.29. Mappa della classificazione sismica della Regione Toscana (Comune di Vagli Sotto evidenziato mediante poligono dal contorno nero). Immagine adattata da <u>http://www.regione.toscana.it/-/classificazione-sismica-della-toscana</u>.



Figura 5.30. Massime intensità macrosismiche registrate dall'anno mille in grado della scala Mercalli (comune di Vagli Sotto evidenziato mediante poligono di colore bianco). Immagine adattata da <u>https://www.astrogeo.va.it/sismi/bodyto99.htm</u>.

5.5.6.2 Verifica della stabilità

L'analisi di stabilità dinamica è stata eseguita in ambiente RocscienceTM adottando il metodo di analisi di tipo probabilistico. Sono state effettuate 18 simulazioni prendendo in considerazione, per ogni versante individuato, i cinematismi più critici (scivolamento planare, scivolamento di cunei e ribaltamento diretto), sia in condizioni statiche che dinamiche. La variabilità delle dimensioni dei blocchi che possono formarsi è stata considerata secondo una distribuzione statistica (uniforme o uniforme-troncata), in maniera tale da ottenere blocchi caratterizzati da volumi variabili comparabili a quelli osservati in situ.

Le Tabelle 5.11, 5.12 e 5.13 mostrano i principali parametri utilizzati e i risultati delle analisi suddivisi per tipologia di cedimento, riportano anche i valori di Deviazione Standard (DS) utilizzati. Il peso di volume di riferimento per la litologia marmorea dell'area è di 2,7 t/m³.

Zona	V1	V1	V2	V2	V3	V3
Tipologia	Statico	Dinamic o	Statico	Dinamico	Statico	Dinamico
Volume medio blocco (m ³)	8,858	8,858	8,97	8,97	8,58	8,58
Volume massimo blocco (m ³)	23,795	23,795	23,06	23,06	22,02	22,02
Inclinazione versante (°)	85 (DS 5°)	85 (DS 5°)	85 (DS 5°)	85 (DS 5°)	85 (DS 5°)	85 (DS 5°)
Altezza versante (m)	5 (DS 1 m)	5 (DS 1 m)	5 (DS 1 m)			
Inclinazione gradoni (°)	10 (DS 2°)	10 (DS 2°)	10 (DS 2°)	10 (DS 2°)	10 (DS 2°)	10 (DS 2°)
Profondità gradoni (m)	6 (DS 0,5)	6 (DS 0,5)	6 (DS 0,5)	6 (DS 0,5)	6 (DS 0,5)	6 (DS 0,5)
Inclinazione piano di scivolamento (°)	54 (DS 5°)	54 (DS 5°)	54 (DS 5°)	54 (DS 5°)	55 (DS 5°)	55 (DS 5°)
Angolo di attrito resid. (°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)
JRC (Joint Roughness Coefficient)	7 (DS 2)	7 (DS 2)	7 (DS 2)	7 (DS 2)	9 (DS 2)	9 (DS 2)
JCS (<i>Joint</i> <i>Compressive</i> <i>Strength</i>) (MPa)	110 (DS 10 MPa)	110 (DS 10 MPa)	110 (DS 10 MPa)	110 (DS 10 MPa)	110 (DS 10 MPa)	110 (DS 10 MPa)
FS _{med}	1,232	1,035	1,231	1,034	1,525	1,277
FS _{min}	0,353	0,278	0,414	0,278	0,442	0,343
FS _{max}	3,127	2,634	3,127	2,634	3,19	2,686
Prob. cedimento FS < 1,3	62,99%	79,40%	63,06%	79,45%	35,04%	55,12%
Prob. cedimento FS < 1	33,07%	52,53%	33,10%	52,64%	11,93%	26,57%

Tabella 5.11. Cava Piastra Bagnata: risultati delle analisi di stabilità probabilistica per scivolamento

planare.

Zona	V1	V1	V2	V2	V3	V3
Tipologia	Statico	Dinamico	Statico	Dinamico	Statico	Dinamico
Volume medio blocco (m ³)	194	194	13,33	13,33	1,26	1,26
Volume max blocco (m ³)	3042,148	3042,148	215,99	215,99	11,91	11,91
Orientazione	240 (DS	240 (DS	270 (DS	270 (DS	300 (DS	300 (DS
versante (°)	5°)	5°)	5°)	5°)	5°)	5°)
Inclinazione	85 (DS	85 (DS 59)	85 (DS	85 (DS 5°)	85 (DS	85 (DS 5°)
versante (°)	5°)	85 (D3 5)	5°)	85 (DS 5)	5°)	85 (DS 5)
Altezza versante	5	5	5	5	5	5
(m)	5	5	5	5	5	5
Direzione giunto 1	240 (DS	240 (DS	240 (DS	240 (DS	240 (DS	240 (DS
(°)	5°)	5°)	5°)	5°)	5°)	5°)
Inclinazione giunto	54 (DS	$54 (DS 5^{\circ})$	54 (DS	$54 (DS 5^{\circ})$	54 (DS	54 (DS 5°)
1 (°)	5°)	51 (199 5)	5°)	51 (150 5 7	5°)	51(005)
Angolo di attrito	30 (DS	$30 (DS 5^{\circ})$	30 (DS	30 (DS 5°)	30 (DS	30 (DS 5°)
residuo giunto 1 (°)	5°)	50 (B5 5)	5°)	50 (25 5)	5°)	50 (25 5)
JRC giunto 1	7 (DS 2)	7 (DS 2)	7 (DS 2)	7 (DS 2)	7 (DS 2)	7 (DS 2)
ICS giunto 1 (MPa)	110 (10	110 (10	110 (10	110 (10	110 (10	110 (10
Joo granto I (IIII a)	MPa)	MPa)	MPa)	MPa)	MPa)	MPa)
Direzione giunto 2	137 (DS	137 (DS	137 (DS	137 (DS	137 (DS	137 (DS
(°)	5°)	5°)	5°)	5°)	5°)	5°)
Inclinazione giunto 2 (°)	85 (DS 5°)	85 (DS 5°)	85 (DS 5°)	85 (DS 5°)	85 (DS 5°)	85 (DS 5°)
Angolo di attrito	30 (DS	$20 (DS 5^{\circ})$	30 (DS	20 (DS 5°)	30 (DS	20 (DS 5°)
residuo giunto 2 (°)	5°)	50 (DS 5)	5°)	50 (DS 5)	5°)	50 (DS 5)
JRC giunto 2	11 (DS 2)	11 (DS 2)	11 (DS 2)	11 (DS 2)	11 (DS 2)	11 (DS 2)
ICS giunto 2 (MPa)	110 (10	110 (10	110 (10	110 (10	110 (10	110 (10
Joo granto 2 (iiii a)	MPa)	MPa)	MPa)	MPa)	MPa)	MPa)
FS _{med}	1,533	1,296	1,306	1,11	1,473	1,249
FS _{min}	0,673	0,33	0,355	0,289	0,488	0,398
FS _{max}	5,01	4,246	3,434	2,905	3,434	3,434
Prob. cedimento FS < 1.3 (PF)	32,93%	42,52%	55,38%	71,81%	21,58%	30,18%
Prob. cedimento FS < 1,3 (PS)	45,67%	58,96%	55,53%	72%	41,60%	58,17%
Prob. cedimento FS < 1 (PF)	16,69%	26,91%	26,82%	43,90%	9,09%	16,85%
Prob. cedimento FS < 1 (PS)	23,14%	37,32%	26,89%	44,02%	17,52%	32,48%

Tabella 5.12. Cava Piastra Bagnata: risultati delle analisi di stabilità probabilistica per scivolamento di cunei.

Zona	V1	V1	V2	V2	V3	V3
Tipologia	Statico	Dinamico	Statico	Dinamico	Statico	Dinamico
Inclinazione versante (°)	85 (DS 5°)	85 (DS 5°)	85 (DS 5°)	85 (DS 5°)	-	-
Altezza versante (m)	5 (DS 1m)	5 (DS 1m)	5 (DS 1m)	5 (DS 1m)	-	-
Spaziatura (m)	0,3 (DS 0,005 m)	0,3 (DS 0,005 m)	0,3 (DS 0,005 m)	0,3 (DS 0,005 m)	-	-
Inclinazione giunto ribaltante (°)	55 (DS 5°)	55 (DS 5°)	55 (DS 5°)	55 (DS 5°)	-	-
Inclinazione giunto basale (°)	54 (DS 5°)	54 (DS 5°)	54 (DS 5°)	54 (DS 5°)	-	-
Angolo di attrito residuo (°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	-	-
JRC	7 (DS 2)	7 (DS 2)	7 (DS 2)	7 (DS 2)	-	-
JCS (MPa)	110 (DS 10 MPa)	110 (DS 10 MPa)	110 (DS 10 MPa)	110 (DS 10 MPa)	-	-
FS _{med}	1,981	1,158	1,981	1,158	-	-
FS _{min}	0,455	0,1	0,455	0,1	-	-
FS _{max}	2,785	2,746	2,785	2,746	-	-
Prob. cedimento FS < 1,3	68,66%	74,20%	68,66%	74,20%	-	-
Prob. cedimento FS < 1	25,80%	30,01%	25,80%	30,01%	-	-

Tabella 5.13. Cava Piastra Bagnata: risultati analisi di stabilità probabilistica per ribaltamento diretto.

5.5.7 Prodotti dei rilievi topografici e DGPS

I prodotti dei rilievi topografici e DGPS sono costituiti dalle coordinate dei *target* misurati in parete utilizzati in qualità di GCP e CP (*Check Point*) in fase di restituzione fotogrammetrica. La Figura 5.31 mostra la localizzazione dei target mentre la Tabella 5.14 le relative coordinate.



Figura 5.31. Cava Piastra Bagnata: localizzazione dei target misurati in parete.

Nome	Est	Nord	Quota
T2	1600636,276	4883898,622	1168,066
Т3	1600647,157	4883914,327	1183,519
Τ4	1600632,951	4883888,124	1182,927
T5	1600647,703	4883913,735	1192,746
Т6	1600654,553	4883926,338	1171,019
Τ7	1600657,241	4883924,44	1195,294
Т8	1600638,691	4883899,303	1191,233
T10	1600667,183	4883941,987	1187,904
T11	1600666,263	4883945,663	1167,723
T12	1600664,977	4883940,327	1176,845
T13	1600670,955	4883951,707	1181,978
T14	1600676,935	4883964,633	1192,769
T15	1600675,975	4883966,704	1175,759
T18	1600653,669	4883927,118	1161,378
T19	1600640,931	4883905,18	1176,02
T20	1600674,08	4883969,023	1163,772
T21	1600678,691	4883969,171	1191,031
T22	1600627,454	4883859,505	1168,329
T23	1600630,224	4883867,436	1176,122
T24	1600629,48	4883872,636	1188,525
T25	1600634,894	4883856,581	1179,769
T26	1600637,388	4883852,675	1182,08
T27	1600627,514	4883869,473	1168,624
T28	1600632,363	4883862,272	1177,949

Tabella 5.14. Cava Piastra Bagnata: coordinate geoidiche dei *target* misurati (sistema di riferimento Monte Mario Italy 1).

5.5.8 Prodotti fotogrammetrici

Di seguito si riportano gli *output* del *processing* dei dati acquisiti mediante rilievo fotogrammetrico UAV. L'elaborazione è stata contraddistinta dal *processing* di 492 fotografie digitali e dal posizionamento di 16 GCP e 7 CP. Le tabelle 5.15 e 5.16 mostrano i valori dell'errore quadratico medio (RMSE, Root Mean Square Error) ottenuto sia per entrambe le categorie di punti.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Zerror (cm)	Total (cm)	Image (pix)	
T2	-0.241744	1.94126	-1.52111	2.47804	0.402 (83)	
T3	1.03966	-0.221979	-1.07696	1.51328	1.476 (31)	
T 7	-0.218035	1.80108	-1.88318	2.61492	0.549 (27)	
T11	-1.40652	1.99809	0.0814816	2.44485	0.155 (46)	
T24	-0.397026	-0.179171	1.39223	1.45878	0.282 (28)	
T27	0.251801	-0.812109	-0.190209	0.871266	0.296 (48)	
T 4	-0.239611	1.16135	-0.201554	1.20282	0.242 (72)	
T 8	-0.682489	2.01848	-0.425278	2.17277	0.484 (33)	
T10	1.56367	-1.00741	-0.221484	1.87323	0.659 (31)	
T13	1.77743	-0.802149	0.611121	2.04357	0.464 (45)	
T15	0.256748	-0.493826	0.408471	0.690385	0.241 (39)	
T20	-1.351	-0.236657	0.97803	1.68456	0.428 (34)	
T21	-0.843634	-1.92624	0.586353	2.1831	0.920 (27)	
T22	-0.180611	-1.74477	-0.260701	1.77336	0.420 (21)	
T26	0.659879	-0.949369	1.10533	1.59953	0.345 (41)	
T28	0.000137883	-0.543656	0.614821	0.820711	0.254 (32)	
Total	0.886871	1.30092	0.893729	1.81044	0.522	

Tabella 5.15. Valori RMSE ottenuti per i 16 GCP lungo gli assi X, Y, Z, sul piano XY, totale e, infine, in termini di pixel. Fonte: *report* dell'elaborazione fotogrammetrica in ambiente AgisoftTM Metashape.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
T1	0.178794	0.350124	0.677282	0.783112	0.377 (54)
T5	0.5462	1.16659	-1.70136	2.13398	0.832 (29)
T6	0.362191	-0.531246	-0.106984	0.651805	0.373 (46)
T12	0.00715889	1.24157	1.04777	1.62462	0.642 (32)
T14	-0.951481	-1.30941	-2.24123	2.76459	0.636 (31)
T23	0.440924	-0.827275	0.550453	1.0871	0.256 (34)
T25	0.779109	-2.00342	1.44819	2.5919	0.452 (30)
Total	0.556555	1.17837	1.30307	1.84291	0.516

Tabella 5.16. Valori RMSE ottenuti per i 7 CP lungo gli assi X, Y, Z, sul piano XY, totale e, infine, in termini di pixel. Fonte: report dell'elaborazione fotogrammetrica in ambiente Agisoft[™] Metashape.

Dall'analisi degli RMSE ottenuti si evince un errore di circa 1,81 cm sui GCP con un'accuratezza del modello fotogrammetrico di circa 1,84 cm (RMSE dei CP). Considerate le finalità del rilievo e del tipo di studio, si tratta di valori pienamente accettabili.

I prodotti fotogrammetrici ricavati sono rappresentati da: nuvola densa di punti (Figura 5.32), DEM (figure 5.33 e 5.34), ortofoto (figure 5.35 e 5.36) e, infine, modello 3D del tipo *mesh* (Figura 5.37).



Figura 5.32. Cava Piastra Bagnata: Dense Point Cloud (AgisoftTM Metashape) costituita da 82.109.639 punti.

Il DEM, ovvero la rappresentazione in formato *raster* della distribuzione delle quote, è caratterizzato da risoluzione pari a 1,1 cm/pix e densità pari a 8040 punti/m². Le figure n. 5.33 e 5.34 mostrano, rispettivamente, il DEM visualizzato in pianta 2D (da AgisoftTM Metashape) e la rappresentazione 3D della distribuzione dell'elevazione mediante modello TIN (*Triangular Irregular Network*) creato, in ambiente ESRITM ArcGIS Pro, a partire dalla nuvola densa di punti. Dalle immagini 5.33 e 5.34 si evince come, nell'area di interesse, le quote varino da circa 1160 m a 1206 m s.l.m.



Figura 5.33. Cava Piastra Bagnata: visualizzazione in pianta 2D del DEM ricostruito mediante AgisoftTM Metashape Professional.



Figura 5.34. Rappresentazione 3D della distribuzione dell'elevazione mediante modello TIN.

L'ortofoto della parete oggetto di analisi, mostrata nelle figure 5.35 e 5.36, è stata prodotta con una risoluzione spaziale pari ad 1 cm/pix.



Figura 5.35. Visualizzazione in pianta 2D dell'ortofoto ricostruita mediante AgisoftTM Metashape Professional.



Figura 5.36. Visualizzazione prospettica dell'ortofoto della Cava Piastra Bagnata (AgisoftTM Metashape Professional).

Il modello tridimensionale in formato *mesh* texturizzata (ovvero dall'aspetto fotorealistico), mostrato in Figura 5.37, è costituito da 6.685.469 facce e 3.351.860 vertici. Disegnando una polilinea sul modello (traccia rossa in Figura 5.37), è stato possibile tracciare il percorso delle DOFS ed esportarlo in formato .shp 3D in ambiente GIS (*Geographic Information System*) dove, al fine di agevolare le analisi dei risultati DOFS, è stato trasformato in uno *shapefile* puntuale e discretizzato con passo 20 cm (Figura 5.38).



Figura 5.37. Modello 3D texturizzato (prospettiva 30°) della Cava Piastra Bagnata con evidenziato il percorso DOFS mediante polilinea di colore rosso.



Figura 5.38. Modello 3D texturizzato importato in ArcGis Pro con sovrapposto il percorso DOFS (in rosso) in formato shapefile 3D puntuale con passo 20 cm. La tabella attributi a destra riporta il FID, codice identificatore di ciascun punto e le distanze progressive e cumulate.

5.5.9 Risultati delle acquisizioni DOFS

Presso la Cava Piastra Bagnata sono state effettuate tre misurazioni DOFS multitemporali di tipo BOTDR in data 20/06/2018, 20/09/2018 e 10/10/2018. Non è stato possibile effettuare ulteriori rilievi in quanto il sito di estrazione è stato chiuso, a causa delle avverse condizioni meteorologiche invernali, nel periodo Novembre 2018 – Febbraio 2019. Inoltre, occorre specificare che, durante la stagione invernale 2017-2018, a causa del persistere del ghiaccio, il cavo sensore ha subito un fenomeno di rottura a circa metà della sua lunghezza. La misura è stata quindi eseguita due volte per ciascuna sessione: una prima volta a partire dall'estremità START (Figura 5.39) e una seconda volta a partire

dall'estremità END (Figura 5.40) della fibra di misura. Occorre specificare che, in modalità BOTDR, la misura si ottiene su tutta la lunghezza di fibra in cui si verifica la continuità ottica, ovvero dal connettore di lancio fino al primo punto di rottura. Poiché dalle due figure appena citate si evince, sia dal connettore START che dal connettore END, una lunghezza della fibra pari a circa 120 m, si presuppone un'interruzione del cavo sensore a circa metà della sua intera lunghezza (250 m).



Figura 5.39. Cava Piastra Bagnata: profili BFS acquisiti in data 20/06/2018, 20/09/2018 e 10/10/2018 con lancio dell'interrogazione a partire dal connettore START.



Figura 5.40. Cava Piastra Bagnata: profili BFS acquisiti in data 20/06/2018, 20/09/2018 e 10/10/2018 con lancio dell'interrogazione a partire dal connettore END.

I valori di *strain*, unificati in un singolo grafico (Figura 5.40), sono stati ottenuti, prendendo come misura di riferimento (lettura al tempo zero) quella eseguita in data 20/06/2018, tramite l'applicazione della relazione (2.16). L'entità delle deformazioni ottenute è relativamente contenuta, se paragonata alla deviazione standard di ciascun profilo, essendo quest'ultima all'incirca pari a 260 με.

Il valore ottenuto per la deviazione standard ($260 \ \mu\epsilon$) ha suggerito la scelta di una soglia di allarme per le deformazioni cinque volte maggiore (Burr et al., 2013) della stessa deviazione standard (applicazione della relazione 2.18):

$$S_{max} = 5 \cdot 260 \cong 1300 \,\mu\varepsilon \tag{5.4}$$

Considerando $E = 43 \ GPa$ e $\sigma_u = 1317 \ \frac{kg}{cm^2} = 129 \ MPa$ (Tabella 5.3), applicando la relazione 2.19, si ottiene:

$$\sigma_{calc} = S_{max} \cdot 10^{-6} \cdot E \cong 56 \, MPa \tag{5.5}$$

Risultando $\sigma_{calc} < \sigma_u$, $S_{max} = 1300 \,\mu\epsilon$, esso è stato considerato come un valore soglia di allarme adatto e precauzionale per le deformazioni del fronte analizzato (Figura 5.41).



i valori soglia di allarme inferiore e superiore.

5.6 Discussione

Sebbene la classificazione RMR_b indichi un ammasso roccioso di buona qualità, i risultati delle analisi di stabilità dinamica di tipo probabilistico segnalano una situazione di media criticità lungo l'intera parete analizzata. La complessità del reticolo di fratturazione, infatti,

è associata ad una geometria dei fronti di cava per lo più sfavorevole alla stabilità. Tuttavia, sebbene l'assetto geomeccanico consenta la formazione di un discreto numero di blocchi, solo alcuni di questi sono contraddistinti da elevate probabilità di cedimento. I cinematismi più critici sono rappresentati dal ribaltamento diretto e dallo scivolamento planare sui versanti V1 e V2, con probabilità di cedimento variabili dal 63%, in condizioni statiche, al 79% in condizioni dinamiche (considerando un fattore di sicurezza pari a 1,3). Il versante V3, invece, non dà luogo a fenomeni di ribaltamento diretto e lo scivolamento planare risulta essere meno accentuato. Per tutte le zone del fronte di cava, i fenomeni di scivolamento di cunei presentano probabilità di cedimento intermedie che tendono a raddoppiare in condizioni dinamiche. Le probabilità di cedimento, infine, diminuiscono notevolmente se si considera un fattore di sicurezza pari all'unità.

In generale, i risultati delle analisi di stabilità ottenuti sono coerenti con il quadro strutturale e con gli sporadici cedimenti che si sono verificati in passato, dovuti al distacco di blocchi per scivolamento, ribaltamento o crollo.

Le tre misurazioni DOFS di tipo BOTDR effettuate hanno permesso inoltre di ricavare due profili di *strain* che mostrano sostanziali condizioni di stabilità dell'intero fronte per tutti i 250 metri di stesura della fibra. Occorre specificare che, durante la stagione invernale 2017-2018, a causa del persistere del ghiaccio, il cavo sensore ha subito un fenomeno di rottura (Figura 5.42) a circa metà della sua lunghezza.



Figura 5.42. Fibra ottica in parete recisa dal ghiaccio invernale. La linea tratteggiata in nero indica l'area di temporanea interruzione, mentre l'ellisse mostra la fibra cadente.

Per ovviare a tale problematica, sono state effettuate misure di tipo BOTDR partendo dalle estremità START ed END della fibra fino al punto in cui era garantita la continuità ottica. Dal confronto dei due profili di *strain* ottenuti (20/09/2018 e 10/10/2018), emergono valori di deformazione più elevati in corrispondenza del tratto finale della curva del 20/09/2018. Tuttavia, il valore soglia di allarme non è stato mai raggiunto in nessuno dei due profili. In effetti, ragionando nell'ottica di *back-analysis*, nel periodo di interesse, non sono stati rilevati fenomeni di crolli di roccia oppure ulteriori eventi di rottura del cavo sensore. Una seconda criticità affrontata riguarda la chiusura del sito di estrazione nei mesi invernali (in entrambe le stagioni 2017-2018 e 2018-2019), dovuta alle avverse condizioni meteorologiche, che ha impedito la possibilità di esecuzione di ulteriori rilievi DOFS. Nonostante i diversi problemi tecnici sopravvenuti, la fibra ottica è stata capace di adattarsi ad un ambiente poco ospitale come un sito di estrazione del marmo e di fornire in *ontput* le misure desiderate, ossia i valori di BFS, a partire dai quali sono stati calcolati i corrispondenti valori di *strain*.

Pertanto, la valutazione dell'efficacia del sistema di monitoraggio sperimentale, in riferimento alla capacità dell'acquisizione dei dati di deformazione, è senza dubbio positiva.

5.7 Conclusioni

Nel presente caso studio sono state presentate la progettazione, l'implementazione e la sperimentazione di un sistema di monitoraggio innovativo costituito da Sensori Distribuiti in Fibra Ottica finalizzato alla sorveglianza di un fronte di un sito di estrazione del marmo. Il sito è stato completamente caratterizzato da un punto di vista geologico-strutturale, geomeccanico e petrografico mediante opportune indagini in situ e in laboratorio. Inoltre, sono state effettuate la rappresentazione delle discontinuità, le analisi di stabilità dinamica e cinematica e la classificazione dell'ammasso roccioso. Per raffinare il rilevamento geomeccanico e georeferenziare e cartografare la posizione dei DOFS, sono stati eseguiti rilievi fotogrammetrici UAV supportati da rilievi topografici e GNSS.

Nonostante le criticità sopraggiunte, ovvero un fenomeno di rottura del cavo sensore e la chiusura della cava nei periodi invernali per le avverse condizioni metereologiche, i risultati ottenuti mostrano il corretto funzionamento del sistema di monitoraggio sperimentale DOFS in un ambiente estremo e poco ospitale per la sensoristica come una cava attiva a cielo aperto a 1200 metri di quota. La fibra ottica, infatti, è stata capace di fornire in *output* le misure desiderate, ossia i valori di BFS, a partire dai quali sono stati calcolati i corrispondenti valori di *strain*.

Pertanto, la valutazione dell'efficacia del sistema di monitoraggio sperimentale, in riferimento alla capacità dell'acquisizione dei dati di deformazione, è senza dubbio positiva. Inoltre, il valore soglia di allarme non è stato mai raggiunto in nessuno dei profili di deformazione ottenuti.

In conclusione, i principali vantaggi dell'approccio adottato possono essere sintetizzati come segue: i) sperimentazione di un sistema di monitoraggio innovativo in una cava a cielo aperto delle Alpi Apuane; ii) monitoraggio delle micro-deformazioni con un'accuratezza inferiore a 4 $\mu\epsilon$ e una risoluzione spaziale di 20 cm; iii) integrazione di metodi geologici tradizionali, moderne tecnologie geomatiche e innovativa tecnologia DOFS; iv) possibilità di ottenimento di informazioni utili per la sicurezza sui luoghi di lavoro e la pianificazione sul medio-lungo termine delle attività estrattive.

Capitolo 6 - Caso studio n. 2: monitoraggio dello *strain* e della temperatura in una cava in sotterraneo

Il presente Capitolo viene esposto in forma di caso studio, descritto in stile accademico, dal quale è stato tratto un abstract sottomesso al Congresso AIGA 2021:

Lanciano C., Vanneschi C., Tufarolo E., Salvini R. *Distributed Optical Fiber Sensors and Terrestrial Laser Scanner surveys for the monitoring of an underground marble quarry.* Sottomesso al 7° Congresso Nazionale della ASSOCIAZIONE ITALIANA DI GEOLOGIA APPLICATA E AMBIENTALE - A.I.G.A. (Milano, 04-06/02/2021).

Contributo di C. Lanciano

Sotto la supervisione del Tutore, C. Lanciano ha avuto modo di partecipare attivamente a tutte le fasi di rilievo e analisi. In fase di progettazione del sistema di monitoraggio, ha contribuito alla definizione del percorso dei DOFS e, in seguito, alla supervisione della loro installazione su due pilastri oggetto di analisi. Ha fatto parte del team del Laboratorio di Geomatica del Centro di Geotecnologie durante i rilievi *laser scanning terrestre*, topografici e GNSS. Inoltre, ha effettuato la fase di *data processing*, articolata in: rappresentazione delle discontinuità; analisi di stabilità cinematica e dinamica; realizzazione di cartografia tematica; elaborazione dei dati GNSS, topografici e *Terrestrial Laser Scanning*; elaborazioni in ambiente GIS. Infine, ha analizzato e interpretato i dati di *strain* e temperatura derivati dalle misure BFS mediante DOFS.

Abstract

In questo caso studio viene presentato un sistema di monitoraggio sperimentale di una cava di marmo in sotterraneo, situata nelle Alpi Apuane, costituito dai DOFS basati sul metodo BFS. Al fine di ottenere informazioni sulla stabilità di due pilastri caratterizzati dalla presenza di numerose discontinuità, sono stati installati 250 metri lineari di sensori in fibra ottica attorno alle due strutture e, utilizzando una speciale centralina di misura, sono state effettuate misurazioni multitemporali di *strain* e temperatura. Inoltre, sono stati eseguiti rilievi con laser scanner terrestre, supportati da GNSS e rilievi topografici tradizionali allo scopo di: i) georeferenziare i dati, compresa la traccia del cavo sensore, ii) identificare sistemi di fratturazione non rilevabili con i tradizionali metodi geologici a causa dell'inaccessibilità alle pareti e iii) localizzare qualsiasi fenomeno di deformazione evidenziato dall'analisi dei dati DOFS. Nonostante le difficoltà riscontrate, legate soprattutto al difficile ambiente di lavoro e alle rigide temperature invernali, il sistema è riuscito a funzionare bene e a rilevare valori di deformazione e temperatura precisi e affidabili. L'integrazione di un sistema di monitoraggio DOFS con le tecnologie geomatiche ha fornito la possibilità di implementare un sistema di analisi efficace volto a

proteggere la salute e la sicurezza dei lavoratori dai rischi legati a possibili crolli rocciosi, in particolar modo nei siti sotterranei, dove le vie di fuga sono molto limitate.

6.1 Introduzione

Recentemente le attività di escavazione in sotterraneo sono diventate un metodo alternativo allo sfruttamento tradizionale a cielo aperto, non solo nei casi in cui l'opzione sotterranea è imposta dalle caratteristiche dell'ammasso roccioso, ma anche per motivi di carattere ambientale che, nel corso del tempo, hanno acquisito una rilevanza sempre una maggiore (Oggeri & Oreste, 2015) e per l'introduzione di normative regionali (Regione Toscana Legge n. 35 del 25 marzo 2015). Inoltre, lo sfruttamento sotterraneo potrebbe essere preferibile in termini economici e in tutti quei casi in cui le operazioni di superficie non siano tecnicamente praticabili (Oggeri, 2000). Diversi elementi sono da prendere in considerazione quando si predilige l'escavazione in sotterraneo: i) buone condizioni strutturali dell'ammasso roccioso; ii) tecnologia di escavazione; iii) proprietà commerciali (colore e granulometria possono variare a causa della limitata omogeneità della massa rocciosa); iv) resa economica rispetto ai metodi di coltivazione a cielo aperto; v) sicurezza e bonifica ambientale. Le caratteristiche di stabilità in questo particolare tipo di ambiente dovrebbero essere garantite sul lungo termine e senza un contributo significativo da parte di supporti artificiali. Generalmente la massa rocciosa ha meno articolazioni rispetto al fronte a cielo aperto, tuttavia possono verificarsi movimenti rigidi di cunei rocciosi a partire dalle pareti oppure dal tetto. L'esperienza nelle attività di escavazione può fornire valide indicazioni circa il controllo delle pareti e lo stato dell'ammasso roccioso, aspetti di fondamentale importanza nell'ambito delle cave in sotterraneo (Cravero e Iachibino, 1997). Tuttavia, la definizione delle condizioni di sicurezza per i lavoratori che operano nei siti sotterranei deve essere basata sul monitoraggio delle prestazioni della struttura rocciosa scavata, cercando di prevedere le possibili tendenze di stabilità/instabilità gravitativa mediante l'adozione di opportune tecniche di analisi. Tale approccio sintetizza la linea di progettazione degli scavi in sotterraneo mediante progettazione controllata, applicata principalmente per gallerie, miniere profonde o grandi strutture civili (ad es. Bieniawsky, 1984; Brady & Brown 1985; Barla et al., 1986).

Il presente caso di studio si riferisce alla "Cava del Piastraio di Sotto" (Figura 6.1), ubicato presso la frazione Levigliani del Comune di Stazzema (LU).

6.2 Inquadramento geografico e geologico

Il sito estrattivo si inserisce nel contesto di una grande struttura plicativa delle Alpi Apuane (inquadramento geologico regionale al paragrafo 5.2) risultato di un'intensa e complessa evoluzione tettonica attribuibile alla fase compressiva D1 e interessata, successivamente, dalla fase distensiva D2. Si tratta di una piega isoclinale non cilindrica, comunemente definita "a guaina" ("*sheath folds*", Sanderson 1973), identificata nella cartografia geologica di riferimento nella sinclinale di Orto di Donna - Monte Altissimo - Monte Corchia - Puntato. Questa complessa struttura è caratterizzata da uno sviluppo chilometrico del proprio piano assiale che interessa tutta l'area apuana occidentale da Nord a Sud per almeno 20 Km.



Figura 6.1. La "Cava del Piastraio di Sotto". a) Posizione della cava nel territorio della Regione Toscana; b) immagine fotografica dei due pilastri oggetto di monitoraggio.

L'area del Monte Corchia rappresenta un esempio di tettonica polifasata studiata da numerosi ricercatori (fin dagli inizi dell'800 con Zaccagna e Lotti) che ripropone il tema della "doppia vergenza" delle Alpi Apuane, molto caro ai primi ricercatori. Questa iniziale visione strutturale, giudicata da molti autori ancora oggi attuale, accomuna il Monte Corchia con la poco distante valle di Arni. Soltanto da pochi decenni tale zona viene interpretata nell'ottica di un'interferenza tra le grandi pieghe tardive e le strutture isoclinali generate dalla fase collisionale (Carmignani & Giglia, 1979).

L'analisi strutturale tratta da Carmignani et al. (1993) evidenzia che la sinforme in cui è inserito il Monte Corchia non mantiene una direzione assiale orizzontale bensì tende ad immergere verso Sud in prossimità di quest'ultimo e verso Nord nei pressi di Puntato, dove la stessa si smembra in una distinta piega. I rapporti giaciturali evidenziano, inoltre, la presenza di due strutture anticlinali che contornano la sinclinale del Monte Corchia, corrispondenti all'anticlinale di Campanile-Fociomboli e a quella di Mosceta più a Sud, entrambe riconducibili ad un complesso quadro strutturale di ripiegamento a guaina delle formazioni.

Il comprensorio estrattivo del Monte Corchia, costituito dalle cave denominate "Piastriccioni", "Tavolini A", "Tavolini B", "Borra Larga" e "Cava del Piastraio di Sotto", è collegato alla viabilità comunale mediante una strada privata di arroccamento. I cantieri delle cave "Piastraio di Sotto" e "Piastriccioni" sono raggiungibili direttamente dall'abitato di Levigliani presso il bivio per le località "Antro del Corchia", "Piastraio" e "Borra Larga". In particolare, la "Cava del Piastraio di Sotto" è un sito attivo di estrazione del marmo in sotterraneo in cui si effettua la coltivazione di marmi delle varietà Arabescato e Statuario Corchia. La cava, situata sul versante Sud-Ovest del Monte Corchia ad una quota morfologica variabile tra circa 1200 e 1400 m s.l.m., si sviluppa in sotterraneo, come già anticipato, su più livelli. Proseguendo la strada di arroccamento, oltre l'accesso alla cava "Piastriccioni" (Figura 6.2), si incontra, prima della piccola galleria, la rampa di accesso al primo livello del sotterraneo, caratterizzato dai piani in attuale lavorazione di quota media 1280 m s.l.m.

Lungo il limite nordoccidentale la galleria è in comunicazione con un'ulteriore porzione di sotterraneo che, nella parte più interna, è caratterizzata da quote analoga alla precedente. Nella porzione più esterna, invece, in corrispondenza dell'altro ingresso al cantiere, è caratterizzata da una serie di gradinature interne di quote molto variabili e da uno sviluppo a quote superiori. Proseguendo la strada di arroccamento, oltre la piccola galleria, si arriva all'ingresso del secondo livello di sotterraneo, sviluppato tra le quote 1306 e 1319 m s.l.m. circa. Esso si sviluppa in direzione analoga al sottostante livello 1, per una lunghezza di circa 120 m e larghezza media di circa 26 m. Nella porzione iniziale di questo cantiere in sotterraneo è stato isolato un pilastro di dimensioni 9 x 9 m circa. Infine, ancora al di 1336 e 1343 m s.l.m., caratterizzato da direzione prevalente NNE-SSW. Ad esso si accede esclusivamente a piedi tramite apposita scala; i mezzi, le attrezzature e materiali vengono trasportati per mezzo di un Derrik appositamente posizionato lungo il piazzale esterno.



Figura 6.2. Immagine fotografica dei fronti a cielo aperto tra le cave "Piastraio" e "Piastriccioni".



Figura 6.3. Immagine fotografica delle varie finestre create lungo la parete Sud Est dai due livelli inferiori di sotterranei. Il terzo livello rimane lungo il versante retrostante.

Il primo livello del sotterraneo, che si sviluppa prevalentemente in direzione N-S per circa 150 m di lunghezza e una larghezza media di 40 m, è oggetto di studio nel presente lavoro di tesi. In particolare, nella grande camera meridionale sono stati isolati 2 pilastri di dimensioni medie 10x10x15 m caratterizzati dalla presenza di vari sistemi di discontinuità. In virtù della necessità di esercitare l'attività estrattiva in condizioni di sicurezza, la cava si è presta al monitoraggio mediante sensori distribuiti in fibra ottica e tecnologie geomatiche. Tale sito, inoltre, sviluppandosi in sotterraneo, rappresenta una particolarità rispetto alle altre cave a cielo aperto mostrate in questo elaborato di tesi.

6.3 Materiali e metodi

6.3.1 Rilievo geologico-strutturale e geomeccanico

L'area è stata analizzata in modo accurato mediante rilievi geologico-strutturali e geomeccanici diretti per le medesime finalità già elencate nell'ambito del precedente caso studio (Capitolo 5, Cava Piastra Bagnata) e con gli stessi strumenti.



Figura 6.4. Fasi del rilievo geomeccanico presso la Cava del Piastraio di Sotto.

6.3.2 Analisi petrografiche

Analogamente a quanto descritto nel Capitolo 5 l'analisi petrografica è stata eseguita presso il "Laboratorio di Meccanica delle rocce e dei Materiali naturali da costruzione" del Centro di Geotecnologie dell'Università degli Studi di Siena secondo le medesime modalità.

6.3.3 Classificazione dell'ammasso roccioso

Per rappresentare le caratteristiche geometriche dei piani di fratturazione misurati, anche in questo caso, è stata eseguita un'analisi statistica della distribuzione dei poli delle discontinuità utilizzando la proiezione stereografica equiareale di Schmidt (emisfero inferiore) mediante il *software* Dips 7.0. Inoltre, l'elaborazione dei dati raccolti per ogni singolo sistema di discontinuità ha consentito di calcolare l'RMR_b caratteristico qualificante l'ammasso roccioso.

6.3.4 Analisi di stabilità di versante

Considerato che nel sito oggetto di studio le attività di scavo sono ancora in corso, si è scelto di effettuare un'analisi delle condizioni di stabilità di tipo sia cinematico che dinamico. Le analisi sono state eseguite individuando porzioni di pareti interne con direzione di immersione dei versanti differenti e utilizzando il software Dips 7.0 secondo le modalità già descritte ai Capitoli 3 e 5.

6.3.5 Rilievo DGPS e topografico

6.3.5.1 Acquisizione dei dati

Per eseguire il rilievo DGPS, analogamente al caso della Cava Piastra Bagnata, sono stati utilizzati due ricevitori geodetici a doppia frequenza Leica[™] GS15, operanti in modalità statica, che hanno acquisito i segnali trasmessi dalla costellazione satellitare con continuità e registrando i dati ad intervalli temporali di 5 secondi. Oggetto del rilievo DGPS sono stati il punto di origine delle misure effettuate con la Stazione Totale quello scelto come direzione zero.



Figura 6.5. Ricevitori geodetici a doppia frequenza (LeicaTM GS15) operanti in modalità statica presso la Cava del Piastraio di Sotto.

Il rilievo con TS, invece, è stato effettuato sempre utilizzando la Stazione Totale LeicaTM Nova MS50 rilevando i *target* bianchi e neri appositamente posizionati in cava ai fini della *registration* e georeferenziazione del rilievo TLS.



Figura 6.6. Esempio di *target* bianchi e neri appositamente posizionati in cava ai fini dell'acquisizione TLS e misurati mediante TS.

6.3.5.2 Elaborazione dei dati

La fase *di post-processing* dei dati GPS e topografici è stata eseguita mediante i *software* LeicaTM Geo Office 8.4 (figure 6.7- 6.9) e ConveRgo, analogamente a quanto descritto per il caso studio precedente (Cava Piastra Bagnata, Capitolo 5). Anche in questo caso si è scelto di utilizzare i dati della sola stazione GPS Pieve Fosciana (PFOS) in considerazione della distanza dall'area di studio.



Figura 6.7. Creazione di un nuovo progetto e importazione dei dati in ambiente LeicaTM Geo Office 8.4: a) impostazioni generali; b) sistema di coordinate; c) importazione dei dati grezzi; d) assegnazione dei dati al progetto; e) importazione delle effemeridi precise.

ID punto C	lasse punto	Data/ora	Lati	itudine	Longitudine	Quota ellis.	Quota	scos	Qualità plan	***
PFOS	Controllo	11/16/2017 07:59:4	44* 07' 56.20	0207" N	10° 24' 46.79339" E	426.266			0.000	00
GPS01 N	Vavigazione	11/16/2017 09:51:4	44* 01* 51.52	2167" N	10° 17' 45.44418' E	1321.0610		S	2.352	22
GPS02 N	Vavigazione	11/16/2017 09:53:0	44" 01' 51.20	0073" N	10" 17 44.97753" E	1319.942		· · · ·	1.512	21
prietà punto				9 1	13					
Senerale Valori stoce	atici Dati ternatic	a lennagen			1					
ID purte:	PFOS	127 A	livato			GPS Elab	Esporta	Finestra	?	
Classe del punto	Cantrollo					Mod	fica nunto	2.6		
Sottoclasse del punto	Fisso per plane	metita e quota 💌				Mod	ince punto			
Tipo di coordinate	geodeliche	WGS54	C locali			Mod	inca intervi	3210		
Modeltà custe	(il electric)	prodice, queta	*			<u>Biassegna intervalli</u>				
	40.766.30	100 T M				⊆ancella intervalli				
Landre	107 24 46 79	1339" E Devias	one standard 0.0			Desporta verso RINEX				
Oute	426,2667	m Deven	one standard 0.0			•••••••				
						Moda	lità elabora	zione	•	
						Para	metri elabo	razione		
						We Flab	orazione			
b					-	APA REAL				
_		OK	Amula	Applica		Fines	tre	C		
		G	onfigura parametri pe	er elaborazio	ove GPS	-9	• • • •			
		1	Generale Daharama							
			Constant [Englishington	e animaca						
				100	141.0	Series a				
			Angolo a cur or.			2 0.03				
			Efferrend	(Pres	CH4	 2/0.05 2/0.08 				
			Tipe solutione	An	omatico.	* 9G10 9G11	5 H -			
			Tpo GN\$5	Add	owatics	* 2/014				
						2/017				
						2/619				
						10000	<u>-</u>			
		-	III Veuelizza paramet	n avanzati		Default				
			d			OK Ami				
			~			ATTO	2000A.5			

Figura 6.8. Operazioni preliminari all'elaborazione dei dati in ambiente Leica[™] Geo Office 8.4. a) Vista del progetto. b) Assegnazione della classe "punto di controllo" alla stazione permanente GNSS usata ai fini della correzione, i punti oggetto di rilievo GPS sono invece contraddistinti dalla classe "punto di navigazione". c) Avvio della schermata "parametri di elaborazione". d) Configurazione dei parametri di elaborazione.



Figura 6.9. Elaborazione dei dati in ambiente Leica[™] Geo Office 8.4. a) Assegnazione della classe "riferimento" alla stazione PFOS (barra rossa) e della classe "rover" ai punti "GPS1" e "GPS2" (barre verdi). b) Avvio dell'elaborazione. c) Verifica dello stato di ambiguità e operazioni di salvataggio.
d) Comando *shift*/ruota/scala per roto-traslare i punti rilevati con stazione totale rispetto ai punti GPS precedentemente corretti.

6.3.6 Terrestrial Laser Scanning

6.3.6.1 Acquisizione dei dati

Sulla base dei criteri descritti al paragrafo 4.3, si è scelto di utilizzare lo strumento Trimble[®] TX8 (Figura 6.10), il quale rappresenta uno dei *laser scanner* più veloci e precisi attualmente presenti sul mercato e presenta tutte le caratteristiche di fascia alta di uno *scanner* 3D professionale (Tabella 6.1). Nello specifico, esso si basa su una nuova generazione di scansione a tempo di volo per migliorare la produttività in campo, con un *range* di misura fino a 340 m, un errore di distanza lineare di ±2 mm fino a 100 m e, infine, una velocità di scansione, questo strumento trova larga applicazione nei seguenti campi: misurazione e pianificazione industriale, rilievo di edifici, siti archeologici, ingegneria civile, cave, costoni rocciosi, discariche, deformazioni di strutture, monitoraggio, controllo qualità e altro (https://www.Trimble-italia.com/prodotti/laser-scanner/Trimble-tx8).



Figura 6.10. Laser Scanner Trimble[®] TX8 utilizzato per le riprese all'interno della Cava del Piastraio di Sotto. A sinistra: strumento in primo piano durante l'acquisizione dei dati. A destra: strumento e *target* bianchi e neri rilevati sia mediante TLS che con TS per la *registration* e la georeferenziazione dei dati.

D ringinio di gagnaione	Specchio rotante verticalmente					
Principio di scansione	su base rotante orizzontalmente					
Drincipio di misuraziono	Tempo di volo a velocità ultra-elevata					
r inicipio di misurazione	con tecnologia Trimble® Lightning					
Velocità di scansione (punti/s)	1.000.000					
Range massimo (m)	120					
Rumore di misura (mm)	< 2					
Classe laser	1					
Lunghezza d'onda del laser (µm)	1,5					
Campo visivo (°)	360x317					
Precisione angolare (µrad)	80					
	Livello 1 - 2					
Durate scansions (min)	Livello 2 - 3					
Durata scansione (mm)	Livello 3 - 10					
	Esteso - 20					
Spaziatura dei punti a 10 m (mm)	15,1					
Spaziatura dei pupti a 30 m (mm)	Livello 1 – 22,6					
Spaziatura dei punti a 50 m (mm)	Livello 2 - 11,3					

	Livello 3 - 10		
	Esteso - 5,7		
Spaziatura dei punti a 300 m (mm)	Esteso – 75,4		
	Livello 1 - 34		
	Livello 2 - 138		
Numero di punti (milioni di punti)	Livello 3 - 555		
	Esteso - 312		
Dimensioni (mm)	355 x 386 x 242		
Peso (kg)	11.2 (con basamento e batteria)		
Autonomia di scansione per batteria (ore)	>2		
Intervallo di temperatura in fase operativa	[0 -40] °C		
Umidità in fase operativa	Non condensante		
Condizioni di illuminazione	In tutte le condizioni		
Classe di protezione	IP54		
Archiviazione dei dati	USB 3.0 Flash Drive		
Controllo remoto	con Tablet Trimble [®] o altri dispositivi mobili		
Controllo remoto	tramite WLAN		

 Tabella 6.1. Principali caratteristiche del TLS Trimble® TX8 (<u>https://www.Trimble® - italia.com/prodotti/laser-scanner/Trimble® -tx8</u>).

La prima fase dell'attività di campagna, seguita alla pianificazione del rilievo in laboratorio, è consistita nella disposizione dei *target* ottici utilizzati come riferimento topografico per collegare le diverse scansioni consecutive e la loro georeferenziazione (Figura 6.7). I *target* sono stati posizionati in luoghi visibili da più basi di stazionamento dello *scanner* e scelti in base alle esigenze tecniche e logistiche del caso. In seguito, per ricostruire l'interno della cava, sono state effettuate 8 scansioni *laser* da 8 differenti posizioni. Individuata l'area da rilevare, lo strumento ha automaticamente iniziato a scansionare acquisendo le informazioni geometriche e relative all'intensità del segnale riflesso in un tempo abbastanza rapido (10 minuti per una scansione di 360° di ampiezza in azimut e 317° in zenith). Il risultato, immediatamente visualizzabile, è una nuvola di punti tridimensionale che rappresenta in modo fedele la geometria dell'area rilevata.

Al termine di ciascuna scansione, lo strumento è stato sostituito, sul treppiedi fisso in posizione di scansione, dalla staffa tipo Nodal Ninja Ultimate R1, sulla quale è stata collocata una fotocamera digitale NikonTM D7100 con obiettivo *Fish-eye* tipo Sigma 8 mm f/3.5. In questo modo, è stato possibile acquisire un certo numero di fotogrammi di elevata qualità da associare alla nuvola di punti tridimensionale. Per quanto riguarda i parametri della fotocamera, sono stati stabiliti i seguenti valori: lunghezza focale pari a 8 mm; messa a fuoco automatica; apertura del diaframma pari a 3,6; tempo di esposizione variabile in funzione delle diverse condizioni di illuminazione riscontrate durante il rilievo (parti di cava in ombra alternate a zone più luminose). Utilizzando la configurazione appena descritta, per ciascuna delle postazioni di scansione, le fotografie sono state scattate procedendo ogni 60° sul piano orizzontale (fino ai 360° di azimut), con un'angolazione verticale pari a -10°, e terminando con una fotografia scattata verso l'alto (a +90° rispetto all'orizzontale), in modo tale da coprire l'intera area di interesse.

6.3.6.2 Elaborazione dei dati in ambiente Trimble® Realworks

Gli elementi che intervengono nel processo di elaborazione dei dati TLS sono di seguito elencati: i) la nuvola di punti: per ogni *range scan* sono note le dimensioni della matrice di acquisizione, le coordinate x, y, z di ciascun punto battuto, le coordinate riga, colonna che indicano la posizione di ciascun punto rilevato all'interno della matrice di acquisizione, il

valore di riflettanza (tra 0 e 255) di ogni punto; a seconda del tipo di strumento utilizzato, esistono diversi formati di *file* di scansione laser: estensioni .pts e ptx nel caso di strumenti LeicaTM, .3dd per i laser Riegl, .fls per Faro, ecc.; ii) lista delle coordinate 3D dei *target* rilevati; iii) immagini digitali fotografiche. iv) schema di acquisizione dei dati.

I tempi di elaborazione dipendono dalla qualità del risultato che si vuole raggiungere e vengono generalmente stimati da 5 a 10 volte superiori rispetto a quelli della fase di rilevamento.

Ai fini del presente lavoro, per effettuare la fase di processing, è stato utilizzato il software Trimble[®] Realworks, il quale consente di registrare, visualizzare, esplorare e manipolare nuvole di punti 3D raccolte. In questo ambiente, dopo aver importato il progetto, occorre creare delle scansioni semplificate, al fine di ridurre le dimensioni dei *file* senza perdere in dettaglio. Il processo che permette la co-registrazione delle diverse scansioni, sfruttando le coordinate note dei target ottici, è denominato registration. Tale procedura è finalizzata all'allineamento delle diverse scansioni rispetto ad un unico sistema di riferimento. La registrazione può essere effettuata secondo tre diverse modalità: "auto-register using planes", "cloud-based registration" oppure "target-based registration". La prima delle tre è una funzione target-less di auto-registrazione la quale, utilizzando piani, registra automaticamente le scansioni livellate di ambienti strutturati, purché contengano una quantità significativa di pareti prevalentemente piatte; tale funzione estrae automaticamente tutti i piani principali (pareti, piazzale di cava, tetto delle camere, ecc.), li abbina automaticamente tra le varie scansioni e li utilizza per registrare le stesse. L'accuratezza di due stazioni co-registrate sulla base dei piani è data dal "cloud-to-cloud error", di cui è possibile prendere visione tramite il report di registrazione, definito come la distanza media tra piani associati (di una stazione) e la nuvola di punti (dell'altra stazione). Lo scopo della cloud-based registration, invece, è quello di registrare due nuvole di punti (o due gruppi di nuvole di punti) attraverso una procedura automatica, oppure manualmente selezionando una coppia di punti omologhi tra le nuvole di punti. In seguito, il software può rifinire la registrazione usando le parti in comune tra le nuvole (solitamente, se il rilievo è fatto correttamente, milioni di punti). L'errore di registrazione, in questo caso, viene calcolato come distanza media tra le due nuvole di punti. La "target-based registration", infine, offre la possibilità di registrare un dataset sulla base dei target, i quali possono essere appositamente posizionati in fase di rilievo TLS e misurati con Stazione Totale oppure creati manualmente durante l'elaborazione dei dati. La registrazione si basa su un metodo di regolazione dei minimi quadrati (least-squares adjustment) utilizzando i corrispondenti target di ciascuna stazione. Il report di registrazione consentirà di verificare la qualità della registrazione; qualora uno o più target eccedano la tolleranza d'errore, è possibile annullare il processo, rieseguire la registrazione oppure escludere dei target dal calcolo.

In questo caso, per allineare le diverse scansioni, in un primo momento è stato necessario utilizzare la modalità "*auto-register using planes*" (Figura 6.11) e, in seguito, si è usata la funzione "*target-based registration*" per georeferenziazione il tutto mediante le coordinate dei *target* (Figura 6.12).
Auto-Register using Planes (Target-less)	5
Reference Station	
Station 001	-
Image: Station 001 Image: Station 002 Image: Station 003 Image: Station 003 Image: Station 004 Image: Station 005 Image: Station 006 Image: Station 007 Image: Station 008 Image: Station 009 Image: Station 010	*
Station 001	
Uptions:	
Stait Cance	el Help

Figura 6.11. Cava del Piastraio di Sotto. Elaborazioni laser scanner in Trimble® Realworks: funzione "autoregister using planes".



Figura 6.12. Cava del Piastraio di Sotto. Elaborazioni *laser scanner* in Trimble[®] Realworks: evidenza dei *target* posizionati ed usati per la funzione "*target-based registration*".

Il passo successivo alla registrazione è rappresentato da *steps* di pulizia (rimozione degli oggetti scansionati indesiderati come, ad esempio, macchine operatrici, cavi elettrici e idraulici, persone passanti inavvertitamente durante il rilievo, ecc.) e semplificazione della nuvola di punti (Figura 6.13).



Figura 6.13. Cava del Piastraio di Sotto. Elaborazioni *laser scanner* in Trimble[®] Realworks: pulizia della nuvola mediante "segmentation tool".

Successivamente, dalla schermata "Produzione" di Trimble[®] Realworks, è possibile accedere alla sezione Trimble[®] RealColor (Figura 6.14), che consente di associare alle scansioni le relative fotografie panoramiche, ovvero il modello di colori RGB (*Red Green Blue*). Queste ultime sono state create utilizzando un ulteriore *software* denominato PTGui (New House Internet Services BV).



Figura 6.14. Cava del Piastraio di Sotto. Elaborazioni *laser scanner* in Trimble[®] Realworks: sezione Trimble[®] RealColor (immagine in basso), per associare alle singole scansioni le relative fotografie panoramiche create mediante il *software* PTGui (immagini in alto).

L'area "*Scan Explorer*", invece, consente di avviare il processo "Estrai punti" che porta alla creazione, in ambiente RealWorks, della nuvola di punti comprensiva dei dati RGB (Figura 6.15).



Figura 6.15. Cava del Piastraio di Sotto. Elaborazioni laser scanner in Trimble[®] Realworks - area "Scan Explorer".

Dopo aver effettuato la registrazione e la georeferenziazione delle nuvole e generato le fotografie panoramiche da associare ai punti, è stato possibile ottenere diversi prodotti 3D, il primo dei quali è la nuvola di punti rappresentativa sia dei pilastri oggetto di analisi che dell'intera cava. Seguono DEM, modelli 3D e ortofoto.

Il DEM è stato ottenuto eseguendo le operazioni di seguito elencate: i) semplificazione della nuvola (distanza tra punti pari a 2 cm); ii) importazione della nuvola nel *software freeware* "CloudCompare"; iii) procedura "*Rasterize*"; iv) esportazione della nuvola di punti contenenti i valori dell'elevazione (*height grid values*); v) creazione del modello in formato *raster* in EsriTM ArcGis 10.3.1 con una risoluzione spaziale pari a 1 cm/pixel.

La rappresentazione 3D della distribuzione dell'elevazione dei pilastri della cava è stata realizzata mediante modello TIN ricostruito sulla base della nuvola di punti in ambiente ESRITM ArcGIS Pro.

Il modello tridimensionale *mesh* dell'intera cava è stato creato in ambiente CloudCompare, definendo un certo numero di facce e dando *texture* fotorealistica. Il *workflow* seguito per questa fase è stato articolato nei seguenti passi: i) importazione della nuvola densa di punti nel *software freeware* CloudCompare; ii) calcolo delle normali alle superfici; iii) ricostruzione della *mesh* mediante il *tool "Poisson Surface Reconstruction"*. Inoltre, all'interno di Trimble[®] Realworks, mediante le funzioni "Mesh *Creation"* e "Mesh Editing", è stato possibile realizzare il modello tridimensionale texturizzato dei due pilastri oggetto di monitoraggio.

Infine, sulla base della nuvola di punti 3D, utilizzando all'interno di Trimble[®] Realworks la funzione "Ortho-Projection", è stata prodotta l'ortofoto della cava.

6.3.7 Rilievi DOFS

6.3.7.1 Progettazione e installazione del sistema di monitoraggio mediante DOFS

In fase di progettazione della disposizione del cavo sensore, la geometria dei pilastri è stata approssimativamente ricreata in ambiente Rhinoceros 3DTM a partire dalla topografia bidimensionale esistente resa disponibile al progetto (Figura 6.16). Anche in questo caso, come per il caso studio della Cava Piastra Bagnata, è stato previsto l'impiego di 250 m lineari di DOFS.

La procedura di installazione del cavo sensore, seguita anche in questo caso a quella di disposizione del filo testimone, è stata effettuata, in base alle modalità già descritte per la Cava Piastra Bagnata, grazie al lavoro svolto dai tecnici di cava, ma con due peculiarità: la prima differenza rispetto al caso precedente consiste nel fatto che, in questo caso, per posizionare sia il filo testimone che il cavo sensore, anziché ricorrere a tecniche di imbracatura per gli operatori in parete, è stato utilizzato un cestello meccanico (Figura 6.17) per raggiungere le quote desiderate, poste a circa 10 m dal piano di cava.



Figura 6.16. Progetto della disposizione del cavo sensore presso la Cava del Piastraio di Sotto. a) Topografia bidimensionale. b) Ricostruzione dei pilastri in ambiente Rhinoceros 3DTM.



Figura 6.17. Fasi di installazione del cavo sensore presso la Cava del Piastraio di Sotto.

Inoltre, per volontà degli amministratori di cava, al fine di preservare l'aspetto estetico del sito, considerata la facile visibilità del cavo dal piano di lavorazione, questa volta si è stabilito di non provvedere alla verniciatura di colore rosso del sensore in fibra ottica (Figura 6.18).



Figura 6.18. a) Pilastri oggetto di monitoraggio con sensori in fibra ottica presso la Cava del Piastraio di Sotto. b) Particolare di posizionamento del cavo sensore.

6.4 Risultati

6.4.1 Caratterizzazione geologico-strutturale

Prodotto del rilievo geologico-strutturale è la "Carta geologico-strutturale con sezione interpretativa" (Figura 6.19), da cui, anche in questo caso, si evince che la cava oggetto di analisi ricade all'interno della formazione dei "Marmi".



Figura 6.19. Cava del Piastraio di Sotto. "Carta geologico-strutturale con sezione interpretativa".

6.4.2 Caratterizzazione petrografica

Dal rilievo geologico deriva anche la realizzazione della "Carta delle varietà merceologiche" (Figura 6.20), dalla quale è possibile osservare come i pilastri oggetto di analisi (evidenziati dal percorso della fibra ottica in giallo) ricadano prevalentemente nella formazione "Marmo Grigio" e, solo per una parte secondaria, in quella del "Marmo Venato".



Figura 6.20. Cava del Piastraio di Sotto. "Carta delle varietà merceologiche".

Le analisi di laboratorio eseguite presso il Laboratorio di Meccanica delle Rocce del CGT hanno consentito di determinare le principali caratteristiche della tipologia di marmo prevalente.

<u>Marmo Grigio (Tabella 6.2 e Figura 6.21)</u>. Marmo a grana fine o media di colore grigio attraversato da vene grigie più chiare fino a biancastre. Litotipo molto eterogeneo e variegato dato da alternanze più o meno irregolari di livelli grigi e biancastri. Il colore scuro più o meno uniforme dell'insieme è dato da pirite microcristallina e/o pigmento carbonioso. Non di rado sono presenti masse e/o strati dolomitici più o meno regolari e continui e livelli ocracei con pirite.

Nome	Descrizione	Caratteristica	U.M.	Valore medio
Marmo a attraversa biancas variegat Marmo irregolari Grigio scuro più o da pirit carbonioso	Marmo a grana fine o media di colore grigio attraversato da vene grigie più chiare fino a biancastre. Litotipo molto eterogeneo e variegato dato da alternanze più o meno irregolari di livelli grigi e biancastri. Il colore scuro più o meno uniforme dell'insieme è dato da pirite microcristallina e/o pigmento carbonioso. Non di rado sono presenti masse	Carico di rottura a compressione	kg/cm ²	1200
		Carico di rottura a compressione dopo cicli di gelività	kg/cm ²	1194
		Carico unitario di rottura a flessione	kg/cm ²	151
		Dilatazione lineare termica	10-6 per °C	8,1
		Coefficiente d'imbibizione d'acqua	% in peso	0,15
	e/o strati dolomitici più o meno regolari e continui e livelli ocracei con pirite.	Peso per unità di volume	kg/m ³	2688
		Resistenza all'urto	cm	33,8
		Modulo di elasticità lineare	kg/cm ²	924000
		Resistenza all'abrasione	mm	8,73

Tabella 6.2. Proprietà fondamentali della varietà di "Marmo Grigio".



Figura 6.21. "Marmo Grigio".

6.4.3 Caratterizzazione geomeccanica e rappresentazione delle discontinuità

La Figura 6.22 mostra il risultato dell'analisi statistica della distribuzione dei poli delle discontinuità, mentre la Tabella 6.3 presenta i valori numerici delle giaciture medie e le altre proprietà fondamentali dei principali sistemi di fatturazione individuati.



Figura 6.22. Cava del Piastraio di Sotto: *stereonet* dei piani di fratturazione con evidenziati i principali sistemi.

Sistema	K1.1	K2.1	K2.2	К3	K4	K5
Inclinazione	45	71	79	75	67	78
Direzione di immersione	92	178	2	233	125	292
Spaziatura (cm)	20-60	20-60	20-60	20-60	20-60	20-60
Persistenza (m)	10-20	3-20	>20	3-10	10-20	3-10
Apertura (mm)	1-5	>5	1-5	>5	1-5	>5
Riempimento (mm, tipo)	<5 hard	>5 hard	<5 hard	>5 soft	<5 hard	>5 hard
JRC	8	5	5	6	6	7
Alterazione	Media alterazione	-	-	Leggera alterazione	Media alterazione	Media alterazio ne
Umidità	Umida	Umida	Umida	Umida	Umida	Asciutta

Tabella 6.3. Cava del Piastraio di Sotto: valori di giacitura e caratteristiche delle diverse famiglie di discontinuità individuate.

Nella carta del rilievo geomeccanico (Figura 6.23), è possibile visualizzare i sistemi di discontinuità individuati mediante le attività di indagine sul campo.



Cordinate piane riferite al sistema sistema di riferimento cartografico Roma 40 - Gauss Boaga Fuso Ovest

Figura 6.22. Carta del rilievo geomeccanico della Cava del Piastraio di Sotto.

6.4.4 Classificazione dell'ammasso roccioso

La Tabella 6.4 mostra le principali caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso derivate dai rilievi presso la Cava del Piastraio di Sotto.

Parametro	Valore	Indice
Resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta (MPa)	100-140	A1 = 12
RQD (%)	72	A2 = 14
Spaziatura (m)	0,40	A3 = 9
Condizione delle discontinuità	Persistenza [3-10] m Apertura media [1-5] mm Leggermente rugose Non alterate Riempimento compatto	A4 = 12
Condizioni idrauliche	Asciutte	A5 = 15

Tabella 6.4. Cava del Piastraio di Sotto: caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso.

L'ammasso roccioso ricade nella classe II (qualità buona) con un $RMR_b = 62$. I parametri di resistenza al taglio dell'ammasso roccioso derivati empiricamente sono riportati in Tabella 6.5.

RMR _b	62
Classe	II
Qualità dell'ammasso roccioso	Buona
Coesione (MPa)	310
Angolo di attrito (°)	36
Modulo di deformazione (GPa)	24

Tabella 6.5. Cava del Piastraio di Sotto: qualità dell'ammasso roccioso.

Anche in questo caso, nelle successive analisi di stabilità delle pareti, si è usato, in via cautelativa considerando l'assenza di specifiche prove di laboratorio e le indicazioni fornite da precedenti report tecnici realizzati sul medesimo sito, un valore di angolo di attrito pari a 35°.

6.4.5 Analisi di stabilità cinematica

Analogamente a quanto fatto per la Cava Piastra Bagnata, sono state scelte 2 classi di direzione del versante rappresentative dei pilastri in esame (Figura 6.24 e Tabella 6.6).



Figura 6.24. Cava del Piastraio di Sotto: individuazione di 2 classi di direzione del versante rispettivamente denominate V1 e V2 (visualizzazione in ambiente Trimble[®] Realworks).

Versante	Inclinazione (°)	Direzione di immersione (°)
V1	90	10
V2	90	100

 Tabella 6.6. Cava del Piastraio di Sotto: suddivisione in classi del fronte di cava con indicazione dei valori di inclinazione e direzione di immersione.

L'analisi di stabilità cinematica è stata eseguita in ambiente Dips (RocscienceTM) per entrambe le classi di versante e per ciascuna tipologia di cedimento; inoltre, è stato determinato il valore dell'angolo limite. I risultati ottenuti sono mostrati nelle Tabelle 6.7 (scivolamento planare e su cunei) e 6.8 (ribaltamento diretto e flessurale).

	Scivolamento planare			Scivolamento di cunei		
Zona	Immersione versante (°)	Angolo limite (°)	Sistemi critici Angolo limite (Combinazioni critiche	
V1	10	79	K2.2/K1.1/K5	48	K2.2-K3/K2.2-K5/K2.2- K4/K2.2-K1.1/K4-K1.1	
V2	100	45	K4/K1.1/K2.1	44	K3-K4/K2.1-K4/K2.1- K1.1/K2.2-K4/K2.2- K1.1/K1.1-K4	

Tabella 6.7. Cava del Piastraio di Sotto: risultati dell'analisi cinematica di stabilità sul fronte di cava per le ipotesi di scivolamento planare e di cunei.

	Ribaltamento diretto		Ribaltame	ento flessurale	
Zona	Immersione versante (°)	Angolo limite (°)	Combinazioni critiche	Angolo limite (°)	Sistemi critici
V1	10	19	K3-K4/K4-K5/K2.1-K3 (RIBALTAMENTO OBLIQUO PER K2.1- K4/K2.1-K5/K5-K3) (PIANO BASALE K2.2)	54	K2.1
V2	100	15	K3-K5/K2.2-K3 (RIBALTAMENTO OBLIQUO K2.2-K5/K2.1- K5/K2.1-K3) (PIANO BASALE K1.1/K4)	47	K5

Tabella 6.8. Cava del Piastraio di Sotto: risultati derivati dall'analisi cinematica di stabilità sul fronte di cava per le ipotesi di ribaltamento diretto e flessurale (limiti laterali di 30°).

6.4.6 Analisi di stabilità dinamica

6.4.6.1 Calcolo dei coefficienti sismici orizzontale e verticale

In base alla classificazione sismica della Regione Toscana, il Comune di Stazzema (LC) ricade in zona sismica 2 (Figura 6.25). Come si evince da Figura 6.26, gli eventi sismici ricorrenti nell'area del comune analizzato sono caratterizzati da intensità massima corrispondente a 8 gradi MCS.

Dalla tabella sulla suddivisione delle sottozone sismiche in relazione all'accelerazione di picco su terreno rigido si evince che, per il territorio del Comune di Stazzema (zona

sismica 2), ci si aspetta un'accelerazione compresa tra 0,15 ge 0,25 g. Per il calcolo di a_{max} , si considera:

- $a_g = 0,25 g$ (per zona sismica 2);
- $S_S = 1$ (per categoria di sottosuolo A vedi tabella);
- $S_T = 1,4$ (per categoria topografica T4 vedi tabella);
- $a_{max} = 0,25 \text{ g} \cdot 1 \cdot 1,4 = 0,35 \text{ g}.$

Infine, si ottengono i seguenti valori dei coefficienti sismici orizzontale k_h e verticale k_V .

•
$$k_h = \beta_s \cdot \frac{a_{max}}{g} = 0.38 \cdot \frac{0.35 \, g}{1 \, g} = 0.133$$

•
$$k_V = 0,133 \cdot 0,5 = 0,066.$$



Figura 6.25. Mappa della classificazione sismica della Regione Toscana (Comune di Stazzema evidenziato mediante poligono dal contorno nero). Immagine adattata da <u>http://www.regione.toscana.it/-/classificazione-sismica-della-toscana</u>.



Figura 6.26. Massime intensità macrosismiche registrate dall'anno mille in grado della scala Mercalli (comune di Stazzema evidenziato mediante poligono di colore bianco). Immagine adattata da <u>https://www.astrogeo.va.it/sismi/bodyto99.htm</u>.

6.4.6.2 Verifica della stabilità

L'analisi di stabilità dinamica è stata eseguita in ambiente RocscienceTM adottando il metodo di analisi di tipo probabilistico. Sono state effettuate 3 simulazioni per ogni zona (una per scivolamento planare, una per scivolamento di cuneo, una per ribaltamento diretto), sia in condizioni statiche che dinamiche, per un totale di n. 12 analisi. La variabilità delle dimensioni dei blocchi che possono formarsi è stata considerata secondo una distribuzione statistica (uniforme o uniforme-troncata), in maniera tale da ottenere blocchi caratterizzati da volumi variabili comparabili a quelli osservati in situ.

Le Tabelle 6.9, 6.10 e 6.11 mostrano i principali parametri utilizzati e i risultati delle analisi suddivisi per tipologia di cedimento, riportano anche i valori di DS utilizzati. Il peso di volume di riferimento per la litologia marmorea dell'area è di 2,7 t/m³.

Zona	V1	V1	V2	V2
Tipologia	Statico	Dinamico	Statico	Dinamico
Volume medio blocco (m ³)	2.55	2.55	5.51	5.51
Volume max blocco (m ³)	10.2	10.2	16.65	16.65
Inclinazione versante (°)	90	90	90	90
Altezza Versante (m)	5 (DS 1m)	5 (DS 1m)	5 (DS 1m)	5 (DS 1m)
Inclinazione piano di scivolamento (°)	79 (DS 5°)	79 (DS 5°)	71 (DS 5°)	71 (DS 5°)
Angolo di attrito resid. (°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)
JRC	5 (DS 1)	5 (DS 1)	5 (DS 1)	5 (DS 1)
JCS	120 (DS	120 (DS 10	120 (DS	120 (DS
(Mpa)	10 MPa)	MPa)	10 MPa)	10 MPa)
FS medio	0.29	0.181	0.653	0.526
FS min	0.0002	0	0.203	0.107
FS max	0.948	0.758	1.714	1.469
Prob. cedimento FS < 1.3	100%	100%	99.52%	99.95%
Prob. cedimento FS < 1	100%	100%	95.05%	98.87%

 Tabella 6.9. Cava del Piastraio di Sotto: risultati delle analisi di stabilità probabilistica per scivolamento planare.

Zona	V1	V1	V2	V2
Tipologia	Statico	Dinamico	Statico	Dinamico
Volume medio blocco (m ³)	31.926	31.926	3.778	3.778
Volume max blocco (m ³)	43770.74	43770.74	38	38
Orientazione versante (°)	10 (DS 2°)	10 (DS 2°)	100 (DS 2°)	100 (DS 2°)
Inclinazione versante (°)	90	90	90	90
Altezza versante (m)	5	5	5	5
Direzione giunto 1 (°)	2 (DS 5°)	2 (DS 5°)	233 (DS 5°)	233 (DS 5°)
Inclinazione giunto 1 (°)	79 (DS 5°)	79 (DS 5°)	75 (DS 5°)	75 (DS 5°)
Angolo di attrito residuo giunto 1 (°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)
JRC giunto 1	5 (DS 2)	5 (DS 2)	6 (DS 2)	6 (DS 2)
JCS giunto 1 (MPa)	120 (DS 10 MPa)	120 (DS 10 MPa)	120 (DS 10 MPa)	120 (DS 10 MPa)
Direzione giunto 2 (°)	292 (DS 5°)	292 (DS 5°)	125 (DS 5°)	125 (DS 5°)
Inclinazione giunto 2 (°)	78 (DS 5)	78 (DS 5)	67 (DS 5)	67 (DS 5)
Angolo di attrito residuo giunto 2 (°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)
JRC giunto 2	7 (DS 2)	7 (DS 2)	6 (DS 1)	6 (DS 1)
JCS giunto 2 (MPa)	120 (DS 10 MPa)	120 (DS 10 MPa)	120 (DS 10 MPa)	120 (DS 10 MPa)
FS medio	0.334	0.242	0.718	0.618
FS min	0.017	0	0.194	0.133
FS max	1.439	1.193	1.814	1.621
Prob. cedimento FS < 1.3 (PF)	97.61%	97.63%	97.37%	98.43%
Prob. cedimento FS < 1.3 (PS)	99.98%	100%	98.64%	99.72%
Prob. cedimento FS < 1 (PF)	97.42%	97.6%	88.62%	94.67%
Prob. cedimento FS < 1 (PS)	99.78%	99.97%	89.64%	95.91%

Tabella 6.10. Cava del Piastraio di Sotto: risultati delle analisi di stabilità probabilistica per scivolamento di cunei.

Zona	V1	V1	V2	V2
Tipologia	Statico	Dinamico	Statico	Dinamico
Inclinazione versante (°)	90	90	90	90
Altezza versante (m)	5 (DS 1m)	5 (DS 1m)	5 (DS 1m)	5 (DS 1m)
Spaziatura (m)	0.4 (DS 0.1m)	0.4 (DS 0.1m)	0.4 (DS 0.1m)	0.4 (DS 0.1m)
Inclinazione giunto ribaltante (°)	71 (DS 5°)	71 (DS 5°)	78 (DS 5°)	78 (DS 5°)
Inclinazione giunto basale (°)	49 (DS 5°)	49 (DS 5°)	49 (DS 5°)	49 (DS 5°)
Angolo di attrito residuo (°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)
JRC	5 (DS 1)	5(DS 1)	7 (DS 1)	7 (DS 1)
JCS (Mpa)	120 (DS 10 MPa)	120 (DS 10 MPa)	120 (DS 10 MPa)	120 (DS 10 MPa)
FS medio	1.126	0.483	2.497	0.709
FS min	0.189	0.1	0.244	0.1
FS max	14.395	7.059	25	15.701
Prob. cedimento FS < 1.3	84.1%	94.62%	85.74%	98.34%
Prob. cedimento FS < 1	83.44%	94.52%	75.73%	93%

Tabella 6.11. Cava del Piastraio di Sotto: risultati analisi di stabilità probabilistica per ribaltamento diretto.

6.4.7 Prodotti dei rilievi topografici e DGPS

I prodotti dei rilievi topografici e DGPS sono costituiti dalle coordinate dei *target* posizionati in cava (Figura 6.27 e Tabella 6.12) ai fini della registrazione e georeferenziazione delle scansioni *laser scanner*.



Figura 6.27. Cava del Piastraio di Sotto: localizzazione in pianta dei *target* posizionati in cava al fine di registrare e georeferenziare le scansioni *laser scanner*. I target, n effetti, si trovano tutti in sotterraneo come mostrato nelle figure 6.6, 6.10 e 6.12.

Nome	Est	Nord	Quota
T01	1603823,538	4876248,584	1283,298
T02	1603812,979	4876248,335	1290,643
Т03	1603793,464	4876250,825	1285,232
T04	1603814,109	4876257,643	1284,844
T05	1603818,084	48762457,83	1287,577
T06	1603820,393	4876258,356	1283,982
T07	1603821,099	4876261,753	1286,245
T08	1603821,589	4876255,019	1287,604
T09	1603793,437	4876258,089	1293,241

 Tabella 6.12. Cava del Piastraio di Sotto: coordinate geoidiche *target* misurati (sistema di riferimento Monte Mario Italy 1).

6.4.8 Prodotti del TLS

Di seguito si riportano gli *ontput* del *processing* dei dati acquisiti mediante rilievo TLS. La Figura 6.28 mostra l'RMSE ottenuto sui *target* utilizzati nel processo di registrazione e georeferenziazione delle diverse scansioni TLS. L'errore residuale complessivo ottenuto risulta essere inferiore ad 1 cm. Considerate le finalità del rilievo e del tipo di studio, si tratta di un valore pienamente accettabile.

Station View + Advanced		dvanced Overall	Overall residual error: 0.01 m							
# Match with	& Unmatch	Auto-match all	Auto-match Stat	tion Expert	Report					
		Concernation of the		and the second second	and Contraction of					
Addred Dates										
latoned station										
Name	Scan Per Station	Corresponding Target	Scan Per T	Residual Error	Delta X	Delta Y	Delta Z	Fitting Error	Distance to Scan	
- 🔔 💡 TopoStation	9									
- @ ¶ T01		054	3	2						
Ø T02		044	3						++	
- @ ¶ T03										
Ø T04 Ø		067	2		**	**		**	**	
- @ ¶ T05		070	2	**	**	**	**	**	**	
- 10 TO6		057	3	**	**	**		**	**	
T07		055	2	5.4	**	32		**	44	
@ T08					**			**		
@ ¶ T09		22				22	-	**	44	
- 🔯 🦪 Station 001	8			0.01 m						
Station 001				44		44		**	0.00 m	
🛞 💡 Target2B		044	3	0.02 m	-0.01 m	-0.02 m	-0.01 m	0.03 m	16.19 m	
📆 🎙 Target18		054	3	0.02 m	0.02 m	-0.01 m	-0.00 m	0.00 m	5.98 m	
Target78		055	2	0.01 m	0.01 m	0.01 m	0.00 m	0.00 m	13.36 m	
🛞 🔮 Target68		057	3	0.01 m	0.00 m	0.01 m	0.00 m	0.00 m	11.32 m	
🛞 💡 Target4B		067	2	0.01 m	-0.01 m	0.01 m	0.00 m	0.00 m	16.27 m	
-90 9C		064	2	0.00 m	0.00 m	-0.00 m	-0.00 m	0.04 m	4.97 m	
3 Target58 (2)		070	2	0.01 m	0.00 m	0.01 m	0.00 m	0.01 m	12.84 m	
- 🙀 💡 Station 002	5			0.01 m						
Station 002		77		77					0.00 m	
📆 💡 Target18		054	3	0.02 m	0.00 m	-0.02 m	0.00 m	0.05 m	25.73 m	
🙊 👔 Target28		044	3	0.02 m	-0.02 m	-0.01 m	0.00 m	0.03 m	31.70 m	
\Re 💡 Target68		057	3	0.01 m	-0.00 m	0.01 m	0.00 m	0.03 m	19.38 m	
- OC		064	2	0.00 m	m 00.0	0.00 m	0.00 m	0.05 m	25.87 m	

Figura 6.28. Valori RMSE ottenuti per i target utilizzati nell'ambito del rilievo TLS. Fonte: *report* dell'elaborazione dei dati TLS in ambiente Trimble[®] Realworks.

I prodotti TLS derivati sono rappresentati da: nuvola densa di punti (Figura 6.25), DEM (figure 6.26 e 6.27), modelli 3D del tipo *mesh* (figure 6.32, 6.33 e 6.34) e, infine, ortofoto (Figura 6.35).



Figura 6.29. Cava del Piastraio di Sotto: nuvola di punti rappresentante i due pilastri oggetto di studio costituita da 242.050.837 punti. a) Modalità "*Color Coded Intensity*". b) Modalità RGB.

Le figure n. 6.30 e 6.31 mostrano il DEM (risoluzione pari ad 1 cm/pix) visualizzato, rispettivamente, in pianta 2D (ricostruito utilizzando il *software freeware* CloudCompare) e in 3D mediante modello TIN (*Triangular Irregular Network*) creato, in ambiente ESRITM ArcGIS Pro a partire dalla nuvola di punti. Dalle immagini 6.30 e 6.31 si evince come, nell'area di studio, le quote varino da circa 1281 m a 1298 m s.l.m.



Figura 6.30. Cava del Piastraio di Sotto: visualizzazione in pianta 2D del DEM ricostruito mediante il *software freeware* CloudCompare.



Figura 6.31. Rappresentazione 3D della distribuzione dell'elevazione della Cava del Piastraio di Sotto mediante modello TIN.

Sulla base della nuvola di punti 3D, è stata prodotta l'ortofoto della cava (Figura 6.32) con una risoluzione spaziale pari a 12 cm.



Figura 6.32. Visualizzazione in pianta 2D dell'ortofoto ricostruita mediante Trimble[®] Realworks.

I modelli 3D di tipo *mesh* sono riportati nelle figure 6.33 (rappresentativa dell'intera cava), 6.34 e 6.35 (rappresentative dei pilastri oggetto di studio).

In seguito, disegnando una polilinea sul modello 3D di tipo *mesh* dei pilastri, è stato possibile tracciare il percorso dei DOFS (polilinea di colore rosso nelle figure 6.34 e 6.35) ed esportarlo in formato .shp in ambiente GIS dove, al fine di agevolare le analisi dei risultati circa i DOFS, è stato discretizzato con passo 20 cm (Figura 6.36).



Figura 6.33. Visualizzazione in pianta 2D del modello tridimensionale texturizzato costituito da 1.116.906 facce.



Figura 6.34. Modello tridimensionale texturizzato (vista *right* – Trimble[®] Realworks) con evidenziato il percorso dei DOFS mediante polilinea di colore rosso.



Figura 6.35. Modello tridimensionale texturizzato (vista *left* - Trimble[®] Realworks) costituito da 6.685.469 facce con evidenziato il percorso dei DOFS mediante polilinea di colore rosso.



Figura 6.36. Modello TIN con sovrapposto il percorso DOFS (in rosso) in formato shapefile 3D puntuale con passo 20 cm. La tabella attributi a destra riporta il FID, codice identificatore di ciascun punto, e le distanze progressive e cumulate.

6.4.9 Risultati delle acquisizioni DOFS

Presso la Cava del Piastraio di Sotto sono state effettuate quattro misure DOFS multitemporali (Figura 6.37): la prima, eseguita in data 23/01/2018, è di tipo BOTDA, ossia basata su *scattering* Brillouin stimolato; le successive tre, invece, datate 20/06/2018, 20/09/2018 e 11/10/2018 sono di tipo BOTDR (*scattering* spontaneo di Brillouin). In particolare, i rilievi BOTDR sono stati eseguiti iniettando luce prima dal lato START e poi dal lato END della fibra di misura, in modo tale da poter ricostruire l'intero profilo e

renderlo confrontabile con quello di riferimento acquisito in modalità BOTDA (Figura 6.37).

Purtroppo, non è stato possibile effettuare ulteriori rilievi in quanto, analogamente al caso della Cava Piastra Bagnata, nel periodo compreso tra Novembre 2018 e Febbraio 2019, il sito di estrazione è stato chiuso a causa delle avverse condizioni meteorologiche invernali. La Figura 6.37 mostra sia il profilo al tempo zero, acquisito in modalità BOTDA, relativo alla data del 23/01/2018, sia quelli successivi (modalità BOTDR).



Figura 6.37. Cava del Piastraio di Sotto. Profili BFS acquisiti in data 23/01/18 (BOTDA), 20/06/2018, 20/09/2018 e 10/10/2018 (tutti BOTDR).

Si noti che le misure si estendono su una lunghezza di fibra di misura pari a circa 450 m, quindi maggiore dei 250 m installati sui due pilastri. Tale evidenza implica la presenza di un tratto di fibra "libero", vale a dire non utilizzato per le misure di deformazione ma sfruttato per le misure compensative di temperatura. Considerato l'andamento del profilo mostrato in Figura 6.32, è evidente che il tratto compensativo è quello che corrisponde ai primi 220 m, mentre la maggiore variabilità dello *shift* Brillouin nel tratto finale è indice dell'effetto delle azioni deformative che agiscono sulla fibra in seguito alla procedura di installazione/incollaggio. È interessante sottolineare la sostanziale sovrapponibilità tra il profilo di zero misurato in modalità BOTDA, con quelli successivi acquisiti in modalità BOTDR.

A partire dai dati BFS presentati in Figura 6.37, è stato possibile ricavare l'andamento dello *strain* lungo la fibra. Per ricavare tale grafico, la misura del 23/01/2018 è stata considerata come misura di riferimento, ovvero il profilo di BFS misurato in tale data è stato sottratto a tutti i profili successivi. La Figura 6.38 mostra i profili di *strain* così ottenuti. Per giungere ad una migliore visualizzazione, i valori di *strain* sono stati successivamente sottoposti ad un campionamento realizzato attraverso il calcolo di una media mobile su 51 punti. Il risultato finale è mostrato in Figura 6.38. Le deformazioni

registrate sono relativamente modeste rispetto alla deviazione standard di ciascun profilo, all'incirca pari a 140 µɛ.

Il valore ottenuto per la deviazione standard (140 $\mu\epsilon$) ha suggerito la scelta di una soglia di allarme per le deformazioni cinque volte maggiore (Burr et al., 2013) della stessa deviazione standard (applicazione della relazione 2.18):

$$S_{max} = 5 \cdot 140 \cong 700 \,\mu\varepsilon \tag{6.1}$$

Considerando $E = 90 \ GPa$ e $\sigma_u = 1200 \ \frac{kg}{cm^2} = 117,6 \ MPa$ (Tabella 6.2), applicando la relazione 2.19, si ottiene:

$$\sigma_{calc} = S_{max} \cdot 10^{-6} \cdot E \cong 63 \, MPa \tag{6.2}$$

Risultando $\sigma_{calc} < \sigma_u$, $S_{max} = 700 \,\mu\varepsilon$ esso è stato considerato come un valore soglia di allarme adatto e precauzionale per le deformazioni del fronte analizzato (Figura 6.39). Osservando il grafico, è possibile comprendere che tale valore soglia non viene raggiunto in nessuna posizione lungo tutto l'arco temporale della campagna di monitoraggio.



Figura 6.38. Profili di strain acquisiti presso la Cava del Piastraio di Sotto.



Figura 6.39. Profili di *strain* della Cava del Piastraio di Sotto sottoposti ad un campionamento a media mobile su 51 punti.

Per quanto riguarda i profili di variazione della temperatura (Figura 6.40), essi sono stati ottenuti a partire dai dati mostrati in Figura 6.36 nei primi 220 m. I dati di temperatura ottenuti oscillano tra circa [-8, +8] °C e sembrano non risentire in maniera significativa delle naturali variazioni stagionali: si tratta, infatti, di un sito in sotterraneo dove le temperature medie si mantengono sempre abbastanza basse.



Figura 6.40. Profili di variazione di temperatura acquisiti presso la Cava del Piastraio di Sotto.

6.5 Discussione

La classificazione RMR_b ha evidenziato un ammasso roccioso di buona qualità, anche se dai risultati delle analisi di stabilità si evincono alcune condizioni di criticità in corrispondenza dei pilastri esaminati. Il penalizzante assetto geomeccanico consente, infatti, la formazione di un elevato numero di blocchi contraddistinti da discrete probabilità di cedimento. In generale, i cinematismi più critici risultano essere gli scivolamenti planari e gli scivolamenti dei cunei su entrambi i lati dei pilastri, con probabilità di cedimento superiore al 97% per FS < 1,3. I ribaltamenti, invece, presentano condizioni leggermente migliori: la probabilità di cedimento varia dall'84%, in condizioni statiche, al 98% in condizioni sismiche, sempre considerando un FS < 1,3. Le probabilità di cedimento, inoltre, diminuiscono notevolmente se si considera un fattore di sicurezza pari all'unità. È da sottolineare però che la cava è già stata messa in sicurezza tramite tiranti e chiodature (alcuni esempi in Figura 6.41).



Figura 6.41. Aree in sotterraneo con tiranti di rinforzo già installati.

Le quattro misurazioni DOFS di tipo BOTDA (in data 23/01/2018) e BOTDR (datate 20/06/2018, 20/09/2018 e 11/10/2018) hanno permesso inoltre di ricavare tre profili di *strain*) che mostrano sostanziali condizioni di stabilità dei pilastri per tutta la stesura della fibra. Il valore soglia di allarme non è stato mai raggiunto in nessuno dei tre profili. In termini di *back-analysis*, nel periodo di interesse, si può effettivamente dire che non sono stati rilevati fenomeni di crolli di roccia né importanti deformazioni. I dati di temperatura sembrano non risentire in maniera significativa delle naturali variazioni stagionali probabilmente a causa delle basse escursioni termiche date dal fatto che la cava è in sotterraneo dove le temperature medie si mantengono sempre abbastanza basse. Un'importante criticità affrontata riguarda la chiusura del sito di estrazione nei mesi invernali (in entrambe le stagioni 2017-2018 e 2018-2019), dovuta alle avverse condizioni meteorologiche, che ha impedito la possibilità di esecuzione di ulteriori rilievi DOFS.

Nonostante questi problemi tecnici, la fibra ottica è stata comunque capace di restituire risultati attendibili anche un ambiente poco ospitale come un sito di estrazione del marmo in sotterraneo e di fornire in *output* le misure desiderate, ossia i valori di BFS, a partire dai quali sono stati calcolati i corrispondenti valori di *strain e* temperatura. Pertanto, pur mancando un termine di confronto diretto, la valutazione dell'efficacia del sistema di monitoraggio sperimentale, in riferimento alla capacità dell'acquisizione dei dati di *strain* e temperatura in sotterraneo, è senza dubbio positiva.

6.6 Conclusioni

Nel presente caso studio sono state illustrate le fasi di progettazione, implementazione e sperimentazione di un sistema di monitoraggio innovativo costituito DOFS e tecnologie geomatiche finalizzato alla sorveglianza di due pilastri di un sito di estrazione del marmo in sotterraneo. Il sistema mira a supportare i risultati delle analisi di stabilità dei versanti, al fine di tutelare la salute e la sicurezza dei lavoratori. La cava oggetto di analisi è stata caratterizzata dal punto di vista geologico-strutturale, geomeccanico e petrografico mediante opportune indagini in situ e in laboratorio. Inoltre, sono state effettuate la rappresentazione delle discontinuità, le analisi di stabilità dinamica e cinematica e la classificazione dell'ammasso roccioso. Inoltre, per raffinare il rilevamento geomeccanico e georeferenziare e cartografare la posizione dei DOFS, sono stati eseguiti rilievi TLS supportati da rilievi topografici e GNSS. Nonostante le criticità sopraggiunte, ovvero la chiusura della cava nel periodo invernale per le avverse condizioni metereologiche che ha inevitabilmente ridotto l'entità di dati disponibili, i risultati ottenuti, ossia i valori di BFS, a partire dai quali sono stati calcolati i corrispondenti valori di strain e temperatura, mostrano il corretto funzionamento del sistema di monitoraggio sperimentale DOFS in un ambiente estremo e poco ospitale per la sensoristica come un sito di estrazione del marmo in sotterraneo. Il valore soglia di allarme non è stato mai raggiunto in nessuno dei profili di deformazione ottenuti, né deformazioni o fenomeni di crolli di roccia sono stati rilevati nel periodo di interesse. In futuro, dato che le fibre sono già installate, il proseguimento delle attività di acquisizione dei dati potrebbe offrire la possibilità di analizzare dataset di strain e temperatura molto più consistenti che potrebbero essere utilizzati per sviluppare sistemi di monitoraggio real-time volti alla salvaguardia del personale operativo sul luogo di lavoro e alla pianificazione sul medio-lungo termine delle attività estrattive.

Il presente capitolo viene presentato in forma di caso di studio descritto in stile accademico adattato da:

Lanciano C.,; Salvini, R. Monitoring of Strain and Temperature in an Open Pit Using Brillouin Distributed Optical Fiber Sensors. Sensors 2020, 20, 1924. https://doi.org/10.3390/s20071924.

Contributo di C. Lanciano

Sotto la supervisione del Tutore, C. Lanciano ha avuto modo di partecipare attivamente a tutte le fasi di rilievo e analisi. In fase di progettazione del sistema di monitoraggio, ha contribuito alla definizione del percorso dei DOFS e, in seguito, ha partecipato alla supervisione della loro installazione sul contrafforte oggetto di analisi. Ha fatto parte del team del Laboratorio di Geomatica del Centro di Geotecnologie durante i rilievi fotogrammetrici mediante UAV, topografici e GNSS. Inoltre, ha effettuato la fase di *data processing*, articolata in: rappresentazione delle discontinuità; analisi di stabilità cinematica e dinamica; realizzazione di cartografia tematica; elaborazione dei dati GNSS, topografici e fotogrammetrici; elaborazioni in ambiente GIS. Infine, ha analizzato e interpretato i dati di *strain* derivati dalle misure BFS mediante DOFS ed effettuato confronti con i contemporanei dati di monitoraggio topografico e geotecnico.

Abstract

In questo capitolo vengono mostrati e analizzati i risultati di un sistema di monitoraggio basato sulla combinazione di DOFS a confronto con un sistema più tradizionale di tipo topografico e geotecnico. La complessità morfologica e le intense escursioni termiche che caratterizzano l'area rendono tale applicazione molto originale. Il sito test individuato è la Tecchia di Pradetto presso la cava a cielo aperto di Lorano (Carrara), sempre appartenente alle Alpi Apuane, dove è operativo dal 2012 un sistema di monitoraggio costituito da estensimetri, fessurimetri, inclinometri e da una stazione totale robotizzata posta in maniera permanente in cava. I valori di *strain* e temperatura ricavati dalle misure DOFS sono stati quindi messi a confronto (*i.e.* validati) con dati di deformazione acquisiti in contemporanea dalla strumentazione topografica e geotecnica.

Il sistema è tuttora attiva dato che i risultati che ne derivano danno indicazioni fondamentali sulla stabilità dell'ammasso roccioso al fine di intraprendere azioni finalizzate al miglioramento della sicurezza sui luoghi di lavoro e alla pianificazione a lungo termine delle attività estrattive.

7.1 Introduzione

Il sito test individuato per la sperimentazione è caratterizzato dalla presenza di un contrafforte in marmo, residuo di precedenti attività di scavo (Salvini et al., 2014), denominato "Tecchia di Pradetto". Il pilastro, accessibile da tre lati, è alto oltre 120 m, largo 30 m e profondo 40 m; alla sua base l'attività mineraria è ancora in corso. A partire dall'anno 2012, tale contrafforte viene costantemente tenuto sotto osservazione mediante un sistema di monitoraggio topografico e geotecnico costituito da RTS e sensori geotecnici (estensimetri, fessurimetri e inclinometri). Pertanto, la peculiarità di questo caso studio consiste nella possibilità di effettuare un confronto tra i dati rilevati da tale strumentazione topografica-geotecnica e i risultati delle acquisizioni mediante DOFS.

7.2 Inquadramento geografico e geologico

Il territorio del Comune di Carrara (Provincia di Massa Carrara) è contraddistinto dalla presenza di tre bacini marmiferi molto estesi: Colonnata, Fantiscritti e Torano. In particolare, il Bacino di Torano (Figura 7.1), che comprende 31 cave attive, è caratterizzato da pareti di cava dominate da pendii naturali dalla morfologia molto complessa che raggiungono centinaia di metri di altezza. La produzione del bacino è di oltre 30'000 ton/mese di marmi di qualità pregiate quali lo statuario, lo statuario venato, il calacatta, il cremo e l'arabescato alle quote più basse e pregiati bianchi Carrara alle quote superiori. La finissima struttura saccaroide degli statuari, con una pasta leggermente avoriata, ha reso celebri questi materiali: la loro rarità è dovuta all'essere compresi in "ovuli" dal diametro di qualche decina di metri inseriti all'interno della più vasta lente di bianchi ordinari. Qui, poco distante dalla suggestiva omonima frazione di Torano, vi erano le celebri cave di marmi statuari che dal Trecento ad oggi hanno dato materia alle opere dei più grandi artisti.



Figura 7.1. Vista panoramica di parte del Bacino marmifero di Torano.

Nel Bacino di Torano è ubicato il sito di estrazione Lorano "I" n° 22 (Cantiere Pradetto - Figura 7.2). Dal punto di vista geologico, la cava è ubicata nel fianco dritto dell'Anticlinale di Pianza che, insieme alla Sinclinale dei Vallini, rappresenta una coppia antiforme-sinforme con nucleo di marmi giurassici e meta-calcari quarzosi. Si tratta di lievi pieghe (su scala ettometrica) tra due strutture D1 note come la Sinclinale di Carrara e l'Anticlinale di Vinca situate rispettivamente a Nord-Ovest e Sud-Est (Salvini et al., 2015; Molli & Meccheri, 2012).



Figura 7.2. Inquadramento territoriale della Cava "I" n° 22 di Lorano (Carrara) e fotografia panoramica del contrafforte oggetto di monitoraggio (in basso a sinistra).

7.3 Materiali e metodi

7.3.1 Rilievo geologico-strutturale e geomeccanico

L'area prescelta per l'attività di monitoraggio mediante DOFS è stata analizzata in modo accurato mediante rilievi geologico-strutturali e geomeccanici diretti, in aree accessibili, per le medesime finalità già elencate nell'ambito dei due precedenti caso studio e con gli stessi strumenti.



Figura 7.3. Fasi del rilievo geomeccanico presso la Cava Lorano "I" nº 22.

7.3.2 Analisi petrografiche

Anche in questo caso l'analisi petrografica è stata eseguita secondo le stesse modalità descritte ai Capitoli 5 e 6 presso il "Laboratorio di Meccanica delle rocce e dei Materiali naturali da costruzione" del Centro di Geotecnologie dell'Università degli Studi di Siena.

7.3.3 Classificazione dell'ammasso roccioso

Per rappresentare le caratteristiche geometriche dei piani di fratturazione misurati, anche questa volta, è stata eseguita un'analisi statistica della distribuzione dei poli delle discontinuità utilizzando la proiezione stereografica equiareale di Schmidt (emisfero inferiore) mediante il *software* Dips 7.0. L'elaborazione dei dati raccolti per ogni singolo sistema di discontinuità ha consentito di calcolare l'RMR_b caratteristico qualificante l'ammasso roccioso.

7.3.4 Analisi di stabilità di versante

Analogamente ai precedenti casi di studio, è stata effettuata un'analisi delle condizioni di stabilità di tipo sia cinematico che dinamico scegliendo le giaciture medie dei tre lati del contrafforte come versanti tipo.

7.3.5 Rilievo UAV

7.3.5.1 Acquisizione dei dati

Il rilievo fotogrammetrico della Cava Lorano "I" n° 22 è stato realizzato utilizzando il drone multirotore AibotixTM X6 V1 (Figura 7.4) equipaggiato con la fotocamera tipo Nikon Coolpix A (18,5 mm).

Il volo è stato fatto manualmente acquisendo circa 550 fotografie digitali ad distanza media dal fronte di 51,4 m dalla quale se ne ricava un GSD di 1,43 cm/pix.

In questo caso non è stato necessario eseguire rilievi topografici in quanto sono stati utilizzati GCP e CP tratti da precedenti lavori effettuati dal CGT presso la cava analizzata.



Figura 7.4. Rilievo fotogrammetrico UAV della Cava Lorano "I" n° 22: drone AibotixTM X6 V1 durante l'attività di rilievo di parte dell'area oggetto di studio (immagine in alto, da Lanciano & Salvini, 2020); vista dall'alto con indicate le posizioni della fotocamera (punti in nero) e il numero di immagini sovrapposte tramite legenda colorata (immagine in basso).

7.3.5.2 Elaborazione dei dati

La fase di *processing* dei dati fotogrammetrici è stata eseguita anche in questo caso utilizzando la piattaforma software AgisoftTM Metashape Professional. Le figure 7.5-7.7 mostrano le principali fasi delle elaborazioni effettuate.

Capitolo 7 - Caso studio n. 3: monitoraggio dello strain e della temperatura in una cava a cielo aperto e confronto con contemporanei dati di monitoraggio topografico e geotecnico

Untitled — Agisoft Metashape Professional	of the local division of the local divisione	Untitled — Agisoft Metashape Profes	ssonal and a second
<u>File Edit View W</u> orkflow <u>M</u> odel Phr	oto <u>O</u> rtho <u>T</u> ools <u>H</u> elp	Eile Edit Yiew Workflow	Model Photo Othe Icels Help
	·	Workspace	
		22 맘 맘 맘 & ● ★ 안 Workspace (Lichunks, 0 cameras)	🕞 🖉 🖉 « Lorano » LORANO FIBRA » Lorano_20180730_2 » Foto 🔹 49 Cerca Foto
Workspace	다 × Model Ortho	Chunk 1 (0 cameras)	Organizza 🖛 Nuova cartella 🔊 🐑 🛄
Werkenace (Lichunkr, (Licamerar)	Orthographic		🖈 Prefenti
Chunk 1 (0 cameras)			Racolte Documenti
			Immagini 1003 1005 1007 1009 1011 ∂ Musica
			Nuova raccolta
			🗞 Gruppo home
			101.5 101.7 101.9 1021
			Bis (D) (C) O Units CD (K) My
			b) HP like 1023 1025 1027 1029 1031
a)			
	Label	Size Aligned	Quality
	1015.JPG 4	928x3264 🗸	0.930404
	1011.JPG 4	928x3264 🗸	0.91738
	1019.JPG 4	928x3264 🗸	0.915107
	1017.JPG 4	928x3264 🗸	0.911934
	1009.JPG 4	928x3264 🗸	0.910914
	1013.JPG 4	928x3264 🗸	0.907772 C)
		028x3264	0.906401
	1025.JPG 4	52073204	0.000401
	1025.JPG 4	928x3264 🗸	0.905623
	1025JPG 4 1021JPG 4 1023JPG 4	928x3264	0.905623
	1025JPG 4 1021JPG 4 1023JPG 4 1007JPG 4	928x3264	0.905623 0.902991 0.997883
	1025JPG 4 1021JPG 4 1023JPG 4 1023JPG 4 1007JPG 4 1003JPG 4	928x3264 928x32	0.905623 0.902991 0.897883 0.892076

Figura 7.5. Elaborazione della Cava Lorano "I" n°22 in ambiente AgisoftTM Metashape. a) Creazione di un nuovo progetto. b) Caricamento delle immagini. c) Valutazione della qualità delle fotografie.



Figura 7.6. Elaborazione della Cava Lorano "T" nº 22 in ambiente AgisoftTM Metashape: fase dell'allineamento e produzione della *sparse cloud*.

Capitolo 7 - Caso studio n. 3: monitoraggio dello strain e della temperatura in una cava a cielo aperto e confronto con contemporanei dati di monitoraggio topografico e geotecnico



Figura 7.7. Elaborazione della Cava Lorano "T" n° 22 in ambiente AgisoftTM Metashape: fase dell'inserimento dei GCP e CP.

7.3.6 Sistema di monitoraggio topografico e geotecnico

7.3.6.1 Stazione Totale Robotizzata (RTS)

Il sistema di monitoraggio topografico installato presso il sito di Lorano è costituito da una RTS modello LeicaTM TCA2003 (figure 7.7 e 7.8) e da 24 *target* (prismi o mire passive - figure 7.8 e 7.9). La RTS, installata al di sopra di un blocco di marmo stabile e collocata all'interno di un box protettivo, a partire dall'01/12/2012 esegue automaticamente misure sulle mire h24. Esse sono state posizionate mediante tasselli d'acciaio sia sul pilastro (punti di misura) che al di fuori di esso (punti di riferimento) (Figura 7.9), in modo tale da poter discriminare i movimenti relativi, ovvero dovuti a fratturazione locale, da quelli assoluti, ossia dell'intero pilastro, nonché per poter avere punti di controllo in aree esterne giudicate stabili e fondamentali in fase di calibrazione del sistema di monitoraggio.

Il posizionamento dei punti di misura è stato effettuato sulla base dei risultati del rilievo geomeccanico. Per i punti di riferimento, invece, si è provveduto all'individuazione di fronti stabili, situati in aree affidabili che non mostrassero evidenti indizi di instabilità e avessero alle spalle caratteristiche strutturali e geomorfologiche tali da non comprometterne l'attendibilità.

I cicli di misura si ripetono giornalmente ogni 6 ore (0.00; 06.00; 12.00; 18.00); al fine di avere un controllo qualitativo delle deviazioni standard, su ogni punto si effettuano molteplici misure in doppia faccia.

La trasmissione dei dati acquisiti avviene in *real-time* tramite una linea telefonica ADSL che collega la RTS e il CGT, presso cui è posto il PC preposto alle fasi di controllo remoto del sistema, *data processing* e archiviazione dei dati. L'applicazione di *software* commerciali, come "GeoMos Monitor" di LeicaTM, "Analysis" e "System Anywhere" di GeodesiaTM, consente di controllare la RTS, elaborare i dati e produrre istantaneamente grafici della relazione tempo-spostamento.


Figura 7.8. Principali caratteristiche della RTS modello LeicaTM TCA2003 (<u>https://leica-geosystems.com/</u>).



Figura 7.9. RTS modello LeicaTM TCA2003 installata nell'apposito box protettivo presso la Cava Lorano "I" n° 22 (a sinistra) e dettaglio di una mira posizionata in parete (a destra) (da Lanciano & Salvini, 2020).



Figura 7.10. Cava Lorano "T" n° 22. a) Posizione delle mire di riferimento (R1, R2, Rn..) e del cavo sensore in fibra ottica (linea blu); immagine di sfondo da Google EarthTM. b) Posizione delle mire di misura in parete (P1, P2, Pn..) e del cavo sensore in fibra ottica (linea rossa) su modello 3D da rilievo UAV.

7.3.6.2 Sistema di monitoraggio geotecnico

Nel 2012 la "Coop. Cavatori Lorano" ha installato presso il sito in analisi un sistema di monitoraggio geotecnico finalizzato allo studio del comportamento della Tecchia di Pradetto prima, durante e dopo lo sviluppo dei vari piani di coltivazione. Nello specifico, la strumentazione, che ha la duplice funzione di controllare la risposta del versante durante le attività di estrazione e testare la validità e l'accuratezza delle misure effettuate dalla RTS (Profeti, 2018), è stata implementata dalla U.O. Ingegneria Mineraria ASL n. 1 di Massa-Carrara.

Il sistema di monitoraggio geotecnico, attivo dal 27 Luglio 2012, consiste di 12 fessurimetri monoassiali GEOKON (FSn), 1 fessurimetro tridimensionale SISGEO (FS3D), 2 clinometri biassiali da parete SISGEO (CLn) e 4 estensimetri da foro a 3 basi GEOKON (ESn). Tale strumentazione fornisce con elevata frequenza temporale andamenti della deformazione dei fronti fortemente connessi alle variazioni stagionali e ai dati meteoclimatici (precipitazione e temperatura).

L'attività di monitoraggio viene rilevata in modalità manuale a cadenza settimanale mediante l'utilizzo di una centralina palmare SISGEO CDR400. A Dicembre 2018 risultano attivi tutti i sensori tranne FS3DX, FS5, FS10, CL1, CL2 (Profeti, 2018). Al fine di definire le principali caratteristiche e l'ubicazione del sistema di monitoraggio, di seguito si riportano:

- la Tabella 7.1 riassume i sensori geotecnici installati;
- la Figura 7.11 mostra l'ubicazione planimetrica del sistema di monitoraggio geotecnico sulla base del rilievo geo-strutturale effettuato in occasione di uno dei primi studi sulla stabilità dei fronti effettuato in Ottobre 2010;
- la Figura 7.12 mostra l'ubicazione dei DOFS e dei sensori geotecnici visti da Ovest e Sud-Est.

Nº 4 Estensimetri da foro	Nº 12 Fessurimetri	Nº 1 Fessurimetro	Nº 2 Clinometri
a 3 basi GEOKON	(25-50 mm)	(50 mm)	SISGEO
(25-50 mm)			
ES1 (50 mm)	FS1 (25 mm)	FS3DX (NON	CL1 A-B
(B1 4 m, B2 12 m,	FS2 (25 mm)	ATTIVO)	CL2 A-B
B3 27 m)	FS3 (25 mm)	FS3DY	(NON ATTIVI)
	FS4 (25 mm)	FS3DZ	
ES2 (25 mm)	FS5 (25 mm) (NON		
(B1 9 m, B2 15 m,	ATTIVO)		
B3 27 m)	FS6 (25 mm)		
	FS7 (50 mm)		
ES3 (25 mm)	FS8 (50 mm)		
(B1 6 m, B2 21 m,	FS9 (50 mm)		
B3 30 m)	FS10 (50 mm) (NON		
,	ATTIVO)		
ES4 (25 mm)	FS11 (50 mm)		
(B1 9 m, B2 21 m,	FS12 (50 mm)		
B3 30 m)			

 Tabella 7.1. Cava Lorano "I" nº 22. Denominazione e descrizione degli strumenti geotecnici installati sul contrafforte oggetto di monitoraggio.



Figura 7.11. Cava Lorano "I" nº 22: ubicazione planimetrica della struttura oggetto di monitoraggio geotecnico.



Figura 7.12. "Cava Lorano "I" n° 22". Sensori geotecnici (in blu) e DOFS (in rosso) sui lati Ovest (a) e Sud-Est (b) del contrafforte (Lanciano & Salvini, 2020).

7.3.7 Rilievi DOFS

7.3.7.1 Progettazione e installazione del sistema di monitoraggio mediante DOFS

Lo schema di disposizione della fibra ottica è stato progettato sulla base della posizione della strumentazione geotecnica e topografica già presente in parete, cercando di massimizzare il numero di discontinuità intercettate (Figura 7.12).

In particolare, sul contrafforte oggetto di analisi, sono stati posizionati due cavi indipendenti tra loro, ovvero: 500 m lineari di DOFS per la misura dello *strain* (rinforzato con fili di acciaio inossidabile 316 e incollato alla struttura) e altrettanti 500 m lineari per la discriminazione della temperatura (cavo parallelo al primo non rigidamente vincolato alle pareti). Il posizionamento dei sensori in fibra ottica sulla parete è stato effettuato grazie al contributo del personale tecnico della cooperativa di cavatori assistito da "tecchiaioli" specializzati. Optosensing s.r.l., inoltre, ha eseguito l'installazione della centralina elettronica e della sensoristica necessaria per l'acquisizione dei dati.



Figura 7.13. Cava Lorano "T" N° 22. a) Tecchiaioli in fase di posizionamento della fibra. b) Particolare del passaggio dei sensori in una zona caratterizzata da tagli artificiali al monte e fratturazione (Lanciano & Salvini, 2020).

7.4 Risultati

7.4.1 Caratterizzazione geologico-strutturale

Prodotto del rilievo geologico-strutturale è la "Carta geologico-strutturale con sezione interpretativa" (Figura 7.14) da cui evince che anche la cava oggetto di analisi, ovviamente, ricade all'interno della formazione dei "Marmi".



Figura 7.14. Cava Lorano "I" nº 22. "Carta geologico-strutturale con sezione interpretativa".

7.4.2 Caratterizzazione petrografica

Dal rilievo geologico deriva anche la realizzazione della "Carta delle varietà merceologiche" (Figura 7.15), dalla quale è possibile osservare come il contrafforte oggetto di analisi (evidenziato dal riquadro giallo) sia costituito da "Marmo Ordinario".



Figura 7.15. Cava Lorano "I" nº 22. "Carta delle varietà merceologiche".

Inoltre, mirate analisi di laboratorio eseguite presso il Laboratorio di Meccanica delle Rocce del CGT hanno consentito di determinare le principali caratteristiche di tale tipologia di marmo.

<u>Marmo Ordinario (Tabella 7.2 e Figura 7.16)</u>. Descrizione macroscopica: litotipo compatto bianco perlaceo tendente al grigio chiaro a grana medio-fine, con abbondanti venature ad andamento subparallelo, sia rettilinee di colore grigio scuro, sia ad andamento suturato di colore grigio bruno. Si notano locali plaghe millimetriche sub-arrotondate, mentre non si apprezzano porosità superficiali. Descrizione microscopica: litotipo metamorfico isotropo, anisotropo in coincidenza delle venature. È costituito da blasti subedrali ed in subordine eudrali, con bordi suturati/lineari o arrotondati, di dimensioni seriate (da 50 a 400 μm). Locali noduli millimetrici costituiti da individui a granulometria maggiore (500-900 μm) e venature costituite da microblasti calcitici (CA. 40 μm) e da blasti romboedrici dolomitici intorbiditi da opachi, lacinie muscovitiche, raro quarzo con inclusi pecilitici e diffusi microcristalli (<30 μm) piritici.

Norma	Caratteristica	U.M.	Valore medio	Dev. St.
EN 13755-08	Assorbimento d'acqua a pressione atmosferica	%	0,11	0
EN 1936-07	Massa volumica apparente	kg/m ³	2700	0
EN 1936-07	Porosità aperta	%	0,3	0,11
EN 12372-07	Resistenza a flessione con carico concentrato (allo stato naturale)	MPa	17,2	0,9
	Resistenza a flessione con carico concentrato (EN 12371-03 dopo 48 cicli di gelo)	MPa	14,4	0,4
EN 1926-07	Resistenza alla compressione	MPa	87	7
EN 14231-04	Resistenza allo scivolamento - Finitura levigata (secco)	USRV	49	2
	Resistenza allo scivolamento - Finitura levigata (bagnato)	USRV	35	2

Tabella 7.2. Proprietà fondamentali della varietà "Marmo Ordinario".



Figura 7.16. Marmo "Ordinario".

7.4.3 Caratterizzazione geomeccanica e rappresentazione delle discontinuità

I dati geomeccanici disponibili al CGT da precedenti lavori sono stati confrontati con quelli di Profeti e Cella (2010) e, al fine di caratterizzare le zone fisicamente inaccessibili, integrati con le misure derivanti da rilievi UAV e TLS riportate in numerose pubblicazioni (es. Francioni et al., 2015; Salvini et al., 2015; Salvini et al., 2017). Se la giacitura di oltre 300 giunti è stata calcolata dal TLS, 235 discontinuità aggiuntive sono state misurate manualmente o ricavate dalla fotointerpretazione di immagini da drone acquisite sia prima che dopo il posizionamento dei DOFS. Il *data processing* ha consentito di identificare 4 diversi set di discontinuità, denominati rispettivamente K1, K2, K3 e S1, (figure 10.5 e 10.6) i quali descrivono l'attuale assetto dell'ammasso roccioso costituente il contrafforte oggetto di analisi. Le proprietà dei vari sistemi sono riassunte in Tabella 10.2. Poiché il sistema S1 è stato riconosciuto esclusivamente dalla nuvola di punti 3D ottenuta da drone e TLS, i parametri osservabili direttamente associati a tale famiglia non sono indicati in 7.3. A differenza dei rilievi geomatici, le indagini geomeccaniche hanno consentito di individuare, in corrispondenza della base della parete Est del pilastro, un ulteriore sistema, denominato K4. Essendo tale insieme di fratture riconducibile a discontinuità subverticali con direzione di immersione di N25°, esso può essere considerato come un sistema di nuova generazione strettamente connesso alle attività di escavazione.



Figura 7.18. Cava Lorano "I" n° 22: sistemi di fratturazione. a) *stereonet* con indicazione delle giaciture medie delle famiglie individuate. b) Esempi dei sistemi di fratture K1, K2 e K3 e della foliazione S1 sul pilastro oggetto di studio (Salvini et al., 2015).

Sistema	K1	K2	К3	S 1
Inclinazione (<i>Dip</i>) (°)	87	50	89	51
Direzione d'immersione (<i>Dip Direction</i>) (°)	149	76	244	229
Spaziatura (cm)	1.11	0.96	1.29	-
Persistenza (m)	3-10	3-10	3-10	3-10
Apertura (mm)	1-5	1-5	1-5	-
Riempimento (mm, tipo)	<5, compatto	<5, compatto	<5, compatto	-
JRC (Joint Roughness Coefficient)	6	4	10	-
Alterazione	Non alterata	Non alterata	Non alterata	-
Umidità	Asciutta	Asciutta	Asciutta	Asciutta

 Tabella 7.3. Cava Lorano "I" n° 22: valori di giacitura e caratteristiche delle diverse famiglie di discontinuità individuate.

Nella carta del rilievo geomeccanico (Figura 7.17) è possibile visualizzare gli stendimenti realizzati e i sistemi di fratture individuati.



Figura 7.17. Carta del rilievo geomeccanico della Cava Lorano "I" nº 22.

7.4.4 Classificazione dell'ammasso roccioso

La Tabella 7.4 mostra le principali caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso derivate dai rilievi presso la Cava Lorano "I" n° 22 (in questo caso la famiglia più sfavorevole è risultata K1).

Parametro	Valore	Indice
Resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta (MPa)	86	A1 = 7
RQD (%)	80	A2 = 16
Spaziatura (m)	1,11	A3 = 15
Condizione delle discontinuità	Persistenza [3-10] m Apertura media [1-5] mm Leggermente rugose Non alterate Riempimento compatto	A4 = 16
Condizioni idrauliche	Asciutte	A5 = 15

Tabella 7.4. Cava Lorano "I" n°22: caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso.

L'ammasso roccioso ricade nella classe II (qualità buona) con un $RMR_b = 69$. I parametri di resistenza al taglio dell'ammasso roccioso derivati empiricamente sono riportati in Tabella 7.5.

RMR_b	69
Classe	II
Qualità dell'ammasso roccioso	Buona
Coesione (MPa)	345
Angolo di attrito (°)	39
Modulo di deformazione (GPa)	38

Tabella 7.5. Cava Lorano "I" n°22: qualità dell'ammasso roccioso.

Analogamente agli altri 2 casi di studio presentati, in via cautelativa, considerando l'assenza di specifiche prove di laboratorio e le indicazioni fornite da precedenti report

tecnici realizzati sul medesimo sito, si è scelto un valore di angolo di attrito pari a 35° per le successive analisi di stabilità.

7.4.5 Analisi di stabilità cinematica

Analogamente a quanto fatto per le altre due cave, sono state scelte 3 classi di direzione del versante rappresentative delle tre diverse pareti del contrafforte in esame (Figura 7.19 e Tabella 7.6).



m 5 10

Figura 7.19. Individuazione di 3 settori V1, V2 e V3 del contrafforte dalle caratteristiche geomeccaniche omogenee (visualizzazione in ambiente AgisoftTM Metashape Professional).

Versante	Inclinazione (°)	Direzione di immersione (°)
V1	80	170
V2	90	80
V3	90	250

 Tabella 7.6. Cava Lorano "I" n° 22. suddivisione in classi del fronte di cava con indicazione dei valori di inclinazione e direzione di immersione.

L'analisi di stabilità cinematica è stata eseguita in ambiente Dips (RocscienceTM) per ogni classe di versante e per ciascuna tipologia di cedimento; inoltre, è stato determinato il valore dell'angolo limite. I risultati ottenuti sono mostrati nelle Tabelle 7.7 (scivolamento planare e su cunei) e 7.8 (ribaltamento diretto e flessurale).

	Scive	olamento pla	Scivolamento su cunei		
Zona	Immersione versante (°)	Angolo limite (°)	Sistemi critici	Angolo limite (°)	Combinazioni critiche
V1	170	67	S1	71	K1-S1
V2	80	50	K1/K2	50	K1-K2/S1-K2/S1- K3/K2-K3
V3	250	52	S1/K3	51	K1-K3/S1-K1

 Tabella 7.7. Cava Lorano "I" n° 22: risultati dell'analisi cinematica di stabilità del contrafforte di Lorano per le ipotesi di scivolamento planare e di cunei.

	Rib	altamento di	Ribaltamento flessurale		
Zona	Immersione versante (°)	Angolo limite (°)	Combinazioni critiche	Angolo limite (°)	Sistemi critici
V1	170	-	-	-	-
V2	80	49	K1-S1 (ribaltamento obliquo K1-K3) (piano basale K2)	36	S1/K3
V3	250	50	K1-K2 (piano basale S1/K3)	75	K2

Tabella 7.8. Cava Lorano "I" n° 22: risultati dell'analisi cinematica di stabilità del contrafforte di Lorano per le ipotesi di ribaltamento diretto e flessurale (limiti laterali di 30°).

7.4.6 Analisi di stabilità dinamica

7.4.6.1 Calcolo dei coefficienti sismici orizzontale e verticale

In base alla classificazione sismica della Regione Toscana, il Comune di Carrara (MC) ricade in zona sismica 3 (Figura 7.20). Come si evince da Figura 7.21, gli eventi sismici ricorrenti nell'area del comune analizzato sono caratterizzati da intensità massima corrispondente a 8 gradi MCS.

Dalla tabella sulla suddivisione delle sottozone sismiche in relazione all'accelerazione di picco su terreno rigido si evince che, per il territorio del Comune di Carrara (zona sismica 3), ci si aspetta un'accelerazione compresa tra 0,05 g e 0,15 g. Per il calcolo di a_{max} , si considera:

- $a_g = 0,15$ g (per zona sismica 3);
- $S_s = 1$ (per categoria di sottosuolo A vedi tabella);
- $S_T = 1,4$ (per categoria topografica T4 vedi tabella).

Infine, si ottengono i seguenti valori dei coefficienti sismici orizzontale k_h e verticale k_V .

- $a_{max} = 0,15 \text{ g} \cdot 1 \cdot 1,4 = 0,21 \text{ g}.$
- $k_h = \beta_s \cdot \frac{a_{max}}{g} = 0,38 \cdot \frac{0,21 g}{1 g} = 0,0798.$
- $k_V = 0,133 \cdot 0,5 = 0,0399.$



Figura 7.20. Mappa della classificazione sismica della Regione Toscana (comune di Carrara evidenziato mediante poligono dal contorno nero). Immagine adattata da <u>http://www.regione.toscana.it/-</u> /classificazione-sismica-della-toscana.



Figura 7.21. Massime intensità macrosismiche registrate dall'anno mille in grado della scala Mercalli (comune di Carrara evidenziato mediante poligono di colore bianco). Immagine adattata da <u>https://www.astrogeo.va.it/sismi/bodyto99.htm</u>.

7.4.6.2 Verifica della stabilità

L'analisi di stabilità dinamica è stata eseguita in ambiente RocscienceTM adottando il metodo di analisi di tipo probabilistico, il quale consente di calcolare le probabilità di cedimento. Sono state effettuate 18 simulazioni, prendendo in considerazione, per ognuno dei tre versanti del contrafforte, i cinematismi più critici (scivolamento planare, scivolamento di cunei e ribaltamento diretto), sia in condizioni statiche che dinamiche. La variabilità delle dimensioni dei blocchi che possono formarsi è stata considerata secondo una distribuzione statistica (uniforme o uniforme-troncata), in maniera tale da ottenere blocchi caratterizzati da volumi variabili comparabili a quelli osservati in situ. Le Tabelle 7.9, 7.10 e 7.11 mostrano i principali parametri utilizzati e i risultati delle analisi suddivisi per tipologia di cedimento, riportano anche i valori di DS utilizzati. Il peso di volume di riferimento per la litologia marmorea dell'area è ancora una volta stato considerato pari a $2,7 \text{ t/m}^3$.

Zona	V1	V1	V2	V2	V3	V3
Tipologia	Statico	Dinamico	Statico	Dinamico	Statico	Dinamico
Volume medio blocco (m ³)	8,344	8,344	1,197	1,197	0,984	0,984
Volume massimo blocco (m ³)	30,831	30,831	7,964	7,964	7,044	7,044
Inclinazione versante (°)	80	80	90	90	90	90
Altezza versante (m)	5 (DS 1 m)	5 (DS 1 m)	5 (DS 1 m)			
Inclinazione piano di scivolamento (°)	51 (DS 5°)	51 (DS 5°)	87 (DS 5°)	87 (DS 5°)	89 (DS 5°)	89 (DS 5°)
Angolo di attrito residuale (°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)
JRC (Joint Roughness Coefficient)	6 (DS 1)	6 (DS 1)	6 (DS 1)	6 (DS 1)	10 (DS 1)	10 (DS 1)
JCS (Joint Compressive Strength) (MPa)	86 (DS 10 MPa)					
FS _{med}	1,135	0,976	0,174	0,063	0,214	0,062
\mathbf{FS}_{\min}	0,483	0,401	0,0001	0,000	0,0001	0,000
FS _{max}	2,669	2,317	0,782	0,589	0,806	0,579
Prob. cedimento FS < 1,3	75,19%	89,8%	100%	100%	100%	100%
Prob. cedimento FS < 1	34,37%	58,55%	100%	100%	100%	100%

Tabella 7.9. Cava Lorano "I" n° 22: risultati delle analisi di stabilità probabilistica per scivolamento planare.

Zona	V1	V1	V2	V2	V3	V3
Tipologia	Statico	Dinamico	Statico	Dinamico	Statico	Dinamico
Volume medio	2 250	2 250	920 (2	920 (2	10,33	10,33
blocco (m ³)	5,259	3,239	839,63	839,63		
Volume max blocco (m ³)	20,531	20,531	268253	268253 268253		7097,778
Orientazione versante (°)	170 (DS 2°)	170 (DS 2°)	80 (DS 2°)	80 (DS 2°)	250 (DS 2°)	250 (DS 2°)
Inclinazione versante (°)	80	80	90	90	90	90
Altezza versante (m)	5	5	5	5	5	5
Direzione giunto 1 (°)	149 (DS 5°)	149 (DS 5°)	149 (DS 5°)	149 (DS 5°)	149 (DS 5°)	149 (DS 5°)
Inclinazione giunto 1 (°)	87 (DS 5°)	87 (DS 5°)	87 (DS 5°)	87 (DS 5°)	87 (DS 5°)	87 (DS 5°)
Angolo di attrito residuo giunto 1 (°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)
JRC (Joint					6 (DS 1)	6 (DS 1)
Roughness					~ /	
Coefficient)	6 (DS 1)	6 (DS 1)	6 (DS 1)	6 (DS 1)		
giunto 1						
JCS (<i>Joint</i> <i>Compressive</i> <i>Strength</i>) giunto 1 (MPa)	86 (10 MPa)	86 (10 MPa)	86 (10 MPa)	86 (10 MPa)	86 (10 MPa)	86 (10 MPa)
Direzione giunto 2 (°)	229 (DS 5°)	229 (DS 5°)	76 (DS 5°)	76 (DS 5°)	244 (DS 5°)	244 (DS 5°)
Inclinazione giunto 2 (°)	51 (DS 5°)	51 (DS 5°)	50 (DS 5°)	50 (DS 5°)	89 (DS 5°)	89 (DS 5°)
Angolo di attrito residuo giunto 2 (°)	29 (DS 5°)	29 (DS 5°)	29 (DS 5°)	29 (DS 5°)	29 (DS 5°)	29 (DS 5°)
JRC giunto 2	6 (DS 1)	6 (DS 1)	4 (DS 0,5)	4 (DS 0,5)	10 (DS 2)	10 (DS 2)
JCS (Joint Compressive Strength) giunto 2 (MPa)	95 (10 MPa)	95 (10 MPa)	95 (10 MPa)	95 (10 MPa)	95 (10 MPa)	95 (10 MPa)
FS _{med}	1,279	1,102	1,012	0,87	0,282	0,152
FS _{min}	0,411	0,344	0,427	0,352	0,002	0
FS _{max}	3,364	2,895	2,48	2,123	100	100
Prob. cedimento FS < 1,3 (PF)	58,5%	73,72%	85,62%	94,16%	91,56%	91,58%
Prob. cedimento FS < 1,3 (PS)	59,26%	74,68%	85,62%	94,16%	99,96%	99,98%
Prob. cedimento FS < 1 (PF)	27,08%	44,72%	55,63%	75,04%	91,45%	91,56%
Prob. cedimento FS < 1 (PS)	27,43%	4,3%	55,63%	75,04%	99,84%	99,56%

Tabella 7.10. Cava Lorano "I" n° 22: risultati delle analisi di stabilità probabilistica per scivolamento di cunei.

Zona	V1	V1	V2	V2	V3	V3
Tipologia	Statico	Dinamico	Statico	Dinamico	Statico	Dinamico
Inclinazione versante (°)	-	-	89	89	89	89
Altezza versante (m)	-	-	5 (DS 1 m)	5 (DS 1 m)	5 (DS 1 m)	5 (DS 1 m)
Spaziatura (m)	-	-	1 (DS 0,2 m)	1 (DS 0,2 m)	0.96 (DS 0,2 m)	0.96 (DS 0,2 m)
Inclinazione giunto ribaltante (°)	-	-	51 (DS 5°)	51 (DS 5°)	50 (DS 5°)	50 (DS 5°)
Inclinazione giunto basale (°)	-	-	50 (DS 5°)	50 (DS 5°)	51 (DS 5°)	51 (DS 5°)
Angolo di attrito residuo (°)	-	-	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)	30 (DS 5°)
JRC (Joint Roughness Coefficient)	-	-	6 (DS 1)	6 (DS 1)	4 (DS 1)	4 (DS 1)
JCS (<i>Joint</i> <i>Compressive</i> <i>Strength</i>) (MPa)	-	-	86 (DS 10 MPa)	86 (DS 10 MPa)	86 (DS 10 MPa)	86 (DS 10 MPa)
FS _{med}	-	-	1,018	0,964	1,017	0,976
FS _{min}	-	-	0,521	0,443	0,604	0,592
FS _{max}	-	-	2,421	2,064	3,195	2,743
Prob. cedimento FS < 1,3	-	-	89,94%	92,26%	89,59%	92%
Prob. cedimento FS < 1	-	-	49,07%	62,08%	50,18%	60,02%

Tabella	7.11.	Cava	Lorano	•"I"	n° 22:	risultati	delle an	alisi c	di stabilità	probabilistica	per ribaltamento
							diretto.				

7.4.7 Prodotti fotogrammetrici

L'elaborazione fotogrammetrica è stata contraddistinta dal *processing* di 548 fotografie digitali e dal posizionamento di 49 GCP e 8 CP. Le tabelle 7.12 e 7.13 mostrano l'RMSE ottenuto per entrambe le tipologie di punti.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TS24	0.965584	0.698265	3.42374	3.62518	0.590 (84)
TS25	3.32523	-4.91969	3.30854	6.79757	0.535 (86)
TS29	0.0127253	-1.68856	4.62888	4.92727	0.385 (70)
TS30	2.54244	0.238422	2.82802	3.81032	0.276 (123)
TS32	-2.39628	0.319037	5.53266	6.03774	0.422 (81)
TS34	6.21542	2.49899	-2.8862	7.29429	0.213 (75)
TS31	0.528737	-2.22673	4.61913	5.15502	0.481 (59)
TS36	-0.490331	4.94097	5.32921	7.28382	0.435 (39)
TS37	-0.587516	1.20186	0.422008	1.40276	0.215 (27)
TS38	-2.39226	1.55972	5.69919	6.37467	0.802 (29)
TS39	-0.398481	2.77473	4.60633	5.39223	0.960 (31)
TS11	-2.12451	-3.52208	3.52364	5.41614	0.171 (25)
TS07	-5.12324	-2.78964	-0.166699	5.83588	0.345 (105)
TS33	-1.33361	2.03947	-1.00118	2.63445	0.466 (78)
TS27	-0.145708	-0.253919	1.94305	1.96498	0.550 (45)
TS10	-2.27631	-5.5226	0.818164	6.0291	0.456 (40)
TS06	-1.26953	-4.98146	-6.01698	7.91396	0.327 (158)
TS04	-2.70933	-5.13793	2.72045	6.41402	0.310 (164)
TS03	-1.94103	-10.2664	1.21607	10.5188	0.655 (131)
TS12	-7.65034	-8.19445	3.3336	11.6957	0.395 (7)
TS14	-6.32421	-2.92992	1.18944	7.07071	0.311 (12)
TS75	-0.303275	2.32991	0.0515448	2.35013	0.528 (49)
TS77	-0.224314	8.33774	0.254563	8.34464	0.283 (21)
TS78	-0.857254	6.17983	-1.44197	6.40347	0.253 (21)
TS79	-16.6855	3.63163	-9.94025	19.7586	0.634 (7)
TS64	-2.16752	0.71261	-2.37665	3.2946	0.272 (35)
TS63	0.256106	3.55479	-0.794199	3.65142	0.125 (76)
TS68	0.9901	1.7149	-0.367113	2.01394	0.198 (74)
TS69	0.991525	2.81464	-0.743228	3.07533	0.329 (55)
TS67	-0.281489	-0.0820677	2.72967	2.74537	0.634 (50)
TS61	0.10101	2.65136	-1.06348	2.85848	0.205 (73)
TS60	0.268313	0.565741	-1.76504	1.87281	0.268 (87)
TS58	-0.0850884	-0.0731199	4.19357	4.19507	0.362 (83)
TS66	2.42396	1.40076	-2.4266	3.70487	0.201 (81)
TS62	1.94915	1.45694	-1.46456	2.84021	0.235 (82)
TS56	0.535505	-2.12253	-1.3581	2.57611	0.261 (93)
TS73	-1.93995	-3.29183	-2.96008	4.83338	0.397 (81)
TS71	9.22723	-6.15204	0.879674	11.1249	0.434 (81)
TS72	3.76241	-1.24069	-1.17335	4.1318	0.184 (77)
TS42	0.640198	2.88049	1.98332	3.55537	0.732 (24)
TS41	3.28867	1.90224	1.2676	4.00508	0.721 (27)
TS65	3.06973	0.636712	0.560552	3.18479	0.189 (19)
P1	1.5411	2.32377	-2.44146	3.70615	0.204 (13)
P2	0.657369	4.37556	-2.08955	4.89325	0.145 (3)
P3	9.4148	-3.44411	7.80429	12.7046	0.217 (6)
P4	5.55529	14.3393	-12.6859	19.9352	0.165 (83)
P5	5.3855	-1.69003	-18.6217	19.4584	0.149 (67)
P6	-7.42936	9.64946	-9.81022	15.638	0.165 (51)
P8	3.49984	-17.2131	8.72645	19.6136	0.229 (25)
Total	4.18248	5.00054	4.91837	8.16632	0.396

Tabella 7.12. Valori RMSE ottenuti per i 49 GCP lungo gli assi X, Y, Z, sul piano XY, totale e, infine, in termini di pixel. Fonte: report dell'elaborazione fotogrammetrica in ambiente AgisoftTM Metashape.

Capitolo 7 - Caso studio n. 3: monitoraggio dello strain e della temperatura in una cava a cielo aperto e confronto con contemporanei dati di monitoraggio topografico e geotecnico

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TS26	2.53194	-3.57544	2.96578	5.29059	0.340 (81)
TS28	8.77219	6.17468	13.8577	17.5246	0.548 (83)
TS35	-2.5439	-0.916576	7.42851	7.90533	0.399 (40)
TS09	-13.3774	9.4451	8.30566	18.3616	0.415 (40)
TS13	-2.09936	-8.52258	-4.51799	9.87187	0.405 (13)
TS74	1.42307	3.33157	0.60935	3.67367	0.464 (50)
TS59	-1.45831	-2.06155	-3.55567	4.36113	0.141 (81)
P7	4.70051	1.83331	6.70595	8.39199	0.194 (7)
Total	6.11804	5.38871	7.101	10.8117	0.397

Tabella 7.13. Valori RMSE ottenuti per gli 8 CP lungo gli assi X, Y, Z, sul piano XY, totale e, infine, in termini di pixel. Fonte: report dell'elaborazione fotogrammetrica in ambiente AgisoftTM Metashape.

Dall'analisi degli RMSE ottenuti si deduce un errore di circa 8 cm sui GCP con un'accuratezza del modello fotogrammetrico di circa 10 cm (RMSE dei CP). Considerate le finalità del rilievo e del tipo di studio, si tratta di valori accettabili. I prodotti fotogrammetrici ricavati sono rappresentati da: nuvola densa di punti (Figura 7.22), DEM (figure 7.23 e 7.24), ortofoto (Figura 7.25) e, infine, modello 3D del tipo *mesh* (Figura 7.26).



Figura 7.22. Cava Lorano "I" n°22a: *Dense Point Cloud* (AgisoftTM Metashape) costituita da 23.467.007 punti.

Il DEM è caratterizzato da risoluzione pari a 5,7 cm/pix e densità di punti originale pari a 306 punti/m². Le figure n. 7.23 e 7.24 mostrano, rispettivamente, il DEM visualizzato in pianta 2D (da AgisoftTM Metashape) e la rappresentazione 3D della distribuzione dell'elevazione mediante modello TIN creato, in ambiente ESRITM ArcGIS Pro, a partire dalla nuvola densa di punti. Dalle immagini 7.23 e 7.24 si evince come, nell'area di interesse, le quote varino da circa 560 m a 800 m s.l.m.



Figura 7.23. Cava Lorano "I" n°22: visualizzazione in pianta 2D del DEM ricostruito mediante AgisoftTM Metashape Professional.



Figura 7.24. Rappresentazione 3D della distribuzione dell'elevazione della Cava Lorano "I" n°22 mediante modello TIN (Lanciano & Salvini, 2020).

L'ortofoto della Tecchia di Pradetto, mostrata in vista prospettica nella Figura 7.25, è stata prodotta con una risoluzione spaziale pari di 1,43 cm/pixel.



Figura 7.25. Visualizzazione prospettica dell'ortofoto della Tecchia di Pradetto della Cava Lorano "I" n°22 (AgisoftTM Metashape Professional).

Il modello tridimensionale in formato *mesh* texturizzata, illustrato in Figura 7.26, è costituito da 306.418 facce e 154.382 vertici. Disegnando una polilinea sul modello (traccia rossa in Figura 7.27), è stato possibile tracciare il percorso DOFS ed esportarlo in formato .shp in ambiente GIS dove, al fine di agevolare le analisi dei risultati DOFS, è stato discretizzato con passo 20 cm (Figura 7.28).



Figura 7.26 Modello 3D texturizzato della Cava Lorano "T" n°22a con evidenziato il percorso DOFS mediante polilinea di colore rosso (Lanciano & Salvini, 2020).



Figura 7.27. Modello 3D texturizzato importato in ArcGis Pro con sovrapposto il percorso DOFS (in giallo) in formato shapefile 3D puntuale con passo 20 cm. La tabella attributi a destra riporta il FID, codice identificatore di ciascun punto e le distanze progressive e cumulate. Mentre i punti in verde indicano i prismi del sistema di monitoraggio topografico, i simboli in rosso rappresentano i punti del sistema di monitoraggio geotecnico.

7.4.8 Risultati della RTS

Per rappresentare gli eventuali spostamenti dei prismi si è scelto di realizzare grafici della distanza inclinata, definita come la distanza in linea retta nello spazio tra due punti (nota anche come "distanza in linea d'aria"). Le immagini successive (Figure 7.28 – 7.33) illustrano, per alcune mire esemplificative, sia di riferimento che di misura (collocate in prossimità del cavo sensore in fibra ottica), l'andamento degli spostamenti in millimetri rilevati nel tempo in parallelo ai dati di precipitazione e temperatura media (tratti dal sito internet <u>http://www.meteoapuane.it/</u>, stazione di Carrara Fossola). Nei grafici sono riportate anche le rette rappresentanti i valori soglia di tolleranza strumentale (specifici e calcolati per i singoli punti di misura e riferimento). Tutti i grafici di spostamento della RTS realizzati sono riportati negli allegati.

Occorre specificare che, essendo continuamente esposta alle intemperie metereologiche, la RTS, pur lavorando dal 2012, ha subito periodici malfunzionamenti e fasi di inattività. Per tali ragioni, la disponibilità di dati RTS in sovrapposizione alle misure con fibra ottica è limitata all'intervallo temporale compreso tra il 30/07/2018 e il 28/11/2018 con due periodi di interruzione: dal 06/09/2018 al 22/09/2018 e dal 30/10/2018 al 22/11/2018.



Figura 7.28. Confronto tra gli spostamenti misurati dalla RTS in corrispondenza del punto di misura G02, sia puntuali che interpretati secondo una curva polinomiale di sesto grado, la precipitazione giornaliera, la temperatura media giornaliera e i valori soglia di tolleranza strumentale (grafico adattato da Lanciano & Salvini, 2020).



Figura 7.29. Confronto tra gli spostamenti misurati dalla RTS in corrispondenza del punto di misura G15, sia puntuali che interpretati secondo una curva polinomiale di sesto grado, la precipitazione media giornaliera, la temperatura media giornaliera e i valori soglia di tolleranza strumentale (grafico adattato da Lanciano & Salvini, 2020).

Capitolo 7 - Caso studio n. 3: monitoraggio dello strain e della temperatura in una cava a cielo aperto e confronto con contemporanei dati di monitoraggio topografico e geotecnico



Figura 7.30. Confronto tra gli spostamenti misurati dalla RTS in corrispondenza del punto di misura G17, sia puntuali che interpretati secondo una curva polinomiale di sesto grado, la precipitazione media giornaliera, la temperatura media giornaliera e i valori soglia di tolleranza strumentale (grafico adattato da Lanciano & Salvini, 2020).







Figura 7.32. Confronto tra gli spostamenti misurati dalla RTS in corrispondenza del punto di riferimento R01, sia puntuali che interpretati secondo una curva polinomiale di sesto grado, la precipitazione media giornaliera, la temperatura media giornaliera e i valori soglia di tolleranza strumentale (grafico adattato da Lanciano & Salvini, 2020).

Capitolo 7 - Caso studio n. 3: monitoraggio dello strain e della temperatura in una cava a cielo aperto e confronto con contemporanei dati di monitoraggio topografico e geotecnico



Figura 7.33. Confronto tra gli spostamenti misurati dalla RTS in corrispondenza del punto di riferimento R02, sia puntuali che interpretati secondo una curva polinomiale di sesto grado, la precipitazione media giornaliera, la temperatura media giornaliera e i valori soglia di tolleranza strumentale (grafico adattato da Lanciano & Salvini, 2020).

L'osservazione dei grafici precedenti (figure da 7.28 a 7.33) suggerisce una differenza sostanziale tra i grafici di spostamento dei punti di riferimento (figure 7.32 e 7.33) e quelli relativi ai punti di misura (7.28 - 7.31): si tratta dell'assenza, nel primo caso, di valori più grandi al limite o oltre i valori di soglia strumentale. Questi valori di picco, che mostrano un trend di avvicinamento della mira verso la stazione, si verificano in concomitanza con gli eventi di piovosità più forti. Tutti i punti di misura, installati in posizioni diverse tra loro, mostrano questa tendenza molto simile, suggerendo un comportamento quasi unanime dell'intera struttura in marmo. Anche se alcuni dei loro valori superano le soglie strumentali, si tratta di valori di entità limitata (<2 mm) che non rappresentano, né hanno rappresentato, situazioni particolarmente critiche. Si noti che i grafici mostrati partono dal 2012. Inoltre, esiste una tendenza sinusoidale generalizzata correlata alla risposta termica dello spostamento alla variazione di temperatura. In effetti, su una scala annuale, è possibile constatare che i valori di spostamento sono caratterizzati da una diminuzione all'inizio della stagione calda e da un aumento con l'arrivo della stagione fredda. Questo comportamento del marmo, noto come termoclastismo, è, molto probabilmente, correlato all'anisotropia della calcite, che tende ad espandersi e contrarsi in direzioni vincolate da assi cristallografici (Bonazza et al., 2009; Malaga-Starzec et al., 2002; Siegesmund et al., 2000; Salvini et al., 2015; Salvini e Lanciano, 2020). Il fenomeno è probabilmente incoraggiato da diversi elementi. Il primo si riferisce all'infiltrazione dell'acqua nelle discontinuità durante gli eventi di precipitazione, che può indurre una pressione al loro interno, con un conseguente aumento di volume ed espansione delle articolazioni, creando così uno stress generale che ha ripercussioni sull'intero contrafforte. Gli altri sono legati alla morfologia del sito e alla riduzione dello stress dovuta a cause sia estrattive che naturali (condizione di emersione della struttura geologica apuana).

7.4.9 Risultati del sistema di monitoraggio geotecnico

Le misure rilevate dalla quasi totalità degli strumenti geotecnici, dopo oltre 6 anni di misura (Luglio 2012 – Dicembre 2018) mostrano andamenti di tipo sinusoidale simmetrico che, come si può osservare dai grafici successivi (Figure 7.34 e 7.35), si replicano annualmente con una buona approssimazione.

I valori delle quantità osservate raggiungono i minimi locali durante la stagione estiva e i massimi locali in inverno. Questo comportamento suggerisce l'assenza di movimenti delle masse rocciose monitorati dai seguenti strumenti: FS1, FS2, FS3, FS4, FS5, FS6, FS7, FS8, FS9, FS10, FS11, FS12, FS3DY, FS3DZ, ES1B1, ES2B2, ES2B3, ES3B1, ES3B2, ES4B1 (Profeti, 2018). Le misure relative ai sensori ES1B2, ES1B3, ES3B3, ES4B2, ES4B3, invece, mostrano tendenze sinusoidali non simmetriche nel medio-lungo periodo.

Nell'anno 2018, l'estensione dei movimenti rilevati è pari a 1 mm per ES1B2, ES1B3, ES3B3 e 0,6 mm per ES4B2 ed ES4B3. Questi spostamenti possono essere correlati a condizioni meteorologiche diverse rispetto agli anni di misurazione precedenti (Profeti, 2018).

Le figure 7.34 e 7.35 mostrano, in qualità di esempi, le tendenze relative al fessurimetro FS4 e alla base 1 dell'estensimetro n. 3 (ES3B1 6 m). Sebbene gli spostamenti limitati confermino la stabilità generale dei siti monitorati, la tendenza sinusoidale generale può essere attribuita all'espansione termica in estate. I dati del fessurimetro indicano chiaramente che l'espansione termica tende a chiudere le fratture mentre i dati dell'estensimetro da circa 10 m di profondità mostrano che l'espansione in inverno, dovuta all'acqua e al ghiaccio all'interno delle fratture, è maggiore di quella in estate. Tuttavia, l'analisi comparata di tutti i dati acquisiti non mette in evidenza, allo stato attuale delle conoscenze, andamenti delle misure che possano far ipotizzare significativi spostamenti, nel breve termine, della struttura oggetto di monitoraggio (Profeti, 2018). Tutti i grafici di spostamento derivanti dal sistema di monitoraggio geotecnico realizzati sono riportati negli allegati.



Figure 7.34. Spostamenti lineari registrati dal sensore FS4 dal 2012 al 2018 (Lanciano & Salvini, 2020).



Figure 7.35. Spostamenti lineari registrati dal sensore ES3B1 6 m dal 2012 al 2018 (Lanciano & Salvini, 2020).

7.4.10 Risultati delle acquisizioni DOFS

Tutte le misure eseguite per questa cava sono di tipo BOTDA (risoluzione spaziale di 20 cm). La prima misura (lettura di zero) è stata eseguita in data 04/01/2018 (Figura 7.36).



Figura 7.36. Cava Lorano "T" N° 22. Profilo BFS di tipo BOTDA (lettura di zero) acquisito in data 04/01/2018 (Lanciano & Salvini, 2020).

I primi 500 m del profilo (Figura 7.36), corrispondenti al tratto di fibra-sensore disposto attorno al pilastro, presentano le tipiche oscillazioni derivanti dalle deformazioni associate all'incollaggio. Il profilo prosegue per altri 500 m circa (Figura 7.36), mantenendo, in questo secondo tratto, un andamento molto più stabile, tipico delle fibre utilizzate per la compensazione di temperatura. La Figura 7.37 rappresenta un grafico con i risultati di diverse misure effettuate successivamente alla lettura di zero. Per una migliore

visualizzazione, i diversi profili sono stati traslati verticalmente uno rispetto all'altro, ciascuno della quantità indicata nell'immagine.

Dal confronto tra queste misure e la lettura di zero si evince che la regione di fibra associata al monitoraggio delle deformazioni non è continua ma consta di due regioni, di lunghezza rispettivamente pari a 120 m e 400 m circa. I tratti di fibra corrispondenti alla regione intermedia sono, invece, quelli utili per la compensazione della temperatura. Si noti come, nella misura del 07/02/2018 (Figura 7.37), le regioni di fibra per la misura delle deformazioni e quelle per la misura della temperatura risultano invertite rispetto all'ordine in cui esse si presentano nelle successive acquisizioni. Tale circostanza è da attribuirsi ad una diversa sequenza di connessione tra i diversi tratti di fibra impiegati per le misure.



Febbraio 2018 – Agosto 2018.

Al fine di evidenziare potenziali variazioni del BFS, i profili sono stati rielaborati, in modo tale da congiungere i tratti impiegati per le misure di deformazione e riallinearli lungo l'asse delle ascisse. Inoltre, le misure di deformazione sono state depurate dagli effetti della temperatura, ottenendo i grafici illustrati in Figura 7.38.



Figura 7.38. Cava Lorano "I" n° 22. Profili di BFS (BOTDA) acquisiti nel periodo Gennaio 2018 – Febbraio 2019 depurati dell'effetto della temperatura (Lanciano & Salvini, 2020).

Dall'analisi della Figura 7.38 si evince che da Gennaio 2018 a Febbraio 2019 non si evidenziano variazioni significative dello shift di Brillouin. L'unico scostamento evidente riguarda la prima acquisizione, ossia quella del 04/01/2018 che, nel tratto di misura compreso tra circa 150 m a 250 m, esibisce valori leggermente inferiori rispetto a quelli ricavati dalle altre acquisizioni. Dal momento che, nel tratto in questione, tutte le altre misure sono consistenti tra di loro e che la RTS e i sensori geotecnici presenti in cava in quella zona non indicano spostamenti in quel periodo, è possibile ritenere che tale variazione sia da attribuire ad un assestamento dello stato deformativo della fibra successivo alla sua installazione. Ciononostante, ai fini del calcolo delle deformazioni, si è scelto di escludere la misura del 04/01/2018, assumendo come lettura di zero quella del 07/02/2018. A questo punto, per ciascuna posizione di misura, ovvero ogni 20 cm, sono state calcolate le deformazioni sottraendo il valore di BFS misurato in data 07/02/2018 a quello misurato in data successiva e moltiplicando la variazione di BFS così ottenuta per il coefficiente di trasduzione della fibra ottica, pari a 20 000 $\mu\epsilon/GHz$. I valori ricavati secondo tale modalità sono stati quindi sottoposti ad un filtro a media mobile su 51 punti in maniera tale da rimuovere il rumore (noise) sovrapposto ai dati di interesse. Il risultato finale è mostrato in Figura 7.39.



Figura 7.39. Cava Lorano "I" n° 22. Profili di *strain* ottenuti considerando come misura di zero quella del 07/02/2018 con evidenziate le soglie di allarme. Le linee rosse indicano il valore pari a 5 deviazioni standard scelto come soglia di allarme per le deformazioni (Lanciano & Salvini, 2020).

Come si nota dalla Figura 7.39, le deformazioni più significative, pur rimanendo sempre entro la soglia, appaiono durante i mesi estivi e il comportamento è reversibile. I valori di *strain* sono relativamente modesti rispetto alla deviazione standard di ciascun profilo, all'incirca pari a 200 µɛ. Come suggerito dalla letteratura (Burr et al., 2013), si è scelto di fissare la soglia di allarme delle deformazioni come multiplo della deviazione standard dei valori di *strain*.

Il valore ottenuto per la deviazione standard (200 $\mu\epsilon$) ha suggerito la scelta di una soglia di allarme per le deformazioni cinque volte maggiore della deviazione standard, ovvero uguale a 1000 $\mu\epsilon$. Presso il Laboratorio di Meccanica delle Rocce del CGT, campioni di marmo del sito oggetto di studio sono stati sottoposti a prove di resistenza a compressione. I risultati di queste analisi mostrano un valore del modulo di elasticità E =60 GPa e una resistenza a compressione $\sigma_u = 87 MPa$ (Tabella 10.1). Valori simili sono confermati dai dati riportati in letteratura (Gullì et al., 2015). Considerando il valore misurato del modulo di elasticità, il valore tensionale corrispondente al valore soglia per lo *strain* (1000 $\mu\epsilon$) è dato dalla relazione 7.1.

$$\sigma_{calc} = strain\,(\mu\varepsilon) \cdot 10^{-6} \cdot E \cong 59\,MPa \tag{7.1}$$

Risultando $\sigma_{calc} < \sigma_u$, il valore di 1000 $\mu\epsilon$ è stato considerato come un valore soglia di allarme adatto e precauzionale per le deformazioni del pilastro della cava di Lorano.

Osservando la Figura 7.39, è possibile comprendere che tale valore soglia non è stato mai raggiunto in nessuna posizione lungo tutto l'arco temporale della campagna di monitoraggio.

La Figura 7.40 illustra i profili di variazione di temperatura ottenuti a partire dai dati BFS mostrati in Figura 7.38 e utilizzando come misura di riferimento quella del 07/02/2018. Dall'analisi di tale grafico si evince la naturale differenza di temperatura tra le misure eseguite nei periodi autunnali e invernali rispetto a quelle effettuate nei mesi primaverili ed estivi. I dati di temperatura rilevati da fibra ottica, infatti, variabili nel *range* -10 + 20 °C, risultano essere affetti dalle naturali variazioni stagionali, come è normale attendersi nel caso di una cava a cielo aperto posta in un ampio bacino estrattivo quale quello di Torano.



Figura 7.40. Cava Lorano "I" n° 22. Profili di temperatura ottenuti impiegando come misura di zero quella del 07/02/2018.

La Figura 7.41 mostra un confronto tra la temperatura media giornaliera della stazione meteorologica "Carrara Fossola" e la temperatura media giornaliera misurata dai DOFS (media di tutti i valori registrati lungo il cavo sensore) da Maggio 2018 a Febbraio 2019. Anche se la tendenza della temperatura rilevata dai DOFS segue quella della stazione meteorologica, i valori DOFS sembrano essere inferiori a quelli della stazione meteorologica. Ciò si ritiene dovuto principalmente alla diversa posizione geografica e altitudine tra la stazione (55 m s.l.m.) e il contrafforte in marmo (circa 600-700 m s.l.m.). Inoltre, la Figura 7.42 presenta due esempi di confronto tra sforzo e temperatura in due date individuali, una per l'estate (Figura 7.42) e l'altra per la stagione invernale (Figura 7.43). Osservando i grafici, è possibile dedurre che temperature più elevate portano ad una maggiore deformazione. Tuttavia, come già accennato, questi valori di deformazione sono comunque sempre inferiori ai valori di soglia di allarme (Figura 7.39).



Figura 7.41. Confronto tra la temperatura giornaliera media della stazione meteorologica "Carrara Fossola" e la temperatura giornaliera media dei DOFS (media di tutti i valori registrati lungo il cavo del sensore) da Maggio 2018 a Febbraio 2019.



Figura 7.42. Esempi di confronto dei profili di deformazione e temperatura per la stagione estiva. I valori di deformazione e temperatura sono filtrati secondo una media mobile di 51 punti (risoluzione spaziale di 10 m) (Lanciano & Salvini, 2020).

Capitolo 7 - Caso studio n. 3: monitoraggio dello strain e della temperatura in una cava a cielo aperto e confronto con contemporanei dati di monitoraggio topografico e geotecnico



Figura 7.43. Esempi di confronto dei profili di deformazione e temperatura per la stagione. I valori di deformazione e temperatura sono filtrati secondo una media mobile di 51 punti (risoluzione spaziale di 10 m) (Lanciano & Salvini, 2020).

7.5 Discussione

La classificazione RMR_b ha evidenziato un ammasso roccioso di buona qualità, anche se i risultati dell'analisi di stabilità indicano una situazione di criticità in corrispondenza del pilastro oggetto di monitoraggio. Infatti, la combinazione tra le direzioni delle pareti dei pilastri e quelle delle discontinuità permette la formazione di un elevato numero di blocchi che sono, oltretutto, contraddistinti da elevate probabilità di cedimento. In generale, le pareti del pilastro V2 e V3 risultano essere le più critiche per tutti e tre i tipi di cinematismo, con probabilità di cedimento sempre superiori all'85%, considerando un FS di 1,3. La parete V1, invece, grazie anche alla sua minore inclinazione, mostra probabilità leggermente minori per quanto riguarda gli scivolamenti planari e gli scivolamenti dei cunei e non risulta essere interessata da fenomeni di ribaltamento diretto. In generale, le probabilità di cedimento diminuiscono notevolmente se si considera un fattore di sicurezza pari all'unità. Come negli altri casi di studio, è però da sottolineare però che la cava è già stata messa in sicurezza tramite tiranti e chiodature (alcuni esempi in Figura 7.44).



Figura 7.44. Aree con tiranti di rinforzo già installati.

Per quanto riguarda il sistema di monitoraggio DOFS, durante la fase di acquisizione dati, sono emerse diverse criticità legate sia alla complessa morfologia dell'area di studio sia alla fragilità della componentistica strumentale. Infatti, l'intersezione tra il cavo sensore e le asperità dell'ammasso roccioso ha portato ad avere alcuni fenomeni di recisione del cavo stesso. Queste rotture, tuttavia, sono state prontamente riparate utilizzando una guaina protettiva più robusta accoppiata con canali in alluminio e cavi in acciaio e realizzando interventi di *by-pass* (Figura 7.45).



Figura 7.45. Intervento di by-pass della fibra ottica recisa evidenziato dall'ellisse di colore rosso.

Inoltre, un danno alle batterie di *backup* della centralina OSD-1 e della componentistica circostante ha provocato l'interruzione della registrazione dei dati per circa 3 mesi (da Marzo a Giugno 2018) in attesa della disponibilità dei componenti di sostituzione e riparazione (figure 7.46 e 7.47).



Figura 7.46. In alto, la centralina di misura OSD-1; in basso, le 8 batterie danneggiate e, in seguito, sostituite.



Figura 7.47. Dettaglio delle otto batterie danneggiate.

Al fine di comprendere meglio i risultati ottenuti e confrontare le diverse tecniche di acquisizione dei dati, sono stati realizzati diversi grafici alcuni dei quali riportati di seguito:

- la Figura 7.48 e la Figura 7.49 mostrano il confronto tra i valori di *strain* da DOFS e gli spostamenti registrati dalla RTS; i valori sono abbastanza simili se confrontati tra loro anche se è necessario considerare che, nel periodo di sovrapposizione delle misure, ci sono pochi valori di *strain* da DOFS;
- la Figura 7.50 e la Figura 7.51 mostrano il confronto tra i valori di *strain* da DOFS e gli spostamenti registrati dal sistema di monitoraggio geotecnico; la tendenza è assolutamente comparabile;
- la Figura 7.52 mostra il confronto tra i valori di temperatura misurati da DOFS, dalla stazione meteorologica "Carrara Fossola" e dal sistema di monitoraggio geotecnico; complessivamente, i valori di temperatura mostrano una tendenza comparabile, anche se i valori DOFS sembrano essere inferiori rispetto agli altri. Ciò può essere correlato a diverse cause: innanzitutto alla differenza di altitudine tra la stazione (55 m s.l.m.) e il contrafforte analizzato (600-700 m s.l.m.); secondariamente all'effetto di rivestimento esterno del sensore e resina, necessari per la protezione del sensore stesso da eventi meteorici e raggi UV. Un ulteriore elemento da considerare è il tempo di esecuzione della misura DOFS, dal momento che l'area di studio è caratterizzata da un'intensa escursione termica giornaliera. Infatti, la temperatura misurata dalla fibra, risultando dalla temperatura esterna (aria) e dalla temperatura del marmo dove il sensore è posizionato, varia a seconda dell'ora del giorno, della posizione ed esposizione solare: possono esserci aree in ombra e zone esposte al sole lungo il percorso dei DOFS.



Figura 7.48. Confronto tra lo spostamento del punto di misura P05 della RTS (dati interpretati secondo una polinomiale del sesto ordine) e il corrispondente *strain* misurato da DOFS (Lanciano & Salvini, 2020).



Figura 7.49. Confronto tra lo spostamento del punto di misura G15 della RTS (dati interpretati secondo una polinomiale del sesto ordine) e il corrispondente *strain* misurato da DOFS (Lanciano & Salvini, 2020).

Capitolo 7 - Caso studio n. 3: monitoraggio dello strain e della temperatura in una cava a cielo aperto e confronto con contemporanei dati di monitoraggio topografico e geotecnico



Figura 7.50. Confronto tra lo spostamento del sensore geotecnico FS1 e il corrispondente *strain* misurato da DOFS (Lanciano & Salvini, 2020).



Figura 7.51. Confronto tra lo spostamento del sensore geotecnico FS4 e il corrispondente *strain* misurato da DOFS (Lanciano & Salvini, 2020).
Capitolo 7 - Caso studio n. 3: monitoraggio dello strain e della temperatura in una cava a cielo aperto e confronto con contemporanei dati di monitoraggio topografico e geotecnico



Figura 7.52. Confronto tra i valori di temperatura rilevati da DOFS, sensore geotecnico FS3 e stazione metereologica "Carrara Fossola". I dati sono stati interpretati secondo curve polinomiali del quinto ordine (Lanciano & Salvini, 2020).

7.6 Conclusioni

Sulle pareti di un contrafforte di marmo (Tecchia di Pradetto) situato nella Cava di Lorano "T" n° 22 (Carrara) è stato installato un innovativo sistema di monitoraggio costituito da DOFS basati sullo *shift* di frequenza di Brillouin. Il sistema è stato operativo funzionando in maniera continua per circa un anno (Gennaio 2018 – Febbraio 2019) anche se con alcune interruzioni. I risultati ottenuti da tale sistema sono stati confrontati con quelli provenienti da strumentazione preposta al monitoraggio topografico e geotecnico attiva nel sito dal 2012.

La valutazione dell'efficacia del DOFS, con riferimento alla loro capacità di acquisizione dei dati, è senza dubbio positiva: il sistema, infatti, nonostante le difficoltà riscontrate, legate sia alla complessa morfologia dell'area che alla fragilità dei componenti, ha dimostrato di essere in grado di eseguire il rilevamento di dati affidabili e precisi di *shift* di frequenza di Brillouin, *strain* e temperatura.

Presso il sito di Lorano sono state eseguite misurazioni DFOS di tipo BOTDA. Le deformazioni più significative sono apparse durante i mesi estivi con un comportamento reversibile. I valori di deformazione registrati sono relativamente modesti rispetto alla deviazione standard di ciascun profilo (approssimativamente 200 μ). Questo valore di deviazione standard suggerisce che la soglia di allarme per deformazioni (1000 μ), definita su base statistica e geotecnica, non è mai stata raggiunta in nessuna posizione per tutto il periodo di monitoraggio. Tale evidenza è stata confermata dai valori di spostamento rilevati in corrispondenza di specifici punti di misura della Stazione Totale Robotizzata. Poiché questi valori di spostamento rientrano o sono molto vicini all'intervallo definito dalla soglia di tolleranza strumentale, non sono state rilevate situazioni critiche, in

Capitolo 7 - Caso studio n. 3: monitoraggio dello strain e della temperatura in una cava a cielo aperto e confronto con contemporanei dati di monitoraggio topografico e geotecnico

conformità con i risultati ottenuti con i rilevamenti DOFS. Inoltre, l'analisi comparativa dei dati acquisiti dal sistema di monitoraggio geotecnico conferma l'assenza di spostamenti significativi del contrafforte nel periodo di tempo studiato. I dati di temperatura rilevati dalla fibra ottica, variabili nell'intervallo tra -10 +20 °C, sembrano essere influenzati dalle naturali variazioni stagionali, come è naturale aspettarsi nel caso di una cava a cielo aperto.

I risultati ottenuti confermano la capacità del sistema di monitoraggio DOFS di rilevare e localizzare qualsiasi fenomeno di deformazione che può verificarsi lungo il percorso della fibra, anche in condizioni ostili e ambienti poco ospitali come nel caso dei siti di estrazione del marmo.

Tuttavia, considerando la natura di un sistema di monitoraggio (necessità di analisi sul lungo termine) e i problemi tecnici affrontati, sarebbe opportuno continuare gli esperimenti in futuro, al fine di aumentare la quantità di dati disponibili. Infatti, un dataset più sostanziale potrebbe consentire di effettuare valutazioni più approfondite sull'efficacia del sistema di monitoraggio DOFS e sulla sua durata. Il sistema già installato potrà essere utilizzato continuando le misure per valutare il progredire della deformazione nel tempo al fine di fornire indicazioni utili per la realizzazione di un sistema di preallarme. Quest'ultimo può costituire un valido strumento per garantire ai lavoratori delle cave le giuste condizioni di sicurezza e pianificare le azioni da intraprendere per il proseguimento dei lavori di scavo nelle aree adiacenti.

Discussione

I quesiti cui si è tentato di rispondere in questo elaborato di tesi sono essenzialmente due: innanzitutto se il monitoraggio tramite DOFS, già sperimentato per altre applicazioni ingegneristiche e architettoniche, possa essere utilizzato anche per i versanti artificiali come le cave di marmo delle Alpi Apuane caratterizzate da morfologie e condizioni meteo estreme; secondariamente, se tale metodologia consente, a costi limitati, di passare da un monitoraggio di tipo puntuale quale il geotecnico o il topografico ad un areale tramite l'installazione di fibre della lunghezza di centinaia di metri. Il tutto con diversi vantaggi (costi contenuti, applicabilità anche in assenza di ampi piazzali in relazione alle altezze dei fronti di cava, rapidità e semplicità del *data processing*) rispetto ad altre tecniche ugualmente valide e precise come, ad esempio, l'interferometria radar terrestre.

Il presente progetto di ricerca si propone di rispondere a tali quesiti, avendo previsto lo svolgimento di attività di progettazione, implementazione e test di un innovativo sistema di monitoraggio sperimentale di fronti potenzialmente instabili appartenenti a tre diversi siti di estrazione del marmo delle Alpi Apuane.

A partire da qualche decennio, i DOFS hanno attirato una significativa attenzione da parte delle comunità di ricercatori nel campo della geotecnica e del monitoraggio strutturale. Lo sviluppo sia della progettazione strutturale che dei metodi di rivestimento e installazione della fibra ottica, infatti, ha gradualmente portato ad avere una molteplicità di nuove applicazioni nel campo del monitoraggio geotecnico e strutturale. La necessità di osservare fenomeni quali deterioramenti, danni e potenziale collasso delle infrastrutture ha come conseguenza una maggiore focalizzazione sugli aspetti di integrità strutturale, stabilità e affidabilità. Un efficace sistema di allarme e prevenzione delle catastrofi delle strutture geotecniche richiede una valutazione dell'integrità basata su tensione, deformazione e spostamento. Come evidenziato da Hong et al. (2017), il monitoraggio dello stato geotecnico può beneficiare dei vantaggi dei DOFS in termini di dimensioni ridotte, leggerezza, insensibilità alle perturbazioni esterne, resistenza alla corrosione, bassi costi di misurazione, acquisizione rapida dei dati, nonché facilità di rivestimento e installazione.

Tra le diverse modalità di acquisizione dati disponibili, le tecnologie BOTDR e BOTDA sono due metodologie di rilevamento largamente diffuse per la misura distribuita di *strain* e temperatura, che, soprattutto su lunghe distanze, si presenta molto più conveniente rispetto all'installazione di migliaia di sensori di tipo puntuale (Xiao & Huang, 2013; Zhou et al., 2008).

Nonostante i già citati vantaggi dei DOFS, ai fini delle attività di sorveglianza nel settore geotecnico-strutturale, occorre prestare particolare attenzione alle sfide nelle applicazioni sul campo, in particolare la progettazione dei sensori, il metodo di rivestimento e implementazione, la perdita ottica e, infine, l'intervallo di *strain* e temperatura dei sensori utilizzati (Hong et al., 2017; Hauswirth et al., 2010). Ognuna di queste scelte può contribuire ad un funzionamento ottimale oppure al completo fallimento di un sistema di monitoraggio DOFS e, pertanto, deve essere attentamente valutata da parte di ingegneri e ricercatori.

Sebbene i DOFS siano stati già applicati nel contesto del monitoraggio di siti estrattivi (Kumar, 2010; Wang & Luan, 2014; Ho et al., 2017; Zrelli & Ezzedine, 2018; Liu, et al., 2018), la loro sperimentazione nell'ambito delle cave di marmo delle Alpi Apuane ha costituito un elemento di assoluta novità. Inoltre, grazie alle loro caratteristiche peculiari, come complessità morfologica, presenza di versanti e pareti sub-verticali, spesso

aggettanti, così come scavi di tunnel e gallerie, tali tipologie di sito estrattivo hanno rappresentato il luogo ideale per le attività di test del sistema di monitoraggio DOFS.

Al fine di ottenere un'esaustiva caratterizzazione geologico-strutturale e geomeccanica dei siti, rappresentare cartograficamente sia gli stessi che i percorsi dei DOFS, ma anche per acquisire dati di diversa origine da confrontare con i risultati delle acquisizioni DOFS, il sistema di monitoraggio è stato supportato dall'applicazione di tradizionali tecniche per il rilievo geologico e geomeccanico e da moderne tecnologie geomatiche (drone, laser scanner terrestre, strumentazione GPS, stazione totale, stazione totale robotizzata).Per la Cava Piastra Bagnata, l'installazione dei DOFS ha consentito il calcolo dei valori di deformazione per il periodo di misura. La valutazione dell'efficacia del sistema di monitoraggio è senza dubbio positiva anche se è da registrare una criticità legata alla rottura del cavo sensore durante la stagione invernale 2017-2018, a causa del persistere del ghiaccio, a testimonianza della importanza della scelta del metodo di rivestimento e implementazione per rendere il funzionamento del sistema di monitoraggio ottimale oppure fallimentare. Nella cava del Piastraio di Sotto i DOFS non hanno presentato problemi ed hanno risposto in modo ottimale alle condizioni dell'ambiente sotterraneo. Sono state effettuate poche misure ma è questo non è legato ai sensori ma a difficoltà meteo di accesso alla cava, alla chiusura invernale dell'attività e all'organizzazione tra i vari partner. Il valore soglia di allarme non è stato mai raggiunto. Tale criticità non è stata affrontata presso il sito di Lorano in quanto la centralina di misura, presso tale cava, è stata posizionata in maniera fissa; nelle cave Piastraio di Sotto e Piastra Bagnata i rilievi sono stati fatti in maniera multitemporale, e non in continuo, per motivi di budget disponibile.

Anche a Lorano, comunque, nonostante i buoni risultati in accordo anche con i dati misurati dai sensori geotecnici e dalla RTS sono emerse delle criticità legate sia alla complessa morfologia dell'area di studio che alla fragilità della componentistica strumentale. Infatti, l'intersezione tra il cavo sensore e le asperità dell'ammasso roccioso ha portato ad avere alcuni fenomeni di recisione dello stesso cavo. Queste rotture sono state prontamente riparate utilizzando una guaina protettiva più robusta accoppiata con canali in alluminio e cavi in acciaio. Inoltre, un danno alle batterie di *backup* dell'unità di misura e della componentistica circostante ha provocato l'interruzione della registrazione dei dati per circa tre mesi (da Marzo a Giugno 2018) in attesa dell'arrivo dei componenti di riparazione.

Negli intervalli in comune, l'entità dei valori di *strain* da DOFS e spostamento rilevato dalla RTS e dai sensori geotecnici sono abbastanza simili così come i valori di temperatura misurati da DOFS se confrontati con quelli del sistema di monitoraggio geotecnico e della stazione meteorologica di Carrara Fossola. Chiaro è che nel confronto è da considerare anche l'esposizione dei versanti ed il particolare clima della zona. Esso è tipicamente mediterraneo, con estati calde e asciutte e inverni freddi e umidi; la copiosa precipitazione meteorica (più di 3000 mm/anno) mostra un picco primario nella stagione autunnale e due massimi secondari in inverno e primavera (D'amato Avanzi et al., 2004; Salvini et al., 2015; Lanciano & Salvini, 2020). Si tratta di caratteristiche in grado di rendere i dati molto variabili durante i diversi periodi dell'anno.

Tutto ciò considerato, si può comunque affermare che la fibra ottica sia stata capace di adattarsi ad ambienti poco ospitali come i siti di estrazione del marmo e di fornire in *output* le misure di *strain* e temperatura desiderate. Il mancato superamento delle soglie di allarme presso tutti i siti analizzati risulta essere coerente con le osservazioni strumentali di altro tipo laddove disponibili (Cava Lorano "I" n° 22) e con la constatazione del fatto che, nel periodo analizzato, non si sono verificati episodi di crolli di roccia.

Pertanto, la valutazione dell'efficacia del sistema di monitoraggio sperimentale, in riferimento alla capacità dell'acquisizione dei dati di BFS, da cui sono stati tratti i dati di *strain* e temperatura, è senza dubbio positiva.

I risultati ottenuti confermano la potenziale abilità del sistema di monitoraggio mediante sensori distribuiti in fibra ottica di rilevare e localizzare eventuali fenomeni deformativi che possono verificarsi lungo il percorso della fibra.

Rispetto alle tecniche tradizionali, i DOFS offrono la possibilità di rilevare linearmente e arealmente microdeformazioni, anche in zone che sarebbero difficilmente accessibili, e di monitorare nel tempo l'evoluzione dello stato dell'ammasso roccioso, consentendo di prevedere con buon anticipo il verificarsi di eventuali deformazioni gravitative. Tale aspetto risulta essere di fondamentale importanza in quanto la possibilità di cogliere i segnali precursori di eventuali cedimenti è senza dubbio cruciale in quanto consentirebbe la sicurezza del personale e dei beni (macchinari, attrezzature, veicoli, ecc.).

Tuttavia, considerati i diversi problemi pratici riscontrati, sia di natura tecnica che di natura esterna (stagionale chiusura delle cave causa meteo), adesso che le fibre sono già tutte installate nelle tre cave, si cercherà di proseguire in futuro le misure, tramite nuovi accordi e progetti, al fine di aumentare il numero di dati disponibili e rendere il sistema pienamente operativo. Un dataset più corposo, infatti, potrebbe consentire di effettuare valutazioni più approfondite. Nei nuovi progetti, andrà considerata la necessità di posizionare la centralina di misura in maniera fissa e acquisizione continua al fine di evitare interruzioni e difficoltà quali quelle rinvenute nel rilievo multitemporale con centralina mobile.

Con la disponibilità finanziaria, il sistema installato potrà permettere di valutare l'evoluzione della deformazione nel tempo e, se funzionante in maniera continua, fornire utili indicazioni per la realizzazione di un sistema di pre-allerta. Quest'ultimo potrà rappresentare un valido strumento per garantire condizioni di sicurezza nello svolgimento del proprio lavoro agli operatori di cava e pianificare le azioni da intraprendere ai fini della prosecuzione dei lavori di escavazione nelle aree adiacenti.

Conclusioni

Nel presente lavoro di Tesi di Dottorato è stato presentato un sistema di monitoraggio sperimentale costituito da DOFS e tecnologie geomatiche finalizzato al rilevamento delle deformazioni degli ammassi rocciosi in contesti morfologicamente complessi come quelli dei siti di estrazione del marmo sulle Alpi Apuane. Il sistema DOFS adottato, costituito da sensori in fibra ottica e centralina di misura OSD-1 (Optosensing s.r.l.), è basato sulla determinazione del BFS.

Al fine di sperimentare il sistema di monitoraggio in varie condizioni, sono stati scelti tre siti di estrazione del marmo molto diversi tra loro: la "Cava Piastra Bagnata" (Vagli di Sotto, Lucca) e la "Cava Lorano I n° 22" (Carrara, Massa-Carrara), entrambe a cielo aperto, e la "Cava del Piastraio di Sotto" (Levigliani di Stazzema, Lucca) in sotterraneo. Presso la "Cava Piastra Bagnata", oggetto di monitoraggio è stato un fronte estrattivo, lungo circa 160 m e alto circa 45 m, caratterizzato dalla presenza di fratture che si sviluppano per lunghezze variabili da decimetriche a decametriche e che penetrano verso l'interno per spessori difficilmente stimabili (superando spesso il metro di profondità). L'intersezione tra i vari sistemi di fratturazione e la superficie del versante genera blocchi e cunei rocciosi, di dimensioni variabili, che possono essere soggetti ad eventuali fenomeni di instabilità gravitativa. Per questi motivi, tale parete, già rinforzata in larga parte con tiranti e chiodature, è stata considerata come idonea per il monitoraggio mediante DOFS e tecnologie geomatiche.

Nella "Cava del Piastraio di Sotto", invece, sono stati individuati due pilastri di dimensioni medie 10x10x15 m appartenenti alla grande camera meridionale del primo livello del sotterraneo. Essendo le due strutture caratterizzate dalla presenza di diversi sistemi di discontinuità, in virtù della necessità di esercitare l'attività estrattiva in condizioni di sicurezza, la cava individuata è risultata adatta per l'applicazione del monitoraggio sperimentale.

Il terzo e ultimo caso ha riguardato lo studio di un contrafforte di marmo (Tecchia di Pradetto), residuo di precedenti escavazioni, appartenente alla "Cava Lorano "I" n° 22". A partire dall'anno 2012, tale contrafforte, alto oltre 120 m per una larghezza di 30 m e una profondità di 40 m circa, viene costantemente tenuto sotto osservazione mediante un sistema di monitoraggio topografico e geotecnico costituito da una RTS e sensori geotecnici (estensimetri, fessurimetri e inclinometri). Pertanto, tale caso studio ha fornito la possibilità di effettuare un confronto tra dati di deformazione rilevati da strumentazione di diverso tipo.

Tutti e tre i siti test sono stati caratterizzati dal punto di vista geologico-strutturale, petrografico e geomeccanico. Al fine di completare i dati di rilevo con modelli 3D e ortofoto, georeferenziando anche il tutto (traccia della fibra ottica disposta sulle pareti delle cave inclusa), sono stati effettuati rilievi geomatici con drone o *laser scanner* terrestre, a seconda che la cava fosse a cielo aperto oppure in sotterraneo, e, laddove necessario, rilievi topografici (mediante Stazione Totale e GPS differenziale).

Il sistema OSD-1 ha acquisito dati BFS da cui è stato possibile ricavare dati di *strain* e temperatura. Sulla base di considerazioni di tipo statistico e geotecnico, per tutti e tre i casi studio, sono stati determinati i relativi valore soglia di allarme per lo *strain*, i quali non sono mai stati superati in nessuna posizione della fibra nell'arco temporale considerato. Tale evidenza ha trovato conferma, per l'area test di Lorano, nell'analisi dei dati acquisiti dal sistema di monitoraggio topografico e geotecnico. Inoltre, un'ulteriore validazione dei

risultati ottenuti è determinata dal fatto che, durante la campagna di monitoraggio, non si sono verificati fenomeni di crolli di roccia in nessuno dei tre siti investigati.

In riferimento alla capacità di acquisizione dei dati, la valutazione dell'efficacia del sistema di monitoraggio è senza dubbio positiva. Infatti, nonostante l'estrema complessità morfologica e tecnologica, le fasi di installazione, avvio e funzionamento dell'impianto DOFS si sono concretizzate con successo; di conseguenza, il sistema è risultato essere in grado di effettuare l'acquisizione dei dati di BFS. Inoltre, i risultati ottenuti confermano il potenziale del sistema di monitoraggio mediante DOFS di rilevare e localizzare qualsiasi fenomeno di deformazione che può verificarsi lungo il percorso della fibra, anche in ambienti ostili e poco ospitali come i siti di estrazione del marmo.

Per quanto riguarda lo sviluppo futuro, considerando la natura di un sistema di monitoraggio, legata alla necessità di operare sul lungo termine, sarebbe interessante continuare la sperimentazione; infatti, l'acquisizione di un *dataset* più cospicuo potrebbe consentire di effettuare valutazioni più approfondite sull'efficacia del sistema di monitoraggio DOFS, sulla sua durata e sulla sua utilità ai fini della sicurezza sui luoghi di lavoro.

Il sistema potrebbe essere sviluppato al fine di realizzare attività di *smart-monitoring* della stabilità di fronti rocciosi in siti di estrazione del marmo attraverso DOFS integrati con tecniche di controllo topografico e avanzati sistemi di trasmissione dei dati. Un sistema di questo tipo consentirebbe di realizzare un controllo remoto real-time dei dati di strain e temperatura rilevati dai DOFS, finalizzato al supporto delle operazioni di messa in sicurezza in caso di superamento di una soglia di allerta, mediante tre componenti fondamentali: un'apposita centralina di misura, una web-app e, infine, un gestionale weboriented. Questi ultimi potrebbero essere entrambi basati sul codice PHP e sulle ultime specifiche HTML5 multipiattaforma (compatibili con ogni tipologia di PC, tablet e smartphone). Infine, il proseguo del monitoraggio topografico con RTS e sensori geotecnici sarebbero utile nelle operazioni di verifica, taratura e controllo dell'intero sistema. L'implementazione di un vero e proprio sistema di preannuncio, attualmente terminato il Progetto CAV_OTT con la Regione Toscana, trova difficile realizzazione perla mancanza di fondi anche se potrebbe contribuire notevolmente al miglioramento delle condizioni di sicurezza sui luoghi di lavoro e costituire un valido supporto decisionale nell'ambito della pianificazione delle attività di escavazione sul medio-lungo termine. Il gruppo di lavoro del CGT, in collaborazione con le cave coinvolte, è ancora operativo nella ricerca delle modalità di finanziamento che consentano la prosecuzione del monitoraggio con DOFS.

Bibliografia

- Agisoft. (2019). AgisoftTM Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.5. Copyright © 2019 Agisoft LLC. AgisoftTM Metashape .
- Alejano, L. R., Pons, B., & Bastante, F. A. (2007). Slope geometry design as a means of rockfall control in quarries. Int. J. Rock Meth. & Min. Sci., 44, 903–21.
- Alejano, L. R., Stockhausen, H., Bastante, F. G., Alonso, E., & Ramírez-Oyanguren, P. (2008). ROFRAQ: A statistics-based empirical method for assessing accident risk from rockfalls in quarries. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 45, 1525-72.
- Alejano, L., Veiga, M., Gómez-Márquez, I., & Dellero, H. (2012). Application of rockfall risk assessment techniques in two aggregate quarries. Conference: Harmonising Rock Engineering and the Environment - Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics. doi:10.1201/b11646-353

Architettura, A. (2017). Laser 3D. Tratto da http://www2.arc.usi.ch/ris_icup_infrastuttura_3dlaser.pdf

- Arya, S., Mount, D. M., Netanyahu, N. S., Silverman, R., & Wu, A. Y. (1998). An optimal algorithm for approximate nearest neighbour searching fixed dimensions. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 45, 891-923.
- Arzu, A., Mehmet, K., Arif, E., Haluk, A., & Mustafa, K. (2015). Optical Fiber Technology to Monitor Slope Movement. In G. Lollino, D. Giordan, G. Crosta, J. Corominas, R. W. Azzam, & N. (. Sciarra, *Engineering Geology for Society and Territory* (Vol. 2 Landslide Processes, pp. 1425-1429). doi:10.1007/978-3-319-09057-3_252
- Bao, X., & Chen, L. (2012). Recent progress in distributed fiber optic sensors. Sensors, 8601–8639. doi:10.3390/s120708601
- Barla, G., Pazzagli, G., Rabagliati, U., & Travaglini, S. (1986). The San Donato tunnel (Florence). Congresso Internazionale su Grandi Opere in Sotterraneo, (pp. 61-5). Firenze, Italy.
- Barrias A., C. J. (2016). A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications . Sensors, 16(5), 748. doi:10.3390/s16050748
- Barton, N. L. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, 6, 189–236. doi:https://doi.org/10.1007/BF01239496
- Barton, N. R. (1973). A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. Bergmekanikk. Oslo, Norway.
- Barton, N. R. (1976). The shear strength of rock and rock joints. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 13(9), 255-279. doi:10.1016/0148-9062(76)90003-6
- Barton, N. R., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics and Rock Engineering, 10(1), 1-54. doi:10.1007/BF01261801
- Barton, N., & Bandis, S. (1990). Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. Rock joints, proc. int. symp. on rock joints (pp. 603-610). Loen, Norway,: N. Barton and O. Stephansson.
- Bhalla, S., Yang, Y., Zhao, J., & Soh, C. (2005). Structural health monitoring of underground facilities–Technological issues and challenges. *Tunnell. Undergr. Space Technol.*, 20, 487-500.
- Bieniawski, Z. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. CIVIL ENGINEER IN SOUTH AFRICA, 15(12), 353-343.
- Bieniawski, Z. (1989). Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons.
- Bieniawski, Z. T. (1976). Rock Mass Classification in Rock Engineering. Symposium Proceedings of Exploration for Rock Engineering, 1, pp. 97-106. Johannesburg, South Africa.
- Bieniawski, Z. T. (1979). The geomechanics classification in rock engineering applications. Proceedings of the 4th ISRM Congress, International Society for Rock Mechanics. Montreux, Switzerland.
- Bieniawski, Z. T. (1984). The design process in rock engineering. Rock Mechanics and Rock Engineering, 17(3), 183–190. doi:https://doi.org/10.1007/BF01042549
- Bin, T., & Hua, C. (2018). Application of Distributed Optical Fiber Sensing Technology in Surrounding Rock Deformation Control of TBM-Excavated Coal Mine Roadway. *Journal of Sensors*(Article ID 8010746), 10. doi:10.1155/2018/8010746
- Boccaletti, M., Elter, P., & Guazzone, G. (1971). Plate tectonic models for the development of the Western Alps and Northern Apennines. *Nature*, 234, 108-111. doi:10.1038/physci234108a0

- Bonazza, A., Sabbioni, C., Messina, P., Guaraldi, C., & De Nuntiis, P. (2009). Climate change impact: mapping thermal stress on Carrara marble in Europe. Science of the Total Environment, 407(15), 4506-4512.
- Boufama, B., Mohr, R., & Veillon, F. (1993). Euclidean constraints on uncalibrated reconstruction. Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Vision, (pp. 466-470). Berlin, Germany.

Boyd, R. (2008). Nonlinear Optics (3rd ed. ed.). Rochester, NY, USA: Academic Press.

- Brady, B. H., & Brown, E. T. (2006). Rock Mechanics for underground mining. Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2116-9
- Brideau, M. A., Pedrazzini, A., Stead, D. F., Jaboyedoff, M., & van Zeyl, D. (2011). Threedimensional slope stability analysis of South Peak, Crowsnest Pass, Alberta, Canada. *Landslides*, 8, 139–158.
- Burr, T., Hamada, M., Howell, J., Skurikhin, M., Ticknor, L., & Weaver, B. (2013). Estimating Alarm Thresholds for Process Monitoring Data under Different Assumptions about the Data Generating Mechanism. Sci. Technol. Nucl. Install(705878). doi:https://doi.org/10.1155/2013/705878
- Carmignani, L. (1985). Carta geologico-strutturale del Complesso Metamorfico delle Alpi Apuane, Foglio Nord. Firenze: Litografia Artistica Cartografica.
- Carmignani, L., & al., e. (2000). Carta Geologica del Parco delle Alpi Apuane. Parco Regionale delle Alpi Apuane, Massa, pp. 1:50000.
- Carmignani, L., & Giglia, G. (1975). Le fasi tettoniche terziarie dell'Autoctono delle Alpi Apuane: studio delle strutture minori della zona centro-meridionale. *Boll. Soc. Geol. Ital.*, *94*, 1957–1981.
- Carmignani, L., & Giglia, G. (1977). Analisi mesostrutturale della zona occidentale delle Apuane metamorfiche . *Boll. Soc. Geol. Ital.,* 96, 429–450.
- Carmignani, L., & Giglia, G. (1979). Large scale reverse "drag folds" in the late Alpine building of the Apuane Alps (N. Apennines). Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie, Serie A, LXXXVI, 109-126.
- Carmignani, L., & Giglia, G. (1983). Il problema della doppia vergenza delle Alpi Apuane e la struttura del Monte Corchia. Mem. Soc. Geol. Ital., 26, 515-525.
- Carmignani, L., & Giglia, G. (1984). "Autoctono Apuano" e Falda Toscana: sintesi dei dati e interpretazioni più recenti. *Cento Anni di Geologia Italiana*, 199-214.
- Carmignani, L., & Giglia, G. (1984). Autoctono Apuano e Falda Toscana: sintesi dei dati e interpretazioni più recenti . Soc. Geol. Ital., Giubil., 199- 214.
- Carmignani, L., & Kligfield, R. (1990). Crustal extension in the northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane Core Complex. *Tectonics*, *9*, 1275–1303.
- Carmignani, L., & Kligfield, R. (1990). Crustal extension in the Northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane core complex. *Tectonics, IX*, 1275-1303.
- Carmignani, L., & Kligfield, R. (1990). Crustal extension in the Northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane core complex. *Tectonics*, 9(6), 1275-1303.
- Carmignani, L., Antompaoli, L., Appelius, V., Bocci, M., Chiereghin, F., Coli, M., . . . Sciuto, P. F. (2002). Studi conoscitivi sui bacini marmiferi industriali: un contributo per la gestione pianificata dell'attività. GEAM — Geoingegneria Ambientale e Mineraria, (p. pp.21–43). Torino, Italia.
- Carmignani, L., Conti, P., Cornamusini, G., & Meccheri, M. (2004). The internal Northen Appennines, the Northen Tyrrhenian Sea and the Sardinia-Corsica Block. In S. G. Italiana, *Geology of Italy* (p. 59-77). Roma, Italy.
- Carmignani, L., Conti, P., Disperati, L., Fantozzi, P., & Meccheri, M. (2000). Structure and deformation history of the Stazzema zone, southern Apuane Alps, Evoluzione Geologica dell'Appennino. *Conv. G. Pialli*, (pp. 65-67). Foligno, Italy.
- Carmignani, L., Conti, P., Fantozzi, P. L., Mancini, S., Massa, G., Molli, G., & Vaselli, L. (2007). I marmi delle Alpi Apuane (Toscana settentrionale). *Geoitalia*(21).
- Carmignani, L., Conti, P., Fuoco, S., Martinelli, L., & Segato, D. (2000). Studio geologico strutturale e giacimentologico per la coltivazione di marmi a partire da una galleria di comunicazione stradale nelle Alpi Apuane centrali. Le Cave di Pietre ornamentali, (p. 51-58). Torino.
- Carmignani, L., Conti, P., Mancini, S., Massa, G., Meccheri, M., Simoncini, D., & Vaselli, L. (2007). Carta Giacimentologica dei Marmi delle Alpi Apuane-RELAZIONEFINALE. Technical Report. Siena, Italy: Centre of GeoTechnologies, University of Siena.
- Carmignani, L., Disperati, L., Fantozzi, P., Giglia, G., & Meccheri, M. (1993). Tettonica Distensiva del Complesso Metamorfico delle Alpi Apuane - Guida all'Escursione. *Gruppo Informale di Geologia Strutturale*, 128.

- Carmignani, L., Disperati, L., Fantozzi, P., Giglia, G., & Meccheri, M. (1993). Tettonica distensiva del complesso metamorfico delle alpi apuane-Guidaall'escursione. 128.
- Carmignani, L., Fantozzi, P. L., & Meccheri, M. (1991). La vergenza "sin" e "post-nappe" della Falda Toscananelle strutture di Pescagliae di Castelpoggio. Boll. Soc. Geol. Ital., 110, 351-364.
- Carmignani, L., Fantozzi, P., Giglia, G., & Meccheri, M. (1993). Pieghe associate alla distensione duttile del Complesso Metamorfico Apuano. *Memorie della Società Geologica Italiana, 49*, 99-124.
- Carmignani, L., Giglia, G., & Kligfield, R. (1978). Structural evolution of the Apuane Alps; an example of continental margin deformation in the northern Apennines, Italy. *Journal of Geology*, 86(4), 487-504.
- Carmignani, L., Giglia, G., & Kligfield, R. (1980). Nuovi dati sulla zona di taglio ensialica delle Alpi Apuane. Mem. Soc. Geol. Ital. , 21, 93–100.
- Carmignani, L., Giglia, G., & Kligfield, R. (1981). Nuovi dati sulla zona di taglio ensialica delle Alpi apuane. Memorie della Società Geologica Italiana. 21, 93-100.
- Casagli, N., Catani, F., Del Ventisette, C., & Luzi, G. (2010). Monitoring, prediction, and early warning using ground-based radar interferometry. *Landslides*, 7, 291–301. doi:https://doi.org/10.1007/s10346-010-0215-y
- CGT. (2018, 06 01). Monitoraggio in tempo reale delle pareti di cava mediante utilizzo di fibre ottiche. Tratto il giorno 07 01, 2020 da CGTONLINE: http://www.geotecnologie.unisi.it/?page_id=180
- Cheng, G., Shi, B., Zhu, H., Zhang, C., & Wu, J. (2015). A field study on distributed fiber optic deformation monitoring of overlying strata during coal mining. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 5(5), 553-562. doi:10.1007/s13349-015-0135-6
- Cobbold, P. R., & Quinquis, H. (1980). Development of sheath folds in shear regimes. Journal of Structural Geology. 2, 119-126.
- Conti, P., Carmignani, L., Disperati, L., & Massa, G. (2010). Analisi di Stabilità di Pendii in Roccia.
- Conti, P., Carmignani, L., Giglia, G., Meccheri, M., & Fantozzi, P. L. (2004). Evolution of geological interpretations in the Alpi Apuane Metamorphic Complex, and their relevance for the geology of the Northern Apennines. In D. Morini, & P. Bruni, *The "Regione Toscana" Project of Geological Mapping* (pp. 241–262). Florence, Italy: Region of Tuscany.
- Conti, P., Di Pisa, A., Gattiglio, M., & Meccheri, M. (1993). Prealpine basement in the Alpi Apuane (Northern Apennines, Italy). In J. Von Raumer, & F. Neubauer, Pre Mesozoic Geology in the Alps (pp. 609–621). Springer Verlag.
- Coward, M. P., & Potts, G. J. (n.d.). Complex strain patterns developed at the frontal and lateral tips to shear zones and thrust zones. Journal of Structural Geology, 5, 383-399.
- Cravero, M., & Iachibino, G. (1997.). Geomechanical study for the exploitation of an underground marble quarry. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 34(058), 3-4.
- D'Amato Avanzi, G., Giannecchini, G., & Puccinelli, R. (2004). The influence of the geological and geomorphological settings on shallow landslides. An example in a temperate climate environment: the June 19, 1996 event in northwestern Tuscany (Italy). Eng. Geol., 73, 215-228. doi:https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.005
- Dercourt, J., Zonenshain, L. P., Ricou, L. E., & et, a. (1986). Geological evolution of the Tethys belt from the Atlantic to the Pamirs since the Lias. *Tectonophysics*, 123, 241-315.
- Eberhardt, E. (2003). Rock Slope Stability Analysis-Utilization of Advanced Numerical Techniques. Geological Engineering/EOS. UB C.
- Escher, A., & Watterson, J. (1974). Stretching fabrics, folds and crustal shortening. Tectonophysics, 22, 223-231.
- Federici, P. R. (1981). The quaternary glaciation on the seaward side of the Apuan Alps. Rivista geografica italiana, 88(2), 183-199.
- Federici, P. R. (2005a). Aspetti e problemi della glaciazione pleistocenica nelle Alpi Apuane. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, 13(Serie II), 19-32.
- Federici, P. R. (2005b). Appunti per la storia della scoperta della glaciazione quaternaria nell'Appennino Settentrionale. Memorie dell'Accademia Lunigianese di Scienze, 75, 69-75.
- Feng, Q., Sjögren, P., O., S., & Jing, L. (2001). Measuring fracture orientation at exposed rock faces by using a non-reflector total station. *Engineering Geology*, 59(1-2), 133-146.
- Fischler, M. A., & Bolles, R. C. (1987). Random Sample Consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. In M. A. F., & F. Oscar, *Readings in Computer Vision: Issues, Problems, Principles, and Paradigms* (pp. 726-740). Morgan Kaufmann Publishers Inc., London, United Kingdom.
- Förstner, W. (1986). A feature-based correspondence algorithm for image matching. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 26, 150-166.

Franco, V., & Lo Brutto, M. (2004). Il sistema GPS. Dispensa. Università degli Studi di Palermo. Facoltà di Ingegneria. .

- Furukawa, Y., & Ponce, J. (2007). Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis . Proceedings, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), (pp. 1-8). Minneapolis, USA,.
- Furukawa, Y., Curless, B., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2010). Towards Internet-scale multi-view stereo. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (pp. 1434-1441). San Francisco, CA, USA: IEEE . doi:doi: 10.1109/CVPR.2010.5539802
- Galindez-Jamioy, C., & López-Higuera, J. (2012). Brillouin Distributed Fiber Sensors: An Overview and Applications . Journal of Sensors, ID 204121, 17.
- Gattiglio, M., Meccheri, M., & Tongiorgi, M. (1989). Stratigraphic correlation forms of the Tuscan Palaeozoic basement. Rend. Soc. Geol. Ital., 12, 247–257.
- GEOexplorer. (2018, 06 01). Monitoraggio in tempo reale delle pareti di cava mediante utilizzo di fibre ottiche. Tratto il giorno 07 01, 2020 da GEOexplorer Impresa Sociale srl: https://www.geoexplorersrl.it/cav_ott/
- Giglia, G. (1967). Geologia dell'Alta Versilia Settentrionale (tavoletta M. Altissimo). Mem. Soc. Geol. Ital., 6, 67-95.
- Giglia, G., & Trevisan, L. (1966). Genesi e significato paleogeografico delle brecce tra grezzoni e marmi delle Alpi Apuane. Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., Serie A (31).
- Gomarasca , M. (2009). Basics of Geomatics. Springer.
- Grattan, K., Kerrouche, A., Sun, T., Grattan, S., Taylor, S., & Basheer, P. (2009). Design and evaluation of optical fibre sensors in civil engineering applications. *Structural Health Monitoring, OptoElectronics and Communications Conference, 2009, OECC 2009 14tb*, 1-3.
- Harris, C., & Stephens, M. (1988). A combined corner and edge detector. Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference, (pp. 147-151). Manchester, United Kingdom.
- Hauswirth, D., Iten, M., Richli, R., & Puzrin, A. (2010). Fibre optic cable and micro-anchor pullout tests in sand. *Physical Modelling in Geotechnics, Two Volume Set: Proceedings of the 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG 2010)* (p. 337). Zurich, Switzerland: CRC Press.
- Her, S., & Huang, C. (2011). Effect of Coating on the Strain Transfer of Optical Fiber Sensors. *Sensors, 11*, 6926-6941. doi:https://doi.org/10.3390/s110706926
- Ho, S., Li, W., Wang, B., & Song, G. (2017). A load measuring anchor plate for rock bolt using fiber optic sensor. Smart Materials and Structures, 26(5). doi:10.1088/1361-665X/aa6ae8
- Hoek, E. (2007). Practical Rock Engineering. Online. ed. Rocscience.
- Hoek, E., & Bray, J. (1981). Rock Slope Engineering. London, United Kingdome: Institution of Mining and Metallurgy.
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1991). Rock Slope Engineering. New York, USA: Elsevier Science Publishing.
- Hong, C., Zhang, Y., Zhang, M.-X., Leung, L., & Liu, L. (2016). Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques. *Sens. Actuators A Phys.*, 244, 184–197. doi:10.1016/j.sna.2016.04.033
- Hong, C.-Y., Zhang, Y.-F., Li, G.-W., Zhang, M.-X., & Liu, Z.-X. (2017). Recent progress of using Brillouin distributed fiber optic sensors for geotechnical health monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*, 258, 131-145. doi:https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.03.017
- Horn, B. K. (1987). Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. J. Opt. Soc. Am. A, 4, 629-642. doi:https://doi.org/10.1364/JOSAA.4.000629
- Hungr, O., Salgado, F. M., & Byrne, P. M. (1989). Evaluation of a three-dimensional method of slope stability analysis. Canadian Geotechnical Journal, 26(4), 679-686.
- Iman, R. L. (2014). Latin Hypercube Sampling. Wiley Online Library. doi:10.1002/9781118445112.stat03803
- INFN. (2017). Siamezza Laser. Tratto il giorno 07 02, 2020 da www.bo.infn.it: http://www.bo.infn.it/prevenzione/sicurezza%20laser.pdf
- Insider, B. (2019). Business Insider. Retrieved from https://www.businessinsider.com/carrara-marble-mountains-italy-billion-tuscany-2019-CIB = T##...txrst=TH=0/ 200 carrara/200 unceries// 200 unceries//

6?IR=T#:~:text=The%20Carrara%20quarries%20have%20produced,year%2C%20with%2013%2C000%20people%20involved

- Irrera, N., & Porcari, E. (2014). Monitoraggio dei sistemi mediante l'impiego dei sensori ottici. . Facoltà di Ingegneria Industriale. Corso di Laurea in Ingegneria dell'automazione. Politecnico di Milano.
- Istat. (2017, Aprile 19). Le attività estrattive da cave e miniere. Tratto il giorno 07 01, 2020 da Istat.it: https://www.istat.it/it/files//2017/04/Report_attivit%C3%A0-estrattive-19-04-2017.pdf
- Iten, M., Hauswirth, D., Fischli, F., & Puzrin, A. (2012). Distributed FIBER-OPTIC sensors in geotechnical engineering monitoring. Bull. ISSMGE, 32.
- IUAV. (2017). Università IUAV di Venezia. Tratto da http://www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architettu/docenti-st/Fabrizio-G/materiali-/archivio/materiali-12/rilievo-topografico.pdf
- Kister, G., Winter, D., Gebremichael, Y., Leighton, J., Badcock, R., Tester, P., . . . Fernando, G. (2007). Methodology and integrity monitoring of foundation concrete piles using Bragg grating optical fibre sensors. *Eng. Struct.*, 29, 2048–2055. doi:https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.10.021
- Krohn, D. (2015). Fiber Optic Sensors: Fundamentals and Applications. Retrieved from https://www.photonics.com/images/web/Webinars/80/Fiber_Optic_Sensors_Fundamentals_and_Applications.PDF
- Kumar, A., & Dangi, V. (2016). Electromagnetic Spectrum and Its Impact on Human Life. International Journal of All Research Education and Scientific Methods (IJARESM), 4(8), 2455-6211.
- Kumar, V. (2010). Fiber optic methane and strain sensors for mines. Proceedings of International Conference on Photonics, (pp. 1-4). Langkawi.
- Lalam, N., Ng, W., Dai, X., Wu, Q., & Fu, Q. (2016). Analysis of Brillouin Frequency Shift in Distributed Optical Fiber Sensor System for Strain and Temperature Monitoring. Proceedings of the 4th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS). Rome, Italy.
- Lanciano, C., & Salvini, R. (2020). Monitoring of Strain and Temperature in an Open Pit Using Brillouin Distributed Optical Fiber Sensors. Sensors, 20(1924).
- LeicaTM Geosystems. Leica NovaTM MS50. Dati Tecnici. . (2017). Tratto da www.leica-geosystems.com
- LeicaTM Geosystems. Leica Viva GNSS Ricevitore GS15. Dati Tecnici. (s.d.). Tratto da www.leica-geosystems.com
- Li, H.-N., Li, D.-S., & Song, G.-B. (2004). Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. *Eng. Struct.*, 1647-1657.
- Liu, T., Wei, Y., Song, G., Li, L., Jin, G., Wang, J., . . . Wang, J. (2018). Fibre optic sensors for coal mine hazard detection. *Measurement*, 211-223. doi:10.1016/j.measurement.2018.03.046.
- Lourakis, M. .., & Argyros, A. A. (2009). SBA: A software package for generic sparse bundle adjustment. ACM Transactions on Mathematical Software, 36, 1-30.
- Lowe, D. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. International Conference on Computer Vision, (pp. 1150-1157). Corfu, Greece.
- Lowe, D. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision , 60, 91-110.
- MacKinnon, T., & Murphy, J. (2004). Introduction & Simple Guide to Using the Leica Total Station. . Canada.
- Malaga-Starzec, K., Lindqvist, J., & Schouenburg, B. (2002). Experimental study on the variation in porosity of marble as a function of temperature. J. Geol. Soc., 205, 81-88.
- Mantovani, E., Babbucci, D., & Farsi, F. (1985). Tertiary evolution of the Mediterranean region: major outstanding problems. Boll. Geof. Teor. Appl., 105, 67-90.
- Markland , J. (1972). A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected. *Imp. Coll. Rock Mech. Res. Rep, 19*, 10.
- MarmoNews. (2015). Giornale del marmo. Tratto da http://www.marmonews.it/it/2015/04/20/i-tre-bacini-estrattivi-del-carrarese-edescrizione-delle-principali-cave/)
- Matano, F., Caccavale, M., Esposito, G., Grimaldi, G., Minardo, A., Scepi, G., . . . Sacchi, M. (2016). An integrated approach for rock slope failure monitoring: the case study of Coroglio cliff (Naples, Italy) – preliminary results. *Proceedings of 1st IMEKO TC-*4 International Workshop on Metrology for Geotechnics, (pp. 242-247). Benevento, Italy.
- Minardo, A., Catalano, E., Coscetta, A., Zeni, G., Zhang, L., Di Maio, C., . . . al., e. (2018). Distributed Fiber Optic Sensors for the Monitoring of a Tunnel Crossing a Landslide. *Remote Sens.*, 10, 1291. doi: https://doi.org/10.3390/rs10081291
- Moffat, R. A., Beltran, J. F., & Herrera, R. (2015). Applications of BOTDR fiber optics. Geomechanics and Engineering, 9(3), 397-414. doi:http://dx.doi.org/10.12989/gae.2015.9.3.397

- Molli, G., & Giorgetti, G. (1999). Meso, microstructural and petrological contraints on the tectono-metamorphic evolution of the Alpi Apuane Complex (NW Tuscany, Italy), Exhumation of metamorphic terranes. *Rennes Meeting, Abstract volume*, 54-55.
- Molli, G., & Meccheri, M. (2012). Structural inheritance and style of reactivation at mid-crustal levels: A case study from the Alpi Apuane (Tuscany, Italy). *Tectonophysics*, 579, 74-87. doi:https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.06.044
- Molli, G., Conti, P., Giorgetti, P., Meccheri, M., & Oesterling, N. (1999). Microstructure evolution in marble tectonites within a crustalscale shear zone (Alpi Apuane, Italy). Journal of Conference Abstracts, 4(727).
- Molli, G., Conti, P., Giorgetti, P., Meccheri, M., & Oesterling, N. (2000). Microfabric study on the deformational and thermal history of the Alpi Apuane marbles (Carrara marbles), Italy. *Journal of Structural Geology*, 22, 1809-1825.
- Molli, G., Giorgetti, G., & Meccheri, M. (2002). Tectono-metamorphic evolution of the Alpi Apuane Metamorphic Complex: new data and constraints for geodynamic models. *Bollettino della Società Geologica Italiana, volume speciale n.* 1, 789-800.
- Monserrat, O., Crosetto, M., & Luzi, G. (2014). A review of ground-based SAR interferometry for deformation. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 93, 40-48.
- Nalgire, T., Dahale, P. P., Mehta, A. A., & Hiwase, P. D. (2020). Slope Stability Analysis by GeoSlope . *Helix, 10*(1), 71-75. doi:https://doi.org/10.29042/2020-10-1-71-75
- Naruse, H., Uehara, H., Deguchi, T., & Fujihashi, K. (2007). Application of a distributed fibre optic strain sensing system to monitoring changes in the state of an underground mine. *Measurement Science and Technology*, 18(10). doi:10.1088/0957-0233/18/10/S23
- Nocedal, J., & Wright, S. J. (1999). Numerical optimization.
- Nosenzo, G., Whelan, B., Brunton, M., & al. (2013). Continuous monitoring of mining induced strain in a road pavement using fiber Bragg grating sensors. *Photonic Sens*, 3, 144-158. doi:https://doi.org/10.1007/s13320-012-0077-0
- Oggeri, C. (2000). Basic features for the assessment of the behaviour of supports in rock tunnelling using back-analysis. 7th Geotechnical Colloquium, Darmstadt Un. of Technology. Darmstadt, Germany.
- Oggeri, C., & Oreste, P. (2015). Underground Quarrying for Marble: Stability assessment through modelling and monitoring. International Journal of Mining Science (IJMS), ARC Journals, 35-42.
- Optosensing S.r.l. (2017). Tratto da https://www.optosensing.it/
- Ottria, G., & Molli, G. (2008). Superimposed brittle structures in the late-orogenetic extension of the Northern Appennine: results from the Carrara area. *Terra Nova*, 12(2), 52-59.
- Parco, A. (2017). Parco regionale delle Alpi Apuane. Tratto da http://www.parcapuane.it/
- Pertusati, P., Plesi, G., & CerrinaFeroni, A. (1977). Alcuni esempi di tettonica polifasata nella Falda Toscana . *Boll. Soc. Geol. Ital., 96*, 587–603.
- Pieruccioni, D., Galanti, Y., Biagioni, C., & Molli, G. (2018). Geology and tectonic setting of the Fornovolasco area, Alpi Apuane (Tuscany, Italy). Journal of Maps, 14(2), 357-367. doi:10.1080/17445647.2018.1476985
- Profeti, M. (2018). Relazione tecnica sul monitoraggio strumentale. Analisi dei dati dal 01/01/2018 al 05/06/2018. Technical Report. Coop. Cavatori Lorano.
- Profeti, M. (2018). Relazione tecnica sul monitoraggio strumentale. Analisi dei dati dal 05/06/2018 al 31/12/2018. Technical Report. Coop. Cavatori Lorano.
- Profeti, M., & Cella, R. (2010). Relazione sulla stabilità dei fronti Cava Lorano n. 22. Technical Report. Coop. Cavatori Lorano.
- Raju, D. (2017). Characterization Of Optical Fibers And Their Application In Distributed Brillouin Optical Fiber Sensors. Department of Engineering and Architecture. Università degli Studi di Parma.
- Ramsay, J. (1980). The crack-seal mechanism of rock deformation. Nature, 284, 135-139. doi:https://doi.org/10.1038/284135a0
- RegioneToscana. (2018). Piano Regionale Cave (L.R. 25 Marzo 2015 n. 35). Progetto di indagine tridimensionale della risorsa mineraria del sottosuolo delle Alpi Apuane. Relazione finale.
- Ridley, J. (1986). Modelling of the relations between reaction enthalpy and the buffering of reaction progress in metamorphism. *Mineralogical Magazine, 50*, 375-384.
- Rogers, A. (1999). Distributed optical-fibre sensing. Measurement Science and Technology, 10, R75-R99.
- Rouyet, L., Kristensen, L., Derron, M., Michoud, C., Blikra, L. H., Jaboyedoff, M., & Laukne, T. R. (2017). Evidence of rock slope breathing using ground-based InSAR. *Geomorphology*, 289, 152-169. doi:https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.005

- Rychkov, I., Brasington, J., & Vericat, D. (2012). Computational and methodological aspects of terrestrial surface analysis based on point clouds. Computers & Geosciences, 42, 64-70.
- Salvini, R. (2017). Analisi di Stabilità dei Pendii in Roccia. Dalle dispense di Conti P., Carmignani L., Disperati L., Massa G. CGT Università degli Studi di Siena.
- Salvini, R., Riccucci, S., Gulli, D., Giovannini, R., Vanneschi, C., & Francioni, M. (2014). Geological application of UAV photogrammetry and terrestrial laser scanning in marble quarrying (Apuan Alps, Italy). In G. M. Lollino, & F. Luino, *Engineering Geology for Society and Territory* (pp. 979-983). Springer.
- Salvini, R., Vanneschi, C., Riccucci, S., & et, a. (2015). Application of an integrated geotechnical and topographic monitoring system in the Lorano marble quarry (Apuan Alps, Italy). *Geomorphology, 241*, 209-223. doi:10.1016/j.geomorph.2015.04.009
- Sanderson, D. J. (1973). The development of fold axes oblique to the regional trend. Tectonophysics, 16, 55-70.
- Scandone, P. (1979). Origin of the Tyrrhenian Sea and Calabrian . Arr. Boll. Soc. Geol. It., 98, 27-34.
- Schallert, M., Hofmann, D., Habel, W., & Stahlmann, J. (2007). Structure-integrated fiber-optic sensors for reliable static and dynamic analysis of concrete foundation piless. The 14th International Symposium On: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, International Society for Optics and Photonics (2007). 6530. San Diego, California, United States: SPIE. doi:https://doi.org/10.1117/12.715620
- Schenato, L., Palmieri, L., Camporese, M., Bersan, S., Cola, S., Pasuto, A., . . . Simonini, P. (2017). Distributed optical fibre sensing for early detection of shallow landslides triggering. *Scientific Reports* (14686), 7.

Sgrenzaroli, M., & Vassena, G. P. (2007). Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner (Vol. 1). Brescia, Italia: Starrylink Editrice.

- Siegesmund, S., Ullmeyer, K., Weiss, T., & Tschegg, E. (2000). Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion. Int. J. Earth Sci., 89, 170-182.
- Snavely, N., N., S. S., & R., S. (2006). Photo Tourism: Exploring image collections in 3D. ACM Transactions on Graphics, 1-12.
- Snavely, N., Seitz, S., & Szeliski, R. (2008). Modeling the world from internet photo collections. International Journal of Computer Vision , 80, 189-210.
- Sony, S., Laventure, S., & Sadhu, A. (2019). A literature review of next-generation smart sensing technology in structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(3). doi:10.1002/stc.2321
- Sotto, C. d. (2017). Piano attuativo dei Bacini estrattivi delle Alpi Apuane del Comune di Vagli Sotto (Lu). Documento preliminare Valutazione Ambientale Strategica ai sensi dell'art. 23 della L.R.T. 10/2010 – Bacino Monte Pallerina. Committente A.T.I.
- Spetsakis, M., & Aloimonos, Y. (1991). A multi-frame approach to visual motion perception . International Journal of Computer Vision, 6, 245-255.
- Stampfli, G., Borel, G., Cavazza, W., & Mosar, J. Z. (2001). The Paleotectonic Atlas of the Peritethyan Domain. Eur. Geophy. Soc. .
- Stampfli, G., Marcoux, J., & Baud, A. (1991). Tethyan margins in space and time. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 87, 373-409.
- Startzman, R., & Wattenbarger, R. (1985). An improved computation procedure for risk analysis problems with unusual probability functions. Proc. symp. Soc. Petrolm Engnrs, bydrocarbon economics and evaluation. Dallas, USA.
- Stazzema, C. d. (2017). Piani di bacino di iniziativa pubblica dei bacini estrattivi nel Comune di Stazzema. Relazione idro-geomorfologica e di fattibilità.
- Szeliski, R., & Kang, S. (1994). Recovering 3-D shape and motion from image streams using nonlinear least squares. Journal of Visual Communication and Image Representation, 5, 10-28.
- Tirreno, I. (2018, 02 12). *iltirreno.gelocal.it*. Tratto il giorno 07 01, 2020 da Il Tirreno: http://iltirreno.gelocal.it/massa/cronaca/2018/02/12/news/ecco-le-produzioni-cava-per-cava-1.16467555
- Trimble. (2014). Trimble TX8 3D Laser Scanner User Guide. Version 1.00. Revision B. Trimble .
- UNESCO. (s.d.). UNESCO. Tratto il giorno 07 17, 2020 da GEOPARCHI: http://www.unesco.it/it/ItaliaNellUnesco/Detail/187
- Valley, B., Madjdabadi, B., Kaiser, P., & Dusseault, M. B. (2012). Monitoring mining-induced rock mass deformation using distributed strain monitoring based on fiber optics. *ISRM International Symposium - EUROCK 2012, 28-30 May* (p. 14). Stockholm, Sweden: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Wang, S., & Luan, L. (2014). Analysis on the security monitoring and detection of mine roof collapse based on BOTDR technology. International Conference on Soft Computing in Information Communication Technology, (pp. 83-86). Taipei, China.
- Wang, S., & Luan, L. (2014). Analysis on the security monitoring and detection of mine roof collapse based on BOTDR technology. International Conference on Soft Computing in Information Communication Technology., (pp. 83–86). Taipei, China.

- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314. doi:https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021
- Wolf, P. R., & Dewitt, B. A. (2000). Elements of Photogrammetry with Applications in GIS (3rd Edition ed.). McGraw-Hill.
- Xiao, H., & Huang, J. (2013). Experimental study of the applications of fiber optic distributed temperature sensors in detecting seepage in soils. *Geotechnical Testing Journal*, 36(3), 360-368. doi:https://doi.org/10.1520/GTJ20120096

Yun, C.-B., & Min, J. (2011). Smart sensing, monitoring, and damage detection for civil infrastructures. KSCE J. Civ. Eng., 15, 1-14.

Zaccagna, D. (1932). Descrizione Geologica delle Alpi Apuane. Mem. Descrittive Carta Geol., 25, 1-440.

- Zhao, Z., Zhang, Y., Li, C., Wan, Z., Li, Y., Wang, K., & Xu, J. (2015). Monitoring of coal mine roadway roof separation based on fiber Bragg grating displacement sensors. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 74, 128–132. doi:10.1016/j.ijrmms.2015.01.002
- Zhenglin, Z., Gao, L., Sun, Y., Zhang, Q., & Zeng, P. (2019). Strain Transfer Law of Distributed Optical Fiber Sensor. *Chin. J. Lasers*, 46.
- Zhigang, T., Chun, Z., Yong, W., Jiamin, W., Manchao, H., & Bo, Z. (2018). Research on Stability of an Open-Pit Mine Dump with Fiber Optic Monitoring . *Geofluids, 2018* (Article ID 9631706), 20. doi:10.1155/2018/9631706
- Zhou, Z., He, J., Yan, K., & Ou, J. (2008). Fiber-reinforced polymer-packaged optical fiber sensors based on Brillouin optical timedomain analysis. Opt. Eng., 47, 014401-014410.
- Zrelli, A., & Ezzedine, T. (2018). Design of optical and wireless sensors for underground mining monitoring system. *Optik, 170*, 376-383. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.04.021

Allegato Nº 1: Dati della RTS



































212








Allegati





Allegato Nº 2: Dati del sistema di monitoraggio geotecnico

















































































