



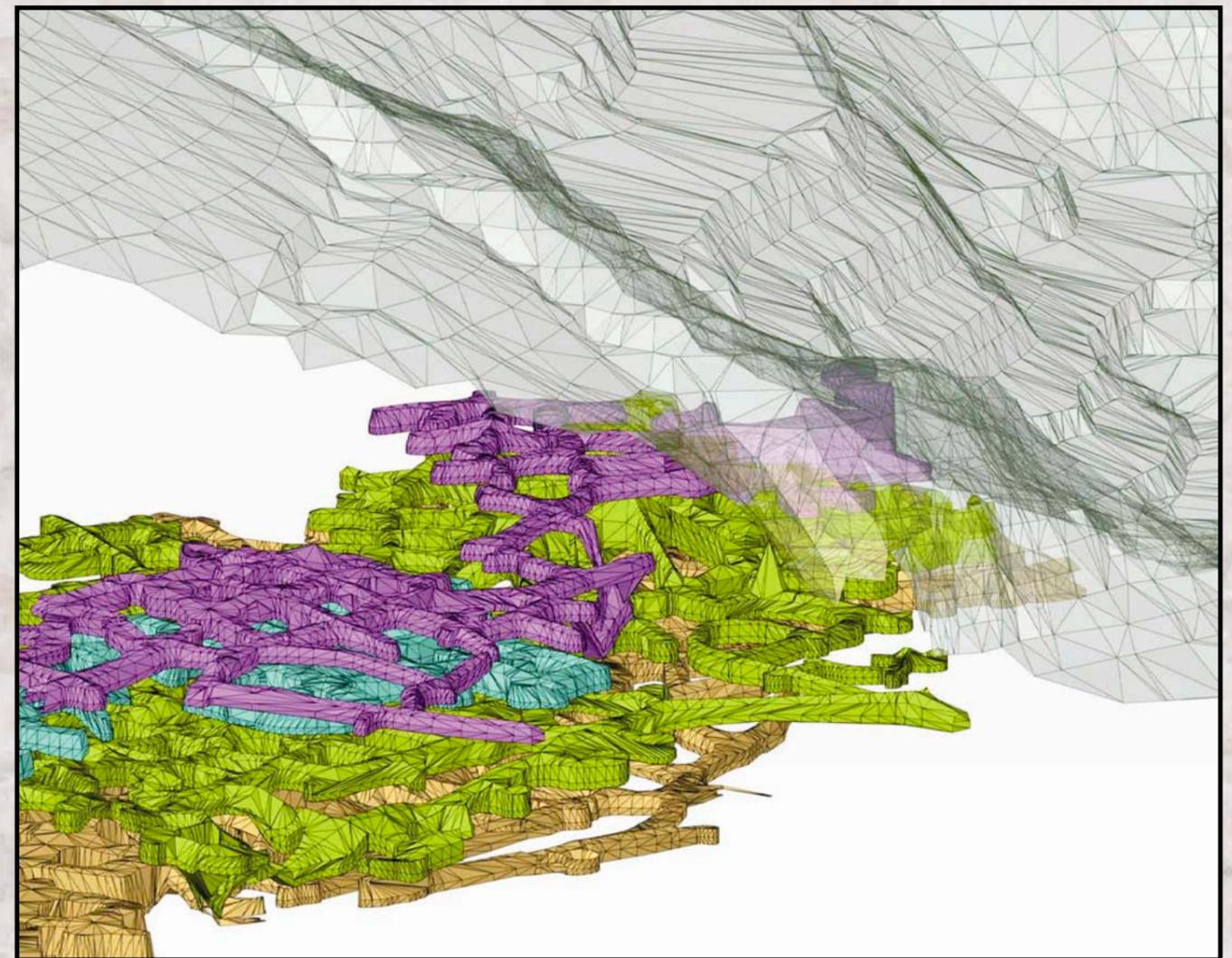
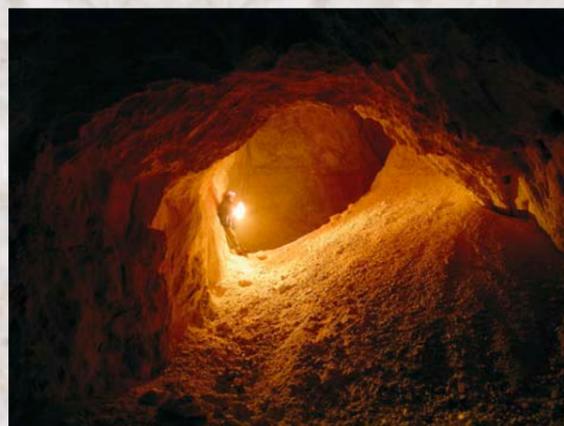
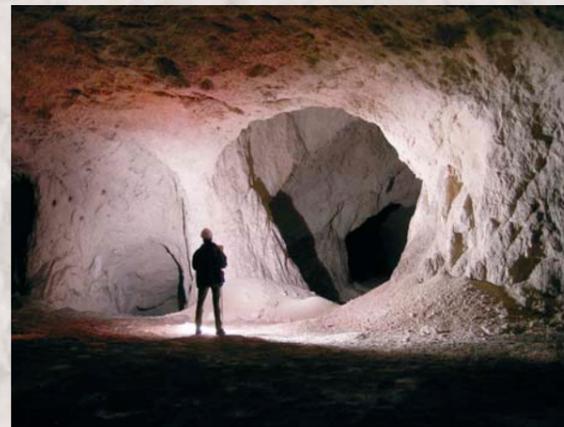
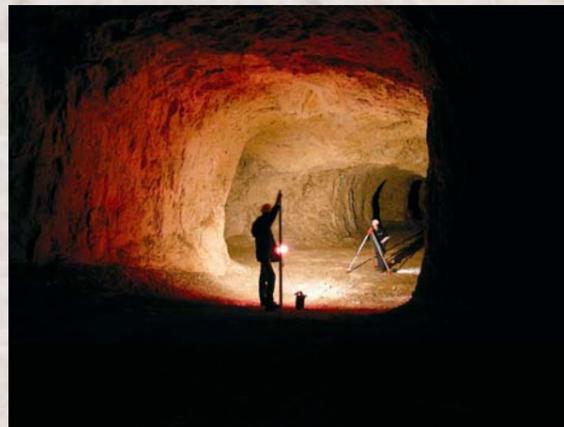
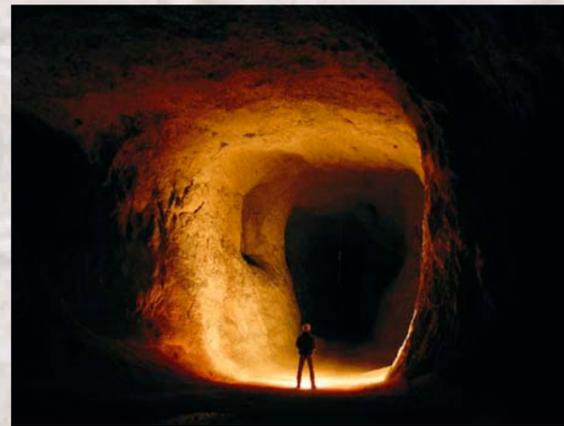
REGIONE AUTONOMA
FRIULI VENEZIA GIULIA

DIREZIONE CENTRALE AMBIENTE
E LAVORI PUBBLICI

servizio geologico

IL “MARMORINO” DI CANEVA UNA RISORSA STRATEGICA NEL FRIULI VENEZIA GIULIA

Realizzazione della
Carta Geologico - Tecnica della Risorsa Marmorino
e definizione delle **Linee Guida** per il suo utilizzo



 **dica**

Università di Trieste

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

ENTE AFFIDATARIO

Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia

Direzione centrale ambiente e lavori pubblici

Servizio geologico: Dott. Geol. Tiziano Tirelli – Direttore del Servizio

Dott. Geol. Maurizio Costanzo

Dott.ssa Geol. Chiara Piano

STRUTTURA INCARICATA

Università di Trieste – D.I.C.A. (Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale)

Prof. Ing. Eugenio Castelli – Responsabile Scientifico della Convenzione

Prof. Rinaldo Nicolich

Dott.ssa Ing. Elisabetta Lucchese

CON I CONTRIBUTI DI:

Dott.ssa Ing. Erica Ambrosi

Dott.ssa Geol. Valeria Bolognani

Dott. Geol. Carlo Brusca

Dott. Geol. Michele Camin

Dott. Geol. Roberto Mandler

Dott. Geol. Stefano Russo

Dott. Geol. Massimo Valent

L.G.T. Laboratorio Geotecnico S.r.l.

In copertina:

Prima: Particolare del modello digitale del terreno con i fusi tridimensionali delle gallerie:
zona Pedemonte – Valmadonna.

Quarta: Fotografie delle varie sezioni di galleria rilevate e ricostruite tridimensionalmente.

1. IL “MARMORINO”

“Marmorino” è la denominazione data localmente ad un calcare che viene estratto nella Regione Friuli Venezia Giulia dal giacimento situato alla base del massiccio del Cansiglio (Figura 1), nella zona di Caneva di Sacile (PN).

Le particolari peculiarità fisico-chimiche che caratterizzano il marmorino sono strettamente legate alla genesi geologica e geomorfologia del sito, che ha fatto sì che il calcare si presenti estremamente puro (99,6% di carbonato di calcio), ma anche pressoché privo di metalli pesanti quali Al, Fe, Pb, As, Cr, nonché di silice, e con elevata bianchezza. Il bassissimo tenore di silice, a prescindere dall'utilizzo finale del prodotto, è un importante pregio sotto il profilo sanitario dell'ambiente di lavoro, sia in cava che negli stabilimenti di macinazione.

Pochi carbonati in altre parti del mondo hanno caratteristiche simili, ma non tutti abbinano le caratteristiche chimiche del marmorino del bacino di Caneva: il basso contenuto di metalli pesanti e magnesio lo rende infatti materia prima indispensabile e quindi “strategica” per alcune applicazioni chimiche, farmaceutiche ed alimentari, e per questo viene venduto in tutto il mondo ed utilizzato dalle più importanti società internazionali del settore.

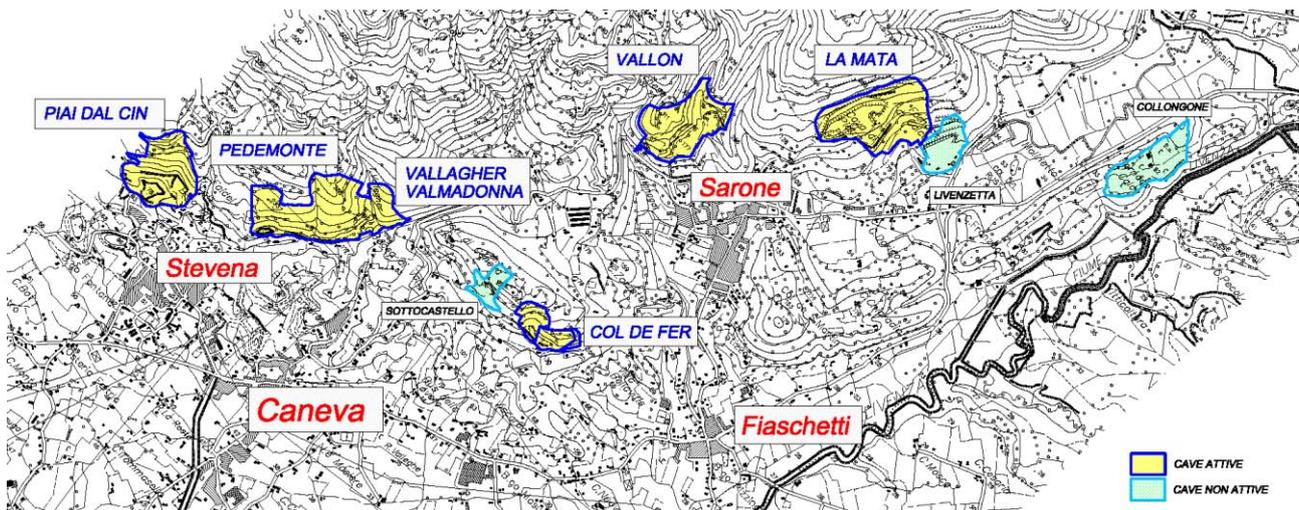


Figura 1 Corografia con evidenziate le cave nell'area di studio

In ambito interregionale non esistono altre alternative territoriali che permettano l'estrazione di un materiale con caratteristiche di purezza chimica paragonabili con quelle del marmorino. In Italia i maggiori poli per la produzione di carbonato di calcio micronizzato sono due, uno in Toscana ed uno in Umbria, tuttavia il materiale estratto non raggiunge gli standard di qualità e purezza propri del marmorino di Caneva. In Europa i principali giacimenti di carbonato di calcio si trovano in Francia, Turchia, Spagna e Germania; tra questi carbonati naturali, soltanto quello estratto a Percy in Francia raggiunge il tenore del 99%, mentre tutti gli altri calcari coltivati presentano tenori più bassi.

Il minerale estraibile dal giacimento di Caneva è pertanto ritenuto il migliore in Europa per la sua purezza chimica ed è quindi una risorsa mineraria strategica in quanto estremamente ricercato per numerosi usi industriali.

Il marmorino presenta caratteristiche di composizione e bianchezza tali da poter essere considerato minerale mercantile già all’atto dell’estrazione; infatti non contiene materiale sterile e pertanto non richiede particolari processi di arricchimento. La lavorazione che esso subisce una volta estratto dalla cava a seconda delle applicazioni e dei mercati a cui è destinato (macinazione, micronizzazione a secco e classificazione) è quindi esclusivamente un processo di trasformazione da minerale grezzo a polvere micronizzata, con l’ottenimento di prodotti caratterizzati da differenti granulometrie.

Un sistema di certificazione qualità ISO9001 ed altre certificazioni omologate da Enti certificatori internazionali garantiscono che il prodotto finito sia stato sottoposto in tutto il suo ciclo produttivo a controlli e procedure che l’abbiano reso idoneo a mercati particolarmente sofisticati quali il farmaceutico (dove, tra l’altro, viene utilizzato come principio attivo) e l’alimentare.

Numerosi sono i settori nei quali trova un utilizzo “strategico”, oltre a quello farmaceutico ed alimentare: carta; collanti, sigillanti e stucchi; fertilizzanti ed alimenti per animali; calci speciali; pitture e vernici; vetriere e cristallerie; resine sintetiche; plastica e gomma; cosmesi e prodotti di pulizia casa; materiali inerti per edilizia.

La gamma di produzione del prodotto finito varia da una granulometria con tetto massimo a 5 micron, fino ad una granulometria di 6 millimetri.

Il mercato mondiale del carbonato di calcio micronizzato di granulometrie inferiori ai 100 micron supera i 30 milioni di tonnellate annue e viene generalmente suddiviso in due gruppi in base alla provenienza del carbonato di calcio:

- il carbonato di calcio naturale o G.C.C., (“Ground Calcium Carbonate”);
- il carbonato di calcio precipitato o P.C.C., (“Precipitated Calcium Carbonate”), che è sintetico ed ha origine da un processo chimico.

Il carbonato di calcio naturale (G.C.C.) è derivato da roccia di calcare o marmo, finemente macinata e micronizzata, mentre il carbonato di calcio sintetico (P.C.C.) è ottenuto per precipitazione trattando una sospensione acquosa di calce idrata con anidride carbonica.

Il carbonato di calcio naturale, dal punto di vista chimico, è uguale a quello precipitato. La differenza si manifesta invece nella forma, nella purezza, nel controllo delle dimensioni e nel campo di applicazione. La tecnologia di lavorazione del carbonato di calcio naturale non permette infatti di ottenere un prodotto perfettamente uguale a quello precipitato, che risulta essere estremamente bianco e con particelle di dimensioni controllate ed uniformi. Non vi è attualmente una diretta concorrenza tra il G.C.C. ed il P.C.C., visto che il rapporto di prezzo vede il carbonato di calcio naturale micronizzato circa 10 volte meno costoso di quello di derivazione chimica. Il carbonato di calcio, che già allo stato naturale si presenta con caratteristiche di straordinaria purezza, può garantire ottimi risultati nei vari settori d’impiego, senza necessità di ulteriori passaggi industriali, con risparmio di risorse energetiche ed economiche. Il marmorino estratto a Caneva si fa preferire, sotto molti punti di vista, oltre che al carbonato di calcio naturale estratto in altre località anche al carbonato di calcio precipitato. La materia prima usata per produrre G.C.C. può avere infatti una marcata influenza sull’uso finale del prodotto. Il G.C.C. offre svariate caratteristiche positive e può venire trattato e lavorato in numerose gradazioni, per migliorare le proprietà delle formulazioni nelle quali viene inserito, come purezza chimica, bianchezza, opacità, forma, dimensione delle particelle e distribuzione granulometrica, proprietà superficiali, proprietà reologiche, viscosità, assorbimento in acqua e in olio, densità di massa.

2. RICOSTRUZIONE 3D DEL SOPRASSUOLO E DEL SOTTOSUOLO DELL'AREA DI STUDIO

Al fine di poter valutare gli effetti delle modalità d'escavazione che hanno caratterizzato e caratterizzano l'attività di valorizzazione del marmorino, si è predisposto un modello tridimensionale della superficie topografica del terreno basato sulla Carta Tecnica Regionale, integrata con la ricostruzione tridimensionale delle cavità presenti nell'area di studio. A tal fine sono stati raccolti ed integrati entro la Carta Tecnica Regionale a scala 1:5.000, per ciascuna cava rientrante nella zona di interesse, i rilievi planoaltimetrici relativi allo stato di fatto più recente ed a conclusione delle operazioni di coltivazione per lo stato di progetto attualmente autorizzato.

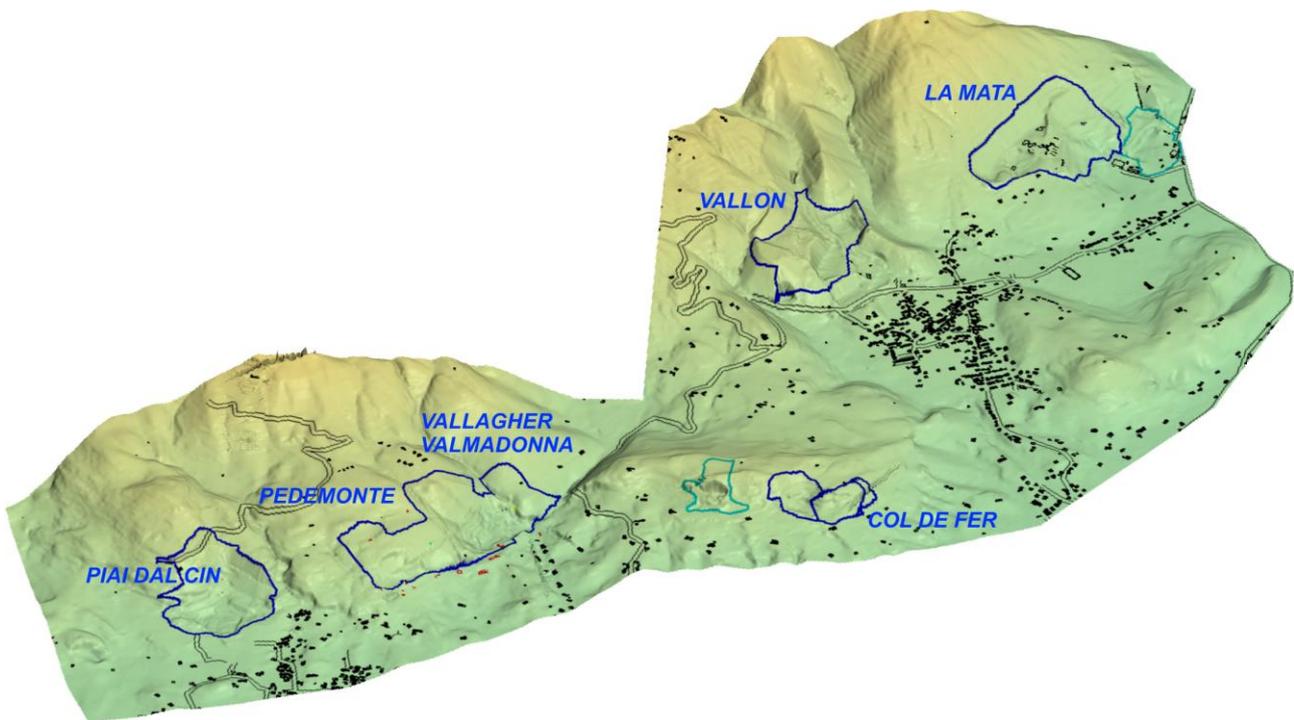


Figura 2 Modello digitale del terreno e carta tecnica regionale aggiornata con le planimetrie dello stato di fatto delle singole cave attive i cui limiti sono evidenziati in blu

Rilevamento delle gallerie di coltivazione abbandonate

L'attività estrattiva della risorsa mineraria "marmorino" nell'area di Caneva si è prevalentemente avvalsa in passato della tecnica di escavazione definita a "camere e pilastri", con la realizzazione di un'estesa rete di gallerie. Queste hanno avuto un particolare sviluppo nel comprensorio delle cave "Pedemonte", "Valmadonna" e "Vallagher", dove nel sottosuolo vari chilometri di cunicoli si presentano con andamenti complessi e ramificati, e su più livelli sovrapposti. Le attuali attività di escavazione dalla superficie, ma anche un eventuale nuovo impulso della coltivazione in sotterraneo, necessitano entrambi di una migliore conoscenza delle gallerie esistenti, per poter valutare le potenzialità minerarie tenendo in considerazione le possibili interferenze tra tali attività e le gallerie già esistenti. In quest'area sono stati pertanto effettuati dei rilievi geometrici, riguardanti sia l'andamento altimetrico delle gallerie che la loro dimensione. Nell'area delle cave "Pedemonte", "Valmadonna" e "Vallagher", i rilievi hanno interessato quattro livelli di gallerie, già denominati con le ri-

spettive quote (in metri s.l.m.): livello "80 m", "100 m", "114 m" e "125 m". Sono state inoltre rilevate le rampe di collegamento tra i diversi livelli (rampe "80 ÷ 100 m", "114 ÷ 125 m", "100 ÷ 125 m") e numerose comunicazioni minori tra i livelli stessi, costituite da fornelli ad andamento verticale, impiegati generalmente in passato per la movimentazione ed il carico del minerale. Oltre al comprensorio delle cave citate, sono state rilevate le gallerie in alcune aree di cava più isolate: nella cava "Caprioli" (dove è presente un unico livello a quota "190 m") e nella cava "Chiaradia" (unico livello a quota "105 m") in Val Civrera. Per tutte le gallerie di cava erano già disponibili delle planimetrie, redatte a cura del Corpo delle Miniere ai tempi delle attività di estrazione in sotterraneo. Dai primi sopralluoghi effettuati a fine 2005, queste planimetrie risultavano abbastanza accurate, con una buona corrispondenza con i cunicoli attuali. I primi sopralluoghi in galleria avevano però evidenziato, all'interno di uno stesso livello, la presenza di variazioni anche significative di quota (rispetto alla quota "simbolica" di ogni livello), per le quali non si disponeva di alcuna informazione. Un'ulteriore importante incognita era inoltre rappresentata dalla dimensione dei cunicoli, che presentano forme e sezioni molto diversificate tra loro, tali da non poterli assimilare a forme standard con dimensioni costanti. Pertanto, per poter predisporre una corretta modellazione tridimensionale delle gallerie in sotterraneo, si rendeva necessario, pur partendo dai rilievi planimetrici già disponibili, sia un rilievo dimensionale delle sezioni trasversali delle gallerie, che una verifica altimetrica delle stesse.

Livellazione geometrica delle gallerie. Variazioni altimetriche frequenti e non definite nella cartografia disponibile hanno reso evidente la necessità di una verifica altimetrica dei livelli e delle rampe di collegamento tra i livelli stessi. Ciò ha comportato la programmazione di livellazioni geometriche lungo i principali allineamenti delle gallerie, da collegare a caposalda altimetrici esterni. La livellazione all'interno del reticolo delle gallerie "Pedemonte", "Valmadonna" e "Vallagher" ha quindi comportato la creazione di due nuovi caposalda esterni, con stazioni G.P.S.. Per le altre cave, la livellazione è stata collegata a caposalda regionali disponibili, presenti all'esterno in prossimità degli imbocchi. Per le misure di livellazione è stato utilizzato un livello Sokkisha C40. Le basi di livellazione sono risultate in genere limitate a 20 ÷ 25 metri, a causa dell'elevata ramificazione dei cunicoli, e in genere è stato possibile eseguire la chiusura delle misure utilizzando i diversi possibili tracciati. Vista l'impossibilità di livellare tutte le gallerie, i rilievi hanno interessato i principali cunicoli, mentre tra i diversi punti di livellazione (che generalmente coincidevano con una sezione trasversale) e lungo le gallerie secondarie, le quote sono state interpolate, in modo da attribuire a ciascuna sezione trasversale una quota altimetrica, con una precisione ritenuta accettabile; in altre aree, più periferiche o di difficile accesso, le quote sono state invece stimate su base morfologica, partendo dalle misure più prossime.

Rilievi di sezioni trasversali con distanziometro laser. Considerata la notevole estensione complessiva delle gallerie ed il loro particolare andamento molto ramificato, con tratti omogenei molto brevi e con intersezioni in media ogni 15 ÷ 20 metri di progressione, al fine di ottenere una rappresentazione corretta, si è deciso di rilevare almeno una sezione trasversale per ogni tratto omogeneo di galleria, ed un'ulteriore sezione in corrispondenza degli incroci, che generalmente presentano un ampliamento dimensionale. Così, in fase di programmazione delle indagini, veniva stimato un numero complessivo massimo pari a 1500 sezioni da rilevare. Una volta definito il numero delle sezioni da rilevare, si doveva valutare un idoneo metodo di rilievo, che consentisse una certa velocità operativa, senza appesantire con un eccessivo dettaglio il previsto data base per la successiva fase di elaborazione del modello tridimensionale. Il rilievo è stato effettuato con un distanziometro palmare (Sokkia MiniMeter MM30), scelto per la buona qualità delle misure di distanza, abbinata ad una notevole compattezza dello strumento. Il distanziometro palmare veniva

montato su un'apposita asta realizzata con un supporto rotante, così predisposto per il rilievo di 5 punti principali per ogni sezione (punto "A" in lato sinistro, "B" a 45°, "C" in calotta, "D" a 45°, "E" in destra) (Figura 3). Il centro di rotazione del distanziometro veniva posizionato ad un'altezza fissa di 140 centimetri dal piano, sia per consentire una lettura facilitata delle distanze rilevate, che per eseguire le misure di sezione del paramento roccioso senza considerare i depositi di detrito accumulati alla base dei piedritti.

I rilievi all'interno del complesso delle gallerie delle cave "Pedemonte", "Valmadonna" e "Vallagher", che hanno interessato uno sviluppo complessivo pari a circa 20.150 metri, sono stati effettuati nei mesi di gennaio-marzo 2006, mentre quelli nelle cave "Caprioli" e "Chiaradia" hanno interessato il successivo periodo di aprile-maggio. In totale, sono state rilevate 1136 sezioni trasversali di gallerie. Mediamente, le sezioni rilevate mostrano una larghezza (tra i punti "A"- "E") di 5 ÷ 10 metri ed un'altezza massima (del punto "C" in calotta) di 4 ÷ 8 metri da terra. Durante i rilievi di sezione nelle gallerie della cava "Valmadonna", si osservava la presenza nel livello "80" di altezze di volta maggiori, fino a 10 ÷ 15 metri da terra, tanto da non risultare più efficacemente rappresentate dal metodo di rilievo "a 5 punti" (limitato dall'inclinazione fissa a 45° per i punti inclinati "B" e "D").

Si decideva così di modificare graficamente la forma di 38 sezioni maggiorate in altezza, secondo la soluzione grafica rappresentata in Figura 3. Anche queste sezioni modificate venivano poi inserite nel data base per la modellazione tridimensionale. In un momento successivo, un certo numero di sezioni maggiorate venivano rimisurate con maggiore dettaglio con uno strumento laser-profiler. I rilievi delle sezioni hanno interessato tutte le gallerie accessibili. Purtroppo, alcune aree risultanti nelle planimetrie originali non sono state rilevate, perché ormai più o meno già raggiunte dall'attività di escavazione dalla superficie, o perché inagibili a causa di crolli sotterranei.

Rilievi di dettaglio con laser-profiler di alcune sezioni trasversali significative. Come accennato in precedenza, in corrispondenza di un'area del livello "80" della cava "Valmadonna", alcuni cunicoli si presentavano con dimensioni maggiorate in altezza; è probabile che qui, in passato, vista la buona qualità merceologica del marmorino, e soprattutto la stabilità geostatica delle gallerie, si sia proceduto con approfondimenti graduali del piano delle gallerie stesse, così da raggiungere altezze in calotta anche di 10 ÷ 15 metri da terra. Per meglio rilevare queste sezioni maggiorate e verificarne l'applicabilità, si è impiegato un laser-profiler, una strumentazione piuttosto sofisticata che anticipa lo sviluppo del moderno laser-scanner e comprende un supporto con un distanziometro rotante, con movimento programmabile da un computer (Figura 3).

Analisi dei dati, digitalizzazione ed elaborazione 3D delle gallerie

Nel processamento delle registrazioni con G.P.S. ci si è riferiti alla stazione Master FVG di Pordenone, in quanto stazione ubicata nelle più immediate vicinanze e opportunamente inquadrata nella Rete Nazionale G.P.S. I.G.M. '95. Si sono così ottenute prima le necessarie coordinate W.G.S. '84 e successivamente, mediante l'applicazione di opportuni parametri di rototraslazione, le coordinate Gauss-Boaga coerenti con quelle della Carta Tecnica Regionale. Per i rilievi sui nuovi caposalda G.P.S. si sono impiegati ricevitori G.P.S. geodetici Ashtech. Una volta rilevate tutte le sezioni trasversali e attribuita loro una quota altimetrica (per livellazione, interpolazione o approssimazione), queste sono state ordinate in un data base appositamente strutturato. Per costruire le sezioni trasversali, tridimensionali e georeferenziate, si è realizzato infine uno specifico software, che per ogni sezione legge le relative informazioni e ricostruisce le sezioni grafiche 3D, in vari formati, per poi essere utilmente impiegate dalle procedure di modellazione tridimensionale dei cunicoli (Figura 3). Queste elaborazioni riguardano la zona di territorio laddove si è riscontrata la

presenza di gallerie: le cave della Val Civrera, la cava Chiaradia, la cava Pedemonte, la cava Valmadonna e la cava Caprioli. I punti rilevati per ciascuna sezione hanno consentito di adattare, puntualmente in corrispondenza di ciascuna sezione, l'andamento planoaltimetrico dei livelli delle gallerie, ottenendo così una dettagliata ricostruzione tridimensionale del loro andamento. Il Digital Elevation Model (D.E.M.) delle diverse gallerie è stato ottenuto mediante Civil Design 5.0, applicativo di AutoCAD, che permette di creare un modello numerico a triangoli utilizzando come base punti o polilinee quotate. Al fine di riprodurre nel modo più fedele possibile l'andamento delle gallerie, l'impronta planimetrica delle stesse è stata adattata in corrispondenza di ciascun piano quotato, e cioè rispettivamente alla base ed alla sommità del piedritto, nei punti più significativi lungo la calotta ed in corrispondenza della volta. Costruito lo scheletro tridimensionale dei diversi livelli è stato creato un modello numerico a triangoli (D.T.M.) per ogni coppia di polilinee vicine. L'unione di tutti i D.T.M. ha poi permesso di ricostruire l'intero fuso tridimensionale. Dove non è stato possibile effettuare il rilievo topografico in galleria, si sono utilizzati i dati reperibili dalle tavole dello stato di fatto e di progetto delle singole cave e dalla documentazione fornita dall'ENEL per la galleria idroelettrica che attraversa una parte significativa della zona di studio; la sezione tipo delle gallerie è stata ipotizzata regolare, mentre per i livelli rilevati in corrispondenza della galleria dell'ENEL si sono utilizzate le geometrie desunte dagli elaborati grafici ENEL. Nella zona Piai Dal Cin, dove non è stato possibile effettuare alcun rilievo in sotterraneo per l'opposizione dei concessionari attivi in Regione Veneto, alcuni livelli di gallerie sono definiti con una quota compresa in un intervallo di valori; per considerare questa incertezza nella quota si è scelto, a favore di sicurezza, di considerare come presenti due gallerie uguali planimetricamente, ma a quote diverse, che corrispondono rispettivamente al limite minore e maggiore dell'intervallo indicato nelle varie tavole. Una corretta valutazione della posizione delle gallerie rispetto alla superficie topografica, in grado di mostrare la situazione più aggiornata possibile e nello stesso tempo fornire un quadro complessivo delle diverse cave di marmorino nel territorio, è stata ottenuta integrando la Carta Tecnica Regionale con i dati relativi allo stato di fatto e di progetto di ogni cava. In questo modo si sono ottenute due planimetrie, una relativa allo stato di fatto (di data variabile per ciascuna cava in quanto funzione dello specifico progetto) ed una all'ultimazione dei lavori previsti dal progetto stesso. L'elaborazione dei dati planimetrici ha permesso di ottenere un modello numerico a triangoli (D.T.M.) dello stato di fatto e di quello di progetto, attraverso il quale sono facilmente estrapolabili delle sezioni trasversali in grado di evidenziare l'interazione tra i diversi livelli di gallerie e la superficie topografica. Situazioni particolari, come l'andamento delle rampe di collegamento tra le varie gallerie o le zone d'imbocco delle stesse presenti sulla superficie, possono in questo modo essere facilmente rappresentate in sezione. L'ambiente digitale entro cui si è operato è quello di Autocad, in grado di fornire una completa visualizzazione 3D dei modelli e delle informazioni negli stessi contenuti, ed una estrazione rapida di sezioni rappresentative.

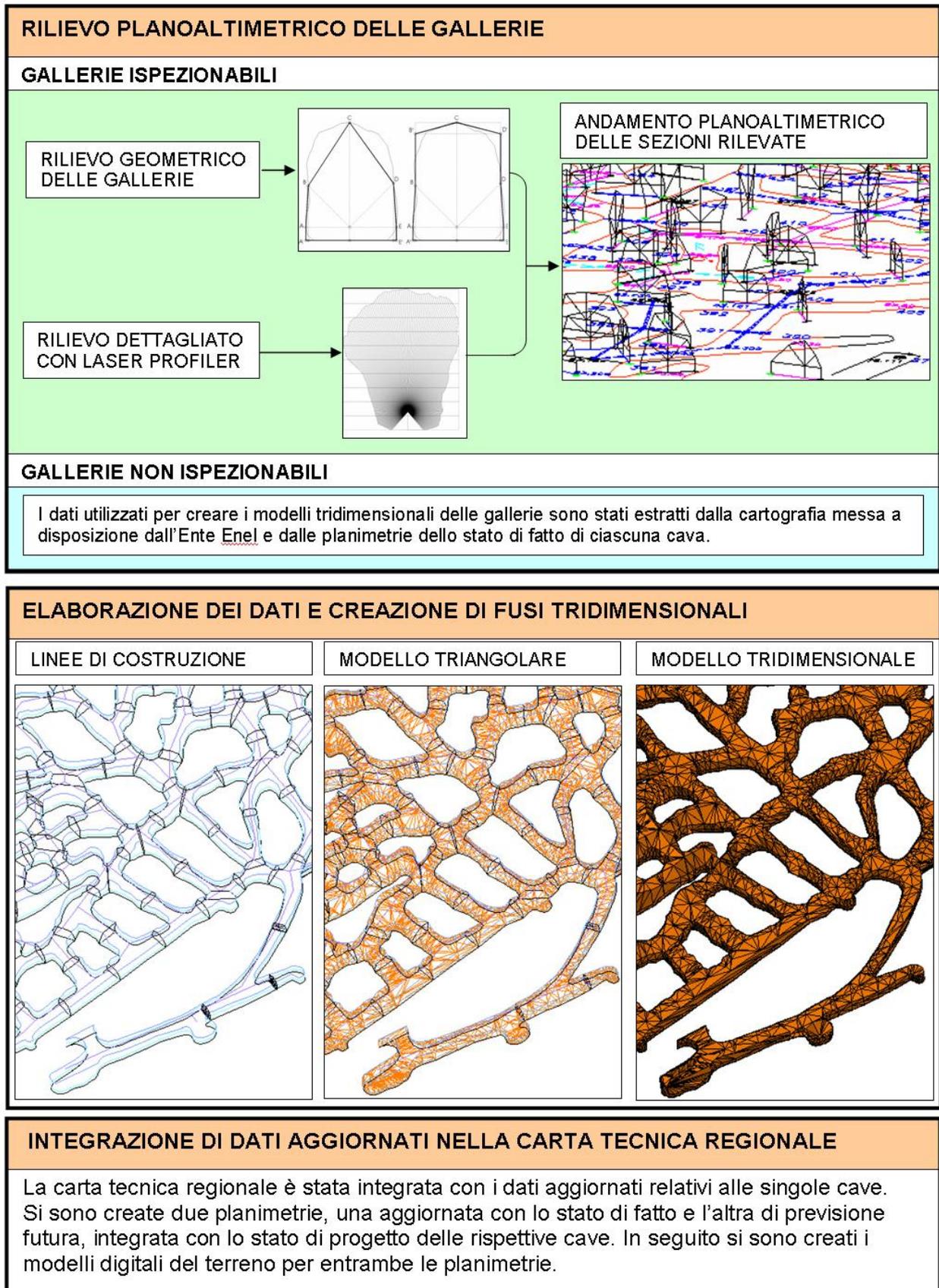


Figura 3 Elaborazione dati e creazione modelli tridimensionali

3. RILEVAMENTO GEOLOGICO

La realizzazione della cartografia geologico-tecnica della risorsa “marmorino” ha comportato l’effettuazione di un dettagliato rilevamento geologico-strutturale di superficie: questo tipo di rilievo è stato condotto su un’area di circa 20 chilometri quadrati comprendente tutto il comprensorio minerario. Alle osservazioni di superficie, è stato abbinato un rilevamento geostrutturale in sottterraneo nella rete di gallerie dell’area “Pedemonte-Valmadonna”, sia al livello di quota 80 metri s.l.m. che al livello di quota 100 metri s.l.m.. Si è così potuto operare una serie significativa di misure di carattere strutturale, avendo la possibilità di condurre osservazioni in tre dimensioni. A partire dalla giacitura delle faglie e dei contatti litologici ricostruiti durante i sopralluoghi sotterranei (contatto marmorino-molassa, contatto marmorino-calcarei), si è potuto ricostruire un modello bidimensionale attraverso sezioni geologiche interpretate. Alcuni dati stratigrafici di sondaggi e misurazioni di falda effettuate al livello di quota 80 metri s.l.m. hanno permesso di ricostruire localmente la geometria del “top” delle argille mioceniche. L’analisi condotta ha permesso di ipotizzare che il livello di interesse minerario continui a essere presente, con spessori compresi tra 25 e 35 metri, anche al di sotto del livello più basso delle gallerie. L’attività svolta ha portato alla descrizione di una serie di affioramenti già noti e di alcuni meno noti del comprensorio estrattivo di Caneva e Sarone. I fronti osservati nelle aree di cava (Figure 4 ÷ 6) e gli affioramenti delle zone altimetricamente più elevate consentono di inquadrare l’area in un contesto deformativo polifasico, in cui sforzi orientati in modo differente nel tempo hanno agito su masse rocciose già deformate. Da un primo settore centrale (Castello di Caneva – Sarone – Col de San Martin) di circa 10 chilometri quadrati, si è poi successivamente proceduto ad effettuare ed integrare i rilevamenti sia verso nord-est (zona di Col Longone e Livenzetta) che verso nord-ovest in territorio veneto (Cordignano-Sarmede) dove termina il marmorino.



Figura 4 Elaborazione tridimensionale dell’ortofoto della Cava Piai Dal Cin



Figura 5 Elaborazione tridimensionale dell'ortofoto delle Cave Pedemonte, Valmadonna e Vallagher



Figura 6 Elaborazione tridimensionale dell'ortofoto delle Cave Caprioli e Col de Fer

Le osservazioni di tipo litologico-stratigrafico-strutturale sono state sistematicamente raccolte e catalogate mediante la descrizione di punti-stazione, in cui sono state riportate con un numero progressivo tutte le osservazioni relative alla descrizione dell'affioramento che sono state successivamente inserite in un GIS dedicato. Ne è derivata una Carta Geologica, alla scala 1: 5.000, in cui si è dato risalto alle unità litologiche omogenee, come descritte nella legenda della carta stessa (Figura 7), ed alle principali strutture tettoniche e relativi cinematismi (Figure 8 e 9).

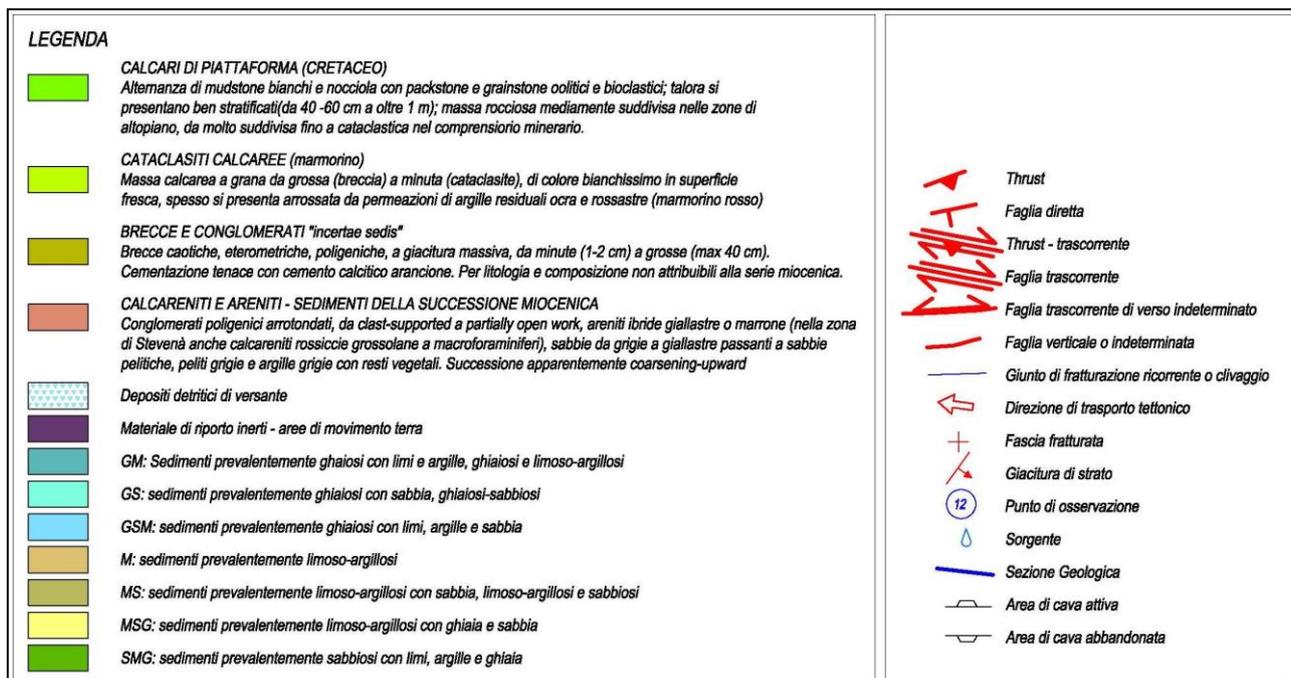


Figura 7 Legenda della carta geologica

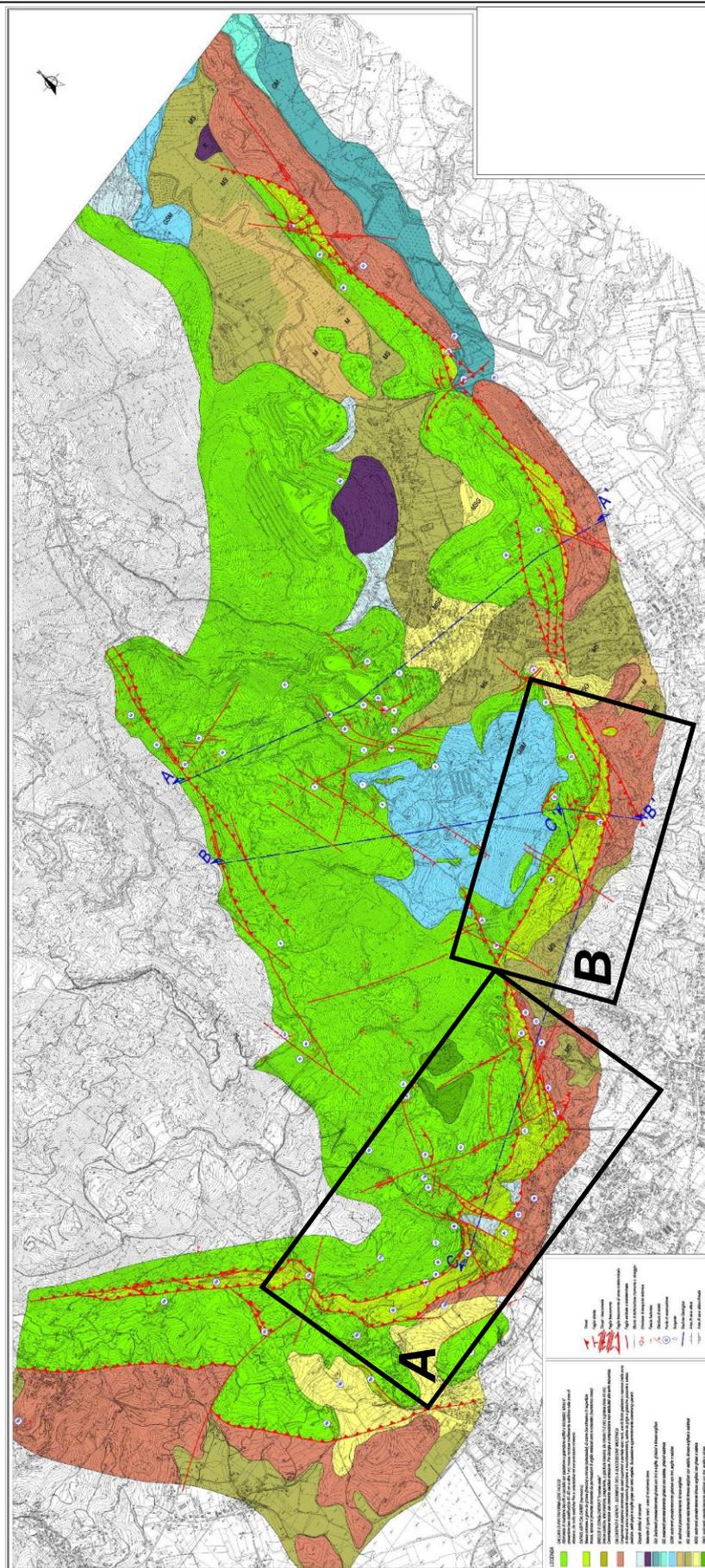


Figura 8 Carta geologica della zona di Sacile

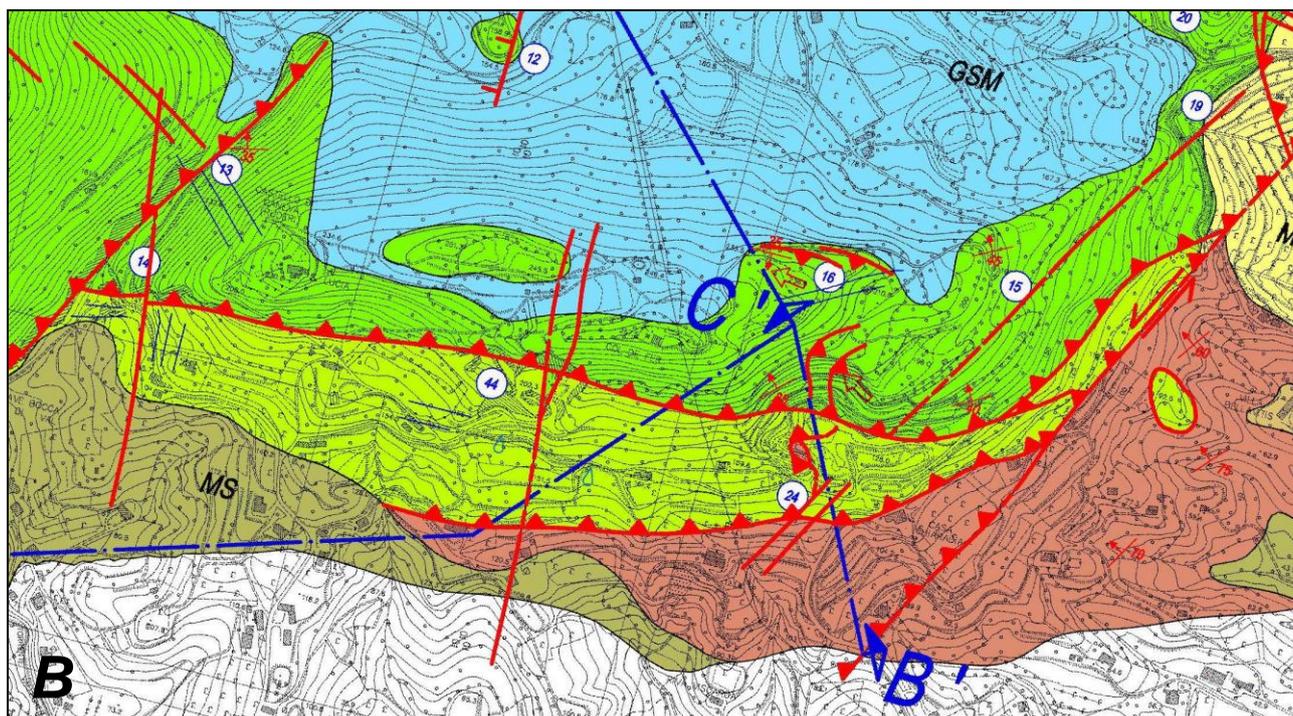
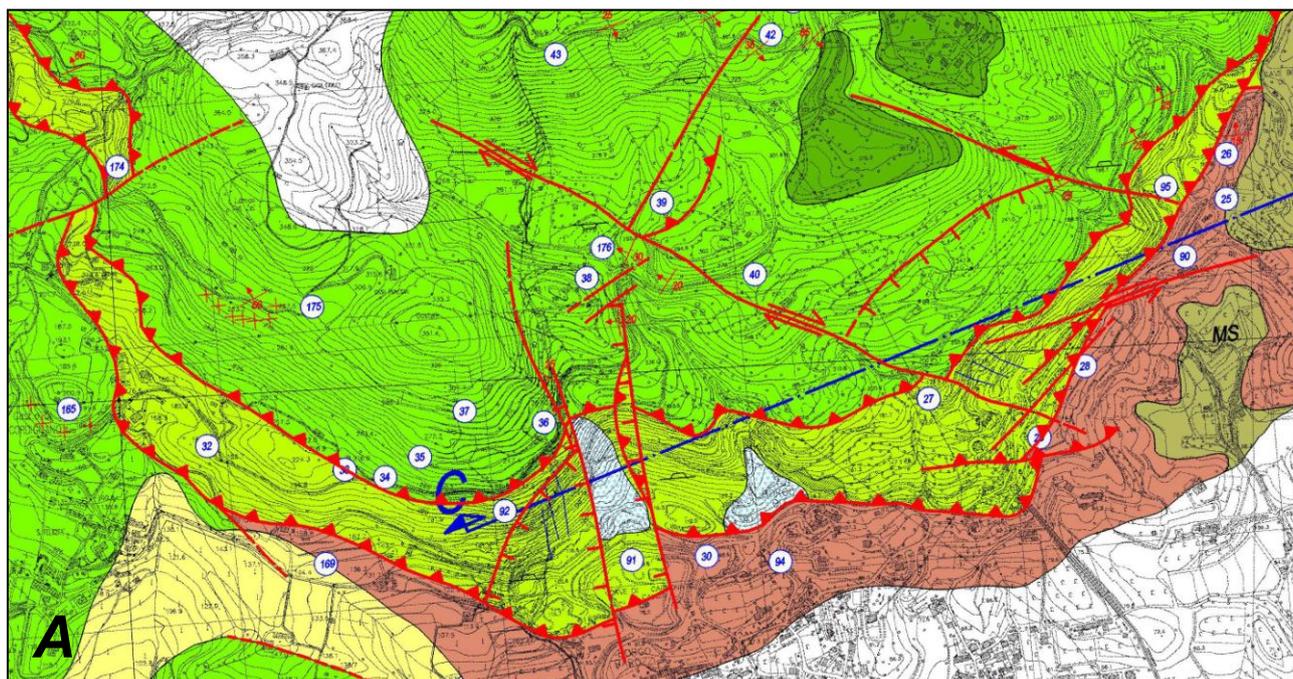


Figura 9 Particolari della carta geologica

4. IL GIACIMENTO

Il giacimento di carbonato di calcio, noto storicamente come "marmorino", deve le caratteristiche peculiari di elevata purezza che lo rendono una risorsa "strategica" ad alto valore aggiunto a particolari condizioni geostrutturali e stratigrafiche. Allo stato attuale delle conoscenze, queste condizioni giacimentologiche si presentano, nel Friuli Venezia Giulia, unicamente nell'area ubicata sul versante sud-orientale dell'Altipiano del Cansiglio, essenzialmente nella zona compresa tra Col de Fer ed il castello di Cordignano, a cavallo tra le province di Pordenone e Treviso, estremo margine dell'alta pianura friulana dove sono da sempre concentrate tutte le attività di estrazione e di valorizzazione del marmorino. Il giacimento, nella sua parte attualmente nota, si estende per circa tre chilometri tra Stevenà e il Col de Fer, dove si ritiene siano presenti le principali riserve disponibili; un tempo è stata sfruttata anche una porzione minore e delocalizzata del giacimento, Colle di Tenuta Longone, posta a pochi chilometri di distanza verso nord-est.

Il versante ha un'esposizione variabile da SW a SE, con pendenze dai 15° ai 25°, che tendono ad accentuarsi nelle parti inferiori. I rilievi collinari che caratterizzano la zona sono di altitudine contenuta e spesso delimitati da modeste incisioni vallive (Valmadonna), che raccolgono le acque attraverso reticoli idrografici piuttosto semplici per convogliarle nel Fiume Livenza. Lateralmente la fascia del versante soggetta ad attività estrattiva è limitata da due valli più profonde: Val de Boer e Val della Pindia. La base del versante vero e proprio è separata dalla pianura da una serie di piccoli rilievi, che talora sono sede di ammassi coltivati di marmorino (Col de Fer e Colle di Borgo dell'Agata).

Litologia

Il quadro geologico è dominato da tre unità litologiche principali: i calcari di tetto, le cataclasi calcaree ed i sedimenti terrigeni e clastici di letto.

I calcari di tetto sono rappresentati da rocce carbonatiche di piattaforma del Cretacico, che si presentano stratificate in banchi da decimetrici a metrici, dati da prevalenti mudstone e wackenstone bianchi, talora rosati, con bioclasti, Echinidi, frammenti di Rudiste, alternati a più rari grainstone oolitico-intraclastici sempre bianchi e compatti.

Le caratteristiche litologiche dei calcari sono ben conservate sugli altopiani, mentre sono totalmente o parzialmente obliterate verso la base strutturale della formazione, dove questa si presenta intensamente fratturata e cataclastica man mano che ci si avvicina ai fronti deformativi principali nella fascia interessata dall'attività estrattiva. La letteratura specifica suddivide tale piattaforma carbonatica nelle seguenti unità litostratigrafiche:

- Calcarea di Polcenigo (Oxfordiano-Kimmeridgiano), costituito dai calcari di scogliera in senso stretto;
- Calcarea del Cellina (Oxfordiano-Aptiano sup.), rappresentato da un'unità principalmente peritidale, caratterizzata da una successione ciclotemica di calcari ben stratificati di piattaforma interna che mostra una certa variabilità di facies, sia per la presenza di episodi di sedimentazione di piattaforma aperta (in particolare nell'Aptiano inferiore con facies a Rudiste), sia per effetto della tettonica sinsedimentaria che ha prodotto brecce sedimentarie in ambiente marino (Albiano) o riempimento di cavità paleocarsiche, nonché modeste depressioni intrapiattaforma e frequenti strutture di emersione, talora con brecce ed argille residuali, e sporadiche stromatoliti;
- Calcarea di Monte Cavallo (Cenomaniano-Campaniano), costituito da facies a Rudiste, che nel Cenomaniano sono rappresentate per buona parte da sedimenti bioclastici di alta energia (Strati del Col dei Schiosi), legate all'instaurarsi di condizioni di piattaforma carbonatica e successivamente di rampa carbonatica.

- Depositi di retro ed avanscogliera nei quali si inquadrano, come facies estremamente particolare, calcari con caratteristiche di elevata purezza.

Le cataclasiti calcaree comprendono il giacimento di marmorino e sono localizzate alla base dei calcari di copertura, caratterizzando con continuità le propaggini meridionali del Cansiglio fra le Località Borgo dell'Agata ed il Col de Fer, con andamento ONO-ESE. Sono costituite da calcare intensamente fratturato e talora milonitizzato, che assume spesso un colore bianco latteo. Si presentano scarsamente fossilifere, per rara presenza di microfossili (prevalentemente macroforaminiferi) e di macrofossili (frammenti di Rudiste e di Lamellibranchi, alghe e rari Briozoi). Le cataclasiti, dove presenti, sono localizzate al tetto del contatto strutturale con le sottostanti formazioni terrigene e clastiche del Miocene. Il marmorino si presenta nelle sue varietà bianco (più pregiato e ricercato) o rosso (per la presenza di permeazioni rossastre di argille residuali), in corpi da decametrici (50 ÷ 60 metri in media), fino ad oltre 140 metri di spessore, che bordano l'affioramento delle principali superfici di thrust; le migliori osservazioni si possono condurre sui fronti delle cave attive, dove si notano talora differenze nel grado di deformazione della massa cataclastica. Il marmorino si presenta in genere come una massa amorfa di materiale carbonatico purissimo, privo di strutture e suddiviso in piccoli volumi unitari di dimensione centimetrica, più raramente subcentimetrica.

I sedimenti terrigeni e clastici di letto sono rappresentati in grande prevalenza da una serie di terreni attribuiti al Miocene inferiore e medio, che si trovano tettonicamente al di sotto del complesso dei calcarei cretacei; nello studio sono stati raggruppati in un'unica unità litologica, ma comprendono in realtà conglomerati ad elementi subarrotondati, areniti e sabbie giallastre, sabbie pelitiche ben stratificate, peliti e marne con resti vegetali e livelli organici, argille varicolori, talora foliate in corrispondenza delle zone di faglia. In qualche zona (come in corrispondenza della cava Piai Dal Cin) sono state riconosciute ed analizzate alcune facies comprendenti calcareniti e calciruditi compatte, giallastre, con bioclasti e macroforaminiferi. Questa unità litologica si rileva lungo la fascia pedemontana. Gli affioramenti risultano però poco estesi in quanto mascherati dalla vegetazione. Procedendo verso la pianura l'unità è ricoperta dalle alluvioni fluvio-glaciali quaternarie dell'alta pianura friulana. A nord di Borgo Barozzi, in prossimità della torre piezometrica dell'ENEL, ed a sud del Col de Fer, le argille risultano in netto contatto tettonico con il marmorino; in alcuni casi, ad esempio nella zona della Val Madonna e lungo la Val della Pindia, si trovano come riempimento di strutture secondarie presenti all'interno della cataclasite calcarea. I termini arenacei ed i conglomerati si rilevano per lo più nella zona tra Borgo Lizzon e la parte orientale della Tenuta Longone e sono caratterizzati da clasti eterogenei e notevolmente arrotondati, con pezzatura da centimetrica a decimetrica.

La Figura 10 riporta la modellazione 3D delle principali litologie sulla cui base sono state successivamente definite circa 30 sezioni geologico-giacimentologiche interpretative, al fine di valutare l'estensione del giacimento e determinare le riserve di marmorino “in vista” e “probabili”.

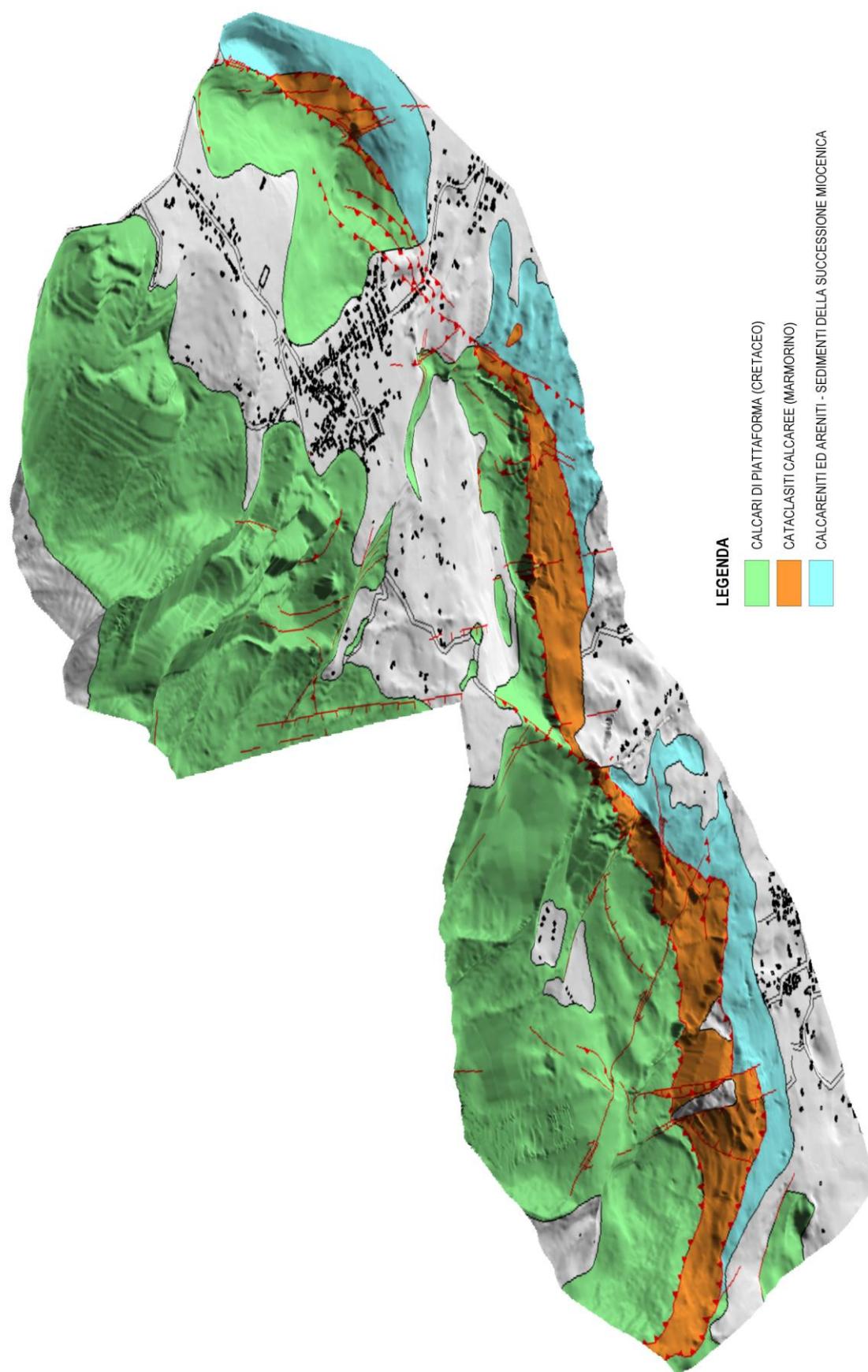


Figura 10 Modellazione 3D delle principali litologie

Assetto strutturale

Il Friuli Venezia Giulia è caratterizzato da una tettonica molto complessa, tuttora attiva, legata a fenomeni di sollevamento; essa è rappresentata in linea di massima da sistemi di faglie, talvolta passanti a veri e propri sovrascorrimenti. A questa attività tettonica è strettamente connessa una sismicità distribuita principalmente lungo la fascia prealpina-pedemontana. Il settore interessato dal presente studio appartiene al sistema più meridionale del thrust belt neoalpino del Subalpino orientale, caratterizzato da una serie di accavallamenti SE - vergenti, talora accompagnati da retroscorrimenti che si sono attivati dal Miocene medio-superiore fino ad almeno tutto il Pliocene inferiore-medio. I sovrascorrimenti più recenti sono anche quelli più meridionali, infatti il thrust belt migra verso sud incorporando settori del suo avampaese, oggi rappresentati dalla pianura veneto-friulana. Il maggior grado di attività si riscontra lungo la fascia tra i rilievi e la pianura, confermato da una più elevata sismicità. In questo quadro, il massiccio Cansiglio-Cavallo, il cui margine meridionale comprende il bacino estrattivo del marmorino, può essere considerato come un'unità tettonica omogenea compresa tra due linee strutturali a carattere regionale, rispettivamente a nord il Sovrascorrimento Periadriatico e a sud la Linea Caneva-Maniago; tuttavia tale struttura è costituita da un insieme di faglie e fratture variamente orientate e tali da determinare un complesso sistema dislocativo.

In particolare, il quadro geologico in cui è inserito il bacino estrattivo è dominato, come già detto, da due complessi litostratigrafici: i calcari del Cretacico ed i sedimenti clastici e terrigeni del Miocene. I due complessi coincidono con due unità tettoniche definite dalla Linea Caneva-Maniago: l'unità Cansiglio-Cavallo (uCC), cui appartiene il rigido complesso calcareo, e l'unità di Caneva (uCa) costituita dai terreni plastici miocenici.

L'unità Cansiglio-Cavallo si presenta, nell'area in esame, come una piega-faglia con asse NE-SO, che evolve in una scaglia sovrascorsa, mediante la Linea Caneva-Maniago, sull'unità di Caneva, che per la sua composizione argillosa ha avuto la funzione di lubrificante tettonico. Il piano di faglia immerge verso monte, cioè verso NO. L'unità di Caneva, formata da una serie di scaglie in terreni miocenici con evidenti deformazioni neotettoniche superficiali, guida l'assetto strutturale della base dei rilievi collinari dal Monte Castelir al Col de Fer, su cui sorge il Castello di Caneva.

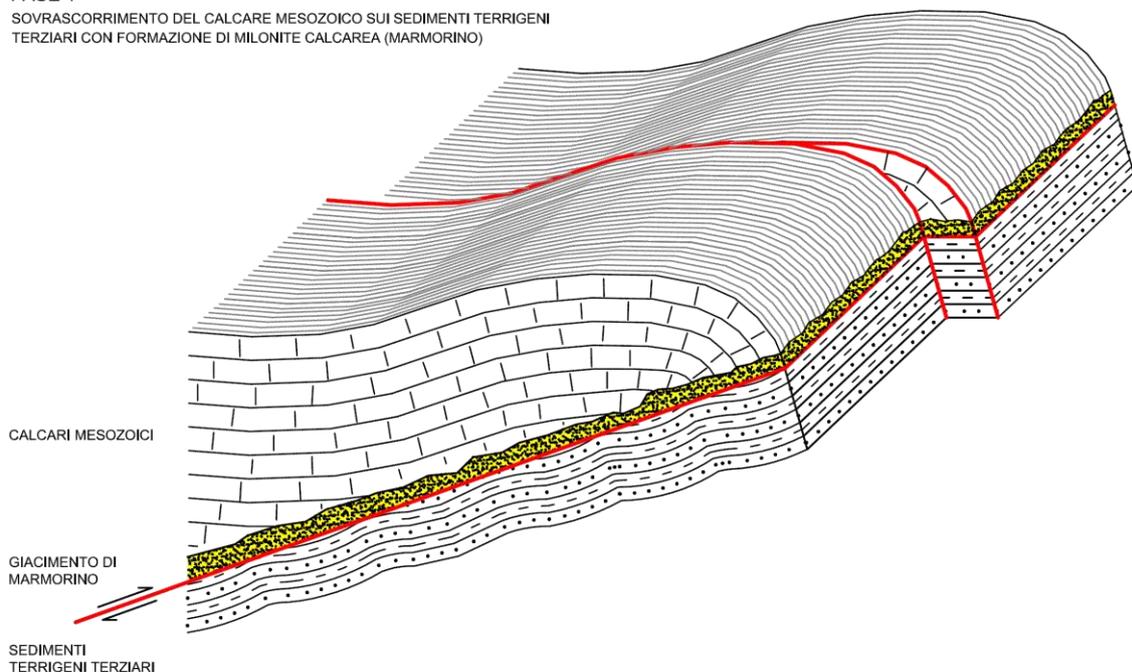
Il giacimento di marmorino rappresenta la milonite calcarea di faglia generatasi per effetto del movimento reciproco tra le suddette unità. Esso costituisce un banco, di alcune decine di metri di spessore, localizzato alla base dei calcari dell'unità Cansiglio-Cavallo. Il marmorino, considerato il contesto tettonico che l'ha generato, potrebbe non necessariamente appartenere ad un unico livello stratigrafico.

La compressione, che ha provocato il sovrascorrimento, si manifesta anche con successive faglie inverse, caratterizzate da una giacitura verso monte e da una maggior inclinazione rispetto alla Linea Caneva-Maniago; in quest'ultima si determina in tal modo una geometria a denti di sega, con locali sovrapposizioni che in passato hanno comportato stime erronee dello spessore del giacimento (Figura 11).

Lo studio condotto ha comprovato la presenza di sistemi di faglie trascorrenti o transpressive ad orientazione preferenziale (in ordine di importanza e di efficacia: N20-N30E, NS e N130-140E) che suddividono in ulteriori blocchi il complesso formato dalle suddette unità tettoniche. Per quanto attiene alle faglie NS potrebbe trattarsi di strutture, già delineate nella fase iniziale del sovrascorrimento, impostatesi su precedenti strutture subverticali di direzione prevalentemente meridiana, la cui esistenza, come faglie sinsedimentarie, è stata rilevata anche al livello dei sedimenti triassici nelle Dolomiti Orientali. Risulta inoltre confermata l'esistenza di sistemi disgiuntivi tardivi con dislocazioni di tipo gravitativo, caratterizzati da scivolamenti verso il basso di porzioni di versante limitate al letto da superficie

concava, con centro di rotazione posto all'esterno del comparto interessato dal collasso. Questi comparti hanno di conseguenza subito una corrispondente rotazione, che spiega la presenza delle giaciture anomale spesso riscontrate in alcune parti del giacimento. I collassi possono essere stati agevolati dal maggiore grado di erodibilità dei sedimenti terrigeni che formano la base del complesso strutturale e dalla plasticità degli stessi indotta dalla imbibizione da parte della falda idrica. Sulla base dei dati rilevati, si può concludere che esistono almeno due generazioni di faglie: la maggior parte sarebbero sin-orogeniche, mentre altre sarebbero post-orogeniche o addirittura recenti. Anche alcune delle famiglie più antiche sembrano essersi sviluppate in una fase tardiva del sovrascorrimento che ha portato i calcari sopra le argille mioceniche. Queste faglie si sarebbero sviluppate all'interno della stessa fascia estremamente fratturata o addirittura milonitizzata, esistente alla base della massa calcarea sovrascorsa. Le faglie post-orogeniche o secondarie, che comprendono i collassi cui si è fatto cenno, si sono certamente sviluppate in un ammasso roccioso già milonitizzato ed è probabile che siano state anche agevolate da tale stato fisico. Per quanto attiene all'ordine cronologico in cui si sono manifestati gli eventi tettonici descritti, è stato constatato che, a dispetto del grado di deformazione elevato dei calcari e delle cataclasiti calcaree, i terreni appartenenti alla successione miocenica (unità di Caneva) appaiono relativamente poco deformati, nonostante le litologie siano altamente deformabili (conglomerati, sabbie, argille e marne in prevalenza). Tra gli aspetti macroscopici in particolare risalta come spesso in essi siano ben conservate sia le giaciture primarie che le strutture sedimentarie, come le laminazioni e i livelli organici. Queste osservazioni suggeriscono che i più recenti movimenti che hanno determinato il contatto strutturale tra il complesso calcari-cataclasiti e la molassa, che oggi affiora alla base del versante, potrebbero aver portato ad una giustapposizione tettonica delle due unità tardiva rispetto alla formazione delle cataclasiti calcaree.

FASE 1
SOVRASCORRIMENTO DEL CALCARE MESOZOICO SUI SEDIMENTI TERRIGENI
TERZIARI CON FORMAZIONE DI MILONITE CALCAREA (MARMORINO)



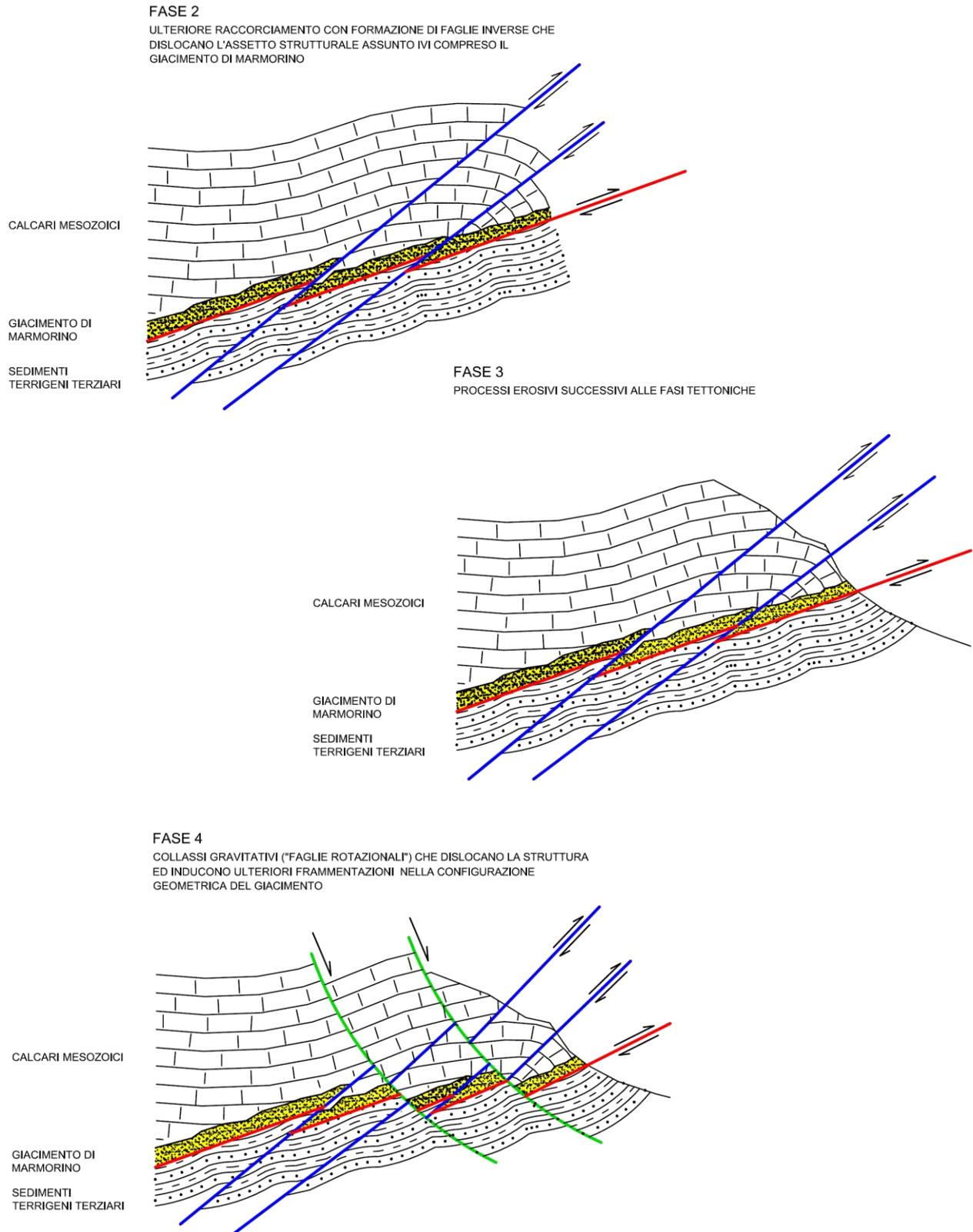


Figura 11 Evoluzione strutturale dell'area di Caneva che ha portato alla formazione ed all'attuale configurazione geometrica del giacimento di marmorino (Fasi 1 ÷ 4)

Idrologia ed idrografia

Il territorio che accoglie il bacino estrattivo del marmorino è compreso in due settori che, per i caratteri strutturali e litologici delle rocce che li costituiscono, presentano due aspetti totalmente diversi della circolazione idrica sia di superficie che sotterranea.

Il settore montano, posto a monte della linea tettonica Caneva-Maniago, formato dalle rocce carbonatiche dell'unità Cansiglio-Cavallo, presenta una circolazione prevalentemente ipogea ed una rete idrografica di superficie poco evoluta e talora assente. La morfologia del versante che delimita a SE il settore montano è caratterizzata dalla presenza di un'idrografia superficiale solo in corrispondenza di forti eventi meteorici, durante i quali la pur elevatissima permeabilità delle rocce non riesce a smaltire l'eccesso d'acqua.

Il settore pedemontano e di pianura, posto a valle della suddetta linea tettonica, formato dai terreni a componente argillosa dell'unità di Caneva, presenta invece una sviluppata rete idrografica di superficie dovuta alla bassissima permeabilità dei litotipi presenti. La superficie di sovrascorrimento tra i due settori ha determinato, nell'area in esame, una tipica situazione di "sbarramento litologico": le acque defluenti all'interno del massiccio carbonatico del Cansiglio verso l'alta pianura friulana sono infatti fermate dal contatto tettonico con i terreni terziari. Nella zona del giacimento di marmorino, data la natura del materiale, una cospicua quantità d'acqua percola nell'ammasso, piuttosto permeabile, inibendo così nocivi fenomeni di ruscellamento superficiale. Tali acque, percolando in profondità, vanno ad alimentare la falda acquifera. La definizione dell'esistenza e delle caratteristiche di tale falda è fondamentale per valutare la possibilità di spingersi con i livelli di coltivazione a profondità maggiori di quelle attuali. Lungo le gallerie di coltivazione, la presenza di stillicidi risulta particolarmente evidente lungo le fratture e le faglie. Queste acque, attraversando i molteplici sistemi di discontinuità, determinano fenomeni di alterazione dell'ammasso roccioso, resi evidenti da una colorazione rossa o roseo-giallognola assunta dal materiale. Tale fenomeno, caratterizzato da una distribuzione piuttosto variabile, rappresenta un problema per lo sfruttamento del marmorino in quanto lo rende localmente meno utilizzabile.

Caratteri della mineralizzazione

I calcari sono per lo più estremamente tettonizzati nelle zone di faglia, dando luogo ad affioramenti di breccia oppure di milonite di pezzatura minuta e media che si identifica con il giacimento di marmorino. Quest'ultimo, generalmente distinto da estrema purezza, si presenta nelle sue varietà in prevalenza bianco e subordinatamente rossastro per la presenza di permeazioni di argille residuali.

Caratteri fisici. Il marmorino è costituito in genere da una massa amorfa di materiale carbonatico purissimo, con struttura cataclastica caratterizzata dalla completa frantumazione della roccia, ridotta ad una milonite suddivisa in piccoli volumi unitari (centimetrici ed anche millimetrici), talvolta solo costipata, ma più frequentemente cementata da processi secondari di ricristallizzazione e di deposizione calcitica ad opera di acque circolanti. L'estrema suddivisione della roccia fa classificare estese porzioni della massa come un mezzo isotropo o quasi isotropo dal punto di vista geomeccanico. Non risultano marcate differenze litologiche tra il marmorino e le cataclasiti ed i calcari ad esso sovrapposti o talora affiancati; la distinzione infatti, sia dal punto di vista macroscopico che microscopico, risulta talora poco evidente.

Caratteri petrografici. L'analisi eseguita al microscopio su sezioni sottili ha consentito di individuare nel marmorino litotipi differenti rappresentati da micriti e biomicriti più o meno intraclastiche, bioclastiti e biospariti (Onofri e Ulcigrai, 1975). Sono stati notati diffusi fenomeni di ricristallizzazione con scomparsa della frazione allochimica e genesi di mosaici geosparitici. Dal punto di vista paleontologico la roccia nella maggior parte dei casi è risul-

tata priva di fossili, sicuramente per effetto della ricristallizzazione, in altri è risultata fossilifera per la presenza di macrofossili (rare Rudiste) e di microfossili (in prevalenza macroforaminiferi) e frammenti di Lamellibranchi, alghe e rari Briozoi. La presenza di tale associazione paleontologica ha fatto ascrivere il complesso al Cretacico superiore nei piani Cenomaniano e Turoniano. I fenomeni di ricristallizzazione anche importanti rilevati fanno supporre che il marmorino si sia formato in condizioni di seppellimento con pressioni e temperature presumibilmente elevate.

Caratteri chimici. Gli standard di qualità e purezza del marmorino del bacino di Caneva sono fra i più elevati della produzione mondiale. Il contenuto in CaCO_3 è di 99,6 % ed inoltre spicca la pressoché totale assenza di silice e di metalli pesanti quali Al, Fe, Pb, As, Cr. Il marmorino si distingue inoltre dai litotipi calcarei che lo ospitano per la percentuale di residuo insolubile in HCl che nei minerali utili è inferiore allo 0,20% ed in quelli sterili presenta valori superiori.

Ipotesi genetica del giacimento

La morfologia del giacimento è assimilabile ad uno strato di potenza variabile, da zero ad alcune decine di metri, che immerge verso monte in discordanza rispetto alla giacitura delle unità incassanti, dislocato, come detto, da varie famiglie di linee strutturali. Per quanto attiene all'andamento del tetto e del letto del giacimento, si può affermare che la superficie di separazione tra marmorino e calcare di copertura presenta sempre un comportamento assai complesso che i cavaatori definiscono "a punte", a causa del gran numero di dislocazioni presenti. Lo stesso si può dire per il limite marmorino-argilla al letto, anche se questo mostra un assetto generalmente meno tormentato ed il passaggio tra le due formazioni è sempre molto nitido. In alcuni casi l'argilla incontrata in cave sotterranee non rappresenta direttamente la base del marmorino, ma è stata spremuta lungo piani di faglia nel corso delle dislocazioni, a guisa di filoni. Tuttavia questo fenomeno è limitato e non si è mai riscontrato negli scavi a cielo aperto. Gli elementi utili per la valutazione dell'andamento del letto concordano nell'indicare un'inclinazione di $20^\circ \div 25^\circ$ per la superficie di contatto marmorino-argilla in prossimità dell'affioramento; tale inclinazione è dovuta alle dislocazioni successive al sovrascorrimento e diminuisce di valore in profondità. L'andamento del tetto è più noto grazie agli scavi a cielo aperto; in molti punti il limite marmorino-calcari è chiaramente tettonico, in altri il passaggio sembra graduale e di difficile definizione. In quest'ultimo caso, nella zona di transizione il marmorino può conservare tracce di stratificazione concordante con quella dei sovrastanti calcari.

Sul piano della genesi, il giacimento di marmorino sarebbe stato originato dal sovrascorrimento delle masse carbonatiche cretache rispetto al sottostante complesso clastico e terrigeno miocenico. Esso rappresenta la milonite calcarea di questo importante evento tettonico che, considerato lo stato di ricristallizzazione del minerale, potrebbe essere iniziato in profondità in condizioni di temperatura e di pressione abbastanza elevate. Ha sicuramente contribuito a determinare l'elevato grado di purezza la circolazione della falda acquifera, condizionata dal limite di permeabilità sottoposto costituito dai terreni miocenici a componente argillosa, che sotto copertura potrebbe aver raggiunto anch'essa temperature elevate. Il raccorciamento crostale che ha dato origine al sovrascorrimento è proseguito nel tempo fino ai giorni nostri, determinando l'ulteriore progressivo movimento reciproco tra le unità di tetto e di letto, ed interessando anche parti della sottostante unità terrigena inizialmente non coinvolte dal sovrascorrimento. Questa ipotesi, che implicherebbe un locale contatto tardivo dei litotipi carbonatici sui litotipi terrigeni, darebbe spiegazione della conservazione delle giaciture primarie e delle strutture sedimentarie che, durante il rilevamento della carta geologica, è stata spesso osservata nella suddetta unità terrigena.

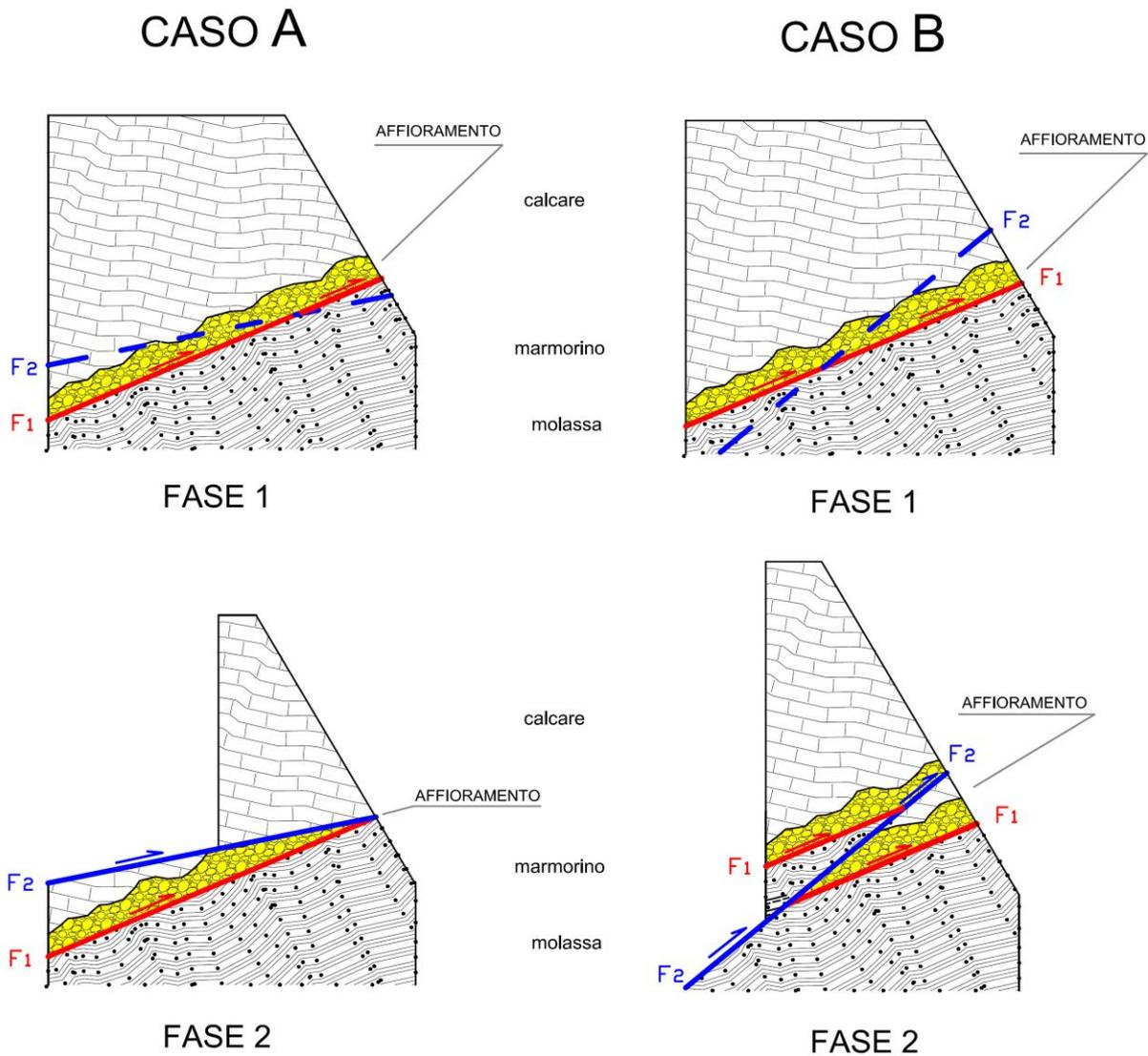


Figura 12 Sovrascorrimenti successivi (fase 2), avvenuti secondo piani strutturali non complanari con quello (fase 1) che ha determinato l'origine primaria del marmorino, possono aver indotto duplicazione o elisione del giacimento.

I movimenti successivi si sarebbero esplicati non solo sul piano originario, ma anche su piani di neoformazione non complanari rispetto ad esso, inducendo elisione o impilamento del marmorino come schematizzato nella Figura 12.

Piani con inclinazione minore rispetto a quella del sovrascorrimento primario avrebbero determinato assottigliamento o addirittura locale elisione del corpo minerario (Figura 12, Caso A), mentre piani con inclinazione maggiore avrebbero indotto aumento di spessore o raddoppio del giacimento stesso (Figura 12, Caso B).

Successive dislocazioni, alcune dovute a faglie trascorrenti, altre a collassi gravitativi tardivi, avrebbero ulteriormente complicato il quadro strutturale, determinando la morfologia articolata e il più delle volte imprevedibile che caratterizza il giacimento.

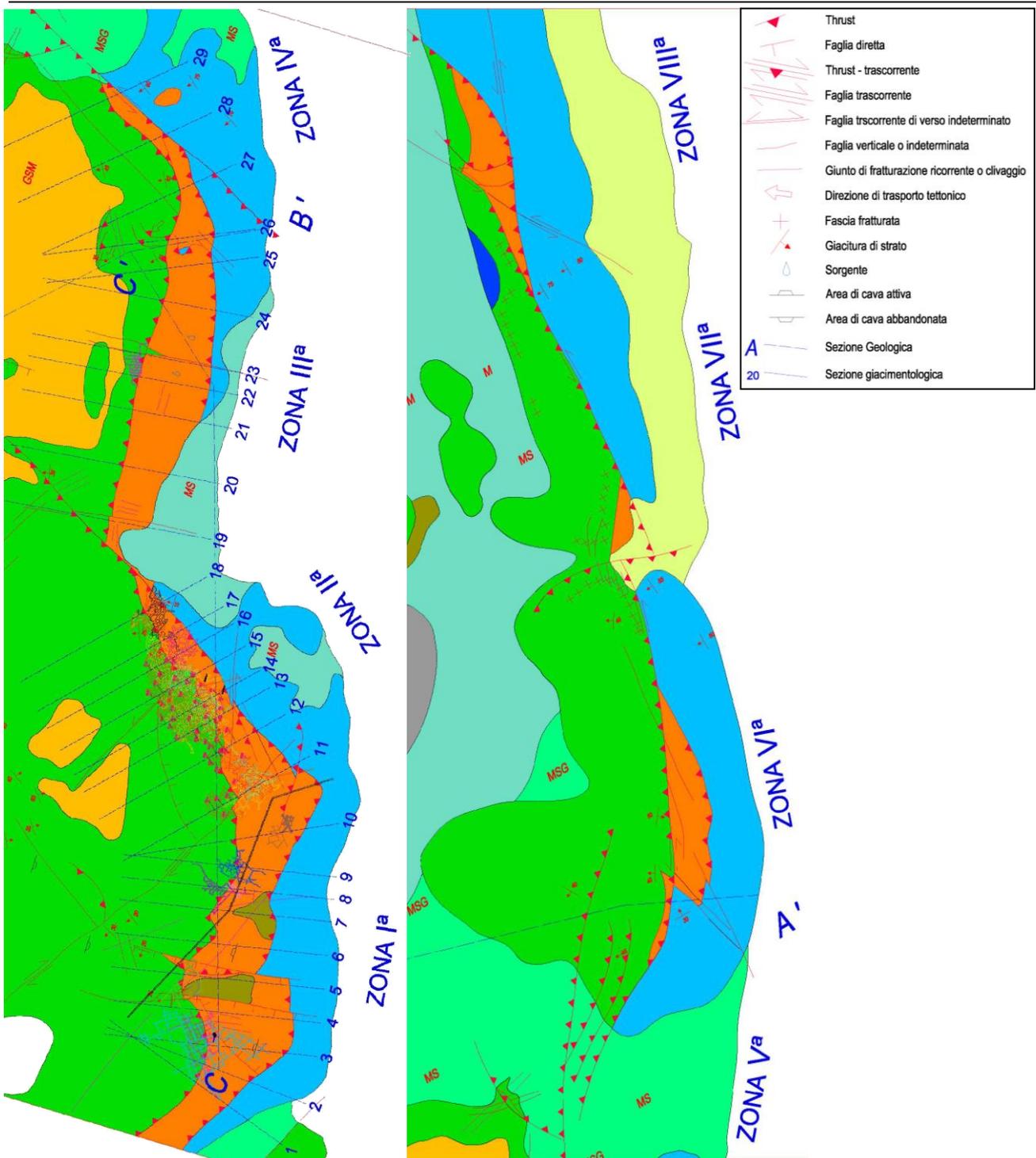
La morfologia del corpo minerario è stata ricostruita sulla base sia delle informazioni ricavate con il rilevamento della carta geologica, sia della distribuzione e forma delle gallerie, sia dei dati di perforazione dei sondaggi. Tali informazioni hanno consentito di suddividere il giacimento in otto zone omogenee distinte in considerazione della densità dei dati e della

tipologia strutturale locale (Figura 13), sulla base di circa 30 sezioni trasversali del corpo minerario di cui la Figura 14 riporta due esempi significativi.

- Zona I^a: compresa tra le sezioni 1 ÷ 9, in cui il giacimento si presenta suddiviso sia da faglie trascorrenti, sia da faglie inverse, trasversali rispetto al sovrascorrimento principale, che hanno determinato un raccorciamento anche in direzione E-O con conseguente ispessimento del corpo minerario che presenta una potenza compresa tra 50 e 90 metri ed inclinazione verso monte di 14° ÷ 16° rispetto al piano orizzontale.
- Zona II^a: compresa tra le sezioni 10 ÷ 18, in cui il giacimento si presenta anche in questo caso suddiviso sia da faglie trascorrenti, sia da faglie inverse, oblique rispetto al sovrascorrimento principale, che hanno indotto un sensibile ispessimento del corpo minerario; quest'ultimo presenta una potenza che varia da 60 a 110 metri ed inclinazione di 15° ÷ 18°. In questa zona la costruzione delle sezioni è stata agevolata dalla presenza di una consistente maglia di sondaggi che ha dimostrato come il giacimento sia localmente presente fino a circa 50 metri al di sotto del livello di base delle gallerie.

Tra le zone II^a e III^a, una faglia trascorrente, di direzione obliqua rispetto all'asse del giacimento, determina lo smembramento ed un elevato assottigliamento di quest'ultimo.

- Zona III^a: compresa tra le sezioni 19 ÷ 25, in cui il giacimento è compreso tra due piani di sovrascorrimento non complanari che comportano un ispessimento della mineralizzazione. Procedendo verso est gli stessi piani, sempre per l'effetto geometrico della non complanarità, inducono una sensibile riduzione di spessore (Sez. 26 ÷ 28) del marmorino.
- Zone IV^a, VI^a e VIII^a: nelle quali si riproduce la stessa configurazione geometrica della Zona III^a; la riduzione di spessore in queste aree è presumibilmente imputabile alle geometrie definite dai piani di faglia (Figura 12, Caso A, Fase 2). Non può essere comunque esclusa la possibilità che procedendo verso est si riduca l'entità del fenomeno iniziale che ha dato origine alla cataclasite calcarea.
- Zone V^a e VII^a: nelle quali si nota l'assenza in affioramento del corpo minerario che, considerata la presenza di piani di scorrimento non complanari, potrebbe essere imputabile a locale elisione per cause tettoniche. Se tale ipotesi corrispondesse alla realtà, potrebbe verificarsi il contesto strutturale schematizzato in Figura 12 (Caso A, Fase 2), secondo il quale il giacimento potrebbe essere presente verso l'interno del versante. Anche in questi casi non può essere esclusa la possibilità che procedendo verso est si riduca l'entità del fenomeno iniziale che ha dato origine alla cataclasite calcarea.



LEGENDA

CALCARI DI PIATTAFORMA (CRETACEO)
 Alternanza di mudstone bianchi e nocciola con packstone e grainstone oolitici e bioclastici; talora si presentano ben stratificati (da 40-60 cm a oltre 1 m); massa rocciosa mediamente suddivisa nelle zone di altipiano, da molto suddivisa fino a cataclastica nel comprensorio minerario.

CATACLASITI CALCAREE (marmorino)
 Massa calcarea a grana da grossa (breccia) a minuta (cataclasite), di colore bianchissimo in superficie fresca, spesso si presenta arrossata da permeazioni di argille residuali ocra e rossastre (marmorino rosso)

BRECCIE E CONGLOMERATI "incertae sedis"
 Breccie caotiche, eterometriche, poligeniche, a giacitura massiva, da minute (1-2 cm) a grosse (max 40 cm). Cementazione tenace con cemento calcitico arancione. Per litologia e composizione non attribuibili alla serie miocenica.

SEDIMENTI DELLA SUCCESSIONE MIOCENICA
 Conglomerati poligenici arrotondati, da clast-supported a partially open work, areniti ibride giallastre o marrone (nella zona di Stevenà anche calcareniti rossicce grossolane a macroforaminiferi), sabbie da grigie a giallastre passanti a sabbie pelliche, peliti grigie e argille grigie con resti vegetali. Successione apparentemente coarsening-upward

Figura 13 Carta geologica schematizzata con indicate le sezioni geologiche e giacimentologiche predisposte

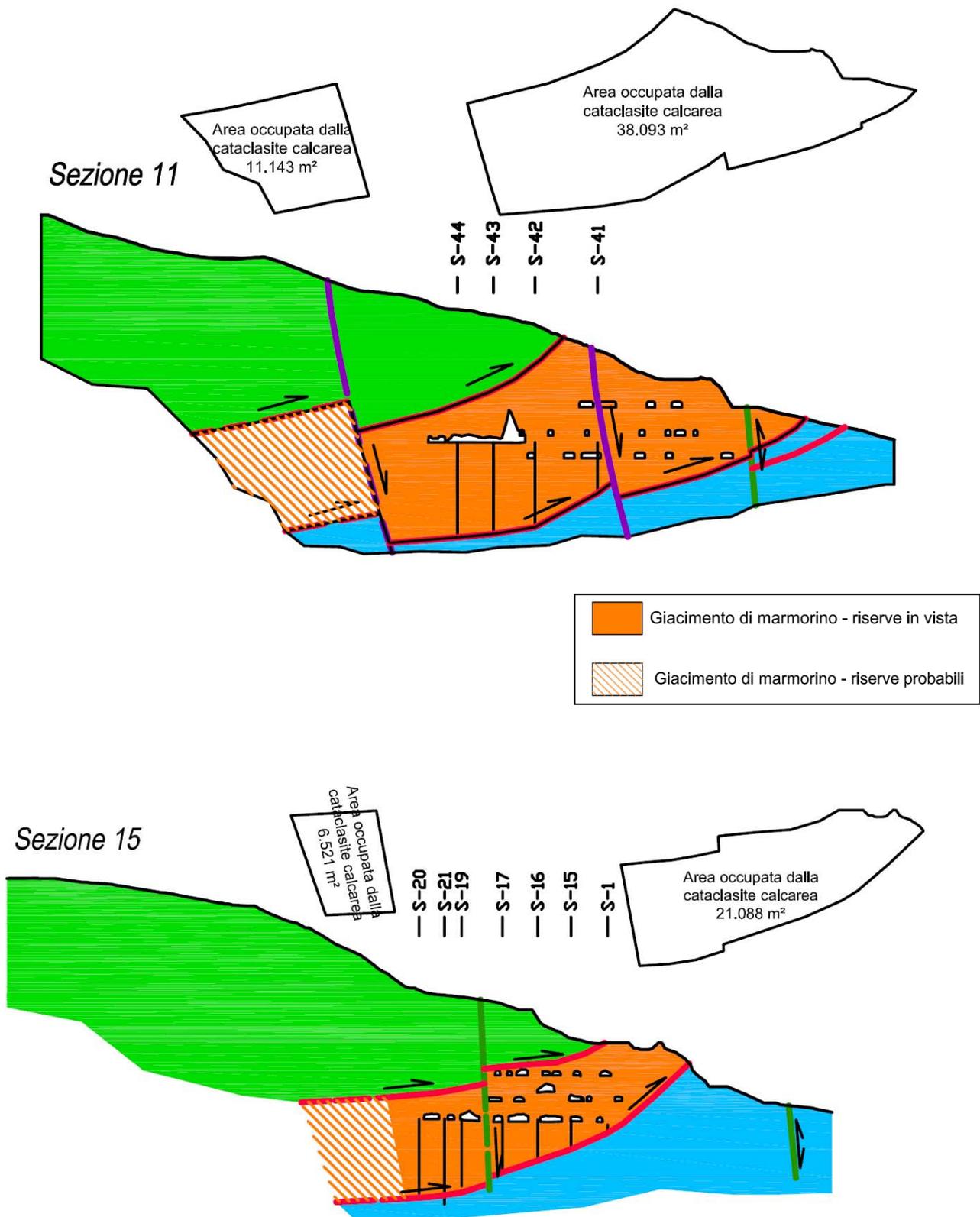


Figura 14 Sezioni trasversali del giacimento

5. LA COLTIVAZIONE DEL MARMORINO

La coltivazione del giacimento di marmorino avviene sia a cielo aperto che in galleria; quest'ultima metodologia è attualmente impiegata solo per le cave attive in Veneto entro l'area del comune di Cordignano (TV), ma un tempo era ampiamente impiegata anche in Friuli Venezia Giulia. La geometria del giacimento entro i confini del comune di Caneva e la natura dell'ammasso roccioso che lo caratterizza fanno sì che la coltivazione a cielo aperto avvenga a gradoni per fette orizzontali sviluppata su uno o più livelli, suddivisi da platee orizzontali coltivate in sequenza discendente. Questo è, tra i metodi utilizzabili a cielo aperto, quello che mitiga l'impatto visivo mantenendo la fascia in fase di coltivazione di ampiezza costante nel tempo abbassandosi lungo il versante man mano che procedono i recuperi ambientali che si sviluppano contestualmente alla coltivazione. Nel giacimento di marmorino la coltivazione prevede un'inclinazione finale del versante di $35^\circ \div 38^\circ$ sull'orizzontale, ottenuta mediante una gradonatura con berme ed altezza del fronte del singolo gradone di dimensioni legate alle condizioni geomeccaniche locali (in genere 8 metri di larghezza per la berma e 15 metri di altezza per il fronte). Durante la successiva fase di ricomposizione naturalistica, i gradoni risultanti vengono modellati morfologicamente mediante terreno di scotico sul quale viene infine steso uno strato di 15 centimetri di terreno vegetale. In questo modo, a fine lavori, le scarpate vengono rilasciate con pendenza di circa 38° con berme, poste ogni 20 metri di dislivello, aventi larghezza compresa tra 4 e 5 metri, provviste di canalette per il drenaggio delle acque piovane. Le acque vengono intercettate in corrispondenza di ciascuna banca e, prima di venire convogliate verso i più vicini bacini di raccolta, fatte decantare in vasche in roccia naturale, appositamente sagomate durante le attività di scavo all'estremità di ogni banca.

Nel passato, nel comune di Caneva, e ancora oggi nel comune di Cordignano, la coltivazione del marmorino è stata condotta anche in sotterraneo con metodo a camere e pilastri abbandonati. Fin dal secolo IX, per raggiungere il giacimento di marmorino, coperto e protetto da rocce sterili, si era infatti dimostrato più agevole procedere scavando delle piccole gallerie alla base delle pareti verticali, piuttosto che operare a cielo aperto; in questo modo si evitava di asportare grossi volumi di roccia di copertura, più compatti e difficili da scavare. Verso la metà degli anni '50, le coltivazioni avevano un andamento a scacchiera, con pilastri di circa 5 x 5 metri, gallerie a volta semicircolare o abbassata, larghe da 3 a 4 metri ed alte circa 3 metri, prive di armature e agevolmente percorribili. Negli anni '60, la produzione era praticamente tutta ottenuta con volate in avanzamento, con sezioni comprese tra i 9 ed i 12 metri quadrati ed un'estrazione di circa 60 ÷ 80 tonnellate di minerale giorno. L'introduzione di attrezzature meccanizzate ha comportato la razionalizzazione dei piani di escavazione con il tracciamento di gallerie sotterranee di carreggio dalle quali si dipartivano dei bracci che attraversavano il materiale da coltivare; da questi si eseguiva la perforazione e l'abbattimento mediante esplosivo, creando dei vuoti sotterranei. La coltivazione era per lo più sviluppata su tre livelli, con gallerie di accesso separate o, per il livello inferiore, con accesso dal livello superiore a mezzo di discenderia ellittica. Verso gli anni '80, per quanto riguarda le coltivazioni eseguite a nord di Stevenà e di Caneva, le gallerie si presentavano ampie, con sezioni da 10 fino ad oltre 20 metri quadrati ed un andamento a scacchiera con pilastri di sezione media di 5 x 5 metri. Quando la distanza verticale tra due livelli non superava i 12 metri, le scacchiere venivano realizzate sovrapposte, al fine di poter poi abbattere più comodamente le solette. I livelli venivano messi in comunicazione tramite fornelli di ventilazione, eseguiti in un'unica volata perforata dall'alto, od anche a mezzo di fornelli inclinati, attraverso i quali il materiale veniva scaricato dai piani superiori fino a quelli più bassi dove veniva radunato per il trasporto all'esterno. L'ultimo livello era

collegato all'esterno da alcuni forni di aerazione. I rilievi effettuati in occasione dello studio mostrano come in generale le cavità siano anche attualmente stabili e non necessitino né di chiodature né di centine. Nei livelli inferiori, dove le sezioni superano i 20 metri quadrati, sono stati notati localmente alcuni cedimenti del tetto con la conseguente formazione di spazi vuoti di dimensioni di una certa rilevanza. Le gallerie disposte su sette livelli, rispettivamente a quota 80, 100, 114, 125, 135, 142 e 168 metri s.l.m., sono stati in parte o in toto intercettate e scavate durante lo sviluppo della coltivazione a cielo aperto.

Per quanto riguarda i problemi derivanti dall'incontro con la falda freatica, in passato non si sono mai verificate situazioni critiche, dal momento che la piezometrica è presente a quote più basse di 80 metri s.l.m.. I fori esplorativi per indagare la profondità del giacimento hanno rilevato presenza di acqua sotterranea ad una quota intorno a 50 ÷ 60 metri s.l.m..

Per quanto attiene alla problematica che può comportare la presenza delle argille, queste si trovano alle quote più basse, (80 ÷ 90 metri s.l.m.), e limitatamente alla parte di giacimento più a sud. Considerato che il banco di marmorino immerge verso monte, nella parte più interna delle gallerie, anche a quote basse, non dovrebbero sussistere problemi di incontro con le argille.

6. UTILIZZO SOSTENIBILE DELLA RISORSA

La valorizzazione ottimale della risorsa mineraria marmorino deve attentamente valutare, con tempistiche differenziate, i seguenti punti:

- la ricerca dello sviluppo del giacimento verso l'interno del versante e la determinazione del livello e dell'escursione stagionale della falda nella porzione basale del giacimento;
- l'interazione tra la coltivazione a cielo aperto e le gallerie minerarie presenti;
- la determinazione del limite tecnico-economico ed ambientale del rapporto tra quantità di materiale utile (marmorino) e sterile (calcare);
- l'individuazione di metodologie e tecniche di coltivazione in sotterraneo alternative al cielo aperto.

Criteri guida per la ricerca

Lo studio ha ricostruito spazialmente il giacimento sulla base delle informazioni raccolte predisponendone un modello digitale successivamente inserito in un G.I.S..

Il criterio guida per la ricerca futura dello sviluppo laterale ("lungo banco") del giacimento rimane il contatto strutturale di sovrascorrimento dei calcari cretaci sulla molassa miocenica. Bisogna però tenere in considerazione la possibilità che la locale assenza in affioramento del corpo minerario non implichi necessariamente l'inesistenza dello stesso. La ricerca va quindi impostata sulla verifica della presenza del giacimento verso l'interno del versante, ricerca che può essere effettuata esclusivamente a mezzo sondaggi da eseguire a monte della discontinuità strutturale, sia inclinati verso l'interno del versante a partire dal medesimo, sia verticali utilizzando vallecole trasversali. In ogni caso si tratta di terebrazioni che possono raggiungere lunghezza notevole, anche dell'ordine di alcune centinaia di metri. Sarà pertanto necessario l'impiego di attrezzature che consentano velocità di esecuzione e costi contenuti, come ad esempio sonde equipaggiate con carotiere estraibile. Per quanto attiene alla ricerca a scala di cantiere, le irregolarità del giacimento indotte dalle diverse generazioni di eventi tettonici rendono auspicabile anche in questo caso la generalizzazione della prospezione già localmente intrapresa a mezzo sondaggi.

È possibile che in profondità il materiale si presenti in uno stato di aggregazione diverso, molto più compatto di quello presente nelle attuali cave, come è stato riscontrato in una galleria di ricerca che si spinge per circa 300 metri all'interno del versante. Il miglioramento delle caratteristiche meccaniche del materiale potrebbe, da una parte, far aumentare i costi di abbattimento e macinazione e, dall'altra, far considerare la possibilità di introdurre sistemi di coltivazione diversi in sotterraneo.

Sviluppo della coltivazione

La coltivazione a cielo aperto, sviluppandosi dall'alto verso il basso e prevalentemente in aree nelle quali precedentemente erano stati effettuati scavi in sotterraneo, richiede un controllo dell'interferenza tra le attività di scavo e le cavità, da parte del progettista durante la predisposizione degli elaborati di progetto e del direttore responsabile durante lo sviluppo dei lavori. Nel caso non siano disponibili adeguate informazioni a causa della non agibilità delle cavità, la coltivazione deve procedere molto cautamente per mitigare il pericolo di sprofondamenti improvvisi e prevedere un'indagine diretta o indiretta del sottosuolo in grado di fornire informazioni utili all'individuazione delle cavità.

Lo studio fornisce informazioni, raccolte in un G.I.S. dedicato, e procedure che permettono di valutare in che modo le modalità di coltivazione all'aperto interferiscano con le gallerie attualmente esistenti nei bacini di intervento, tenendone in considerazione la posizione e lo sviluppo relativamente al D.T.M. dello stato di fatto e di progetto.

La valorizzazione futura del G.C.C. nell'area di Caneva può avvenire attraverso sia la coltivazione in sotterraneo (selettiva o per grandi camere), sia la coltivazione massiva all'aperto. La coltivazione in sotterraneo, un tempo molto sviluppata nell'area di studio ed ancora oggi presente al confine con la Regione Veneto, comporta la presenza di un reticolo più o meno regolare di gallerie disposte su vari livelli all'interno dell'ammasso roccioso costituente il giacimento di G.C.C.. Queste gallerie presentano sezioni differenziate sia in larghezza che in altezza, conseguenza sia di una scelta costruttiva che ha legato il vuoto alla qualità merceologica e geomeccanica del materiale, sia dello sviluppo di fenomeni di decompressione ed allentamento dell'ammasso roccioso che hanno comportato crolli sequenziali di allargamento delle cavità originarie arrivando anche alla creazione di grandi vuoti entro un ammasso roccioso dalle qualità geomeccaniche da mediocri a scadenti. I fenomeni di dissesto possono evolvere sia in verticale, sia in orizzontale, interessando porzioni più o meno estese del territorio. Il vuoto può, come noto, progredire nel suo sviluppo spaziale in maniera differenziata in funzione del materiale entro cui si sviluppa e della geometria di partenza. Nella tecnica mineraria classica la coltivazione all'aperto precede quella in sotterraneo, che viene affrontata solo quando il rapporto tra il materiale sterile che si deve movimentare ed il materiale utile che si vuole valorizzare diventa eccessivamente alto. Nel passaggio in sotterraneo si deve dimensionare lo spessore di soletta di interposizione tra superficie topografica esterna e porzione di giacimento che si può valorizzare mediante coltivazione per vuoti; questa soletta, come pure quella che si interpone tra un livello e l'altro in una coltivazione in sotterraneo per vuoti, è detta, con termine inglese, *crown pillar*. Il fenomeno di collasso, in genere, avviene perché il vuoto sotterraneo si avvicina alla superficie topografica superando lo spessore di sicurezza costituito dal "*crown pillar*", o perché due livelli sotterranei si avvicinano troppo tra loro causando il collasso delle gallerie a formare un unico grande vuoto. Diversamente da quanto accade nell'attuale coltivazione del marmorino, la superficie esterna risulta statica, mentre è lo scavo sotterraneo che si sviluppa verso l'alto e/o in orizzontale. Nel caso di studio, infatti, la coltivazione del marmorino avviene in genere all'aperto, con metodologia classica a gradoni orizzontali discendenti. Con il progredire della coltivazione si ha la progressiva modificazione del territorio, dato che la superficie topografica (stato di fatto) migra verso il basso nelle aree di giacimento di maggior qualità merceologica fino al completamento del progetto autorizzato (stato di progetto). Può accadere pertanto che vi sia un'interazione tra modalità di coltivazione a cielo aperto ed in sotterraneo, laddove la presenza di cavità, dovute a passate o presenti attività di valorizzazione della materia prima o a specifiche infrastrutture (ad esempio la galleria idroelettrica), porti al potenziale crollo verso il sotterraneo di porzioni più o meno estese di territorio, laddove venga raggiunto e superato lo spessore di sicurezza del *crown pillar*. Al fine di valutare gli effetti delle modalità di coltivazione sul territorio e sull'ambiente, non potendo allo stato attuale ipotizzare una diversa metodologia di abbattimento dell'ammasso roccioso, né una diversa gestione dei vuoti, si è ritenuto opportuno valutare quali fossero i livelli di attenzione da adottare nelle aree di possibile interferenza, proponendo una metodologia di definizione del rischio funzione dello spessore del *crown pillar* e del numero di gallerie contemporaneamente sovrapposte per unità di superficie topografica esterna. Lo studio ha preliminarmente determinato i fattori di sicurezza e le probabilità di collasso per vari spessori del *crown pillar*, associandoli poi all'effettiva realtà dell'area di studio.

La caratterizzazione geotecnica dell'ammasso roccioso entro cui si sviluppano le attività minerarie è stata condotta mediante indagini dirette ed indirette ed ha comportato la valu-

tazione dei parametri di deformabilità (E_d , ν) e di resistenza, questi ultimi con riferimento al criterio di Hoek-Brown (σ_{ci} , m_b , s).

Indagine diretta

L'indagine diretta ha comportato la determinazione, in alcune aree del giacimento, dell'Indice di caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso sulle superfici verticali delle gallerie accessibili ed il tentativo di esecuzione di alcuni campionamenti con carotiere semplice. La marcata decompressione e la conseguente fratturazione non hanno consentito di ottenere campioni significativi da sottoporre a prove di laboratorio volte alla definizione dei parametri di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso. A tal fine si sono invece utilizzati dei campioni cilindrici di marmorino, ottenuti con la tecnica del doppio carotiere ed aventi un diametro di 75 millimetri; dall'analisi delle cassette di classificazione, tali campioni si possono ricondurre all'area Valmadonna - Vallagher e ad una quota di circa 60 metri s.l.m.. I campioni sono stati consegnati ad un laboratorio ufficiale, certificato per l'esecuzione delle prove su roccia secondo le raccomandazioni I.S.R.M. e le norme A.S.T.M., al fine di eseguire le seguenti prove:

- prove triassiali in cella Hoek (Figura 15) con determinazione della resistenza massima con restituzione dei diagrammi sforzi/deformazioni e determinazione del modulo di Young e del co-efficiente di Poisson (I.S.R.M., 1983);
- determinazione diretta del peso di volume (I.S.R.M., 1979);
- determinazione della velocità delle onde P e S;
- prova di trazione indiretta alla brasiliana (I.S.R.M., 1977);
- determinazione dell'indice PLT (I.S.R.M., 1985).

Prova di compressione triassiale su roccia - Tipo I - Racc. I.S.R.M. 1983

PROVINO 2

Pressione di contenimento σ_3	21,1	Mpa
Valore a rottura σ_1	272,6	Mpa
Deformazione assiale a rottura	0,003694	$\mu\epsilon$
Deformazione circonferenziale a rottura	-0,001597	$\mu\epsilon$
Modulo Elastico secante E_s assiale al 50 % della rottura	96,05	GPa
Modulo Elastico secante E_s circonferenziale al 50 % della rottura	293,75	GPa

Grafico andamento tensione assiale σ_1 vs tempo

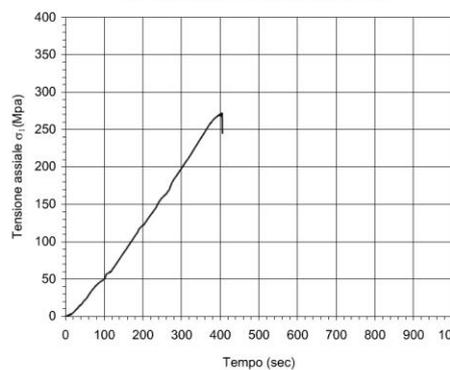


Grafico deformazione assiale ϵ_a e circonferenziale ϵ_c vs tensione assiale σ_1

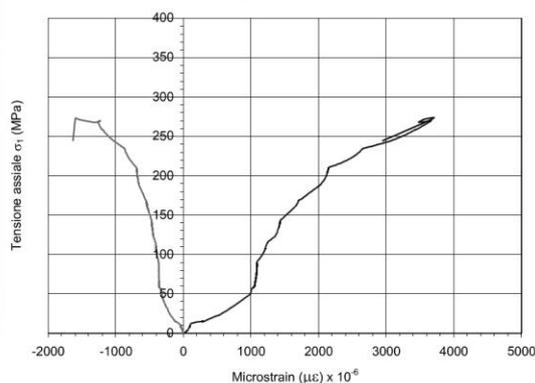


Figura 15. Prova di compressione triassiale su roccia: provino 2

Indagine indiretta

All'interno della galleria 80 della cava Valmadonna è stata effettuata una campagna di acquisizione di dati sismici, al fine di definire i campi di velocità delle onde sismiche nella propagazione entro le formazioni rocciose che costituiscono i supporti di separazione delle caverne e verificarne il grado di compattezza e di tenuta. L'indagine ha permesso inoltre di definire i parametri elastici dell'ammasso roccioso in sito attraverso le onde P ed S. Si è riscontrato che le velocità rilevate con la tomografia cross-pilastro sono molto basse, inferiori alle velocità rilevate con il profilo a rifrazione lungo una parete del pilastro e sul piano della galleria. I valori della tomografia sono assimilabili ad una sabbia cementata e senza acqua. Inoltre sono evidenti zone interessate da fratturazioni o faglie con forti indebolimenti della struttura. La rifrazione sul piano della galleria mette in evidenza le notevoli disomogeneità presenti nell'ammasso del marmorino, collegate probabilmente a situazioni deposizionali e all'evoluzione tettonica. La rifrazione sulla parete del pilastro fornisce velocità P ed S pari a 2100 e 1200 m/s rispettivamente, con un plausibile rapporto tra le due velocità pari a 1,75. La tomografia, prendendo le velocità medie attraverso il pilastro e non solo gli intervalli a velocità più alte, non fornisce valori superiori a 1500 m/s.

Determinazione degli indici geomeccanici

Per la validazione degli indici geomeccanici qualitativi dell'ammasso roccioso si sono utilizzati i risultati delle indagini sismiche eseguite al livello 80; queste hanno permesso di stimare l'Indice di qualità dell'ammasso roccioso “Q” in base alle velocità P. Una volta determinato l'indice Q, lo si è confrontato, trovandone buona corrispondenza, con i risultati delle indagini di campagna di caratterizzazione geomeccanica, al fine di derivarne il Geological Strength Index (G.S.I.) caratteristico dell'ammasso roccioso costituente il giacimento di marmorino, da cui poterne desumere i parametri di resistenza e di deformabilità. I valori caratteristici della roccia intatta sono stati desunti dalle prove di laboratorio su campioni significativi di marmorino. Si ritiene che, dal punto di vista geomeccanico, il marmorino possa essere associato ad un “brecciated limestone”, con valori caratteristici di G.S.I. compresi tra 30 e 45 a seconda delle condizioni della superficie di contatto tra i nuclei di roccia intatta. Per le finalità di questa parte dello studio, volte alla valutazione dell'interazione tra le coltivazioni all'aperto e le cavità sotterranee ed alla definizione della pericolosità e del rischio che ne consegue, si è ritenuto di utilizzare per l'indice geomeccanico G.S.I. caratteristico un valore di 30. In assenza di specifiche prove in sito, lo stato tensionale originario nell'area di studio è stato valutato considerando come sollecitazione principale σ_1 quella derivante dal carico litostatico, con un coefficiente di spinta orizzontale, k_0 , calcolato in base al modello di Sheorey.

L'interazione tra la coltivazione a cielo aperto e le gallerie esistenti, come pure l'interazione tra gallerie disposte su più livelli aventi pertanto quote diverse, è stata analizzata mediante una modellazione numerica che consenta di definire, con un grado di precisione direttamente proporzionale alla significatività dei dati di input, il fattore di sicurezza e la propensione al crollo delle solette presenti tra aree sovrapposte di scavo. La modellazione numerica è stata condotta utilizzando il programma di calcolo CPILLAR (2003), che risulta di comprovata affidabilità e di specifica applicabilità alle problematiche legate alla stabilità dei crown pillars minerari. Il programma permette di definire la stabilità di qualsiasi pilastro orizzontale presente in una miniera, sia quello di testa “surface crown pillar”, sia quelli frapposti tra i diversi cantieri di coltivazione in sotterraneo.

L'analisi condotta è consistita nella determinazione delle condizioni di equilibrio limite nelle tre condizioni specifiche: lastra rigida, lastra elastica e lastra “voussoir” (no tension). L'analisi della probabilità di rottura è di tipo statistico, una volta definite le deviazioni standard, rispetto al valore medio, dei parametri caratteristici dell'ammasso roccioso e dei cari-

chi. Si sono valutate le modalità di rottura conseguenti al cedimento del blocco chiave, alla compressione, al taglio ed alla flessione. Lo stato tensionale considerato è stato di tipo gravitativo, con k_0 pari a 0,5. Il criterio di resistenza associato all'ammasso roccioso è quello di Hoek & Brown generalizzato. La stabilità della porzione di giacimento posta tra la coltivazione a cielo aperto e quella in sotterraneo è stata analizzata considerando, a favore di sicurezza, un pilastro di corona avente una pianta pari a 10 x 10 metri ed una potenza variabile tra 2,5 e 20 metri. Per tener conto della possibilità che il pilastro sia soggetto ad un sovraccarico dovuto ai mezzi d'opera o ad uno strato di materiale di copertura, si sono sviluppate le simulazioni numeriche considerando due ipotesi: la prima senza carico e la seconda con carico. Le analisi numeriche condotte hanno portato alla definizione dei "fattori di sicurezza" per le varie geometrie ed i meccanismi di collasso ipotizzati risultano essere significativi alla luce dei fenomeni di dissesto che nel passato si sono verificati nell'area. In particolare, la rottura per taglio lungo superfici subverticali appare possibile in porzioni di giacimento poste alle quote più elevate, dove l'ammasso roccioso è più rigido ed il suo comportamento è ascrivibile ad un mezzo discontinuo, mentre quella per collasso flessionale appare possibile in porzioni di giacimento poste alle quote inferiori, dove l'ammasso roccioso ha un comportamento più isotropo e plastico. La Figura 16 riporta il fattore di sicurezza per la soluzione rigida ed elastica per i vari spessori del pilastro di testa, rispettivamente per la condizione scarica e carica.

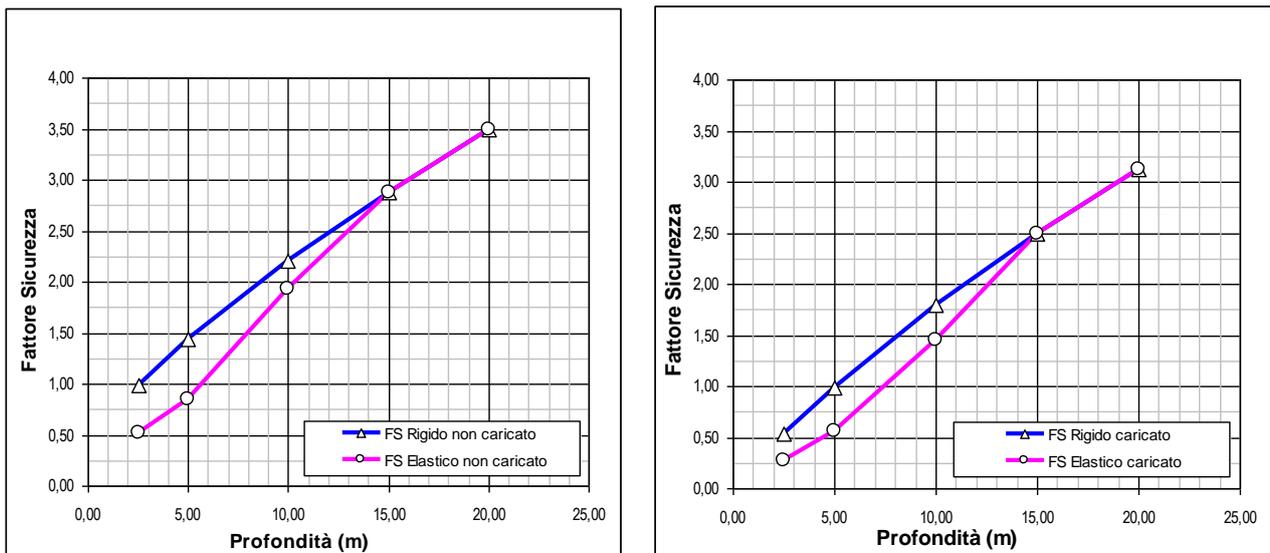


Figura 16 Fattore di sicurezza soletta di cava

Determinazione degli effetti della coltivazione sul territorio

Le modellazioni numeriche, condotte per determinare le probabilità di rottura dei pilastri di testa a causa dell'interazione tra sotterraneo e aperto in fase di coltivazione, hanno indicato una differenziazione delle stesse in relazione allo spessore di ammasso roccioso integro; in particolare si è visto che per uno spessore di 10 metri sussiste una, seppur minima, probabilità di rottura, mentre per uno spessore di 5 metri questa diventa pressoché certa. Dalla modellazione numerica risulta pertanto che è possibile differenziare l'effetto della coltivazione sulla base della potenza verticale del pilastro; si è pertanto prodotta una cartografia di base sulla quale si è riportata la distanza minima della calotta delle gallerie dalla superficie topografica, sia dello stato attuale, sia dello stato di progetto. Dall'analisi fenomenologica relativa al collasso delle cavità è noto che la dimensione e la forma del vuoto

possono influire in modo sinergico laddove si abbiano gallerie sovrapposte su livelli differenti; si è pertanto predisposta una cartografia di base sulla quale si è riportato il numero di gallerie che accade si sovrappongono in uno stesso punto topografico.

Al fine di determinare gli effetti della coltivazione sul territorio si propone:

- un “indice di pericolosità P”, compreso tra P1 = bassa e P4 = molto elevata, direttamente correlato alla distanza minima delle gallerie dalla superficie;
- un “indice di rischio R”, compreso tra R1 = basso e R4 = molto elevato, ottenuto assegnando un peso alle distanze ed applicandolo al numero di gallerie che si sovrappongono in uno stesso punto.

Sulla base di questi due indici si ritiene sia possibile valutare gli effetti delle modalità di coltivazione sul territorio e sull’ambiente in relazione all’attività estrattiva attuale e futura. La determinazione degli indici è stata possibile operando con i Sistemi Informativi Territoriali che permettono di gestire abbastanza agevolmente un’ampia mole di dati. L’elaborazione di una mappa in grado di fornire informazioni puntuali trae beneficio dall’utilizzo di tali sistemi con i quali è possibile elaborare i modelli digitali prima ottenuti. Nel caso specifico è stato utilizzato Grass, Opensource che lavora in ambiente Linux, che permette di eseguire sia operazioni semplici che complesse raster, sia la successiva visualizzazione bidimensionale e tridimensionale. Nella valutazione della distanza delle gallerie dalla superficie sono stati utilizzati i vettoriali che definiscono la chiave, il tetto e la base per ciascun livello considerato ed una volta trasformati in raster sono stati confrontati con i modelli digitali del terreno. Nell’elaborazione dei dati relativi alle gallerie rilevate, data la precisione della planimetria, si è preferito usare come linee quelle definite dall’intersezione fra il lato inclinato e quello che congiungeva il punto di chiave; una volta trasformate si è eseguita un’operazione di buffer su di esse, ovvero si è delimitata un’area che definisce la distanza dalla linea attorno ad essa, area che poi è stata riclassificata in modo tale da sostituire al valore della distanza un valore numerico arbitrario pari ad uno. Così facendo è stato definito un raster che fornisce l’andamento planimetrico della galleria. Per le gallerie che non è stato possibile rilevare e sono pertanto ricostruite su base ipotetica, la geometria risulta più regolare e ciò ha favorito l’esportazione dei dati. I raster così definiti, comparati con i raster del modello digitale del terreno relativi sia allo stato di fatto che a quello di progetto, hanno permesso di ottenere una mappa in grado di rappresentare l’andamento dello spessore di terreno presente fra il suolo e la volta della galleria. Per riassumere in due sole mappe quello che è il valore dello spessore del terreno si è calcolato il valore minimo e massimo della profondità delle gallerie. Prima di fare questo calcolo si sono dovuti annullare tutti i valori minori di zero, tratti di gallerie già scavate, in modo da non coprire eventuali gallerie che, coincidendo planimetricamente ma risultando a profondità maggiore, sarebbero state nascoste. Il calcolo è stato fatto in modo tale che, per ogni pixel, venisse confrontato il valore assunto dai raster caratteristici della profondità di tutte le gallerie presenti in quell’area e venissero presi rispettivamente quelli con profondità minore e maggiore. Con i valori così ottenuti si sono create due mappe che definiscono l’intervallo di valori entro i quali sono comprese le gallerie: per ogni punto si ha la profondità a cui si incontra la prima galleria e quella a cui si incontra l’ultima, e chiaramente l’area in cui sono presenti. La definizione di un raster per ciascun livello ha permesso l’elaborazione di una mappa in grado di rappresentare quali e quanti livelli sono presenti in uno stesso punto (x,y).

La Figura 17 sintetizza lo schema operativo che ha permesso di generare le mappe conoscitive dell’interferenza tra il sottosuolo ed il soprassuolo. Le Figure 18 ÷ 21 riportano alcune elaborazioni significative ottenute grazie alle informazioni desumibili dalle mappe ora citate.

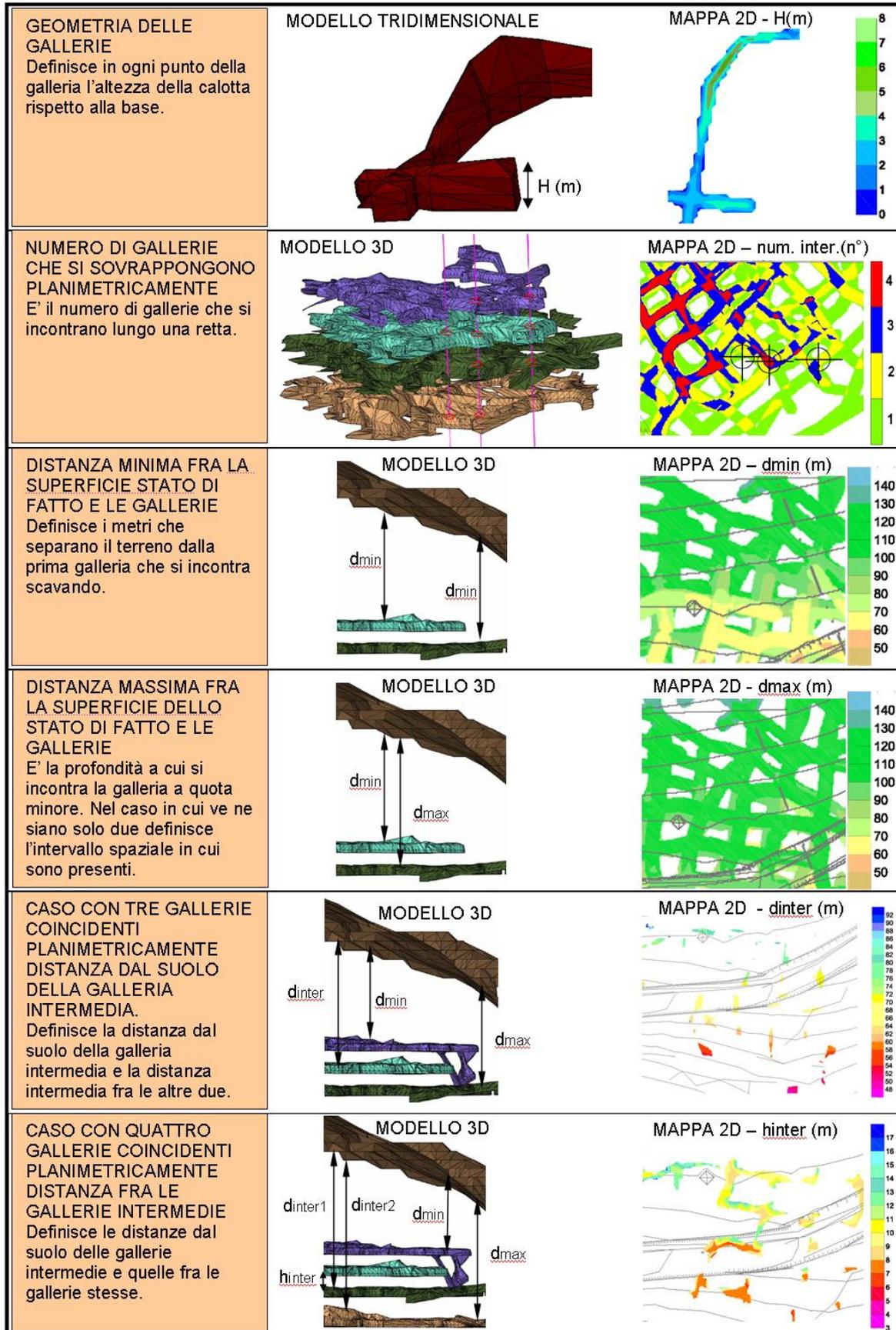


Figura 17 Elaborazione e creazione di mappe tramite l'utilizzo di G.I.S.

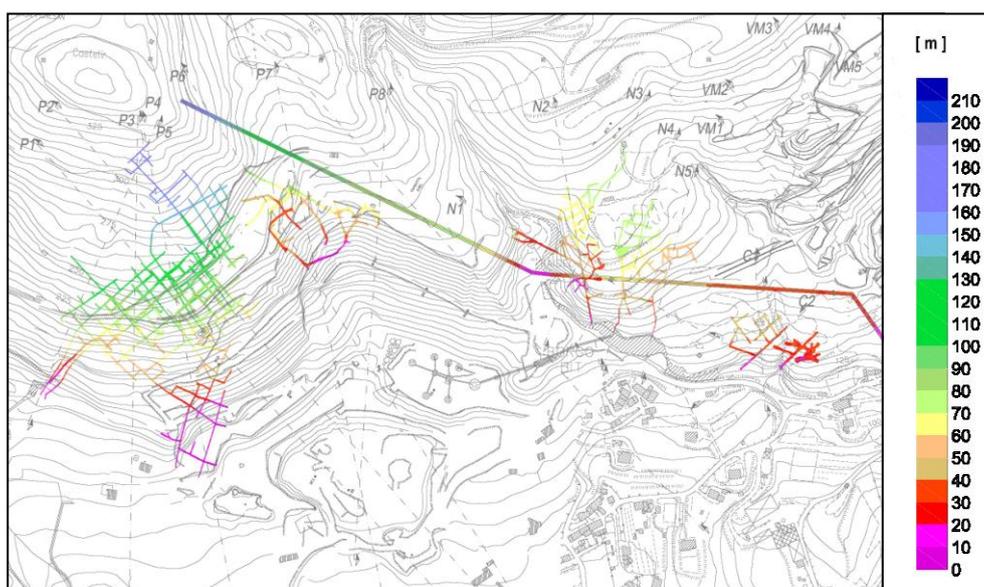


Figura 18 Distanza minima delle cavità dalla superficie dello stato di fatto: Piai Dal Cin, Valcovrera, Chiaradia, e Galleria ENEL

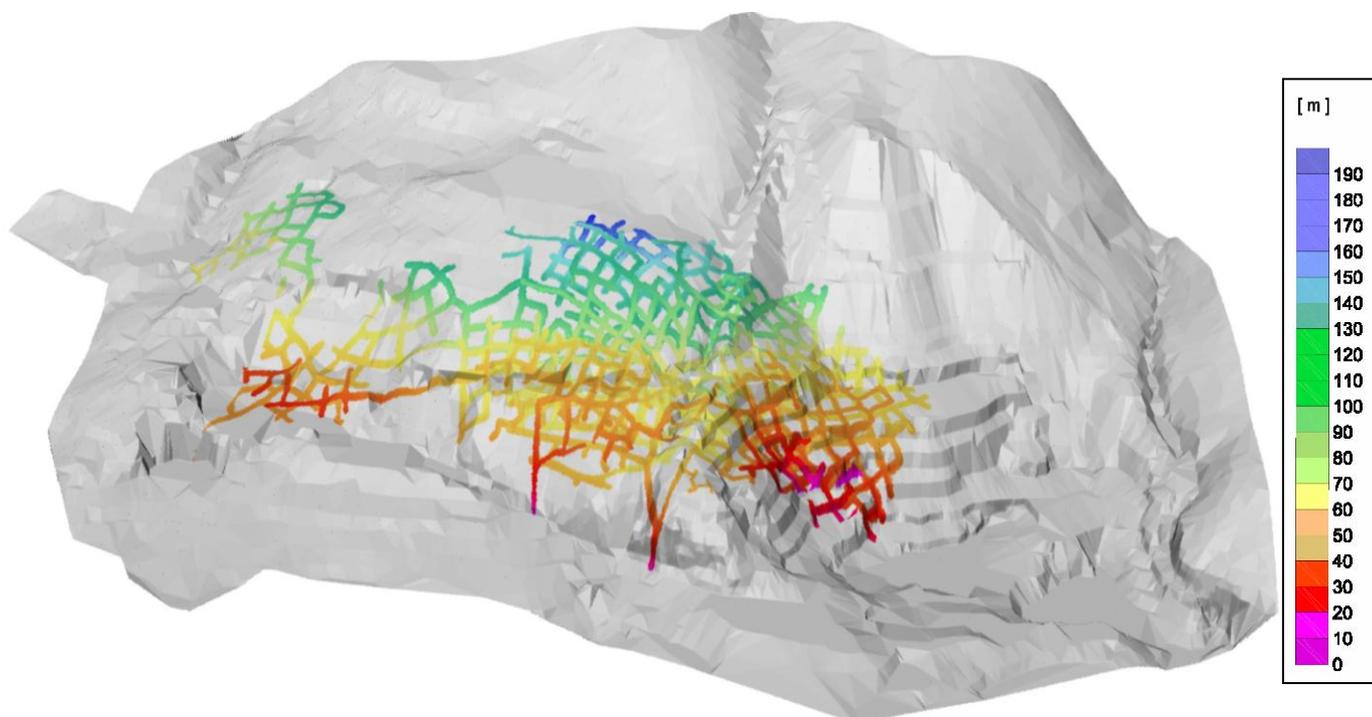


Figura 19 Distanza minima delle cavità dalla superficie dello stato di fatto: Pedemonte e Valmadonna

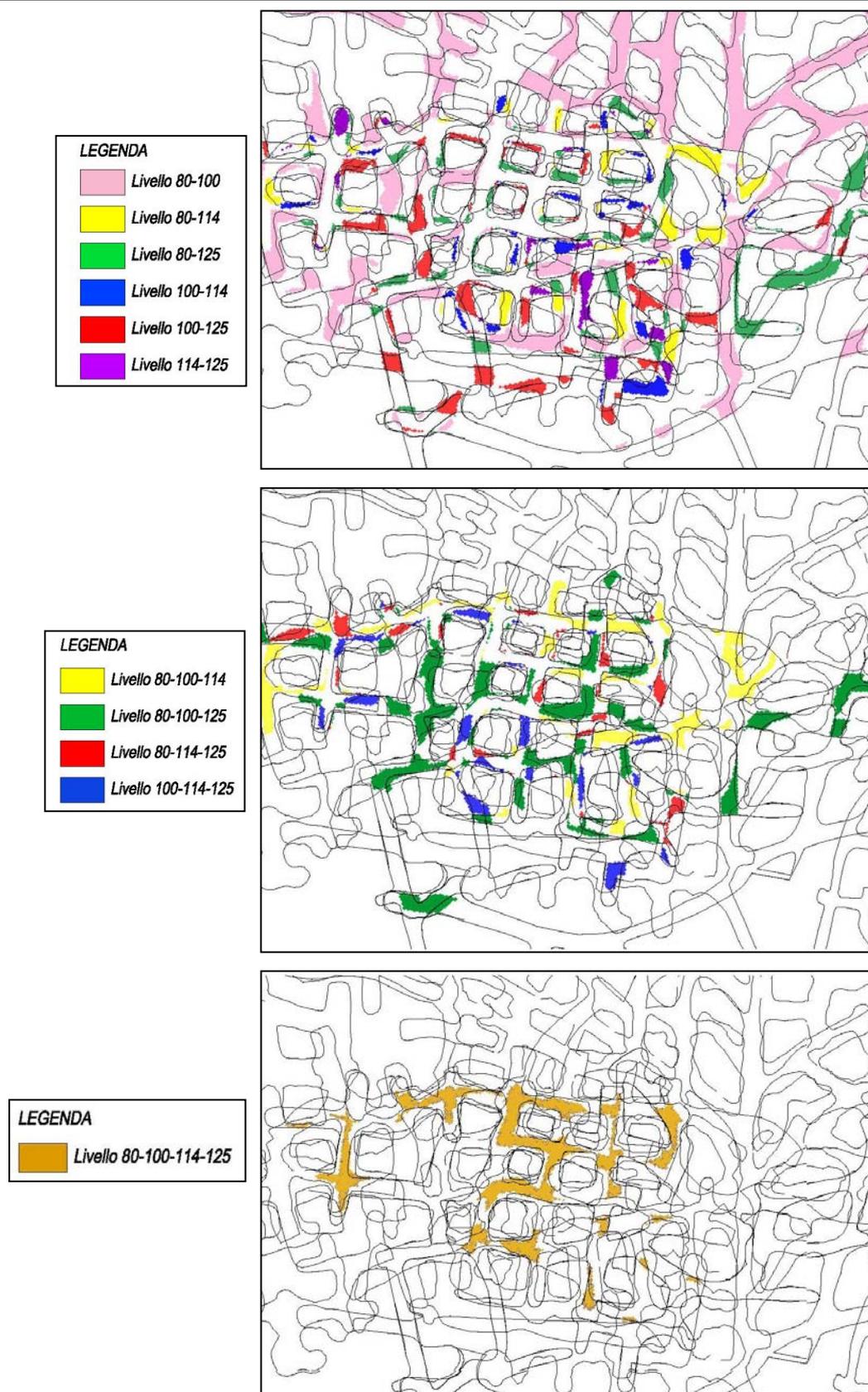


Figura 20 Zone di intersezione planimetrica fra i diversi livelli: Zona Pedemonte - Valmadonna

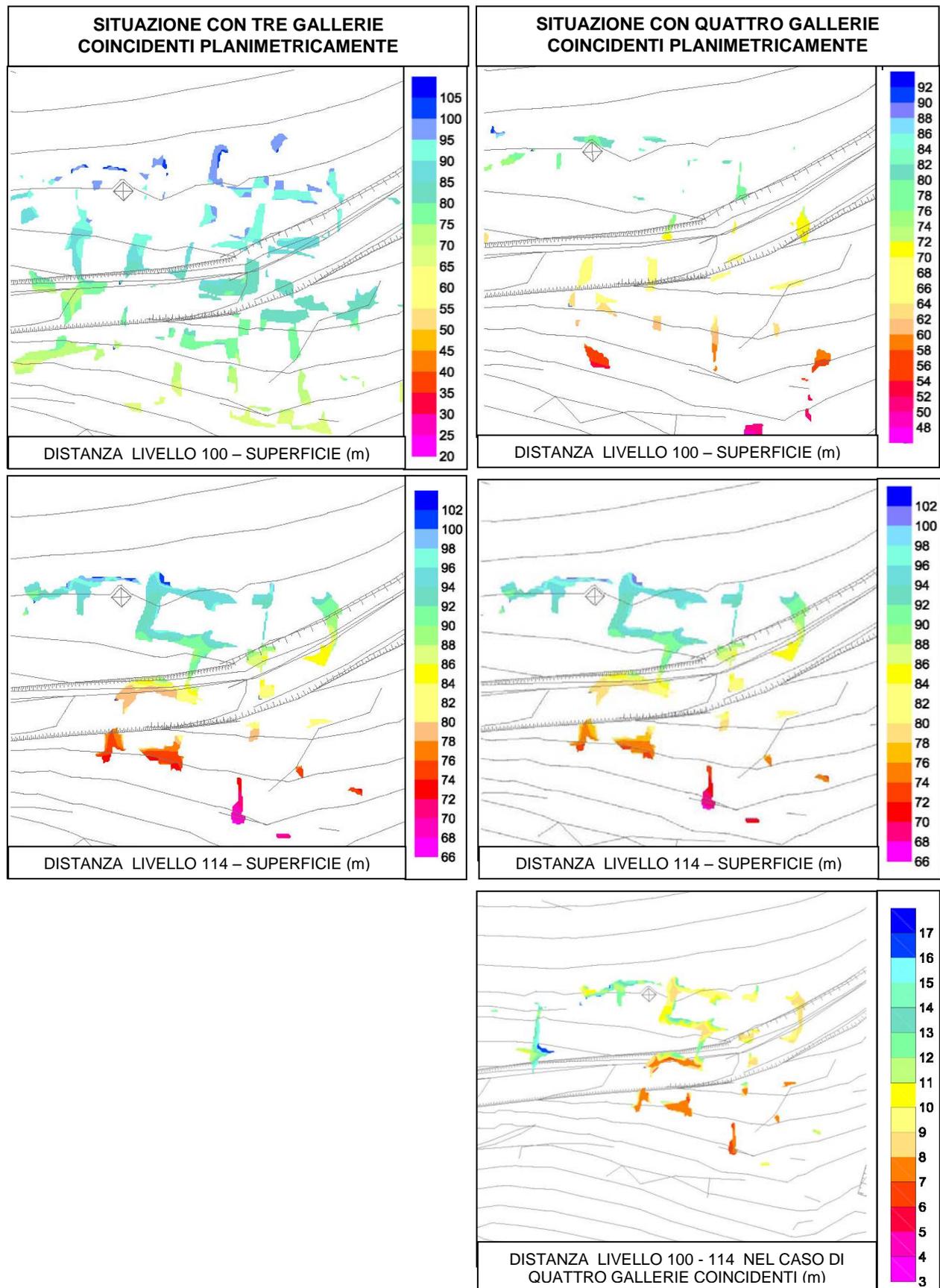


Figura 21 Posizione dei livelli intermedi rispetto alla superficie dello stato di fatto e distanza fra i due livelli intermedi nel caso di quattro gallerie coincidenti planimetricamente

Proposta di una metodologia di valutazione della pericolosità e del rischio connesso all’attività mineraria

Nella valutazione dell’indice di rischio è stata ritenuta di fondamentale importanza la distanza minima dalla superficie; ai 4 intervalli individuati è stato pertanto assegnato un valore (peso). La presenza di gallerie poste su livelli (quote) differenti, ma aventi le stesse coordinate (x,y), è stata soggetta ad un apposito peso. Si è arrivati infine a definire e proporre una matrice di definizione del rischio “minerario”. Le Figure 22 e 23 riporta la “Carta del rischio” e la “Carta della pericolosità” delle cave Pedemonte – Valmadonna.

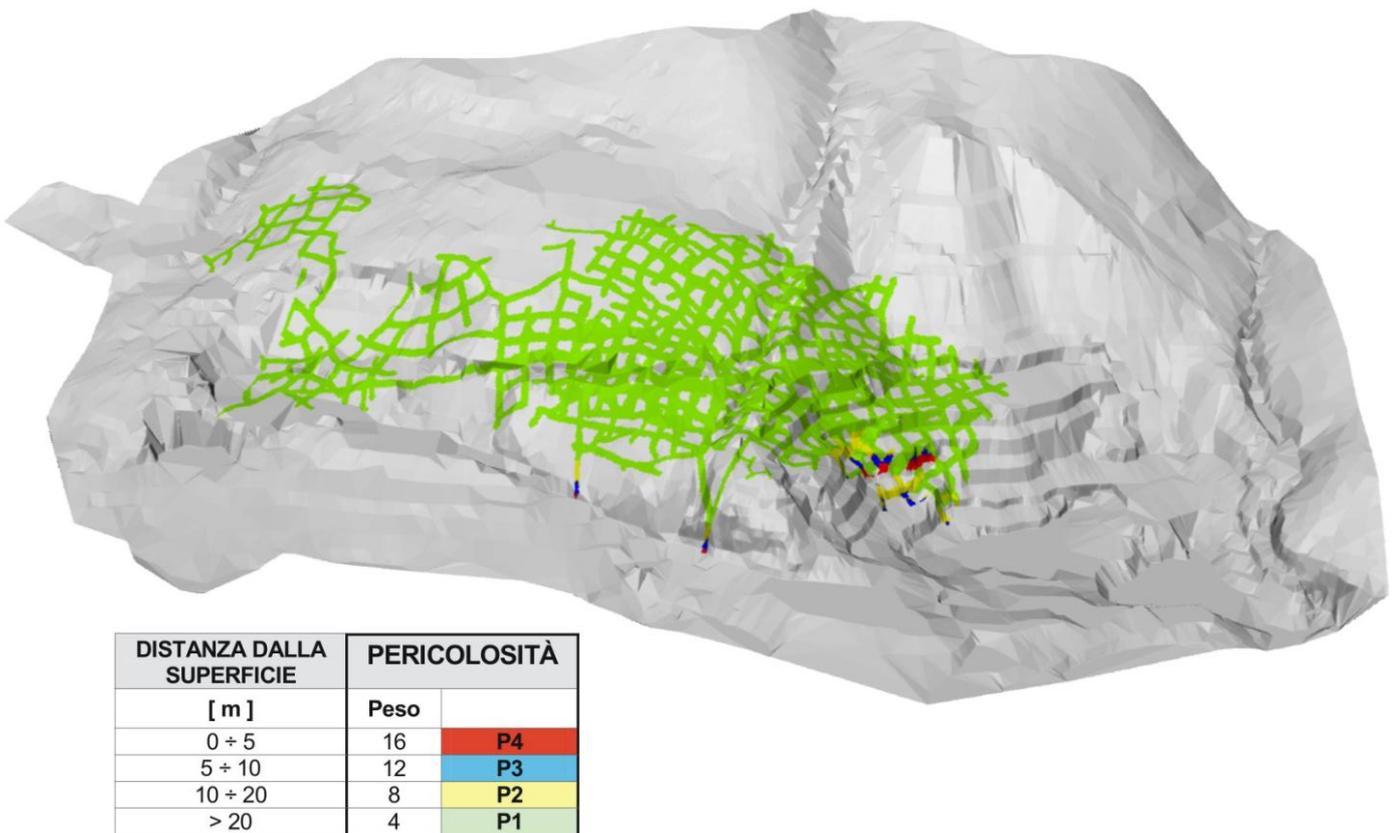


Figura 22 Carta della pericolosità: zona Pedemonte - Valmadonna

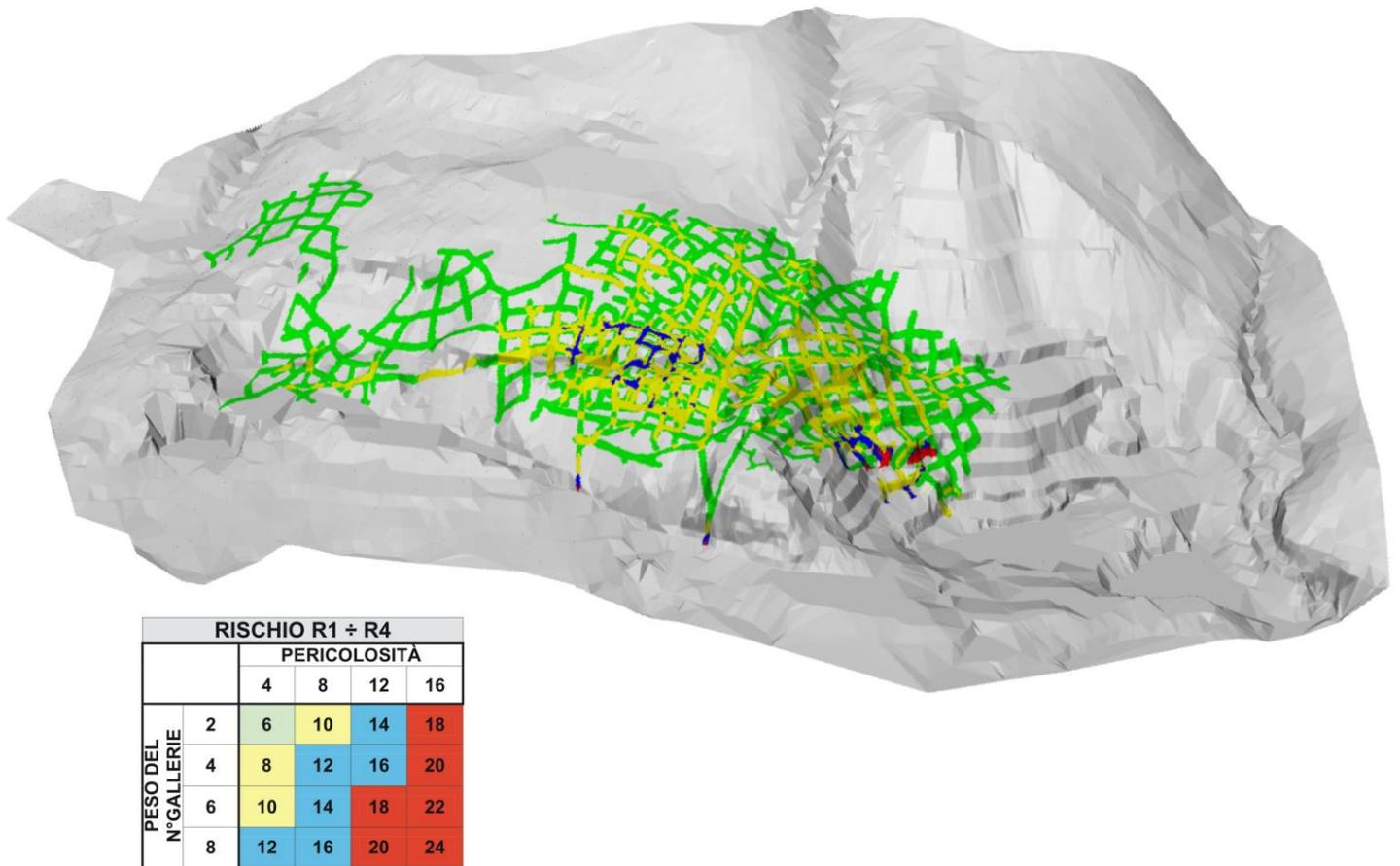


Figura 23 Carta del rischio: zona Pedemonte - Valmadonna

Individuazione dei vuoti mediante tecniche indirette

I rilievi geometrici effettuati hanno consentito di determinare i valori altimetrici dei livelli delle gallerie presenti a varie profondità. Una volta definita anche l'ampiezza dei cunicoli, ed in particolare la loro altezza in calotta, erano evidenti delle situazioni di possibile interferenza con le attività di escavazione dalla superficie. Si è pertanto eseguito un test con impiego di strumentazione georadar, per verificare l'efficacia del sistema nell'individuare la presenza di eventuali cunicoli ignoti sottostanti una pista di normale percorrenza. A seguito degli ottimi risultati del test, questo metodo è stato successivamente impiegato in rilievi sistematici, programmati nella normale attività estrattiva di superficie. Il test ha interessato un'area in cava "Valmadonna", dove una galleria del livello 100, per un tratto di circa 40 metri, risulta svilupparsi proprio sopra 3 sottostanti gallerie del livello 80. Come base topografica, si è utilizzato il rilievo planimetrico fornito dal Servizio Geologico, modificato ed integrato sia con le misure delle sezioni trasversali rilevate, che con gli effettivi valori altimetrici prodotti dalle livellazioni geometriche. Per la galleria superiore, le quote effettive di calpestio risultano pertanto di 100,99 - 101,40 - 101,89 metri s.l.m.. Per le tre sezioni delle gallerie inferiori, le quote effettive di calpestio risultano di 83,40 - 83,36 - 83,37 metri s.l.m., mentre quelle massime in calotta risultano di 87,22 - 87,19 - 87,14 metri s.l.m.. Lo spessore di copertura risulta quindi pari a 13,8 - 14,2 e 14,7 metri, molto interessante per testare le possibilità del sistema, permettendo sia una verifica della profondità di investigazione del metodo, che una calibrazione della velocità di propagazione delle onde radar nella

massa rocciosa del "marmorino". Nel tratto individuato, l'indagine è consistita nell'esecuzione di vari profili georadar, ripetuti più volte per meglio definire i parametri di registrazione, producendo una sezione interpretativa finale di lunghezza complessiva di 36 metri. Nell'indagine in galleria si è utilizzata una frequenza radar di emissione pari a 100 MHz, che fornisce un buon compromesso tra dettaglio e profondità di indagine. Nel profilo finale, si è adottato un fondo scala di 450 nsec, che ha consentito di raggiungere una profondità di investigazione di circa 22 metri. Durante l'acquisizione dei dati, sono stati emessi 40 segnali/sec con un campionamento di 512 valori/segnale. Nell'esecuzione dei profili lungo il tratto di galleria, si è proceduto con trascinamento manuale, dopo aver preliminarmente eseguito una metratura del profilo con cordella metrica e marcando nelle registrazioni tacche di riferimento con passo di 2 metri. Già in fase di acquisizione, tutte le registrazioni hanno evidenziato subito un'ottima penetrazione dei segnali in profondità all'interno del marmorino. Noto in partenza il reale spessore minimo di copertura attraversato dai segnali (variabile da 14 a 15 metri circa), una volta applicata l'adeguata costante dielettrica dei segnali (pari a 7.5), si è potuta ottenere una rappresentazione con scala metrica verticale corretta. Questa rappresentazione trova un'ottima corrispondenza con i rilievi geometrici effettuati e mette in evidenza anche un piccolo errore di posizione planimetrica della cartografia originale per il sottostante cunicolo siglato dalla sezione 690. Il test con metodo georadar, eseguito su marmorino di particolare qualità merceologica, è risultato efficace nell'individuazione di cunicoli sepolti, fino alla profondità di 15 ÷ 17 metri dal piano di indagine. Gli ottimi risultati si sono comunque ottenuti programmando una "intercettazione" ortogonale dei cunicoli sottostanti, mentre per angoli diversi le "iperboli di riflessione" (che evidenziano la presenza dei vuoti) potrebbero risultare senz'altro meno evidenti.

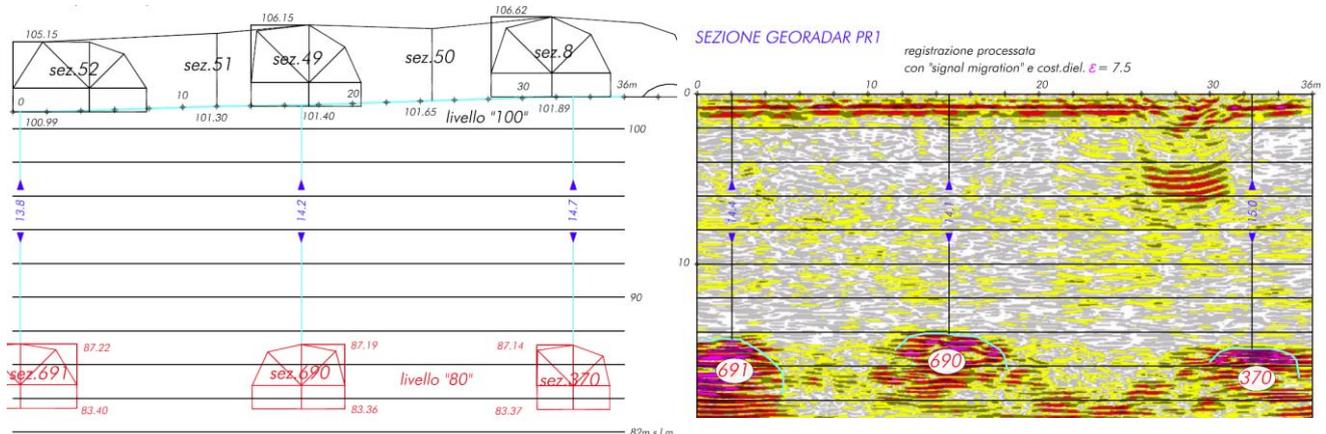


Figura 24 Sezione topografica e georadar, dal livello 100 m delle gallerie "Valmadonna". Fondo scala verticale = 22m dal piano di indagine. I cunicoli sottostanti, riconoscibili dalle anomalie cromatiche, corrispondono alle sezioni trasversali 691, 690 e 370 del livello 80 m

Proposta di una coltivazione in sotterraneo con metodo sublevel stopping

La coltivazione a cielo aperto non potrà essere sviluppata oltre determinati valori di rapporti di scopertura ("stripping ratio"), in una prospettiva a medio-lungo termine è pertanto necessario prevedere una coltivazione in sotterraneo con metodologie che minimizzino il rischio per gli addetti alle operazioni di coltivazione e per l'ambiente circostante. Il giacimento di marmorino ed il versante calcareo che lo sovrasta hanno immersione opposta; ne consegue che il progressivo sviluppo della coltivazione verso l'interno comporta un incre-

mento della copertura, sulla verticale del punto considerato, dato dalla somma in valore assoluto delle quote che competono in quel punto al giacimento ed al versante. Assumendo come valori medi un'inclinazione del versante di 32° ed un'inclinazione del giacimento di 18° , risulta che l'incremento dello spessore di copertura da asportare per ogni metro di sviluppo verso l'interno della coltivazione è pari a circa 1,2 metri. Considerato che attualmente la differenza di quota tra tetto del giacimento e superficie topografica è mediamente di oltre 60 metri, si evince quali possono essere gli ordini di spessore progressivamente assunti e le conseguenze di carattere ambientale che l'asportazione della copertura può indurre. Si ritiene che sia pertanto opportuno prendere in considerazione la necessità di intraprendere uno studio per adottare un metodo di coltivazione in sotterraneo che dia garanzia di stabilità geostatica e di economicità di realizzazione. Si fa presente che i metodi fino ad ora adottati sono stati sviluppati quasi sempre su un unico livello, quindi caratterizzati dai costi unitari che competono allo scavo delle gallerie. Tali costi unitari sono stati decrementati con abbattimenti di sparetamento e di scoronamento eseguiti successivamente allo scavo delle gallerie, ma sicuramente il loro valore rimane sempre elevato. Per conseguire costi di abbattimento che possano avvicinarsi a quelli di una coltivazione a cielo aperto, è necessario introdurre un metodo di coltivazione che definisca, con opportuni lavori di preparazione, pannelli a prevalente sviluppo verticale che possano essere abbattuti con metodologia assimilabile all'abbattimento di un gradone di cava.

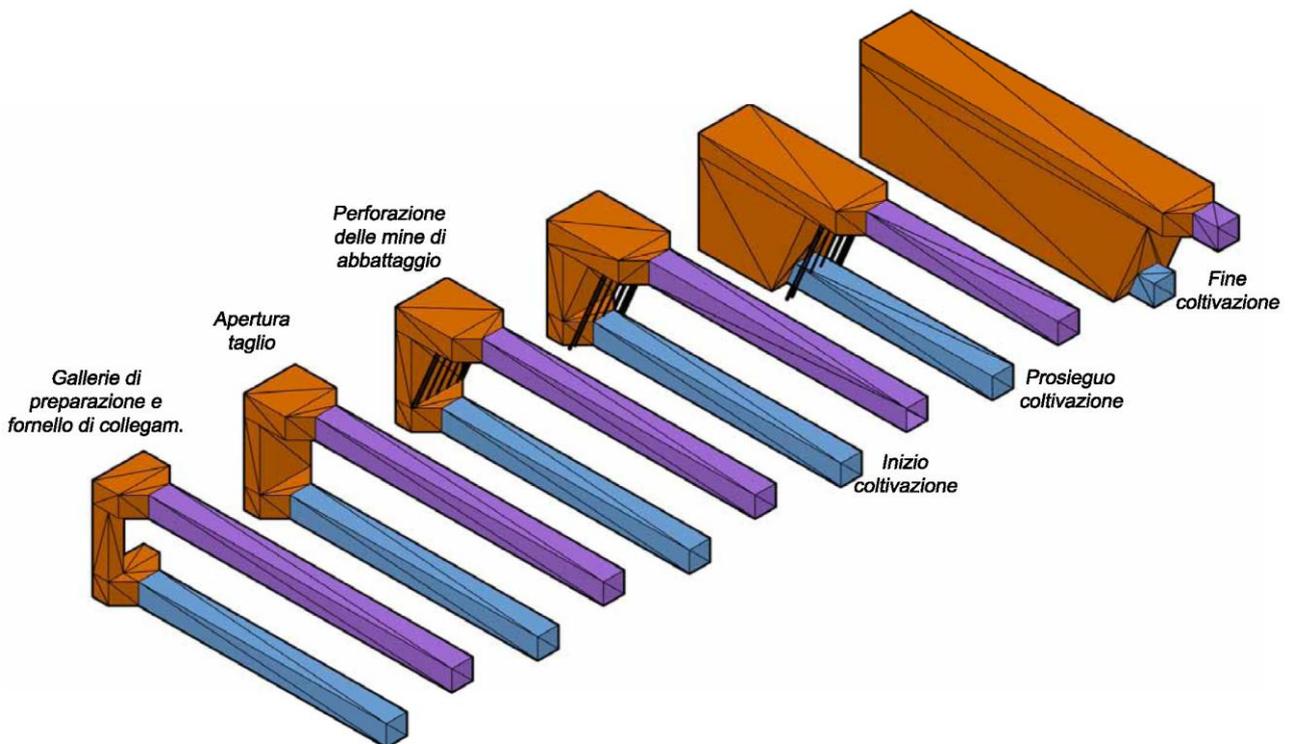


Figura 25 Schema 3D della coltivazione a camere e pilastri con il metodo sublevel stoping

La Figura 25 illustra in forma schematica la sequenza delle operazioni di scavo riferite ad un pannello con le seguenti dimensioni: larghezza 10 metri; altezza 20 metri; lunghezza 57 metri. Il volume di marmorino compreso nel pannello è pari a poco più di 11.000 metri cubi. Tali dimensioni sono state ipotizzate sulla base di osservazioni effettuate nelle gallerie attualmente accessibili relativamente alla natura del materiale ed alla forma e stabilità dei vuoti esistenti. È un'ipotesi che deve essere sperimentalmente verificata, possibilmente in

una zona dove già esistano gallerie perfettamente sovrapposte e dove la copertura sia tale che, in caso di collasso della volta, la frana non si propaghi fino alla superficie.

Si è effettuata una verifica sulla propagazione verso l'alto di un collasso in roccia calcarea. La verifica è stata eseguita con calcolo infinitesimale basato sul fatto che la roccia che collassa subisce un aumento di volume che tende via via a cicatrizzare il vuoto stesso (Figura 26). Trattandosi di roccia milonitica, è molto remota la possibilità che si possa verificare un crollo con effetto pistone controllato da faglie con conseguente modesto aumento di volume della massa collassata e pertanto con rischio di propagazione verso l'alto non quantificabile. Nel caso specifico il collasso dovrebbe avvenire per disgregazione della roccia con aumento di volume della massa collassata. Tale incremento di volume è uguale al rapporto tra i pesi dell'unità di volume della roccia sana (2,5) e della roccia collassata (1,6). Al tetto del vuoto di coltivazione creato si possono formare quindi collassi in successione verso l'alto con formazione di vuoti sempre più ridotti. (Il primo vuoto che si formerà al tetto del vuoto iniziale sarà uguale al prodotto fra quest'ultimo e l'inverso dell'aumento di volume; e così di seguito fino alla cicatrizzazione del collasso). Il volume totale interessato è calcolato utilizzando una progressione geometrica decrescente indefinita per $n \rightarrow \infty$. L'altezza della campana di collasso che può formarsi al tetto del vuoto di coltivazione risulta essere pari a: $2,8 - 1 = 1,8$ volte l'altezza del vuoto.

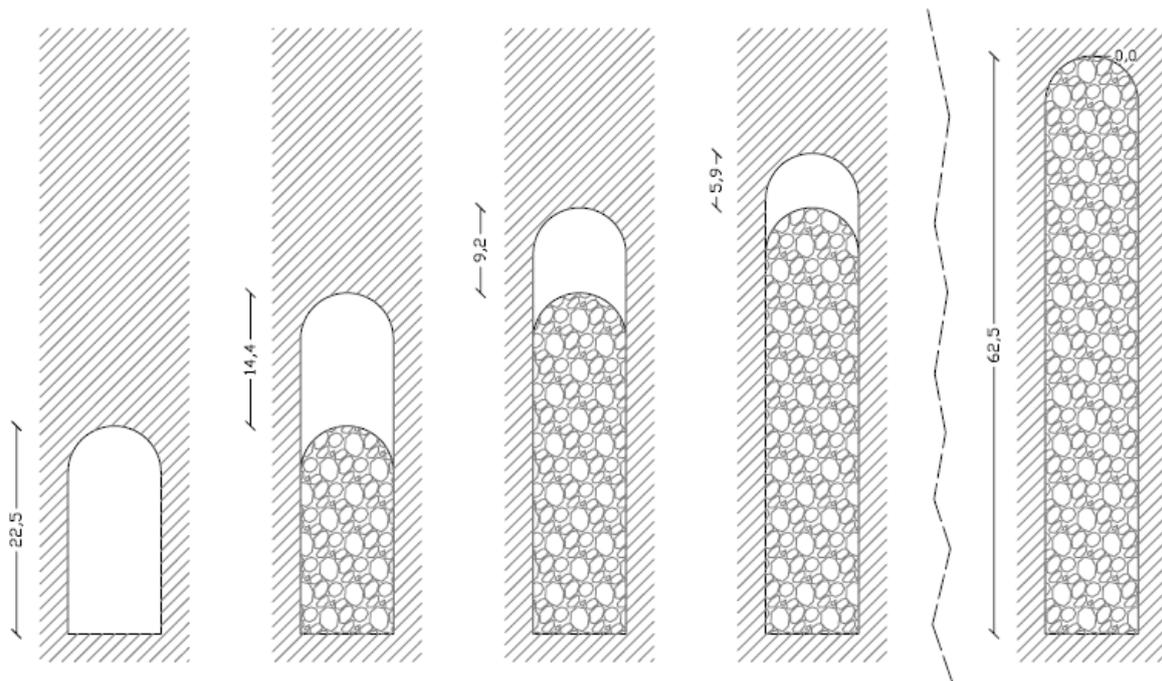


Figura 26 Stadi successivi della propagazione verso l'alto del collasso della volta di un vuoto di forma geometrica regolare in roccia calcarea fratturata

La coltivazione potrà essere sviluppata per camere parallele lasciando fra di esse dei pilastri che saranno dimensionati sulla base di un'accurata caratterizzazione geotecnica della roccia e distribuiti in funzione di esigenze locali che terranno conto della bontà del minerale e della eventuale presenza di disturbi tettonici. Le ipotesi di rendimenti e di costi sono state confrontate con i rendimenti ed i costi che generalmente vengono realizzati in una

cava di calcare a cielo aperto; ciò in quanto non si dispone di dati specifici relativi alla coltivazione in atto nelle cave di marmorino.

I costi di coltivazione in sotterraneo risultano essere circa il 50% superiori a quelli a cielo aperto, ma probabilmente compatibili con il valore di vendita del marmorino. Per quanto attiene alla coltivazione in sotterraneo con metodo sublevel stoping, si evince l'elevata incidenza del costo dei lavori di preparazione rispetto ai lavori di abbattimento vero e proprio del minerale. Da ciò risulta evidente che il costo unitario medio globale è inversamente proporzionale alla dimensione delle camere di coltivazione. Il raffronto con la coltivazione a cielo aperto tiene conto anche dei lavori di preparazione e di recupero ambientale che quest'ultima richiede. Non tiene invece conto delle difficoltà che possono essere indotte in una coltivazione a cielo aperto dalle condizioni climatiche che invece hanno contenuta incidenza nei lavori in sotterraneo. L'ipotesi di costo relativamente alle gallerie di preparazione è stata basata sullo scavo realizzato con l'impiego di esplosivo. Va verificata la possibilità di decremento di costo impiegando mezzi meccanici, come una piccola fresa ad attacco puntuale, riservando l'impiego di esplosivo unicamente allo scavo dell'apertura taglio ed all'abbattimento del pannello.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI ESSENZIALI

- AA.VV., 1985. *Neotectonic Map of Italy, CNR Progetto finalizzato "Geodinamica"* – Roma.
- Beinat A., Crosilla F., Furlan-Radivo R., Marchesini C., Mozzi G., Renner G., Zambon G. & Zanferrari A., 1988. *Studio multidisciplinare dell'attività neotettonica dell'area di Caneva (Friuli)*. In: Proc. 7th Annual Congress of the Gruppo di Studio Geofisica della Terra solida.
- Cancian G., Ghetti I. e Semenza E., 1985. *Aspetti geologici dell'altipiano del Cansiglio*. Soc. Veneta di Sc Nat., vol. 10 - Venezia.
- Carulli G.B., 2006. *Carta geologica del Friuli Venezia Giulia, scala 1:150.000*. Regione F.V.G., Direzione Regionale Ambiente e Lavori Pubblici, Servizio Geologico Regionale. Selca, Firenze.
- Fantoni R., Catellani D., Merlini S., Rogledi S. & Venturini S., 2002. *La registrazione degli eventi deformativi cenozoici nell'avampese Veneto-Friulano*. Mem. Soc. Geol It. 57, pp. 301 ÷ 313.
- Fontanive F., 1978. *Fenomeni di deformazione gravitativa lungo il versante meridionale del monte Castelir e loro influenza sulla struttura del giacimento di "marmorino" di Caneva (Pordenone)*. Istituto di Chimica Applicata e Industriale; Quaderno n. 75. pp. 48.
- Fontanive F., De Nardin D., 1989. *Aspetti geostrutturali del giacimento di marmorino di Caneva (Pordenone)*. Quarry & Construction – Parma, Vol. 10, pp. 101 ÷ 113.
- Galadini F., Poli M.E., & Zanferrari A., 2005. *Seismogenic sources potentially responsible for earthquakes with $M > 6$ in the eastern Southern alps (Thiene-Udine sector, NE Italy)*. Geophysics J. Vol. 161, pp. 739 ÷ 762.
- Grass Development Team, 2006. *Geographic Resources Analysis Support System (Grass) Software*. ITC-irst, Trento, Italy. <http://grass.itc.it>
- Mineraria Sacilese S.p.A., 2004. *Stratigrafie di sondaggi geognostici nella miniera di Pedemonte*. Rapporto interno.
- Onofri R., Ulcigrai F., 1975. *Ricerca sui giacimenti di carbonato di calcio nella zona di Caneva di Sacile (Pordenone)*. In: Studi sul carbonato di calcio della regione Friuli Venezia Giulia, Regione F.V.G.. Trieste, pp. 102.
- Zenari S., 1929. *Studio geo-idrologico del bacino del T. Cellina* – Uff. Idr. Magistrato alle Acque di Venezia; Padova, pp. 125.

INDICE

1.	IL “MARMORINO”	1
2.	RICOSTRUZIONE 3D DEL SOPRASSUOLO E DEL SOTTOSUOLO DELL’AREA DI STUDIO	3
3.	RILEVAMENTO GEOLOGICO	8
4.	IL GIACIMENTO	13
5.	LA COLTIVAZIONE DEL MARMORINO.....	25
6.	UTILIZZO SOSTENIBILE DELLA RISORSA	27