



REGIONE TOSCANA

GIUNTA REGIONALE

PIANO REGIONALE CAVE

L.r. 25 marzo 2015 n.35

PROGETTO DI INDAGINE TRIDIMENSIONALE DELLA RISORSA MARMIFERA DEL SOTTOSUOLO DELLE ALPI APUANE

RELAZIONE FINALE

**PR
12**

Approvato con Delibera del Consiglio Regionale n° 47 del 21/07/2020





ISO 9001:2008 - Nr. Reg.: CH-32286

PROGETTO:

**PROGETTO D'INDAGINE TRIDIMENSIONALE
DELLA RISORSA MARMIFERA DEL SOTTOSUOLO
DELLE ALPI APUANE**

COMMITTENTE

REGIONE TOSCANA

Direzione Politiche Mobilità, Infrastrutture e Trasporto Pubblico Locale
Settore Pianificazione e controlli in materia di cave

OGGETTO:

**RELAZIONE
FINALE**

DATA:

2 Maggio 2018

ELABORATO:

ALLEGATO TECNICO

FILE:

Relazione Finale_v05.docx

PROTOCOLLO:

744/2

PROGETTO CGT:

n° 302

SCALA:

- - -

REVISIONE	DESCRIZIONE	ELABORATO:	VERIFICATO:	APPROVATO:	DATA:
	Versione_6	STAFF	Massa	Conti - Carmignani	05/04/2018

INDICE

1. PREMESSA	4
2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO, GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELLE ALPI APUANE	5
2.1. <i>Inquadramento geografico</i>	5
2.2. <i>Inquadramento geologico.....</i>	6
2.3. <i>Inquadramento geomorfologico.....</i>	10
2.4. <i>Inquadramento idrogeologico.....</i>	11
3. IL MARMO DELLE ALPI APUANE.....	13
3.1. <i>Descrizione generale.....</i>	13
3.2. <i>Le varietà merceologiche e le varietà commerciali di marmo</i>	14
3.2.1. Marmi bianchi.....	15
3.2.2. Marmi grigi e venati.....	15
3.2.3. Marmi brecciati.....	16
3.2.4. Marmi cipollini	16
3.2.5. Marmi storici.....	17
3.3. <i>Varietà pregiate delle pietre ornamentali delle Alpi Apuane.....</i>	19
3.3.1. Distribuzione percentuale delle varietà merceologiche nel territorio apuano	19
3.3.2. Marmi storici PRAER 2007	20
3.4. <i>Caratteristiche meccaniche dei giacimenti marmo.....</i>	23
4. MODELLO GEOSTRUTTURALE TRIDIMENSIONALE DELLA RISORSA MARMIFERA	27
4.1. <i>Premessa</i>	27
4.2. <i>Attività di campagna</i>	30
4.3. <i>Attività di fotointerpretazione.....</i>	31
5. DESCRIZIONE FILE DI CONSEGNA	32
5.1. <i>Allegato 1 _ Ortofoto</i>	32
5.2. <i>Allegato 2 _ Elementi relativi alle attività estrattive</i>	33
5.3. <i>Allegato 3 _ Carta geomorfologica</i>	34
5.4. <i>Allegato 4 _ Carta geologica</i>	35
5.5. <i>Allegato 5 Carta Idrogeologica</i>	36
5.6. <i>Allegato 6 _ Carta delle varietà merceologiche.....</i>	38

5.7.	<i>Allegato 7 _ Analisi strutturale</i>	38
5.8.	<i>Allegato 8 _ Modello Ortofoto</i>	39
5.9.	<i>Allegato 9 _ Modello 3D marmo</i>	40
5.10.	<i>Allegato 10 _ Testo Allegati 1_9</i>	41
5.11.	<i>Modello tridimensionale_file .3rdm</i>	41
6.	BANCA DATI GIS E SISTEMA INFORMATIVO GEOGRAFICO	46
6.1.	<i>Introduzione</i>	46
6.2.	<i>Descrizione del lavoro e dati utilizzati</i>	47
7.	CONCLUSIONI	48
8.	BIBLIOGRAFIA	50

1. PREMESSA

A seguito dell'accordo di collaborazione scientifica tra la Regione Toscana e il Centro di GeoTecnologie (CGT) dell'Università degli Studi di Siena è stata condotta un'indagine finalizzata alla ricostruzione tridimensionale della risorsa marmifera nel sottosuolo delle Alpi Apuane con l'obiettivo d'interesse comune di giungere ad un quadro di riferimento della potenzialità dei giacimenti sotterranei di pietre ornamentali. Lo scopo dell'indagine è stato quello di arrivare alla quantificazione della risorsa marmifera e all'individuazione, in base a criteri di sostenibilità economica, geologica, ambientale e normativa, di possibili giacimenti sotterranei. L'intento ulteriore è stato quello di proseguire le attività di studio sulla geologia e sulla giacimentologia delle pietre ornamentali apuane al fine di indagare le caratteristiche della risorsa marmifera nel sottosuolo.

I ricercatori del CGT sono impegnati come compito statutario in attività di ricerca, di sviluppo sperimentale ed innovazione tecnologica e vantano la partecipazione a numerosi progetti nazionali e internazionali nel campo della geologia di base e della geologia applicata. In particolare le ricerche compiute nell'ambito nel settore della geologia di base nell'area Apuana, delle attività estrattive e di monitoraggio hanno prodotto numerosi dati scientifici e tecnici innovativi oggetto di pubblicazioni scientifiche in riviste nazionali ed internazionali. Le banche dati e le cartografie realizzate negli ultimi quindici anni dal CGT costituiscono attualmente il più completo set di dati geologici sulla risorsa marmifera affiorante nell'area delle Alpi Apuane e forniscono un'ottima base di partenza per il progetto di rappresentazione tridimensionale della risorsa marmifera del sottosuolo. Segue un elenco delle principali banche dati prodotte negli ultimi anni dai ricercatori del CGT:

- Banca dati del Continuum Territoriale Geologico della Regione Toscana che oltre a tutti i dati inerenti gli elementi geologici e geomorfologici in senso stretto, comprende anche l'ubicazione puntuale e areale delle zone di cava.
- Banca dati progetto marmi apuani con risoluzione di acquisizione alla scala 1:10.000 da cui sono state derivate: la Carta Giacimentologica degli Agri Marmiferi, la Carta Strutturale degli Agri Marmiferi e la Carta delle Tipologie Merceologiche dei Ravaneti.
- Progetto della Carta delle pietre ornamentali della Regione Toscana alla scala 1/10.000 che individua in tutto il territorio della Regione Toscana gli affioramenti dei materiali lapidei (marmi, graniti e pietre) evidenziando le varietà merceologiche coltivate, le relative formazioni geologiche produttive e l'ubicazione delle cave attive ed inattive.
- Progetto della Carta delle Risorse Minerarie che costituisce un documento conoscitivo per la gestione territoriale in materia di miniere, in campo ambientale e nel settore delle attività produttive.
- Progetto della Carta Geomorfologica che comprende l'aggiornamento delle frane alla data di ultima consegna (fine 2013) per l'intero territorio regionale toscano.
- Atlante dell'Uso del Sottosuolo finalizzato all'individuazione delle aree critiche in cui la risorsa del sottosuolo si trova a rischio di sfruttamento o non salvaguardia.
- Banca Dati Indagini Geotematiche (BDIG) realizzata utilizzando i dati geotematici derivati da archivi di interesse regionale, con lo scopo di fornire e valorizzare un quadro conoscitivo coerente e completo delle conoscenze geologico-tecniche del territorio della Regione Toscana.

Sulla base dei dati disponibili sopraelencati è stato condotto un aggiornamento ed un approfondimento degli elementi geologici e geomorfologici utili per la realizzazione di modelli tridimensionali della risorsa marmifera realizzati nelle zone individuate dai bacini delle aree contigue, così come definite dal Parco delle Alpi Apuane (L.R. n. 65/1997), e in un loro congruo intorno ad

esclusione del bacino 21 (All. 5 PIT). Le attività di aggiornamento dei dati geologici sono state realizzate attraverso specifici rilievi di campagna e attività di laboratorio: fotointerpretazione ed elaborazione statistica dei dati strutturali al fine di realizzare sezioni geologiche rappresentative propedeutiche alla realizzazione di modelli tridimensionali della risorsa marmifera.

Su specifica richiesta della dirigenza del "Settore Pianificazione e controlli in materia di cave" della Regione Toscana i modelli geologici tridimensionali dei bacini marmiferi sono stati realizzati in corrispondenza delle Aree contigue di cava, e di un loro congruo intorno, così come definite dall'ente regionale Parco delle Alpi Apuane.

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO, GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELLE ALPI APUANE

2.1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'attività di ricerca ha coinvolto il territorio delle Alpi Apuane (Figura 1) ed in particolare le zone interessate da affioramenti di marmo appartenenti al Complesso metamorfico apuano. L'area di studio ricade nella Provincie di Massa-Carrara (MS) e Lucca (LU) ed è compresa nei Fogli IGM Massa Carrara 249, Castelnuovo di Garfagnana 250, Viareggio 260 e, per una porzione estremamente limitata, nel Foglio Lucca 261. Per Complesso metamorfico apuano si intende quella porzione di territorio che comprende i maggiori rilievi apuani in cui affiorano rocce metamorfiche appartenenti alle Unità tettoniche di Massa e dell'"Autoctono" *Auct.* delimitate dal contatto tettonico con l'Unità non metamorfica della Falda Toscana. Tale contatto descrive una forma ellissoidica con asse maggiore di circa 25 chilometri orientato parallelamente alla costa versiliese (direzione Nord Ovest - Sud Est) ed un asse minore ortogonale al precedente di circa 12 chilometri. In quest'area ricadono i seguenti Comuni interessati da attività di estrazione della risorsa marmifera: Casola in Lunigiana (MS), Fivizzano (MS), Carrara (MS), Massa (MS), Montignoso (MS), Minucciano (LU), Vagli di Sotto (LU), Stazzema (LU) e Seravezza (LU).

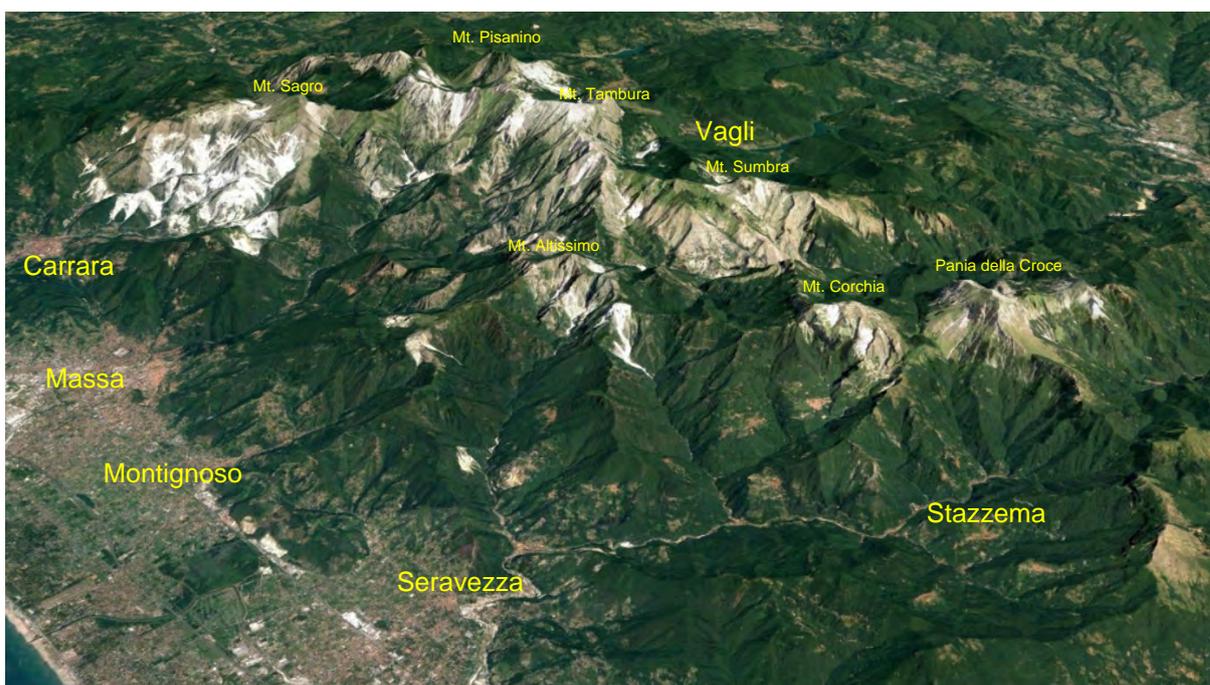


Figura 1 - Panoramica del territorio delle Alpi Apuane da Google Earth. Il Nord è ubicato verso l'alto dell'immagine.

2.2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La finestra tettonica delle Alpi Apuane costituisce la porzione geometricamente più bassa, nota in affioramento, dell'edificio a falde dell'Appennino Settentrionale (Figura 2).

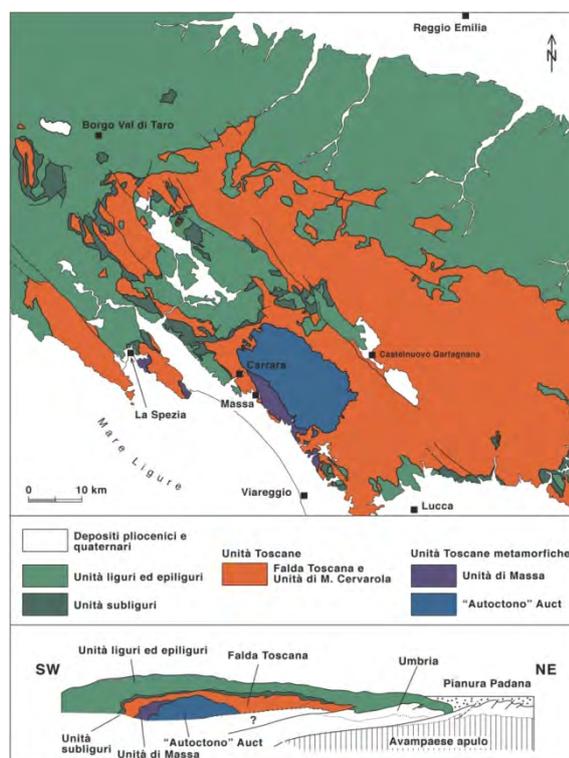


Figura 2 - Schema delle unità tettoniche dell'Appennino Settentrionale.

In quest'area affiorano sia i terreni metamorfici profondi della catena (Unità di Massa e "Autoctono" Auct.), sia le unità tettoniche più superficiali rappresentate dall'alto verso il basso dalle Unità Liguri s.l., Sub-liguri e dalla Falda Toscana (Figura 2 e Figura 3).

Le Alpi Apuane sono costituite da rocce metamorfiche di medio-basso grado, con età compresa fra il Cambriano Inferiore (Paleozoico) e il Miocene Inferiore (Cenozoico), appartenenti all'Unità tettonica dell'"Autoctono" Auct. (anche detta Unità delle Alpi Apuane). Tale unità tettono-metamorfica è caratterizzata dalla presenza di un basamento continentale di età paleozoica, sopra al quale affiora, in discordanza, una copertura costituita da una successione metasedimentaria di età compresa fra il Triassico Superiore ed il Miocene Inferiore. Il basamento paleozoico è costituito, dal basso verso l'alto, da filladi e quarziti (unità delle Filladi Inferiori, ?Cambriano-?Ordoviciano), metavulcaniti e sedimenti metavulcanoclastici (Porfiroidi e Scisti Porfirici, ?Ordoviciano), metarenarie, quarziti e filladi (Metarenarie Quarzose, ?Ordoviciano superiore) e filladi con intercalazioni di dolomie ad *Orthoceras* (Dolomie scistose ad *Orthoceras*, Siluriano).

La successione della copertura è caratterizzata, dal basso verso l'alto, da metaconglomerati poligenici, metarenarie calcaree e dolomie silicoclastiche con intercalazioni di metabrecce. Tali litotipi sono riferibili ad un ambiente deposizionale di tipo transizionale, da continentale a marino costiero (Verrucano, Ladinico Superiore-Carnico e Formazione di Vinca, Carnico Superiore p.p.), seguiti dalle dolomie della piattaforma tardo-triassica dei Grezzoni (Norico p.p.). Verso l'alto si osservano metacalcari micritici fossiliferi (Calcari e Marne di Colonnata, membro della formazione dei Grezzoni) e marmi più o meno ricchi in muscovite (Marmi a Megalodonti, Norico p.p.- Retico), intercalati a metabrecce poligeniche (Brecce di Seravezza) e Scisti a Cloritoide (Norico superiore-Hettangiano p.p.). Le metabrecce poligeniche e gli scisti a cloritoide testimoniano episodi di emersione della

piattaforma carbonatica, con formazione di livelli lateritico-bauxitici e deposizione di debris flow ai piedi di scarpate di origine tettonica.

In posizione geometricamente superiore affiorano marmi più o meno dolomitizzati, dolomie cristalline, marmi e metabrecce monogeniche (Marmi Dolomitici e Marmi s.s., Hettangiano p.p.), i quali rappresentano lo sviluppo di una nuova piattaforma carbonatica, successiva a quella tardo-triassica dei Grezzoni. Verso l'alto seguono, marmi rosati (Marmi Zebrini, Hettangiano p.p. - Pliensbachiano p.p.), metacalcari con selci (Metacalcari Selciferi, Pliensbachiano p.p.-Bathoniano), calcescisti (Calcescisti, Pliensbachiano p.p.-Bathoniano), interpretabili come fase di annegamento della piattaforma carbonatica dei marmi ed impostazione di una sedimentazione di tipo emipelagico.

Infine, chiudono la successione le metaradiolariti (Metaradiolariti, Calloviano-Titonico), i metacalcari con liste e noduli di selce (Metacalcari Selciferi ad Entrochi, Berriasiano-Barremiano), le filladi sericitiche (Scisti Sericitici, Aptiano- Oligocene inferiore), i calcescisti (Calcari Cipollini, Eocene?-Oligocene) e le metarenarie quarzo-feldspatiche (Pseudomacigno, Oligocene superiore-Miocene inferiore) riferibili a depositi pelagici e d'avanfossa.

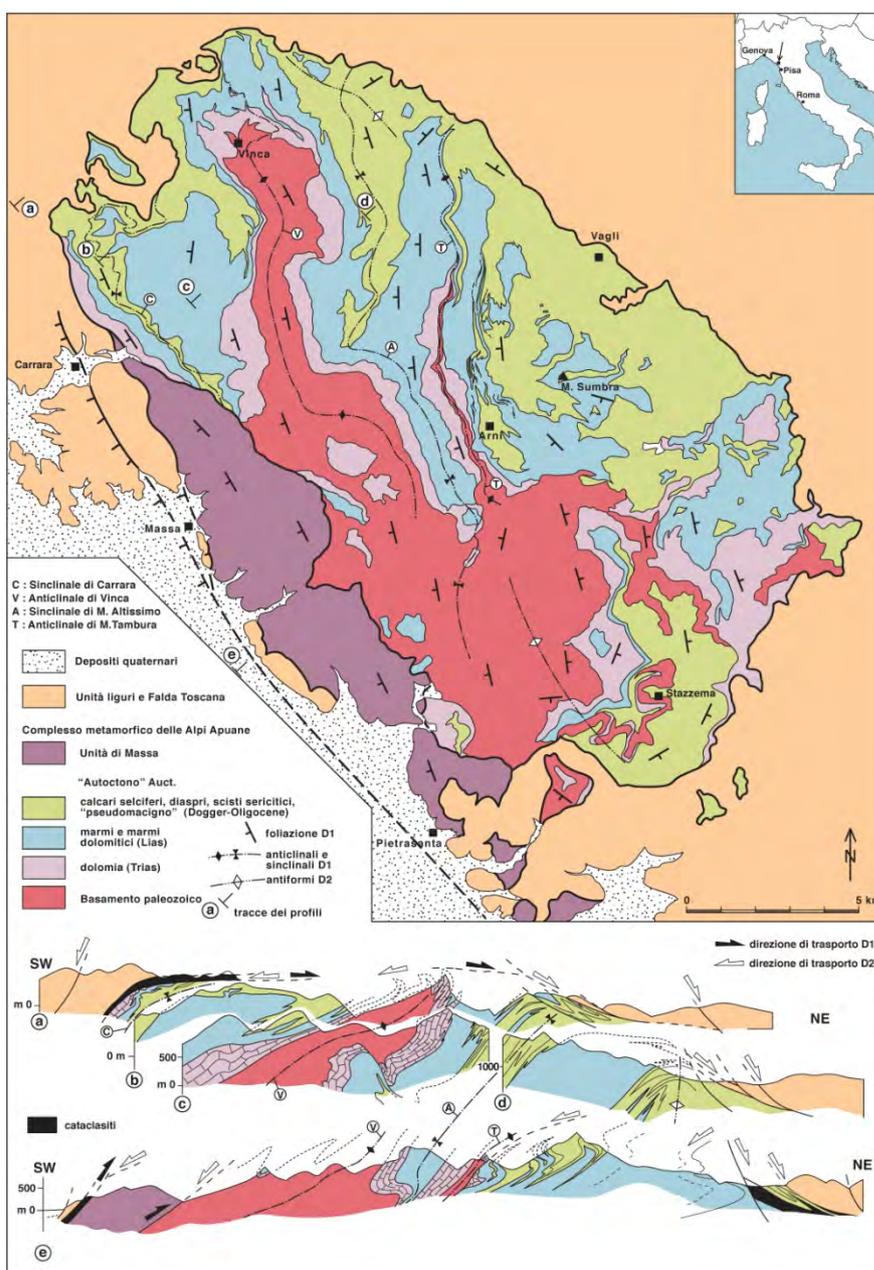


Figura 3 - Schema tettonico delle Alpi Apuane.

Le geometrie deformative che caratterizzano il Complesso Metamorfo delle Alpi Apuane sono il risultato di due principali eventi tettono-metamorfici (noti nella letteratura geologica con i termini Fasi D1 e D2). Tali fasi sono inquadrabili all'interno di una storia di deformazione progressiva sviluppatasi attraverso gli stadi collisionali e post-collisionali che hanno caratterizzato l'evoluzione della porzione interna dell'Appennino Settentrionale (Carmignani & Kligfield, 1990; Molli & Meccheri, 2000). Durante la fase D1, correlabile alla collisione continentale tra il blocco Sardo-Corso e la Microplacca Adria, si verifica la messa in posto verso Nord-Est delle unità tettoniche superiori non metamorfiche (Unità Liguri e Falda Toscana) al di sopra di unità tettoniche più profonde ("Autoctono" *Auct.* e Unità di Massa). Tale evento deformativo, attivo in questo settore di catena dal Miocene Medio, ha sviluppato all'interno dell'unità tettono-metamorfica dell'"Autoctono" *Auct.* pieghe isoclinali, coricate, fortemente non cilindriche, osservabili a tutte le scale: esse hanno infatti dimensioni da millimetriche a plurichilometriche. A tali strutture è associata una scistosità di piano assiale (denominata S1), che spesso traspone l'originaria stratificazione, e una lineazione di estensione (L1), con direzione media Sud Ovest - Nord Est, interpretata come la principale direzione di trasporto dell'unità tettoniche dell'orogene.

Le principali strutture di primo ordine con estensione regionale riferibili alla fase D1 presenti nel settore occidentale delle Alpi Apuane sono: i) la struttura anticlinale dell'Unità di Massa seguita, procedendo verso est nell'unità tettonica dell'"Autoctono" *Auct.*, ii) dalla Sinclinale di Carrara, iii) dall'Anticlinale di Vinca, iv) dalla Sinclinale di Orto di Donna-Monte Altissimo e v) dall'Anticlinale del Monte Tambura (Figura 3). Vengono di seguito descritte le strutture sopra elencate:

Unità di Massa:

affiora in corrispondenza del versante sudoccidentale del massiccio apuano ed è rappresentata da un basamento ercinico costituito da metasedimenti e metavulcaniti acide e da una copertura epimetamorfica post-ercinica rappresentata da depositi terrigeni e carbonatici associati a subordinate vulcaniti basiche. Non sono rappresentati, nell'Unità di Massa, termini più recenti del Triassico Superiore.

Sinclinale di Carrara:

è formata da un fianco dritto costituito dai Grezzoni, il cui massimo spessore si registra presso il paese di Colonnata e da un fianco rovesciato rappresentato dai Grezzoni dell'allineamento Miseglia-Torano. Nella Sinclinale di Carrara le dolomie confinano una struttura disarmonica che a livello del contatto Marmi-Metacalcari selciferi realizza una struttura che comprende: i) la sinclinale di Carrara s.s., con a nucleo Metacalcari selciferi e Scisti sericitici della zona di Campocecina; ii) l'anticlinale di Pianza con a nucleo la formazione dei Marmi e infine, iii) le strutture di M. Sagro comprendenti due strette anticlinali di Marmo e due sinclinali di Metacalcari selcifero ben esposte sul versante meridionale del M. Sagro.

Anticlinale di Vinca:

il fianco rovesciato di questa struttura si sviluppa per una lunghezza di quasi quindici chilometri, dall'altezza del paese di Vinca fino a sud di M. Altissimo. A nucleo affiorano le formazioni delle Filladi Inferiori, Porfiroidi e Scisti Porfirici. Il contatto fra i Grezzoni e le filladi paleozoiche del fianco dritto è interessato da una fascia di taglio diretta che da sud verso nord taglia progressivamente la formazione dei Grezzoni che è ridotta ad una decina di metri sulla trasversale del M. Sagro.

Sinclinale di Orto di Donna - M. Altissimo:

La traccia del piano assiale di questa struttura può essere seguita per circa 20 km, da Orto di Donna fino a sud di M. Altissimo. Il nucleo della sinclinale costituita dai suoi termini cretaci affiora estesamente nella valle di Orto di Donna e nella parte più settentrionale comprende alcuni lembi di Pseudomacigno. Verso sud il nucleo della struttura è costituito dalla formazione dei Marmi.

Anticlinale del M. Tambura:

Il fianco dritto è costituito da tutte le formazioni dell'Unità tettonica dell'Autoctono *Auct.* ben conservate. La superficie assiale dell'anticlinale è testimoniata da un esiguo spessore di basamento paleozoico che si segue con direzione N-S dal M. Tambura fino al Torrente Renara. Più a sud la struttura cambia progressivamente di direzione partecipando alla così detta "Virgazione di Arni".

Le strutture D1 geometricamente sottostanti all'Anticlinale di M. Tambura sono costituite da una serie di strette pieghe isoclinali spesso con struttura "a guaina" che arrivano a comprendere a nucleo delle sinclinali la formazione dello Pseudomacigno, mentre la formazione più antica del nucleo delle anticlinali è il Marmo. Tra le strutture D1 più importanti (a nucleo di Pseudomacigno) segnaliamo la Sinclinale di Gorfigliano, che dal paese omonimo si segue verso sud lungo il versante orientale del M. Tambura dove è trasposta secondo una fascia di taglio diretta, con cinematica verso Ovest, che costituisce la caratteristica zona milonitica bene esposta sul versante orientale del M. Tambura che non era sfuggita ai valligiani che hanno denominato questa località "Le Cintole" (nella letteratura geologica zona delle "Cintole della Rocchandaglia").

Durante la successiva fase D2, attiva a partire dal Miocene Superiore, le cui dinamiche sono ad oggi ancora oggetto di dibattito nella comunità scientifica, si realizza una deformazione distensiva duttile che porta al riequilibrio isostatico della crosta ispessita durante la precedente fase D1 di raccorciamento. Le precedenti strutture vengono deformate con sviluppo di pieghe parassite, variamente non-cilindriche, associate ad un clivaggio di crenulazione di piano assiale generalmente poco inclinato e senso di rovesciamento verso Est ed Ovest, rispettivamente, lungo i fianchi orientali ed occidentali delle Alpi Apuane. Alle pieghe D2 sono associate zone di taglio, responsabili della progressiva esumazione delle unità metamorfiche verso livelli strutturali più superficiali. Gli stadi finali dell'evento D2 sono caratterizzati dallo sviluppo di strutture da semi-fragili a fragili, rappresentate da pieghe aperte e di tipo *kink*, con piano assiale sub-verticale e da faglie dirette a basso ed alto angolo. La struttura D2 più nota e studiata è senz'altro quella di Arni (Carmignani et alii., 1993). In quest'area le strutture principali della fase D1 sono costituite da due sinclinali isoclinali principali a nucleo di Pseudomacigno: la Sinclinale di Arni e la Sinclinale del M. Fiocca, separate dall'Anticlinale a nucleo di marmi di Passo Sella. Esse sono ripiegate durante la fase D2 da una sinforme ed una antiforme chilometriche (Sinforme ed Antiforme di Arni) che viste da sud realizzano il classico profilo a "S" che si ritrova in tutte le pieghe D2 (Figura 4). Per quanto riguarda la struttura di Arni essa si segue dalla zona di San Viviano (vicino all'abitato di Vagli) fino sulla trasversale di Arni - M. Fiocca; in questo primo tratto la linea di cerniera ha una direzione circa N-S e una debole immersione verso Nord. A partire dall'altezza di Arni la direzione della struttura cambia gradualmente fino a disporsi NW-SE con leggera immersione verso SE realizzando quella che è nota in letteratura come "Virgazione di Arni" (Giglia, 1967).

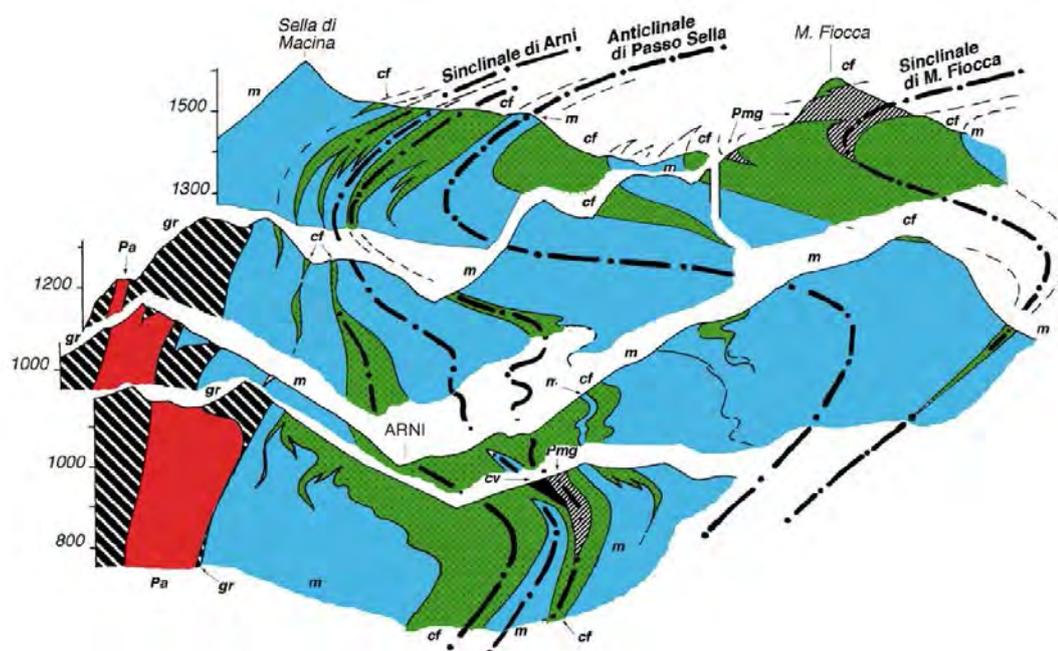


Figura 4 - Sezione composita della valle di Arni orientata in direzione Ovest-Est. Chiave di lettura delle sigle: Pa Basamento paleozoico; gr Grezzoni; m Marmo; cf Metacalcri selciferi, Metacalcri selciferi ad Entrochi, Metaradiolariti; Pmg Pseudomacigno.

La storia deformativa del settore di catena investigato è caratterizzata da metamorfismo in facies scisti verdi. Le condizioni di picco metamorfico nell'“Autoctono” *Auct.* sono caratterizzate da una temperatura compresa fra 350-450°C e una pressione di 4-6 kbar (Molli et al., 2002) con paragenesi costituita da pirofillite, cloritoide, clorite. L'età del metamorfismo, determinata mediante il metodo K-Ar⁴⁰Ar-³⁹Ar sulle miche bianche, varia da 27 a 10 Ma (Kligfield et al., 1986). Nello specifico i dati radiometrici ottenuti sulle miche della fase D1 forniscono età comprese tra i 27 e i 20 Ma, mentre sulle miche correlate alla fase D2 età tra i 12 e 14 Ma. Gli ultimi stadi dell'assottigliamento crostale e dell'esumazione del nucleo apuano sono stati determinati attraverso le tracce di fissione in zirconi e apatiti e hanno prodotto età rispettivamente tra i 13-10 Ma e 7-4 Ma (Fellin et al., 2007).

Recentemente è stata proposta dagli scriventi l'ipotesi dello sviluppo di una fase deformativa tardiva, denominata D3, responsabile dell'attivazione di zone di taglio duttili caratterizzate da cinematismi diretti e trascorrenti. Tali *shearzones* hanno ulteriormente complicato l'assetto strutturale del Complesso metamorfico e sembrano essere determinanti per la geometria finale attuale.

La carta geologica dei bacini marmiferi è descritta nel paragrafo 5.4.

2.3. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

L'area delle Alpi Apuane comprende un territorio caratterizzato da un'estrema varietà morfologica che si esprime tipicamente nella prossimità di ambienti propriamente “alpini” alla fascia costiera, attraverso una stretta zona di raccordo (Figura 1). In funzione di tali caratteristiche, della recente evoluzione tettonica, dei cambiamenti climatici pleistocenico-olocenici, delle caratteristiche litologiche delle rocce e, non ultimo, dell'impatto delle attività antropiche in tali territori, la zona apuo-versiliese presenta un'eccezionale concentrazione di forme e processi riferibili ai principali insiemi geomorfologici (dinamico, climatico e strutturale).

Le zone più elevate e con morfologia più aspra corrispondono principalmente agli affioramenti delle metamorfite e costituiscono un complesso orografico che ben si distingue dall'usuale paesaggio appenninico sia per la posizione geografica (le sue vette distano pochi chilometri dal mare), sia per le caratteristiche geologiche dei terreni affioranti, sia, infine, per la marcata individualità morfologica.

I tratti morfologici di maggior evidenza consistono nell'elevata energia del rilievo dovuta ad un recente ringiovanimento di questo, che si caratterizza per i profili aspri e per la presenza di speroni rocciosi. Il conseguente approfondimento degli alvei ha determinato lo sviluppo di valli incassate tipo canyon o forre, la scarsità di zone pianeggianti, la reincisione ed il terrazzamento dei versanti. La fisiografia spiccatamente alpina si caratterizza per la presenza di forme di erosione quali creste in roccia, pinnacoli e scarpate di erosione lungo i profondi solchi vallivi. I depositi sono costituiti per la maggior parte da corpi detritici eterometrici alla base di scarpate in roccia, con forme di falda o cono, locali accumuli per frane di crollo/ribaltamento, da depositi incanalati lungo solchi ad elevata pendenza dove si sviluppano episodi tipo debris-flow in occasione dei principali eventi meteorologici o durante lo scioglimento delle nevi, e da pietraie. Da considerare anche i corpi di accumulo dei materiali di scarto delle attività estrattive (denominati “ravaneti”), che in nessun altro luogo al mondo rappresentano un elemento caratterizzante del paesaggio come nell'area del carrarese.

Il glacialismo apuano, le cui tracce sono state per la prima volta individuate nel 1872 da Cocchi e Stoppani, si è sviluppato, nel corso del Pleistocene, essenzialmente sul versante nord-orientale della catena, dove il clima rigido, in combinazione con le abbondanti precipitazioni orografiche e la conformazione del rilievo, hanno permesso lo sviluppo di un certo numero di ghiacciai vallivi, i cui fronti d'avanzamento hanno lasciato tracce a quote eccezionalmente basse, come 600 metri s.l.m. per i ghiacciai M. Contrario-Orto di Donna e M. Tambura-Acqua Bianca e 500 metri s.l.m. per il ghiacciaio Pizzo d'Uccello- Solco di Equi (Braschi et alii, 1986). Lungo il versante occidentale l'elevata energia del rilievo non ha permesso la formazione di ghiacciai importanti, pur in presenza di un glacialismo diffuso di cui riporta notizie Federici (1981). Le forme ed i depositi osservabili sono comunque sempre

da inserirsi in un contesto di profonde trasformazioni morfologiche che hanno avuto inizio in conseguenza del riadattamento morfo-climatico post-glaciale a cui si è aggiunta, in tempi recenti, l'escavazione dei bacini marmiferi.

Le forme di erosione più comuni e spettacolari sono i circhi glaciali, spesso composti dall'unione di più cavità e più raramente (M. Pisanino, M. Altissimo, M. Pelato, M. Roccandaglia) costituiti da un'unica grande conca. Numerose sono le forme minori quali conche di sovrescavazione sul fondo di alcuni circhi, docce e solchi glaciali, resti di superfici levigate e varie tracce di modellamento misto carsico e glaciale e, secondo alcuni autori, carsico e fluvio-glaciale (ad esempio le "marmitte dei giganti" della Turrite Secca, dell'Anguillara e del Fatonero).

Circa le forme di deposito sono segnalati corpi morenici terminali e rari esempi di morene stadiali (morena del Pianellaccio) e morena frontale di Campocatino, vari corpi di accumulo sono segnalati a valle dei ghiacciai M. Macina-Arni, M. Corchia-Val Terreno e nella zona di Pianizza, a quote comprese tra 925 e 1.100 metri s.l.m. (Federici, 2005a e b). L'età della glaciazione apuana viene generalmente stabilita in analogia ai fenomeni glaciali dell'Appennino settentrionale, dove Federici (1979) segnala resti d'industria del Mesolitico nei circhi più alti e soltanto tre o quattro stadi tardiglaciali di ritiro riconoscibili in campagna. È ragionevole pensare quindi che il ritiro dei ghiacci sia stato estremamente veloce e che le masse glaciali costruite nei 55 mila anni precedenti siano rapidamente scomparse 10 mila anni fa. Sporadiche segnalazioni di depositi morenici cementati pre-würmiani testimoniano fasi glaciali antiche che in alcune occasioni hanno lasciato indizi a quote più basse dei depositi riferibili all'ultimo massimo glaciale (esempio il Solco d'Equi, Braschi et alii, 1986).

Le Alpi Apuane rappresentano una delle aree carsiche più importanti d'Italia, con sviluppo di forme di dissoluzione epigea, ma soprattutto di un impressionante sistema di gallerie e pozzi sotterranei tra i maggiori in Europa per sviluppo e profondità. Nel Complesso metamorfico apuano l'importanza di tale fenomeno è da ricondursi principalmente alle formazioni dei Grezzoni e Marmi.

Il carsismo superficiale si manifesta diffusamente sia con forme di dissoluzione come scannellature, impronte e docce che danno luogo, soprattutto a quote elevate, ai tipici campi solcati, sia con forme di interfaccia quali doline di dissoluzione o crollo (catino del M. Sagro, M. Borla, Carcaraia, M. Pisanino, M. Sumbra) che risultano tuttavia relativamente rare in Apuane, specie sul versante sud-occidentale, per la scarsità di aree a morfologia sub-pianeggiante. La frequenza di queste trova il suo massimo tra i 1450 ed i 1500 metri di quota risultando sede di nivazione prolungata anche in virtù della forma stretta e profonda, fino a diventare veri e propri "pozzi a neve" (Piccini, 2005).

I sistemi carsici ipogei a direzione verticale conosciuti si sviluppano lungo la linea di spartiacque tra il M. Sagro e la Pania della Croce raggiungendo talora valori ragguardevoli per profondità (l'Abisso Paolo Roversi con i suoi 1.358 m è il più profondo d'Italia) ed estensione (il Complesso carsico del M. Corchia ha uno sviluppo complessivo stimato di oltre 56 km). Le cavità a sviluppo orizzontale si collocano ai margini delle strutture carbonatiche, nelle zone di recapito delle acque sotterranee e, in molti casi, funzionano ancora da cavità-sorgenti perenni o di troppo pieno.

Una ricostruzione precisa delle tappe evolutive del carsismo apuano è argomento assai ampio ed ancora aperto. Vari indizi portano a pensare che i sistemi più antichi (cavità relitte delle aree sommitali della catena, generalmente a quote maggiori di 1500 metri s.l.m. di cui solo il Complesso carsico del M. Corchia mantiene significative testimonianze) siano da riferirsi al Pliocene superiore. Nel corso del Pleistocene l'esposizione di aree calcaree sempre più vaste e l'abbassamento delle soglie impermeabili porta alla formazione di nuovi sistemi carsici, riconosciuti in tre generazioni principali (quattro nel Complesso carsico del M. Corchia) sulla base della distribuzione altimetrica dei condotti freatici (Piccini, 1998, 2011). La carta geomorfologica dei bacini marmiferi è descritta nel paragrafo 5.3.

2.4. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

Il Complesso metamorfico delle Alpi Apuane costituisce, come riferito nel paragrafo precedente, una delle più importanti e complesse aree carsiche del territorio italiano con affioramenti di formazioni

carbonatiche che presentano in totale un'estensione pari a circa 383 Km². Il carsismo si manifesta soprattutto con la presenza di estesi sistemi carsici ipogei mentre il carsismo superficiale è limitato ad aree ristrette (Carcaraia, Vetricia, Pianiza, Monte Sagro, Monte Sumbra, Monte Pisanino, Monte Altissimo), dove è rappresentato soprattutto da forme di dissoluzione medio-piccole (doline e pozzi superficiali). Tali forme si sviluppano in particolare in zone di carso nudo, prive di vegetazione, dove è favorita l'infiltrazione delle acque meteoriche (si stima che nell'area della Carcaraia circa il 90% delle precipitazioni si infiltrano nel substrato) e in zone a quote elevate dove il manto nevoso può permanere più a lungo nei mesi invernali e primaverili. Non mancano tuttavia anche fenomeni di carsismo coperto (ad esempio doline nella zona del Retrocorchia, Torre di Monzone, M. Matanna, M. Croce e Monte Penna) in cui lo sviluppo delle forme carsiche superficiali è favorito dalla presenza di coltri di suolo ricche di sostanze umiche. La morfologia superficiale e la fratturazione degli ammassi rocciosi influenzano in maniera importante la distribuzione delle forme carsiche epigee. Altro fattore importante nello sviluppo di forme epigee è la pendenza dei versanti: laddove affiorano rocce carbonatiche e le pendenze sono basse (versante Nord orientale delle Alpi Apuane) si hanno preferenzialmente doline, pozzi a neve o di erosione inversa e campi solcati. Se è presente anche un'intensa fratturazione, è favorita, invece, la formazione di trincee e di carso a blocchi. Sul versante a mare le manifestazioni di carsismo epigeo sono più rare: la maggiore acclività favorisce il ruscellamento superficiale e caratteristiche di tali zone sono soprattutto microforme carsiche quali scannellature, o vaschette di corrosione. Nell'area apuana sono state censite nel Catasto Speleologico Regionale oltre 1000 cavità.

La presenza di cavità relitte a quote generalmente superiori ai 1500 m s.l.m. e la datazione di speleotemi da diverse grotte apuane fanno risalire l'origine del carsismo ipogeo al Pliocene superiore (Piccini, 1994), in una fase precedente al sollevamento delle Alpi Apuane. Alternanze di fasi di sollevamento e di stasi successive (Pleistocene medio-inferiore) hanno favorito una progressiva estensione del carsismo profondo e una riorganizzazione dei reticoli carsici preesistenti, soprattutto nel versante sud-occidentale del massiccio. Tale riorganizzazione è probabilmente ancora in corso: ciò è dimostrato dai valori dei gradienti idraulici nelle aree di alimentazione drenate dalle sorgenti localizzate nel versante a mare. Tali gradienti (fino al 5%) sono piuttosto elevati rispetto a quelli che si riscontrano invece nel versante Nord-orientale della catena (0.2-0.3%). Per quanto riguarda la relazione tra gli ingressi delle cavità e litologia, la maggior parte si sviluppa all'interno dei termini carbonatici della successione mesozoico-terziaria dell'Autoctono Apuano. Gli ingressi di tali cavità sono concentrati soprattutto in zone coperte da ghiacciai durante l'ultima glaciazione: l'azione del glacialismo ha reso comunicanti con l'esterno molte cavità attraverso passaggi praticabili dall'uomo. Nell'Unità tettonica dell'Autoctono *Auct.* le formazioni più carsificabili sono i Marmi, cui seguono i Metacalcri selciferi a Entrochi, i Metacalcri selciferi, i Marmi dolomitici e i Grezzoni. L'andamento delle cavità carsiche indica l'esistenza di diverse tipologie di cavità, complesse o polifasiche, o a struttura semplice (verticali od orizzontali). Le prime sono rappresentate soprattutto da sistemi carsici localizzati prevalentemente al centro del nucleo apuano, lungo un allineamento NW-SE (Pizzo d'Uccello-Monte Corchia). Si tratta di grotte che hanno avuto un'evoluzione in più fasi legata a contesti idrologici e morfologici diversi dall'attuale. Le seconde, per quanto riguarda le cavità verticali, invece, sono localizzate in aree carsiche situate lungo l'asse della catena o in prossimità delle vette principali (Valle d'Arnetola, Carcaraia). Anche per la distribuzione delle forme carsiche profonde si riscontra un legame con l'assetto morfologico delle Alpi Apuane: le cavità verticali sono concentrate nel versante Nord-orientale e costituiscono zone di trasferimento verticale delle acque. La loro genesi è da ricondurre a situazioni idrologico-idrogeologiche simili a quelle attuali. Le cavità orizzontali si ritrovano, invece, al contatto tra le formazioni carbonatiche e le non-carbonatiche, lungo i fondovalle, soprattutto nel versante a mare. In tale versante, le suddette cavità costituiscono zone di recapito delle acque sotterranee, funzionando da cavità sorgenti o da troppo pieno.

La carta idrogeologica dei bacini marmiferi prodotta alla scala 1:10000 illustra i corpi idrici sotterranei nell'intorno significativo di ciascuna area contigua di cava è descritta nel paragrafo 5.5. In questa carta sono rappresentati gli elementi principali che caratterizzano l'assetto idrogeologico delle Alpi Apuane: classi di permeabilità dei diversi corpi idrici sotterranei, tipi litologici (complessi carbonatici e non carbonatici), limiti di bacino idrografico, elementi idrostrutturali, fenomeni carsici

puntuali, sorgenti, pozzi, derivazioni, reticolo idrografico, opere e impianti relativi alla rete di distribuzione delle acque.

3. IL MARMO DELLE ALPI APUANE

3.1. DESCRIZIONE GENERALE

I marmi delle Alpi Apuane possono essere annoverati tra i materiali lapidei più conosciuti e sono utilizzati da progettisti, architetti e artisti per decorare le città d'arte nel mondo. L'attività estrattiva è di grande impatto nel territorio apuano che attualmente è interessato da più di 100 cave attive con produzione totale attuale maggiore di 1.000.000 ton/anno di marmo. Nella regione apuana l'estrazione di pietre ornamentali è caratterizzata da una storia secolare, con produzione di una grande varietà di marmi che non trova eguali altrove.

All'interno delle sequenze metasedimentarie che caratterizzano le unità tettoniche di Massa e dell'"Autoctono" *Auct.* sono presenti, a differenti livelli stratigrafici marmi, metabrecce e calcescisti dai quali viene estratta la vasta gamma di pietre ornamentali della regione apuana (Carmignani et al., 2007) (Figura 5). Nell'Autoctono *Auct.* litologie marmoree (marmi e metabrecce mono o poligeniche) caratterizzano sia formazioni triassiche (Formazione di Vinca, Breccie di Seravezza, Marmi a Megalodonti) che formazioni del Lias inferiore (Marmi Dolomitici, Marmi e Marmo Zerbino). Marmi impuri, metabrecce poligeniche e calcescisti si trovano in diverse formazioni del Dogger e del Cretaceo (Calcescisti, Formazione di Arnetola e Cipollini). Nell'Unità di Massa litologie marmoree caratterizzano invece la formazione dei Marmi a Crinoidi del Trias medio.

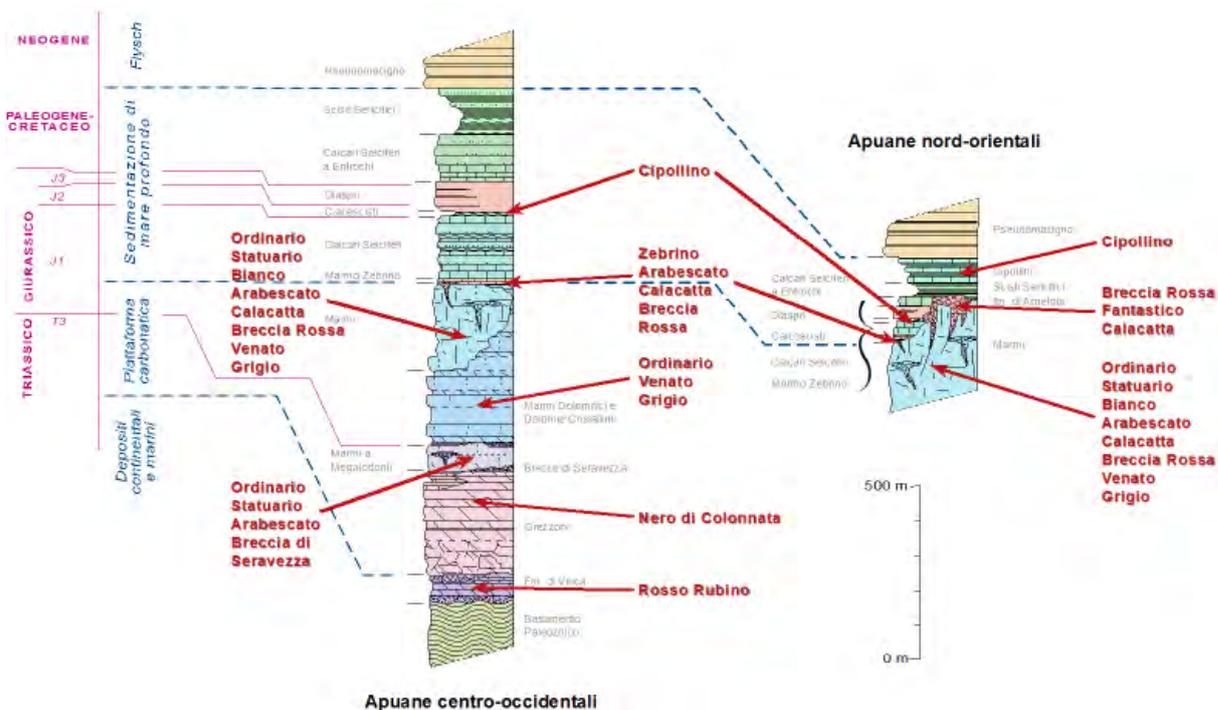


Figura 5 - Le varietà merceologiche di marmi (indicate in rosso) nella successione metamorfica delle Alpi Apuane. Basamento Paleozoico: filladi, porfiroidi, scisti porfirici, dolomie, filladi grafitiche e calcescisti (?Cambriano - ?Devoniano); Formazione di Vinca: filladi, quarziti e metaconglomerati alternati a dolomie, marmi, marmi dolomitici, e metabrecce poligeniche (Carnico - ?Norico); Grezzoni: dolomie, dolomie brecciate e marmi neri alternati a dolomie (Norico); Marmi a Megalodonti e Breccie di Seravezza: marmi, metabrecce poligeniche e scisti a cloritoide; Marmi Dolomitici: marmi, marmi dolomitici e dolomie (Lias Inf); Marmi: marmi e metabrecce monogeniche (Lias Inf); Marmo Zerbino: marmi, metabrecce e calcescisti (Lias Inf - ?Medio); Formazione di Arnetola: metabrecce poligeniche (Lias inf - ?Cretaceo); Calcari Selciferi: metacalcilutiti con liste e noduli di selce (Lias Medio - Sup); Calcescisti: calcescisti e filladi carbonatiche (Lias Sup); Diaspri: metaradiolariti e filladi quarzitiche (Malm); Calcari Selciferi a Entrochi: metacalcilutiti con liste e noduli di selce bianche

(Turoniano Sup. - Cretacico Inf.); Scisti sericitici: filladi con intercalazioni di calcareniti e metaradiolariti (Cretaceo Inf. – Paleogene); Cipollini: calcescisti e marmi a clorite (?Eocene – Oligocene); Pseudomacigno: metarenarie e filladi (Oligocene Sup.- ?Miocene Inf.).

Durante l'evoluzione tettonica delle Alpi Apuane i marmi hanno avuto un ruolo fondamentale nei processi di deformazione crostale. Le rocce carbonatiche infatti sono capaci di accomodare elevate quantità di strain e di deformarsi in modo plastico anche in condizioni di bassa temperatura. In relazione ai due principali eventi deformativi D1 e D2 i marmi apuani risultano coinvolti in complesse strutture deformative che, nei casi più semplici, determinano un raddoppio del loro originario spessore o una loro totale elisione tettonica.

3.2. LE VARIETÀ MERCEOLOGICHE E LE VARIETÀ COMMERCIALI DI MARMO

Le varietà merceologiche riconosciute nascono in risposta all'esigenza di identificare le diverse tipologie di marmo immesse sul mercato. I termini utilizzati oggi (es. varietà Arabescato, Calacatta ecc.) trovano origine nella secolare storia di estrazione e commercio di questi materiali e sono stati codificati indipendentemente da una loro connotazione geologico – stratigrafica. (Carmignani et alii., 2007)

La legenda della carta delle varietà merceologiche di marmo utilizzabile a scala dell'intero bacino marmifero apuano, è stata realizzata considerando una varietà merceologica come una "unità litostratigrafica informale" che rappresenta un corpo roccioso distinguibile e separabile da quelli adiacenti in funzione di una generale omogeneità litologica e per la presenza di altri caratteri peculiari, quali per esempio la loro utilità o interesse economico. Una varietà merceologica di marmo può essere quindi completamente descritta e separata da quelle adiacenti in base a caratteri che sono, da un lato, strettamente litologici (es: metacalcare, metabreccia, calcescisto, ecc.), dall'altro propriamente "commerciali-estetici" (es: colore e disegno), a prescindere dalla sua collocazione stratigrafica. Questo ha come diretta conseguenza che la stessa tipologia di marmo può essere riconosciuta e cartografata in differenti posizioni stratigrafiche all'interno della successione metamorfica apuana (Figura 5).

I caratteri litologici presi in considerazione per definire le varietà merceologiche sono frutto di osservazioni a scala dell'affioramento e analisi al microscopio ottico e riguardano: i) il litotipo predominante (es: marmo, marmo impuro, metabreccia mono - o poligenica, calcescisto etc.); ii) la struttura della roccia (es: roccia omogenea o anisotropa); iii) la dimensione media dei cristalli di calcite (grana fine < 150 μ m, grana media 150-350 μ m, grana grossa > 350 μ m); iv) la composizione mineralogica; v) nel caso di metabrecce, il rapporto tra clasti e matrice (tessiture casto sostenute o matrice sostenute). I parametri estetici presi in considerazione sono invece rappresentati dal colore e dal disegno. Il colore risulta spesso un fattore discriminante e, nei marmi, è in genere dovuto alla presenza di microcristalli di ematite (colorazione dal rosa al rosso vivo), ossidi di manganese (dal rosso scuro al viola), idrossidi di ferro (dall'arancione al giallo), clorite (toni del verde) ecc., omogeneamente diffusi all'interno della roccia o concentrati nella matrice. Il disegno è definito dalla dimensione, forma, orientazione e disposizione relativa degli elementi che sostituiscono il materiale (es: forma dei clasti di una metabreccia, disposizione spaziale delle venature).

In base ai criteri sopra esposti sono 14 le unità litostratigrafiche informali che rappresentano le diverse varietà merceologiche presenti all'interno del bacino marmifero delle Alpi Apuane (Tabella 1). Le 14 varietà merceologiche sono state suddivise, in base alle loro caratteristiche generali, in 5 gruppi: Marmi bianchi, Marmi grigi e venati, Marmi brecciati, Marmi cipollini e Marmi storici (Carmignani et alii., 2007).

Tipo di marmo	Varietà merceologica
MARMI BIANCHI	ORDINARIO
	STATUARIO
	BIANCO
MARMI GRIGI E VENATI	GRIGIO
	VENATO
	ZEBRINO
MARMI BRECCIATI	ARABESCATO
	CALACATTA
	BRECCIA ROSSA
	FANTASTICO
MARMI CIPOLLINI	CIPOLLINO
MARMI STORICI	BRECCIA DI SERAVEZZA
	ROSSO RUBINO
	NERO DI COLONNATA

Tabella 1 – Tipi di marmo e varietà merceologiche dei marmi delle Alpi Apuane. I nomi utilizzati per individuare le varietà merceologiche derivano dai termini comunemente adoperati nel commercio.

3.2.1. Marmi bianchi

Con il termine Marmi bianchi s'intendono tutti quei litotipi marmorei di composizione estremamente omogenea e colori molto uniformi che variano dal bianco al bianco avorio, da bianco perlaceo al grigio chiaro.

Ordinario: Si tratta di marmi a grana media, di colore da bianco perlaceo a grigio chiaro in genere piuttosto uniforme o variamente punteggiato da macchie grigie di dimensioni centimetriche dai limiti sfumati, dovute a presenza di pirite microcristallina. Raramente si osservano irregolari trame di vene di colore grigio chiaro o scuro (Figura 6A).

Statuario: marmi a grana grossa, di colore bianco-avorio, a volte tendente al giallo-beige molto chiaro, e generalmente assai uniforme. Queste colorazioni sono date da tracce di muscovite microcristallina omogeneamente distribuita nella prevalente matrice carbonatica. Localmente sono presenti macchie grigie, dovute a deboli concentrazioni di pirite e fillosilicati, che si possono organizzare in sottili vene anastomizzate.

Bianco: marmi a grana fine o media, estremamente omogenei e di colore dal bianco puro al bianco perlaceo. Risultano privi di qualsiasi ornamentazione e solo localmente presentano macchie scure isorientate o piccole vene di calcite (Figura 6B).

3.2.2. Marmi grigi e venati

Al gruppo Marmi grigi e venati appartengono tutti quei materiali caratterizzati da un colore di fondo da bianco a bianco perlaceo e venature grigie e marmi da grigio chiari a grigio scuri con vene più chiare o scure.

Venato: marmi a grana media, di colore da bianco a bianco perlaceo, con venature più scure da molto regolari ad anastomizzate e di spessore in media da millimetriche a centimetriche. Non sono rare macchie grigie di forma irregolare talvolta caratterizzate da una certa isorientazione. Questa varietà è caratterizzata da un'ampia gamma di ornamentazioni determinata dalla diversa orientazione, frequenza e spessore delle vene e delle macchie grigio scuro (Figura 6C).

Grigio: marmi a grana fine o media, di colore da grigio chiaro a grigio scuro attraversati da vene da grigio scuro a bianche. L'ornamentazione risulta estremamente variabile pur rimanendo all'interno di un tipo generale: si può infatti passare da litotipi con aspetto molto eterogeneo e variegato, dato da alternanze più o meno irregolari di livelli da grigi a grigio chiare (Nuvolato), a materiali molto omogenei con colori che vanno dal grigio-bluastro al grigio scuro con sottili venature più scure (Bardiglio). Il colore scuro più o meno uniforme dell'insieme è dato da pirite microcristallina e/o pigmento carbonioso. Sono talvolta presenti masse e/o strati dolomitici più o meno regolari e continui e livelli ocrei con pirite.

Zerbino: marmi a grana da medio-fine a medio-grossa, in genere da bianco-avorio a beige, caratterizzati dalla presenza di livelli filladici di colore grigio-verde (Figura 6D).

3.2.3. Marmi brecciati

Nel gruppo dei Marmi brecciati ricadono gran parte delle metabrecce di composizione prevalentemente carbonatica presenti in diverse posizioni stratigrafiche nella successione metamorfica apuana. In genere sono rappresentate da metabrecce clasto-sostenute ad elementi di marmo e matrice variamente colorata dal grigio al verde e dal rosso al viola. A causa della deformazione subita, i clasti di queste metabrecce hanno assunto una forma fortemente appiattita e allungata sulla foliazione metamorfica principale, determinando la possibilità da parte di questi materiali di assumere aspetti completamente differenti su tagli di cava diversamente orientati.

Arabescato: metabrecce clasto-sostenute ad elementi eterometrici di marmo in matrice di colore da grigio al verde scuro. I clasti sono tipicamente di colore da grigio chiaro a bianchi e in funzione della loro taglia, disposizione relativa e rapporto con la matrice circostante, determinano un'ampia gamma di aspetti e ornamentazioni (Figura 6E).

Calacatta: metabrecce a clasti eterometrici di marmo da bianchi a bianco-avorio, talora con deboli colorazioni verde-chiaro in matrice di colore da giallo-ocra a grigio-verde. In genere la scarsa percentuale di matrice rende poco evidente la natura clastica del materiale (Figura 6F).

Breccia rossa: metabrecce poligeniche, da clasto a matrice-sostenute, a prevalenti clasti di marmo e subordinate selci da grigio chiaro a rosse, con matrice di colore dal rosso scuro al rosso-violaceo. I clasti di marmo, da bianchi a grigio-chiari, da giallo-beige a rosa sono spesso ricchi in articoli di crinoidi e frammenti di belemniti (Figura 6G).

Fantastico: metabrecce poligeniche a prevalenti clasti di marmo e subordinate selci da grigio chiaro a rosse, con matrice di colore dal rosso scuro al rosso-violaceo. I clasti di marmo, da bianchi a grigio-chiari, da giallo-beige a rosa si presentano tipicamente piegati e deformati in modo tale da determinare un caratteristico disegno nei blocchi estratti.

3.2.4. Marmi cipollini

Nel gruppo dei Marmi cipollini ricadono litotipi marmorei impuri, presenti prevalentemente nella parte alta della successione litostratigrafica. In genere si tratta di calcescisti caratterizzati da un'ampia gamma di colorazioni e disegni.

Cipollino: calcescisti di colore da grigio-verde a verde o da rosso a rosso-violaceo con livelli di filladi carbonatiche e filladi muscovitiche di colore da verde scuro a rosso violaceo. In genere sono presenti numerose vene di calcite variamente deformate e piegate. Le variazioni cromatiche, i differenti rapporti tra le componenti filladica e carbonatica, il diverso disegno determinato dalle vene di calcite e quarzo, determinano per questa varietà un'ampia gamma di aspetti e ornamentazioni di solito molto evidenti nei tagli di cava.

3.2.5. Marmi storici

Con il termine Marmi storici ci si riferisce a marmi con peculiari caratteristiche cromatiche e di disegno coltivati anche in passato in Toscana per uso prevalentemente ornamentale. Nel documento del PRAER 2007 sono stati individuati i siti estrattivi di questi materiali al fine di valutare la possibilità di essere riattivati per fornire, anche saltuariamente, quelle quantità che risultassero utili al restauro monumentale o al recupero edilizio. Marmo Cipollino a parte, cartografato separatamente, la Carta delle varietà merceologiche delle Alpi Apuane (Allegato 6 di consegna) comprende in legenda i seguenti tre materiali storici indicati nel PRAER (capitolo Rocce metamorfiche paragrafo "Marmi e dolomie del nucleo apuano"): Breccie di Seravezza, Rosso Rubino e Nero di Colonnata. Le varietà Bardiglio Imperiale e Bardiglio Fiorito considerati marmi storici nel documento PRAER, 2007 non sono stati distinti cartograficamente e sono compresi nei Marmi grigi.

Breccia di Seravezza: si tratta di metabreccie poligeniche, clasto-sostenute, a prevalenti elementi di marmo di colore da bianco a grigio chiaro e subordinati clasti di dolomia da grigia a giallo-arancio e rare selci. La matrice, di composizione fillosilicatica, mostra un'ampia gamma di colorazioni che vanno dal grigio-verde al verde scuro, dal rosso mattone al rosso-violaceo e localmente arricchite in cristalli di cloritoide (Figura 6H). Le Breccie di Seravezza comprendono le tipologie storiche: Fior di Pesco, Breccia Medicea, Mischio e Skiros d'Italia.

Rosso rubino: Marmi e marmi dolomitici di colore da rosso scuro a rosso violaceo con sottili livelli filladici verdi di spessore millimetrico. Localmente sono presenti metabreccie clasto-sostenute con elementi di marmo e/o dolomia da bianchi a giallo-arancio da rosa a viola e matrice colorata dal giallo al rosso fino al rosso scuro-viola. Il Rosso rubino comprende le tipologie: Rosso Rubino, Rosso Apache, Breccia Arlecchina, Giallo Liberty e Giallo Italia (queste ultime due tipologie si trovano alla base delle dolomie dei Grezzoni).

Nero di Colonnata: Marmi grigio scuri o neri a grana fine caratterizzati da livelli giallo-arancio di spessore da millimetrico a centimetrico e interstrati di dolomia da grigia a grigia scura.

A complicare la nomenclatura delle varietà merceologiche dei marmi apuani, così come definite sopra, interviene la prassi comune e sempre più frequente di coniare termini nuovi da parte degli imprenditori e istituire una nomenclatura estemporanea, informale e transitorio, delle varietà commerciali. E' prassi corrente che ogni impresa d'escavazione commerci il proprio prodotto utilizzando una nomenclatura originale, spesso esotica, per rendere appetibile e univocamente individuato il proprio materiale. Di seguito vengono riportati solo alcuni esempi di varietà commerciali di marmo apuano: Arabescato Corchia, Bianco Extra, Bianco Carrara strinato, Statuarietto, Persichino, Bardiglio tigrato, Calacatta cielo, Striato argento ecc.. Alcuni termini fanno riferimento esplicito alla corrispondente nomenclatura delle varietà merceologiche (ad esempio: Arabescato) aggiungendo il nome della località estrattiva o della società produttrice (ad esempio Arabescato Corchia). In altri casi il nome è di pura fantasia, in altri ancora il nome risulta totalmente fuorviante poiché viene attribuito alla pietra un nome che non la rappresenta in modo oggettivo (ad esempio l'appellativo Bianco attribuito ad un Marmo venato).

Nel testo dell'allegato 10 (paragrafo 5.10) per ogni sito estrattivo viene descritta la corrispondenza fra la nomenclatura della varietà commerciale utilizzata dai concessionari e le varietà merceologiche riportate in tabella 1.

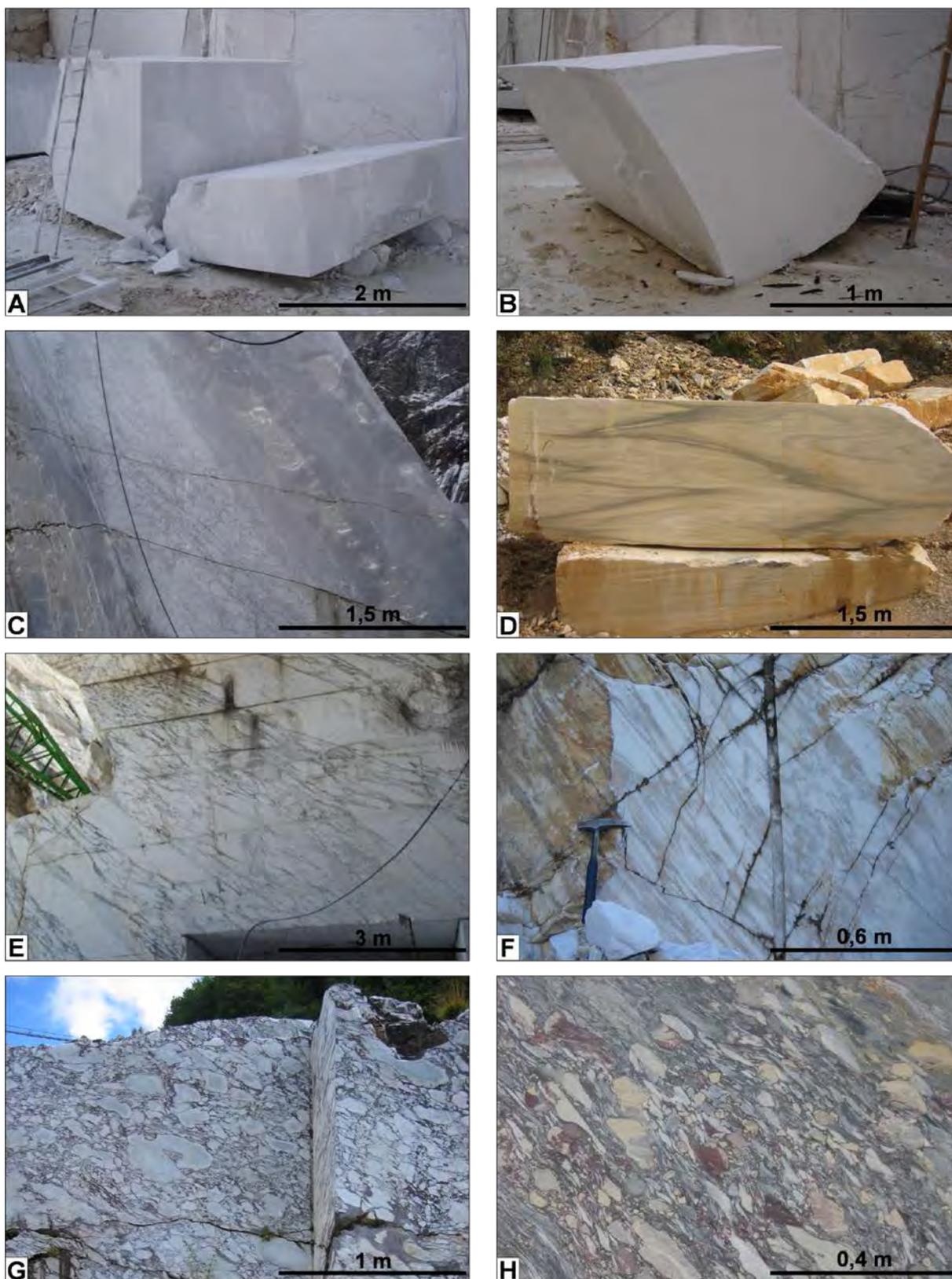


Figura 6 - Varieta' merceologiche dei marmi delle Alpi Apuane: A) Blocco di marmo Ordinario (Carrara); B) Blocco di marmo Bianco (Forno); C) Livello di marmo Venato all'interno di marmi Grigi (Equi); D) Blocco di marmo Zerbino (Carrara); E) Fronti di coltivazione in marmo Arabescato (M. Corchia); F) Tagli di cava in marmo Calacatta (Forno); G) Tagli di cava in Breccie Rosse (Arnetola); H) Tagli cava in Breccie di Seravezza (M. Corchia).

3.3. VARIETÀ PREGIATE DELLE PIETRE ORNAMENTALI DELLE ALPI APUANE

3.3.1. Distribuzione percentuale delle varietà merceologiche nel territorio apuano

Nelle Alpi Apuane gli affioramenti di marmo raggiungono un'estensione totale di poco superiore a 71 km², dei quali il 27% è rappresentato da marmi bianchi, il 24% da marmi grigi e/o venati, il 10% da marmi cipollini, il 2,5% da marmi brecciati e da meno dell'1% da marmi storici (Figura 7). Le aree restanti (34%) sono costituite da affioramenti di marmo inaccessibili (pareti subverticali e strapiombanti) oppure da marmi debolmente ricristallizzati o caratterizzati da un'intensa dolomitizzazione secondaria che non presentano alcun interesse da un punto di vista merceologico.

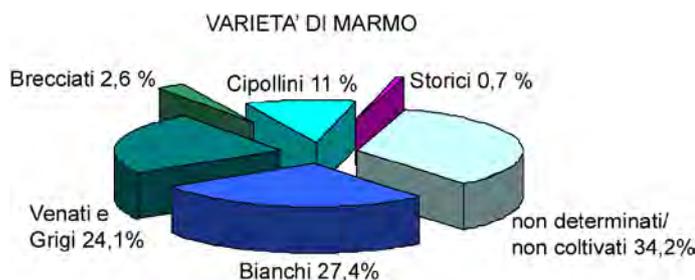


Figura 7 - Distribuzione percentuale delle varietà merceologiche di marmo delle Alpi Apuane.

All'interno dei marmi bianchi la varietà merceologica più rappresentata è l'Ordinario, il quale costituisce il 98,5% degli affioramenti, mentre le varietà Statuario e Bianco assieme raggiungono solo il 1,5%. La varietà Ordinario si trova in quasi tutti i principali bacini marmiferi apuani: bacini di Carrara, del M. Costa, del M. Altissimo-Alberghi e di Arni-Arnetola e lungo l'allineamento M. Sella - M. Tambura - M. Roccandagia. Le varietà Statuario e Bianco risultano molto meno diffuse e caratterizzate, in genere, da affioramenti dello spessore di pochi metri (2 - 10 m) e continuità laterale dell'ordine delle centinaia di metri (200 - 300 m). Corsi di Statuario sono localizzati nei bacini di Carrara, del M. Altissimo-Alberghi e del M. Corchia, mentre la varietà bianco affiora nei bacini del M. Altissimo-Alberghi, di Orto di Donna e di Gorfigliano.

I litotipi grigi nel gruppo dei marmi grigi e/o venati rappresentano il materiale predominante (60%). Si trovano in tutti i principali bacini marmiferi apuani, costituendo affioramenti di notevole spessore ed estensione prevalentemente nei settori orientali e sud-orientali. Anche i marmi venati (38%) risultano ampiamente diffusi nei settori centrali e orientali. La varietà Zerbino (2%) è rappresentata da corsi di modesto spessore (massimo 10 metri) localizzati in prevalenza nel settore occidentale del bacino di Carrara e nelle aree nord-orientali delle Alpi Apuane.

Tra i marmi brecciati la varietà Arabescato, oltre ad essere la più rappresentata (40%), è anche quella distribuita in modo più omogeneo; inoltre è possibile osservare come, nei settori centro-orientale e sud-orientale, questo materiale raggiunga notevoli spessori ed una maggiore continuità laterale. I principali corsi della varietà Calacatta (11%) caratterizzano in prevalenza il bacino di Carrara (fianco rovesciato della Sinclinale di Carrara) e quello di Arni-Arnetola, mentre quelli delle varietà Breccia rossa e Fantastico risultano confinati quasi esclusivamente nel bacino di Arni-Arnetola.

I marmi cipollini contraddistinguono i bacini marmiferi orientali e sud-orientali costituendo giacimenti di notevole spessore ed estensione.

Infine tra i marmi storici la Breccia di Seravezza rappresenta circa l'85% degli affioramenti contro l'11% del Nero di Colonnata e il 4% del Rosso rubino. Questi materiali rappresentati in affioramento in percentuale inferiore all'uno per cento rispetto al totale dei marmi estratti nelle Alpi Apuane.

3.3.2. Marmi storici PRAER 2007

I marmi compresi nell'elenco dei materiali storici del documento PRAER, 2007 sono stati utilizzati nel passato, oggi scarsamente o per nulla coltivati (ad esempio Breccie di Seravezza, Nero di Colonnata e Rosso Rubino), per la realizzazione di monumenti e opere architettoniche di particolare interesse artistico e storico.

3.3.2.1. Breccie di Seravezza

La formazione delle Breccie di Seravezza, riferibile all'intervallo Norico sup. - Hettangiano, è caratterizzata da metabreccie in filoni sedimentari all'interno dei Marmi a Megalodontidi e in ammassi irregolari tra i Grezzoni in basso, e il Marmo Nero di Colonnata o i Marmi Dolomitici e i Marmi in alto. Nel passato sono state chiamate con nomi differenti da vari autori (Cocchi, D'Achiardi, Zaccagna e Bonatti): "Mischio o Brecciato di Seravezza"; "Breccie", "Persichino"; "Breccia africana", "Breccia o Mischio ottrelitico"; "Breccie policrome tra i Marmi ed i Grezzoni", "Breccie policrome-ferrifere"; "Mischio di Stazzema". Quando i clasti sono rari o mancano del tutto il termine Breccie di Seravezza è sostituito dal termine "Scisti a Cloritoide". Con il termine "Mischio" nel gergo locale viene considerata una breccia con clasti policromi a colori vivi che si confondono con la matrice, mentre con "Brecciato" viene intesa una roccia analoga ma con clasti poco colorati e ben distinti dalla matrice.

Le breccie sono costituite in gran parte da clasti di marmo ceroide e subordinatamente saccaroide di dimensioni da centimetriche a decimetriche (raramente metriche) con bande e macchie di alterazione pigmentate da ossidi di ferro (ematite e limonite), bordi frastagliati e di colori diversi dall'avorio al giallo crema, al rosso, al grigio e al nero. Subordinati sono i clasti dolomitici derivanti dai Grezzoni, anche questi con bordi arrossati da ematite. I clasti sono immersi in una matrice massiva criptocristallina o scistosa, pigmentata per la presenza di ematite o limonite e sempre ricca di cloritoide. L'origine della matrice è continentale (Giglia & Trevisan, 1966) che doveva essere formata da terre residuali di tipo lateritico fortemente arricchite in titanio, ferro e allumina formatesi in clima caldo umido (Franceschelli et alii, 2003). L'imponente sviluppo di filoni sedimentari all'interno dei Marmi a Megalodontidi è una chiara testimonianza dell'origine carsica delle terre residuali (Conti et alii., in stampa). La particolare genesi delle breccie comporta una certa variabilità litologica esaltata al momento del taglio del materiale per la produzione delle lastre (Figura 6H, Figura 8 e Figura 9). Nell'ambito della formazione delle Breccie di Seravezza vengono distinte diverse varietà commerciali: Fior di Pesco, Breccia Medicea, Mischio e Skiros d'Italia.

Le Breccie di Seravezza e gli associati Scisti a Cloritoide affiorano diffusamente in tutto il nucleo metamorfico dal Pizzo d'Uccello al Monte Altissimo e al M. Corchia ove raggiungono il massimo spessore. Ulteriori affioramenti sono presenti alle pendici di M. Alto e in tutto la Zona dello Stazzemese e nel versante settentrionale del M. Focoraccia. Sono invece scarsamente rappresentate o del tutto assenti nella zona di Colonnata (Carrara) e delle Panie. I litotipi delle Breccie di Seravezza affiorano nelle seguenti aree contigue: Bacino Solco d'Equi; Bacino Fondone Cerignano; Bacino Valsora Giacceto; Bacino Monte Pelato; Bacino Retro Altissimo; Bacino Tacca Bianca; Bacino Mossa; Bacino Caprara; Bacino Madielle; Bacino Monte Altissimo Est; Bacino Monte Corchia; Bacino Borra Larga e Bacino Mulina Monte di Stazzema.

Complessivamente la superficie d'affioramento della formazione delle Breccie di Seravezza e degli associati Scisti a Cloritoide, dedotta dal continuum geologico della Regione Toscana, realizzato nell'area apuana sulla base dei rilevamenti eseguiti dall'Università degli Studi di Siena, è piuttosto estesa e si attesta ad un valore di 517.616,75 m² (0,52 Km²).

Nella cava Capraia nel Comune di Massa (Bacino Capara, versante settentrionale del Monte Focoraccia) la formazione delle Breccie di Seravezza ha uno spessore superiore ad una decina di metri ed è stata oggetto ed è tuttora oggetto di estrazione, rappresentando l'unica attività di tipo industriale, paragonabile ad altri materiali delle Alpi Apuane, come gli Zebrini o alcune tipologie di

marmo Statuario. Il materiale estratto viene commercializzato con svariati nomi in funzione del disegno prevalente o della moda del momento: Breccia Capraia Classic (Figura 8), Arabescato Type, Calacatta GMC, Golden Type, Breccia Madonna, Fior di Pesco e Fior di Pesco Light. Tali materiali sono utilizzati per rivestimenti di edifici, quali alberghi, centri commerciali e ville private. Nella stessa cava è presente un livello discontinuo dello spessore massimo di circa 2 - 3 metri di metacalcare nodulare di colore rossastro, denominato Fior di Pesco (Figura 9) intercalato nella massa di marmo brecciato e per questo non separabile se non in termini merceologici dopo la trasformazione in lastre. La cava Capraia avendo avuto continuità di estrazione nel tempo ed un utilizzo del marmo di tipo industriale e non legato a opere e manufatti di importanza storica, non ricade propriamente tra i materiali definibili "Storici" come definiti nel PRAE, rappresentando l'unica eccezione tra le Breccie di Seravezza di materiale utilizzato con continuità ed allo stesso modo degli altri marmi delle Alpi Apuane.

Nella tabella seguente sono riportate le caratteristiche fisico meccaniche delle Breccia Capraia (Tabella 2).

	Resistenza a compressione (Kg/cm ²)	Resistenza a compressione dopo gelività (Kg/cm ²)	Resistenza a flessione (Kg/m ²)	Dilataz.Termica lineare (10 ⁻⁶ °C)	Coeff. Imbib. H ₂ O (% in peso)	Peso per unità di Vol. (Kg/m ³)	Resist. all'urto (cm)	Resist. all'abrasione (mm)
Breccia Capraia	1126	978	99	7,4	0,15	2683	57,5	7,82

Tabella 2 - Caratteristiche fisico meccaniche della Breccia Capraia



Figura 8 - Blocco di Breccia Capraia (Comune di Massa)

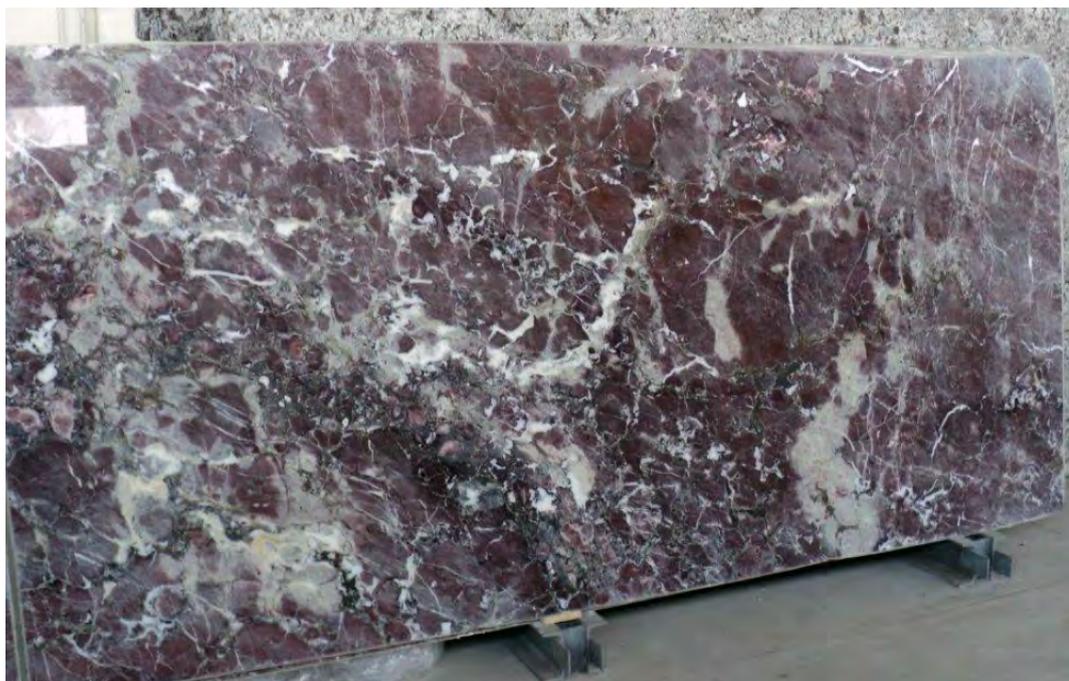


Figura 9 - Lastre di Fior di Pesco Cava Capraia (Comune di Massa)

Concludendo, le Breccie di Seravezza sono state utilizzate nel passato per la realizzazione di monumenti e opere architettoniche di particolare interesse artistico e storico, ma sono comunque largamente distribuite e diffuse nel territorio apuano ed attualmente sono coltivate presso la cava Capraia nel Comune di Massa.

3.3.2.2. Nero di Colonnata

Si tratta di metacalcari ben stratificati da grigio-scuri a neri, frequentemente bioturbati, e subordinate dolomie grigio chiare regolarmente stratificate, in banchi di spessore pluridecimetrico, con interstrati metapelitici grigio-scuri e neri, giallastri all'alterazione (Figura 10). Nei metacalcari sono localmente preservati livelli lumachellici e lamine ooidiche ad andamento ondulato indicative di trasporto trattivo (Conti et alii., in stampa). Il Marmo Nero di Colonnata (Norico superiore - Retico) ricopre stratigraficamente i Grezzoni attraverso una superficie di parziale inconformità. E' conosciuto con vari sinonimi nella letteratura geologica: "Calcari marmorei neri"; "Grezzone tipo Portoro"; "Grezzoni di Colonnata" p.p., "Grezzoni di Casette e Caglieglie" p.p. e "Grezzoni di Bedizzano e di Torano" p.p.; "Grezzoni" p.p.; "Marmo scistoso; facies Marmo Nero di Colonnata"; "Calcari e marne di Colonnata" (Zaccagna, Bonatti, Ciarapica e Passeri, Carmignani, Coli e Fazzuoli).

Il Nero di Colonnata affiora esclusivamente nell'area contigua del Bacino Gioia (Carrara) (Mancini, 2005) ed attualmente non è oggetto di coltivazione.



Figura 10 - Affioramento di Marmo Nero di Colonnata.

3.3.2.3. Rosso Rubino

Nel Foglio Massa Carrara di prossima pubblicazione (Conti et alii. in stampa) la Formazione di Vinca (Carnico superiore - base Norico) è stata suddivisa in tre livelli. Il livello intermedio è caratterizzato da dolomie silicoclastiche gialle e rosate alternate localmente a metarenarie a matrice carbonatica con stratificazione incrociata planare a basso angolo. Presso Retignano questo intervallo è rappresentato da dolomie rosse e rosate fittamente straterellate, caratterizzate dalla presenza di strutture di tipo "stromatactis" e di sottili livelli millimetrici irregolari di filladi verdastre. Le dolomie rossastre passano verso l'alto a dolomie da crema a rosate (denominate dal punto di vista commerciale come "Brecce Arlecchino"), fortemente nodulari, con livelli discontinui da centimetrici a subdecimetrici di metapeliti verdi ricchissime di cloritoide (spessore complessivo: 7-8 metri). In qualche caso (Bonatti, 1938) la Formazione di Vinca è stata denominata Mischio, alla stregua del Mischio di Stazzema (Breccia di Seravezza) con il quale può condividere l'abbondanza di cloritoide, pur essendone stata riconosciuta la giacitura "anomala" tra il Basamento e i Grezzoni. Questo particolare litotipo rappresentato in lenti discontinue decametriche di qualche metro di spessore affiora alla base dei Grezzoni, appartenenti al fianco dritto del Monte Corchia nella Zona dello Stazzemese dalla zona di Molte Alto fino ad arrivare ai Pizzi del Bottino. Una lente di Rosso Rubino affiora nell'area contigua denominata: La Risvolta presso Ponte Stazzemese dove sono ubicate alcune cave attualmente non attive.

3.4. CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI GIACIMENTI MARMO

Le caratteristiche meccaniche degli ammassi rocciosi dipendono strettamente dalle caratteristiche fisico meccaniche della roccia intatta che costituisce l'ammasso stesso (ricavabili da test su campioni rappresentativi non alterato, senza discontinuità) e dalle caratteristiche meccaniche delle superfici di discontinuità presenti. Per discontinuità si intende ogni tipologia di anisotropia meccanica planare con spaziatura discreta associate sia a variazioni tessiturali e composizionali (es.

stratificazione, layering tettono-metamorfici) oppure di natura puramente meccanica (es. giunti). Le discontinuità fragili nel marmo apuano sono da ricondurre agli ultimi stadi di evoluzione del massiccio metamorfico connessi alla fase esumativa, realizzata negli ultimi milioni di anni, caratterizzata da un progressivo detensionamento delle rocce. Le tre principali discontinuità della massa marmorea sono conosciute con i seguenti nomi, derivati dal lessico locale ormai consolidato fra le maestranze: Verso, Contro e Secondo. Con il termine Verso (o verso di macchia) si intendono le discontinuità circa parallele alla giacitura della scistosità principale della massa marmorea, mentre con Secondo e Contro si intendono discontinuità, generalmente ad alto angolo di inclinazione, circa mutuamente ortogonali fra loro e alla scistosità. Nel caso in cui superfici del "Contro" oppure del "Secondo" siano concentrate in una ristretta fascia della massa marmorea (caratterizzata da qualche centimetro a qualche metro di spessore) prendono il nome di "Finimento". Il numero di discontinuità nelle masse marmoree possono essere maggiori di tre, esiste un'ampia gamma di casistiche locali dove in zone in cui l'ammasso è particolarmente fratturato le famiglie delle discontinuità individuate possono essere numerose. Giacitura, spaziatura, persistenza, scabrezza, apertura, presenza eventuale di riempimento o d'acqua di ogni famiglia di discontinuità influiscono in modo determinante, sulla stabilità del pendio e dei fronti di cava e sulla resa della cava in termini di blocchi, semisquadrati, informi e materiale di scarto.

La caratterizzazione dell'ammasso roccioso nelle cave di marmo viene realizzata utilizzando i correnti metodi proposti in letteratura: Bieniawski (Indice RMR), Q di Barton, Indice RME (Rock Mass Excavability). I valori generalmente ottenuti nella classificazione delle masse marmoree nel Complesso metamorfico apuano si collocano nella classe II (Buono) di Bieniawski a cui corrispondono parametri stimati di resistenza dell'ammasso roccioso di 300 - 400 KPa di Coesione e 35° - 45° di angolo di attrito. Le discontinuità sono caratterizzate da una certa variabilità di JRC, che mediamente ricade nella classe 6-8.

Le caratteristiche fisico meccaniche della roccia intatta vengono determinate in laboratorio utilizzando provini di forma e dimensioni predefinite in funzione della tipologia di test. Le procedure di prova fanno riferimento a standard nazionali ed internazionali quali ad esempio: UNI-EN, ASTM, BS ecc. L'utilizzo di pietre ornamentali nel campo dell'edilizia prevede l'obbligo della redazione della Dichiarazione di Prestazione (DoP), che dal luglio 2013 sostituisce la Dichiarazione di Conformità, per tutti i prodotti che rientrano nell'ambito di norme armonizzate (lastre, cubetti e cordoli per pavimentazioni esterne, marmette modulari in pietra naturale, lastre per pavimentazioni, scale in pietra naturale e per rivestimenti in pietra naturale, elementi di muratura di pietre naturali, ardesia e prodotti di pietra per coperture discontinue e rivestimenti) sancendo di fatto l'obbligo della marcatura CE per tali prodotti. La Dichiarazione di Prestazione deve essere esibita dal produttore del materiale edilizio e rappresenta la modalità attraverso la quale può essere apposto il marchio CE, divenendo una "carta di identità del prodotto" finalizzata alla descrizione della prestazione dei materiali in relazione alle loro caratteristiche essenziali e ad altre che il produttore ritiene di esplicitare. In questo modo non viene fornita una idoneità all'utilizzo di un prodotto da costruzione ma una garanzia sul fatto che siano fornite informazioni precise ed affidabili sulle prestazioni del singolo prodotto. Tali prestazioni dovranno successivamente essere valutate dall'utilizzatore o dall'autorità di controllo in confronto a quelle richieste dai capitolati o dai documenti progettuali.

I test principali finalizzati alla caratterizzazione fisico meccanica delle pietre ornamentali nell'ambito della marcatura CE sono le seguenti: Assorbimento d'acqua a pressione atmosferica (UNI-EN 13755); Massa volumica apparente e porosità aperta (UNI-EN 1936); Resistenza a flessione sotto carico concentrato e dopo 48 cicli di gelo e disgelo (UNI-EN 12371 e 12272); Resistenza alla compressione (UNI-EN 1926); Resistenza allo scivolamento in condizioni secche e bagnate (UNI-EN 14231) e Analisi petrografica (UNI-EN12407).

La tabella seguente contiene i valori medi relativi ad alcuni test correntemente realizzati sui marmi ai fini della marcatura CE. Si tratta di 49 campioni rappresentativi delle differenti varietà merceologiche (Tabella 4).

	Ass. acqua a $P_{atm.}$ (%)	Massa Vol. apparente (Kg/m^3)	Porosità aperta (%)	Resistenza a flessione (Mpa)	Resistenza a compressione (Mpa)	Resist. scivol. secco (USRV)	Resist. scivol. bagnato (USRV)
Valore medio	0,1	2710	0,4	15	90	58	30
Valore min.	0,07	2690	0,1	5	50	40	14
Valore max	0,3	2740	0,9	27	129	82	78

Tabella 3 - Medie dei valori relativi ad alcune caratteristiche fisico meccaniche dei marmi apuani (tratto da "The Tuscan Marble Identities", edito da Regione Toscana, Toscana promozione, Ministero dello sviluppo economico e istituto nazionale per il commercio estero). La tabella riporta il valore medio, il valore minimo e massimo relativo a 49 campioni. I test fanno riferimento alla normativa UNI-EN il cui riferimento è riportato nel testo. La prova di resistenza allo scivolamento è stata eseguita su campioni con finitura levigata.

Di seguito è riportata una tabella relativa ai risultati dei test compiuti in occasione del progetto ERTAG (1980) su 53 campioni di varie tipologie di marmo apuano (Tabella 5). Le caratteristiche fisico meccaniche sono state misurate con le tecniche descritte nelle "Norme sui materiali per costruzione" previste nei regi Decreti del 16 novembre 1939.

	Resistenza a compressione (Kg/cm^2)	Resistenza a compressione dopo gelività (Kg/cm^2)	Resistenza a flessione (Kg/m^3)	Dilataz. Termica lineare ($10^{-6} \text{ } ^\circ C$)	Coeff. Imbib. H_2O (% in peso)	Peso per unità di Vol. (Kg/m^3)	Resist. all'urto (cm)	Resist. all'abrasione (mm)
Valore medio	1331	1276	179	6	0,1	2692	51	5,6
Valore min.	972	978	72	1	0,07	2674	20	2,4
Valore max	1796	1628	244	9,4	0,23	2719	82,5	9,8

Tabella 4 - Medie dei valori relativi alle caratteristiche fisico meccaniche dei marmi apuani (ERTAG, 1980 media su 53 campioni. I test fanno riferimento alle indicazioni ISRM).

I moduli di deformazione del marmo (modulo di Young) da bibliografia (E_{t-50}) si attesta su valori compresi fra 50 e 80 GPa. La media dei valori del modulo di elasticità lineare ottenuti in occasione dei test del progetto ERTAG si attestano sui seguenti valori 687.471 Kg/cm^2 (68,7 GPa) (valore medio), 391.000 Kg/cm^2 (39,1 GPa); $1.212.000 \text{ Kg/cm}^2$ (121,2 GPa) Valore massimo)

Una prova di compressione semplice con misura della deformazione (secondo la procedura indicata da ISRM) effettuata su un campione di Bianco Ordinario della cava Lorano (Bacino di Torano, Carrara), presso il laboratorio di Meccanica delle Rocce e dei Materiali Naturali da Costruzione del CGT,) ha fornito i seguenti risultati (Figura 11, Figura 12 e Figura 13):

Cava Lorano (Carrara) Bianco Ordinario	Resistenza a compressione σ_u	Modulo di Young E_{t-50}
Campione 1	87 MPa	54 - 72 GPa

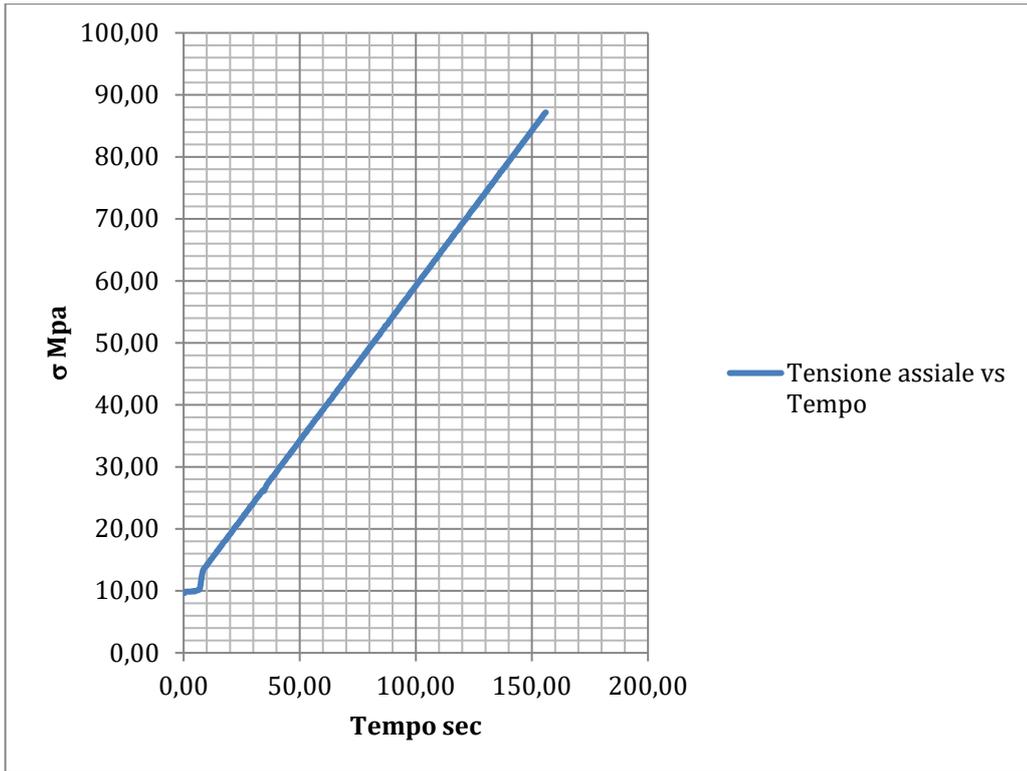


Figura 11 - Andamento della tensione assiale espressa in MPa, rispetto al tempo di prova in secondi.

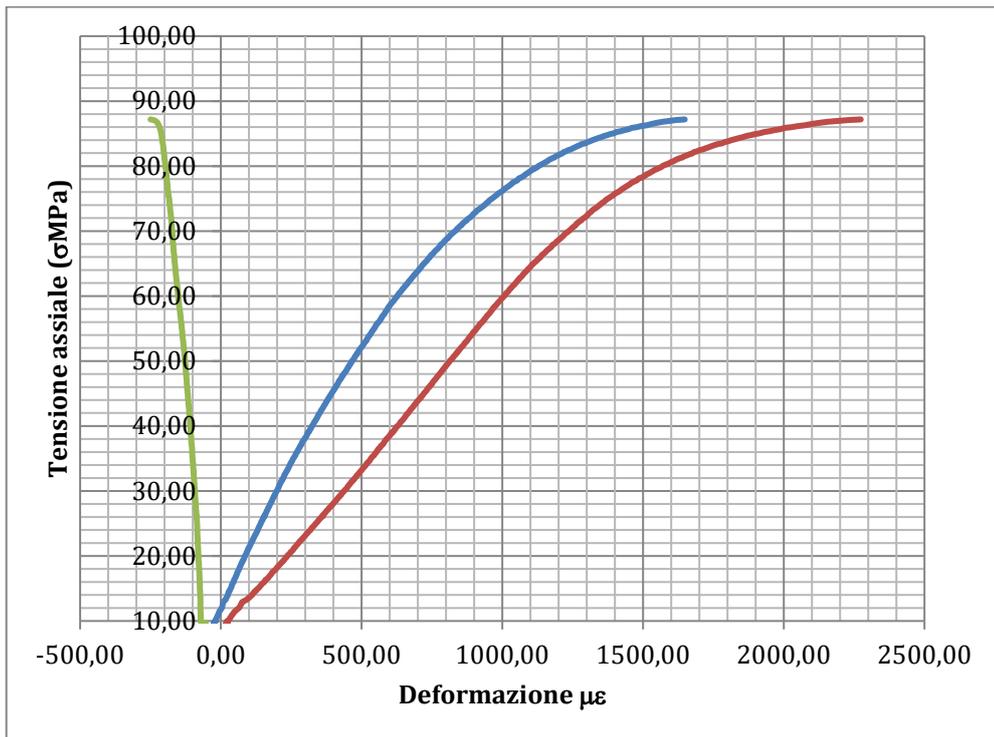


Figura 12 - Andamento della tensione assiale (MPa) Vs deformazione assiale (curva azzurra e rossa) e della deformazione diametrale (curva verde) (microepsilon).



Figura 13 - Immagine del provino a termine della prova utilizzato per il test di compressione uniassiale e la misura della deformazione.

4. MODELLO GEOSTRUTTURALE TRIDIMENSIONALE DELLA RISORSA MARMIFERA

4.1. PREMessa

La rappresentazione della geometria tridimensionale della risorsa marmifera nelle Alpi Apuane è stata ottenuta come prodotto finale di una procedura che ha previsto l'elaborazione e l'interpretazione degli elementi geologici noti dalla bibliografia e dei nuovi dati acquisiti tramite attività di fotointerpretazione e rilievo di campagna. La rappresentazione bidimensionale dell'andamento dei contatti geologici nel sottosuolo tramite le sezioni geologiche ha nelle Alpi Apuane una lunga tradizione risalente alla metà del diciannovesimo secolo. Le prime carte e sezioni geologiche di alto valore scientifico del massiccio apuano furono realizzate da Zaccagna che, nel 1987, pubblicò una carta geologica in quattro fogli in scala 1/50.000 corredata da sezioni geologiche seguita dalla stampa di diciassette tavolette in scala 1/25.000 di tutta l'area apuana. Da allora il progresso delle conoscenze geologiche ha influito sull'interpretazioni delle deformazioni delle formazioni rocciose affioranti nelle Alpi Apuane e del loro sviluppo nel sottosuolo. A partire dagli anni settanta con l'avvento delle tecniche della moderna geologia strutturale vari autori (Carmignani, Giglia, Kligfield, Meccheri, Coli) hanno prodotto cartografie e sezioni geologiche che sono tutt'ora di riferimento per il mondo professionale e accademico.

Al fine di realizzare l'analisi strutturale del massiccio apuano e disegnare sezioni geologiche rappresentative da utilizzare per la costruzione di un modello tridimensionale della risorsa marmifera, sono state selezionate preliminarmente undici aree di pertinenza dei principali domini strutturali. Tali domini sono stati individuati sulla base delle conoscenze pregresse, essi rappresentano macro aree caratterizzate da una certa costanza dell'orientazione degli elementi strutturali quali ad esempio la scistosità principale e gli assi delle pieghe tardive (Figura 14):

1: Dominio di Carrara: è individuato dalla struttura plicativa di prim'ordine denominata Sinclinale di Carrara, che comprende il marmo del fianco rovesciato della piega e il marmo dell'esteso fianco dritto. Il dominio coincide con quasi tutta l'area industriale a monte della città di Carrara comprendendo verso Sud le cave di Casette e Rocchetta nel Comune di Massa. Il dominio comprende anche gli affioramenti dei marmi del Trias Medio appartenenti all'Unità tettonica di Massa.

2: Dominio di Orto di Donna: comprende gli affioramenti di marmo nella porzione più settentrionale delle Alpi Apuane appartenenti al fianco rovesciato di raccordo fra l'Anticlinale di Vinca Forno e la Sinclinale di Orto di Donna-Monte Altissimo (zona del Solco d'Equi, Orto di Donna, fino alla struttura complessa dell'Antiforme di Monte Rasori nel Comune di Massa, in corrispondenza delle cave Romana e Fondone Cerignano). Il dominio comprende anche i marmi del fianco dritto della Sinclinale di Orto di Donna Monte Altissimo che in alcuni tratti riducono il loro spessore fino a scomparire.

3: Dominio del Monte Tambura Monte Sella: si sviluppa lungo una fascia di territorio esteso in direzione Nord Sud comprendendo il fianco rovesciato dell'Anticlinale del Monte Tambura e la zona nota in letteratura come "Cintole della Rocchandaglia". Nel settore più orientale del dominio è compresa la complessa struttura plicativa tardiva di Arni - Arnetola.

4: Dominio di Boana: comprende i marmi della complessa struttura di Boana e la zona di affioramento dei Marmi Cipollini polideformati del Bacino di Fontana Baisa.

5: Dominio della Turrite Secca: costituisce la porzione meridionale della zona denominata Virgazione di Arni coincidente con i versanti meridionale e settentrionale del Monte Sumbra. In quest'area le strutture plicative isoclinali associate alla fase precoce D1 sono nuovamente deformate in maniera duttile e subiscono una torsione di novanta gradi ruotando da una direzione Nord _Sud nella zona di Arni ad una direzione Est - Ovest nella valle della Turrite Secca.

6: Dominio del Monte Altissimo: corrisponde alla porzione meridionale della Sinclinale di Orto di Donna-Monte Altissimo caratterizzata in questa zona da un importante nucleo di marmo sviluppato in direzione Nord Nord Ovest - Sud Sud Est.

7: Dominio delle Madielle: comprende il raggruppamento di tre strutture sinclinali isoclinali minori (Caprara, Madielle e Monte Carchio) a nucleo di marmo, interessate da importanti zone di taglio tardive.

8: Dominio delle Crevaiole: coincide con la terminazione meridionale della Sinclinale di Orto di Donna-Monte Altissimo che forma un'isola di marmo nella porzione sommitale del Picco di Falcovaia sede della cava delle Crevaiole.

9: Dominio del Monte Corchia: coincide con il massiccio omonimo e comprende il marmo, fasciato dalla formazione delle dolomie dei Grezzoni, dei due fianchi della struttura sinclinale isoclinale che lo caratterizza.

10: Dominio di Trambiserra Monte Costa: comprende i marmi affioranti nelle località omonime nell'estrema porzione Sud occidentale del Complesso metamorfico apuano.

11: Dominio della zona dello Stazzemese: coincide lo sviluppo meridionale della struttura del Monte Corchia comprendendo il Monte Alto fino ad arrivare in località La Porta. Si tratta di una zona peculiare delle Alpi Apuane, sede del maggiore affioramento della formazione dello Pseudomacigno, oggetto di studi geologici specifici fino dalla metà dell'ottocento.

7. 3D Caprara (Comune di Massa)
8. 3D Madielle (Comune di Massa)
9. 3D Monte Carchio (Comuni di Massa e Montignoso)
10. 3D Combratta Monte Brugiana (Comuni di Carrara e Massa)
11. 3D Gioia Rocchetta (Comune di Massa)
12. 3D Torano (Comune di Carrara)
13. 3D Fantiscritti (Comune di Carrara)
14. 3D Gioia (Comune di Carrara)
15. 3D Pescina (Comune di Carrara)
16. 3D Piscinicchi (Comune di Carrara)
17. 3D Orto di Donna Valserenaia (Comune di Minucciano)
18. 3D Acqua Bianca (Comune di Minucciano)
19. 3D Carcaraia (Comune di Minucciano)
20. 3D Retro Altissimo Tacca Bianca (Comune di Seravezza)
21. 3D Canale delle Gobbie (Comune di Seravezza e Comune di Stazzema)
22. 3D Monte Macina (Comune di Stazzema e Comune Vagli sotto)
23. 3D Borra Larga (Comune di Stazzema)
24. 3D Monte Corchia (Comune di Stazzema)
25. 3D Tre Fiumi (Comune di Stazzema)
26. 3D Canale delle Fredde (Comune di Stazzema)
27. 3D La Risvolta (Comune di Stazzema)
28. 3D Monte di Stazzema (Comune di Stazzema)
29. 3D Colubraia (Comune Vagli sotto)
30. 3D Monte Pallerina (Comune Vagli sotto)
31. 3D Fontana Baisa (Comune Vagli sotto)

4.2. **ATTIVITÀ DI CAMPAGNA**

In alcune aree circoscritte di interesse è stato realizzato un rilievo geologico strutturale finalizzato alla verifica e all'aggiornamento delle carte esistenti edite ed inedite in possesso degli scriventi, alla luce delle più recenti interpretazioni dell'evoluzione tettonica del massiccio apuano.

Sono state realizzate stazioni di misura dei principali elementi strutturali (scistosità, assi di pieghe, lineazioni d'estensione ecc.). Durante i rilievi è stato utilizzato tablet dotato di un supporto informatico hardware e software (ArcMap 10.5 e Geonotepad), con sistemi operativi rispettivamente Windows 10 ed Android (Figura 15). Il tablet grazie al sistema GPS integrato permette al geologo rilevatore un posizionamento sul terreno con precisione metrica, così da consentire una migliore ubicazione delle aree di affioramento, dei limiti litologici e degli elementi strutturali misurati rispetto ad un tradizionale rilevamento con bussola ed altimetro. La raccolta di misure geologico-strutturali in campagna è stata quindi effettuata direttamente in formato digitale e i dati acquisiti sono georeferenziati. Il tablet ha consentito inoltre d'integrare il lavoro di campagna e di laboratorio agendo su un unico ambiente software, minimizzando i possibili errori di posizionamento e georeferenziazione degli elementi geologici e geomorfologici.



Figura 15 - Geologo rilevatore che si appresta all'utilizzo del tablet presso il Bacino Monte Borla nel Comune di Fivizzano.

4.3. ATTIVITÀ DI FOTOINTERPRETAZIONE

Le aree di studio sono state investigate tramite un'analisi multiscala, integrando le attività di laboratorio e le attività di terreno. La fotointerpretazione è stata effettuata con l'utilizzo del software ArcGis Pro 1.4 utilizzando ortofoto ad alta ed altissima risoluzione (rispettivamente 1 m e 5cm / 20cm) ed una adeguata superficie di elevazione (DTM Lidar). In alcuni specifici settori del territorio (zona del Monte Cavallo, Monte Sumbra; Acquabianca, Campocecina e Monte Altissimo) sono stati realizzati modelli digitali dell'elevazione di elevata precisione ottenuti mediante l'utilizzo di foto aeree ad alta risoluzione spaziale acquisite con un velivolo sperimentale dedicato al monitoraggio multiparametrico airborne, denominato "Radgyro" (Figura 16).



Figura 16 - Radgyro in volo nel territorio apuano.

Utilizzando le immagini riprese durante i voli a bassa quota del RadGyro è possibile creare DEM (Modelli Digitali di Elevazione) e ortofotomosaici con caratteristiche tali da consentire la successiva elaborazione mediante tecniche di analisi spaziale. È possibile raggiungere risoluzione per pixel inferiore ai 50 cm per i modelli 3D e ai 10 cm per le ortofoto utilizzando delle camere digitali calibrate con risoluzione del sensore full-frame di 24 mpx e ottica da 35 mm. Tali informazioni vengono restituite mediante l'elaborazione di numerosi fotogrammi stereoscopici acquisiti sulle aree di interesse mediante uno o più voli fotogrammetrici a seconda della risoluzione finale richiesta. I fotogrammi così ottenuti vengono elaborati con software dedicati che permettono di gestire elevate quantità di dati in modo quasi-automatico

Utilizzando sia le ortofoto disponibili che le immagini ricavate da voli specifici in condizioni di affioramento naturale della roccia senza coperture vegetali e di terreno superficiale il software ArcGis Pro 1.4 ha consentito un'analisi fotointerpretativa dei sistemi di fratturazione presenti nell'area, nonché l'identificazione delle strutture geologiche più evidenti.

5. DESCRIZIONE FILE DI CONSEGNA

I dati acquisiti durante le attività di campagna e di fotointerpretazione, insieme ai dati cartografici pregressi in possesso degli scriventi, sono stati utilizzati per la realizzazione dei modelli tridimensionali della risorsa marmifera e delle cartografie tematiche oggetto della convenzione.

Gli elaborati realizzati sono di seguito descritti singolarmente, ognuno di essi riporta l'area contigua di cava a cui si riferisce:

5.1. ALLEGATO 1 _ ORTOFOTO

L'allegato relativo all'ortofoto si propone lo scopo d'inquadrare l'area di studio nel contesto territoriale fisico e amministrativo (Figura 17). L'immagine è accompagnata da una breve descrizione del contesto morfologico in cui l'area si trova che generalmente è rappresentato da valli di tipo "alpino", caratterizzate da versanti molto acclivi, con substrato costituito prevalentemente da rocce calcaree o dolomitiche (Grezzoni, Marmi, Metacalcari sciferi, Marmi Cipollini). L'osservazione dell'ortofoto consente di constatare con immediatezza, alla data della foto (anno 2013), la diffusione sul territorio delle attività antropiche collegate con l'industria estrattiva del marmo (zone di scavo e zone di accumulo degli scarti di escavazione "ravaneti").

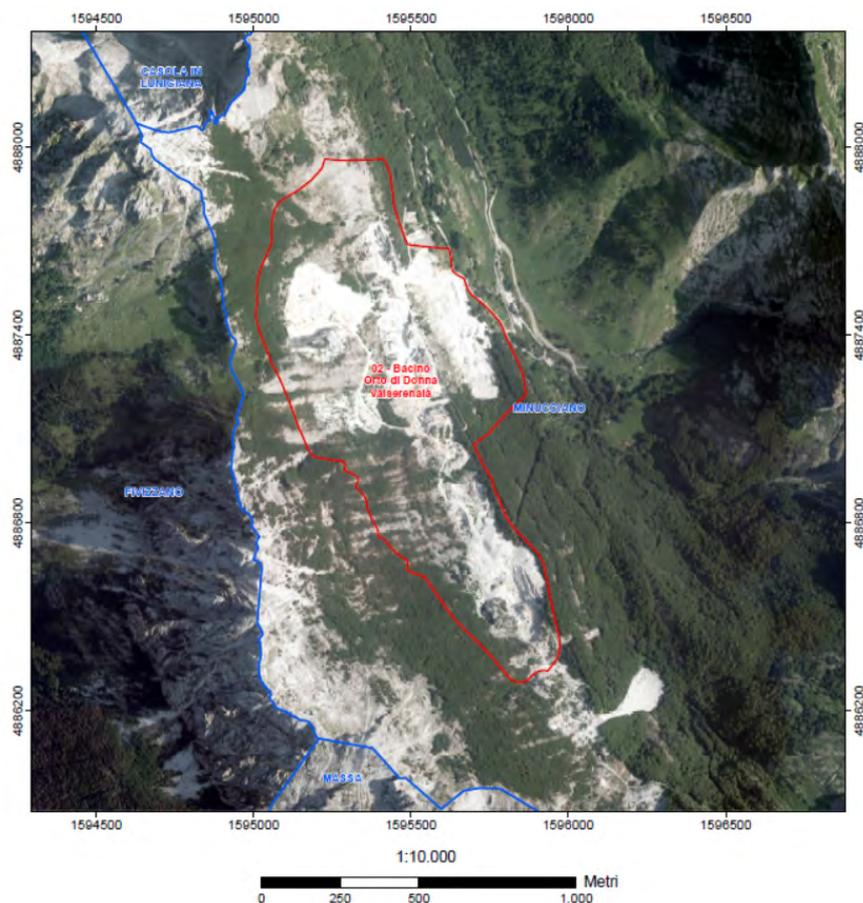


Figura 17 - Esempio di ortofoto relativa al bacino Orto di Donna Valsereña nel Comune di Minucciano. In rosso è indicata l'area contigua del Bacino marmifero Orto di Donna Valsereña. In blu sono indicati i limiti dei territori comunali di Massa, Fivizzano, Minucciano e Casola in Lunigiana.

5.2. ALLEGATO 2 _ ELEMENTI RELATIVI ALLE ATTIVITÀ ESTRATTIVE

Questo allegato riporta sulla base topografica della Carta Tecnica della Regione Toscana le strade di arroccamento alle aree estrattive, gli orli di scarpata di cava presenti nelle ortofoto datate 2013 e le porzioni di territorio occupate dai ravaneti, ripериметrate anch'esse nel corso del presente progetto sulla base delle immagini delle ortofoto. Il documento indica lo stato di attività, il materiale prevalente e la granulometria dei ravaneti stessi così come riportato dal "Progetto marmi" realizzato dal personale del Centro di GeoTecnologie dell'Università di Siena (AAVV, 2007). L'allegato riporta anche l'indicazione puntuale dell'ubicazione delle cave, della loro tipologia (a cielo aperto o in sotterraneo) e lo stato di attività. La sigla con cui è stata denominata ogni cava è stata dedotta dagli elaborati del "Progetto marmi" e in alcuni casi aggiornata sulla base delle più recenti documentazioni (Figura 18).

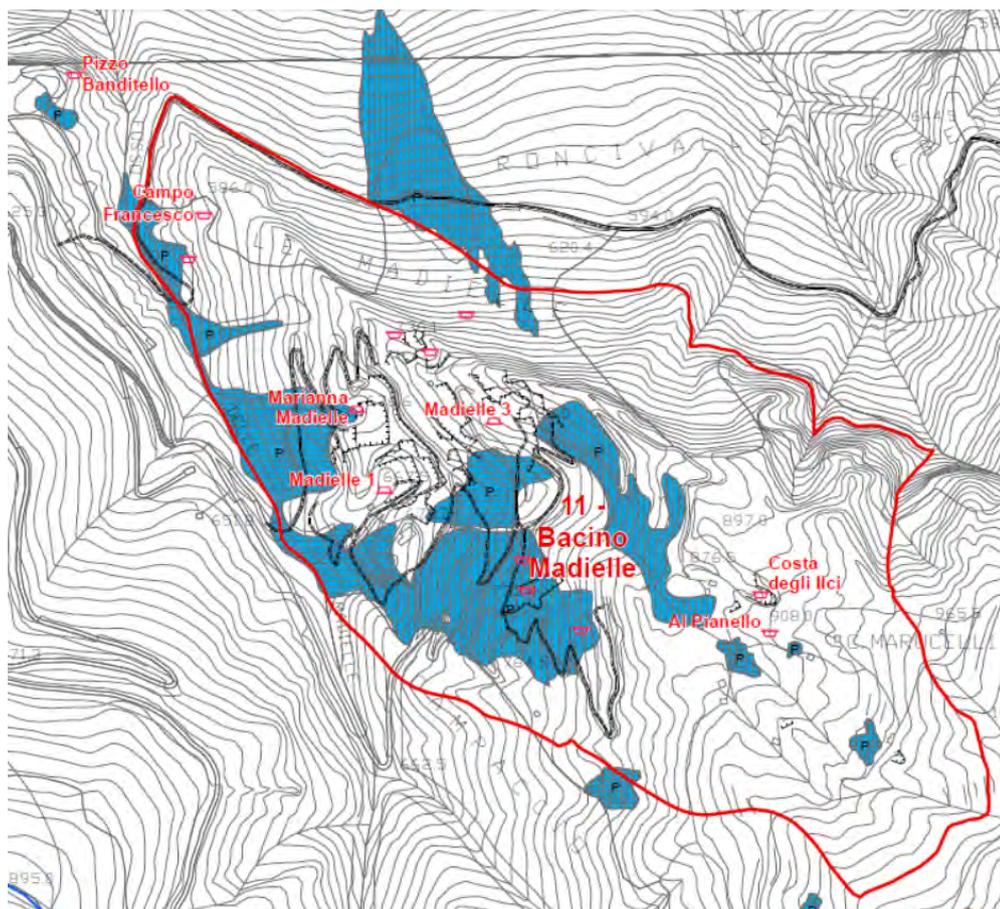


Figura 18 - Stralcio dell'allegato 2 relativo gli elementi delle attività estrattive del bacino delle Madielle nel Comune di Massa.

5.3. ALLEGATO 3 _ CARTA GEOMORFOLOGICA

La carta geomorfologica descrive tutti gli elementi caratteristici del paesaggio apuano modellato dall'azione della gravità, dall'attività glaciale, fluviale e dal carsismo (Figura 19).

Sono state evidenziate le forme di versante dovute alla gravità distinte in forme di accumulo e di denudazione. Le prime comprendono principalmente le varie tipologie di scarpate di frana e le relative aree di distacco. Le forme di accumulo e i relativi depositi comprendono le varie tipologie di frane, suddivise in attive, quiescenti, stabilizzate e relitte, ed anche le aree interessate da coni di detrito.

Forme e depositi fluviali dovuti al dilavamento sono state suddivise anch'esse in forme di erosione e di accumulo che comprendono rispettivamente: spartiacque, limite di bacino idrografico in evoluzione, orlo di scarpata di erosione fluviale o torrentizia, solco erosivo di ruscellamento concentrato, orlo di terrazzo recente e antico, ripiano d'erosione di origine fluviale, terrazzo orografico su substrato, superficie di terrazzo alluvionale, ripiano erosivo di origine fluviale, terrazzo orografico e conoide alluvionale e da debris flow.

Le forme di erosione carsica, diffuse in caso di substrato carbonatico, sono la dolina e l'ingresso delle grotte. Quest'ultimo tematismo puntuale è compreso anche nella carta idrogeologica.

Gi orli di circo sono le forme di erosione glaciale più diffuse soprattutto nei versanti settentrionali del massiccio, mentre le forme di deposito glaciale più frequenti sono le morene: Le più note e maggiormente estese sono ubicate in località Campocatino nel Comune di Vagli sotto.

La carta geomorfologica contiene anche forme e depositi relativi all'attività antropica connesse con l'escavazione e trasporto delle pietre ornamentali già evidenziate nei precedenti allegati: ubicazione delle cave, stato di attività estensione dei ravaneti.

Completano la carta geomorfologica i depositi quaternari: depositi di versante, depositi di falda o coni detritici, depositi di origine mista e depositi colluviali.

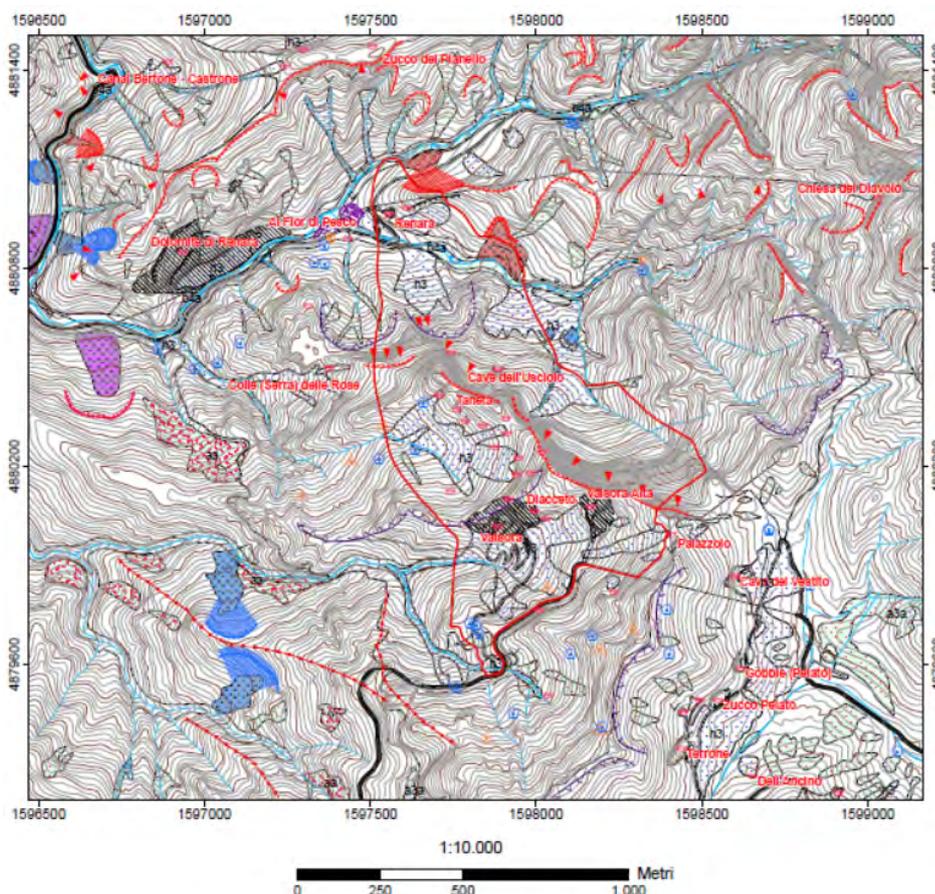


Figura 19 - Allegato 3 Esempio di Carta Geomorfologica relativa all'area contigua Valsora Giacceto nel Comune di Massa.

5.4. ALLEGATO 4 _ CARTA GEOLOGICA

Le formazioni presenti nella carta geologica sulla base della legenda adottata nel "Contium geologico della Regione Toscana" sono raggruppate in unità tettoniche, come in uso nella cartografia geologica delle catene a falde ed alcune di queste sono suddivise in membri e litofacies (Figura 20).

Le unità tettoniche presenti nel settore nord appenninico e nella zona apuana sono di seguito elencate a partire dall'unità geometricamente più bassa:

a) Unità tettoniche toscane metamorfiche:

- Unità Tettonica "Autoctono" *Auct.*, costituita da un Basamento paleozoico e relativa copertura mesozoica e terziaria, interessata da metamorfismo in facies degli scisti verdi;
- Unità Tettonica di Massa, anch'essa interessata da metamorfismo in facies degli scisti verdi e costituita da un Basamento paleozoico e da una copertura triassica;

b) Unità tettoniche toscane non metamorfiche:

- Unità Tettonica della Falda Toscana;

c) Unità tettoniche subliguri:

- Unità Tettonica di Canetolo;

d) Unità tettoniche liguri:

- Unità Tettonica di Ottono;
- Unità Tettonica di Monte Gottero;
- Unità Tettonica di Monte Antola.

Sono inoltre presenti nell'area apuana depositi post-orogenici del Bacino di Aulla-Olivola-Villafranca e depositi quaternari. Nella zona di pertinenza dei bacini marmiferi apuani non sono rappresentate le unità liguri e subliguri ubicate in posizione periferica rispetto allo sviluppo dei giacimenti rappresentati nelle due unità metamorfiche.

La carta geologica descrive la natura dei contatti fra le diverse formazioni geologiche e tra le differenti unità tettoniche (es: contatto stratigrafico, contatto tettonico, faglia, sovrascorrimento ecc.) e riporta le giaciture delle superfici di stratificazione e di scistosità delle due principali fasi deformative duttili (D1 e D2), le misure delle assi delle varie generazioni di pieghe e la lineazione di estensione e mineralogica.

La carta geologica mantiene le informazioni relative all'azione antropica collegata alle aree estrattive: ubicazione e tipologie di cava, orli di scarpate di cava, limite dell'area contigua.

Ulteriore informazione contenute nella carta geologica è l'orientazione delle tracce delle sezioni geologiche realizzate per l'estrapolazione del dato geologico in sottterraneo e la costruzione del modello tridimensionale del giacimento marmifero.

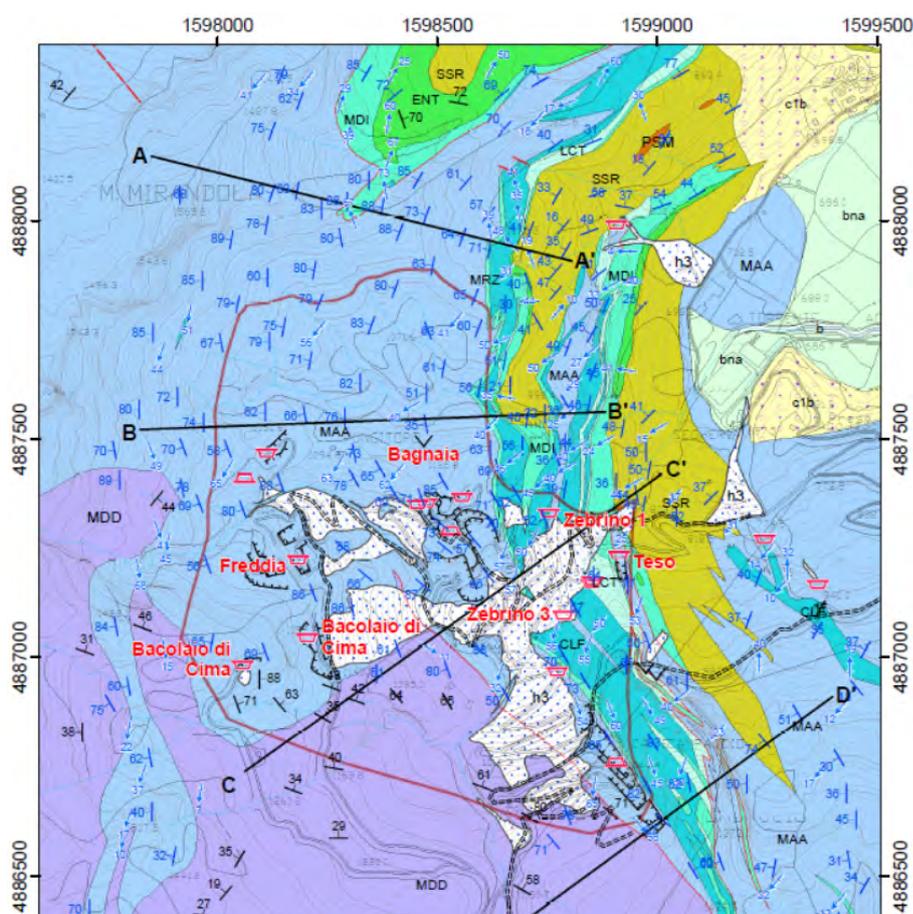


Figura 20 - Stralcio dell'Allegato 4: Carta geologica relativa all'area contigua della Carcaia nel Comune di Minucciano.

5.5. ALLEGATO 5 CARTA IDROGEOLOGICA

La carta idrogeologica dei bacini marmiferi prodotta alla scala 1:10000 illustra i corpi idrici sotterranei nell'intorno significativo di ciascuna area contigua di cava (Figura 21). In questa carta sono rappresentati gli elementi principali che caratterizzano l'assetto idrogeologico delle Alpi Apuane. Vengono mostrate le classi di permeabilità dei diversi corpi idrici sotterranei delle Alpi Apuane, basandosi su una classificazione che tiene conto sia del grado di permeabilità della roccia (5 classi di permeabilità), sia del tipo di permeabilità. I corpi idrici sotterranei sono classificati sia in classi di permeabilità: I - Permeabilità da bassa a molto bassa, II - Permeabilità medio-bassa, III - Permeabilità media, IV - Permeabilità medio-alta, V - Permeabilità Alta; sia in base al tipo litologico: complessi

carbonatici e non carbonatici. I complessi carbonatici sono caratterizzati da due tipologie di permeabilità: una permeabilità per fratturazione e/o carsismo e una permeabilità solo per fratturazione. I complessi carbonatici rientrano nella classi di permeabilità alta e medio alta. I complessi non carbonatici invece presentano una permeabilità da medio bassa a molto bassa, con una permeabilità solo per fratturazione.

La Carta Idrogeologica descrive altri tematismi importanti. Nello specifico sono riportate le ubicazioni dei seguenti elementi:

- sorgenti,
- pozzi,
- derivazioni,
- reticolo idrografico,
- opere e impianti relativi alla rete di distribuzione delle acque,
- limiti amministrativi,
- bacino idrografico,
- elementi idrostrutturali,
- fenomeni carsici puntuali,

In corrispondenza della formazioni carbonatiche e dolomitico-carbonatiche si riscontrano le aree a permeabilità elevata, classe IV e V, e al contempo si concentrano i principali fenomeni carsici (ingressi grotte, inghiottitoi ecc..).

Il tematismo corrispondente ai fenomeni carsici puntuali (ingressi di grotta), con relativa etichetta indicante il codice catastale, è aggiornato alle ultime scoperte e censimenti della FST (Federazione Speleologica Toscana) del 2017

(http://www.speleotoscana.it/programmi_php/catasto/menu_ric.php?x=109&y=18).

Le sorgenti d'acqua riportate in carta sono classificate in base a diversi gradini di portata e sono classificate in base alla tipologia in sorgenti captate, sorgenti libere e sorgenti di tipologia sconosciuta.

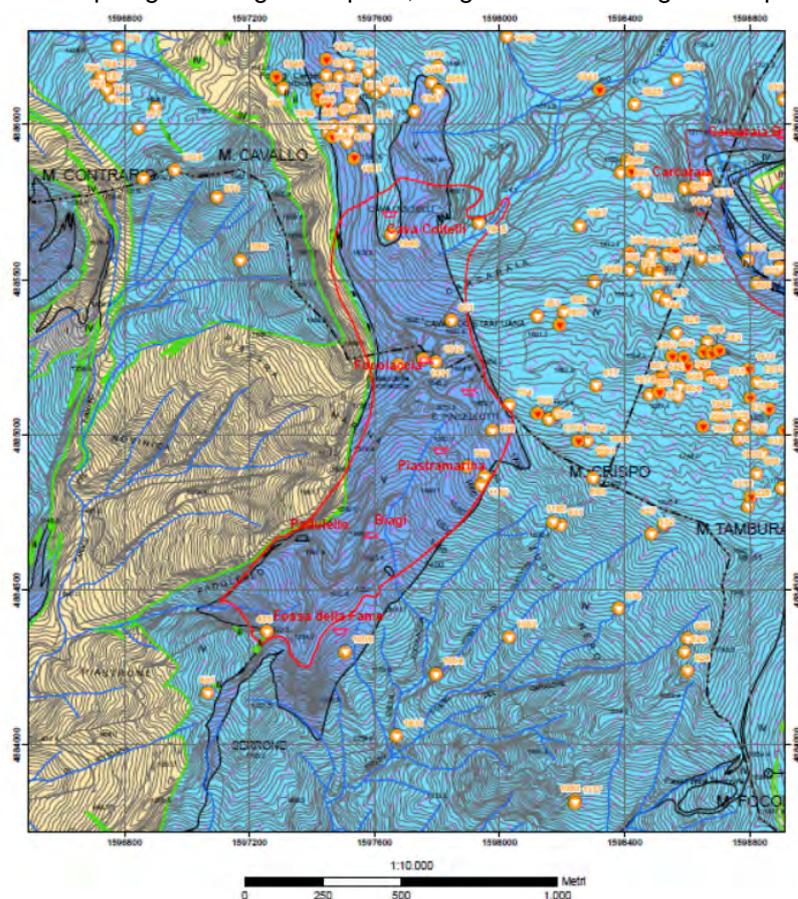


Figura 21 - Carta Idrogeologica relativa all'area contigua del Monte Cavallo (Comune di Massa e di Minucciano).

5.6. ALLEGATO 6 _ CARTA DELLE VARIETÀ MERCEOLOGICHE

La carta delle varietà merceologiche distingue all'interno della formazione marmifera, mantenendone quindi la base e il tetto, le differenti tipologie di marmo (Figura 22). Le varietà merceologiche sono state definite sulla base di quanto descritto nel capitolo 3.2. Complessivamente le tipologie di varietà merceologiche cartografate sono 14, suddivise, in base alle loro caratteristiche generali, in 5 gruppi: Marmi bianchi, Marmi grigi e venati, Marmi brecciati, Marmi cipollini e Marmi storici.

La carta contiene inoltre informazioni relative alla distribuzione areale dei ravaneti all'ubicazione e alla tipologia delle cave e all'ingombro delle aree contigue di cava.

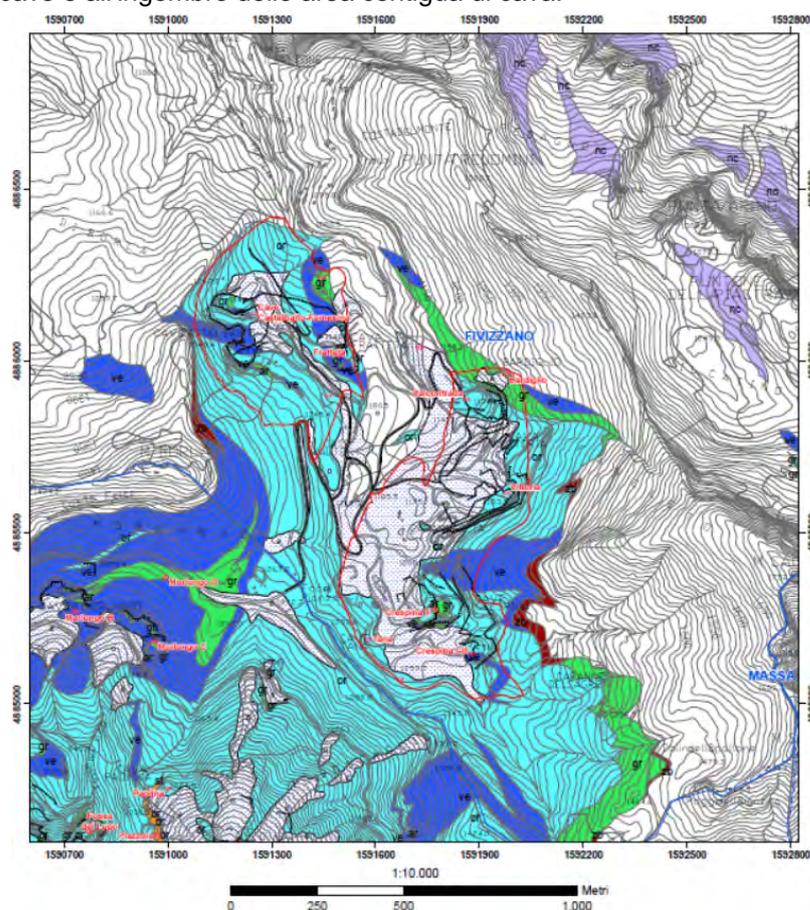


Figura 22 - Carta delle varietà merceologiche delle aree contigue Monte Sagro Morlungo e Monte Borla (Comune di Fivizzano)

5.7. ALLEGATO 7 _ ANALISI STRUTTURALE

Per ogni area contigua è stata condotta un'analisi statistica degli elementi strutturali disponibili al fine di realizzare sezioni geologiche seriate, opportunamente orientate, necessarie per la costruzione di un modello geologico tridimensionale dei giacimenti marmiferi compresi nelle aree contigue di cava e di un loro congruo intorno. Sono stati realizzati stereonet degli elementi strutturali rilevati e di quelli rappresentati nella cartografia pregressa (stratificazione, scistosità, lineazioni d'intersezione e lineazioni d'estensione) al fine di individuare domini omogenei dal punto di vista strutturale (Figura 23). All'interno di questi domini le geometrie plicative sono state assunte come cilindriche. Sono state quindi realizzate sezioni geologiche seriate proiettando gli elementi strutturali e i contatti geologici fino ad una profondità utile al fine della presente ricerca (Figura 24). Nell'effettuare l'analisi statistica è stato tenuto conto della natura polifasica della deformazione nel contesto metamorfico apuano. In particolare è stato tenuto conto delle deformazioni relative alla fase D2 che hanno generato strutture plicative di dimensioni tali da essere evidenti alla scala cartografica, come a esempio nella Valle di

Arni e nella Valle di Arnetola. In questi casi la proiezione degli elementi strutturali utilizzati per la costruzione delle sezioni geologiche è stata realizzata parallelamente alla direzione dell'asse medio di seconda fase (A2) ottenuto dall'analisi statistica mediante stereonet (cerchio π e media degli assi misurati). L'ubicazione in profondità delle cerniere delle strutture plicative di prima fase è da sempre considerata una difficoltà oggettiva per la realizzazione delle sezioni geologiche nelle Alpi Apuane. L'individuazione nelle sezioni geologiche delle zone di cerniera delle pieghe isoclinali (con tipica forma a "fiamma" nelle carte geologiche) è stata condotta tenendo conto dell'orientazione degli assi di prima fase nell'intorno della sezione geologica, della giacitura della direzione della lineazione di estensione locale e della giacitura degli assi di seconda fase eventualmente presenti nell'area.

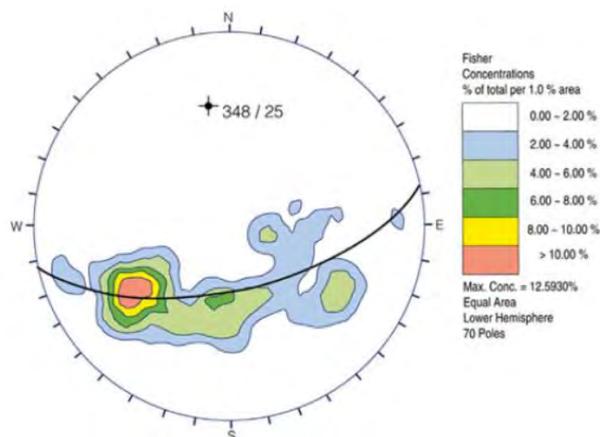


Figura 23 - Analisi statistica relativa alla dispersione della scistosità principale finalizzata all'individuazione dell'asse medio della struttura dell'antiforme del Monte Rasori presso la cava Romana (area contigua Fondone Cerignano) (da Vanneschi et alii., 2014).

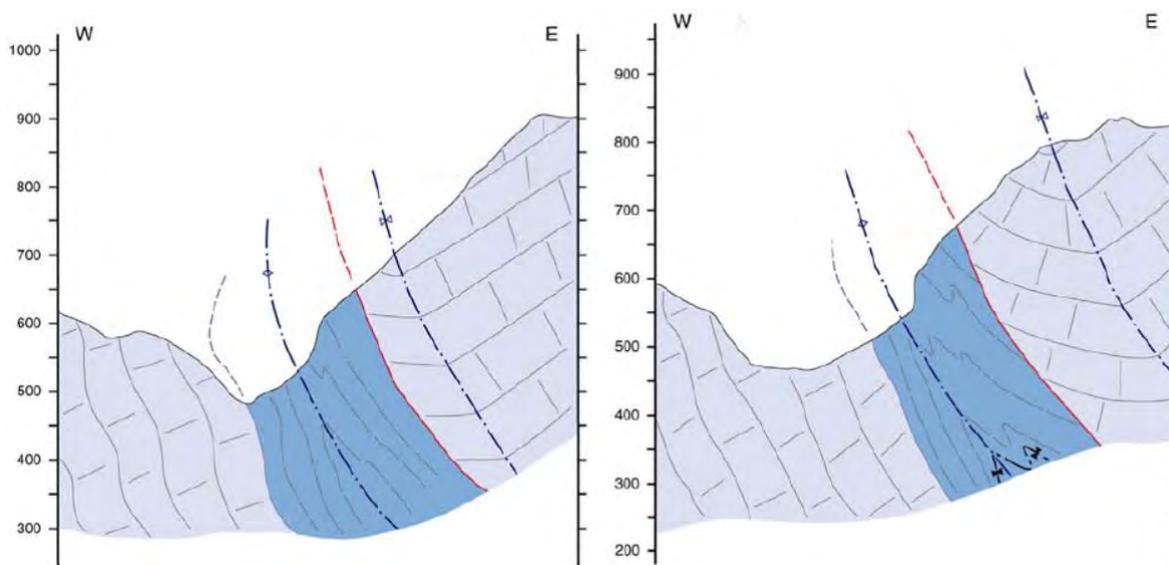


Figura 24 - Sezioni utilizzate per la ricostruzione geologica tridimensionale del giacimento di marmo relativo all'area contigua Fondone Cerignano nel Comune di Massa. (da Vanneschi et alii., 2014).

5.8. ALLEGATO 8 _ MODELLO ORTOFOTO

L'allegato mostra le immagini dell'ortofoto e dell'ortofoto con carta geologica sovrapposta di tutti bacini marmiferi di cui è stato realizzato il modello tridimensionale (Figura 25). Lo scopo del documento è quello di inquadrare nel contesto territoriale il bacino marmifero indagato e l'estensione in superficie della formazione marmifera. Il colore utilizzato per evidenziare le formazioni geologiche è coerente con l'allegato della Carta geologica. In posizione periferica dell'allegato sono mostrate alcune

visuali prospettive tridimensionali da diversi punti di vista del territorio con e senza carta geologica sovrapposta.



Figura 25 - Esempio dell'allegato 8 relativo al territorio del bacino marmifero denominato "Mossa" sulle pendici sud occidentali del Monte Altissimo presso il Comune di Seravezza.

5.9. ALLEGATO 9 _ MODELLO 3D MARMO

Il documento mostra alcune visuali prospettive da diversi punti di vista del modello tridimensionale della geologia dei vari bacini analizzati (Figura 26). In posizione centrale, in basso, nel modello viene indicato il bordo di colore rosso che delimita l'area contigua di cava. In posizione centrale, in alto, il modello geologico è ritagliato utilizzando la proiezione geodetica del limite dell'area contigua. Sono mostrate diverse viste del modello tridimensionale della risorsa e di un suo congruo intorno da diverse angolazioni, completo di tutte le formazioni geologiche, ed altre del solo volume della formazione oggetto di escavazione. La legenda associa ad ogni colore presente nel modello la formazione geologica corrispondente o l'accorpamento di più formazioni.

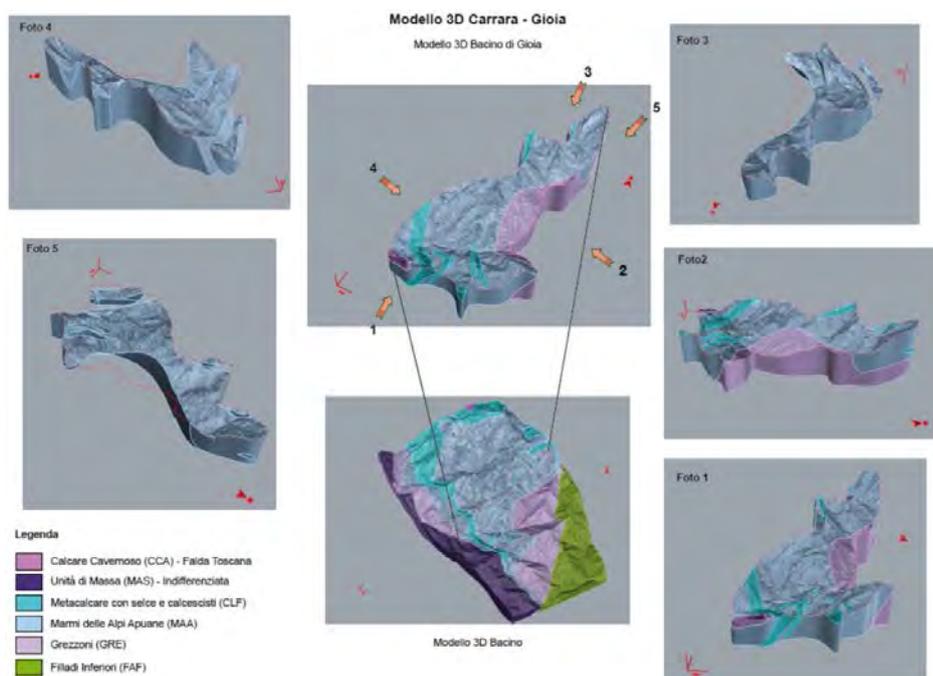


Figura 26 - Allegato 9 relativo al territorio del bacino marmifero di Gioia nei Comuni di Carrara e Massa.

5.10. ALLEGATO 10 _ TESTO ALLEGATI 1_9

L'allegato 10 consiste di un file di testo che riporta un breve commento a tutti i precedenti allegati cartografici e che ne sottolinea succintamente le peculiarità e i tratti essenziali. La terminologia utilizzata per la descrizione degli aspetti geologici, geomorfologici, idrogeologici e delle varietà merceologiche presuppone la lettura dei primi capitoli introduttivi della presente relazione finale.

5.11. MODELLO TRIDIMENSIONALE_FILE .3RDM

I modelli tridimensionali dei giacimenti marmiferi sono stati realizzati con software Rhinoceros (CAD 3D). Ogni modello è caratterizzato da volumi chiusi rappresentanti formazioni geologiche (in alcuni casi accorpate tra loro). Ogni volume è delimitato da una superficie basale, da quattro superfici laterali e dalla superficie topografica (Lidar) (Figura 34). La formazione marmifera è sempre presente ed è rappresentata con il colore celeste. Da tenere presente che in alcuni casi la formazione oggetto di escavazione non è la formazione marmifera, ma la formazione del Marmo cipollino, Rosso Rubino o delle Breccie di Seravezza.

La realizzazione del modello tridimensionale della risorsa prevede alcuni passaggi tecnici di seguito riassunti: i) costruzione della superficie topografica a partire dal dato Lidar; ii) importazione e digitalizzazione di sezioni geologiche seriate opportunamente orientate; iii) creazione delle superfici di contatto fra le varie formazioni; iv) costruzione della superficie di base e delle pareti laterali che delimitano il modello; v) chiusura del modello.

i) Realizzazione della superficie topografica:

Il dato di partenza per la costruzione della superficie topografica è costituito da un file di tipo testuale (.txt) contenente le coordinate x, y, z di riferimento. Tale file è creato a partire dal dato "Lidar" del terreno processato all'interno dell'applicativo ArcMap (Suite EsriArcGis). Il file testuale viene successivamente importato nel software Rhinoceros e processato mediante l'utilizzo del plug-in denominato "Landscape", al fine di ottenere un modello digitale del terreno costituito da curve NURBS (Non Uniform Rational Basis - Splines) (Figura 27, Figura 30).



Figura 27 - Esempio di modello digitale del terreno in area apuana costituito da curve NURBS (Non Uniform Rational Basis - Splines).

ii) Importazione delle sezioni geologiche seriate:

E' stato realizzato un numero congruo di sezioni geologiche seriate per ogni modello e sono state orientate in maniera ottimale come suggerito dall'analisi strutturale descritta nel paragrafo 5.7. Le sezioni georeferenziate vengono importate nel software Rhinoceros (Figura 28).

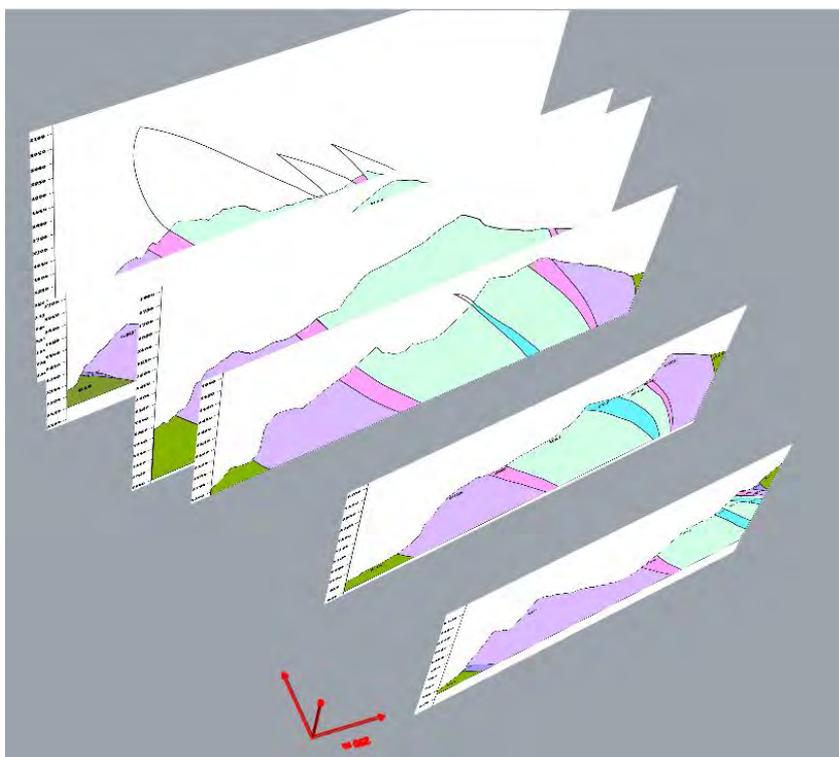


Figura 28 - Sezioni geologiche seriate utilizzate per la realizzazione del modello tridimensionale della geologia del Monte Corchia. La formazione marmifera è indicata di colore celeste chiaro.

iii) Creazione dei contatti e delle superfici geologiche:

Il passaggio successivo consiste nella digitalizzazione delle linee rappresentative dei contatti geologici rappresentati nelle sezioni. Successivamente il software mediante specifiche procedure costruisce le superfici di contatto fra le varie formazioni geologiche interpolando le linee corrispondenti nelle sezioni geologiche (Figura 29).

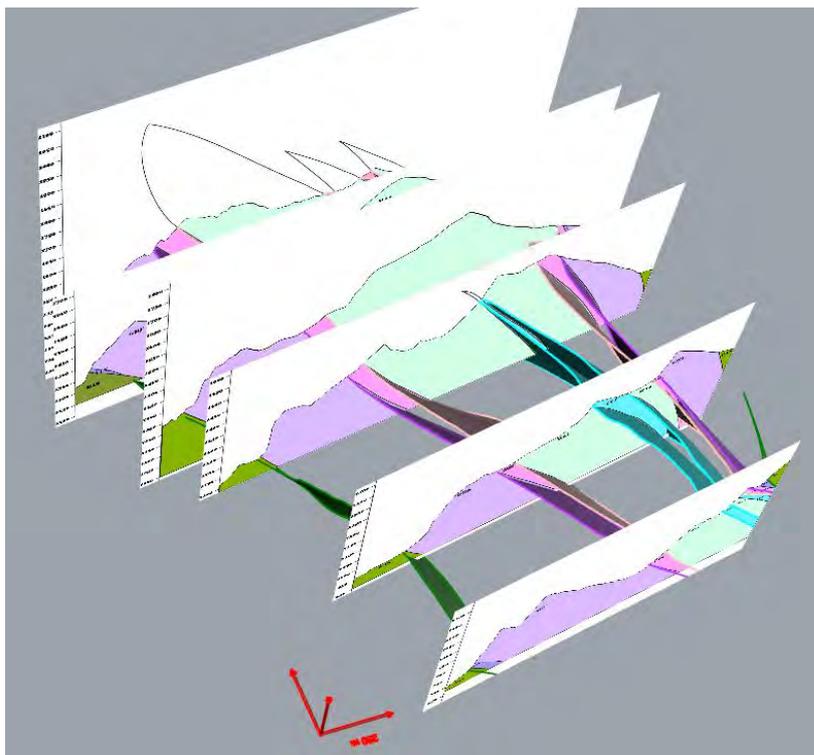


Figura 29 - Superfici di contatto fra le varie formazioni presenti nel Monte Corchia.

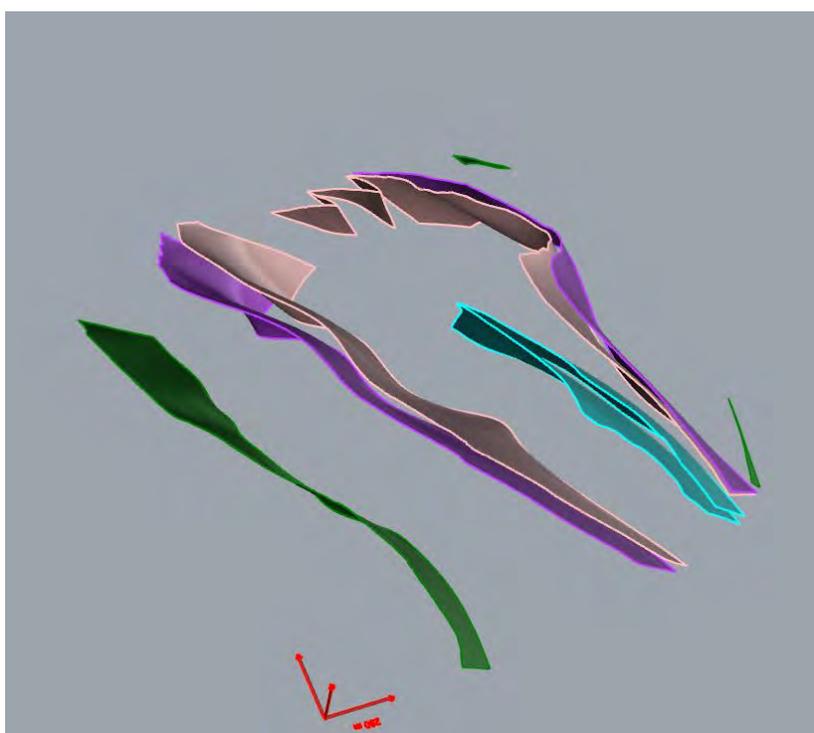


Figura 30 - Visualizzazione delle superfici di contatto tra le varie sezioni geologiche nel Monte Corchia. Nel fianco dritto della struttura Sinclinale del Monte Corchia è indicato in verde il tetto del basamento paleozoico, in viola il tetto della formazione dei Grezzoni, in rosa il tetto delle Breccie di Seravezza e Marmi a Megalodonti, in azzurro il tetto della formazione dei Marmi. Nel fianco rovesciato della Sinclinale i contatti sono ripetuti con ordine inverso.

iv) Realizzazione della superficie di base e delle pareti laterali del modello:

Al fine di creare dei volumi chiusi rappresentativi di ogni formazione geologica, ed in particolare della formazione marmifera, sono state inserite superfici per delimitare il modello alla sua base e lateralmente. La superficie di base può essere individuata da un piano orizzontale posto ad una certa

quota o da un piano inclinato o ancora da una superficie irregolare. La scelta della profondità a cui porre la superficie di base del modello è dettata essenzialmente dal grado di affidabilità delle proiezioni nel sottosuolo delle linee di contatto fra le formazioni geologiche nelle sezioni. Tale grado di affidabilità è variabile caso per caso, ed è determinato dalla complessità strutturale dell'area e dal numero e dalla distribuzione dei dati strutturali di superficie disponibili. La delimitazione laterale del modello è realizzata da piani verticali. L'ubicazione di tali piani è stata scelta in modo da generare un modello più ampio dell'area contigua di riferimento considerando anche un suo significativo intorno (Figura 31).

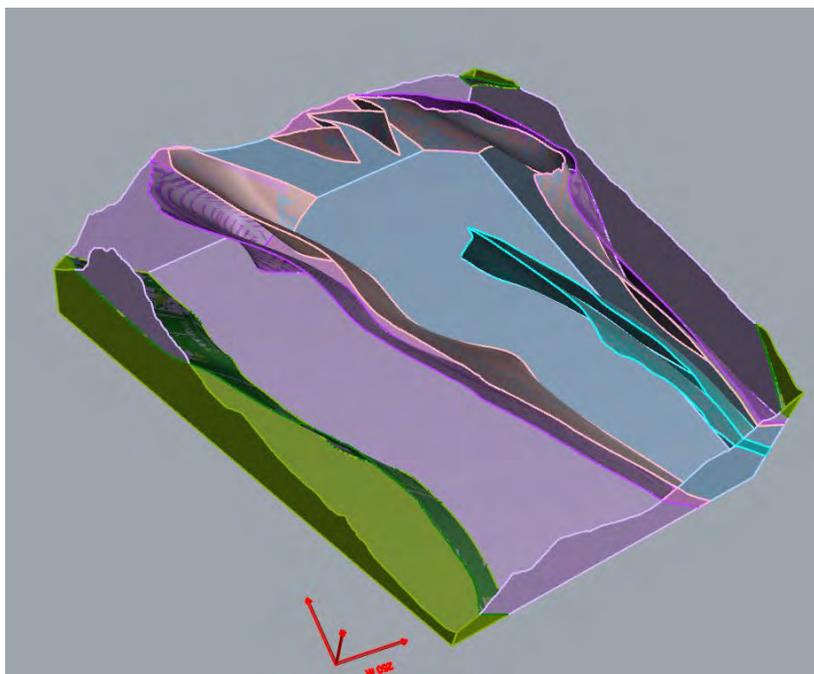


Figura 31 - Modello tridimensionale del Monte Corchia in cui sono state inserite quattro superfici laterali verticali ed una superficie di base piana inclinata.

v) Chiusura del modello

Il modello tridimensionale viene chiuso e i volumi delle formazioni geologiche vengono generati intersecando la superficie topografica precedentemente ottenuta (vedi punto i) con le superfici che delimitano le varie formazioni geologiche e i piani laterali del modello (Figura 32). E' stata prodotta anche una versione di ogni modello tridimensionale realizzato ottenuta estraendo il modello stesso con la superficie chiusa verticale contenente il limite dell'area contigua (Figura 33, Figura 34).

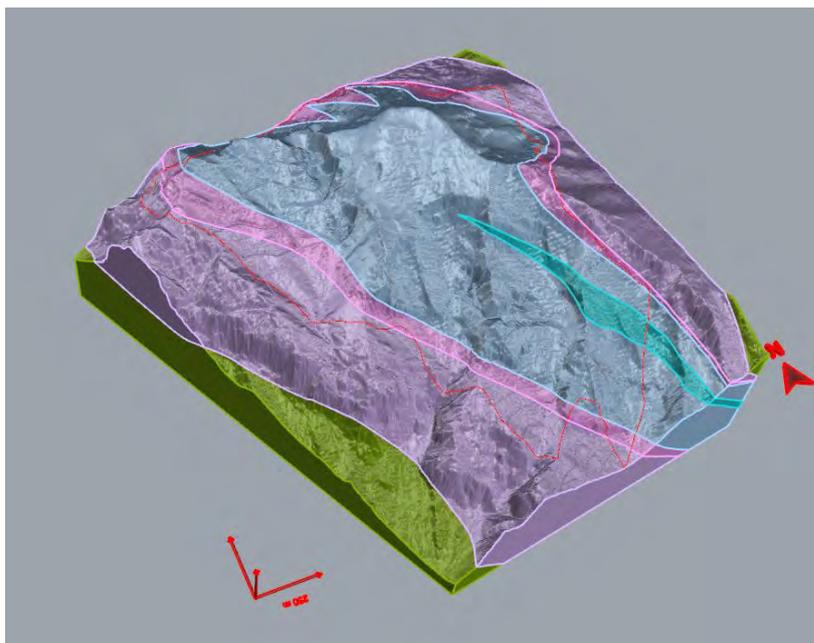


Figura 32 - Modello tridimensionale del Monte Corchia. In celeste chiaro è rappresentata la formazione marmifera. La linea rossa sottile mostra il limite dell'area contigua.

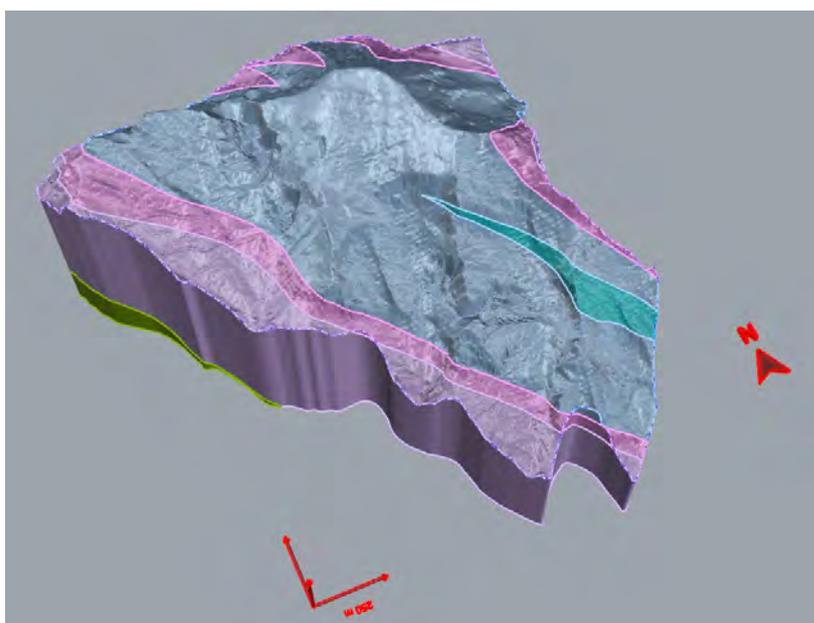


Figura 33 - Modello tridimensionale del Monte Corchia delimitato dalla proiezione verso il basso della superficie contenente il limite dell'area contigua.

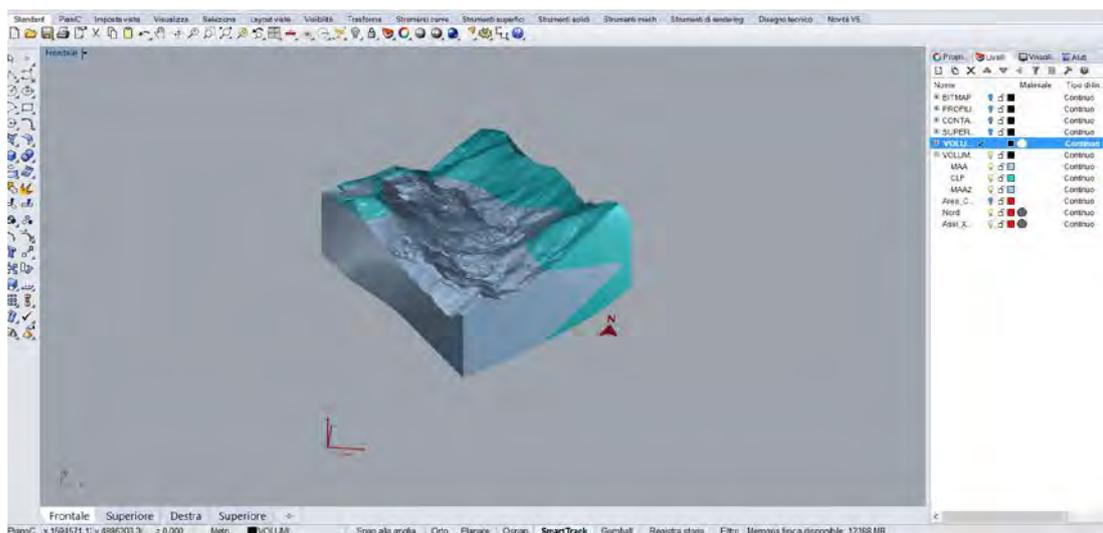


Figura 34 - Esempio di schermata da Rhinoceros™ 5.0. del modello tridimensionale dei Bacini di Monte Sagro Morlungo e Monte Borla. In celeste chiaro è rappresentata la formazione marmifera.

Ogni modello tridimensionale realizzato è suscettibile di essere sezionato secondo piani o superfici orientate a piacere nello spazio. Questa possibilità consente di ottenere anche sezioni del modello orizzontali piane, poste a qualsivoglia quota, finalizzate, ad esempio, alla misura di distanze fra il giacimento ed una porzione di roccia improduttiva.

Nel caso del bacino del Monte Corchia è stato costruito un modello tridimensionale della geologia dell'area introducendo anche lo sviluppo sotterraneo del sistema carsico denominato Antro del Corchia (Figura 35).

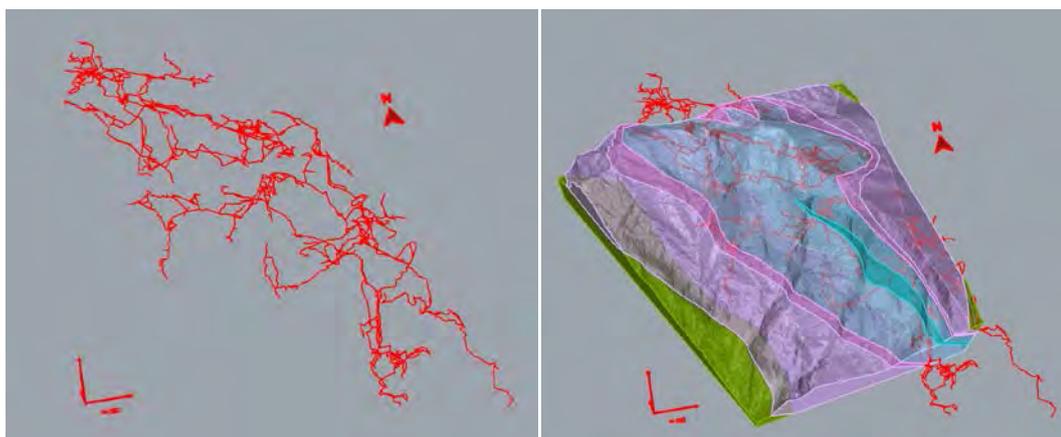


Figura 35 - A sinistra complesso carsico del Monte Corchia rappresentato in tre dimensioni. A destra modello geologico tridimensionale del Monte Corchia comprensivo dello sviluppo sotterraneo del sistema carsico. In azzurro è rappresentata la formazione marmifera.

Il sistema delle grotte che interessano il complesso carbonatico del Monte Corchia è stato acquisito dalla documentazione della Federazione Speleologica Toscana (www.speleotoscana.it. catasto online delle grotte toscane).

6. BANCA DATI GIS E SISTEMA INFORMATIVO GEOGRAFICO

6.1. INTRODUZIONE

Nell'ottica di realizzare un Sistema Informativo Geografico (Geographic Information System) che descriva in maniera dinamica il contesto ambientale in cui ricadono i bacini estrattivi oggetto del presente progetto, è stato realizzato un modello dati interrogabile in ambiente open source, in cui a

qualsiasi segmento di un'entità geografica rappresentata (puntuale, lineare, poligonale) corrisponde una tabella di attributi consultabile ed esportabile liberamente.

Per il raggiungimento di tale obiettivo, si è scelto di utilizzare QGIS (Quantum GIS), noto software open source con cui è possibile visionare, analizzare ed interrogare i dati raccolti ai fini dello studio e consultarne i dettagli a qualsiasi scala di visualizzazione.

A conclusione del lavoro vengono consegnati:

- Progetto realizzato in Quantum GIS, in formato open source *.qgs;
- Banca Dati con dati in formato ESRI shapefile *.shp (e ulteriori file *.dbf collegati);
- Librerie di simboli per la rappresentazione cartografica, nei formati *.qml e *.SLD;
- Legende in formato *.qrl (equivalente LYR);
- Metadati in formato *.xml per ciascun strato informativo;
- Dizionario dei dati, con descrizioni relative a campi, attributi e domini dei valori ammissibili;
- Allegati tecnici e tavole descrittive, in formato PDF, connessi ai dati vettoriali tramite hyperlinks.

6.2. DESCRIZIONE DEL LAVORO E DATI UTILIZZATI

Il lavoro svolto ha portato alla realizzazione di un progetto in formato *.qgs, georeferenziato in coordinate piane riferite al sistema di riferimento Gauss Boaga – Roma40 - Fuso Ovest (Monte Mario / Italy zone 1, EPSG:3003), che garantisce la visualizzazione dei seguenti inquadramenti tematici per ciascuna area di bacino:

- a) Carta degli Elementi Relativi alle Attività Estrattive;
- b) Carta Geomorfologica;
- c) Carta Geologica;
- d) Carta delle Varietà Merceologiche;
- e) Carta Idrogeologica.

I suddetti gruppi tematici trovano corrispondenza con i relativi allegati tecnici di consegna in scala 1:10.000 e in formato *.pdf, ai quali si può accedere anche in maniera immediata tramite appositi hyperlinks, che collegano ciascuna area di bacino alle relative cartografie tematiche.

Ogni tipologia di inquadramento raggruppa layer vettoriali, ai quali corrispondono tabelle di informazioni consultabili tramite le opportune funzioni di selezione e interrogazione rese disponibili dal software QGIS.

I dati utilizzati sono in formato ESRI Shapefile *.shp e presenti all'interno della specifica cartella di consegna. Di seguito, si elencano tutte le operazioni svolte connesse alla natura degli strati informativi (s.i.) prodotti:

- digitalizzazione e creazione di nuovi s.i. 2D e 3D tramite foto-interpretazione in ambiente ESRI ArcGIS 10.5 e ArcGIS Pro 2.0;
- integrazione di s.i. preesistenti con dati aggiuntivi derivanti da rilevamento in campo e/o da foto-interpretazione su software ESRI ArcGIS 10.5 e ArcGIS Pro 2.0;
- estrapolazione ed utilizzo di s.i. dal Servizio WMS GEOscopio fornito da Regione Toscana;
- utilizzo di s.i. derivanti da Banche Dati geografiche preesistenti in formato ESRI Geodatabase *.gdb; a tal proposito, si fa riferimento a Banca Dati del Continuum Geologico della Regione Toscana, Banca Dati Cave Alpi Apuane, Banca Dati per la gestione delle risorse idriche sotterranee delle Apuane (Geodb_CISS).

Nei casi in cui sia stato necessario attingere da geodatabase, le classi di oggetti spaziali di tipo Feature Class sono state trasformate in shapefile, mantenendo la geometria corrispondente. Le

tabelle rappresentanti classi di oggetti non spaziali, originariamente relazionate con opportune cardinalità alle classi di oggetti geometrici del Geodatabase, sono state accorpate nelle tabelle degli attributi di ogni shapefile. Tale operazione si è resa necessaria al fine di garantire la persistenza dei dati senza perdita alcuna di informazioni, facilitando al contempo la fruibilità del dato senza richiedere all'utente finale di ricostruire la struttura dati del geodatabase mediante gli strumenti degli applicativi GIS a propria disposizione, siano essi proprietari o open source, quali operatori di Join o Relates.

Dopo aver raccolto, selezionato e uniformato gli s.i. utili, si è proceduto alla loro vestizione ai fini di una rappresentazione cartografica quanto più chiara e corretta possibile; la simbologia scelta per le geometrie puntuali, lineari e poligonali, realizzata totalmente in QGIS, viene consegnata nei formati *.qml e *.SLD.

Ogni dato reca, inoltre, uno specifico file in formato *.XML contenente le metainformazioni compilate secondo specifiche ISO19139.

Si riporta in Allegato il Dizionario di dati recante la descrizione della strutturazione degli shapefile prodotti.

7. CONCLUSIONI

Il presente progetto d'indagine tridimensionale della risorsa marmifera del sottosuolo delle Alpi Apuane ha consentito un incremento delle conoscenze geologiche relative allo sviluppo delle geometrie della formazione marmifera e in generale delle formazioni oggetto di coltivazione come pietre ornamentali. La forma e lo sviluppo dei volumi di roccia in sotterraneo sono strettamente legati alla dinamica dell'evoluzione tettonica del massiccio apuano dal Miocene inferiore/medio durante le fasi di orogenesi dell'Appennino settentrionale. Per la prima volta sono stati generati modelli tridimensionali vettoriali con topografia di precisione (LIDAR) delle strutture geologiche in cui sono coinvolti i volumi delle pietre ornamentali. I modelli sono stati realizzati nelle aree interessate dalle aree contigue di cava e in un loro intorno e nel bacino marmifero di Carrara. Alcuni modelli tridimensionali comprendono più aree contigue ed altri, come per esempio nella zona di Carrara, sono stati suddivisi in più modelli a causa della pesantezza del dato informatico in termini di Gigabyte.

I modelli tridimensionali sono stati realizzati sulla base delle carte geologiche del continuum della Regione Toscana, con aggiornamenti mirati nel corso del presente progetto in alcune aree specifiche. La documentazione geologica relativa al continuum geologico nell'area apuana deriva da rilievi di campagna realizzati da borsisti, dottorandi, ricercatori e docenti dell'Università degli Studi di Siena sotto la direzione del Prof. Luigi Carmignani. In alcune d'interesse di particolare complessità sono stati eseguiti rilevamenti mirati con ausilio di supporto informatico hardware e software (tablet) per la geolocalizzazione dei dati strutturali acquisiti durante il rilevamento.

A corredo del dato geologico di superficie illustrato nella carta geologica sono state realizzate altre carte tematiche di seguito elencate:

- Inquadramento del territorio mediante ortofoto a colori;
- Carta degli elementi relativi alle attività estrattive;
- Carta geomorfologica;
- Carta idrogeologica;
- Carta idrogeologica;
- Carta delle varietà merceologiche;
- Modello 3D ortofoto;
- Modello 3D marmi.

A conclusione del lavoro sono state prodotte schede denominate "Vincoli_Analisi di bacino" contenenti l'analisi di tutti i vincoli di vario genere e provenienza (definiti nelle schede di bacino del PIT) incrociato con la disponibilità in superficie della risorsa lapidea. Il documento contiene alcune considerazioni di massima relative al potenziale sviluppo del bacino nel rispetto dei vincoli espresso in

termini di metri quadrati di risorsa lapidea disponibile. Il dato così ottenuto se moltiplicato per lo spessore del giacimento, in prima approssimazione, fornisce una valutazione dei volumi di materiale ornamentale presente in ogni bacino che generalmente si attesta su valori di alcuni milioni di chilometri cubi. Tale numero esprime il volume di marmo disponibile del sottosuolo, senza tenere conto della fratturazione che lo caratterizza, della presenza di cavità carsiche ed infine della presenza di difetti comuni a giacimenti di pietre ornamentali.

Presidente
Centro di GeoTecnologie
Prof. Paolo Conti

8. BIBLIOGRAFIA

AA.VV. (2007) – Carta giacimentologica dei marmi delle Alpi Apuane a scala 1:10.000 e sua informatizzazione. Centro di GeoTecnologie - Università degli Studi di Siena, Regione Toscana.

Braschi S., Del Freato P. & Trevisan L. (1986) - Ricostruzione degli antichi ghiacciai sulle Alpi Apuane. *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie, Serie A*, 93: 203–219.

Bonatti S. (1938) - Studio Petrografico delle Alpi Apuane, *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia*, vol. 26. Regio Ufficio Geologico d'Italia, Roma, 116 pp.

Carmignani L. (1985) - Carta Geologico-Strutturale del Complesso Metamorfico delle Alpi Apuane, Foglio Nord. Scala 1:25.000, Litografia Artistica Cartografica (LAC), Firenze.

Carmignani L. & Kligfield R., (1990) – Crustal extension in the Northern Apennines: the transition from compression to extension in the AlpiApuane core complex. *Tectonics*, vol. 9, No. 6, pp. 1275 – 1303.

Carmignani L., Fantozzi P. L., Giglia G. & Meccheri M. (1993) – Pieghe associate alla distensione duttile del Complesso Metamorfico Apuano. *Boll. Soc. Geol. It.* 49, "Scritti in onore di Livio Trevisan".

Carmignani L., Conti P., Fantozzi P. L., Mancini S., Massa G., Molli G., Vaselli L., (2007) – I marmi delle Alpi Apuane (Toscana settentrionale). *Geoitalia*, n°21, Novembre 2007.

Conti P., Carmignani L., Massa G., Meccheri M., Patacca E., Scandone P. & Pieruccioni D. in stampa - Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 "Foglio 249 - Massa Carrara". Servizio Geologico d'Italia, Roma, 144 pp.

Federici P.R. (1979) - Una ipotesi di cronologia glaciale wurmiana nell'Appennino Centrale. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 2: 196–202.

Federici P.R. (1981b) - The Quaternary glaciation on the seaward side of the Apuan Alps. *Rivista Geografica Italiana*, 88 (2): 183–199.

Federici P.R. (2005a) - Appunti per la storia della scoperta della glaciazione quaternaria nell'Appennino settentrionale. *Memorie dell'Accademia Lunigianese di Scienze "G. Capellini"*, 75: 69–75.

Federici P.R. (2005b) - Aspetti e problemi della glaciazione Pleistocenica nelle Alpi Apuane. In: *Atti del Convegno "Le grotte raccontano: un milione di anni di storia naturale conservato nei sistemi carsici delle Alpi Apuane"*, *Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, Serie II*, vol. 18, pp. 19–32. Italiano di Speleologia.

Fellin M. G., Reiners P. W., Brandon M. T., Wuthrich E., Balestrieri M. L., Molli G., (2007) – Thermochronologic evidence for the exhumational history of the AlpiApuane metamorphic core complex, Northern Apennines, Italy. *Tectonics*, Vol. 26, pp. 6015 – 6036.

Franceschelli M., Puxeddu M. & Gattiglio M. (2003) - Geochemistry and origin of chloritoid schist from the Alpi Apuane, Italy: evidence of a prevailing lateritic signature. *European Journal of Mineralogy*, 15 (3): 575–588.

Giglia G. (1967) - Geologia dell'alta Versilia settentrionale (Tav. M. Altissimo). *Mem. della Soc. Geol. It.*, 6: 67–95.

Giglia G. & Trevisan L. (1966) - Genesi e significato paleogeografico delle brecce tra Grezzoni e Marmi delle Alpi Apuane. *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie, Serie A*, 73 (2): 503–517.

Kligfield R., Hunziker J., Dallmeyer R.D., Schamel S., (1986) – Dating of deformation phases using K-Ar and ⁴⁰Ar/³⁹Ar techniques: results from the Northern Apennine. *Journal of Structural Geology*, Vol. 8, No. 7, pp. 781 – 798.

Mancini S. (2005) – Note geologiche su due marmi rari del Carrarese: il Nero di Colonnata e il Rosso di Castelpoggio. *Acta Apuana*, IV - V pp. 79 – 83.

Molli G. & Meccheri M., (2000) – Geometrie di deformazione nell'alta valle di Colonnata: un esempio di strutturazione polifasica e composita nelle Alpi Apuane. *Boll. Soc. Geol. It.*, Vol. 119, pp. 379 – 394.

Molli G., Giorgetti G., Meccheri M., (2002) - Tectono-metamorphic evolution of the Alpi Apuane Metamorphic Complex: new data and constraints for geodynamic models. *Boll. Soc. Geol. It. Vol. Spec. 1*, pp. 789 – 900.

Piccini, L. (1994). "Caratteri morfologici ed evoluzione dei fenomeni carsici profondi nelle Alpi Apuane (Toscana, Italia)." *Natura Bresciana, Ann. Mus. Civ. Sc. Nat., Brescia v. 30*, 1996: 48-85.

Piccini L. (1998) - Evolution of karst in the Alpi Apuane (Italy): Relationships with the morphotectonic history. *Suppl. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 3 (4): 21–31.

Piccini L. (2005) - Morfologia ed evoluzione dei sistemi carsici delle Alpi Apuane. In: *Atti del Convegno "Le grotte raccontano: un milione di anni di storia naturale conservato nei sistemi carsici delle Alpi Apuane"*, pp. 33–54. *Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, serie II, vol. XVIII*, Castelnuovo Garfagnana (LU)- 11/12 dicembre 2004.

Piccini L. (2011) - Speleogenesis in highly geodynamic contexts: the quaternary evolution of Monte Corchia multi-level karst system (Alpi Apuane, Italy). *Geomorphology*, 134 (1): 49–61.

C. Vanneschi, R. Salvini, G. Massa, S. Riccucci & A. Borsani (2014) - Geological 3D modeling for excavation activity in a underground marble quarry in the Apuan Alps (Italy) - *Computers & Geosciences* 69, pp 41–54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2014.04.009>