

AperTO - Archivio Istituzionale Open Access dell'Università di Torino

Analisi archeometrica dell'Arco di Susa

This is the author's manuscript

Original Citation:

Availability:

This version is available <http://hdl.handle.net/2318/1539529> since 2016-06-12T17:38:29Z

Terms of use:

Open Access

Anyone can freely access the full text of works made available as "Open Access". Works made available under a Creative Commons license can be used according to the terms and conditions of said license. Use of all other works requires consent of the right holder (author or publisher) if not exempted from copyright protection by the applicable law.

(Article begins on next page)



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO

This is an author version of the contribution published on:

Questa è la versione dell'autore dell'opera:

M. ACETO, A. AGOSTONI, A. BORGHI, A. AGOSTINO (2015) Analisi archeometrica dell'Arco di Susa. Segusium, LII, 185-215

The definitive version is available at:

La versione definitiva è disponibile alla URL:

http://www.segusium.org/index.php?option=com_content&view=article&id=114:pubblicata-la-monografia-sullarco-di-susa&catid=21:eventi&Itemid=62

**Maurizio Aceto, Alberto Agostoni,
Alessandro Borghi, Angelo Agostino^(*)**

Analisi archeometrica dell'Arco di Susa^()**

L'analisi complessiva dei materiali impiegati per la realizzazione dell'arco di Augusto a Susa e per la decorazione delle superfici del monumento non può che abbracciare differenti discipline e professionalità operanti nel settore dell'archeometria: per ogni materiale, pitture, pietre ornamentali, metalli, la scienza può offrire delle risposte ai quesiti specifici legati all'aspetto originario, alla provenienza degli elementi costitutivi, alla tecnologia impiegata per la realizzazione.

La ricerca e caratterizzazione di eventuali tracce di colore, che avrebbero potuto in antichità decorare il monumento, sono state svolte sia direttamente sull'arco, sia su campioni analizzati presso i laboratori di chimica del Dipartimento di Scienze e Innovazione Tecnologica dell'Università del Piemonte Orientale in Alessandria.

Lo studio di provenienza del marmo impiegato per la realizzazione della struttura ha coinvolto il laboratorio del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Torino, comprendendo non solo le analisi petrografiche su campioni, ma anche sopralluoghi nei siti estrattivi di marmo bianco nei pressi di Susa.

(*) Maurizio Aceto, Università del Piemonte Orientale, Dipartimento di Scienze e Innovazione tecnologica; Alberto Agostoni, Ricercatore indipendente; Alessandro Borghi, Università degli Studi di Torino, Dipartimento di Scienze della Terra; Angelo Agostino, Università degli Studi di Torino, Dipartimento di Chimica

(**) Progetto realizzato grazie al contributo e al coordinamento della società Segusium, sotto la supervisione della Soprintendenza Archeologica del Piemonte. Un ringraziamento particolare è rivolto al direttore di Segusium, Piero Del Vecchio.

Infine, durante le ricerche di tracce di colore, ci si è imbattuti in una graffa metallica (impiegata per tenere uniti i blocchi marmorei) ancora *in situ*; per comprendere la lega metallica impiegata per la sua realizzazione si è fatto ricorso alle analisi tramite XRF portatile, svolte dal Dipartimento di Chimica dell'Università di Torino.

Individuazione e caratterizzazione delle tracce di colore

La genesi dello studio

In uno studio del 2010⁽¹⁾ Dario Vota suggerisce la possibilità che l'arco di Augusto a Susa potesse essere anticamente colorato, sottolineando come le campiture di colore possano influenzare il significato artistico e come la ricerca delle eventuali tracce ancora presenti sulla superficie abbia condotto in celebri studi a una rilettura dell'opera; vi sono anche casi celebri risalenti all'epoca augustea, come l'*Ara Pacis* e l'Augusto di Prima Porta.

La quantità e l'intensità delle policromie della statuaria antica sono tutt'oggi argomento di discussione nella comunità scientifica, con la formazione spesso di fazioni irrigidite sulle proprie posizioni e che hanno spesso una visione estetizzante e tradizionale dell'arte antica, che fatica ad accettare e a favorire gli studi sui colori di statue e monumenti dell'antichità⁽²⁾.

Il prelievo

Allo scopo di individuare le aree potenzialmente di interesse per le ricerche di eventuali tracce di colore, è stata osservata macroscopicamente la superficie dell'arco facendo anche ricorso alle principali tecniche generalmente impiegate nella fase di ricerca: la spettroscopia Ultravioletta e le osservazioni in luce radente⁽³⁾. Le indagini sono state svolte servendosi di un cestello per raggiungere le parti più alte del monumento.

Durante il primo sopralluogo l'individuazione delle aree di interesse è stata svolta ricorrendo anche ad osservazioni in luce radente (fig. 1) e in luce Ultravioletta; le tecniche non hanno però permesso di evidenziare né strati in rilievo riconducibili a superfici pittoriche, né aree con fluorescenza ultravioletta anomala rispetto al marmo, alla sua patina o ai restauri (fig. 2). Occorre comunque considerare che il sopralluogo è stato svolto in condizioni piuttosto difficoltose, in buona parte su un cestello da cui non era ovviamente spesso possibile avvicinarsi a sufficienza alla superficie del monumento.

(1) D. VOTA, *Duemila anni fa in Valle di Susa. Il tempo dei Cozii*, Borgone Susa 2010, pp. 35-39.

(2) *I colori del bianco. Policromia nella scultura antica*, F. Buranelli (a cura di), Città del Vaticano 2004, pp. 29-33.

(3) *Ivi*, pp. 35-40.



Fig. 1. Particolare del fregio in luce radente.



Fig. 2. Particolare del fregio sotto luce UV, le parti dalla fluorescenza giallo acceso sono riconducibili ai prodotti organici impiegati durante il restauro del 1989.



Fig. 3. Fotografia scattata sul lato Est per indicare il punto di campionamento durante la campagna di prelievo effettuata con il cestello. Si notano superfici di diverso colore, dal giallo bruno, al grigio, al rosato (come il punto indicato).



Fig. 4. Macrofotografia in cui si osservano strati di colore grigio e rosso presenti al di sopra di uno strato bianco, dall'interno del fornice.

Le aree in cui si è scelto di concentrare le ricerche sono state le seguenti:

- le superfici non interessate dai restauri del 1989, che riguardarono in particolare il fregio e i capitelli superiori (comunque indagati per rigore)⁽⁴⁾;
- le evidenti aree di colore giallo ocre, rosso ocre e rosato, allo scopo di discernere se si tratta di degrado del marmo o di pitture (fig. 3);
- tracce di colore osservabili su superfici bianche, in quanto potrebbe trattarsi potenzialmente di uno strato pittorico e della preparazione (fig. 4);
- strati di colore, per discriminare se si tratta di strati antichi o moderni o atti vandalici;

(4) L. BRECCAROLI, *Susa. Restauro dell'arco di Augusto*, in «Quaderni della Soprintendenza Archeologica del Piemonte» n. 10 (1991), pp. 183-185.



Fig. 5. La nicchia sul lato Est che presenta linee tracciate di colore giallo, blu e nero. Tutti gli strati di colore si trovano non direttamente sul marmo, bensì su una stesura di malta, spesso presente all'interno delle nicchie.

- le nicchie, in particolare una nicchia sul lato Est, la quale presenta tracce di colore nero, ocra e blu (fig. 5).

Sono stati prelevati in tutto 51 campioni provenienti dalla superficie dell'arco, che sono stati analizzati nei laboratori del Dipartimento di Scienze e Innovazione Tecnologica dell'Università del Piemonte Orientale in Alessandria.

Le analisi

Per quanto riguarda le analisi volte a caratterizzare i campioni prelevati, si è fatto ricorso a osservazioni con stereomicroscopio, spettroscopia micro-Raman e spettroscopia infrarossa in trasformata di Fourier (FT-IR).

La tecnica micro-Raman è stata impiegata, come le osservazioni con stereomicroscopio (fig. 6), su tutti i 51 campioni e ha permesso, grazie all'impiego del microscopio accoppiato allo spettroscopio, di osservare da vicino le particelle che conferiscono il colore all'area campionata (fig. 7); in questo modo è stato possibile selezionare per ogni campione alcune aree in cui effettuare le analisi puntuali con la spettroscopia Raman; i risultati sono stati confrontati

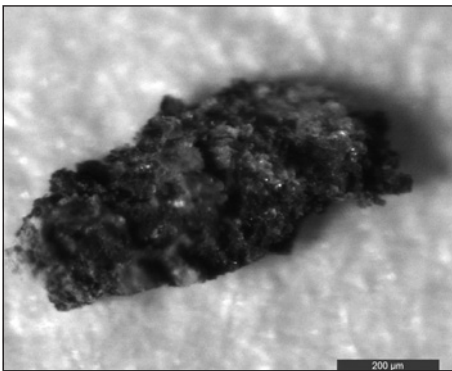


Fig. 6. Particella verde prelevata osservata allo stereomicroscopio.

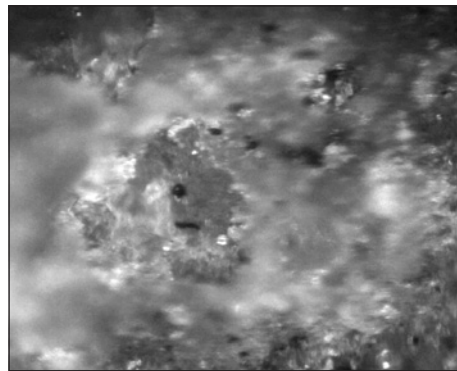


Fig. 7. Particella rossa osservabile in uno dei campioni al microscopio accoppiato allo spettroscopio Raman.

con i riferimenti riscontrabili in bibliografia⁽⁵⁾.

Sui campioni in cui l'analisi effettuata non ha permesso di avere un risultato utile per riconoscere in modo univoco il composto, sono state effettuate le misure FT-IR, dopo aver preparato il campione ottenendo pastiglie di bromuro di Potassio. Lo stesso è stato svolto per i campioni che presentano sostanze come l'ematite, ovvero riconducibili sia a pigmenti sia a ossidazioni del Ferro (naturalmente presente nel marmo); per comprendere l'origine di queste particelle si è ricorso alle analisi FT-IR, in grado di fornire informazioni sulla presenza di un eventuale legante da associarsi a strati di colore⁽⁶⁾.

I risultati

Sono stati riconosciuti numerosi minerali presenti nel marmo o nelle patine di degrado, già individuati in altri studi⁽⁷⁾, in particolare: dolomite, calcite, rutilo, weddellite, magnetite, quarzo, ematite. Le analisi con FT-IR svolte sui campioni contenenti ematite non presentano leganti organici ma il minerale risulta immerso nei carbonati che compongono il marmo (grafico 1). E' stata inoltre riscontrata la presenza di glushinskite (grafico 2), un ossalato di magnesio, riconducibile al degrado della dolomite. Ne desumiamo che le aree di colore giallo ocra, rosso ocra e rosate che si osservano su un'ampia superficie del monumento, debbano la loro colorazione all'ossidazione del ferro naturalmente contenuto nel marmo e non a tracce di pittura.

La stesura bianca nel fornice, sulla quale sono state fatte altre stesure, è in gesso (grafico 3). Quanto agli strati più superficiali, si tratta di ematite stesa in legante inorganico. Il gesso nel fornice potrebbe essere uno strato di preparazione agli strati rossi e grigi stesi su un intonaco fresco oppure una stesura volta a cancellare delle scritte che oggi si possono ancora osservare con difficoltà.

Alcuni campioni presentano grani in blu di ftalocianina (grafico 4), giallo Hansa e altri pigmenti del Novecento, riconducibili ad atti vandalici.

In una nicchia (le nicchie erano già presenti nella raffigurazione dell'arco di Susa all'interno del *Theatrum Sabaudiae* nel 1682) sul lato Est sono state trovate tracce di colore: ocra, blu e nere. I colori blu e nero sono risultati particolarmente interessanti: nel caso del nero si tratta di grafite (grafico 5), in quello

(5) I. M. BELL, R. J. H. CLARK, P. J. GIBBS, *Raman spectroscopic library of natural and synthetic pigments (pre - 1850 AD)*, in «Spectrochimica Acta Part A: molecular and biomolecular spectroscopy» n. 53 (1997), pp. 2159-2179. Il database è visitabile sul sito internet: www.ruff.info.

(6) M. R. DERRICK *et Alii.*, *Infrared spectroscopy in conservation science*, Los Angeles 1999. A. G. IMMA, *Applicazioni della spettrofotometria IR allo studio dei beni culturali*, Padova 2001.

(7) G. CHIARI, L. FIORA, R. COMPAGNONI, *Studio dell'alterazione della pietra dell'arco di Augusto a Susa (Piemonte, Italia)*, in *Le pietre nell'architettura. Struttura e superfici*, Atti del Convegno di studi (Bressanone 25-28 giugno 1991), G. Biscontin, D. Mietto (a cura di), Padova 1991, pp. 347-353.

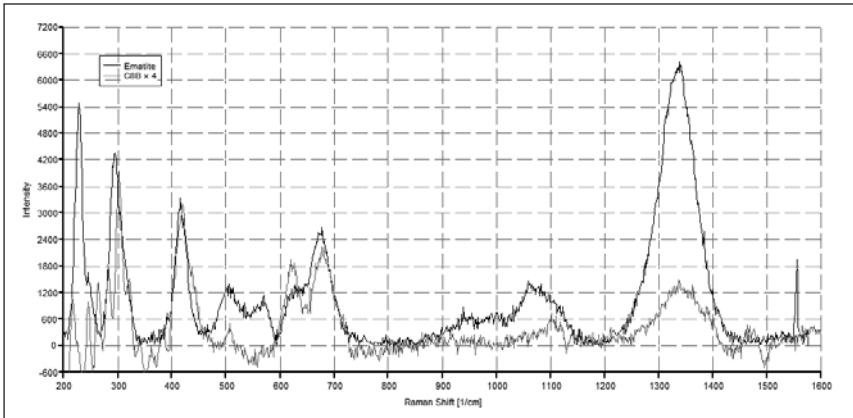
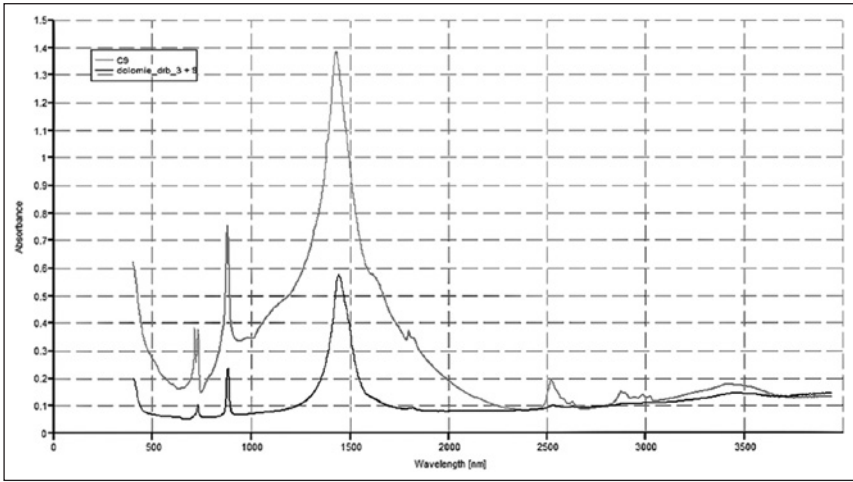
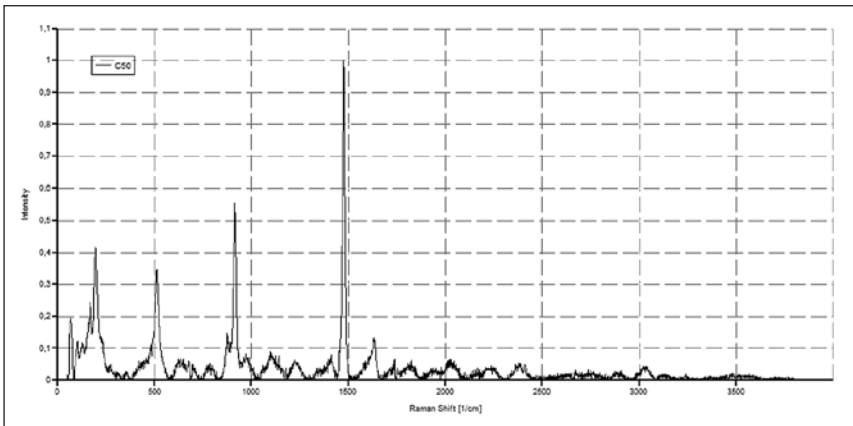


Grafico 1. Confronto tra lo spettro FT-IR del campione C9 (in alto) e la dolomite (in basso).



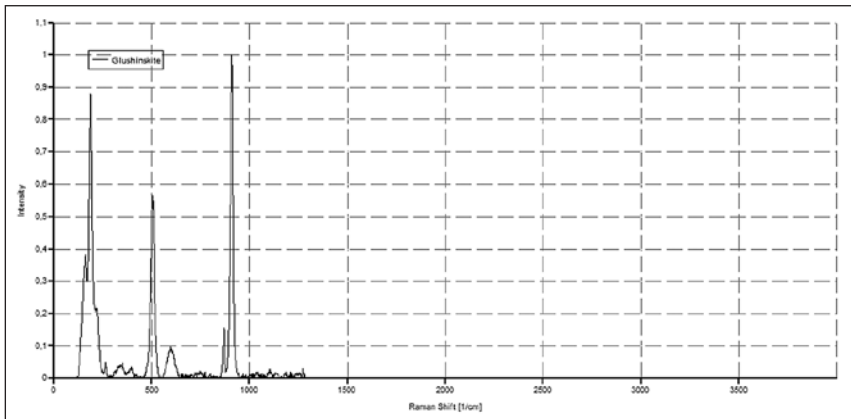


Grafico 2. Confronto tra gli spettri Raman del campione C50 (in alto) e della Glushinskite (in basso).

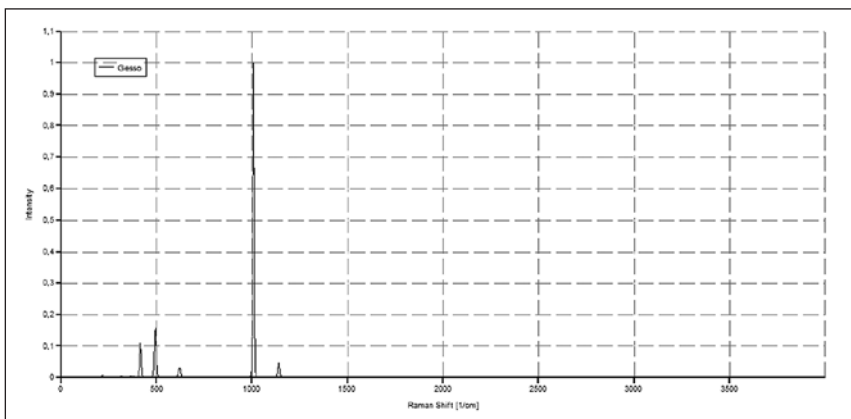
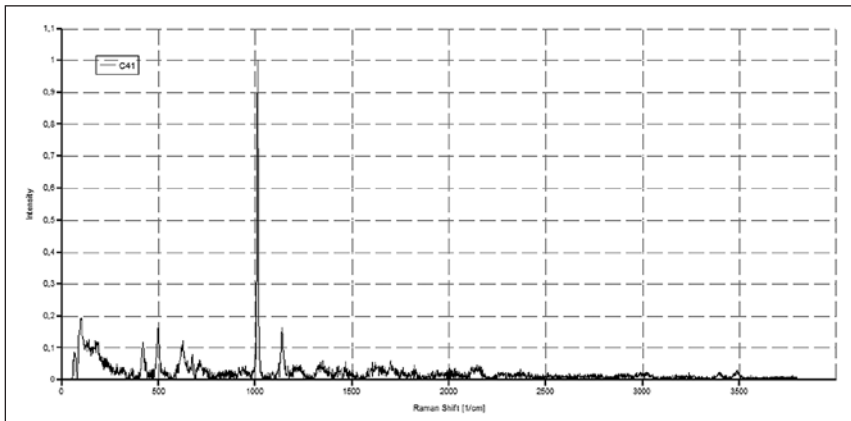


Grafico 3. Confronto tra gli spettri Raman del campione C41 (in alto) e il gesso (in basso).

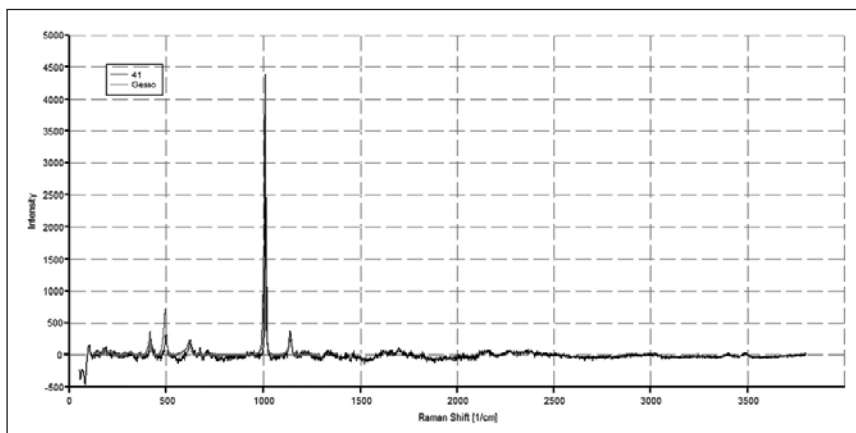
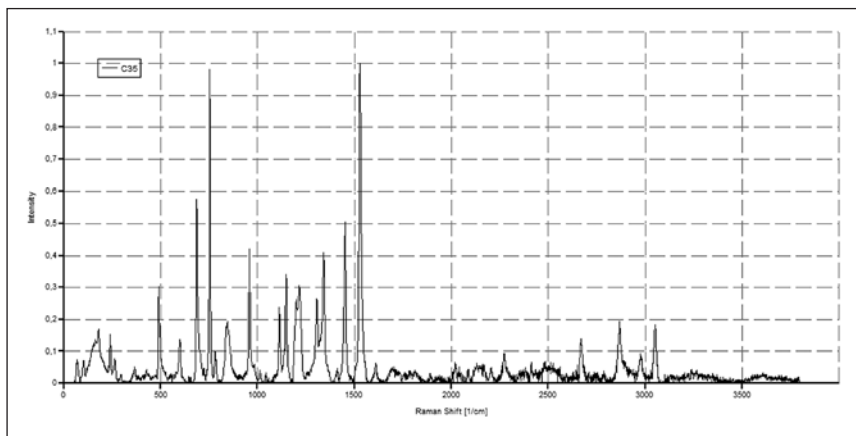
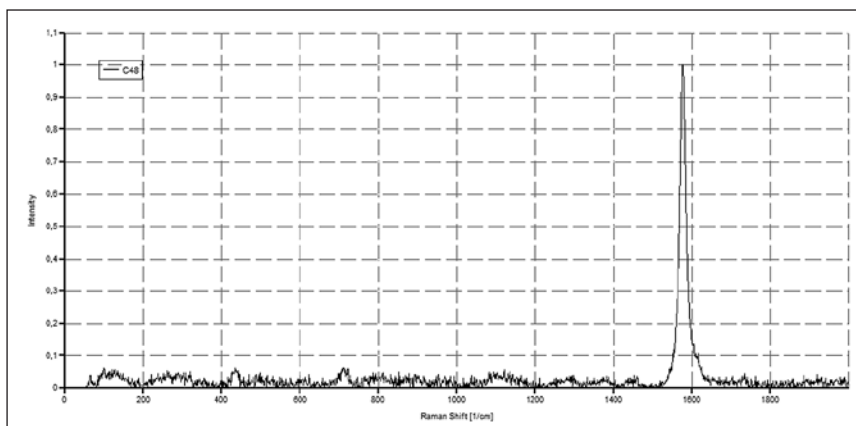


Gráfico 4. Spettro Raman del campione C35 riconducibile al blu ftalocianina in particolare per le bande osservabili a 681, 1389, 1450 e 1527 cm^{-1} .



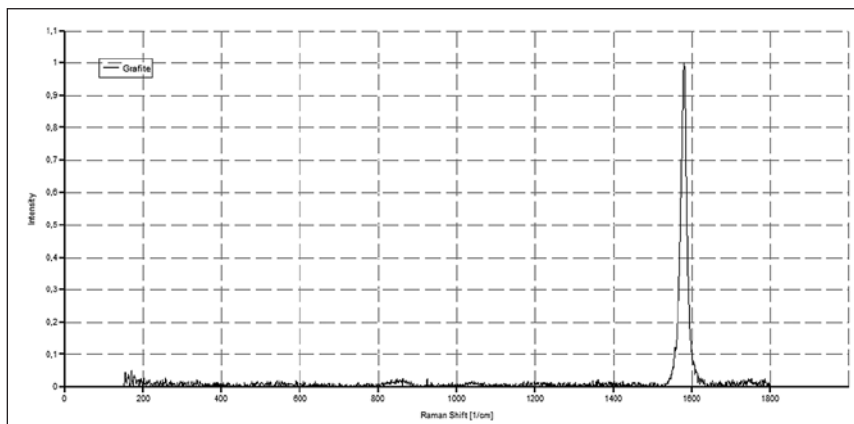


Gráfico 5. Confronto tra gli spettri Raman del campione C48 (in alto) e della grafite (in basso).

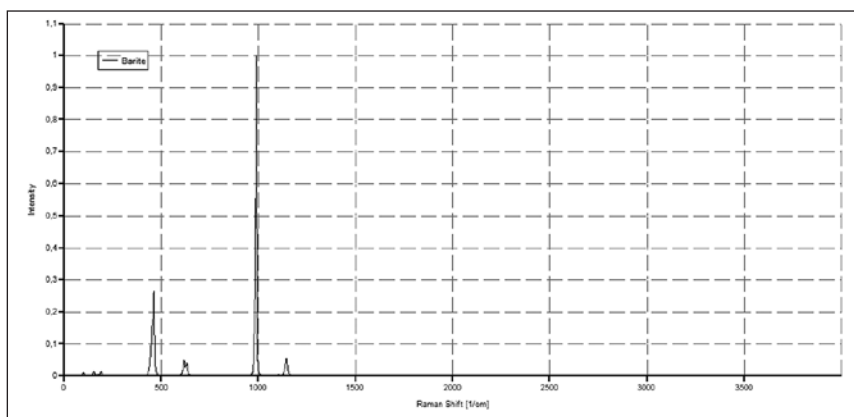
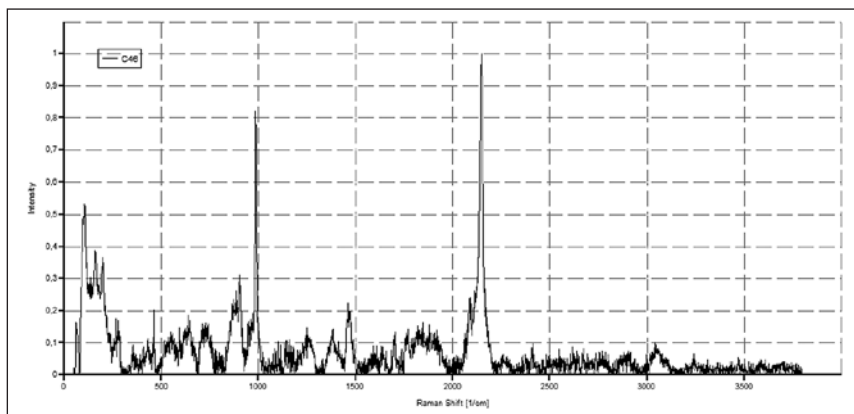


Gráfico 6. Confronti tra gli spettri del campione C46 (in nero), del blu di Prussia (in grigio scuro) e della barite (in grigio chiaro).

del blu (grafico 6) di blu di Prussia e barite (riconducibile al pigmento bianco fisso). Il blu di Prussia è stato impiegato dalla seconda metà del XVIII secolo fino alla prima metà del secolo scorso, il bianco fisso invece è impiegato dal XIX secolo, ponendo un termine *post quem* alle pitture.

Conclusioni

Non sono state trovate tracce di colore che potrebbero risalire in maniera univoca all'epoca romana; sono stati rinvenuti minerali anche impiegati come pigmenti in passato, in particolare l'ematite, ma in nessun caso sembrano appartenere a uno strato di pittura.

La superficie dell'arco, a eccezione delle decorazioni più complesse (capitelli e fregio), risulta essere ruvida, forse lavorata a gradina (fig. 8); quindi per avere una superficie adatta a dipingere in queste aree del monumento era necessario stendere uno strato di preparazione, in genere veniva impiegato il gesso⁽⁸⁾; la presenza di questo strato e di quello di colore, renderebbe una superficie pittorica sull'arco ben riconoscibile rispetto al marmo. Occorre comunque considerare, d'altro canto, la notevole superficie da indagare e le difficoltà oggettive nell'avvicinarsi alle parti superiori del monumento. Nella lettura dei risultati occorre infine aggiungere che, come riscontrato ad esempio negli studi condotti negli ultimi anni dal Copenhagen Polychromy Network sulle sculture della Ny Carlsberg Glyptotek⁽⁹⁾, è spesso arduo individuare tracce di colore, sovente microscopiche, sulle superfici marmoree antiche.

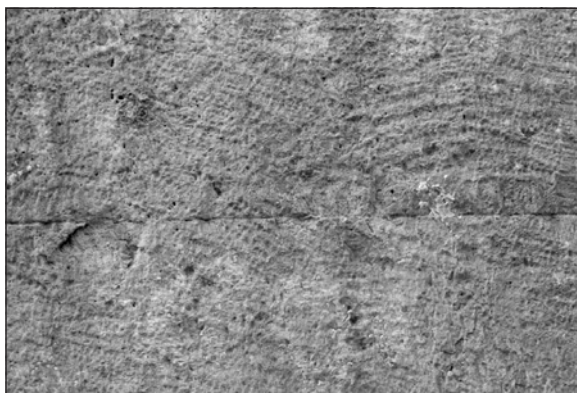


Fig. 8. Tracce della lavorazione superficiale del marmo, probabilmente con gradina.

(8) *I colori del bianco* cit. (v. nota 3), pp. 319-321.

(9) Ny Carlsberg Glyptotek - The Copenhagen Polychromy Network, *Tracking colour. The polychromy of Greek and Roman sculpture in the Ny Carlsberg Glyptotek*, Preliminary report 5, Copenhagen 2013.

Analisi minero-petrografica del marmo bianco dell'arco di Susa

Nell'ambito delle scienze della terra, la descrizione e la classificazione delle rocce da sempre costituiscono uno dei presupposti fondamentali per la comprensione dei processi genetici ed evolutivi della crosta terrestre. Più recente è invece il riconoscimento del contributo che le scienze petrografiche possono fornire allo studio storico dei materiali lapidei antichi. Negli ultimi decenni, lo sviluppo dell'archeometria, che si occupa dell'applicazione di metodologie scientifiche rivolte all'analisi di beni di interesse culturale, ha consentito di evidenziare come lo studio della natura e della provenienza delle pietre ornamentali siano problematiche eminentemente geologiche, che non possono essere risolte senza un approccio di tipo petrografico. In modo particolare questo risulta vero per i monumenti e manufatti realizzati in marmo bianco, uno dei materiali lapidei maggiormente utilizzati in Antichità e, in particolare, in età Romana⁽¹⁰⁾.

Il marmo bianco

Indispensabile premessa per la comprensione dello studio scientifico è la definizione del termine marmo nelle sue accezioni etimologiche, commerciali e petrografiche.

Il vocabolo marmo deriva dal greco antico *μάρμαρον* o *μάρμαρος* con il significato di «pietra splendente», a sua volta derivato dal verbo *μαρμαίρω* che significa «splendere, brillare».

Le caratteristiche di facile lavorabilità e lucidabilità del marmo tornano anche nella definizione commerciale e sono riportate nelle norme UNI8458 / UNI EN 12670⁽¹¹⁾. Il marmo viene caratterizzato come una roccia cristallina, compatta, lucidabile, da decorazione e da costruzione, prevalentemente costituita da minerali di durezza dell'ordine di 3 - 4 (quali calcite, dolomite, serpentino) su una scala da 0 a 10 (scala di Mohs), che assegna ad ogni minerale un valore empirico progressivo da 0 a 10, in modo che ciascuno sia in grado di scalfire quello che lo precede e sia scalfito da quello che lo segue. Tale definizione pone quindi l'accento sulle caratteristiche fisico-meccaniche della roccia, trascurando completamente l'aspetto macroscopico, il colore e la composizione geo-

(10) A. BORGHI *et Alii.*, *The Piedmont white marbles used in Antiquity: An archaeometric distinction inferred by a minero-petrographic and C-O stable isotope study* in «Archaeometry» n. 51 (2009), pp. 913-931.

(11) UNI8458. *Prodotti lapidei. Terminologia e classificazione*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (a cura di), pp. 1-6, Milano 1983. UNI EN 12670. *Natural stone – Terminology*, European Committee For Standardization (a cura di), pp. 1-53, Brussels 2001.

mica. Essa include pertanto litotipi che non rientrano nella classificazione strettamente scientifica dei marmi, come i calcari, le dolomie e le breccie calcaree lucidabili, gli alabastrini calcarei, le serpentiniti e le oficalciti.

La definizione petrografica in senso stretto è certamente più precisa e circoscrive l'uso del termine a rocce olocristalline derivanti dal metamorfismo di rocce carbonatiche, cioè costituite prevalentemente da calcite e dolomite. Trascurando il significato dei termini tecnici, osserviamo che questi ultimi sono due minerali caratterizzati rispettivamente da una durezza di 3 e 3.5-4. La calcite, carbonato di calcio di formula chimica CaCO_3 , e la dolomite, carbonato misto di calcio e magnesio, $\text{MgCa}[(\text{CO}_3)_2]$, hanno durezza superiore soltanto al talco e al gesso e si rigano con una punta di acciaio.

Si comprende quindi come il diffuso impiego del marmo bianco nella produzione artistica trovi ragione non soltanto nelle sue caratteristiche estetiche, ma anche e soprattutto nelle sue proprietà fisiche e petrografiche.

Se da un lato la relativa semplicità composizionale e tessiturale dei marmi ne ha determinato l'incredibile fortuna commerciale attraverso i secoli, dall'altro lato queste stesse caratteristiche rendono estremamente complessa una distinzione tra varietà provenienti da diversi distretti estrattivi. Marmi bianchi estratti a migliaia di chilometri l'uno dall'altro sono molto spesso indistinguibili sia all'osservazione macroscopica che a quella più dettagliata al microscopio ottico⁽¹²⁾.

Il problema dello studio di provenienza dei marmi bianchi antichi

Uno dei problemi più difficili che la ricerca archeometrica ha dovuto affrontare negli ultimi decenni è certamente l'identificazione dei marmi bianchi impiegati nell'antichità. Si tratta infatti di un tema la cui complessità scientifica si intreccia indissolubilmente con quella storica, in un continuo rimando tra discipline apparentemente lontane che si trovano a dover necessariamente dialogare per consentire il raggiungimento di risultati attendibili.

Da un punto di vista storico-artistico, l'impiego del marmo ha rivestito un ruolo di primo piano non soltanto per la produzione scultorea, ma anche per la realizzazione di grandi opere architettoniche. Gli esempi che si potrebbero citare a questo proposito sono pressoché infiniti e attraversano trasversalmente tutte le civiltà che si sono sviluppate nel Mediterraneo dal Neolitico ai giorni nostri⁽¹³⁾.

(12) L. LAZZARINI, *Archaeometric aspects of white and coloured marbles used in antiquity: the state of the art*, in «Periodico di Mineralogia» n. 73 (2004), pp. 113-125.

(13) C. GORGONI *et Alii.*, *An updated and detailed mineralogical and C-O stable isotopic reference database for the main Mediterranean marbles used in antiquity*, in *Asmosia V: interdisciplinary studies on ancient stone*, London 2002, pp. 115-131.

La diffusione e l'importanza del marmo culminarono in epoca romana, quando alla progressiva estensione geografica dell'Impero corrispose l'apertura di nuove cave di proprietà imperiale in tutto il bacino del Mediterraneo e lo sviluppo di una complessa organizzazione per il loro sfruttamento e la loro commercializzazione. Il marmo divenne progressivamente un segno tangibile di prestigio sociale e politico, assumendo un preciso significato ideologico e simbolico⁽¹⁴⁾. Alla ricerca di nuove fonti di approvvigionamento, i romani si spinsero fino ai confini più remoti dell'Impero, diffondendo marmi di origine diversa in tutti i principali centri del potere imperiale (fig. 9).

E' pertanto già a partire dal I secolo d.C. che si andò progressivamente perdendo il legame tra il contesto geografico e culturale sotteso alla realizzazione di un oggetto d'arte e la provenienza della materia prima impiegata per realizzarlo.

La ricerca archeologica ha quindi molto spesso bisogno di essere supportata da un contributo di tipo geo-chimico e minero-petrografico che consenta di validare o smentire le ipotesi formulate su base storica e stilistica.

Ricordando la definizione di marmo bianco, ritorniamo quindi alla complessità scientifica del problema e concentriamo l'attenzione sull'approccio analitico che viene adottato per risolverlo.

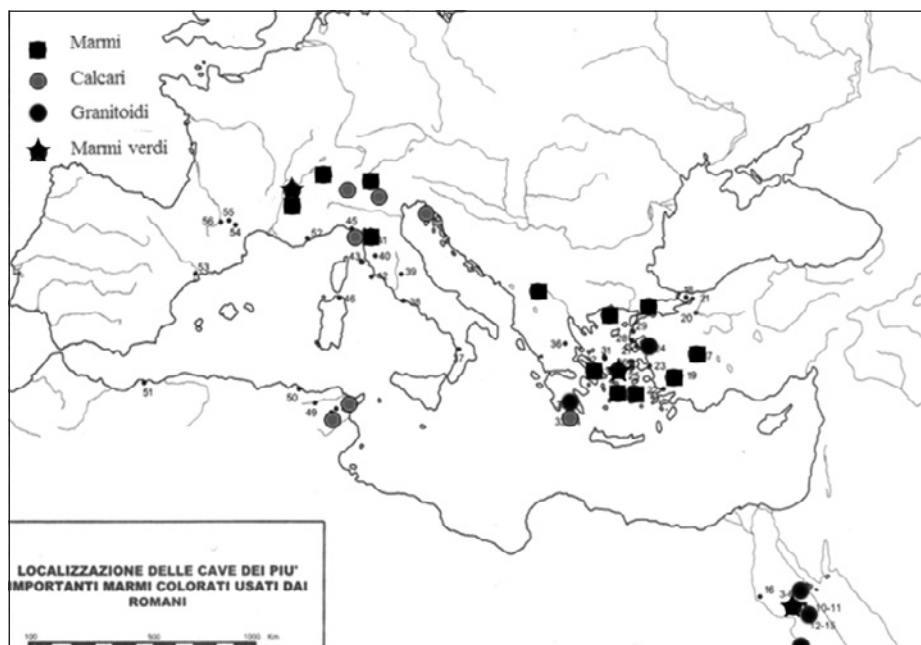


Fig. 9. Carta del Mediterraneo con indicati i siti estrattivi di pietre ornamentali più sfruttate in epoca romana (da L. Lazzarini, *Pietre e Marmi Antichi*, Padova, 2004, modificato).

(14) P. PENSABENE, *Il fenomeno del marmo nel mondo romano*, in *I marmi colorati della Roma Imperiale*, M. De Nuccio, L. Ungaro (a cura di), Venezia 2002, pp. 3-68.

L'approccio micro-analitico

A partire dai primi tentativi di Richard Lepsius alla fine del XIX secolo⁽¹⁵⁾ il problema dell'identificazione dei marmi bianchi è stato al centro dell'attenzione dei ricercatori in campo archeometrico, nel tentativo di individuare una tecnica analitica che da sola consentisse di caratterizzare in maniera univoca le diverse varietà. I primi risultati si sono ottenuti per mezzo di un semplice microscopio da petrografia. Attraverso il microscopio ottico a luce trasmessa è possibile rilevare le manifestazioni dell'interazione tra un fascio di luce polarizzata e la struttura cristallina del campione lapideo in analisi. Lo studio al microscopio implica il prelievo di un piccolo frammento dal reperto e la realizzazione di sezioni dello spessore di 0.03 millimetri, abbastanza sottili da consentire l'osservazione in luce trasmessa. L'importanza di questa tecnica nell'ambito della caratterizzazione minero-petrografica risiede nella possibilità di individuare le fasi cristalline ed i relativi rapporti quantitativi e spaziali (tessitura, grana, orientazione e forma). In particolare, nel caso dei marmi, i parametri maggiormente discriminanti risultano essere la dimensione media dei cristalli (*Average Grain Size*, AGS), le dimensioni del cristallo più grande (*Maximum Grain Size*, MGS) e la forma dei bordi di grano che separano i diversi cristalli (*Grain Boundary Shape*, GBS). Inoltre si determina l'eventuale presenza di un'orientazione preferenziale delle fasi cristalline nella sezione e l'eterogeneità della grana (variazioni dimensionali dei cristalli all'interno di una stessa sezione).

Una combinazione di tutti questi parametri consente, nei casi più fortunati, di ottenere una buona distinzione tra marmi di provenienza diversa. Nella maggioranza dei casi, però, l'osservazione al microscopio non è sufficiente dal momento che, come già accennato, il marmo ha una composizione relativamente semplice (prevalentemente calcite e dolomite), le varietà maggiormente ricercate non presentano orientazione preferenziale ed hanno una grana media estremamente fine (MGS < 1 mm).

E' quindi presto stata chiara la necessità di integrare questo tipo d'indagine con un'osservazione più dettagliata, che consentisse di avere una stima quantitativa dei rapporti spaziali tra le diverse fasi cristalline (rapporto tra calcite e dolomite, presenza di minerali accessori). Il microscopio elettronico a scansione (*Scanning Electron Microscope*, SEM), se integrato con microsonda EDS, permette di associare all'osservazione morfologica un'analisi composizionale di tipo quantitativo. Lo strumento si basa sulla rilevazione dei diversi tipi di segnale generati dall'interazione di un fascio elettronico opportunamente accelerato e collimato con la superficie di un campione reso conduttivo mediante metallizzazione (il campione viene ricoperto con un sottilissimo strato generalmente di oro o grafite). Il microscopio elettronico permette innanzitutto di effettuare osservazioni di tipo morfologico ad elevata tridimensionalità con ingrandimenti fino a circa 20.000 X. L'analisi quantitativa viene effettuata rilevando

(15) R. LEPSIUS, *Greichische Marmorstudien*, Berlin 1890.

le energie e la distribuzione delle intensità dei raggi X prodotti dall'interazione elettroni/materia attraverso fenomeni di fluorescenza.

I dati ottenuti dal SEM-EDS integrano quelli ottenuti al microscopio ottico, consentendo una migliore distinzione tra le varietà⁽¹⁶⁾. Tuttavia, date le caratteristiche intrinseche del marmo bianco (secondo la definizione petrografica), anche questo tipo di analisi può non essere sufficiente ad ottenere una classificazione soddisfacente. Un forte limite nello studio di provenienza dei marmi mediante SEM-EDS, ad esempio, è rappresentato dall'impossibilità di quantificare gli elementi che costituiscono le diverse fasi cristalline quando sono presenti in concentrazioni inferiori allo 0.1%.

Fin dalle prime applicazioni del metodo all'inizio degli anni '70⁽¹⁷⁾, lo studio della composizione isotopica delle fasi carbonatiche ha fornito i risultati più promettenti, diventando ben presto la tecnica di elezione in questo tipo di studi. Essa si basa, per mezzo di uno spettrometro di massa, sulla quantificazione del rapporto tra gli isotopi stabili del carbonio ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) e dell'ossigeno ($^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$), ossia sulla quantificazione del rapporto tra atomi di stessi elementi chimici aventi massa atomica differente.

La maggior parte degli studiosi oggi concorda sull'impossibilità di giungere a risultati soddisfacenti per mezzo di un'unica tecnica e sulla necessità di combinare i risultati di diversi strumenti analitici⁽¹⁸⁾.

L'XRF, così come la microsonda EDS, consente di individuare e quantificare gli elementi costitutivi di un campione grazie all'analisi della fluorescenza a raggi X, caratteristica prodotta in seguito ad eccitazione atomica. In questo caso, tuttavia, la radiazione primaria è costituita non da un fascio elettronico accelerato, ma da fotoni X, con un'energia di qualche decina di keV. I fotoni vengono collimati per mezzo di un complesso sistema di lenti capillari ed impattano su un'area estremamente ridotta (0.03 mm di diametro) della superficie del campione da analizzare.

Uno dei principali vantaggi dell'impiego di questa tecnica è la possibilità di quantificare livelli estremamente bassi di concentrazione di un elemento chimico dell'ordine di un milligrammo per ogni chilogrammo, convenzionalmente definiti elementi in traccia e calcolati come parti per milione (ppm).

I dati acquisiti per mezzo dell'osservazione al microscopio ottico vengono quindi integrati con quelli ottenuti dall'analisi degli elementi maggiori ed in

(16) S. CAPEDEI, G. VENTURELLI, A. PHOTIADES, *Accessory minerals and $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ of marbles from the Mediterranean area*, in «Journal of Cultural Heritage» n. 5 (2004), pp. 27-47.

(17) H. CRAIG, V. CRAIG, *Greek marbles: determination of provenance by isotopic analysis*, in «Science» n. 176 (1972), pp. 401-403.

(18) K. J. MATTHEWS, *The establishment of a data base of neutron activation analyses of white marble*, in «Archaeometry» n. 39 (1997), pp. 321-332; K. POLIKRETI, *Detection of ancient marble forgery: techniques and limitations*, in «Archaeometry» n. 49 (2007), 603-619; A. EBERT *et Alii*, *Provenance of marbles from Naxos based on microstructural and geochemical characterization*, in «Archaeometry» n. 52 (2010), pp. 209-228.

traccia nelle fasi carbonatiche e confluiscono in un database che comprende alcune delle principali caratteristiche minero-petrografiche e geochemiche delle diverse varietà di marmo bianco.

Una volta creata una banca dati di campioni di cui sia nota con certezza la provenienza, è possibile procedere all'analisi di reperti incogniti confrontando i dati acquisiti con quelli di riferimento e definendo l'area geografica dalla quale è stato cavato il litotipo impiegato per la sua realizzazione.

Il marmo dell'arco di Susa

L'Arco Imperiale di Augusto risulta costituito interamente in marmo bianco, ad eccezione del basamento in pietra locale. Sorge lungo l'antica strada delle Gallie, accanto alle rovine del *castrum*, che era la sede del comando prefettizio romano. Ad una osservazione macroscopica il marmo appare chiaro con presenza diffusa di patina superficiale giallo ocre, da cui la colorazione di molti dei blocchi. Si può inoltre osservare che è stato impiegato un marmo a diversi livelli di porosità e di anisotropia. Pertanto, per studiare i processi di degrado in atto sono stati raccolti, in occasione dei restauri del 1989 commissionati dalla Soprintendenza Archeologica del Piemonte, alcuni campioni di minime dimensioni (alcuni mm²) provenienti da differenti punti dell'Arco. Tale studio risulta finalizzato alla definizione del sito di provenienza del marmo dell'Arco, che già a suo tempo era stato attribuito nel 1907 da Sacco al Marmo di Foresto⁽¹⁹⁾.

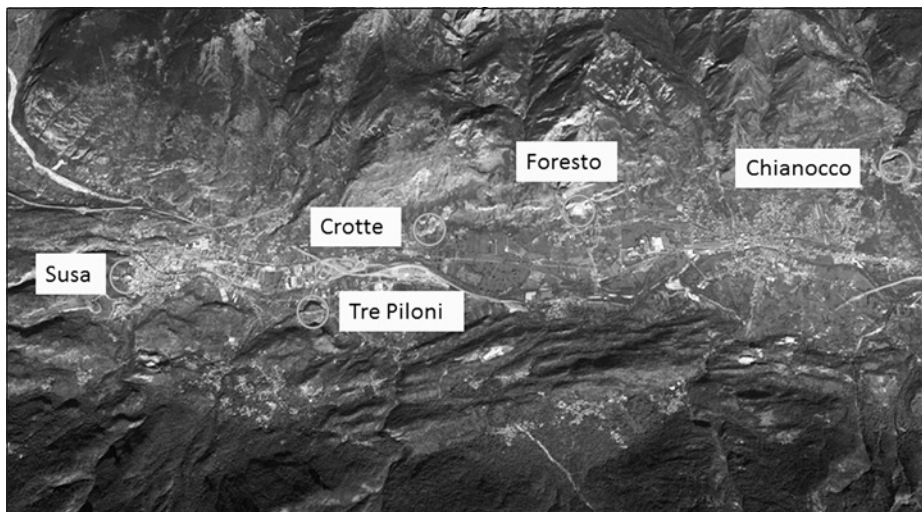


Fig. 10. Foto satellitare con indicati i punti di campionamento dei riferimenti per le analisi petrografiche e l'arco di Susa (rielaborazione da www.google.com).

(19) F. SACCO, *Geologia Applicata della città di Torino*, in «Giornale di geologia pratica» n. 5 (1907), pp. 121-162.



Fig. 11. Carta IGM 1:25.000 con indicati l'arco di Susa e i punti dei prelievi realizzati per il presente studio (rielaborazione da <http://www.pcn.minambiente.it/>).

Il campionamento è stato quindi integrato dai campioni in sezione sottile a suo tempo utilizzati dal prof. Chiari⁽²⁰⁾ messi gentilmente a disposizione dal Prof. Roberto Compagnoni del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Torino.

Questi campioni sono stati inoltre confrontati con campioni di marmo raccolti in prossimità di Susa e precisamente presso Chianocco, Foresto, Crotte e località Tre Piloni (fig. 10), corrispondenti a siti storici di cava dismessi. In particolare i campioni di riferimento delle cave di Chianocco e Foresto sono quelli prelevati e analizzati all'interno dello studio del 2009 riguardante i marmi bianchi⁽²¹⁾, invece i campioni di Crotte e Tre Piloni sono inediti e prelevati appositamente per ottenere dei riferimenti dei siti estrattivi più vicini al monumento (fig. 11). Crotte è una frazione del comune di Foresto dove sono stati prelevati quattro campioni durante un sopralluogo alla cava di calce, località Fornace di Crotte. Tre Piloni è una località nel comune di Susa, presso la frazione Garelli; è presente uno sperone di marmo da dove sono stati prelevati sei campioni, ancora oggi sfruttato per l'estrazione del carbonato per ottenere la calce.

Inquadramento geologico

Con il termine generico di "Marmo di Foresto" si intende il marmo affiorante lungo la porzione centrale della Valle di Susa, che geologicamente corrisponde alle coperture carbonatiche del Massiccio Dora Maira (fig. 12). Il Massiccio Dora Maira rappresenta una unità di crosta continentale appartenente al Dominio Pennidico delle Alpi Occidentali, che è stata pervasivamente deformata

(20) CHIARI, *Studio dell'alterazione*, cit. (v. nota 8), pp. 347-353.

(21) BORGHI, *The Piedmont white marbles*, cit. (v. nota 11), pp. 913-931.

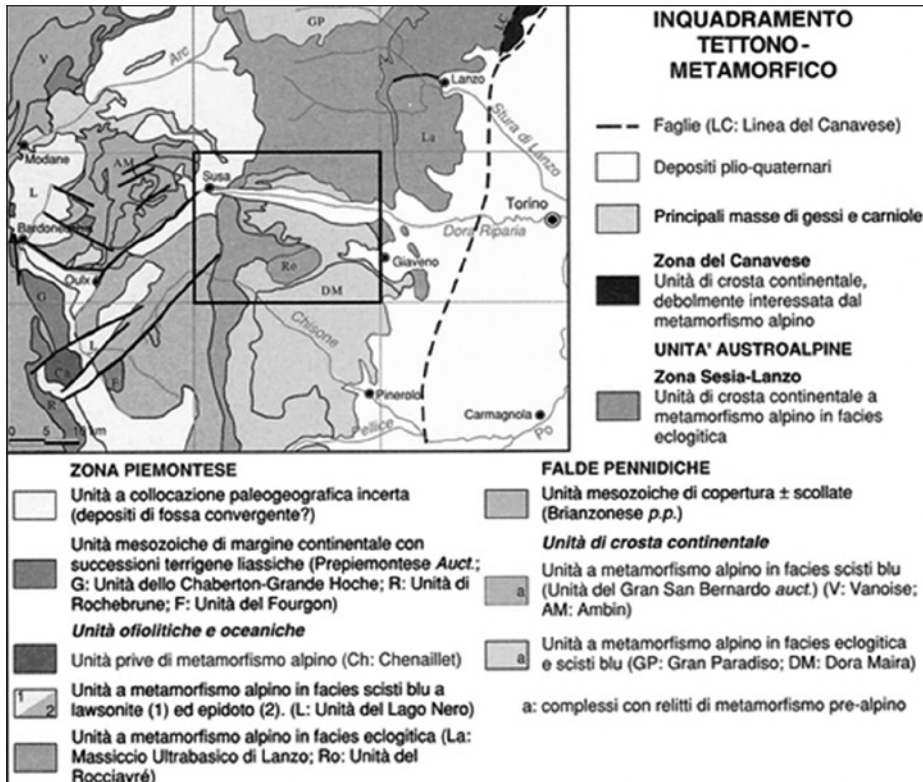


Fig. 12. Carta geologica schematica con indicate le principali unità tettono-metamorfiche della valle di Susa (da Carta geologica d'Italia dalla carta alla scala 1:50000 dell'IGM, a cura di ISPRA, foglio 154 "Susa", Nichelino, 2002).

e metamorfosata durante l'orogenesi alpina avvenuta circa 50 milioni di anni fa. Il Dora Maira è prevalentemente costituito da gneiss e micascisti di età Paleozoica e da rari lembi di copertura carbonatica di età Triassica Liassica che durante il metamorfismo alpino si sono trasformati in marmi dolomitici ora affioranti tra Bussoleno e Susa. Il ciclo metamorfico alpino ha comportato un primo evento in condizioni eclogitiche, durante il quale si sono raggiunte le P e le T più elevate, seguito da una retrocessione metamorfica in *facies* scisti verdi.

Osservazioni petrografiche

I campioni di marmo dell'arco di Susa sono risultati piuttosto omogenei da un punto di vista microstrutturale (tabella 1). Essi presentano una struttura prevalentemente xenoblastica, cioè caratterizzata da un aggregato di cristalli di calcite e dolomite di forma irregolare, che denota una cristallizzazione avvenuta in condizioni sin-cinematiche rispetto allo sviluppo della foliazione tettonica

NOME CAMPIONE	STRUTTURA	GRANA	GBS	AGS	MGS	TESSITURA	PARAGENESI MINERALOGICA								
							COSTITUENTE PRINCIPALE	ACCESSORI							
								wm	qtz	cc	chl	ap	rt	ep	trn
ARC01	Xenoblastica	eteroblastica	curvi - netti			d anisotropo	dolomite	x	x	x		x		x	x
ARC03	Granoblastica	eteroblastica	curvi			anisotropo	dolomite	x	x	x	x		x	x	x
ARC04A	Granoblastica	omeoblastica	netti			anisotropo	dolomite	x	x		x	x	x		
ARC04B	Xenoblastica	eteroblastica	curvi			d anisotropo	dolomite	x	x	x	x	x	x	x	x
ARC05	Granoblastica	omeoblastica	netti - curvi			isotropo	dolomite	x	x	x		x	x	x	x
ARC06	Xenoblastica	eteroblastica	netti - curvi			d anisotropo	dolomite	x	x	x				x	x
ARC08	Granoblastica	eteroblastica	curvi - irregolari			d anisotropo	dolomite	x	x	x	x			x	x
ARC09	Xenoblastica	eteroblastica	curvi			anisotropo	dolomite	x	x	x		x		x	x
ARC10	Granoblastica	eteroblastica	curvi - irregolari	0,02493	0,37	d anisotropo	dolomite	x	x	x				x	x
ARC11	Xenoblastica	eteroblastica	curvi	0,023304	0,28	d anisotropo	dolomite	x	x	x		x		x	x
ARC15	Xenoblastica	omeoblastica	curvi			isotropo	dolomite	x	x	x			x	x	x
ARC16	Xenoblastica	omeoblastica	curvi			isotropo	dolomite	x	x	x				x	x
ARC20	Xenoblastica	eteroblastica	curvi - irregolari	0,048727	0,36	isotropo	dolomite	x	x	x				x	x
ARC21	Xenoblastica	omeoblastica	curvi - irregolari	0,028211	0,47	anisotropo	dolomite	x	x	x				x	x
ARC22	Granoblastica	eteroblastica	netti - curvi	0,056421	0,46	anisotropo	dolomite	x	x	x	x			x	x
ARC23	Granoblastica	eteroblastica	curvi			anisotropo	dolomite	x	x	x		x		x	x
ARC25	Xenoblastica	omeoblastica	curvi			isotropo	dolomite	x	x	x		x	x		

Tabella 1. Schematizzazione delle principali caratteristiche riscontrate nei campioni provenienti dall'arco di Susa.

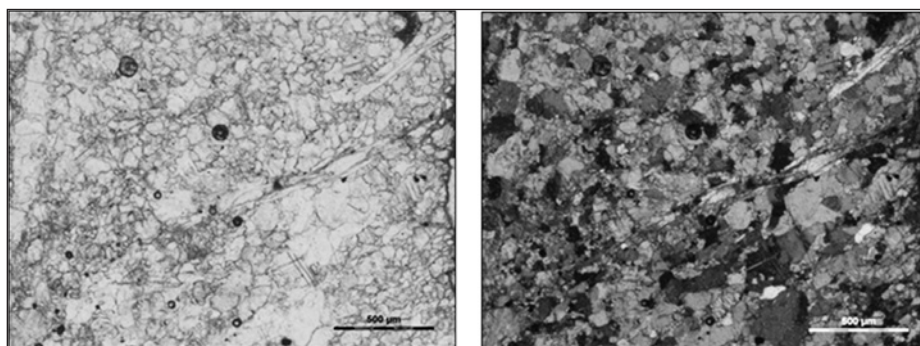


Fig. 13. Microfotografie dei campioni provenienti dall'arco di Susa, a polarizzatori paralleli e a polarizzatori incrociati.

regionale, tipica dei marmi alpini, che affiorano in piccole lenti discontinue intercalate negli scisti cristallini delle diverse unità tettoniche che compongono la catena Alpina (fig. 13). Solo in rari casi la struttura è risultata granoblastica, cioè caratterizzata da una disposizione regolare ed ordinata dei cristalli di carbonato con contorni dei granuli rettilinei e contatti a giunti tripli. Questa è la tipica struttura che si riscontra in marmi cristallizzati in condizioni statiche tardive, come ad esempio avviene per i marmi delle Alpi Apuane. La grana risulta prevalentemente eteroblastica, anche se in alcuni campioni è più omogenea (omeoblastica). La forma dei singoli cristalli di carbonato è piuttosto regolare con contorni da curvi a netti che solo raramente diventano irregolari a formare strutture convolute. La tessitura della roccia è prevalentemente anisotropa, cioè mostra nel suo insieme una debole orientazione preferenziale dei componenti mineralogici, che definisce una scistosità. In alcuni casi la tessitura è anche isotropa, cioè non sono presenti orientazioni prevalenti. Nella figura 14 sono riportati per confronto quattro microfotografie rappresentative della microstruttura

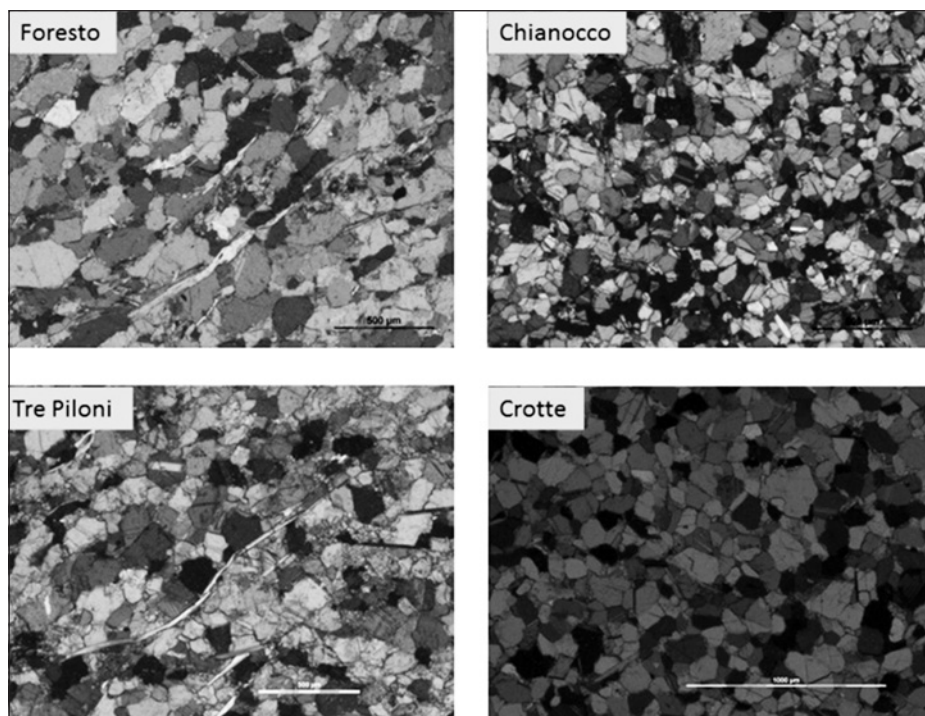


Fig. 14. Microfotografie a polarizzatori incrociati di campioni rappresentativi e di provenienza nota.

prevalente per i marmi raccolti nei siti di cava storici. Come si può osservare, i marmi provenienti dalle località Foresto e Tre Piloni sono caratterizzati da una evidente tessitura anisotropa definita dalla orientazione preferenziale dimensionale di sottili lamelle di mica bianca. I cristalli di carbonato mostrano una grana prevalentemente eteroblastica e contorni di granulo piuttosto irregolari. Il marmo di Crotte è invece caratterizzato da una tipica struttura granoblastica a giunti tripli con cristalli caratterizzati da contorni netti o leggermente curvi. Le lamelle di mica bianca in questo caso non sono orientate. Il marmo di Chianocco, infine, è quello caratterizzato dalla grana più fine e da una tessitura isotropa, anche se meno regolare di quella del marmo di Crotte.

Sono stati infine misurati due importanti parametri archeometrici, quali l'AGS e l'MGS. Dai diagrammi del grafico 7 si può notare che i campioni dell'Arco di Susa mostrano valori di AGS e MGS piuttosto omogenei pari a valori medi di 0.01 – 0.05 mm per il primo parametro e a 0.35 – 0.50 mm per il secondo parametro. In assoluto questi due diametri sono molto ridotti e riflettono condizioni di cristallizzazione avvenute a temperature molto basse, coerenti con la storia metamorfica del Massiccio Dora Maira, dove sono state raggiunte T di picco metamorfico attorno a 500 °C⁽²²⁾. Il confronto con i campioni raccolti

(22) I. GASCO, M. GATTIGLIO, A. BORGHI, *New insight on the lithostratigraphic setting and*

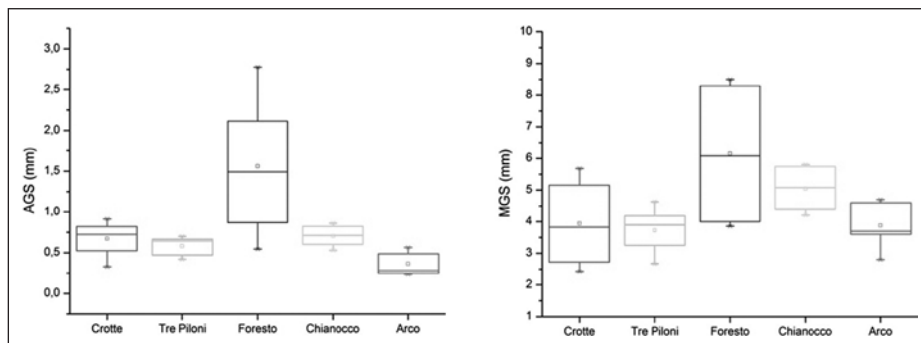


Grafico 7. I valori di AGS e MGS dei campioni dell'arco di Susa e dei riferimenti con rispettivi deviazione standard, massimi e minimi.

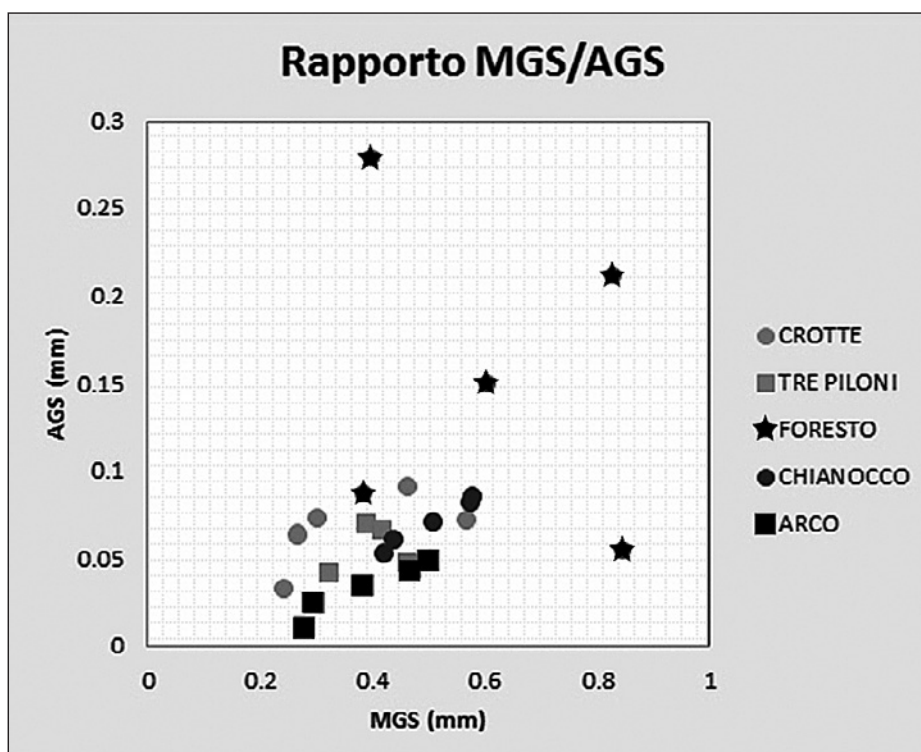


Grafico 8. Grafico riassuntivo con i valori di AGS e MGS misurati per le diverse provenienze.

in cava è riportato nel grafico 8, dove si può notare una buona corrispondenza tra il marmo dell'Arco e quello di Chianocco, Crotte e Tre Piloni, mentre il

on tectono metamorphic evolution of the Dora Maira vs Piedmont Zone boundary (middle Susa Valley), in «Journal of Earth Science» n. 100 (2011), pp. 1065-1085.

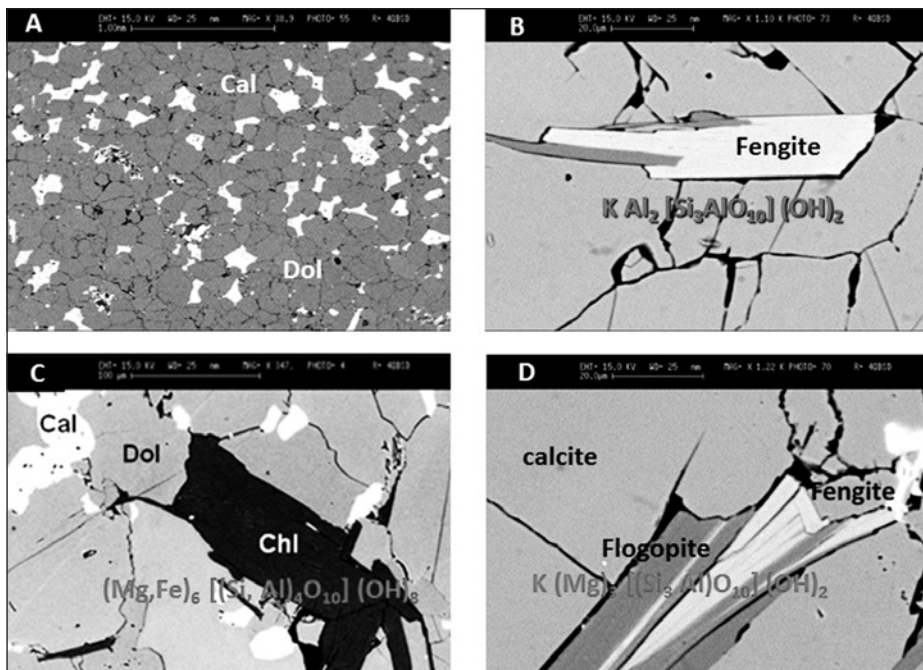


Fig. 15. Microfotografie scattate al SEM e indicazioni di alcune fasi mineralogiche riscontrate durante lo studio.

marmo di Foresto risulta caratterizzato da valori sia di AGS sia di MGS leggermente più elevati e meno omogenei.

Da un punto di vista mineralogico il marmo dell'Arco di Susa risulta prevalentemente costituito da dolomite, mentre la calcite è sempre presente, ma in quantità inferiori (fig. 15a). Tra i minerali accessori sono presenti numerosi minerali sialici. Tra questi il più abbondante ed anche il più significativo risulta essere la mica bianca (fig. 15b), presente in tutti i campioni analizzati, che definisce la scistosità del marmo. Seguono il quarzo, gli ossidi di ferro e la pirrite. Saltuariamente possono essere presenti clorite (fig. 15c), apatite, epidoto, titanite e rutilo. La presenza di rutilo, tipico minerale di rocce di alta pressione, conferma che il marmo dell'Arco di Susa ha una provenienza "alpina" poiché i diversi marmi delle Alpi occidentali sono stati coinvolti dall'evento eclogitico che ha caratterizzato la prima fase dell'orogenesi alpina. In alcuni campioni (C11) è stata anche individuata tramite analisi con la microsonda elettronica la flogopite, una mica triottaedrica termine puro di Mg della biotite (fig. 15d), piuttosto rara nei marmi e per questo considerata un buon *marker* mineralogico per caratterizzare il marmo dell'Arco di Susa. Rari cristalli di flogopite si sono osservati anche nei campioni raccolti nella cava di Crotte.

Da un punto di vista composizionale, la mica bianca dei campioni del marmo di Augusto (C10, C11, C20, C22), analizzata mediante microsonda elettro-

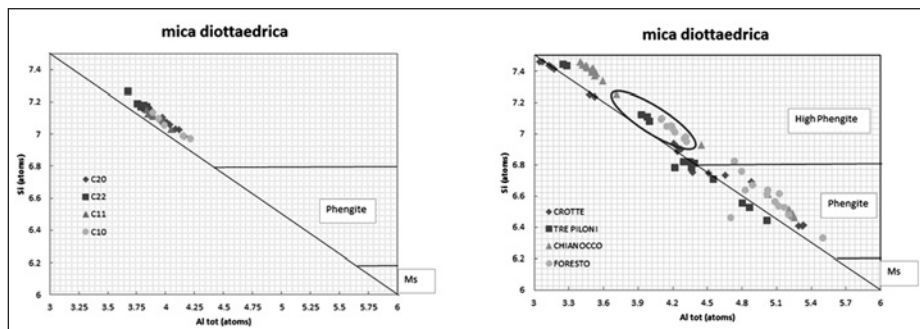


Grafico 9. Grafici in cui si riportano la composizione in Silicio e Alluminio delle miche fengitiche per i campioni di diversa provenienza.

nica, è risultata una fengite piuttosto omogenea e caratterizzata da un elevato contenuto in Silicio, indice di cristallizzazione ad elevate pressioni (grafico 9a). In particolare il tenore in Si, espresso in atomi per formula unitaria (p.f.u.) sulla base di 22 ossigeni, varia tra 6.93 e 7.24, rientrando pertanto nel campo delle fengiti di alta pressione secondo il diagramma classificativo di Capedri⁽²³⁾. Il tenore in Mg è compreso tra 0.765 e 0.994 atomi p.f.u., mentre il Fe, coerentemente con il sistema carbonatico, è risultato sempre assente. Nello stesso modo sono assenti anche il Ca e il Na nel sito X, a coordinazione 12, risultato interamente occupato dal solo Potassio. La somma del sito ottaedrico (sito Y) è compresa tra 1.975 e 2.111 atomi p.f.u. risultando pertanto leggermente triottaedrica, coerentemente con quanto riportato in letteratura.

Confrontando la composizione della mica fengitica del marmo dell'Arco di Augusto con quella delle miche dei campioni di cava, si osserva una sovrapposizione parziale con quelle del marmo di Foresto e Tre Piloni (grafico 9b). E' inoltre da enfatizzare il fatto che le miche dei campioni di cava risultano molto più zonate, mostrando tenori in Si compresi tra 6.32 e 7.45. In particolare le miche di Chianocco e Tre piloni sono quelle risultate più ricche in Si. Questa zonatura è da attribuire agli effetti della parziale retrocessione della mica fengitica in mica muscovitica durante il secondo evento metamorfico che ha interessato il Massiccio del Dora Maira, avvenuto in condizioni di bassa pressione.

La clorite analizzata, sia nei campioni di cava sia in quelli del marmo impiegato nell'Arco di Augusto, è risultata sempre molto omogenea da un punto di vista composizionale. In particolare, utilizzando il diagramma classificativo di Hey⁽²⁴⁾, le cloriti analizzate si proiettano a cavallo dei campi del clinocloro e della pennina, risultando caratterizzate da un tenore in Si compreso tra 6.038 e 6.316 atomi p.f.u. sulla base di 28 ossigeni e valori nulli di Fe (grafico 10).

Per una migliore discriminazione tra i diversi campioni di marmo si sono de-

(23) CAPEDEI, *Accessory minerals*, cit. (v. nota 17), pp. 27-47.

(24) M. H. HEY, *A new review of chlorites*, in «Mineralogical Magazine» n. 30 (1954), pp. 277-292.

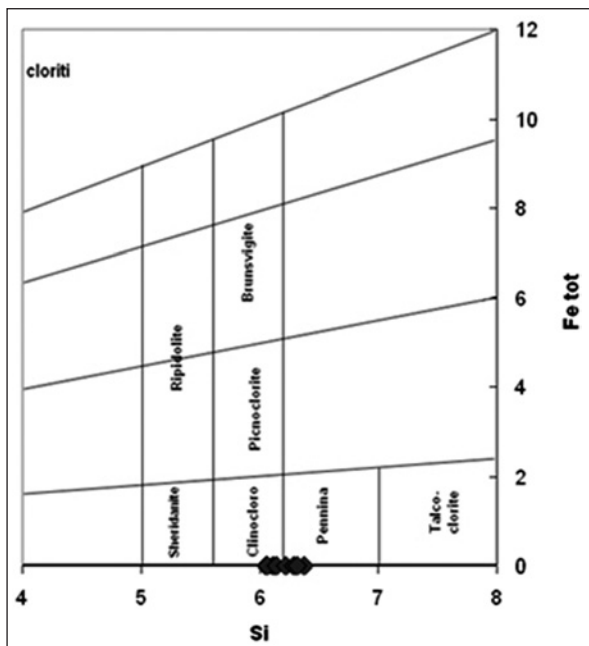


Grafico 10. Diagramma di Hey con i risultati sulla composizione in Silicio e Ferro delle cloriti per i campioni provenienti dall'arco di Susa.

terminati i contenuti degli elementi in traccia (Fe, Mn e Sr) mediante la microfluorescenza a raggi X. I risultati si sono espressi in parti per milione (ppm) e sono proiettati in grafico 11. Tre (C11, C20 e C22) dei quattro campioni dell'Arco di Susa sono caratterizzati da valori piuttosto omogenei tra di loro, mentre il campione C10 è caratterizzato da una maggiore variazione composizionale. In parti-

colare il tenore in Mn è il più scarso ed è compreso tra 14 e 28 ppm, segue lo Sr i cui contenuti variano tra 105 e 184 ppm. Un discorso a parte è necessario per il Fe. Per i campioni C11, C20 e C22 il suo contenuto è piuttosto omogeneo, variando tra 101 e 215 ppm, mentre il campione C10 mostra tenori decisamente più elevati compresi tra 358 e 511. Confrontando i dati degli elementi in traccia ottenuti per i campioni di cava, si possono trarre le seguenti considerazioni: i quattro siti di provenienza sono caratterizzati da campi ristretti e ben separati tra di loro. In particolare i siti Tre Piloni, Foresto e Crotte si distinguono per un progressivo incremento del contenuto in Fe, mentre Chianocco, caratterizzato da tenori in Fe bassi e confrontabili con quelli di Tre Piloni, si caratterizza per

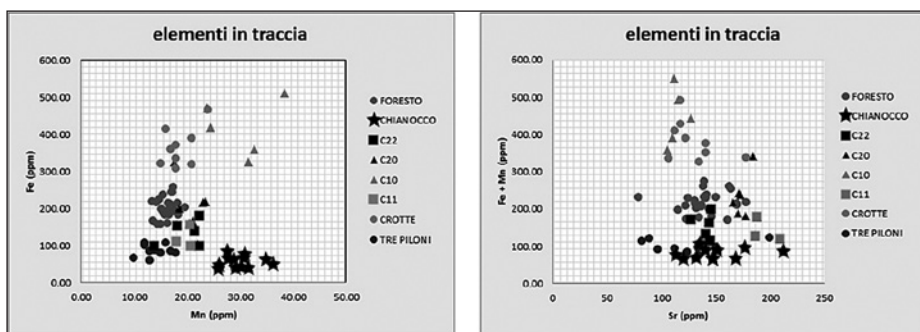


Grafico 11. Grafici nei quali si riportano le presenze degli elementi in traccia Ferro, Manganese e Stronzio nei carbonati dei campioni di diversa provenienza.

valori in Mn più elevati di 20 ppm (grafico 11a). Confrontando questi campi con quelli dei campioni del marmo dell'Arco di Augusto, si nota che i campioni C11, C20 e C22 si sovrappongono bene con i campi rappresentativi dei marmi raccolti nelle cave di Tre Piloni e Foresto, mentre il campione C10 mostra tenori in Fe e Mn confrontabili con quelli del marmo raccolto nella cava di Crotte. Nessun campione dell'Arco mostra valori compatibili con il marmo di Chianocco. Nel diagramma della tavola 19b (grafico 11b), dove è riportato anche il valore in Sr si possono trarre le stesse considerazioni.

Conclusioni

Dal confronto di tutti i dati ottenuti applicando diverse metodologie (microscopia ottica ed elettronica per lo studio strutturale, microanalisi elettronica per la determinazione degli elementi maggiori dei carbonati e delle fasi silicatiche accessorie e microfluorescenza a raggi X per la determinazione degli elementi in traccia nelle fasi carbonatiche) è stato possibile trarre le seguenti conclusioni:

1) I dati minero-petrografici confermano l'ipotesi a suo tempo già avanzata da Sacco⁽²⁵⁾, che attribuì il marmo dell'Arco di Susa alle coperture carbonatiche del Massiccio Dora Maira, trasformate in marmi di alta pressione durante l'orogenesi alpina. Questa considerazione è testimoniata dal fatto che il marmo impiegato è caratterizzato da fasi mineralogiche silicatiche tipiche della *facies* eclogitica, quali la mica fengitica e il rutilo.

2) Anche i caratteri microstrutturali indicano forti analogie tra il marmo dell'Arco di Augusto e quelli raccolti nelle vicine cave. In particolare i campioni a tessitura foliata potrebbero essere attribuiti alle cave di Foresto e Tre Piloni, mentre i pochi campioni mostranti una tessitura isotropa potrebbero provenire dal sito di Crotte. Considerazioni analoghe si possono fare sulla base dei dati degli elementi in traccia. La maggior parte dei campioni mostrano infatti tenori confrontabili con quelli riscontrati per i campioni raccolti nei siti di Foresto e Tre Piloni, mentre il campione C11 è più compatibile con gli alti tenori di Fe ritrovati nel sito di Crotte. Questo può significare che il marmo utilizzato per costruire l'arco di Augusto non provenga da un solo sito, ma sia stato raccolto da più cave prossime al sito archeologico. In alternativa si potrebbe ipotizzare una diversa provenienza di blocchi di marmo impiegati successivamente per opere di parziale restauro dell'opera.

3) i dati raccolti escluderebbero viceversa una provenienza dal sito di Chianocco, che per altro è quello che si trova più distante dalla città di Susa.

(25) SACCO, *Geologia Applicata*, cit. (v. nota 20), pp. 121-162.

Analisi composizionale delle grappe metalliche

L'arco di Augusto, monumento unico nel panorama artistico italiano, rappresenta una delle più belle opere di epoca romana visibili a Susa. Come molte delle opere architettoniche giunte fino ai nostri giorni, questo è dovuto alla maestria con cui i romani, edotti dalle tradizioni greche, padroneggiassero la tecnica delle costruzioni. Un ruolo determinante a questo scopo, ossia l'edificazione di opere in pietra, è da ricercarsi anche nell'utilizzo di sistemi di ancoraggio dei blocchi da costruzione per mezzo di artifici, in grado di evitarne lo spostamento e il disallineamento. L'oggetto di questo studio si concentra nell'analisi non invasiva delle *grappe* metalliche presenti nel monumento augusteo e nella loro caratterizzazione chimica. Prima di entrare però nel dettaglio della discussione dei risultati, occorre fare una breve introduzione su come le *grappe* (dal longobardo *krapfo*, uncino, sec. XIX) fossero applicate al fine di determinare la coesione tra i diversi blocchi di, in questo caso, marmo.

La 'prima' applicazione di *grappe* è da attribuire alle culture del Mediterraneo (tale tecnica fu scarsamente applicata in oriente e, in ogni caso, in maniera differente), da quella micenea a quella egizia, fino ad affinarsi nella tradizione greca e successivamente romana⁽²⁶⁾. Dapprima l'uso delle *grappe* era relegato alle sole costruzioni lignee, ma successivamente rivestì un ruolo di primo piano nell'architettura lapidea e successivamente in quella con laterizi. Nella tradizione greca si usavano *grappe* metalliche in ferro o in bronzo⁽²⁷⁾, con differenti forme, le quali venivano inserite in (fig. 16) appositi fori realizzati nei blocchi di pietra. I fori venivano realizzati dell'esatta misura della testa della *grappa*,

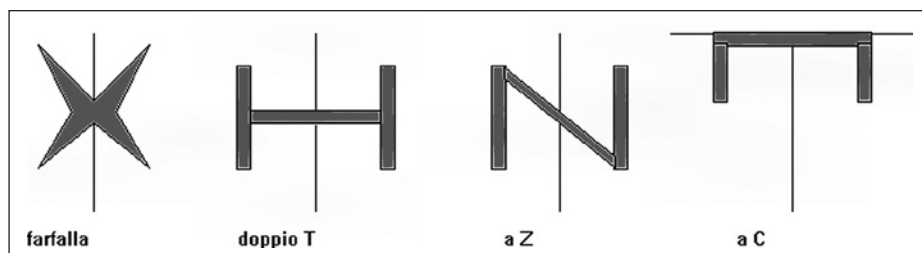


Fig. 16. Esempi di disposizione di grappe.

(26) R. GINOUVES, R. MARTIN, *Dictionnaire méthodique de l'architecture greque et romaine. I. Matériaux et techniques*, Coll. Ecole Française de Rome, Roma 1985; J. DE LAINE, *An engineering approach to Roman building techniques: the Baths of Caracalla in Rome* in «British Archaeological Reports» 1985, p. 195; J. DE LAINE, *The Baths of Caracalla in Rome: a study in the design, construction and economics of large-scale building projects in imperial Rome* in «JRA Supplementary Series» n. 25 (1997).

(27) E. LIPPOLIS, M. LIVADIOTTI, G. ROCCO, *Architettura greca*, Milano 2007.

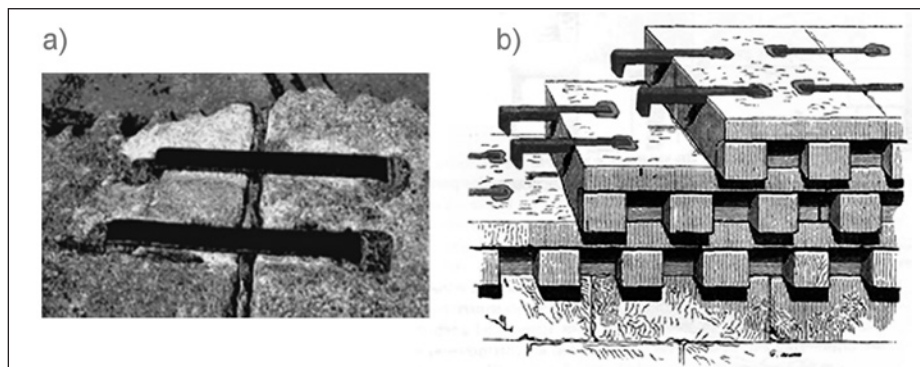


Fig. 17. a) grappa con relativa colatura a piombo. b) schema della disposizione delle grappe in una struttura muraria romana.

al fine di garantire la perfetta tenuta. In epoca romana⁽²⁸⁾ questa perizia nella realizzazione dei fori tende a perdersi, e la tenuta tra metallo e blocco lapideo viene garantita da una colata di piombo fuso nell'alveo (fig. 17a)⁽²⁹⁾, come mostrato nello schema della figura 17b⁽³⁰⁾.

Nel caso della tradizione romana, era il ferro il metallo quasi esclusivamente utilizzato⁽³¹⁾.

Materiali e metodi

L'analisi delle *grappe* dell'arco di Susa ha richiesto alcuni accorgimenti particolari, primo fra tutti quello dell'uso di tecniche analitiche non invasive; questo a causa del fatto che praticamente tutte le *grappe* del monumento sono state asportate e quella misurata (fig. 18) rimane l'unica accessibile.

La pratica di asportazione delle *grappe* metalliche era un fenomeno piuttosto diffuso nel passato, presente in diverse epoche, pratica che ha colpito molte delle opere architettoniche romane, si pensi per esempio al Colosseo.

La tecnica analitica utilizzata in questo frangente è stata la spettrometria di fluorescenza di raggi X (XRF). Il principio dell'analisi XRF consiste nell'eccitazione degli elementi presenti in un materiale per mezzo di raggi X a bassa potenza. A loro volta gli elementi presenti nel materiale generano l'emissione di raggi X caratteristici che li identificano in maniera univoca⁽³²⁾.

(28) G. GIOVANNONI, *La tecnica della costruzione presso i romani*, Roma 1925.

(29) VITRUVIUS, *De Architectura*, II, 8, 4.

(30) E. VIOLLET-LE-DUC, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle*, 1867, p. 400.

(31) C. M. AMICI, *L'uso del ferro nelle strutture romane*, in «Materiali e Strutture» 2-3 (1997), pp. 85-95.

(32) R. JENKINS, R. W. GOULD, D. GEDCKE, *Quantitative X-Ray Spectrometry*, New York, 1996.



Fig. 18.
Alloggiamento
della grappa
analizzata
sull'arco di
Augusto.

L'analisi, come detto, fornisce dati di carattere elementare che si esplicitano in grafici in cui le intensità degli elementi chimici, presenti nel materiale, si distribuiscono lungo una scala di energie, definendone esplicitamente la presenza e implicitamente la quantità (grafico 12). Le analisi e gli studi svolti in laboratorio hanno mostrato l'efficienza di questa tecnica anche su sistemi metallici parzialmente degradati.

Tutte le misurazioni sono state realizzate in situ⁽³³⁾ e successivamente i dati ottenuti sono stati confrontati con dei materiali standard certificati⁽³⁴⁾ (MBH). Le misurazioni sono state realizzate mediante differenti protocolli di indagine⁽³⁵⁾ al fine di indagare sia la composizione della lega metallica che il contributo delle patine di alterazione. Le misure sono, inoltre, state effettuate in diversi punti della *grappa* al fine di verificare la composizione locale della lega. Per la determinazione dei metalli sono stati utilizzati degli algoritmi che hanno previ-

(33) L'analisi è stata effettuata con un spettrometro EDXRF *Thermo NITON* (USA) modello XL3T-900-GOLDD, dotato di un target di argento e di un *Large Area – Silicon Drift Detector* (SDD) con superficie di 25 mm², spessore del chip di Si 500 µm, risoluzione energetica di 135 eV calcolata a 5.9 keV, *shaping time* di 4 µm e *processing ability* di 180000 cps. La geometria usata è 30°/30°, con una distanza di lavoro di 2 mm sulla normale al piano *detector/sorgente* e uno *spot*, sul campione, di 3 o 8 mm di diametro. Il punto di analisi, e la dimensione dell'area irraggiata, è visualizzato mediante una videocamera CCD. Il tempo totale di analisi è stato fissato a 240 secondi suddiviso in 4 frazioni di 60 secondi ciascuna, in cui le condizioni operative sono modificate per ottimizzare la risposta strumentale ai diversi intervalli energetici (*high*: 50keV, 50µA, filtro Mo; *main*: 40keV, 50µA, filtro Fe/Al; *low*: 20keV, 95µA, filtro Cu; *light*: 6keV, 95µA, senza filtro).

(34) Per lo studio di calibrazione sono stati utilizzati materiali standard certificati (CRM) delle serie *iron base*, *copper base* and *lead base* della MBH Analytical Ltd. (UK).

(35) VAN ESPEN, P. LEMBERGE, *ED-XRF spectrum evaluation and quantitative analysis using multivariate and nonlinear techniques*, in «Advances in X-ray Analysis» 43 (1999), pp. 560-569.

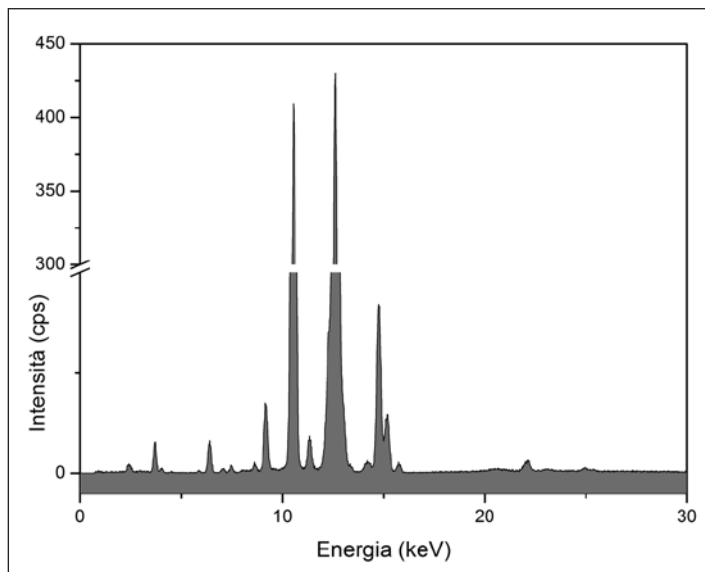


Grafico 12. Esempio di spettro di fluorescenza di raggi X della zona analizzata.

sto la normalizzazione del risultato⁽³⁶⁾.

L'analisi dei dati ha purtroppo portato ad un risultato difficilmente utilizzabile. La zona misurata, visibile in figura 19, mostra una composizione anomala (si veda tabella di seguito) per via della quasi totale assenza del ferro. Nella realtà l'informazione va epurata e scomposta in una serie di componenti, questo a causa della peculiarità dell'analisi XRF, ossia quella di fornire una simultanea indicazione dello strato superficiale (patina + impurità ambientali) e di un strato profondo, attribuibile alla lega metallica.

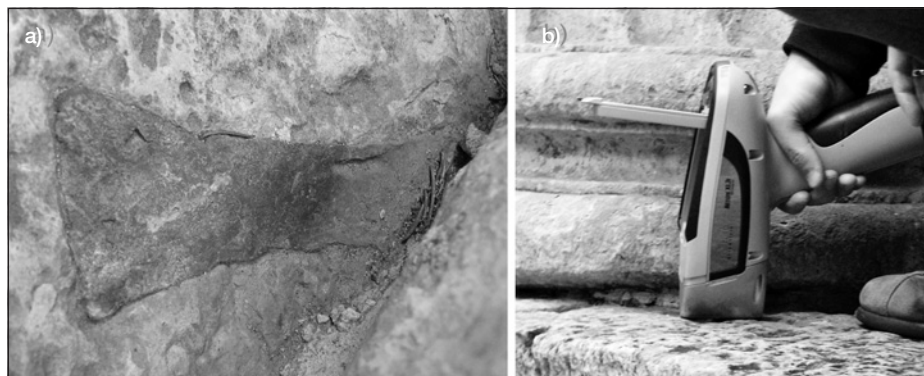


Fig. 19. a) zona di analisi. b) condizioni di analisi in situ.

(36) Gli spettri ottenuti sono stati processati con il software commerciale *Win Axil* (Canberra), derivato dal software accademico IAEA.

	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Mn	Al	P	Si	
<i>grappa</i>	0.4	74.9	0.2	0.1	2.8	0.2	1.2	6.5	13	99.2

Valori non normalizzati della composizione del volume analizzato⁽³⁷⁾.

In questo caso si possono osservare una serie di elementi associabili a fenomeni di alterazione della *grappa*, o comunque a depositi superficiali derivanti dall'esposizione atmosferica. Queste informazioni sono scarsamente fruibili e, in ogni caso, il valore numerico ad esse associato è solamente indicativo.

Differente discorso può, invece, essere fatto per lo strato più profondo, i cui valori, una volta normalizzati, offrono un'indicazione sulla composizione del metallo (tabella di seguito).

	Ag	Pb	Zn	Cu	
<i>grappa</i>	0.6	98.1	0.3	0.1	99.1

Valori composizionali della lega. Dati normalizzati⁽³⁸⁾

Siamo in presenza di una lega di piombo i cui contenuti, mostrano le tipiche impurezze dell'arrostimento della galena (PbS), così come descritto da Plinio⁽³⁹⁾.

Come detto, sebbene questo risultato non sia di per sé anomalo, lo è nell'assenza dell'elemento ferro. Le motivazioni dell'assenza di un'evidenza sperimentale della composizione ferrosa della *grappa* è da ricercarsi più in una deficienza della tecnica XRF che nell'uso del piombo quale elemento di giunzione tra i diversi blocchi lapidei. È infatti improbabile che un elemento malleabile quale il piombo potesse fornire i requisiti meccanici normalmente espletati dalle *grappe* di ferro, usualmente in essere nell'architettura romana. La motivazione della mancata determinazione del ferro è da ricercarsi, più probabilmente, nell'impossibilità per i raggi X usati nell'analisi XRF di indagare strati profondi del metallo, per via della loro scarsa penetrazione nel piombo. L'ipotesi dunque più verosimile è che le *grappe* siano state completamente ricoperte dal piombo fuso utilizzato per il riempimento dei fori creati sui conci, come era d'uso nell'opera quadrata romana⁽⁴⁰⁾.

(37) I valori espressi nella tabella sono da intendersi come valori percentuali degli elementi costituenti il metallo e sono stati riportati indicando un numero di cifre significative che tenesse conto di un errore pari almeno a 3σ . Per ragioni grafiche non viene riportato l'errore per ogni singola misura che si può comunque considerare come incertezza sull'ultima cifra riportata. Non essendo questa la sede per fare una trattazione degli elementi in traccia, sono state impostate delle soglie che omettessero valori nell'ordine delle centinaia di parti per milione (ppm). Gli elementi riportati in tabella rappresentano quelli che hanno mostrato una certa ripetibilità nel risultato e non sono frutto di una distribuzione casuale. I dati non sono stati normalizzati.

(38) Si veda nota 37.

(39) PLINIO IL VECCHIO, *Naturalis Historia*, XXXIII, 1-100. XXXIV, 54, XXXV, 19.

(40) L. PAYEN, *Nuovo dizionario universale tecnologico o di arti e mestieri* XII, Venezia 1839, p. 244.

Conclusioni

La metodologia di indagine adottata, sebbene corretta dal punto di vista della salvaguardia del bene archeologico, non ha permesso di soddisfare completamente la discussione sulla composizione chimica delle *grappe* che in origine costituivano una parte integrante dell'arco di Augusto in Susa.

La rilevanza nella determinazione del piombo e i relativi dati composizionali, permettono di suffragare le ipotesi sulle tecnologie di raffinazione dei metalli usate dai romani. Tale dato andrebbe però integrato con una valutazione strutturale di metalli utilizzati, per esempio mediante il prelievo di micro campioni che fossero rappresentativi della composizione stratigrafica della *grappa*.