

DOMENICO POGGI*

INDAGINI *IN SITU* E IN LABORATORIO FINALIZZATE ALLO STUDIO DEL MARMO E SUE PRINCIPALI ALTERAZIONI

Analisi petrografica su sezione sottile, al microscopio polarizzatore, esami isotopici ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$) mirati all'identificazione del litotipo e relativa provenienza.

Osservazioni allo stereo-microscopio con test microchimici

During the first phases of the restoration of the artefact, in situ examinations and laboratory analyses were conducted on representative samples of the stone material and its main forms of alteration. The observed study methodology, described in this work, allowed the marble to be identified as "Pentelic", extracted from the mountain of the same name near Athens (Greece). Visual observations, microscopic investigations and simple microchemical tests have made it possible to define the main forms of macroscopic alteration according to UNI 11182:2006, also highlighting the possible formation mechanisms. During the in situ investigations, possible residues of reddish polychromy were identified, the possible study of which was however postponed until the end of the cleaning operations.

1. PREMESSA

Durante le prime fasi dell'intervento di restauro sono stati condotti esami macroscopici finalizzati alla preliminare caratterizzazione sia dei vari frammenti di marmo della scultura sia delle loro principali forme di alterazione.

L'esame autoptico, oltre ad individuare le principali forme di deterioramento, ha consentito di acquisire informazioni di primo livello, utili a "restringere il campo" delle possibili provenienze del marmo. Al termine delle osservazioni si è proceduto al prelievo di quattro campioni, eseguito tenendo conto di quanto riportato nella norma UNI EN 16085:2012.

Gli obiettivi principali delle indagini sono stati i seguenti:

- identificare il litotipo e, quindi, definirne la provenienza comparando i risultati ottenuti con quelli che caratterizzano i più importanti marmi bianchi impiegati in antico¹;
- classificare secondo UNI 11182:2006 le principali forme di alterazione macroscopica;
- verificare la possibile presenza di tracce di policromie sotto alle incrostazioni.

¹ ANTONELLI, LAZZARINI 2015; ATTANASIO *et al.* 2015; BRILLI *et al.* 2018; WIELGOSZ-RONDOLINO *et al.* 2020.

2. MATERIALI E METODI

Nel corso dell'intervento *in situ*, al termine delle osservazioni macroscopiche, sono stati prelevati quattro campioni: due dal marmo costitutivo, due dalle forme di deterioramento più diffuse. In particolare, i prelievi rappresentativi del materiale lapideo sono stati asportati dalla superficie di frattura “fresca” della gamba destra, presso la zona superiore dell'arto (campioni nn. 1 e 2: *fig. 2*). Poiché la gamba si è distaccata dal resto² del corpo durante il ritrovamento del reperto i prelievi rappresentano gran parte della scultura.

I campioni nn. 3 e 4 hanno compreso poche scaglie millimetriche rappresentative delle *incrostazioni* che ricoprivano gran parte della superficie dei frammenti lapidei.

In laboratorio tutti i prelievi sono stati esaminati allo stereo-microscopio³, indagine propedeutica a qualsiasi altra analisi di approfondimento; nel caso dei campioni rappresentativi delle incrostazioni (nn. 3 e 4) tale esame, corredato di test microchimici e documentazione microfotografica, ha permesso di definirne preliminarmente morfologia e relative sequenze stratigrafiche, permettendone la classificazione.

Con la scaglia di marmo compresa nel prelievo n. 1 è stata allestita la sezione sottile utilizzata per l'analisi petrografica al microscopio polarizzatore⁴. Sul materiale in polvere del campione n. 2 è stata effettuata la determinazione dei rapporti $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ e $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ con restituzione dei risultati in unità δ , calcolate rispetto allo standard internazionale PDB⁵.

Questi due tipi di indagini, tra loro complementari, hanno consentito di identificare il marmo definendone la provenienza. A tal proposito è importante sottolineare che per identificare i marmi bianchi è necessario combinare più metodologie analitiche.

La metodologia più diffusa, di cui si ha un'ampia banca dati, prevede la combinazione tra studio mineralogico - petrografico in sezione sottile, determinazione dei rapporti isotopici $\text{C}^{13}/\text{C}^{12}$ e $\text{O}^{18}/\text{O}^{16}$ e, talora, l'analisi di alcuni elementi chimici “indice” (stronzio, magnesio, manganese, ecc.)⁶.

Metodi diversi, in parte complementari, consistono nell'affiancare ad alcune semplici osservazioni microscopiche, da eseguire talora anche *in situ* (misura dell'M.G.S.: Maximum Grain Size del marmo), la determinazione dei rapporti isotopici, le misure *EPR* (risonanza paramagnetica elettronica) e, per quanto concerne i “marmi a grana fine”, la misura della concentrazione di alcuni elementi chimici in traccia. Queste informazioni vengono poi elaborate statisticamente mediante analisi multivariata.

A prescindere dal tipo d'indagini è importante conoscere l'ambito storico - archeologico e geografico in cui sono collocati i reperti oggetto di studio. In molti casi fondamentale è anche l'esame macroscopico del marmo che, oltre a consentire il prelievo mirato dei campioni da analizzare in laboratorio, permette spesso una prima classificazione dei materiali lapidei⁸, fondamentale quando non è possibile eseguire lo studio petrografico ma solamente analisi strumentali.

² Gli esami autoptici hanno suggerito che anche la base con i piedi e gli altri frammenti sono coerenti con il resto dell'opera. Peraltro, le zone di frattura dei vari pezzi combaciavano.

³ Stereo-microscopio Leitz Elvar con ingrandimento in continuo da 6,3 a 50x.

⁴ La sezione, allestita con resina epossidica bi-componente, è stata studiata con un microscopio ottico Leitz Laborlux 12 Pol, dotato di illuminatore Leitz Type 307-148.004 514709 e degli obiettivi elencati nel seguito. NPL Fluotar 5X/0,09 DF; NPL Fluotar 10X/0,22 DF; $\infty/0/30 - 20X/0,30 P$; $\infty/0/30 - 50X/0,65 P$.

⁵ MC CREA 1950, pp. 849-857.

⁶ WIELGOSZ-RONDOLINO *et al.* 2020.

⁷ PROCHASKA *et al.* 2018, pp. 175-183.

⁸ Marmi a grana fine, media o grossolana (GORGONI *et al.* 2002, pp. 115-131).



1. TESSITURA FOLIATA DEL MARMO EVIDENZIATA DALLA DEGRADAZIONE DIFFERENZIALE E DALLE VENE BIGIASTRE DISPOSTE PARALLELAMENTE ALL'ALLUNGAMENTO DELLA SCULTURA (foto Autore)



2. ZONA PRELIEVO DEI CAMPIONI NN. 1 E 2 (foto Autore)



3. SEZIONE SOTTILE, LUCE TRASMESSA POLARIZZATA, NICOLS INCROCIATI. LATO LUNGO IMMAGINE ACQUISITA CON OBIETTIVO 5X, LUNGHEZZA DI CIRCA 2,82 MM (foto Autore)



4. SEZIONE SOTTILE, LUCE TRASMESSA POLARIZZATA, NICOLS INCROCIATI. LATO LUNGO IMMAGINE, ACQUISITA CON OBIETTIVO 10X, LUNGHEZZA DI CIRCA 1,41 MM (foto Autore)

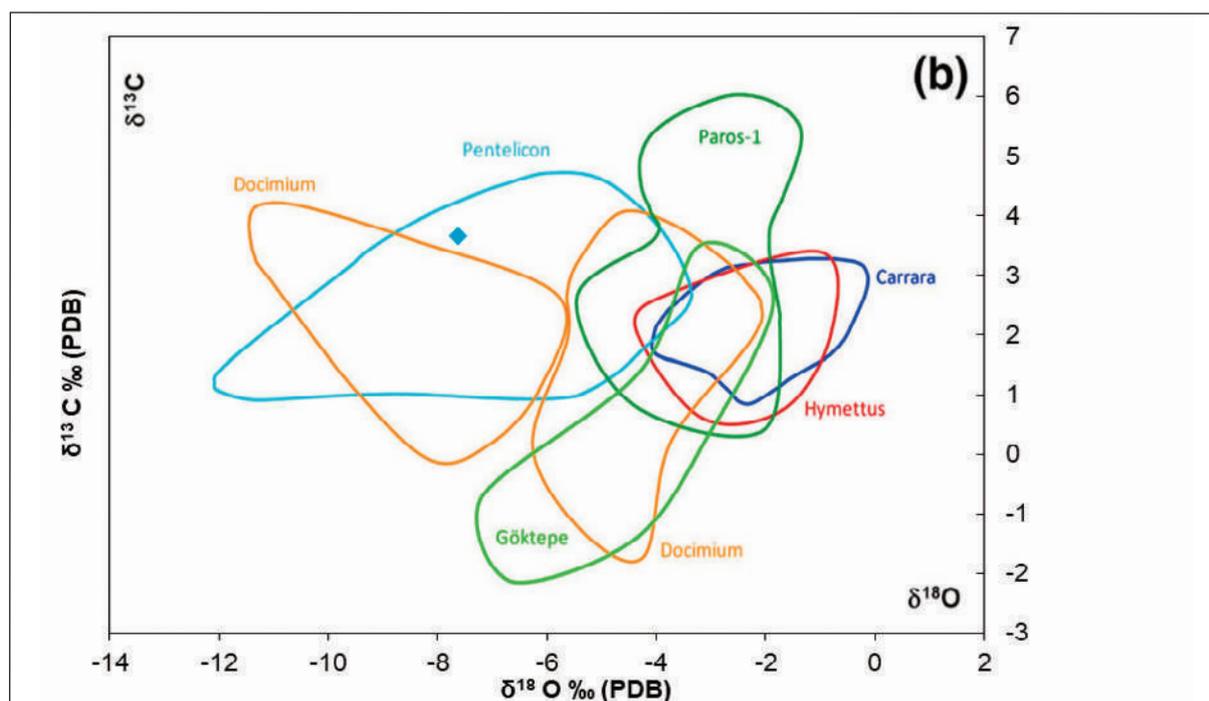
3. SINTESI E INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI

Le osservazioni macroscopiche e, soprattutto, i risultati delle analisi petrografiche ed isotopiche ($\delta^{13}\text{C} - \delta^{18}\text{O}$) hanno consentito di identificare inequivocabilmente nel *marmo pentelico* (estratto sul Monte omonimo presso Atene) il materiale lapideo da cui deriva la scultura. In particolare, si tratta della facies più tipica del marmo pentelico caratterizzata da grana fine⁹ e tessitura nettamente orientata (“foliata”), come segnalato dall’allineamento di vene e plaghe verticali di colore verde bigiastro parallele all’allungamento della statua (*fig. 1*). Tali strutture, di spessore variabile da millimetrico a centimetrico, oltre che per la colorazione si caratterizzano per la presenza di minerali accessori tra cui fillosilicati (miche e cloriti di tonalità argentea e verdastra), quarzo e probabilmente dolomite. Gli ultimi due minerali, presenti come piccole granulazioni da millimetriche a sub-millimetriche, risultano in aggetto rispetto alla matrice di calcite che li ingloba a causa della maggiore resistenza all’erosione: degradazione differenziale (*fig. 1*).

Lo studio petrografico su sezione sottile al microscopio polarizzatore ha indicato che anche micro-struttura e composizione del materiale lapideo corrispondono all’olotipo del marmo estratto sul Monte Pentelico. I cristalli di calcite, dai bordi di forma prevalentemente lobata (“a golfi”: *fig. 4*), risultano sovente allungati parallelamente ad una direzione preferenziale, definita anche dall’orientamento sia di plaghe di ricristallizzazione a grana molto fine sia delle lamine di mica chiara (*figg. 3-4*). Alcuni grani di calcite presentano lievi deformazioni delle tracce di geminazione polisintetica, mentre altri cristalli mostrano segni di tensionamento ai bordi e/o aloni di ricristallizzazione.

⁹ Sulla base delle dimensioni del cristallo più grossolano della compagine (Maximum Grain Size), i marmi vengono suddivisi in tre categorie: a grana fine (M.G.S. > 2,0 mm), a grana media (2,0 mm < M.G.S. < 5,0 mm), a grana grossa (M.G.S. > 5,0 mm).

Un'ulteriore conferma che il reperito fu realizzato con il marmo del Partenone è stata fornita dai risultati degli esami isotopici ($\delta^{13}\text{C}$ ed $\delta^{18}\text{O}$), proiettati nel diagramma di riferimento dei marmi a grana fine (*fig. 5*)¹⁰. I valori sperimentali ottenuti dall'analisi isotopica $\delta^{18}\text{O} \text{‰}$ (-7,62 PDB) e $\delta^{13}\text{C} \text{‰}$ (+3.65 PDB) si incrociano in un punto situato all'interno della sola ellisse pertinente il marmo pentelico¹¹; pertanto, possono essere escluse le provenienze degli altri più importanti marmi a grana fine (M.G.S. < 2,0 mm) diffusi in tutto l'impero: Alpi Apuane (*marmo lunense*), presso Marathi nell'Isola di Paros (*paros-1*), Kessariani, in "prossimità" di Atene (*m. imetto*), Göktepe, presso Efeso in Turchia (*m. di Göktepe*), presso Docimium nell'antica Frigia, attuale Turchia (*m. docimio*).



5. DIAGRAMMA ISOTOPICO DEI PIÙ IMPORTANTI MARMI A GRANA FINE (MAXIMUM GRAIN SIZE MINORE DI 2,0 MM) IMPIEGATI IN ANTICO (ANTONELLI, LAZZARINI 2015, FIG. 7B). IL ROMBO AZZURRO INDICA IL PUNTO DOVE S'INCROCIANO I VALORI SPERIMENTALI $\delta^{18}\text{O} \text{‰}$ (-7,62 PDB) E $\delta^{13}\text{C} \text{‰}$ (+3.65 PDB). IL ROMBO È SITUATO ALL'INTERNO DEL CAMPO RELATIVO AL MARMO PENTELICO (elaborazione Autore)

Le principali forme di alterazione macroscopica (sensu UNI 11182:2006) che, prima della pulitura, interessavano le varie porzioni della statua sono classificabili tra le incrostazioni e le concrezioni carbonatiche (*figg. 6-7*). Altre forme di deterioramento del marmo sono le seguenti: degradazione differenziale, talora anche accentuata, a spese di livelli e vene di colore grigio verdastro ricchi di fillosilicati (miche e cloriti); erosione; mancanze.

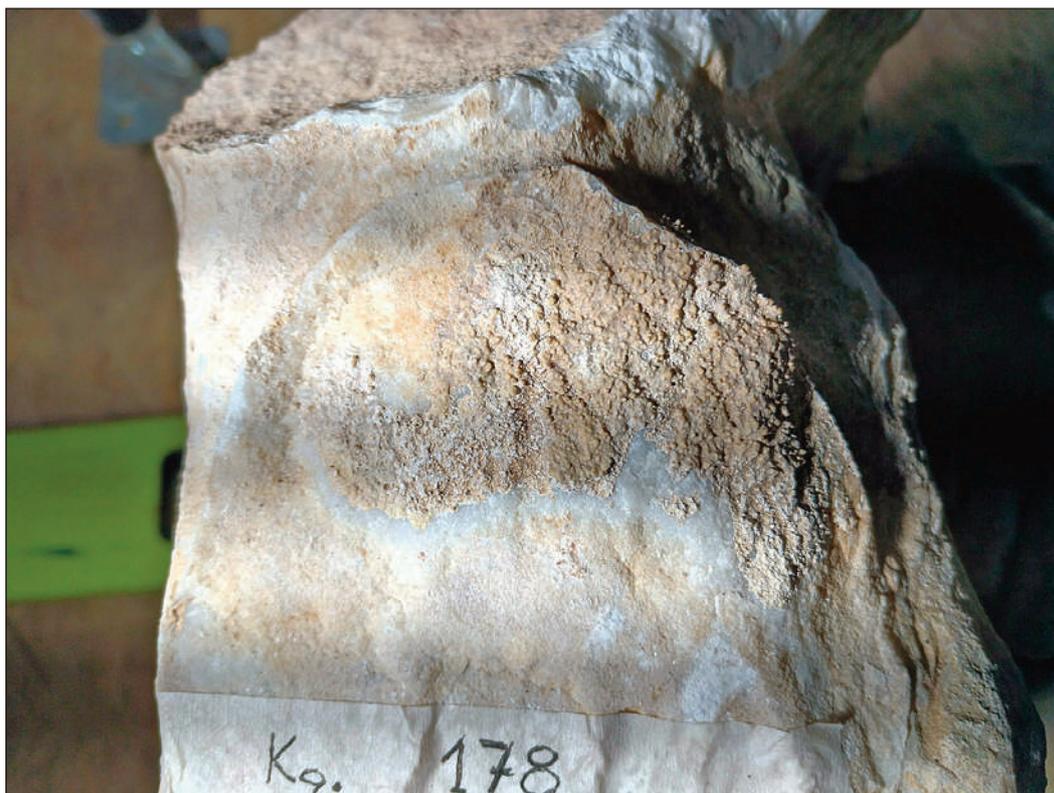
Incrostazioni e concrezioni si sono formate nel corso del periodo d'interro, come è parso evidente sia dal loro andamento (*fig. 6*) sia dal fatto che ricoprivano anche le parti fratturate prima del seppellimento dei manufatti¹².

La colorazione rosa dei depositi carbonatici, determinata dall'inglobamento di particelle di terreno (tra cui "pozzolana"), rappresenta un ulteriore indizio che conferma quanto sopra affermato circa l'origine di incrostazioni e concrezioni.

¹⁰ Proposto recentemente da ANTONELLI, LAZZARINI 2015, fig. 7b.

¹¹ Si veda anche in SCOTT 2000.

¹² Incrostazioni e concrezioni ricoprivano lati e dorso della scultura che giaceva supina; le acque di infiltrazione avevano modo di percolare lungo le superfici lavorate, solubilizzare il carbonato di calcio e, quindi, deporre la calcite più in basso.



6. BASAMENTO, PARTE INFERIORE DEL PILASTRINO DI SOSTEGNO DELLA SCULTURA. SI OSSERVANO INCROSTAZIONI, TALORA PASSANTI A VERE E PROPRIE CONCREZIONI, CHE RICOPRONO LE SUPERFICI DI FRATTURA PRE-INTERRO (foto Autore)



7. STEREO-MICROSCOPIO, LUCE RIFLESSA. L'INTERVALLO TRA LE TACCHE DEL RIFERIMENTO MISURA MM 1,0. L'IMMAGINE ILLUSTRA LE DUE SCAGLIE COMPRESSE NEL PRELIEVO N.3 RIPRESE DALLA FACCIA ESTERNA: EVIDENTE LA STRUTTURA "A GRAPPOLO" TIPICA DELLE INCROSTAZIONI-CONCREZIONI (foto Autore)

Mentre le mancanze precedono l'interro¹³, parte dell'erosione e della degradazione differenziale può essersi formata anche nel corso del seppellimento. Ci si riferisce in particolare alle forme rilevate sul viso e sul petto (*fig. 1*), le zone più a contatto con le acque d'infiltrazione provenienti dalla superficie.

Possibili residui di policromie di tonalità rossastra (originali o accidentali) sono stati individuati sia macroscopicamente, nel corso delle osservazioni autoptiche condotte *in situ*¹⁴, sia durante gli esami microscopici (campione n. 4). Tuttavia, si è scelto di rimandare il loro studio al termine delle operazioni di pulitura, periodo durante il quale i restauratori hanno il tempo di individuare meglio le eventuali tracce cromatiche, isolarle dalle *incrostazioni* e predisporre le condizioni per eventuali analisi *in situ* e in laboratorio mirate alla loro qualificazione.

*Geologo professionista
artelab@libero.it

¹³ Ad eccezione naturalmente di quelle prodotte incidentalmente in occasione della scoperta del reperto.

¹⁴ Sul frammento principale: lato sinistro presso il manto, la pelle del leone e la spalla; sul basamento comprendente i piedi.

Bibliografia

ANTONELLI, LAZZARINI 2015: F. ANTONELLI, L. LAZZARINI, “An updated petrographic and isotopic reference database for white marbles used in antiquity”, in *RendLincei* 26 (4), pp. 339-413.

ATTANASIO *et al.* 2015: D. ATTANASIO, M. BRUNO, W. PROCHASKA, A. B. YAVUZ, “A multi-method database of the black and white marbles of Göktepe (Aphrodisias), including isotopic, EPR, trace and petrographic data”, in *Archaeometry* 57, 2, pp. 217-245.

BRILLI *et al.* 2018: M. BRILLI, M. P. LAPUENTE MERCADAL, F. GIUSTINI, H. ROYO PLUMED, “Petrography and mineralogy of the white marble and black stone of Göktepe (Muğla, Turkey) used in antiquity: new data for provenance determination”, in *JASc Report* 19, pp. 625-342.

GORGONI *et al.* 2002: C. GORGONI, L. LAZZARINI, P. PALLANTE, B. TURI, “An updated and detailed mineralogical and C-O stable isotopic reference database for the main Mediterranean marbles used in antiquity”, in J. HERRMANN, N. HERZ, R. NEWMAN (a cura di), *ASMOSIA V, Interdisciplinary Studies on Ancient Stone* (Proceedings of the Fifth International Conference of the Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity, Museum of Fine Arts, Boston, June 1998), London, pp. 115-131.

MC CREA 1950: J. M. MC CREA, “On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale”, in *J.Chem.Phys.* 18, pp. 849-857.

PROCHASKA *et al.* 2018: W. PROCHASKA, D. ATTANASIO, M. BRUNO, “Unraveling the Carrara - Göktepe entanglement”, in: D. MATETIC POLJAK, K. MARASOVIC (a cura di), *ASMOSIA XI Interdisciplinary Studies of Ancient Stone* (Proceedings of the Eleventh International Conference of ASMOSIA; Split 2015), Split, pp. 175-183.

SCOTT 2000: HARRIS PIKE, SCOTT, *Archaeological Geology and Geochemistry of Pentelic marble, Mount Pentelikon, Attica, Greece, Athens, Georgia* (https://getd.libs.uga.edu/pdfs/pike_scott_h_200012_phd.pdf; ultimo accesso 16 dicembre 2023).

UNI 11182/2006: Commissione Tecnica UNI, Beni Culturali - NORMAL), *Beni culturali. Materiali lapidei naturali ed artificiali. Descrizione della forma di alterazione - Termini e definizioni* (<https://www.uni.com/?s=uni+beni+culturali>; ultimo accesso 12 marzo 2024).

UNI EN 16085:2012: Commissione Tecnica UNI, Beni Culturali - NORMAL), *Conservazione dei beni culturali - Metodologia per il campionamento dei materiali costituenti i beni culturali - Regole generali*; <https://www.uni.com/?s=uni+beni+culturali> (ultimo accesso 12 marzo 2024).

WIELGOSZ-RONDOLINO *et al.* 2020: D. WIELGOSZ-RONDOLINO, F. ANTONELLI, M. J. BOJANOWSKI, M. GŁADKI, M. C. GOUNCÜOĞLU, L. LAZZARINI, “Improved methodology for identification of Göktepe white marble and the understanding of its use: A comparison with Carrara marble”, in *JASc* 113 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305440319301463>; ultimo accesso 16 dicembre 2023).