

PROTOCOLLI DI ANALISI PER LO STUDIO DELLE MALTE. TRA APPLICAZIONI ARCHEOMETRICHE E NUOVE PROPOSTE SOSTENIBILI PER IL RESTAURO

1. ANALISI ARCHEOMETRICHE APPLICATE ALLO STUDIO DELLE MALTE: STATO DELL'ARTE

Le malte ottenute a partire dalla miscelazione di leganti, aggregati, acqua e additivi, costituiscono un'importante categoria di materiali da costruzione introdotti all'interno delle architetture con lo scopo di unire i singoli elementi, di accrescerne la resistenza o di proteggerne le superfici (ARTIOLI 2010). Il loro uso crescente nel corso della storia ha costituito una vera e propria rivoluzione nel modo di concepire le opere edilizie, in particolare favorendo l'introduzione di singole unità costruttive di piccole dimensioni estremamente adatte alla realizzazione di sistemi architettonici complessi (VITTI 2021). Tra i costituenti di cui anticipato, additivi e *admixtures* contribuiscono al miglioramento e alla modifica di alcune proprietà fisico-meccaniche delle miscele leganti (FARINHA *et al.* 2021). Nel caso delle malte di allettamento la maggiore resistenza meccanica e la lavorabilità intrinseca derivate dal tipo di materie prime selezionate per la produzione, oltre a favorire un'applicazione modulare tra i singoli elementi costruttivi, influiscono direttamente sul comportamento strutturale dell'edificio: maggiore è la capacità di coesione della malta, migliore sarà il comportamento di insieme della struttura (VITTI 2021). La complessità dei materiali di cui si discute, implica necessariamente l'adozione di un metodo di studio multi-analitico che unisca indagini chimiche, mineralogiche, petrografiche e fisico-meccaniche; tale approccio consente infatti di delinearne una caratterizzazione completa offrendo informazioni sulla natura dei materiali impiegati e sulla perizia tecnica delle maestranze coinvolte, aspetto che trova correlazione diretta sia con la pragmatica e consapevole selezione di alcune materie prime, sia nella scelta dei metodi di lavorazione adottati per periodo cronologico in un dato contesto esaminato (PECCHIONI *et al.* 2014).

Un completo studio di carattere archeometrico applicato all'analisi dei materiali da costruzione, con specifico interesse per i materiali leganti, permette di approfondire conoscenze relazionate alla geologia di un sito, alle fasi costruttive di un'opera architettonica, nonché di supportare le indagini che precedono interventi di restauro. La diffusione di nuove tecnologie nei settori appena menzionati e rivolte allo studio di malte e leganti sta permettendo ad oggi di ampliare il numero di risposte deducibili non solo per quanto concerne i prodotti ad uso edilizio, ma anche i materiali leganti di interesse culturale. In particolar modo, notevoli progressi si registrano sia

per i software di imaging impiegati nelle analisi di microscopia ottica – a partire dalle prime osservazioni sulla stratigrafia dei campioni fino alle analisi quantitative rivolte al rapporto legante/aggregato e alla porosità (PIOVESAN *et al.* 2022) – sia in riferimento ai programmi utilizzati per il raffinamento del dato mineralogico con metodo Rietveld (GUALTIERI *et al.* 2019); tra questi ultimi si menzionano i più ricorrenti nell’ambito archeometrico: Profex/BGMN (DÖBELIN, KLEEBERG 2015), HighScore Plus (Malvern PANalytical, Malvern, UK) e TOPAS (Bruker AXS, Karlsruhe, DE). L’ulteriore progresso disciplinare avvenuto nei settori di studio scientifico applicato ai materiali da costruzione sta inoltre fornendo nuovi input in ambito culturale anche per quanto concerne l’utilizzo di test fisico-meccanici su malte e materiali cementizi. Tra le soluzioni di più ampio uso risultano frequenti l’adozione di prove distruttive di compressione e prove di microdurezza: l’obiettivo del primo tipo di test è quello di determinare il comportamento o la risposta di un materiale sottoposto a carico di compressione attraverso la misurazione di variabili come la deformazione, lo stress e la pressione; il secondo tipo di prova, eseguita con carichi statici o dinamici localizzati in aree puntuali della superficie dell’oggetto in esame, verifica la durezza del materiale oltre che la sua resistenza a deformazione (IGARASHI *et al.* 1996).

L’applicazione delle procedure di analisi di cui esposto permette di indagare approfonditamente i materiali moderni come anche i materiali di interesse storico. Lo sviluppo di nuove tecnologie per lo studio di materiali leganti sta inoltre promuovendo nuove riflessioni incentrate sul tipo di materie prime impiegate per la produzione di leganti e malte: grazie all’integrazione di studi archeometrici e archeologici, risulta sempre più evidente come alcune pratiche standardizzate di architettura vernacolare, dunque quel sistema di saperi tradizionali che viene a costituire una cultura costruttiva, continuino ad essere presenti nelle opere contemporanee quali testimoni di pratiche e conoscenze tecniche relazionate alle esigenze ambientali, economiche e sociali di intere comunità umane (DIPASQUALE, MECCA 2016). L’attenta reintroduzione di pratiche costruttive di minore impatto ambientale e connesse a materiali di riuso o di scarto provenienti da altri cicli di lavorazione primaria, costituisce un campo di ricerca innovativo che sta progressivamente influenzando anche lo sviluppo di nuovi prodotti ispirati ai materiali da costruzione impiegati in esempi di architetture a valore storico-culturale. Tra le ricerche recenti in materia, si introduce a seguire un caso studio esemplificativo per ciò che concerne l’uso efficace di procedure multi-analitiche integrate. All’interno del contesto medievale di San Giovanni Evangelista in Castelseprio (VA), l’analisi dettagliata di alcuni campioni di malte, ha permesso di comprendere come miscele apparentemente semplici, costituite dallo sfruttamento di geo-risorse locali, abbiano consentito la realizzazione di prodotti finali complessi a reazione di tipo pozzolanico.

2. LE MALTE DI SAN GIOVANNI EVANGELISTA IN CASTELSEPPIO (VA)

2.1 *Introduzione al sito: inquadramento geologico e storico-archeologico*

Nel corso degli ultimi decenni il Parco Archeologico di Castelseprio, insieme al complesso monasteriale di Torba, hanno acquisito notevole rilievo culturale sia su scala regionale che nazionale; riconosciuti come siti cardine per la narrazione storica connessa alle *gentes Langobardorum*, continuano a mantenere un importante ruolo grazie all'accoglienza di studi pluridisciplinari sempre più attenti ad integrare analisi scientifiche e metodologie proprie dell'ambito archeologico. Dal 2011, l'inserimento ufficiale nella Lista del Patrimonio Mondiale dell'UNESCO come parte integrante del sito seriale “Longobardi in Italia, i luoghi di potere” ne ha sancito nuovamente la posizione di spicco soprattutto per quanto riguarda gli aspetti connessi alla tutela, alla conservazione e alla fruizione da parte dei differenti pubblici (DE MARCHI 2013; BROGIOLO, CHAVARRÍA ARNAU 2021). Il sito di Castelseprio, che accoglie il *castrum* tardoantico e il borgo medievale, si colloca su un pianalto fluvioglaciale a 357 m s.l.m., tra le valli dei corsi fluviali Tenore e Olona (BROGIOLO, CHAVARRÍA ARNAU 2021). Le unità allostratigrafiche¹ caratteristiche di questi territori, inquadrabili negli anfiteatri morenici del Verbano e del Lario, si alternano a una serie di unità litostratigrafiche profonde la cui caratterizzazione litologica, costituita da una maggioranza di clasti alpini, carbonatici e in minoranza vulcanici, può essere descritta attraverso l'osservazione delle sezioni affioranti sulla destra idrografica dell'Olona, dove si includono anche le formazioni di Torba e Castelseprio (ZUCCOLI 2000). Lo schema dei rapporti stratigrafici nell'Anfiteatro del Verbano (BINI, ZUCCOLI 2012, 54, fig. 3), oltre a riportare la successione tra le formazioni sepolte dell'antica Valle Olona e il Ceppo dell'Olona, descrive la natura dei depositi distinti principalmente in ghiaie e sabbie soggette a trasporto fluvioglaciale e caratterizzate nella loro porzione sommitale da processi di alterazione cronologicamente attribuibili all'interglaciale Mindel-Riss (BINI, ZUCCOLI 2012). I clasti alterati risultano inglobati in una matrice argillosa rossastra che presenta un'alta concentrazione di ossidi di ferro e alluminio, esito dei processi di decalcificazione e idrolisi avvenuti sui materiali originari (FONTANA 2012).

Procedendo a ritroso nella ricostruzione della storia e dell'archeologia sepriense, si riporta attenzione alle attività di ricerca che hanno interessato il sito. In alcune aree di Vico Seprio gli scavi e gli studi archeologici condotti a partire dalla metà degli anni Quaranta hanno permesso di inquadrare la

¹ Nel 1983 la North American Commission on Stratigraphic Nomenclature ha introdotto tale definizione per identificare corpi stratiformi di rocce sedimentarie distinguibili dalle caratteristiche delle loro superfici limite.

prima frequentazione dell'area tra Bronzo Medio e Ferro, e di rilevare alcune sporadiche evidenze di periodo romano perlopiù come elementi architettonici di reimpiego in porzioni murarie o strutture tombali (DE MARCHI 2011, 2013). Il recente avvio delle indagini archeologiche nel quadro del progetto “Castel Seprio, centro di potere” intende promuovere uno studio approfondito delle sedi di potere religioso e civile altomedievali nell’ottica delle relazioni intessute con i territori della Valle dell’Olona; tra i luoghi oggetto di studio rientra la chiesa di San Giovanni Evangelista (BROGIOLO 2020). Nella prime menzioni scritte dell’edificio risalenti intorno al Mille se ne evince il ruolo di battesimale plebana mantenuto come tale fino al XVI secolo, oltrepassando dunque la fase di crisi del 1287, scaturita dopo l’invasione di questi territori da parte dei Visconti (DE MARCHI 2011). L’edificio religioso in esame, rientrante nel complesso di San Giovanni che include il battistero di San Giovanni Battista, la torre campanaria e la cisterna (BROGIOLO 2022, 239, fig. 3), si preserva in alzato per un’altezza inquadrabile tra i 6 e i 10 m, nelle porzioni murarie dei perimetrali e nelle due absidi; lo studio archeologico-architettonico, in combinazione con i dati delle prospezioni georadar, ha fatto presupporre una suddivisione interna in tre navate. Per quanto riguarda le tecniche murarie, l’impiego di ciottoli grossolani e pietre spaccate uniti da malta negli elevati – con litotipi di origine metamorfica tra cui scisti, gneiss, serpentiniti, anfiboliti affiancati a minoranze di calcari dolomitici, travertini e conglomerati – trova corrispondenza anche nei lacerti murari emersi nell’area di scavo interna alle strutture perimetrali e attribuibili a un edificio ecclesiastico preesistente che recenti riletture stratigrafiche, incentrate nello studio del rapporto tra battistero e muri perimetrali, permettono di ricollocare tra tardoantico e alto medioevo (DE MARCHI 2013; BROGIOLO 2022; SBROGIÒ *et al.* 2024).

2.2 *Finalità, metodologie e strumenti di ricerca*

Seguendo la linea di indagine definita dal progetto sui centri di potere di Castel Seprio, lo studio delle malte provenienti da una selezione di alcune strutture tombali e architettoniche rinvenute entro i perimetrali dell’edificio ecclesiastico, mirava a incentivare nuove riflessioni sulle fasi di costruzione e sulle maestranze coinvolte nel cantiere in esame. Le domande di ricerca poste in questa sede hanno richiesto l’applicazione di procedure standardizzate di analisi, diffuse in ambito archeometrico e miranti a una piena caratterizzazione petrografica, mineralogica, micro-strutturale e chimica dei materiali; in particolare l’integrazione di tutte le tecniche elencate ha condotto le indagini verso un approfondimento completo sia qualitativo che quantitativo dei materiali archeologici prescelti. La fase di studio archeometrico, anticipata dalle attività di campionamento in scavo e di preparazione dei campioni in laboratorio, si è svolta rispettando il seguente iter multi-analitico:



Fig. 1 – Micrografia OM-TL in nicols paralleli del campione CS_04. Al centro, un inerte di argillite.

- studio petrografico preliminare svolto sia macroscopicamente su porzioni rappresentative di campione, al fine di descrivere i parametri colore, dimensionali e di coesione della malta, che microscopicamente (Fig. 1) su preparati in sezione sottile lucidata dello spessore di 30 μm , con l’obiettivo di caratterizzarne legante ed aggregato e di riconoscere l’eventuale presenza di calcinaroli e additivi²;
- adozione della microscopia elettronica a scansione con microanalisi EDS (SEM-EDS) (Fig. 2) per lo svolgimento di analisi microstrutturali e chimiche puntuali delle sezioni sottili delle malte;
- diffrazione ai raggi X delle polveri dei campioni integrali micronizzati e delle polveri dei separati gravimetrici dei leganti (XRPD)³ per l’esecuzione di analisi qualitative e quantitative volte alla determinazione delle fasi mineralogiche.

La corretta esecuzione delle procedure analitiche di cui esposto ha previsto primariamente l’impiego di macchinari funzionali alla preparazione dei campioni stessi e in una seconda fase l’adozione di apparati strumentali e software associati. Per la parte di analisi delle variazioni cromatiche si è fatto uso di un colorimetro PCE-XXM 30; per lo studio petrografico si è ricorso a un microscopio a luce trasmessa Nikon Eclipse Me 600 equipaggiato con macchina fotografica Canon EOS 600D utile per l’acquisizione di

² Le analisi macroscopica e microscopica sono state effettuate seguendo le prescrizioni della normativa uniformata UNI 11176 del 2006.

³ Tra le fasi di lavorazione preliminare del campione si è prevista anche l’addizione di ossido di zinco in quantità nota utile per determinare il contenuto di amorfo mediante il metodo combinato Rietveld-RIR.

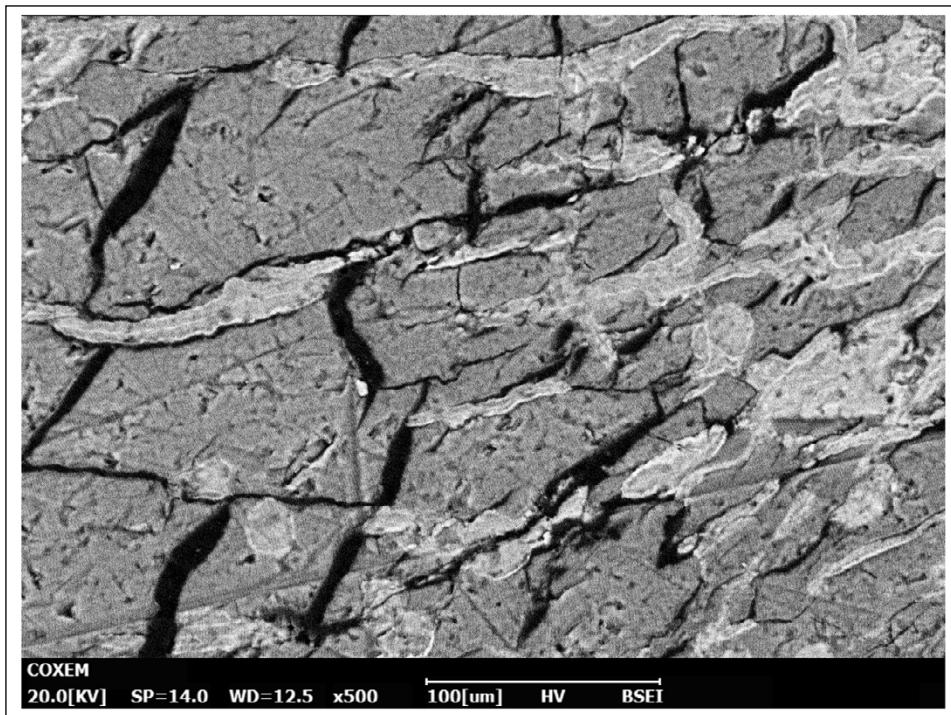


Fig. 2 – Immagine a elettroni retrodiffusi del campione CS_07. Dettaglio microstrutturale di una argillite.

immagini mediante software abbinato EOS Utility. Per l'analisi microchimica e microstrutturale si è usufruito di un microscopio COXEM EM 30AX Plus con associato sistema a dispersione di energia EDAX Element-C2B; la rilettura qualitativa e poi semi-quantitativa dei dati è stata effettuata con software EDAX TEAM. Infine, lo studio in diffrazione delle polveri ha incluso l'utilizzo di un diffrattometro PANalytical X'Pert PRO a geometria Bragg-Brentano. I pattern di diffrazione sono stati interpretati con l'uso del software associato X'Pert HighScore Plus 3.0, il quale ha permesso di svolgere una prima valutazione qualitativa dei profili mineralogici attraverso la consultazione incrociata di diversi database cristallografici⁴; i raffinamenti quantitativi secondo metodo Rietveld sono poi stati eseguiti con il software della Bruker TOPAS 4.1 (RAZZANTE 2023).

⁴ Il software permette di avere accesso alle seguenti risorse: ICDD (International Centre for Diffraction Data), COD (Crystallography Open Database), ICSD (Inorganic Crystal Structure Database).

Nome campione	Settore di scavo	Struttura muraria o tombale	Metodologie analitiche applicate
CS_07	C	Struttura tomba 6	Analisi macroscopica, XRPD, OM-TL, SEM-EDS, XRPD SG
CS_17	B	Porzione muraria dell'abside minore con andamento N-W/S-E	Analisi macroscopica, XRPD, OM-TL, SEM-EDS
CS_21	D	Lacero di struttura muraria associabile al primo nucleo ecclesiastico	Analisi macroscopica, XRPD, OM-TL, SEM-EDS, XRPD SG
CS_25	E	Muratura attribuibile alla chiesa precedente con orientamento N-S	Analisi macroscopica, XRPD, OM-TL, SEM-EDS, XRPD SG
CS_27	C	Struttura tomba 17	Analisi macroscopica, XRPD, OM-TL, XRPD SG
CS_33	E	Fondazione pilastro che collega battistero e paramento nord della chiesa	Analisi macroscopica, XRPD, OM-TL, XRPD SG

Tab. 1 – Elenco dei campioni sottoposti a procedura di separazione gravimetrica del legante.

2.3 Risultanze analitiche: i suoli del “Ferretto” come precursori di reazioni pozzolaniche

Lo studio di 31 campioni (18 provenienti da strutture murarie e 13 da strutture tombali), ha portato ad ottenere una suddivisione compositiva delle malte in tre macro-raggruppamenti seguendo primariamente quanto emerso dall'incrocio delle analisi semi-quantitative. Attraverso il trattamento statistico dei dati diffrattometrici con l'analisi delle componenti principali (PCA), è stato possibile riconoscere i seguenti gruppi: i) Gruppo I – campioni ricchi in frazione carbonatica a reazione prevalentemente aerea; ii) Gruppo II – *cluster* caratterizzato da una doppia reazione pozzolanica basata su sistemi sia calcici che magnesiaci, nello specifico alluminosilicati idrati di calcio (C-A-S-H) e magnesio (M-A-S-H); formazione di aliquote dominanti di amorfico esito delle reazioni tra legante calcico e frazione argillosa; iii) Gruppo III – materiali con elevate percentuali di frazione lateritica, soggetti a reazione pozzolanica alternativa e con strutturazione finale di fasi idrate AFm, ovvero composti lamellari di tipo brucitico definiti anche *layered double hydroxides* (VELASCO *et al.* 2012), e fasi M-A-S-H. Successivamente, sei campioni sono stati selezionati per lo svolgimento di ulteriori approfondimenti analitici (Tab. 1); tra questi, quattro (CS_17, CS_21, CS_25, CS_33) sono stati prelevati dalle strutture murarie ritenute parte del primo nucleo di San Giovanni, al fine di chiarire le domande archeologiche connesse alle prime fasi di vita della chiesa; diversamente, per alcune malte delle strutture tombali (CS_07, CS_27), è stato possibile approfondire le risposte fornite dalla prima disamina multi-analitica che hanno posto in evidenza la netta differenziazione compositiva di tali campioni rispetto ai tre raggruppamenti omogenei individuati in precedenza (RAZZANTE 2023).

I campioni fin qui descritti sono dunque stati sottoposti a una procedura standardizzata di separazione e purificazione del legante, solitamente adottata al fine di rimuovere gli aggregati e i potenziali contaminanti riscontrabili durante l'esecuzione di analisi di datazione con il metodo del radiocarbonio. Tale protocollo operativo prevede una prima disaggregazione meccanica dei materiali integrali e una successiva sedimentazione gravimetrica per via umida

Campione	Cal	Mg.cal	Ar	Vat	Dol	Idc	Itc	Idg	To	Br	Qu	Mus	Cl	Cao	Ver	Fs.gel	Em	Am
CS 07 SG	25,70	7,60	5,66	0,00	0,00	0,00	0,35	0,00	0,00	0,00	1,15	0,00	0,00	9,21	0,06	18,88	0,00	31,39
CS 17 SG	47,92	18,78	0,62	0,74	0,00	0,00	2,37	0,00	0,00	0,00	0,52	0,00	0,00	1,73	0,00	4,52	0,00	22,81
CS 21 SG	41,83	4,62	3,73	0,59	0,28	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00	1,48	3,13	1,98	9,88	0,07	11,91	0,28	20,00
CS 25 SG	8,24	2,76	0,60	0,30	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	2,19	3,99	1,75	7,07	0,14	14,00	0,36	57,86
CS 27 SG	5,05	0,00	0,58	0,64	0,00	3,85	17,02	2,44	5,55	8,30	0,52	2,31	2,00	0,00	0,14	8,62	0,00	43,00
CS 33 SG	2,23	0,00	0,00	0,47	0,00	0,00	0,33	0,00	3,05	0,00	1,70	2,53	1,33	2,59	0,16	8,38	0,00	77,75

Tab. 2 – Analisi mineralogica quantitativa dei separati gravimetrici del legante ottenuta mediante raffinamento a profilo totale dei dati di diffrazione secondo il metodo Rietveld. Abbreviazioni: Cal = calcite; Mg-cal = calcite magnesiaca; Ar = aragonite; Vat = vaterite; Dol = dolomite; Idc = idrocumite; Itc = idrotalcite; Idg = idrogranato; To = tobermorite; Br = brucite; Qu = quarzo; Mus = muscovite; Cl = clinocloro; Cao = caolinite; Ver = vermiculite; Fs-gel = gel fillosilicatico; Em = ematite; Am = amoro.



Fig. 3 – Campionamento di suoli ferrettizzati costituiti dalla presenza di argilla e ossidi di Fe, Al e Mg. Fotografia realizzata lungo il sentiero 844B di Mozzate (CO) (“Strada Rossa”).

alternata a fasi di centrifugazione e filtraggio per ottenere una frazione di materiale molto fine (ADDIS *et al.* 2016; RICCI *et al.* 2020).

L'esito ultimo delle analisi fin qui svolte, inclusa l'esecuzione della diffrazione ai raggi X sui separati del legante con l'utilizzo parallelo dei due software HighScore Plus e TOPAS, ha evidenziato il ruolo primario delle frazioni di suolo lateritico locale introdotte all'interno delle malte di San Giovanni; a riprova di ciò, si sottolinea come la consistente strutturazione di fasi pozzolane alternative del tipo M-(A)-S-H, in aggiunta a fasi AFm sia testimonianza evidente della precipitazione di gel-fillosilicatici presenti all'interno di additivi ricchi in magnesio, come emerso anche in altri contesti di studio archeologici (RICCI *et al.* 2020, 2022; SECCO *et al.* 2022). L'analisi in diffrazione eseguita

sui separati gravimetrici dei leganti e incentrata sulle frazioni fillosilicate, ha permesso di contraddistinguere alcune fasi mineralogiche peculiari: clino-cloro, ematite, vermiculite (già precedentemente riconosciute sui campioni integrali polverizzati delle malte), ilmenite, gibbsite e caolinite (Tab. 2). Nel caso del sito in esame, come in alcune aree limitrofe della provincia di Varese e in altri territori prealpini italiani, tali suoli lateritici rientrerebbero nella definizione tradizionale di “Ferretto”: il termine è stato convenzionalmente utilizzato nella letteratura geologica internazionale per riferirsi a un profilo di alterazione di colore rosso associabile o a un limo argilloso alterato oppure a materiali grossolani di origine fluvio-glaciale (Fig. 3) e distinti come marker cronologici dell’interglaciale Mindel-Riss (BINI, ZUCCOLI 2012, 51). Dal punto di vista strettamente geologico-composizionale tale tipologia di materiali risulta costituita da argilla e ossidi di alluminio, ferro e magnesio. L’introduzione di questi sedimenti all’interno del ciclo produttivo delle malte, con duplice contributo di additivi disciolti e in forma di argilliti nella frazione inerte (Figg. 1 e 2), influisce incisivamente nell’attivazione di processi pozzolanici. Il presente lavoro ha inoltre evidenziato come l’occorrenza di fasi con contenuto magnesiacco, oltre che porsi a favore della strutturazione di sistemi pozzolanici del tipo M-A-S-H, permetta anche la stabilizzazione di nuove fasi carbonatiche antropogeniche (RAZZANTE 2023).

3. NUOVE PROSPETTIVE DI RICERCA: PER UN RECUPERO VANTAGGIOSO DI MATERIALI E SAPERI

Il caso studio della chiesa di San Giovanni Evangelista in Castelseprio offre l’opportunità di soffermarsi su alcune pratiche di riuso circolari ben consolidate in passato e riportate in primo piano all’interno degli studi rivolti alle opere edilizie contemporanee. A questo proposito, oggi come in passato, la realizzazione di manufatti architettonici richiede un volume considerevole di risorse energetiche e materiali, il cui uso sistematico e talvolta inadeguato ha effetti di ricaduta sull’ambiente naturale. In ambito edilizio è stata recentemente introdotta la definizione di *life cycle assessment*, che misura l’impatto ambientale di un prodotto durante il suo ciclo di vita e che include alcuni step fondamentali connessi alla reperibilità delle materie prime, ai processi di lavorazione, al trasporto e all’uso del prodotto finale e infine alle operazioni di smaltimento dei rifiuti (CRAWFORD *et al.* 2019). La produzione di malte, cementi e calcestruzzi moderni ha subito un incremento esponenziale a partire dalla fine del XIX secolo, arrivando a rappresentare all’interno del settore delle costruzioni una delle attività maggiormente impattanti sul piano ambientale. Tra i dati più attuali in materia si testimonia come i rifiuti da costruzione e demolizione – *construction and demolition wastes* – vengano a costituire oltre un terzo dei materiali di scarto prodotti

all'interno dell'Unione Europea⁵. La peculiarità dei processi di produzione dei materiali leganti tocca alcune tematiche particolarmente dibattute e in evidente contrasto con i cicli di lavorazione delle produzioni antiche: lo sfruttamento elevato di risorse idriche e geologiche con conseguenti ripercussioni su flora e fauna, le ingenti emissioni di CO₂ e la diffusione ulteriore di agenti inquinanti derivati dalla lavorazione di alcune materie prime (FARINHA *et al.* 2021). Nell'arco dell'ultimo decennio, risultano essere in forte crescita studi che incoraggiano nuove soluzioni di reimpiego dei rifiuti edilizi, nello specifico nell'ambito della produzione di leganti questi si concentrano sulla formulazione di materiali attivati alcalinamente e di geopolimeri (ABULENCIA *et al.* 2021). Questi ultimi, nonostante siano prodotti sintetici a base alluminosilicatica che possono essere ottenuti anche dal reimpiego di materiali di scarto edilizio (PANIZZA *et al.* 2018), presentano talvolta caratteristiche analoghe ad alcuni additivi di formazione geologica impiegati storicamente per la realizzazione di malte e riconosciuti come precursori di reazioni pozzolaniche (SECCO *et al.* 2022).

Nel vasto panorama di letteratura scientifica rivolto ad approfondire la caratterizzazione e il ruolo dei geopolimeri quali importanti possibili sostituti dell'odierno cemento portland, ricorre con una discreta frequenza l'utilizzo di argille; queste sono infatti costituite da fasi allumino-silicatiche, componenti cruciali per l'attivazione di reazioni di geopolimerizzazione (ABULENCIA *et al.* 2021). Rapportando il dato contemporaneo al passato, studi condotti su materiali archeologici hanno permesso di testimoniare come il primo materiale legante adottato sin dal Paleolitico sia stato proprio l'argilla. Con il Neolitico si documenta un notevole sviluppo tecnologico che ne estende la fruizione tra l'Africa e il Medioriente, con attestazioni documentate in Mesopotamia, Persia e Anatolia; questa prima tipologia di legante era adottata non solo per rivestire pavimentazioni o murature, ma anche per l'allettamento degli elementi costruttivi e ancora con funzione impermeabilizzante di coperture lignee (DILARIA, SECCO 2022). Le numerose casistiche archeologiche, così come le diffuse applicazioni in ambito architettonico odierno (DIPASQUALE, MECCA 2016), sono testimonianza evidente di come un tipo di materiale tanto semplice trovi una grande continuità d'uso in epoca storica e si associa ancora oggi a pratiche durature di architettura vernacolare ed eco-sostenibile.

In accordo con quanto riportato fin ora, la progressione degli studi in materia di malte e materiali leganti si sta dunque indirizzando verso prodotti maggiormente sostenibili e performanti; nonostante ciò, le ricerche sulle miscele da adoperare contestualmente a opere di restauro, e dunque la conoscenza

⁵ https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en.

approfondita di malte formulate in differenti contesti con condizioni ambientali e con temperature diverse da quelle raggiungibili grazie alle strumentazioni contemporanee, restano ancora sporadiche e carenti. Tali prodotti infatti richiedono non solo una preliminare e prolungata disamina delle materie prime, ma anche prove sperimentali rivolte a testarne le corrette proprietà meccaniche, la durabilità, la lavorabilità e soprattutto la compatibilità per un utilizzo in opere edilizie dotate di muratura non armata, solitamente rinvenuta in contesti architettonici di interesse culturale (ABULENCIA *et al.* 2021).

Le ricerche sui leganti, e più ampiamente tutto l'insieme degli studi sui beni culturali, necessitano l'adozione di protocolli di analisi multi-scalari il più delle volte rimodulabili a seconda delle domande di ricerca differenziate e dipendenti dalla tipologia di materiale studiato; inoltre, l'eterogeneità e la peculiarità riconosciute dalla caratterizzazione chimica, fisica e microstrutturale, oltre che le eventuali variazioni compostionali esito di fenomeni di alterazione secondari, implementano la complessità del quadro di analisi. L'articolazione insita nelle strutture tradizionali e la volontà odierna di riproporre sperimentalmente eventuali materiali e tecniche costruttive richiede dunque la scelta di strategie analitiche e operative interdisciplinari che garantiscano un'appropriata conoscenza iniziale di ciascun manufatto e che siano di supporto alla concretizzazione di interventi di tutela e conservazione compatibili con le murature storiche (FABER *et al.* 2021). In questa complessa rete di componenti che costituisce ogni opera edilizia, la caratterizzazione dei materiali leganti, così come di malte e cementi, e la pianificazione programmatica di possibili restauri, non può prescindere dallo studio completo dei singoli elementi costruttivi e del loro stato di conservazione, oltre che dal più ampio contesto storico-architettonico. Per questo motivo l'invito è ancora una volta quello di progettare gli indirizzi di ricerca attuali verso prospettive pluridisciplinari che integrino indagini strutturali, test non invasivi ed analisi micro-invasive con letture della stratigrafia muraria al fine di ricostruire un più completo e puntuale percorso storico delle singole architetture che ponga attenzione alle numerose e complesse trasformazioni avvenute nel corso del tempo.

VALERIA RAZZANTE

Dipartimento dei Beni Culturali
Università degli Studi di Padova
valeria.razzante@phd.unipd.it

Ringraziamenti

I contenuti del paragrafo 2 presentano una rielaborazione parziale della tesi magistrale dell'autrice dal titolo *Analisi archeometriche di malte storiche: il caso studio della chiesa e del cimitero di San Giovanni Evangelista in Castel Seprio* discussa nell'a.a. 2022/2023 presso l'Università degli Studi di Padova. Le analisi condotte sui campioni di malte della chiesa di San Giovanni Evangelista in Castelseprio (VA)

sono state eseguite nel quadro del progetto “Castel Seprio, centro di potere”. Si ringraziano il prof. Gian Pietro Brogiolo, coordinatore scientifico del progetto, e la prof.ssa Alexandra Chavarria, direttrice delle attività di scavo, per aver indirizzato il lavoro di tesi e aver supervisionato le attività di campionamento. Si ringrazia inoltre il prof. Michele Secco per il lavoro di supporto in fase di indagine analitica e per l’ulteriore affiancamento durante il processamento e l’interpretazione dei dati archeometrici.

BIBLIOGRAFIA

- ABULENCIA A.B., VILLORIA M.B.D., LIBRE R.G.D. JR., QUIATCHON P.R.J., DOLLENTE I.J.R., GUADES E.J., PROMENTILLA M.A.B., GARCIANO L.E.O., ONGPENG J.M.C. 2021, *Geopolymers as sustainable material for strengthening and restoring unreinforced masonry structures: A review*, «Buildings», 11, 532 (<https://doi.org/10.3390/buildings11110532>).
- ADDIS A., SECCO M., PRETO N., MARZAIOLI F., PASSARIELLO I., BROGIOLI G.P., CHAVARRÍA ARNAU A., ARTIOLI G., TERRASI F. 2016, *New strategies for radiocarbon dating of mortars: Multi-step purification of the lime binder*, in I. PAPAYANNI, M. STEFANIDOU, V. PACHTA (eds.), *Proceedings of the 4th Historic Mortars Conference – HMC 2016 (Santorini 2016)*, Thessaloniki, Aristotle University of Thessaloniki, 665-672.
- ARTIOLI G. 2010, *Scientific Methods and Cultural Heritage: An Introduction to the Application of Materials Science to Archaeometry and Conservation Science*, Oxford, Oxford University Press.
- BINI A., ZUCCOLI L. 2012, *Il significato del termine ferretto analizzato nel quadro della geologia del Quaternario della Valle Olona*, «Sibrium», 26, 59-67.
- BROGIOLI G.P. 2020, *Il nuovo progetto di ricerca “Castel Seprio, centro di potere”*, in G.P. BROGIOLI, P.M. DE MARCHI (eds.), *I Longobardi a nord di Milano. Centri di potere tra Adda e Ticino, IV Incontro per l’Archeologia barbarica (Cairate 2019)*, Mantova, SAP – Società Archeologica.
- BROGIOLI G.P. 2022, *San Giovanni di Castel Seprio. Architetture, stratigrafie e interventi dopo una serie di crolli*, «Post Classical Archaeologies», 12, 237-264.
- BROGIOLI G.P., CAGNANA A. 2017, *Archeologia dell’architettura. Metodi e interpretazioni*, Firenze, All’Insegna del Giglio.
- BROGIOLI G.P., CHAVARRÍA ARNAU A. 2021, *Torba (VA). Scavi 2013-2019*, Mantova, SAP – Società Archeologica.
- CRAWFORD R.H., STEPHAN A., PRIDEAUX F. 2020, *Environmental Performance in Construction (EPiC) Database*, Melbourne, The University of Melbourne.
- DE MARCHI P.M. 2011, *Castelseprio: il castrum, lo stato delle conoscenze tra tardo antico e alto medioevo. Note*, in E. PERCIVALDI (ed.), *Il Seprio nel Medioevo. Longobardi nella Lombardia settentrionale (sec. VI-XIII)*, Rimini, Il Cercchio, 45-64.
- DE MARCHI P.M. 2013, *Castelseprio e Torba: sintesi delle ricerche e aggiornamenti*, Mantova, SAP – Società Archeologica.
- DILARIA S., SECCO M. 2022, *Mortar recipes through the ages. A brief review of data from prehistory to late antiquity*, in M. KORAĆ, S. GOLUBOVIĆ (eds.), *Archaeology and Science (18)*, Belgrade, Center for New Technology Viminacium, 113-125 (https://doi.org/10.18485/arhe_apn.2022.18.9).
- DIPASQUALE L., MECCA I. 2016, *L’architettura vernacolare come modello codificato per il progetto contemporaneo sostenibile*, «TECHNE – Journal of Technology for Architecture and Environment», 12, 190-198 (<https://doi.org/10.13128/Techne-19352>).
- DÖBELIN N., KLEEBERG R. 2015, *Profex: A graphical user interface for the Rietveld refinement program BGMIN*, «Journal of Applied Crystallography», 48, 1573-1580 (<https://doi.org/10.1107/S1600576715014685>).

- FABER K.T., CASADIO F., MASIC A., ROBBIOLA L., WALTON M. 2021, *Looking back, looking forward: Materials science in art, archaeology, and art conservation*, «Annual Review of Materials Research», 51, 435-460 (<https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-080119-013103>).
- FARINHA C., DE BRITO J., DO VEIGA M. 2021, *Mortars and sustainability*, in C. FARINHA, M. DO VEIGA, J. DE BRITO (eds.), *Eco-Efficient Rendering Mortars*, Cambridge, Woodhead Publishing, 1-6.
- FONTANA L. 2012, *Relazione geologica e geotecnica a supporto di interventi di ampliamento dei cimiteri di Carnago e Rovate mediante la realizzazione di nuovi loculi*, Castelseprio.
- GUALTIERI A.F., GATTA G.D., ARLETTI R., ARTIOLI G., BALLIRANO P., CRUCIANI G., GUAGLIARDI A., MALFERRARI D., MASCIOCCHI N., SCARDI P. 2019, *Quantitative phase analysis using the Rietveld method: Towards a procedure for checking the reliability and quality of the results*, «Periodico di Mineralogia», 88, 147-151 (<https://doi.org/10.2451/2019PM870>).
- IGARASHI S., BENTUR A., MINDESS S. 1996, *Microhardness testing of cementitious materials*, «Advanced Cement Based Materials», 4, 2, 48-57 ([https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(96\)90051-6](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(96)90051-6)).
- PANIZZA M., NATALI M., GARBIN E., TAMBURINI S., SECCO M. 2018, *Assessment of geopolymers with Construction and Demolition Waste (CDW) aggregates as a building material*, «Construction and Building Materials», 181, 119-133 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120158>).
- PECCHIONI A., FRATINI F., CANTISANI E. 2014, *Atlante delle malte antiche in sezione sottile al microscopio ottico*, Firenze, Nardini Editore.
- PIOVESAN R., MAZZOLI C., MARITAN L. 2022, *Production recipes of mortar-based materials from ancient Pompeii by quantitative image analysis approach: The microstratigraphy of plasters in the Temple of Venus*, «Journal of Cultural Heritage», 59, 57-68 (<https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.11.002>).
- RAZZANTE V. 2023, *Analisi archeometriche di malte storiche: il caso studio della chiesa e del cimitero di San Giovanni Evangelista in Castel Seprio*, Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Padova, Padova.
- RICCI G., SECCO M., ADDIS A., PISTILLI A., PRETO N., BROGIOLO G.P., CHAVARRÍA ARNAU A., MARZAIOLI F., PASSARIELLO I., TERRASI F., ARTIOLI G. 2022, *Integrated multianalytical screening approach for reliable radiocarbon dating of ancient mortars*, «Scientific Report», 12, 3339 (<https://doi.org/10.1038/s41598-022-07406-x>).
- RICCI G., SECCO M., MARZAIOLI F., TERRASI F., PASSARIELLO I., ADDIS A., LAMPUGNANI P., ARTIOLI G. 2020, *The Cannero Castle (Italy): Development of Radiocarbon Dating Methodologies in the Framework of the Layered Double Hydroxide Mortars*, «Radiocarbon», 62, 3, 617-631 (<https://doi.org/10.1017/RDC.2020.31>).
- SBROGIÒ L., TAVANO L., SARETTA Y., CAPRINO A., CHAVARRÍA ARNAU A., BROGIOLO G.P., VALLUZZI M.R. 2024, *Dynamic-based limit analysis for seismic assessment of free-standing walls of San Giovanni Church in Castelseprio UNESCO World Heritage Site*, «Heritage», 7, 448-475 (<https://doi.org/10.3390/heritage7010022>).
- SECCO M., ASSCHER Y., RICCI G., TAMBURINI S., PRETO N., SHARVIT J., ARTIOLI G. 2022, *Cementation processes of Roman pozzolanic binders from Caesarea Maritima (Israel)*, «Construction and Building Materials», 355, 129128 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129128>).
- VELASCO J., ARDANUY M., ANTUNES M. 2012, *Layered double hydroxides (LDHs) as functional fillers in polymer nanocomposites*, in F. GAO (ed.), *Advances in Polymer Nanocomposites. Types and Applications*, Cambridge, Woodhead Publishing, 91-130 (<https://doi.org/10.1533/9780857096241.1.91>).
- VITTI P. 2021, *Mortars and masonry-structural lime and gypsum mortars in Antiquity and Middle Ages*, «Archaeological and Anthropological Sciences», 13, 164 (<https://doi.org/10.1007/s12520-021-01408-y>).
- ZUCCOLI L. 2000, *Geologia dei pianalti di Castelseprio e Tradate (Provincia di Varese)*, «Italian Journal of Quaternary Sciences», 13, 1-2, 57-80.

SITOGRAFIA

https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en

ABSTRACT

Methodological developments in the field of archaeometry are now providing a better understanding of archaeological finds through the multi-analytical study of the chemical, physical, microstructural and mechanical properties of each material. Interesting advances have been made in the characterization of historic mortars; in addition to the chronological classification and the distinction of individual properties related to the preservation of an architectural artefact, other disciplinary implications focus on the use of highly available geo-resources or demolition waste recycled as aggregates or additives. Recent studies have revealed the adoption of specific additives as promoters of complex standard (C-A-S-H) and alternative (M-A-S-H) pozzolanic processes.