Cecilia Bandieri

7. Malte idrauliche naturali in Appennino reggiano: analisi dei leganti costruttivi nel sito di Castel Pizigolo (Toano, RE)

1. Introduzione

Il presente contributo mostra i risultati emersi dallo studio archeometrico delle malte prelevate dalle strutture medievali del sito di Castel Pizigolo (Toano, RE).
Le indagini archeologiche, avvenute nelle campagne 2015 e 2016[1], hanno costituito la prima fase operativa di questa ricerca, durante la quale è stato effettuato il campionamento delle malte di allettamento presenti nelle murature. Nello specifico, i campioni selezionati provengono dai resti di tre edifici in muratura conservati quasi esclusivamente a livello di fondazione. Il primo, situato in posizione dominante sulla cima del rilievo, è stato interpretato come una torre difensiva a pianta quadrata, conservata in alzato per un massimo di 50 cm e recante le tracce di una demolizione avvenuta in epoca medievale. Il secondo edificio, collocato nel settore nord orientale del colle, è stato identificato come una chiesa a pianta rettangolare, presentante almeno due distinte fasi costruttive. Il terzo come una struttura antecedente alla chiesa, ma di cui, data l'esigua porzione messa in luce dallo scavo è impossibile esprimere considerazioni sulla sua funzione.
I campioni sono stati sottoposti ad analisi mineralogico-petrografiche e microchimiche presso i laboratori del Centro Interdipartimentale di Ricerca per lo Studio dei Materiali Cementizi e dei Leganti Idraulici (CIRCe) del Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova, con l'obbiettivo di arricchire l'interpretazione del dato storico ed archeologico, attraverso un'ottica multidisciplinare di ricerca.
In particolare si è cercato di acquisire un sistema di riferimento tipologico delle malte, elaborato a partire dalla combinazione di diversi criteri discriminanti. Tali criteri sono stati ottenuti in primis grazie alla caratterizzazione petrografica operata sui campioni grezzi, osservati ad occhio nudo o attraverso lenti d'ingrandimento binoculari, e successivamente sui campioni in sezione sottile, esaminati tramite microscopio ottico polarizzatore. Altri parametri di valutazione sono scaturiti dagli esiti delle analisi diffrattometriche (XRPD) sulle malte, utili alla definizione delle fasi mineralogiche (microcristalline e amorfe) caratterizzanti la natura dei materiali presenti nelle miscele leganti.
In ultimo, lo studio microstrutturale e microchimico, operato in microscopia elettronica a scansione (SEM-EDS), ha permesso di individuare l'indice di idraulicità (HI) dei leganti e la natura del materiale aggregato, affinando ulteriormente i dati ottenuti dalle analisi petrografiche.
Parallelamente, questa indagine ha tenuto in considerazione alcuni fattori relativi al contesto geologico di appartenenza del sito[2] (per individuare possibili fonti di approvvigionamento del-

1. Si veda Mancassola in questo volume.
2. Si veda Tirabassi in questo volume.

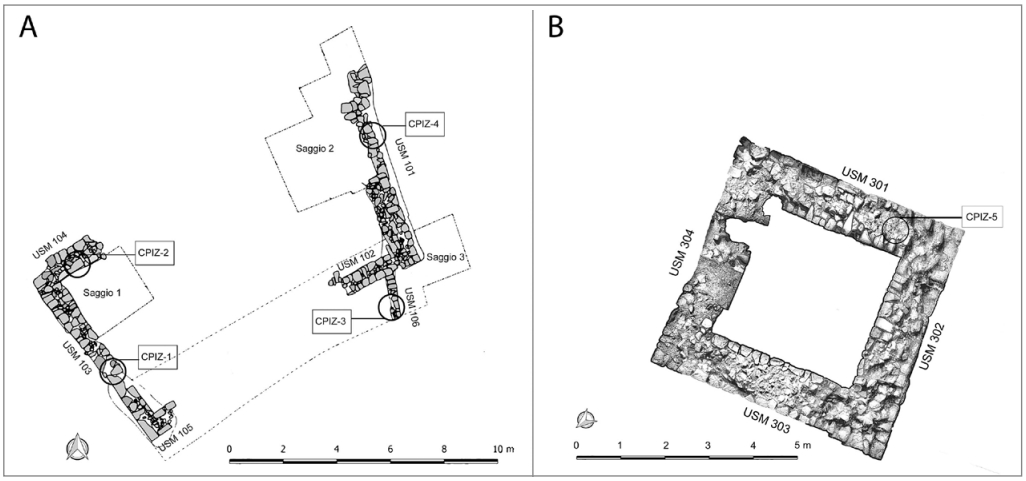

fig. 1 – Localizzazione in pianta dei punti di campionamento delle malte edilizie: **a.** Area 1000, chiesa ed edificio 1. **b.** Area 3000, torre.

Campione	*Struttura*	*USM*	*Tipo di malta*	*Analisi applicate*		
				XRPD	*OM-TL*	*SEM-EDS*
CPIZ-1	Chiesa	103	allettamento	x	x	x
CPIZ -2	Chiesa	104	allettamento	x	x	x
CPIZ -3	Edificio 1	106	allettamento	x	x	x
CPIZ -4	Chiesa	101	allettamento	x	x	x
CPIZ -5	Torre	301	allettamento	x	x	x

tab. 1 – Lista dei campioni analizzati con riferimento alle unità stratigrafiche murarie d'origine e alle tipologie di analisi effettuate.

le materie prime) e altri connessi al sapere tecnico delle maestranze occupate nel processo produttivo delle malte.
Infine, l'interpolazione dei dati archeometrici e archeologici ha permesso di verificare la sequenza relativa delle fasi edilizie, individuate sulla base della lettura stratigrafica delle murature e dello studio delle tecniche costruttive[3].

2. Materiali e metodi

2.1 Campionamento

Il campionamento delle malte ha interessato le murature appartenenti alla torre, alla chiesa e ad una struttura antecedente alla sua costruzione (USM 106), d'ora in avanti denominata "edificio 1", dalle quali si sono ottenuti 5 campioni in totale.
Il prelievo è stato effettuato nei principali nodi stratigrafici e, dove possibile, nei punti di minor contaminazione da elementi di disturbo, ovvero in quelle zone non entrate eccessivamente

3. Si veda Zoni in questo volume. Si rimanda invece a BANDIERI 2020, per l'analisi delle malte di un altro castello reggiano: Monte Lucio (Quattro Castella).

a contatto con agenti atmosferici, organismi patogeni o risalita di acque (*fig*. 1). Tutte le malte sono state denominate con la sigla "CPIZ" affiancata da numero progressivo corrispondente alle unità stratigrafiche di provenienza (*tab.* 1).

2.2 Preparazione dei campioni

In via preliminare, i campioni sono stati preparati e adattati alle diverse tipologie di analisi previste. Per poter effettuare l'osservazione in microscopia ottica ed elettronica si sono prodotte alcune sezioni sottili delle malte, utilizzando il procedimento indicato dalla raccomandazione NORMAL 14/1983. Una porzione dei campioni è stata tagliata con apposita macchina troncatrice e consolidata a vuoto con una miscela di resina epossidica (araldite), quindi assottigliata per mezzo di macchine lappatrici fino ad uno spessore di 30 µm, infine lucidata e fissata su un vetrino porta-oggetti non riflettente.
Le medesime sezioni sottili sono inoltre state sottoposte a metallizzazione tramite l'applicazione di uno strato di grafite. Tale materiale ha la funzione di eliminare cariche residue e rendere conduttiva la superficie del campione, adattandola alle analisi elettroniche (SEM-EDS).
Una seconda frazione rappresentativa dei campioni è stata preparata per l'analisi diffrattometrica a raggi Xsu polveri. Le malte sono state sottoposte a macinazione manuale, per mezzo di mortai e pestelli in agata, fino al raggiungimento di una granulometria piuttosto fine (500µm). Successivamente la polvere ottenuta è stata ulteriormente raffinata, utilizzando un micronizzatore (McCroneMicronizingMill), ottenendo una granulometria di 10 µm, infine il prodotto è stato raccolto all'interno di appositi porta campioni.

2.3 Analisi petrografiche

Tutti i campioni sono stati preliminarmente sottoposti ad un'osservazione macroscopica al loro stato naturale, operata ad occhio nudo o per mezzo di uno stereo microscopio ottico. In questo modo si sono individuate le più evidenti caratteristiche strutturali e morfologiche delle malte, registrate sulla base dei parametri descrittivi indicati dalla norma UNI 11176/2006. Fra questi rientrano aspetti dimensionali, caratteristiche cromatiche, valutazione del grado di adesione e coesione, identificazione di biodeteriogeni, ecc.
L'analisi sui campioni in sezione sottile effettuata con microscopio ottico polarizzatore e analizzatore ha fornito le informazioni necessarie alla caratterizzazione petrografica delle malte e all'individuazione di gruppi petrografici di appartenenza dei singoli campioni.
Le micrografie effettuate a diversi ingrandimenti (5x, 10x, 20x), realizzate sui singoli clasti di aggregato e sulla matrice, hanno fornito una serie di dati essenziali all'individuazione della tipologia del legante: la tessitura della matrice, la presenza di grumi (lumps) incotti o stracotti di calce, la quantità e natura dei pori nell'impasto, le principali tipologie di aggregato e la loro distribuzione granulometrica nell'area campione. In questa fase si è proceduto inoltre alla determinazione percentuale della frazione legante in rapporto all'aggregato presente nell'impasto. Il rapporto legante/aggregato costituisce uno degli aspetti antropici più evidenti del processo di preparazione dei materiali leganti, in quanto fornisce informazioni sul grado di accuratezza della miscelatura dell'impasto e sulla selezione delle materie prime (pietra da calce, materiale aggregato, eventuali additivi). La quantificazione di tale rapporto è stata effettuata per mezzo di diagrammi di stima visiva per la valutazione percentuale degli elementi tessiturali[4].

4. Muller 1964.

2.4 Analisi compositive

I campioni sono stati oggetto di analisi strumentali più approfondite mirate all'identificazione delle componenti mineralogiche totali presenti negli impasti delle malte.
I dati sono stati raccolti attraverso analisi diffrattometriche a raggi X su polveri (XRPD)[5], utilizzando un diffrattometro PANalyticalX'Pert PRO con geometria Bragg-Brentano di tipo θ-θ e rivelatore X'Celerator. I parametri strumentali utilizzati per l'acquisizione dei dati sono i seguenti: scansione continua da 3,01 [°2 Th] a 84,99 [°2 Th], con step di 0,02 [°2 Th] al secondo, goniometro θ-2θ, tubo sorgente dei raggi X con anodo di cobalto (Co K*a*) generatore a 40 mA e 40 kV. Nello specifico si è scelto di utilizzare il software X'Pert High Score Plus 3.0 (PANalytical) per l'analisi qualitativa delle fasi cristalline (QPA) coadiuvato dal database internazionale ICDD (International Center for Diffraction Data), il quale fornisce i diffrattogrammi standard di confronto realizzati su fasi mineralogiche note. L'analisi quantitativa (QPA) delle medesime fasi mineralogiche, è stata effettuata grazie al software Topas 4.1 (Bruker AXS), che si avvale dell'utilizzo del metodo a profilo totale Rietveld[6].
L'analisi attraverso microscopio elettronico a scansione (SEM) ha premesso di indagare la morfologia dei campioni in modo estremamente approfondito, grazie ad ingrandimenti ottici fino a 100.000 volte superiori alla realtà che hanno messo in evidenza alcune particolarità della microstruttura del legante. Per questi esami si è utilizzato un microscopio elettronico a scansione CamScan MX2005, equipaggiato con un catodo Lab_6 ed un rivelatore di immagini retrodiffuse BSE a 4 quadranti. I parametri strumentali utilizzati sono i seguenti: voltaggio di accelerazione 20 kV. corrente del filamento 1.80 A, corrente di emissione 20 μA, corrente di apertura 300 nA, distanza di lavoro 20-30 mm. Inoltre tale strumentazione è stata associata ad un sistema di analisi chimica qualitativa e semi-quantitativa in dispersione di energia (EDS), grazie al quale si sono potute saggiare le componenti chimiche delle malte (legante, aggregato, bordi di reazione, relitti di calcinazione, ricalcificazioni, ecc.). La stima semi-quantitativa delle concentrazioni in peso degli ossidi di Ca, Mg, Si, Al e Fe, effettuata mediante analisi chimiche EDS, ha permesso di determinare l'indice di idraulicità dei leganti.

3. Risultati delle analisi archeometriche

3.1 Risultati dell'analisi petrografica

L'analisi petrografica delle malte di allettamento dei tre edifici di Castel Pizigolo ha permesso di identificare 2 principali gruppi petrografici ed una variante tipologica del secondo gruppo.
Una prima distinzione, riscontrata autopticamente, è stata individuata fra il campione Cpiz 3 (gruppo 1) e i restanti (gruppi 2, 2A), in quanto diametralmente opposti per grado di adesione, coesione e colore. La variante del gruppo 2 è stata distinta in base alla presenza di un aggregato sabbioso piuttosto fine, visibile facilmente ad occhio nudo, non riscontrato altrove.

Gruppo1: campione Cpiz-3
Il campione 3 costituisce un tipo petrografico isolato rispetto al complesso delle malte provenienti dal sito di Castel Pizigolo. Il frammento di malta, proveniente dall'edificio 1, è apparso di

5. Pecchioni, Fratini, Cantisani 2008, pp. 155-157.
6. Rietveld 1969.

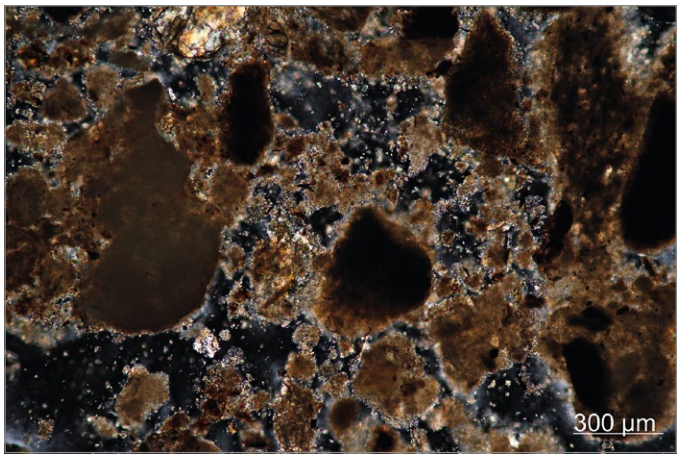

fig. 2 – Gruppo 1. Campione CPIZ3, ingrandimento 10x, micrografia a luce trasmessa a nicol incrociati: porzione del campione in sezione sottile in cui sembra conservarsi parte della matrice originaria.

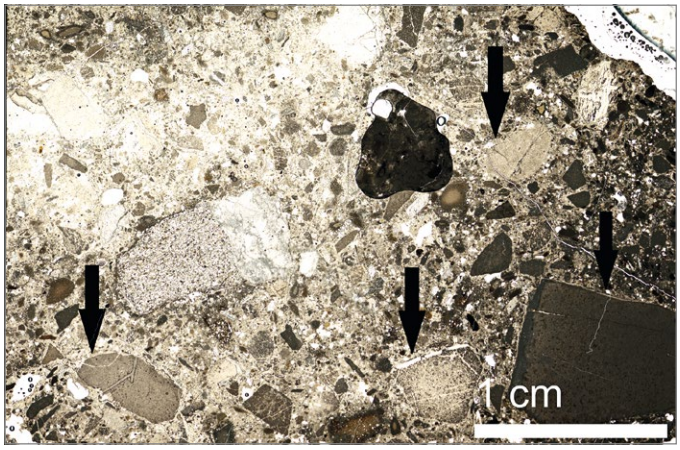

fig. 3 – Gruppo 2. Campione CPIZ-2, scansione a nicol paralleli su sezione sottile: le frecce indicano alcuni grossi *lump* incotti (bruno chiaro) e stracotti (bruno scuro, come il clasto più a destra) di marna. Sono visibili le fasi di neoformazione a silicati di calcio formatisi in cottura, inglobati nella matrice micritica calcica (fessurazioni longitudinali nei lumps).

difficile lettura da un punto di vista petrografico a causa dello scarso grado di coesione in cui versava già in fase di campionamento. Sebbene il cattivo stato di conservazione del campione abbia in parte compromesso la lettura della struttura del legante e della sua composizione mineralogica, le micrografie prodotte mostrano alcune aree in cui la struttura originaria della malta si è parzialmente conservata (*fig.* 2).

Da un'osservazione di tipo macroscopico il campione CPIZ-3 si presenta composto da un unico strato di posa, scarsamente aderente al supporto murario. Il colore di massa è assimilabile al codice del sistema Munsell 10 YR 6/6 Dark Yellowish Orange[7]. Il legante appare molto scarso e interessato da un alto grado di porosità, provocato da fenomeni di dissoluzione intervenuti successivamente alla messa in opera della malta. Questo, laddove conservato, mostra in punti isolati una colorazione piuttosto scura e tendenzialmente disomogenea, imputabile alla presenza di una forte componente argillosa derivata dalla tipologia della pietra calcinata. La frazione aggregata è composta da granuli di quarzo, feldspati ed altri minerali argillosi di origine fluviale a granulometria arenacea medio-fine, mediamente classati.

7. *Geological Rock-Color Chart* 2009.

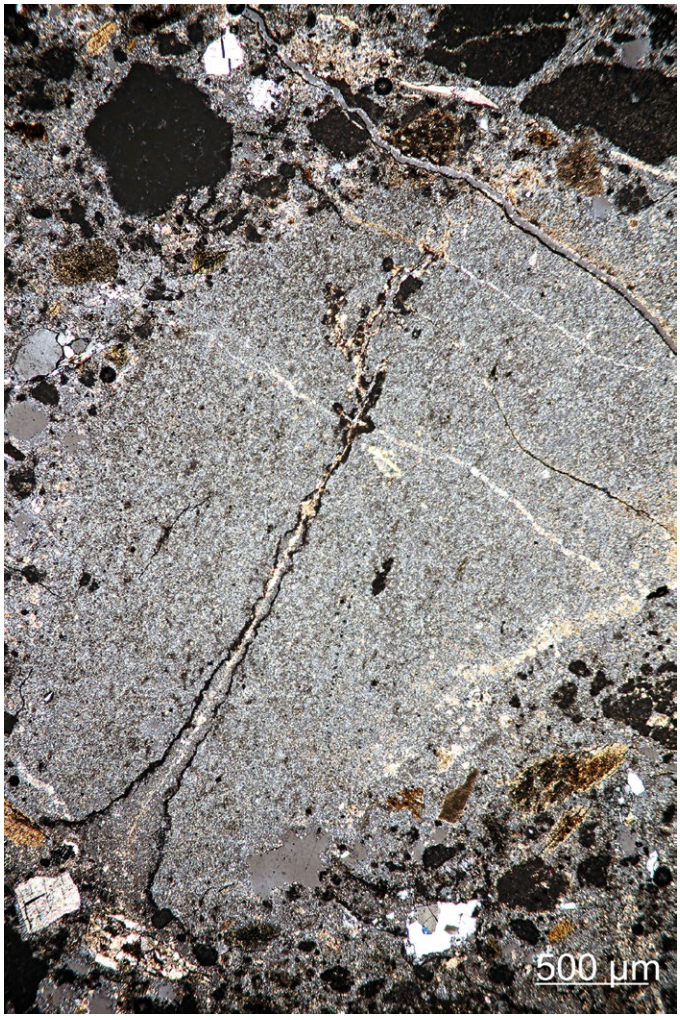

fig. 4 – Gruppo 2. Campione CPIZ-2, ingrandimento 5X, micrografia a luce trasmessa a nicol incrociati. Grumo di calce incotto in cui sono visibili i bordi di reazione con la matrice legante e fenomeni di ricalcificazione interni alla struttura (fessurazioni).

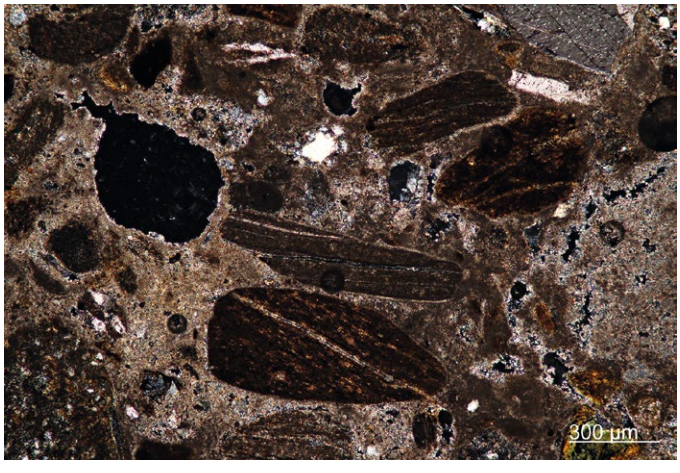

fig. 5 – Gruppo 2A, Campione CPIZ-1, ingrandimento 5x, micrografia a luce trasmessa su sezione sottile a nicol incrociati. Tracce di ricalcificazione (in forma di fessurazioni) nella matrice legante e nei bordi esterni degli aggregati della miscela legante.

Gruppo 2: campioni Cpiz-2, Cpiz-4, Cpiz-5

Le malte del secondo gruppo, due provenienti dalla chiesa (Cpiz-2, Cpiz-4) e una dalla torre (Cpiz-5), sono accomunate dalle medesime caratteristiche morfologiche e composizionali, riconoscibili a livello macroscopico. Allo stato naturale appaiono composte da un unico strato, caratterizzato da una consistenza tenace e ben aderente al supporto murario di provenienza e tendono ad una colorazione di massa assimilabile al colore del sistema Munsell 5Y 8/1 Yellowish Grey.

L'analisi in microscopia ottica a luce trasmessa ha immediatamente messo in evidenza una caratteristica comune a tutte le malte del gruppo 2 e 2A, ossia la presenza di un legante di tipo idraulico ottenuto dalla cottura di calcari contenenti impurità argillose. Ciò è visibile sia dalla colorazione disomogenea della matrice, che presenta macchie più scure in corrispondenza di concentrazioni di minerali argillosi, sia dalla presenza di numerosi relitti di calcinazione (stracotti e incotti) di grandi dimensioni, formatisi in seguito a temperature di cottura non omogenee di rocce marnose (*fig.* 3)[8].

All'interno dei grumi di legante appare frequente il fenomeno di ricalcificazione (nei pori e nelle fessurazioni dovute alla ritrazione del legante). Tale fenomeno si è osservato in tutti i campioni del gruppo 2 (*fig.* 4) e in misura minore nel gruppo 2A (*fig.* 5).

In generale l'osservazione microscopica di questo gruppo di malte ha evidenziato la presenza di un legante a tessitura micritica, con numerose plaghe di ricristallizzazione di calcite neomorfica a grana più grossolana. La porosità stimata è circa il 20%, composta per lo più da fessurazioni concentrate in corrispondenza dei clasti di aggregati e da bollosità di grandezze millimetriche distribuite omogeneamente. L'aggregato appare ben selezionato ed è principalmente composto da cristalli di plagioclasi (feldspati) e granuli di quarzo di dimensioni minime tra i 0,50-0,10 mm di grandezza e massime intorno a 1-2 mm. I numerosi relitti di calcinazione (incotti o parzialmente cotti) visibili nella matrice legante possono essere considerati come aggregati fortemente reagiti con il legante e volutamente lasciati all'interno dell'impasto dopo la fase di spegnimento della calce[9].

Gruppo 2A: campione Cpiz-1

Le principali caratteristiche che differenziano questo campione rispetto al gruppo precedente dipendono dall'aspetto dimensionale dell'aggregato, caratterizzato da una granulometria conglomeratica fine ben classata, e dalla minor quantità di grumi di legante incotti presenti nell'impasto. Si tratta di una distinzione che riguarda una più accurata selezione della frazione aggregata ed una maggiore attenzione prestata durante i processi di idratazione della calce (*fig.* 6).

La ragione di tali criteri selettivi e qualitativi, che conferiscono al legante maggiore plasticità e un aspetto più fine, sarebbe da ricercare nella specifica funzione di questa malta, posta ad allettare conci di arenaria ben squadrati e spianati inseriti nella muratura corrispondente alla facciata d'ingresso dell'edificio (USM 103).

3.2 Risultati delle analisi diffrattometriche (XRPD)

Le analisi condotte in diffrattometria a raggi X sono risultate decisive nel determinare la natura idraulica delle malte di Castel Pizigolo. In particolare i profili mineralogici (*tab.* 2), mostrano una

8. Per un approfondimento sulle tipologie di malte idrauliche antiche e moderne si veda Elsen, Van Balen, Mertens 2012.
9. Caroselli 2014, p. 95; Elsen 2006.

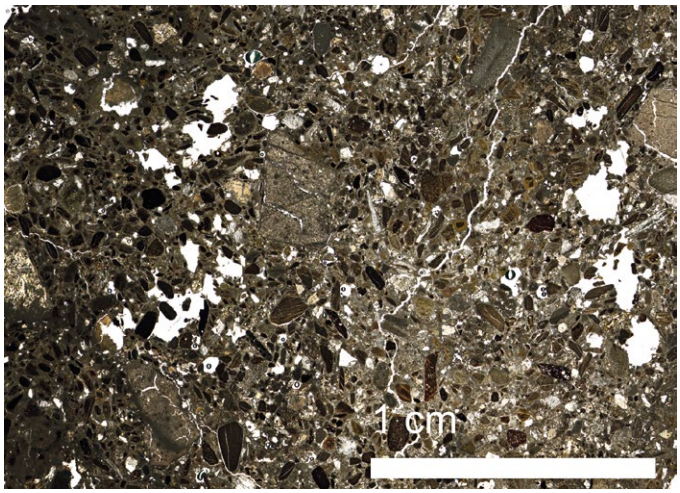

fig. 6 – Gruppo 2A. Campione Cpiz-1, scansione a nicol paralleli su sezione sottile. L'immagine mostra l'abbondanza di materiale aggregato di forma arrotondata e piccole dimensioni. La porosità è piuttosto consistente e dalla forma irregolare e concentrata in bande.

Campione	*Edificio/ USM*	Calcite	Aragonite	Vaterite	Tobermorite	Monocarbonate	Sericite	Clinochlore	Montmorillonite	Lizardite	Quartz	Albite	Microcline	Gypsum	Amorphous
CPIZ-1	Chiesa, USM 103	47,51	0,00	0,00	4,85	0,00	6,99	4,52	0,00	0,00	8,04	2,14	0,00	0,00	25,94
CPIZ-2	Chiesa, USM 104	28,84	4,90	3,92	0,00	0,54	3,49	2,12	0,00	0,00	3,96	0,67	0,00	0,00	51,57
CPIZ-3	Edificio 1, USM 106	28,37	0,00	0,00	6,05	1,10	9,53	5,47	0,00	0,00	14,08	5,14	0,00	0,00	30,26
CPIZ-4	Chiesa, USM 101	41,61	2,02	0,74	0,00	0,61	2,38	1,79	0,00	0,00	2,49	0,14	0,00	0,00	48,23
CPIZ-5	Torre, USM 301	31,73	1,10	1,34	0,00	0,49	3,03	1,79	0,00	0,00	3,56	0,53	0,00	0,00	56,44

tab. 2 – Elenco delle percentuali quantificative delle fasi mineralogiche presenti nei campioni del sito di Castel Pizigolo (analisi XRPD).

sostanziale omogeneità per tutti i campioni, collocando di fatto anche la malta del gruppo 1 (Cpiz-3) nella categoria dei leganti idraulici.

I principali indizi di idraulicità riscontrati riguardano gli alti valori di fasi amorfe (tra il 26% e il 56%), ovvero di fasi mineralogiche paracristalline a bassa diffrangenza, in relazione alle fasi carbonatiche presenti. Fra queste la calcite, presente in media al 40%, potrebbe indicare la percentuale carbonatica della marna selezionata per la calcinazione. Valori alti (4-5%), piuttosto rari per questi minerali, si riscontrano anche per aragonite e vaterite, due polimorfi del carbonato di calcio che indicano la presenza di processi di carbonatazione antropogenici. Le percentuali di tobermorite e di monocarboalluminato sono dovute alla presenza di fasi silico-alluminose formatesi in seguito alla reazione dei prodotti idraulici generati dalla cottura di calcari e argille, presenti nelle rocce marnose.

Le fasi mineralogiche argillose e fillosilicatiche (sericite, clinocloro, montmorillonite, lizardite) indicano la diversa composizione dei minerali argillosi contenuti nella marna cotta in fornace. Si notano in particolare valori piuttosto alti di sericite (una varietà di muscovite), la quale dona alla marna locale la tipica sfumatura verdastra. Analogamente, sono presenti buone percentuali di clorite (clinocloro), un minerale argilloso magnesiaco-ferroso che si concentra in sottili venature della pietra, il quale dà forma a prodotti di reazione molto evidenti a seguito della cottura ad alte temperature.

In alcuni casi risultano piuttosto bassi i valori relativi alla presenza di quarzo e albite (feldspato), che di norma costituiscono la principale composizione dell'aggregato utilizzato nella produzione delle malte. Nello specifico la quantità di aggregato aggiunto, di natura silicea, risulta

Campione	NaO	MgO	Al_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	SO_3	Cl_2O	K_2O	CaO (%)	TiO_2	FeO (%)	Tot. (%)	HI
Cpiz-1	5.89	3.52	6.43	28.91	1.15	0.41	0.99	50.72	0.14	1.84	100	0.68
Cpiz-2	3.38	3.14	5.10	35.94	0.80	0.27	0.24	48.42	-	2.71	100	0.84
Cpiz-3	4.77	6.68	9.63	39.01	1.00	0.35	1.58	31.39	0.26	5.33	100	1.41
Cpiz-4	1.34	2.17	2.90	37.07	0.74	0.34	0.53	51.48	0.29	3.13	100	0.80
Cpiz-5	4.84	7.41	8.29	47.86	1.46	1.36	0.25	24.51	0.46	3.55	100	1.87

tab. 3 – Composizione chimica dei leganti in percentuale di peso con calcolo dell'indice di idraulicità (HI).

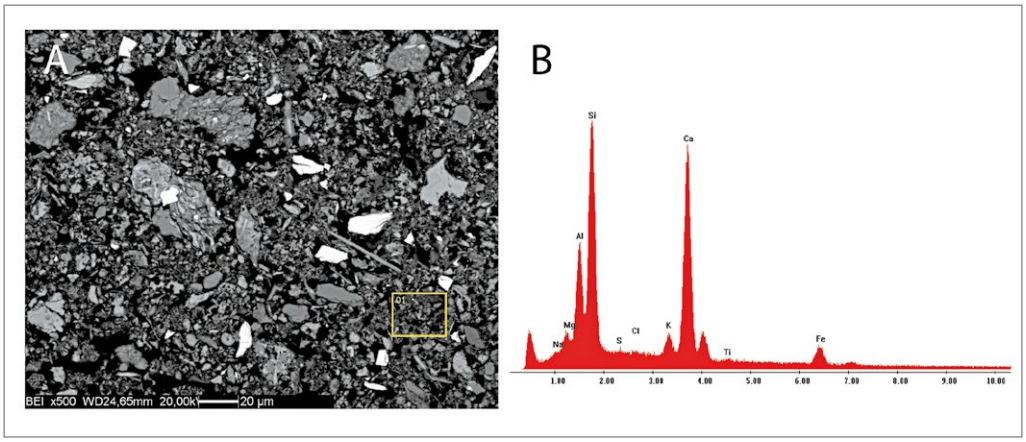

fig. 7 – **a.** Campione Cpiz-2, immagine BEI, 100x. Porzione della matrice legante idraulica: si notano sul margine a destra e nell'angolo in alto e a sinistra due grumi di incotti di marna circondati da una corona reattiva composta prevalentemente da Ca. Il riquadro bianco indica l'area di ingrandimento della fig. 52. **b.** Campione Cpiz-2, immagine BEI, 500x. Ingrandimento di fig. 51: nei riquadri in giallo sono indicate le aree analizzate chimicamente. Le zone più chiare nella matrice sono precipitazioni di carbonato di calcio avvenute in cottura [02]; il legante argilloso si presenta più scuro [01]. **c.** Campione Cpiz-2, analisi EDS della matrice legante, [01]: composizione a prevalenza di silicati di calcio, con una piccola percentuale alluminosa. **d.** Campione Cpiz-2, analisi EDS della matrice legante [02]: composizione prevalentemente calcica.

essere particolarmente scarsa soprattutto nei campioni Cpiz-2 e Cpiz-4, mentre assume valori anche superiori al 14% in Cpiz-1, Cpiz-5 e Cpiz-3. In maniera inversamente proporzionale, i campioni con basse percentuali di aggregato presentano maggiore intensità di amorfo, mentre quelli contenenti maggiori quantità di sabbie fini presentano livelli più bassi di fasi idrauliche.

3.3 Risultati delle analisi SEM-EDS

Gli esiti delle analisi in microscopia elettronica a scansione hanno approfondito il grado di riconoscimento delle fasi idrauliche presenti nei campioni.
Analisi chimiche puntuali si sono concentrate in particolare sulle matrici leganti e sui grumi non miscelati all'impasto (*tab.* 3). L'elevato contenuto di silicio, alluminio e ferro nei leganti dei campioni analizzati (in particolar modo in Cpiz-2, Cpiz-4, Cpiz-5) conferma il carattere eminentemente idraulico di queste malte. Ne sono una prova le evidenti tracce di precipitazioni carbonatiche (di colore chiaro) diffusamente distribuite nella matrice più scura argillosa (*fig.* 7). Queste formazioni, composte da carbonato di calcio pressoché puro, derivano presumibilmente dal processo di reazione avvenuto in cottura tra la componente argillosa e carbonatica della marna, che hanno dato origine a silicati di calcio (CSH). Successivamente, durante fase di idratazione (spegnimento) del legante, i composti di CSH subiscono un decadimento che porta alla formazione di fasi idrauliche separate a composizione calcica e silicea (silico-alluminati

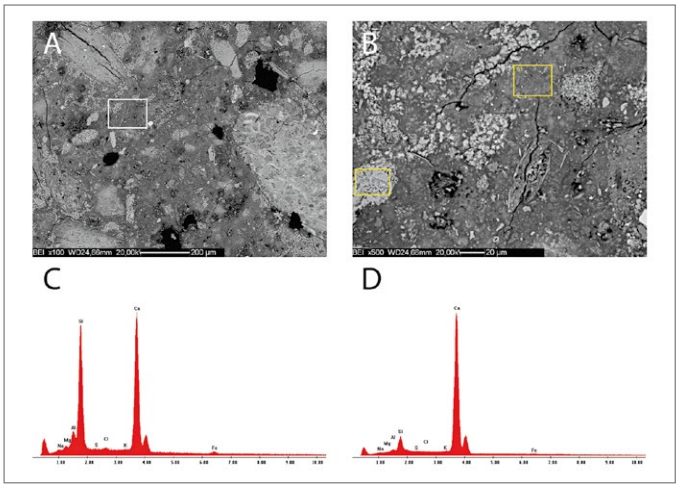

fig. 8 – Campione Cpiz-2, immagine BEI, 25x. Micrografia di un grumo di legante; la colorazione una componente preponderante di silicio e alluminio; si nota nella corona esterna la concentrazione di fasi carbonatiche.

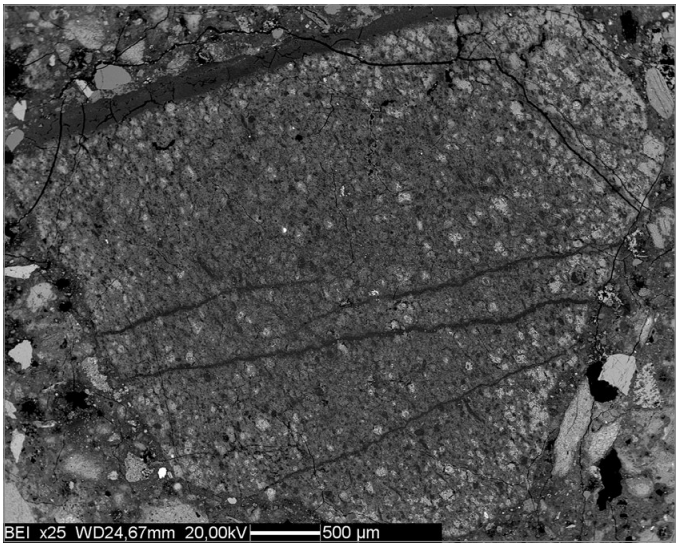

fig. 9 – Campione Cpiz-1, immagine BEI, 25x. Micrografia della tessitura del campione, ricco di frammenti di quarzo e plagioclasio. Sulla sinistra si nota la presenza di un *lump* di marna molto cotto con le tipiche venature colmate da calcite di nuova formazione.

di calcio idrati). La distribuzione spaziale di queste due fasi conferma tali ipotesi, dal momento che le concentrazioni di calcite si concentrano spesso all'esterno o in prossimità dei pori o racchiudono zone più scure al loro interno[10].

Questo fenomeno è riscontrabile anche nei grumi di legante incotti, dove sono evidenti colorazioni più scure concentrate nel nucleo interno, mentre sui bordi esterni è distribuita la componente calcica con colorazione chiara. Ciò potrebbe essere in parte dovuto all'effetto dell'assorbimento di acqua durante la fase di spegnimento o ad una ricalcificazione avvenuta successivamente alla posa in opera (*fig.* 8)[11].

Una situazione analoga a quella finora descritta si riscontra per il campione Cpiz-1, prodotto sempre dalla calcinazione di marne locali, ma in seguito arricchito da una buona quantità di aggregato sabbioso fine. Va evidenziato che in questa malta la dimensione di grumi di legante è

10. Elsen, Van Balen, Mertens 2012, pp. 130, 131.
11. Gadermayr, Pintér, Weber 2013.

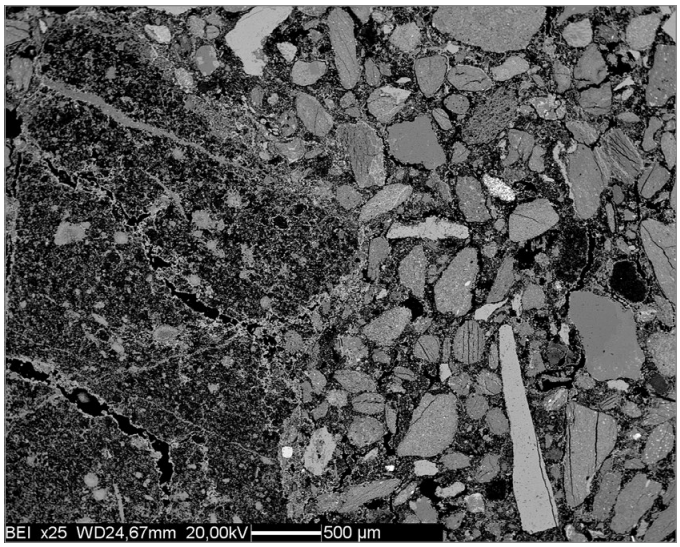

fig. 10 – **a.** Campione CPIZ-3, immagine BEI, 25x. Nel riquadro giallo è indicato la porzione di legante oggetto di analisi chimica. **b.** Campione CPIZ-3, analisi EDS della matrice legante: i valori percentuali in peso mostrano una matrice a composizione argillosa.

nettamente inferiore rispetto al gruppo precedente, seppur presente in modo diffuso (*fig*. 9). In ultimo, il legante del campione proveniente dall'edificio 1, CPIZ-3, risulta formato da un'alta componente argillosa (superiore al 50%) e da un basso contenuto di calcite riscontrato dalle analisi chimiche (*fig*. 10). Dall'osservazione SEM non è stato possibile individuare fasi idrauliche riconoscibili per questa malta, tuttavia la presenza di altri valori di fasi mineralogiche di tobermorite riscontrati nelle analisi diffrattometriche (*tab.* 2) escludono che si tratti di una malta terrosa.
La varietà della composizione mineralogica della pietra da calce utilizzata per le malte di Castel Pizigolo (esaminata sui frammenti di marna incotti) indica che la materia prima sia stata ricavata da punti di approvvigionamento casuali o distinti cantiere per cantiere. Non è da escludere tuttavia che la eterogenea composizione mineralogica delle materie prime derivi dalla natura stessa delle marne, costituite da sedimentazioni a percentuale variabile di minerali carbonatici e argillosi.

4. Discussione dei risultati

Il dato più evidente scaturito dalle analisi sui leganti artificiali del sito di Castel Pizigolo riguarda la presenza di leganti a base di calce idraulica naturale in tutti i campioni selezionati.
Da un punto di vista macroscopico l'unico tipo di malta che si discosta dal resto dei casi studiati è il campione CPIZ-3, reso parzialmente illeggibile a causa del suo scarso grado di conservazione. Il frammento di malta proviene da una muratura in bozzette di piccole e medie dimensioni che si trova obliterata dalle successive fasi costruttive della chiesa, costituendo la traccia di un impianto edilizio più antico. Nonostante questo breve tratto di muro (non scavato nella sua interezza) presentasse scarse tracce di malta di allettamento in buone condizioni di conservazione, è stato possibile analizzare la composizione chimico-mineralogica di alcuni residui di legante ancora intatti. I risultati delle analisi diffrattometriche mostrano tracce di reazioni tipicamente idrauliche, come la presenza di fasi mineralogiche amorfe e prodotti di reazioni tra la componente calcica e silico-alluminosa del legante (tobermorite). Lo sviluppo del degrado strutturale

della malta può essere stato originato da diversi fattori: l'azione di infiltrazioni d'acqua piovana o l'umidità del terreno; fenomeni di cristallizzazione salina per sali provenienti dall'aggregato (solfuri, solfati, cloruri); l'utilizzo, nello spegnimento della calce viva, di acqua a composizione chimica con Ph acido (< 7); procedimenti di cottura non adeguati (sbalzi termici, distribuzione del calore disomogenea, temperatura insufficiente) o da altri errori nel ciclo produttivo.
I campioni della chiesa Cpiz-2, Cpiz-4 e il solo campione prelevato dalla torre Cpiz-5, appaiono accomunati per composizione mineralogica, tessitura e processi produttivi (temperatura di cottura, grado di selezione materiale, miscelatura, ecc.).
Alla luce dei dati raccolti è possibile presumere che la cottura della pietra marnosa, utilizzata nel cantiere della prima fase edilizia della chiesa, sia avvenuta in fornaci 'a fossa' con temperature intorno ai 900°C, necessari al raggiungimento della completa calcinazione. La difficoltà nel mantenimento di una temperatura costante e uniformemente diffusa durante il procedimento sembra essere la principale causa della formazione di relitti di calcinazione riscontrati nelle malte. Non va escluso che la conservazione di frammenti non del tutto calcinati all'interno dell'impasto sia stata intenzionale, con lo scopo di utilizzarli come un aggregato altamente reattivo e sostitutivo alla sabbia.
La presenza di aggregato arenaceo di origine fluviale è invece presente in discrete quantità (rapporto legante/aggregato 1:3) nel campione Cpiz-1 (gruppo 2A): l'utilizzo preponderante di sabbie fini in questo campione sarebbe da imputare alle esigenze estetiche di questa malta, posta ad allettamento di due corsi murari sulla facciata occidentale dell'edificio religioso (USM 103).
Da un punto di vista strutturale le malte utilizzate per le parti murarie in alzato risultano meno tenaci e di tenore idraulico inferiore, ma più adatte ad allettare i conci delle parti in alzato della struttura, grazie alla loro maggiore plasticità e resa estetica. I campioni del gruppo 2 sono stati invece prelevati da fasi di fondazione, in posizioni non visibili, dove l'aspetto del legante è secondario alla tenacia e alla resistenza strutturale.

5. Conclusioni

Le analisi condotte su 5 campioni di malta provenienti dai resti dei due edifici in muratura rinvenuti nel sito di Castel Pizigolo (Toano, RE) hanno permesso di effettuare alcune considerazioni sugli aspetti relativi alle vicende costruttive avvenute in antico.
La distinzione dei campioni in gruppi tipologici ha innanzitutto potuto confermare la scansione cronologica delle fasi edilizie presenti nell'edificio religioso. La muratura più antica (USM 106), datata all'XI secolo (?), sulla quale si impostano le strutture delle fasi successive della chiesa, è caratterizzata da un legante di tipo idraulico ottenuto dalla cottura di pietra locale a composizione mista di carbonato di calcio e argilla (gruppo 1, campione Cpiz-3). Lo scarso stato di conservazione delle malte di questa struttura va ricondotto a processi produttivi che non raggiunsero le temperature sufficienti alla reazione del calcio con i minerali argillosi presenti nelle marne.
Il secondo gruppo di malte comprende i campioni provenienti dalle strutture appartenenti alla prima fase edilizia della chiesa (USM 103 e USM 104) e alla muratura della torre (USM 301), databili rispettivamente tra la seconda metà del XII secolo alla prima metà del XIII secolo e al XIII secolo. L'aspetto più evidente scaturito dalle analisi riguarda l'elevato grado di idraulicità

dei leganti, prodotti sempre a partire da materiale reperibile in loco (pietra marnosa) attraverso procedimenti produttivi nettamente superiori a quelli precedentemente analizzati. Da un punto di vista strutturale questi materiali sono caratterizzati da un'ottima tenacia e da lievi fenomeni di degrado fisico (gruppo 2 e 2A, campioni Cpiz-1, Cpiz-2, Cpiz-5). La composizione della frazione aggregata (quarzo, muscovite, feldspati), la ricristallizzazione della calcite, le fasi amorfe di silico-alluminati di calcio (CSH) e la scarsità della porosità del legante sono con ogni probabilità responsabili dell'elevata resistenza meccanica delle malte.
Il perimetrale posto a nord-est dell'edificio religioso, l'USM 101, appartiene da un punto di vista stratigrafico ad una nuova fase costruttiva e ad una consistente ristrutturazione databile tra XIV e XV secolo. Dal punto di vista della tipologia dei materiali leganti, tuttavia, non si evidenziano particolari differenze rispetto alle caratteristiche individuate nelle malte delle strutture precedenti (gruppo 2, campione Cpiz-4).
Più in generale appare evidente come le capacità tecniche delle maestranze impegnate nei cantieri edilizi, susseguitisi nel sito di Castel Pizigolo, siano progressivamente aumentate, portando il processo produttivo delle malte ad un collaudato perfezionamento tecnico.

Bibliografia

Bandieri C. 2020, *La chiesa di San Leonardo a Monte Lucio: fasi edilizie e tecniche costruttive di un oratorio privato medievale*, in *Il Castello di Monte Lucio. La chiesa e la necropoli*, a cura di N. Mancassola, Sesto Fiorentino, pp. 89-102.

Caroselli M., 2014, *Mortar, plaster and brick dating: the case study of the Modena Medieval UNESCO site*, tesi di dottorato in Earth System Sciences: Environment Resources and Cultural Heritage, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, ciclo XXVII, dicembre 2014, relatore Prof. Stefano Lugli.

Charola A.E., Henriques F.M.A., 2000, *Hydraulicity in lime mortars revisited*, in Bartos P., Groot C., Hughes J.J., *Historic Mortars: Characteristics and Tests*, Proceedings of the International RILEM workshop, Paisley, pp. 95-105.

Elsen J., Van Balen K., Mertens G., 2012, *Hydraulicity in Historic Lime Mortars: A Review*, RILEM Book series, 7, pp. 125-139.

Elsen J., 2006, *Microscopy of historic mortar: a review*, «Cement Concrete Research», 36 (2006), pp. 1416-1422.

Fratini F., Pecchioni E., Cantisani E., 2010, *L'idraulicità delle malte: il contributo della diagnostica minero-petrografica*, in 2° Convegno Nazionale del Forum Italiano Calce, *Calce: materiale antico, idee nuove*, Genova 3-4 dicembre 2009, Roma, pp. 40-44.

Geological Rock-Color Chart 2009 = *Geological Rock-Color Chart with genuine Munseel color chips*, Geological Society of America (GSA).

Gadermayr N., Pintér F., Weber J., 2013, *Identification of 19 th century roman cements by the phase composition of clinker residues in historic mortars*, 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, New York, 22-25 October 2012, New York.

Müller G., 1964, *Methoden der Sedimentuntersuchung*, Stuttgart.

Pecchioni E., Fratini F., Cantisani E., 2008, *Le malte antiche e moderne tra tradizione e innovazione*, Bologna.

Rietveld H.M., 1969, *A profile refinement method for nuclear and magnetic structures*, «Journal of Applied Crystallography», 2 (1969), pp. 65-71.