

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento dei Beni Culturali: Archeologia, Storia dell'Arte,
del Cinema e della Musica

Corso di laurea triennale in Archeologia

**Analisi archeometriche sulle malte e le pozzolane vulcaniche
delle Terme a Mare di Nora**

Relatore

Dott. Simone Dilaria

Correlatrice

Prof.ssa Caterina Previato

Laureando: Zeno Caneva

Matricola: 2006240

Anno Accademico 2022/2023

INDICE

Introduzione	1
1. Miscele leganti: elementi costitutivi e terminologici	3
1.1 Legante	3
1.1.1 Legante a base di calce aerea	4
1.1.2 Legante argilloso	5
1.2 Aggregato	6
1.2.1 Aggregati non pozzolanici	6
1.2.2 Aggregati pozzolanici	7
1.3 Additivi	9
2. Nora, inquadramento storico e geografico	11
3. Le Terme a Mare	17
3.1 Articolazione planimetrica e fasi edilizie	17
3.2 Tecniche costruttive	21
4. Campionamento e metodi di analisi	27
4.1 Il campionamento	27
4.2 I metodi di analisi	32
4.2.1 Microscopia ottica (OM)	32
4.2.2 Fluorescenza a raggi X (XRF)	33
4.2.3 Microscopia elettronica a scansione associata a spettroscopia a energia dispersiva (SEM-EDS) .	34
5. Risultati	37
5.1 Caratterizzazione delle miscele leganti	37
5.2 Provenienza delle pozzolane vulcaniche	46
6. Interpretazioni archeologiche	55
Bibliografia	61

Introduzione

Questo elaborato fornisce uno studio di diciassette campioni provenienti dal sito delle Terme a Mare di Nora (Pula, Cagliari), di cui dodici rocce vulcaniche e cinque miscele leganti. I campioni sono stati prelevati da elementi strutturali pertinenti alla fase medio imperiale del complesso termale (inizi III secolo d.C.). Essi provengono dai corpi di strutture murarie e da alcune volte in opera cementizia in stato di crollo all'interno dell'edificio. Le miscele leganti sono state sottoposte ad un'analisi al microscopio ottico a luce polarizzata su sezioni sottili di spessore 30 µm al fine di determinarne la tessitura e le caratteristiche petrografico-mineralogiche. Dal punto di vista compositivo, si è potuto distinguere un unico gruppo di miscele leganti costituito prevalentemente da sabbie classate e clasti vulcanici (tra cui pomici), con un evidente outlier, rappresentato dal campione TMAR_17, proveniente dal paramento della struttura muraria di una vasca presso il *praefurnium* posto nel *laconicum/tepidarium*. Si tratta di una malta di cocchiopesto composta da frammenti fittili misti a clasti di ossidiana e ignimbriti riolitiche. L'uso di ossidiana appare particolare ma non del tutto inusuale a Nora, attestata solamente nelle gettate cementizie del Teatro Romano (I secolo d.C.). Evidenze archeologiche dimostrano come il vetro vulcanico, oltre alle pozzolane tradizionali, venisse sfruttato nelle province dell'Impero per produrre materiali idraulici a base di malta. Il suo impiego all'interno delle Terme a Mare, probabilmente di natura idraulizzante, non è ancora chiaro e necessita di ulteriori campionamenti e approfondite indagini.

I risultati completi delle analisi effettuate sui singoli campioni di miscela legante hanno dimostrato come la reattività del materiale vulcanico contenuto in essi sia limitata ai bordi dell'aggregato pozzolanico stesso, e quasi nulla nei clasti di ossidiana, a esclusione invece della componente fittile. Questa, infatti, mostra una maggiore reattività con il legante, ma dimostrando comunque una limitata capacità idraulizzante della malta cocchiopesto.

Per quanto riguarda i campioni di roccia vulcanica, comprendenti pomici e un solo campione di tufo (TMAR_7), sono state effettuate analisi XRF al fine di determinarne la provenienza tramite la caratterizzazione della composizione chimica degli elementi maggiori e in traccia delle singole pozzolane, comparandoli con i dati nella letteratura. Analisi puntuali EDS al SEM sono state svolte invece su aree non reagite di sette clasti di ossidiana presenti in TMAR_17, permettendo di studiare il chimismo del materiale vulcanico ed ottenere un profilo geochimico sulla media dei valori estrapolati dalle analisi stesse. Il TAS (Total Alkali vs. Silica) ha permesso una prima discriminazione sulla distribuzione dei clasti vulcanici attraverso il confronto dei profili degli elementi maggiori con l'impronta geochimica dei distretti vulcanici presenti nella penisola italiana. I risultati hanno dimostrato una compatibilità delle pomici e del tufo con i prodotti vulcanici del Lazio, delle Isole Eolie, e, principalmente, della Campania. Il profilo geochimico delle ossidiane invece è risultato

compatibile con i prodotti piroclastici del distretto sardo di Monte Arci, con una possibile corrispondenza anche con le Isole Eolie. Procedendo con le indagini, si sono conteggiati gli elementi in traccia dei campioni di pomice e tufo, escludendo le ossidiane in quanto non forniscono abbastanza materiale per un'analisi efficace con la tecnica XRF. Per i campioni analizzati, sono stati utilizzati i rapporti tra Zirconio (Zr), Ittrio (Y), Niobio (Nb), Neodimio (Nd), e Rubidio (Rb), utili per discriminare le provenienze dei prodotti vulcanici in oggetto, basandosi sui dati geochimici presenti in letteratura. Sulla base dei diversi rapporti tra questi elementi, si è potuto escludere sin da subito l'area laziale, osservando come tutti i clasti ricadano nel distretto vulcanico campano. Usfruendo di un ulteriore database di profili geochimici per la regione campana, sono stati analizzati con maggior dettaglio i termini di affinità con le unità principali della provincia magmatica campana. Le indagini hanno permesso di escludere l'area vesuviana, pertanto sembra confermarsi una compatibilità geochimica con l'area flegrea o Ischia.

In conclusione, lo studio dei campioni di miscela legante e pozzolana vulcanica ha permesso di ricostruire aspetti importanti della tecnologia costruttiva dell'edificio e della commercializzazione di materie prime. Interessante è la presenza di maestranze di provenienza probabilmente differente, specializzate nella realizzazione di determinati frangenti architettonici, impiegando materiali differenti, alloctoni e locali, così da fornire importanti informazioni sulla possibile presenza di gruppi artigiani di estrazione sarda.

Capitolo 1

Miscele leganti: elementi costitutivi e terminologici

Una miscela legante è un composto artificiale di leganti inorganici, quali calce, gesso, argilla, combinati con acqua ed eventuali aggregati o additivi organici e/o inorganici, che al momento della miscelazione assume un'opportuna lavorabilità, mentre a contatto con l'aria si solidifica tramite una serie di reazioni chimiche, assumendo adeguate caratteristiche fisiche, meccaniche, e di durabilità¹. Tra le miscele leganti si distinguono le malte e i calcestruzzi, entrambi realizzati con calce ed acqua, differenziandosi però sulla base della granulometria dell'aggregato. Una malta presenta aggregati prevalentemente fini, con una grana minore di 5 mm, come la sabbia; il calcestruzzo è costituito invece da aggregati a grana grossa, uguale o maggiore di 5 mm, come ghiaia ed altri elementi lapidei². Una miscela legante, sia essa una malta o un calcestruzzo, è costituita da una combinazione di elementi di seguito definiti:

- Legante
- Acqua
- Aggregato
- Additivi

Per ciascuna di queste componenti, verrà fornita descrizione di dettaglio in seguito.

1.1 Legante

Il legante è la componente dell'impasto che permette di legare effettivamente le miscele leganti. È solitamente ottenuto per cottura di rocce sedimentarie (carbonatiche e solfatiche), o rocce metamorfiche, come i marmi, ma esistono anche leganti naturali utilizzati così come si rinvencono in natura, quali, ad esempio, l'argilla. I leganti, una volta mescolati con acqua, formano masse plastiche, inducendo una serie di interazioni chimico-fisiche che nel tempo "litificano" l'impasto stesso, ovvero gli conferiscono rigidità e resistenza meccanica, diversa in funzione del tipo di legante. Lo sviluppo di proprietà meccaniche consta di due fasi, la presa (o stagionatura) e l'indurimento, ovvero la perdita di plasticità e lavorabilità dell'impasto, e la conseguente rigidità con l'acquisto di resistenza meccanica. Da ciò nasce una suddivisione generale in leganti aerei, in grado di far indurire l'impasto a contatto con l'aria (argille, calce aerea e gesso), e leganti idraulici, il cui impasto si litifica a contatto con l'acqua (calci idrauliche, calci aeree con materiali a comportamento pozzolanico).

¹ Secondo la definizione riportata nella normativa *Documento UNI 10924 (2001)*; Pecchioni *et alii* 2014, 9.

² Ginouves, Martin 1985, 50-52.

1.1.1 Legante a base di calce aerea

La calce aerea è un legante ottenuto per cottura (calcinazione) di rocce carbonatiche con elevato contenuto di CaCO_3 a temperature non superiori a 850°C ³. In passato, la cottura della calce avveniva tramite l'uso di fornaci, in genere costruite nei pressi del luogo di estrazione e di utilizzazione della roccia. La pietra da calce poteva presentare delle impurità dovute alla presenza di frazioni silicee o argillose; queste non dovevano superare il 5-10% del volume totale, per evitare di avere una limitata idraulicità nell'impasto. Per la realizzazione della calce si privilegiava, infatti, la scelta di calcari più puri possibile, con un quantitativo di carbonato di calcio CaCO_3 e/o di calcio e magnesio $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ maggiore del 95%. Con la cottura di calcari contenenti solo carbonato di calcio si ottenevano calci calciche, chiamate anche calci aeree grasse, mentre dalla cottura di calcari contenenti carbonato doppio di calcio e magnesio $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ in differenti percentuali (come calcari magnesiaci, dolomitici o dolomie), si ottenevano calci magnesiache, o calci aeree magre, meno reattive di quelle calciche, ma comunque con elevate qualità.

Il ciclo produttivo tradizionale della calce (fig. 1.1.1) prevedeva la cottura della pietra calcarea (carbonato di calcio), che dava luogo alla calce viva (CaO) con una liberazione di anidride carbonica, secondo la seguente reazione endotermica:



Una volta ottenuta la calce viva, si procedeva con lo spegnimento, facendola reagire con l'acqua al fine di ottenere un prodotto plastico e lavorabile capace di indurire a contatto con l'aria, l'idrossido di calcio, chiamato anche calce spenta o portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).



La reazione portava alla realizzazione di una pasta bianca e plastica, idonea per la realizzazione di malte, stucchi e calcestruzzi per strutture architettoniche o opere d'arte.

I primi leganti artificiali utilizzati dall'uomo sono gli intonaci a base di calcare e gesso ampiamente utilizzati nel Vicino e Medio Oriente nel VII e VIII millennio a.C.⁴ Vi sono numerosi studi che riguardano lo sviluppo preistorico dei leganti a base di calce nel Neolitico Pre-Ceramico del Levante. In questa fase iniziale, i leganti non vengono impiegati subito a livello strutturale, ma sono realizzati come superfici durevoli, principalmente nei rivestimenti parietali e pavimentali con uno scopo protettivo, oltre che decorativo. Le occorrenze successive di malte ed intonaci di calce sono testimoniate nel mondo minoico (II millennio a.C.), dove i materiali a base di calce vengono ampiamente utilizzati a Creta, Cipro e altrove per decorazioni murali e l'impermeabilizzazione delle cisterne, anche con proprietà idrauliche, ponendo le basi tecnologiche per l'architettura romana

³ Ginouvès, Martin 1985, 50; Pecchioni, Frantini, Cantisani 2008, 28-46.

⁴ Artioli *et alii* 2019, 161, 165; Dilaria, Secco 2022.

successiva⁵. A partire dall'epoca romana vi è una massificazione dell'impiego; la malta viene usata per rafforzare le strutture in muratura sia negli edifici pubblici che in quelli militari. È il primo uso strutturale completamente registrato di leganti in architettura, in cui il legante collega intimamente le unità della muratura e contribuisce attivamente alla resistenza meccanica della struttura composita⁶.

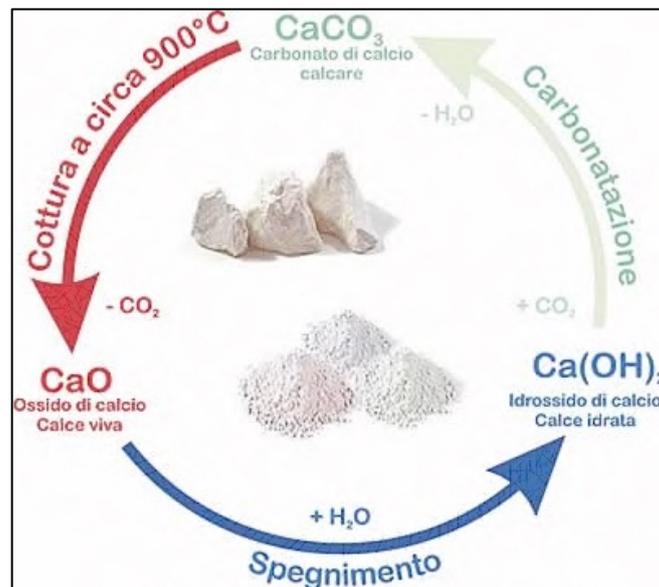


Fig. 1.1.1. Ciclo di produzione della calce.

1.1.2 Legante argilloso

L'argilla è il più antico legante utilizzato dall'uomo, con evidenze già a partire dal Neolitico in siti della Mesopotamia e Anatolia, e il suo uso è durato a lungo, anche in epoche recenti. L'argilla veniva usata sia direttamente con funzioni di allettamento sia aggiunta alla calce. Vi sono evidenze di questo uso architettonico in Medio Oriente a partire dal X millennio a.C. Nella sua forma più semplice, senza uso di pirotecnologia, una muratura poteva essere composta da mattoni d'argilla essiccati al sole, legati da uno strato umido di fango (Çatalhöyük, Anatolia 7500-6000 a.C.)⁷. Il vantaggio nello sfruttamento di questa materia prima, ricca di silicio e alluminio, stava nella facilità di essere reperita in qualsiasi parte del mondo, da terreni argillosi naturali. Come legante, veniva sfruttata per migliorare la resistenza della miscela nei confronti dell'umidità, dal momento che i minerali argillosi hanno capacità idroscopiche; inoltre, l'argilla contrastava il ritiro di volume durante la carbonatazione, favorendo la stabilizzazione dell'impasto.

⁵ Shaw, 1973; Wright, 2005.

⁶ Artioli *et alii* 2019, 172.

⁷ Artioli *et alii* 2019, 152.

1.2 Aggregato

L'aggregato rappresenta la parte costituita da frammenti lapidei, minerali singoli, e tutti quegli elementi che, assieme al legante e all'acqua, compongono l'impasto di una malta o di un calcestruzzo⁸. La funzione dell'aggregato è quella di impedire o limitare, in fase di presa e indurimento, i fenomeni di ritiro del legante e le conseguenti fessurazioni o fratture. Fungendo da scheletro tra le particelle del legante, l'aggregato contrasta il ritiro stesso e con la sua aggiunta viene ridotta la quantità di legante che si fessura in seguito alla perdita di acqua di impasto. L'aggregato riesce quindi a impedire alle tensioni derivate dalle contrazioni di produrre fessurazioni tra i cristalli formati dopo l'idratazione. La scelta dell'aggregato avveniva sulla base delle caratteristiche tecniche, estetiche e sulla economicità del prodotto. Esso, infatti, doveva rispondere a diversi requisiti, di cui buona resistenza meccanica, bassa porosità, assenza di argilla, sali e sostanze organiche, e una corretta granulometria. L'aggregato può essere di origine naturale, ovvero materiale incoerente di origine sedimentaria (sabbia fluviale, ghiaie, depositi incoerenti di origine piroclastica), o di frantumazione, cioè materiale a granulometria più o meno fine ottenuto per macinazione di rocce o minerali. Tra i diversi tipi si distinguono gli aggregati pozzolanicamente reattivi e quelli non reattivi.

1.2.1 Aggregati non pozzolanici

Tra gli aggregati non pozzolanici rientrano tutti i materiali che non interagiscono pozzolanicamente con il legante, tra cui le sabbie e le ghiaie. In passato le sabbie non erano classate, cioè non venivano ben selezionate granulometricamente. Una buona selezione si poteva ottenere grazie alla setacciatura, ma più la granulometria veniva selezionata, meno le sabbie risultavano adatte, in quanto lasciavano più vuoti con il legante. Per un ottimo impasto era necessario avere una variata selezione, in modo che i granuli più piccoli riempissero gli spazi tra i granuli più grandi, così da risparmiare sui dosaggi di legante e diminuendo i fenomeni di ritiro. La sabbia poteva essere prelevata lungo il corso dei fiumi, da spiagge lacustri, o da rocce arenacee di origine marina, estratte in cave a cielo aperto. Vitruvio è il primo autore a menzionare le *harenae fossiciae*, ovvero le sabbie da cava, che potevano presentarsi con colori diversi (*rubra, nigra e cana*), ed essere impiegate in materiali a base di malta per rafforzare la muratura. Lo stesso autore distingue le sabbie da cava da quelle marine. Le prime seccavano velocemente sulle costruzioni, conservavano gli intonaci, e potevano reggere le camere voltate (*fossiciae vero celeriter in structuris siccescunt, et tectoria permanent, et concamerationes patiuntur*)⁹; la sabbia marina invece veniva sconsigliata, in quanto prima di essere

⁸ Pecchioni, Frantini, Cantisani 2008, 91-93.

⁹ Vitruvio, *De Architectura*, 2.4.1.

utilizzata necessitava di un lavaggio accurato per l'eliminazione dei sali, che potevano alterare la presa. Infatti, esse tendevano a seccare difficilmente, divenendo non adatte a reggere il peso delle volte e nemmeno ad essere impiegate per la realizzazione degli intonaci, perchè, quando frantumate, rilasciavano la loro salsedine (*sed ea in structuris haec habet vitia: difficulter siccescit, neque onerari se continenter paries patitur, nisi intermissionibus requiescat, neque concamerationes recipit. Marina autem hoc amplius, quod etiam parietes, cum in iis tectoria facta fuerint, remittentes salsuginem corium dissolvunt*). Le sabbie migliori risultano quelle silicee, senza elementi calcarei teneri o chimicamente alterabili, prive di argilla, la quale influisce sul rapporto acqua-legante, e di sostanze organiche, poiché ritardano la presa. Fini o grosse che siano, le sabbie venivano usate per malte ed intonaci, sia per limitare il ritiro del legante sia per ridurre la plasticità della calce. Dove non era possibile reperire la sabbia, si usufruiva di pietrisco, ovvero ghiaia macinata, la cui preparazione richiedeva l'impiego di manodopera. La ghiaia veniva prelevata da depositi alluvionali in pianura, allo sbocco di torrenti montani, o in conoidi alluvionali. La sua granulometria può variare, e in passato poteva essere utilizzata allo stato naturale come aggregato di calcestruzzi, o, se macinata, come aggregato di malte e intonaci nel caso in cui si volessero utilizzare specifici materiali per alcune proprietà cromatiche; ad esempio, negli strati di intonachino di intonaci, per far risaltare il pigmento, si aggiungevano nell'impasto elementi frammentati di calcite spatica o marmo, meccanicamente frammentati, setacciati ed utilizzati a tal scopo¹⁰.

1.2.2 Aggregati pozzolanici

In passato, come aggregato veniva utilizzata anche pozzolana naturale o materiali con proprietà pozzolaniche. Frammenti di terracotta, polveri, ceneri organiche e, soprattutto, clasti vulcanici di origine piroclastica sono le pozzolane più comunemente utilizzate nell'antichità. Tra le pozzolane naturali si distinguono prevalentemente rocce di origine piroclastica costituite sostanzialmente da pomice e tufi. La pomice è una roccia vulcanica, molto leggera per via della sua porosità, friabile, e con una bassa permeabilità. Spesso viene inglobata in matrici cineritiche di rocce ignimbristiche o tufi. Anch'esso leggero ma più compatto della pomice, il tufo è una roccia magmatica formata per litificazione in ambiente idrotermale di frammenti di prodotti vulcanici di origine piroclastica, tra cui pomice, lave vulcaniche e ceneri piroclastiche. Oltre a pozzolane naturali, esistono materiali che si comportano in modo tale, reagendo con la calce, come il cocchiopesto, ottenuto artificialmente tramite la frantumazione di cocci ceramici o frammenti laterizi.

¹⁰ Daniele, Gratzu 1996; Dilaria 2023, 260.

Tali materiali risultano estremamente reattivi, una volta miscelati con calce spenta e acqua, in virtù di un determinato processo chimico-fisico che avviene a temperatura ambiente e permette alle miscele leganti di assumere specifiche caratteristiche idrorepellenti, a cui si accompagna un generale miglioramento delle capacità coesive.

La capacità di un materiale di reagire con l'idrossido di calcio (calce spenta) per formare composti idraulici viene definita "comportamento pozzolanico". I materiali pozzolanici sono infatti ricchi di silice reattiva (SiO_2) e allumina (Al_2O_3), aventi una struttura chimica poco stabile, data da legami chimici solo parzialmente saldati (strutture amorfe); grazie alla loro composizione, quando entrano a contatto con una soluzione acquosa, in ambiente alcalino con elevato pH, reagiscono con la calce idrata ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), dando luogo a fasi di silicati di calcio idrati, alluminati di calcio idrati o silicati di calcio idrati, dalla stechiometria atomica non stabile e pertanto comunemente definiti con la formula generica di C-S-H, C-A-H o C-A-S-H, sostanzialmente insolubili in acqua (fig. 1.2.1)¹¹.

La pozzolana più famosa dell'età romana è la *pulvis puteolana*¹². Definita da Vitruvio come un materiale "straordinario"¹³, dal punto di vista geologico, con *pulvis puteolana* si intende una serie di prodotti piroclastici riferibili alle eruzioni più tarde dei Campi Flegrei e del Vesuvio ed affiorante in un ampio territorio che va dalla Baia di Napoli nei Campi Flegrei fino a Somma-Vesuvio¹⁴. L'aggettivo "*puteolana*" viene usato per la prima volta da Plinio, individuando l'area di provenienza del materiale in prossimità dell'antica città di *Puteoli* (oggi Pozzuoli, a nord di Napoli)¹⁵. Questa polvere può fornire eccellenti caratteristiche strutturali e proprietà impermeabilizzanti ai composti leganti antichi, ed è stata raccomandata, soprattutto da Plinio e Vitruvio, per la costruzione di strutture marittime in *opus caementicium*¹⁶. Infatti, ricerche recenti hanno dimostrato la presenza di pozzolana vulcanica proveniente dalla Baia di Napoli in strutture di alcuni dei principali porti dell'Impero Romano¹⁷. Tuttavia, Vitruvio ha specificato che la *pulvis puteolana* viene utilizzata principalmente in una vasta gamma di edifici per rinforzare le strutture murarie, e non soltanto, in strutture marittime (*non modo ceteris aedificiis praestat firmitates, sed etiam moles cum struuntur in mari, sub aqua solidescunt*)¹⁸, empiricamente comprendendo che il materiale nel complesso poteva essere impiegato non soltanto per le sue caratteristiche idrorepellenti ma anche in virtù del miglioramento delle capacità coesive conferite dal sistema di reazioni chimiche menzionato precedentemente.

¹¹ Dilaria et alii 2023a, 36-52.

¹² Dilaria et alii 2023b, 1,2.

¹³ Vitruvio, *De Architectura*, 2.6.1-2; 5.12.2.

¹⁴ Vitruvio, *De Architectura*, 2.6.1.

¹⁵ Plinio il Vecchio, *Naturalis Historia*, 16.202; 35.166.

¹⁶ Vitruvio, *De Architectura*, 2.6.1; Plinio il Vecchio, *Naturalis Historia*, 35.166.

¹⁷ Brandon et alii 2014.

¹⁸ Vitruvio, *De Architectura*, 2.6.1.

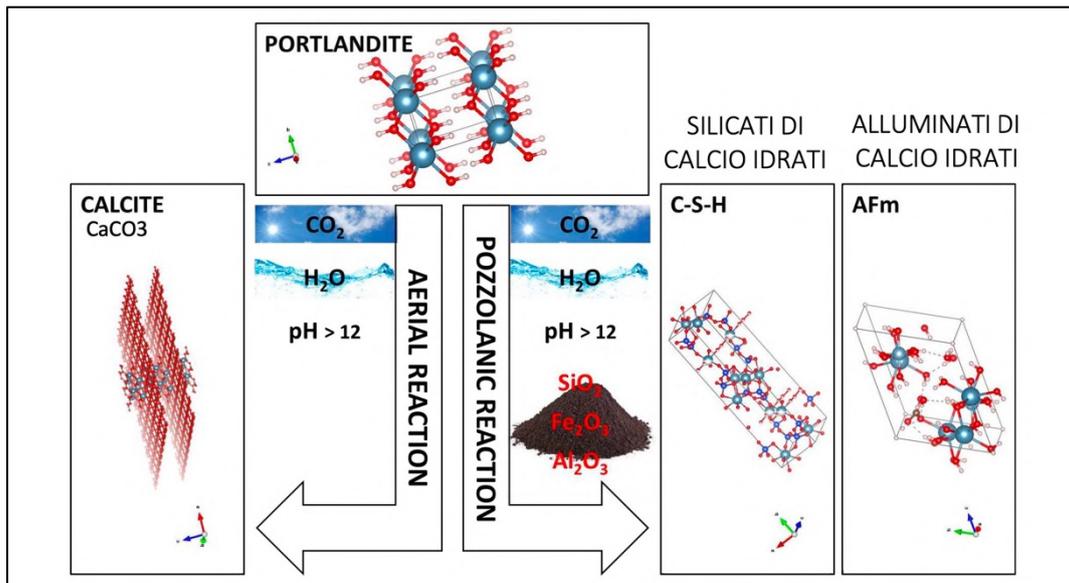


Fig. 1.2.1. Reazione pozzolanica.

1.3 Additivi

Nella realizzazione di una miscela possono essere aggiunte sostanze, per lo più di natura organica, che migliorano le caratteristiche, la lavorabilità, le prestazioni della miscela stessa e prendono il nome di “additivi”¹⁹. Il loro uso risale a epoche molto antiche e si possono suddividere in additivi di natura proteica, e additivi a base di polisaccaridi, olii e grassi²⁰. L’uso di sostanze proteiche è attestato sin dal I secolo a.C. presso i Cretesi e gli Egizi, che usufruivano di gomma arabica, colla animale, latte vegetale, rosso d’uovo, soprattutto per la preparazione di stucchi. Plinio nella *Naturalis Historia* riporta come fosse solito anche per i Romani aggiungere nelle malte sostanze di origine animale e vegetale, come ceneri o fibre vegetali, proprio per ottenere un’elevata resistenza dell’impasto. Per quanto riguarda gli olii, minerali o vegetali, oltre ad agire all’interno dell’impasto, potevano essere applicati sulla superficie delle miscele fresche, con la funzione di evitare che le condizioni ambientali danneggiassero le caratteristiche, esterne ed interne, del materiale. Gli additivi possono avere la funzione di areante, fluidificante, accelerante/ritardante della presa, e possono conferire maggiore adesione e maggiore idrofobicità all’impasto. Gli additivi potevano essere associati ad altre “aggiunte”, come paglia, crine, carbone, e altre sostanze, perlopiù organiche.

¹⁹ Pecchioni, Frantini, Cantisani 2008, 105, 106.

²⁰ Arcolao, Dal Bò, 2001; Sickels, 1981.

Capitolo 2

Nora, inquadramento storico e geografico

La città antica di Nora sorge sulla costa meridionale della Sardegna, nel territorio dell'attuale comune di Pula, all'estremità occidentale del Golfo di Cagliari (fig. 2.1)²¹. Essa si trova in un'area costiera caratterizzata da promontori, spiagge e lagune. Il centro antico occupa proprio uno di questi promontori che presenta una forma sub-triangolare caratterizzata da due punte, una ad est (Punta del Coltellazzo) ed una a sud (Punta 'e su Coloru), ed è circondato dal mare su tre lati, assumendo così la definizione di "penisola".

Questa ebbe origine da un'isola vulcanica saldatasi alla terraferma tramite un istmo sabbioso. Il territorio, infatti, dal punto di vista geologico è costituito da un substrato di rocce vulcaniche a chimismo andesitico-dacitico di color bruno nerastro o grigio chiaro, formatesi nel Miocene. Gli affioramenti vulcanici risultano colmati da depositi tirreniani, ovvero sedimenti costieri che assumono l'aspetto di arenarie ben compattate, ricche di malacofauna, e sfruttate in epoca antica con attività di cava per il reperimento di materiale da costruzione. Con la sua conformazione stretta e allungata, Nora offre un quadro paesaggistico e ambientale straordinario, determinandone il pregio e il fascino, ma al tempo stesso anche un fattore di rischio²². Vento, acqua, sale marino, raggi solari, elementi potenzialmente pericolosi per la loro azione di degrado, si trovano a Nora straordinariamente concentrati. Ma non si può concepire l'antica città senza lo spazio marino che la circonda. Il mare, infatti, fu fonte di ricchezza economica e culturale, e quindi fondamentale per la vita della città; un tempo veicolo di persone, merci, idee, oggi invece minaccia per la conservazione del sito stesso a causa dell'innalzamento dei livelli marini, con un arretramento della linea di costa di diverse decine di metri dall'età romana²³.

²¹ Previato 2016, 13-17.

²² Minoja 2013, 2-3.

²³ Bonetto 2014, 3-10; Carraro, Metelli 2018, 10.



Fig. 2.1. Posizione di Nora in Sardegna e veduta d'insieme della penisola da sud-ovest (da <https://nora.beniculturali.unipd.it/virtual-tour/fotografie-aeree/immagini-statiche/>, ultima consultazione 17/09/2023).

Secondo la tradizione tramandata dallo storico greco Pausania (II secolo d.C.), Nora fu la più antica città della Sardegna, fondata dagli Iberi, identificati con i mercanti fenici sotto la guida dell'ecista Norace. Tuttavia, osserviamo una frequentazione del territorio da parte di genti locali sin dal periodo nuragico, frequentazione che non sembra essere esistita nell'area della penisola, dal momento che non vi sono attestazioni archeologiche che testimoniano la presenza di sedi nuragiche stabili²⁴, ma che è confermata invece nel territorio prossimo ad essa con nuraghi e tombe di giganti risalenti all'età del Bronzo Recente e Finale (1400-1100 a.C. circa)²⁵. E proprio con queste comunità sarde i naviganti levantini iniziarono a scambiare merci a partire dai primi decenni dell'VIII secolo a.C., il tutto testimoniato epigraficamente dall'importante e celebre "stele di Nora"²⁶. Scritta in caratteri fenici e datata tra la seconda metà del IX e il primo quarto dell'VIII secolo a.C., la stele riporta per la prima volta il nome della Sardegna, SRDN, e una dedica alla divinità, segnalando proprio l'esistenza di un luogo sacro, punto di riferimento dei naviganti per i traffici commerciali.

La presenza fenicia si inserì così in un tessuto insediativo marcato dalla presenza nuragica nella stessa area del promontorio, non come occupazione coloniale, ma con una frequentazione stagionale testimoniata non solo dalla stele, ma anche dalla documentazione ceramica, confermando

²⁴ Bonetto 2013, 179.

²⁵ Tronchetti 2018a, 12.

²⁶ Bonetto 2021a, 197-199, 202-206.

la presenza di popoli non locali dalla seconda metà dell'VIII secolo a.C. Le evidenze archeologiche di un primo impianto di occupazione si notano non prima della fine del VII secolo a.C., con buche di palo riferibili a capanne ed edifici dalla pianta irregolare e absidata in materiale deperibile (pali lignei, canne, argilla) con uno zoccolo lapideo alla base, individuate sulle pendici sud-orientali del colle di Tanit, negli strati sottostanti al Tempio Romano e alla zona del Foro²⁷. Gli scavi mostrano come già da questo secolo il centro fenicio fosse ben organizzato e complesso dal punto di vista funzionale, con una suddivisione in tre nuclei separati destinati all'abitato, al centro di culto e ad una necropoli ad incinerazione dislocata nell'estrema parte settentrionale dell'istmo che collega la penisola alla terraferma²⁸.

La situazione cambiò alla fine del VI secolo a.C. quando l'intera Sardegna cadde in mano a Cartagine tra il 545 e il 510 a.C., il tutto documentato dal trattato romano-cartaginese del 509²⁹. Dal punto di vista insediativo Nora subì una nuova strutturazione: le capanne fenicie furono defunzionalizzate e sostituite da nuovi edifici in muratura realizzati con raffinate tecniche costruttive e pietra da taglio ricavata dalle cave del territorio. Lo spazio abitativo venne organizzato in due isolati adiacenti a un asse stradale rettilineo, con funzione anche di luogo per lo stoccaggio delle merci, tra cui molto probabilmente cereali. Altro intervento che vide il ripensamento dello spazio abitativo fu quello dell'architettura sacra, con almeno quattro complessi religiosi documentati nella punta del promontorio. Il primo datato a fine VI secolo a.C. si collocava sulla sommità del colle cui secondo la tradizione ha dato il nome di "Tanit", divinità punica venerata come protettrice della città e legata alla fertilità, alla quale il complesso era dedicato. Altro polo di culto si situava sulle pendici del Colle del Coltellazzo dove gli scavi hanno riportato alla luce una terrazza a cielo aperto con un altare che data alla seconda metà del VI secolo o inizio del V secolo a.C. Un terzo complesso di pieno V secolo a.C. si collocava invece nella parte meridionale del promontorio, verso il mare e verso Cartagine, con rimandi architettonici al mondo orientale. Infine, l'ultimo polo religioso è stato scoperto durante le ricerche presso l'area del Foro romano³⁰. Questo periodo però segna una fase buia per la documentazione archeologica; molti resti infatti sono stati obliterati dall'urbanizzazione romana. Ma una preziosa testimonianza sull'evoluzione dell'insediamento ce la offrono ancora una volta le necropoli situate sull'istmo: una ad est, oggi erosa dal mare, e una ad ovest, sfruttata già in epoca fenicia. Non più caratterizzate da un rito ad incinerazione, le tombe puniche conservavano i corpi nel loro *status post mortem* assieme ai relativi corredi, deposti in fosse rettangolari o all'interno di ipogei scavati nella roccia, databili tra il V e il III secolo a.C. Inoltre, verso la fine del VI e l'inizio del V

²⁷ Bonetto 2021, 91-92.

²⁸ Dilaria 2018, 112-113; Bonetto *et alii* 2020, 1051-1054.

²⁹ Bonetto 2021, 92-95.

³⁰ Bonetto 2009, 141-169.

secolo a.C., una deposizione di stele figurate nell'estremità settentrionale dell'istmo mostra la nascita di un altro santuario, il tofet, un luogo destinato solamente alla sepoltura dei bambini premorti o deceduti poco dopo la nascita³¹. Questi contesti furono l'esito di un processo indicativo di formazione di comunità capaci di decisioni unitarie, con un'organizzazione strutturale sempre più pianificata ed evoluta, che superarono lo stadio di centri a carattere emporico per assumere il "rango" di vere e proprie città.

Nel III secolo a.C. vediamo l'ascesa di un'altra potenza che stava acquisendo sempre più il controllo della penisola italiana, la grande rivale di Cartagine: Roma. La città di Nora entrò sotto il dominio romano a seguito della conquista dell'isola da parte di Roma stessa nel 238 a.C., divenendone poi provincia assieme alla Corsica nel 227 a.C. L'abitato si ampliò verso il centro della penisola, ma la vita di Nora non cambiò, senza presentare cesure dovute all'instaurarsi di questo nuovo ordine politico³². Per i primi due secoli dalla conquista il tessuto urbano rimase invariato e gli edifici pubblici mantennero la stessa funzione, probabilmente mantenendo anche le stesse istituzioni locali di origine punica, dal momento che non vi sono evidenze monumentali destinate ad attività politico-amministrative. A subire invece un netto cambiamento fu la necropoli occidentale, la cui area venne svuotata con fenomeni di spoliazione, e in seguito sfruttata per la raccolta di acqua in cisterne ricavate proprio dai precedenti ipogei, e per attività di cavatura della pietra, utile per l'ampliamento della città³³. La prima fase di monumentalizzazione si colloca nella seconda metà del I secolo a.C., quando gli abitanti di Nora divennero veri e propri cittadini romani. A questo periodo risale la costruzione del foro in un'area centrale dell'abitato compresa tra il colle di Tanit e il promontorio del Coltellazzo, adibita precedentemente ai magazzini di età punica. Per la sua posizione urbana, per l'organizzazione interna degli spazi e la funzione dei singoli edifici, il foro divenne un luogo di incontro per la comunità, indispensabile soprattutto per la vita politica e amministrativa³⁴. I grandi interventi di monumentalizzazione della città avvennero durante la prima età imperiale, a partire dalla realizzazione nel I secolo d.C. di un teatro in muratura nelle vicinanze del foro. Nel corso di questo periodo il centro monumentale cominciò a perfezionarsi, numerose statue dedicate ad imperatori o cittadini illustri vennero erette, mentre vicino al porto si affermò un nuovo quartiere di case-bottega per le esigenze commerciali.

Fu però l'età severiana, ovvero il III secolo d.C., il periodo più fiorente per Nora, come testimonia la crescita delle importazioni ceramiche, lo sviluppo della produzione artistica, e anche a livello infrastrutturale con l'opera di lastricatura delle strade urbane. A questa fase si data, inoltre, la

³¹ Bonetto, Carraro, Minella 2016, 245.

³² Ghiotto, Zara 2020, 5-6; Nervi 2018, 127.

³³ Bonetto *et alii* 2020, 1059.

³⁴ Ghiotto 2018, 33-39.

realizzazione di un tempio esastilo, chiamato “Tempio Romano”, alle pendici sud-orientali del colle di Tanit, e la costruzione di un acquedotto pubblico, fondamentale per i numerosi impianti termali della città: le Terme centrali, le Piccole terme, e le Terme a mare, su cui si soffermerà maggiormente questo elaborato. Questa grande vitalità edilizia proseguì anche nel corso del IV secolo d.C., documentata sia dalla realizzazione di un altro impianto termale, le Terme di Levante, sia dalla monumentalizzazione del già esistente santuario di Esculapio.

Dalla metà del V secolo d.C. iniziarono le invasioni vandale, che si accentuarono sotto il dominio bizantino, dove molte strade persero la loro funzione, e il centro perse la sua unità, con nuclei abitativi isolati³⁵. L’Anonimo Ravennate, testo del VII secolo, cita Nora come semplice *praesidium*, ovvero una fortezza, arrivando poi all’abbandono definitivo del sito. Nel corso del Medioevo venne costruita una chiesetta dedicata a Sant’Efisio, martire di Nora, il cui culto permane ancora oggi.

La città antica rimarrà sepolta fino al 1952. Giovanni Patroni, Gennaro Pesce, Carlo Tronchetti, questi sono solo alcune delle tante persone che hanno dedicato la loro vita nel riportare alla luce il centro antico norense³⁶. Ai giorni nostri le attività di scavo e indagini sul sito sono proseguite da diversi Atenei italiani, tra cui quello di Padova, Milano, Genova, Cagliari, a cui si affiancarono in anni passati anche Pisa, Venezia Ca’ Foscari e Viterbo.

³⁵ Asolati, Bonetto, Zara 2018, 99-100; Bonetto, Ghiotto 2013, 273-274, 279.

³⁶ Tronchetti 2018b, 16-21.

Capitolo 3

Le Terme a Mare

3.1 Articolazione planimetrica e fasi edilizie

L'età medio-imperiale costituì uno dei momenti più felici per la qualità della crescita del panorama architettonico norense³⁷. In questo periodo, infatti, ci furono una serie di importanti iniziative pubbliche, tra cui la ridefinizione della rete stradale urbana, e la costruzione o il rifacimento di complessi privati e pubblici. All'interno di questo arco cronologico, il periodo in cui le attività edilizie risultarono più fervide si ebbe sotto la dinastia dei Severi, coincidente con la fine del II secolo d.C. e l'inizio del secolo successivo. Ne sono testimoni gli importanti interventi di ristrutturazione di alcuni dei principali monumenti norensi, come il santuario di Esculapio, il foro e il teatro, a cui si accompagnarono una serie di nuovi impianti pubblici, tra cui quelli termali, che costituirono la classe architettonica più rappresentata nella Sardegna romana con numerose testimonianze in ambito urbano ed extraurbano³⁸. A Nora questo rinnovamento urbanistico trovò maggiormente spazio in uno dei principali settori della città, il quartiere occidentale, e il fulcro di questa operazione di monumentalizzazione fu la costruzione dell'edificio delle Terme a Mare³⁹.

Situate nel quartiere occidentale, le Terme a Mare, come si deduce anche dal nome, furono costruite in prossimità della linea di costa occidentale dell'istmo norense, un tempo più avanzata rispetto ai giorni nostri⁴⁰ (figg. 3.1.1, 3.1.2). Proprio per la vicinanza alla costa, presso le Terme a Mare, così come in altri complessi balneari del mondo romano, era praticata la talassoterapia, che comprendeva diversi trattamenti che sfruttavano gli effetti benefici del sale marino⁴¹. Oggi, tuttavia, è proprio il mare a costituire la più grande minaccia per l'edificio in sé e per il sito stesso, registrando dall'età romana fino ai giorni nostri una crescita esponenziale del medio mare, con conseguente riduzione dello spazio urbano⁴². Le stesse Terme a Mare ogni anno subiscono l'azione erosiva dei flutti, come testimonia lo stato di avanzato degrado del settore occidentale dell'edificio⁴³.

³⁷ Bonetto 2018, 105-106.

³⁸ Ghiotto 2004, 109.

³⁹ Al giorno d'oggi la parola "terme" definisce i bagni di acqua termo-minerale. Nell'antichità questo concetto era più ampio, comprendendo anche i bagni con acqua riscaldata artificialmente, come nel caso delle Terme a mare, che in ugual modo vantano di effetti terapeutici.

⁴⁰ Tronchetti 2018c, 20, 86.

⁴¹ Ghiotto 2004, 135.

⁴² Bonetto 2014, 3-4; Carraro, Metelli 2018, 20-21.

⁴³ Dal 2008 il parco archeologico si impegna alla manutenzione e conservazione del sito con interventi di messa in sicurezza della linea di costa.

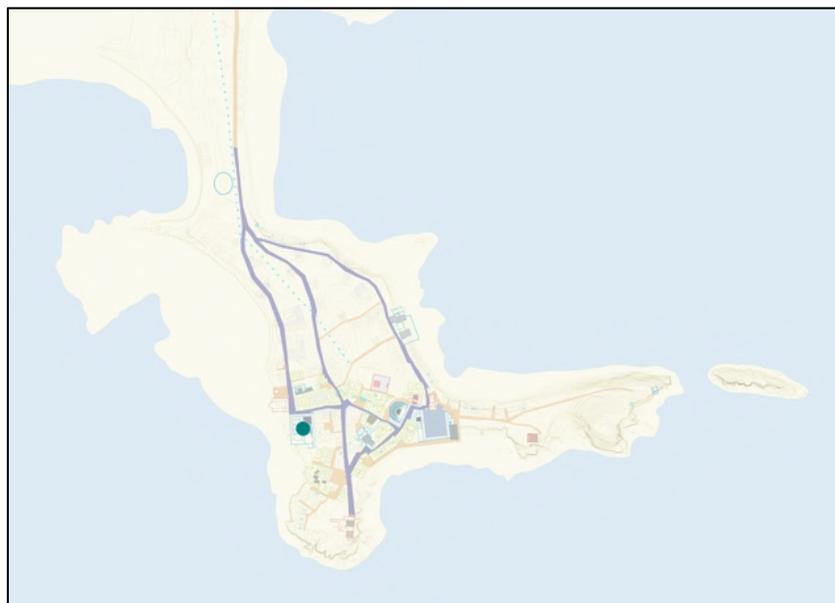


Fig. 3.1.1. Pianta di Nora con posizione delle Terme a Mare (da <https://nora.beniculturali.unipd.it/gli-edifici/edifici-pubblici/terme-a-mare/>, ultima consultazione 01/08/2023).

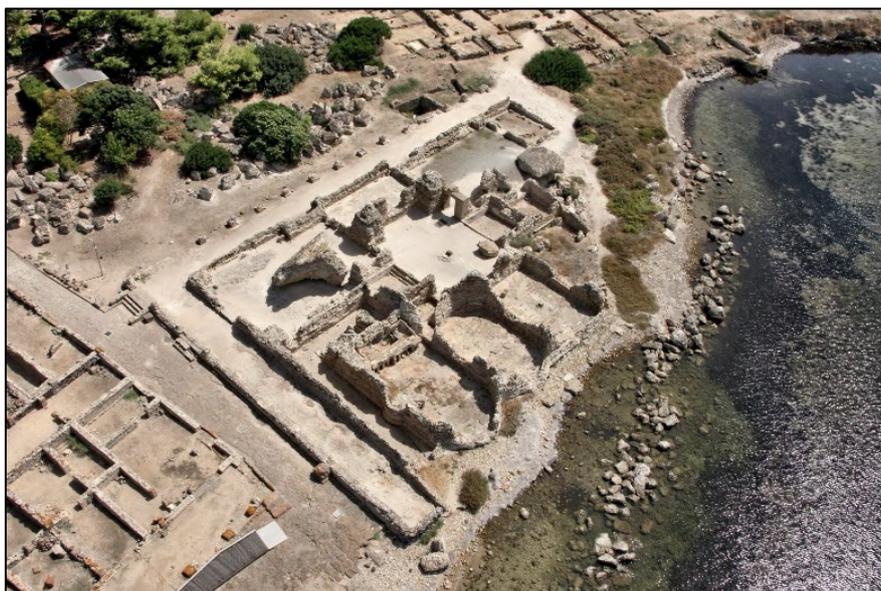


Fig. 3.1.2. Veduta d'insieme da drone da nord-ovest delle Terme a Mare (da Tronchetti 2018a, 87, fig. 68).

Dell'edificio termale di Nora abbiamo notizie solo a partire dall'800 da parte di alcuni viaggiatori, tra cui Francesco d'Austria-Este che descrisse i resti dell'acquedotto, del teatro e di un complesso termale, da identificare probabilmente proprio con le Terme a Mare⁴⁴. Le prime ricerche archeologiche si devono alle indagini condotte da Carlo Tronchetti nel 1977, grazie alle quali fu possibile datare l'edificio agli inizi del III secolo d.C., in età severiana.

⁴⁴ Tronchetti 2018b, 16, 20-21.

Di dimensioni imponenti (57 x 41 m), il complesso si sviluppò con una pianta rettangolare su una superficie superiore a 2300 m², divenendo il maggior edificio termale della città. Dopo la costruzione dell'impianto termale furono realizzate la pavimentazione stradale e un arco come ingresso al centro urbano. A dare accesso allo stabilimento vi era un portico a pilastri (fig. 3.1.3, A), disposto sui lati settentrionale e orientale, e raggiungibile dalla rete stradale tramite una scala di tre gradini in andesite. All'ingresso, l'edificio presentava due atri simmetrici rispetto ad uno spogliatoio o *apodyterium* intermedio (C), pavimentato a mosaico e accessibile solamente dall'atrio settentrionale (B), ritenuto quello principale⁴⁵. Una volta rientrati nell'atrio, si passava ad una grande sala rettangolare centrale, il *frigidarium* (D), un ambiente destinato ai bagni d'acqua fredda che permetteva di raggiungere i vani caldi posti attorno secondo uno schema "anulare". Il *frigidarium* era provvisto di due vasche rettangolari simmetriche sul lato settentrionale e meridionale, dotate di scalini e ornate da tre nicchie parietali da cui sgorgava l'acqua, mentre una nicchia absidata decorava il lato breve orientale. All'interno del *frigidarium* la pavimentazione e le vasche avevano un rivestimento marmoreo, di cui si conservano solo pochi frammenti. A coprire l'ambiente vi erano volte a crociera, come per gli altri vani maggiori, forse rivestite a mosaico, come attesterebbero le tessere rinvenute negli strati di crollo. Volte a botte invece sono attestate negli ambienti minori delle terme. Proseguendo nel suo percorso, il bagnante, passando per una piccola stanza (H), entrava in un vano di pianta absidata, interpretabile come *laconicum* o *tepidarium* (G), dotato di una piccola vasca d'acqua calda e di una nicchia posta sulla parete settentrionale davanti alla soglia che portava al *sudatorium*, secondo ambiente riscaldato (F). Di forma ellissoidale, il *sudatorium* conserva buona parte dell'alzato con gli appositi canali di sfogo dell'aria calda, visibili nello spessore della parete⁴⁶. Infine, un'altra soglia portava al *calidarium* o *tepidarium* di pianta rettangolare (E), ornato da una nicchia rettangolare, con cui si terminava il percorso degli ambienti caldi, rientrando poi nel *frigidarium*. Il sistema di riscaldamento era quello tipicamente romano, che consiste nel ricorso ad uno o più *praefurnia* da cui fuoriusciva aria calda posti al di sotto dei piani di calpestio. Questi ultimi erano sostenuti da piccoli pilastri a base quadrata, le *suspensurae*⁴⁷. In genere, ogni vano riscaldato era dotato di un proprio *praefurnium*, ma nel caso delle Terme a Mare, come in altri edifici termali, si attesta la presenza di forni all'interno di vani e corridoi di servizio ricavati nel sottosuolo, divenendo spazi funzionali, percorribili dal personale addetto al funzionamento della struttura. Inoltre, la presenza di canali di sfogo e di *tegulae mammatæ* infisse nelle intercapedini dei muri ci dimostra come l'aria calda potesse circolare anche attraverso le pareti, avvolgendo l'intero ambiente. Per

⁴⁵ Ghiotto 2004, 115-116.

⁴⁶ Tronchetti 1985, 74.

⁴⁷ Ghiotto 2004, 130; Tronchetti 2018a, 91-92.

conservare al meglio il calore prodotto, questi spazi erano collocati nella parte occidentale delle terme, così da sfruttare al meglio l'illuminazione solare, soprattutto durante il periodo invernale. All'interno dell'edificio vi erano altri vani, raggiungibili tramite un percorso secondario accessibile dal portico orientale. Un grande atrio (M), simmetrico a quello settentrionale e in origine pavimentato a mosaico, conduceva ad un grande ambiente absidato (I) tramite una piccola stanza (L), ricollegandosi poi al *frigidarium* centrale. Il vano, oggi quasi completamente distrutto dall'azione erosiva del mare, poteva costituire un ambiente secondario delle terme, in funzione di *calidarium*, oppure un settore riservato alle donne, come sala per massaggi o per i bagni di sole, che confluiva in un *frigidarium* comune. Nella parte nord-ovest si trovavano gli ambienti di servizio (N), con un ulteriore *praefurnium* collegato tramite un corridoio alla zona occidentale, oggi erosa dal mare, dove si aprivano gli altri forni per il riscaldamento delle stanze. Ultimo ambiente, collocato a sud-est e accessibile dal porticato orientale, era quello destinato a *latrina* pubblica⁴⁸ (O), impianto igienico che sfruttava l'acqua di svuotamento delle vasche del *frigidarium* per convogliare i rifiuti a mare tramite una fogna percorrente l'atrio meridionale e il *frigidarium* stesso⁴⁹. A rifornire idricamente le terme era probabilmente l'acquedotto cittadino, che alimentava serbatoi d'acqua collocati sopra il corridoio, raggiungibili tramite una scaletta di servizio, i cui resti furono trovati vicino al *praefurnium* del corridoio stesso. L'acqua, attraverso canalizzazioni poste all'interno delle pareti, raggiungeva le vasche termali, provviste di fori di scolo per il deflusso delle acque reflue.

Nel V secolo d.C. l'edificio venne pesantemente ristrutturato⁵⁰. Di fronte all'ingresso dell'atrio principale fu costruita una rozza scaletta di accesso dalla strada, mentre fu occlusa la soglia dell'atrio secondario con banconi in muratura realizzati lungo le pareti. La pavimentazione di questi due vani, come quella dello spogliatoio principale, fu sostituita con un lastricato di andesite divelto dalla pavimentazione stradale, mentre gli accessi da una stanza all'altra, compresa la *latrina*, vennero ristretti e rialzati per riadattarli al nuovo piano di calpestio. Lo stesso avvenne per gli ambienti caldi, adeguati al piano base con un riempimento di terra, ricoprendo e defunzionalizzando anche il forno nel vano di servizio, così da creare un nuovo spazio accessibile grazie a un'apertura realizzata nell'atrio principale.

Le terme furono l'ultimo edificio pubblico ad essere utilizzato durante l'abbandono della città tra il VII e l'VIII secolo d.C. In epoca altomedievale, molti edifici termali furono riadattati a luoghi di culto cristiano, ma nella loro ultima fase d'uso, in particolare nel periodo che vide i Vandali

⁴⁸ Pesce 1972a, 84-85.

⁴⁹ Tronchetti 1985, 74; Bonetto 2001, 25; Ghiotto 2004, 130. Questo sistema è attestato anche nelle Terme centrali di Nora e presso le Terme di Convento vecchio a Tharros.

⁵⁰ Ghiotto 2004, 126-127; Tronchetti 2018, 92.

occupare l'isola, le Terme a Mare divennero “fortezza”, come cita anche l'Anonimo Ravennate, a difesa dell'accesso al porto⁵¹.

La loro distruzione fu probabilmente causata da un incendio, testimoniato da numerose tracce di bruciato al di sotto delle volte crollate. In seguito, il sito fu abbandonato con successive frequentazioni fino ai primi decenni del secolo scorso da parte di contadini e pastori, che sfruttavano i grossi blocchi di crollo come riparo dal vento durante le pause del lavoro, il tutto testimoniato da tracce di focolai e vasellame da cucina.

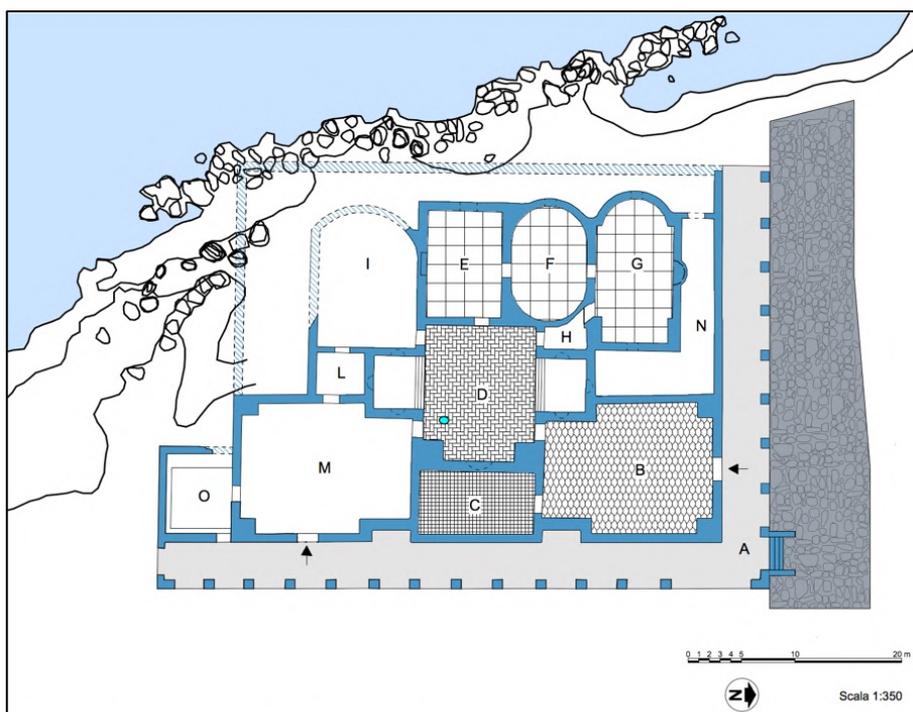


Fig. 3.1.3. Pianta delle Terme a Mare

(da <https://nora.beniculturali.unipd.it/gli-edifici/edifici-pubblici/terme-a-mare/>, ultima consultazione 01/08/23).

3.2 Tecniche costruttive

Gli scavi degli anni '70 hanno mostrato come il terreno su cui furono costruite le terme fosse leggermente in pendenza da est verso la riva del mare ad ovest. Per far fronte al problema, dopo aver costruito le fondazioni murarie poste in imponenti trincee scavate nella roccia, fu necessario creare una piattaforma orizzontale artificiale, alzando così il livello della pavimentazione. Uno strato di miscela legante, forse costituita da sola calce, fu posto alla base, coperto da un riempimento di terreno di circa 1 m di spessore. Al di sopra di questo, fu posto un ulteriore livello di simile composizione, con l'aggiunta di uno strato di 20 cm di argilla giallastra sopra di esso, su cui furono poi realizzati

⁵¹ Tronchetti 1985, 77-79.

pavimenti. Successivamente, sopra le fondamenta vennero costruite le mura, caratterizzate da un paramento in mattoni di forma triangolare, con lati variabili da 20 a 26 cm e uno spessore da 2,5 a 3,5 cm⁵². Ad intervalli regolari di 2,1 m le murature erano attraversate da filari di sesquipedali (45 x 45 cm), con la funzione di consolidare la sezione muraria e di marcapiano man mano che si procedeva con la costruzione per il mantenimento delle quote (figg. 3.2.1, 3.2.2). Il nucleo delle pareti era costituito da gettate di opera cementizia (*opus caementicium*) con elementi grossolani (*caementa*) rappresentati da spezzoni di arenaria di forma irregolare e disposti in corsi orizzontali⁵³. La stessa composizione si osserva anche nelle volte delle stanze, oggi ancora visibili all'interno dell'edificio ma in stato di collasso. Nelle stanze più piccole vi erano volte a botte, mentre, in quelle più grandi, volte a crociera, con nervature di laterizio e colate centrali di *opus caementicium* (figg. 3.2.3, 3.2.4). Per quanto riguarda la pavimentazione, le stanze riscaldate erano caratterizzate dalla presenza di pavimenti ad ipocausto.

La pavimentazione di base, conservata in tutte le stanze, era costituita da bipedali (60 x 60 cm), su cui poggiavano pilastri alti circa 80 cm, composti da mattoni quadrati di 20-21 cm (fig. 3.2.5). Sopra di essi, un ulteriore strato di mattoni fungeva da base per i livelli preparatori del pavimento su *suspensurae* (fig. 3.2.6). L'aria calda prodotta dai *prae-furnia* passava sotto i pavimenti e lungo le pareti, dove fluiva attraverso fessure realizzate con *tegulae mammatae*, fissate alla parete da chiodi di ferro (fig. 3.2.7). Il calore così riscaldava i vani e l'acqua posta nelle vasche, impermeabilizzate grazie all'uso di miscela legante idraulica (cocciopesto). Un materiale raro di cui si trovano poche tracce è il marmo, utilizzato in funzione decorativa nel rivestimento della pavimentazione di alcuni ambienti, tra cui il *frigidarium*, e all'interno delle vasche termali (fig. 3.2.8)⁵⁴. Sotto la pavimentazione dell'edificio vi era un sistema di smaltimento dell'acqua, costruito da un condotto fognario realizzato con paramento in elementi lapidei e nucleo in opera cementizia. La copertura è invece alla "cappuccina".

L'acqua raggiungeva la *latrina*, costituita da sedili di arenaria sagomati, oggi ancora visibili sui lati est, sud e ovest della stanza.

⁵² In alcuni punti, blocchi parallelepipedi di arenaria furono inseriti nel rivestimento in mattoni. Probabilmente sono legati a restauri antichi (Tronchetti 1985, 72).

⁵³ Previato 2023, 123-136.

⁵⁴ Tronchetti 1985, 72-73.

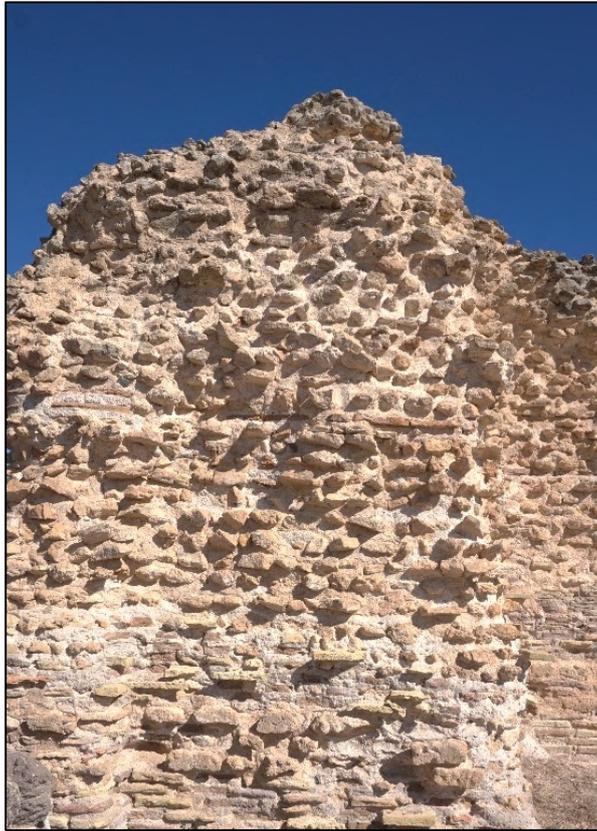


Fig. 3.2.1. Alzato con nucleo in calcestruzzo e mattoni di forma irregolare, disposti in corsi orizzontali, alternati a filari di sesquipedali.



Fig. 3.2.2. Dettaglio muratura.



Fig. 3.2.3. Volta a crociera in stato di collasso nell'atrio principale (vano B).



Fig. 3.2.4. Dettaglio della volta.



Fig. 3.2.5. Veduta da nord-est del *calidarium/tepidarium* (vano E) con pavimentazione in bipedali.



Fig. 3.2.6. Intercapedine del *praefurnium* con ricostruzione delle *suspensurae*, su cui poggia la pavimentazione della vasca del *laconicum/tepidarium* (vano G).

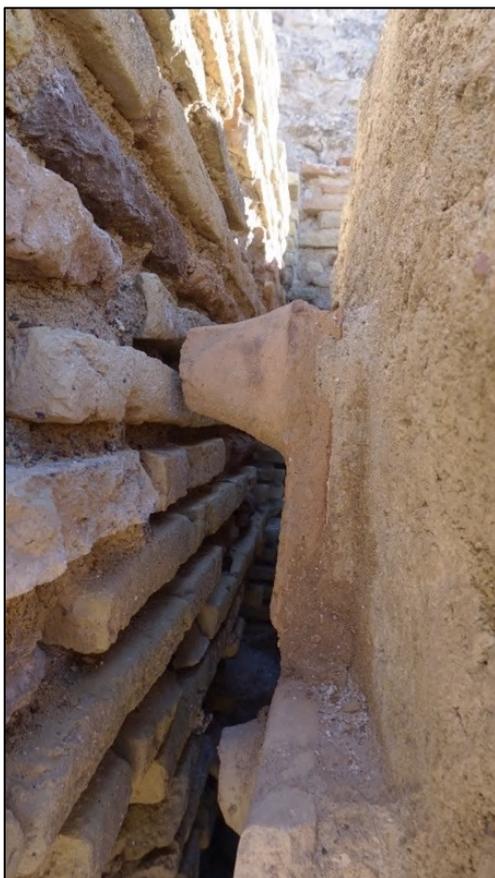


Fig. 3.2.7. *Tegula mammata* fissata sulla parete del *laconicum/tepidarium* (vano G).



Fig. 3.2.8. Lastra di rivestimento marmorea della pavimentazione.

Capitolo 4

Campionamento e metodi di analisi

4.1 Il campionamento

Cinque campioni di miscela legante e dodici campioni di rocce vulcaniche sono stati raccolti dalle strutture murarie e dalle volte dei vani delle Terme a Mare (figg. 4.1.1, 4.1.2). Il campionamento ha consentito la raccolta di clasti vulcanici grossolani, di cui si distinguono prevalentemente rocce di origine piroclastica costituite sostanzialmente da pomici e tufi (fig. 4.1.3). Tufi e pomici sono considerate potenziali pozzolane naturali per via dell'elevata componente di silice ed alluminio reattiva, data la loro natura prevalentemente amorfa.

I campioni di roccia vulcanica TMAR_1, TMAR_2, TMAR_3, TMAR_4, TMAR_16, TMAR_6 e TMAR_7 provengono dalle volte in crollo del vano B e M, identificati come atrio principale e secondario dell'edificio termale.

Nel dettaglio, il campione TMAR_1 proviene dalla porzione di opera cementizia di una volta in crollo rinvenuta nell'atrio principale B; TMAR_2, TMAR_3, TMAR_4 provengono dalla gettata in opera cementizia interposta alla nervatura della volta del vano B; TMAR_16 proviene dal nucleo di una volta dell'atrio B; i campioni TMAR_6 e TMAR_7 invece provengono dalla gettata in opera cementizia di una volta in crollo dell'atrio secondario M. Il campione TMAR_5 è stato prelevato dal nucleo della struttura muraria in laterizi perimetrale est del *frigidarium* (vano D), vicino all'ingresso che conduce all'atrio secondario; TMAR_9 proviene dal nucleo della struttura muraria in laterizi perimetrale nord dell'ambiente di servizio (ambiente N), mentre TMAR_10 e TMAR_11 dal nucleo della struttura muraria perimetrale sud del medesimo ambiente. L'ultimo campione, TMAR_8, proviene invece dal nucleo della struttura muraria in laterizi perimetrale ovest, esterna al secondo ambiente riscaldato, il *sudatorium* (vano F), e appartenente ad ambienti oggi erosi dal mare.

Per quanto riguarda le miscele leganti, sono stati prelevati cinque campioni in cinque diversi ambienti dell'impianto termale, quali l'atrio principale settentrionale, il vano G, interpretabile come *laconicum* o *tepidarium*, l'ambiente N di servizio delle terme, l'atrio secondario, e l'ambiente L, piccola stanza che collegava l'atrio secondario al *frigidarium* centrale (fig. 4.1.4).

Nello specifico, i campioni TMAR_13 e TMAR_14 provengono dalle volte in crollo dei corrispettivi atri dell'edificio, precisamente il TMAR_13 dalla malta del nucleo della volta nell'atrio principale B, e TMAR_14 dalla malta di allettamento della nervatura in mattoni della volta nell'atrio secondario M. Il campione TMAR_12 è stato prelevato dal nucleo della struttura muraria perimetrale est dell'ambiente di servizio N; il campione TMAR_15 proviene invece dal paramento della struttura muraria in laterizi perimetrale nord del piccolo vano L. L'ultimo campione, TMAR_17, proviene dal

paramento della struttura muraria in mattoni di una vasca presso il *praefurnium* posto nel vano G (tabella 4.1.1).

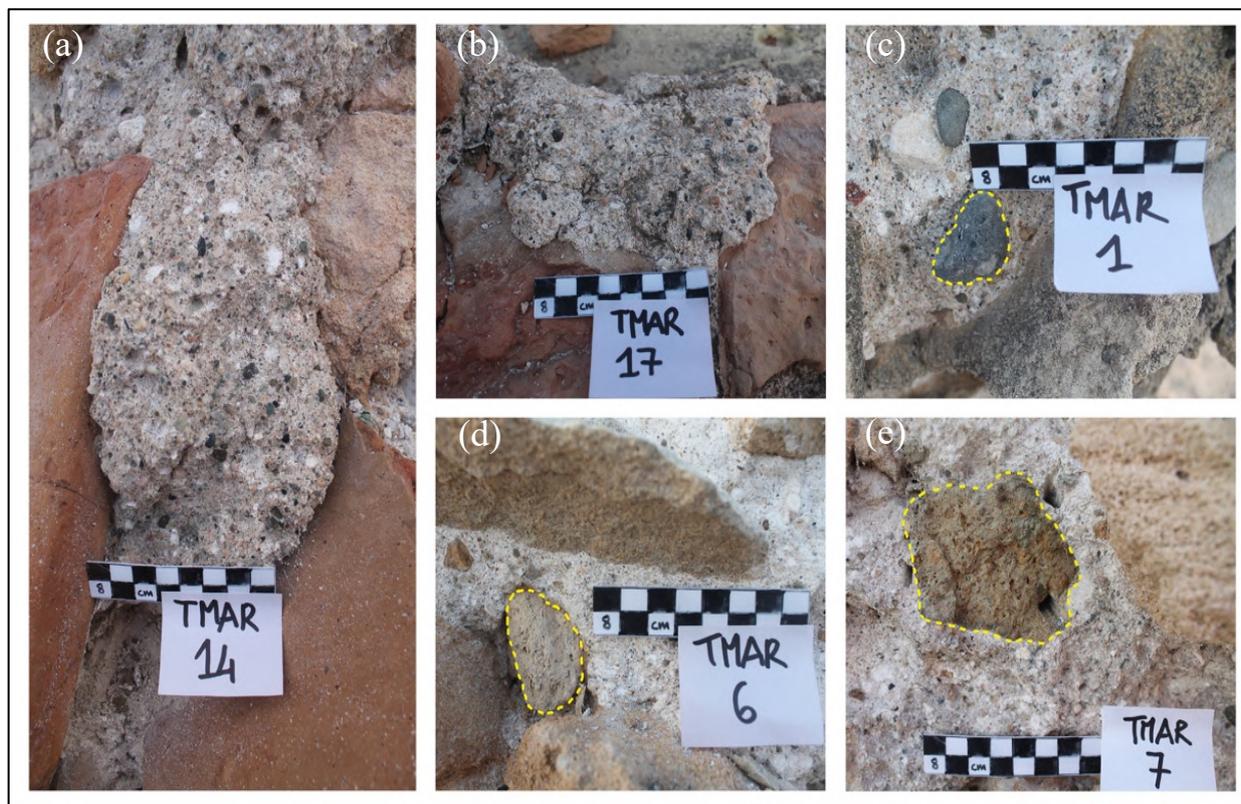


Fig. 4.1.1. (a,b) campionamento delle miscele leganti; (c-e) clasti grossolani di rocce vulcaniche, evidenziati da una linea tratteggiata gialla.

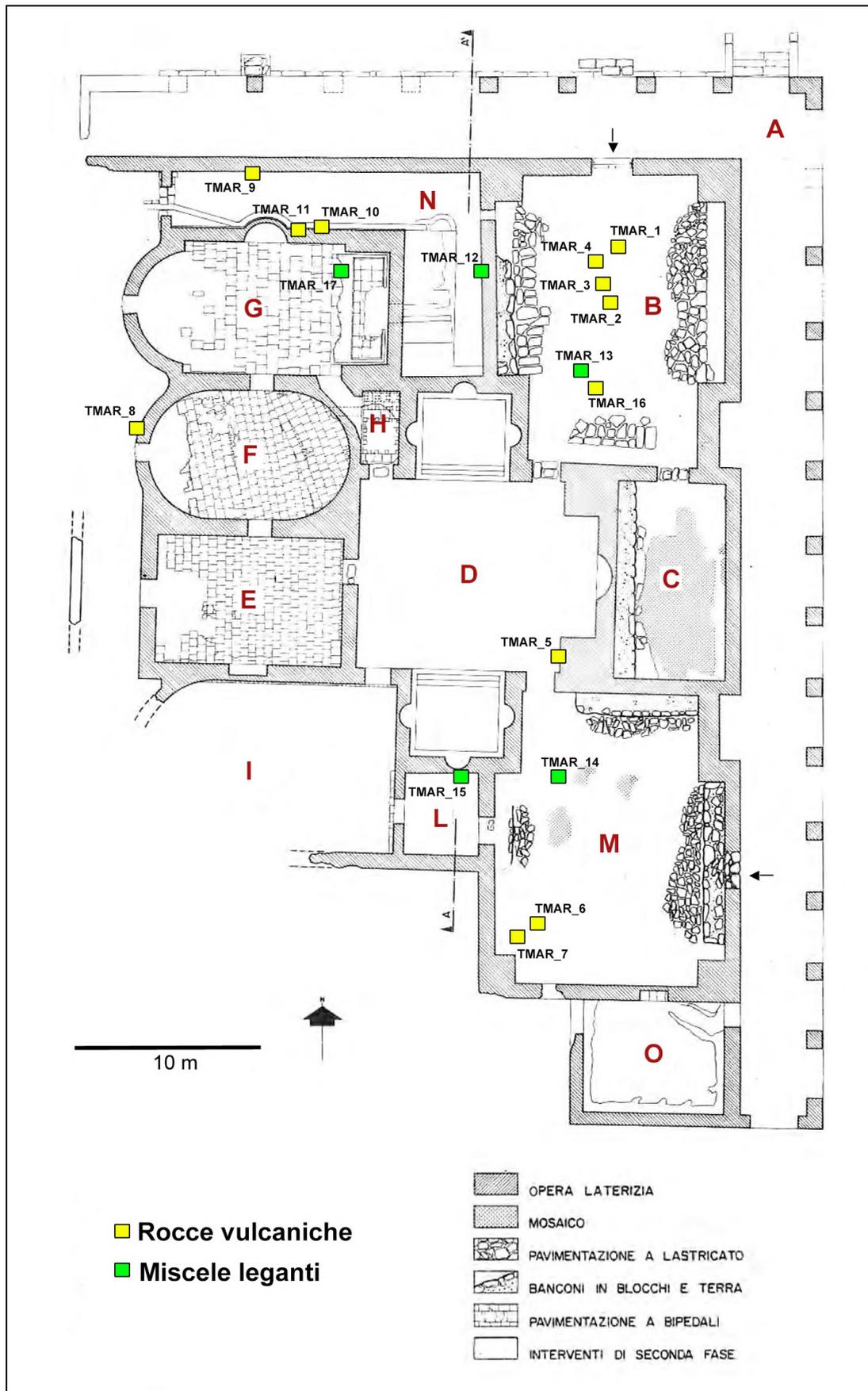


Figura 4.1.2. Distribuzione planimetrica dei campioni analizzati di miscele leganti e rocce vulcaniche (pianta rielaborata da Tronchetti 1985, 106, fig. 12).

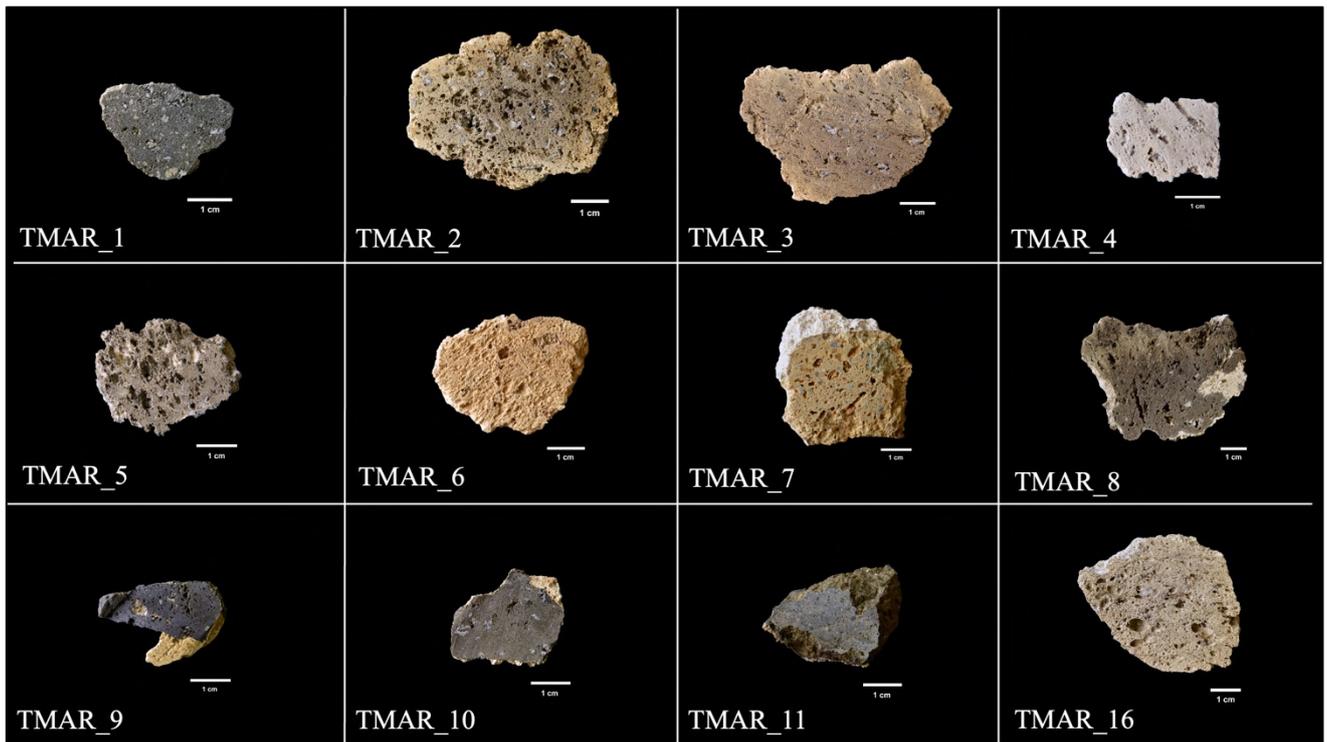


Fig. 4.1.3. Clasti di rocce vulcaniche: pomici e tufi.

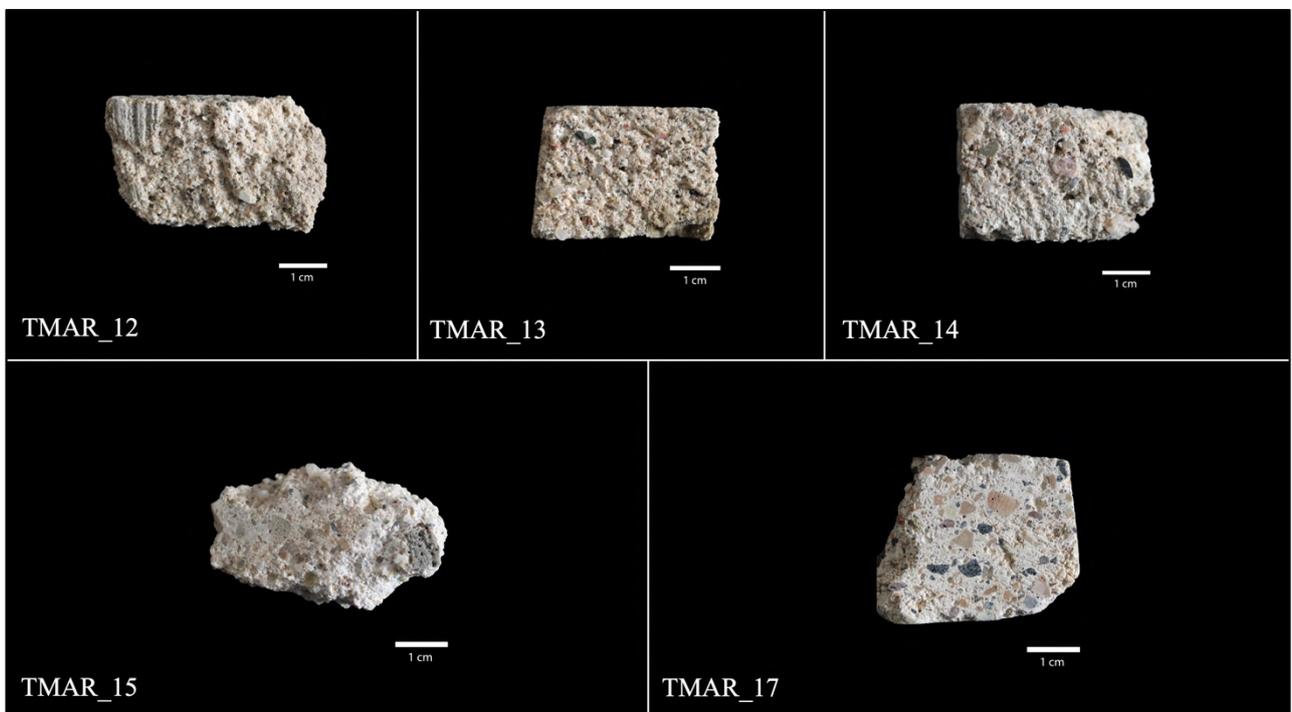


Fig. 4.1.4. Campioni di miscele leganti dopo il taglio petrografico.

Campione	Tipo (malta/clasto)	Porzione strutturale	Vano
TMAR_1	Pomice compatta	Opus caementicium volta in crollo	Atrio principale B
TMAR_2	Pomice	Opus caementicium volta in crollo	Atrio principale B
TMAR_3	Pomice	Opus caementicium volta in crollo	Atrio principale B
TMAR_4	Pomice biancastra	Opus caementicium volta in crollo	Atrio principale B
TMAR_5	Pomice nera	Nucleo di struttura muraria in laterizi	<i>Frigidarium D</i>
TMAR_6	Pomice gialla	Opus caementicium volta in crollo	Atrio secondario M
TMAR_7	Tufo giallo	Opus caementicium volta in crollo	Atrio secondario M
TMAR_8	Pomice nera	Nucleo struttura muraria in laterizi	<i>Sudatorium F</i>
TMAR_9	Pomice inglobata in tufo giallo	Nucleo struttura muraria in laterizi	Ambiente di servizio N
TMAR_10	Pomice	Nucleo struttura muraria in laterizi	Ambiente di servizio N
TMAR_11	Pomice compatta	Nucleo struttura muraria in laterizi	Ambiente di servizio N
TMAR_12	Malta pozzolanica	Nucleo struttura muraria in laterizi	Ambiente di servizio N
TMAR_13	Malta pozzolanica	Nucleo volta in crollo	Atrio principale B
TMAR_14	Malta pozzolanica	Malta di allettamento nervatura in mattoni della volta in crollo	Atrio secondario M
TMAR_15	Malta pozzolanica	Paramento struttura muraria in laterizi	Vano L
TMAR_16	Pomice grigia	Nucleo di una volta in crollo	Atrio principale B
TMAR_17	Malta pozzolanica	Paramento struttura muraria in mattoni di una vasca	<i>Praefurnium vano G</i>

Tabella 4.1.1. Tabella dei campioni analizzati e posizione.

4.2 I metodi di analisi

4.2.1 Microscopia ottica (OM)

Tutti i campioni di miscele leganti sono stati analizzati con un microscopio ottico (OM = Optical Microscopy) a luce polarizzata, al fine di determinarne la tessitura e le caratteristiche petrografico-mineralogiche. I campioni sono stati sottoposti a taglio petrografico con troncatrice per ottenere una sezione trasversale, rappresentativa dei diversi strati di rivestimento. Attraverso l'uso di un'unità di impregnazione sottovuoto (Struers Citovac), lappatrici (Struers Planopol-3 e Struers LaboPol-5), sistemi di assottigliamento (Buehler Petrothin e Logitech LP20) e lucidatrici (Labopol-35 con braccio labo-Force Mi), è stata ottenuta una sezione sottile di spessore pari a 30 μm . In seguito, le sezioni sottili sono state analizzate con un microscopio Leica DM750 P munito di fotocamera digitale integrata FLEXACAM C1 (fig. 4.2.1).

Lo studio petrografico è stato eseguito in luce polarizzata trasmessa operando sia a nicol paralleli sia a nicol incrociati (con l'analizzatore inserito). I minerali osservati al microscopio presentano colorazioni caratteristiche e diagnostiche, che ne permettono la caratterizzazione ed il riconoscimento. La descrizione petrografica dei composti è stata effettuata in accordo con le direttive della norma UNI 1176: 2006 "Beni culturali: descrizione petrografica di una malta", che riguarda:

Descrizione macroscopica, ossia osservazione delle caratteristiche strutturali e morfologiche visibili ad occhio nudo, che comprende:

- definizione della stratigrafia (numero, spessore dei singoli strati);
- descrizione del colore;
- valutazione della coesione complessiva del composto (determinata empiricamente).

Descrizione microscopica, ovvero:

- descrizione del legante (la sua struttura, tessitura, composizione mineralogica ed eventuali forme di interazione con l'aggregato);
- definizione della quantità e della distribuzione dei pori e loro forma;
- descrizione morfologica e petro-mineralogica dell'aggregato di ciascuno strato (forma, sfericità e arrotondamento, granulometria, dimensioni, classazione, distribuzione areale, presenza di bordi di reazione nelle aree di interfaccia con la componente legante, composizione petrografico-mineralogica dei clasti);
- definizione del tipo e della quantità di additivi (se presenti);

- stima delle proporzioni tra legante ed aggregato (L : A), spesso semplificato in parti (ad es. 1 : 2; 3 : 1 ecc.).⁵⁵

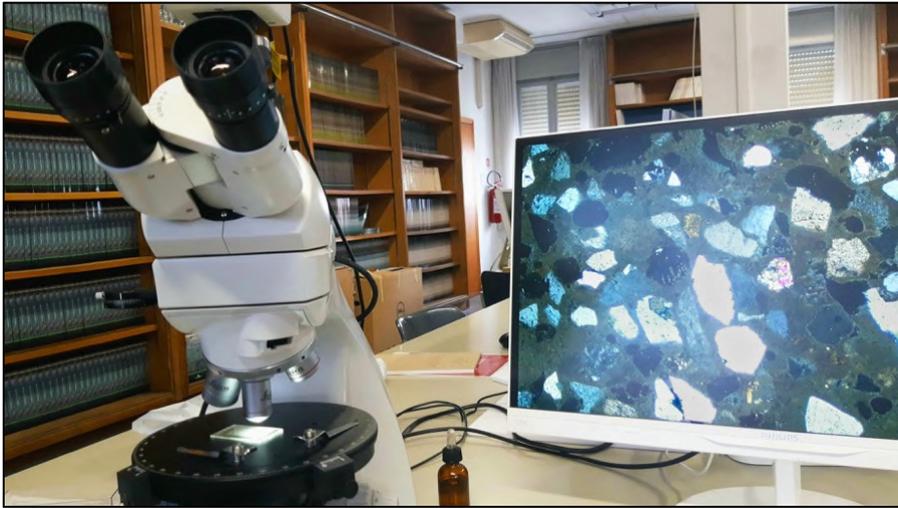


Fig. 4.2.1. Analisi di una sezione sottile al microscopio ottico Leica DM750 P.

4.2.2 *Fluorescenza a raggi X (XRF)*

L'analisi della fluorescenza a raggi X (X-Ray Fluorescence) è stata adottata per caratterizzare la composizione chimica degli elementi maggiori e in traccia delle rocce vulcaniche campionate, e determinarne la provenienza, comparandoli tra loro con i dati nella letteratura. L'analisi è stata eseguita con uno spettrometro sequenziale WDS Panalytical Zetium operando in condizioni di sottovuoto ed equipaggiato con un tubo al rodio con un'intensità di 2.4 kW.

I campioni di pomice e tufo sono stati spianati e puliti meccanicamente per rimuovere contaminazioni ambientali e post-deposizionali, e successivamente macinati in un mortaio d'agata alla dimensione granulometrica di 180 μm , fino ad ottenere circa 2-3 grammi di polvere (fig. 4.2.2).

⁵⁵ Pecchioni, Frantini, Cantisani 2014.

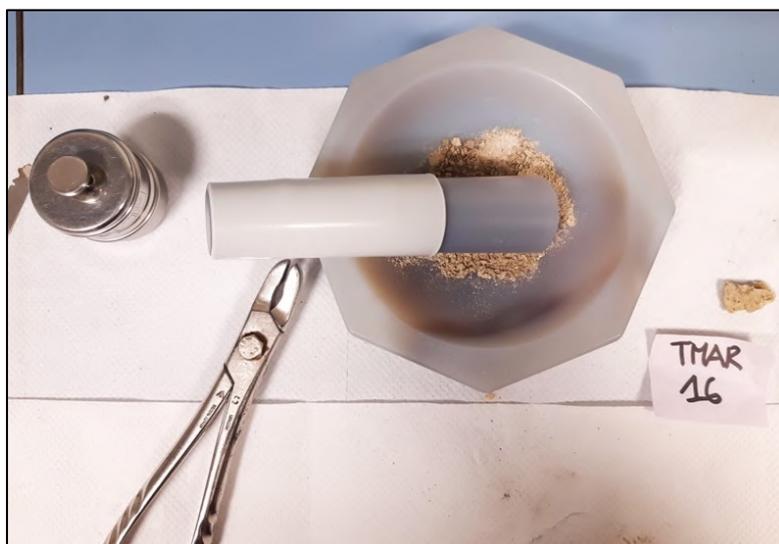


Fig. 4.2.2. Macinazione del campione TMAR_16 (pomice) con mortaio d'agata e successiva setacciatura.

Per determinare il Loss On Ignition (L.O.I), ovvero il valore di perdita alla fusione, i campioni sono stati sottoposti a cottura in un forno elettrico a muffola prima alla temperatura di 860°C per circa 20 minuti, e poi a 980°C per circa 2 ore. I campioni sono stati trasformati in perle utilizzando tetraborato di litio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) come fluido ad un grado di diluizione di 1:10. La fusione è stata eseguita utilizzando un mulino a perle Claisse Eagon 2 (temperatura massima ottenuta circa 1150°C).

Gli elementi maggiori calcolati sono Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P (espressi in percentuale del relativo ossido). Gli elementi in traccia, conteggiati in ppm (parti per milione), sono Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, La, Ce, Nd, Pb, Th, U. Il valore di perdita alla fusione (L.O.I) è stato calcolato separatamente. La precisione strumentale (definita attraverso ripetute analisi sullo stesso campione) è entro lo 0.6% per gli elementi maggiori ed entro il 3.0% per gli elementi in traccia. I limiti di rilevabilità (L.O.D.) per Al, Mg e Na sono entro lo 0.01%, entro lo 0.2% per il Si, ed entro 0.005% per Ti, Fe, Mn, Ca, K e P. I limiti per gli elementi in traccia sono (in ppm) Sc = 3, V = 5, Cr = 6, Co = 3, Ni = 3, Cu = 3, Zn = 3, Ga = 3, Rb = 3, Sr = 3, Y = 3, Zr = 3, Nb = 3, Ba = 10, La = 10, Ce = 10, Nd = 10, Pb = 5, Th = 3, U = 3.

4.2.3 *Microscopia elettronica a scansione associata a spettroscopia a energia dispersiva (SEM-EDS)*

Le analisi al SEM-EDS (Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectroscopy) sono state effettuate su sezione sottile di 30 μm del campione legante TMAR_17 con un microscopio elettronico a scansione COXEM EM 30AX con filamento al Tungsteno (W), dotato di rilevatori SE

e BSE (Solid type 4 Channel) e un rivelatore di raggi X a energia dispersiva (EDX) EDAX Element-C2B (fig. 4.2.3).

Prima delle analisi, la sezione sottile è stata rivestita di grafite e in seguito posta sottovuoto. Le analisi si sono concentrate sullo studio del chimismo delle ossidiane contenute nel campione, e sull'osservazione dei suoi processi di reazione con il legante. Lo spettrometro EDS ha consentito di acquisire lo spettro di emissione completo e di identificare i diversi elementi che compongono il campione con le relative proporzioni. L'intensità (espressa in luminosità) dei raggi X caratteristici di ogni elemento è stata riportata in un'immagine digitale in backscattered (in scala di grigi). Questa ha fornito una mappa semiquantitativa della distribuzione dell'elemento sulla superficie del campione, prendendo in considerazione o l'intera immagine o un'area ridotta.



Fig. 4.2.3. Analisi al SEM COXEM EM 30AX con spettrometria EDS.

Capitolo 5

Risultati

5.1 Caratterizzazione delle miscele leganti

L'analisi al microscopio ottico dei cinque campioni di miscele leganti qui presi in esame ha permesso di descriverne i caratteri petrografico-mineralogici e tessiturali, potendo in seguito identificare gruppi di campioni con caratteristiche simili. Sulla base dei dati di scavo, tutti i campioni sarebbero da riferire ad elementi strutturali pertinenti alla fase medio imperiale del complesso termale (inizi del III secolo d.C.). Macroscopicamente essi presentano aggregati non macinati finemente, ma di grossa granulometria e sottoposti a diversa selezione. Nella maggior parte dei campioni prevale un aspetto granulare arenaceo caratterizzato da frammenti di calcari cristallini, accompagnati da clasti vulcanici (come tufi e prevalentemente pomici) color grigio-nerastro.

Il campione TMAR_17 si distingue da tutti gli altri per la presenza consistente di materiale fittile, molto più grossolano degli altri aggregati, e intervallato a frammenti di materiale vulcanico color grigio-nerastro. Gli aggregati dei cinque campioni sono immersi in una matrice legante biancastra. In seguito alle osservazioni macroscopiche, le analisi al microscopio hanno permesso di identificare con maggior precisione le caratteristiche composizionali dei campioni e di riunirli in un gruppo principale (Gruppo 1) con un evidente outlier (tabella 5.1.1).

Gruppo 1

Le analisi microscopiche all'interno dei campioni del gruppo 1 hanno permesso di caratterizzarli petrograficamente e di distinguerli in due sottogruppi (sottogruppo 1a e sottogruppo 1b) per alcune leggere differenze composizionali.

I campioni TMAR_12, TMAR_13, TMAR_14 (sottogruppo 1a), provenienti sia dal nucleo della struttura muraria di un ambiente di servizio (TMAR_12) sia dalle volte in crollo dei due atrii dell'edificio (TMAR_13 e TMAR_14), mostrano simili caratteristiche composizionali e tessiturali. Sono malte a base di calce aerea "grasse" (proporzioni legante:aggregato maggiori di 1:2, poco più superiori in TMAR_12), costituite da un legante calcico micritico, leggermente zonato in TMAR_13, a struttura omogenea ma mal addensato. Numerosi sono infatti i grumi di calce non miscelata, spesso con microfratture, e alcuni relitti incotti delle rocce sottoposte a calcinazione, tra cui si riconoscono calcari cristallini (prevalenti nel campione TMAR_14). La porosità è abbastanza diffusa, soprattutto in TMAR_12, data la presenza di vughs (vuoti) subarrotondati, accompagnati da planar voids e qualche sporadico channel (fratture da ritiro). L'aggregato è costituito da sabbie piuttosto classate e

rientranti nel *range* delle sabbie medio-grosse (0.4-0.6 mm), secondo la scala Wentworth⁵⁶. Sotto il profilo petro-mineralogico, i campioni mostrano una selezione bimodale dell'aggregato, rappresentato prevalentemente e abbondantemente da granuli sub-angolosi di quarzo, con quarziti e graniti/granitoidi, e sporadici clasti di K-feldspati (principalmente ortoclasio). In frazione molto ridotta, si osservano clasti carbonatici e vulcaniti laviche, clasti di arenaria, e saltuariamente singoli minerali di biotite e pirosseni. La distribuzione petro-mineralogica dei clasti di sabbie d'aggregato risulta compatibile con i depositi sedimentari locali⁵⁷. Si identificano, inoltre, in TMAR_13 bioclasti (gasteropodi), e qualche frammento fittile nel campione TMAR_14 (figg. 5.1.1, 5.1.2, 5.1.3).

Tra le pozzolane vulcaniche, in concentrazioni sempre elevate vi sono rocce piroclastiche non frantumate, soprattutto pomici con fenocristalli di feldspati e biotite, mediamente prevalenti nei campioni TMAR_13 e TMAR_14, e, in quest'ultimo, con una tessitura principalmente afirica e leggermente porfirifica. Sotto il profilo tessiturale le caratteristiche di questi elementi vulcanici non sembrano compatibili con la geologia locale.

Le pomici presentano in tutti i campioni del gruppo una debole reazione pozzolanica con il legante circostante, limitata alle interfacce tra clasto e matrice calcica e non appaiono invece particolarmente alterate.

Da questo primo gruppo si distingue leggermente TMAR_15 per alcune caratteristiche tessiturali e composizionali (sottogruppo 1b).

TMAR_15, proveniente dal paramento della struttura muraria del vano L (vano di servizio), è una malta a base calce che si differenzia dal primo gruppo di campioni per alcuni aspetti. Il legante è costituito da calce aerea con una tessitura micro-sparitica, e appare piuttosto disomogeneo con addensamenti a bassa birifrangenza. Il composto ha un rapporto legante:aggregato di circa 1:1.5 (impasto leggermente grasso), e appare meglio miscelato rispetto ai campioni del sottogruppo 1a, per via dell'assenza di calcinaroli e per la ridotta occorrenza di relitti di cottura. La porosità è mediamente rilevante con la presenza di vughs subarrotondati. Vi è una selezione polimodale dell'aggregato, costituito, anche in questo campione, prevalentemente da sabbie leggermente più grossolane (0.4-1.5 mm), sempre di provenienza locale, composte principalmente da quarzo, K-feldspati (ortoclasio), e, meno frequenti, da quarziti e granitoidi. In concentrazione ridotta vi sono clasti vulcanici andesitico-dacitici (lave), clinopirosseni, clasti di arenaria, calcareniti (arenite tirreniana), e bioclasti, tra cui si riconoscono bivalvi (conchiglie) (figg. 5.1.4, 5.1.5).

⁵⁶ Wentworth 1922.

⁵⁷ Melis, Columbu 2000.

Tra le pozzolane vulcaniche, ricorrenti sono i frammenti grossolani di pomici con microliti e qualche frammento di tufo, all'apparenza reagiti in maniera più intensa con la calce rispetto a quanto visto in precedenza.

Outlier

L'ultimo campione, TMAR_17, proveniente dal paramento della struttura muraria di una vasca presso il *praefurnium* posto nel *tepidarium/laconicum*, mostra caratteristiche composizionali completamente diverse rispetto ai precedenti campioni. Anch'esso è una malta di calce aerea con un impasto "grasso" (proporzioni legante:aggregato maggiori di 1:2), avente un legante calcico a tessitura micritica non sempre omogenea. Il composto appare poco miscelato, a causa dell'elevata presenza di grumi di calce nel legante, e con una lieve porosità data da vughs e vescicles, causati da fenomeni di ritiro. L'aggregato è costituito essenzialmente da una grande quantità di frammenti fittili (fig.5.1.6), con smagrange differenziato, dalla variabile distribuzione granulometrica: da clasti plurimillimetrici fino a piccoli frammenti micrometrici (polvere fittile). Tali frammenti presentano avanzati fenomeni di reazione pozzolanica con il legante carbonatico. Anche l'analisi della matrice del campione, nelle zone prossime ai clasti fittili, presenta addensamenti a bassa birifrangenza, verosimilmente imputabili alla diffusione locale di fasi idrauliche.

Peculiare è la presenza di un'altra tipologia di aggregato vulcanico piroclastico. In questo caso non si tratta di pomici porose ma di ossidiane, in frammenti e shards, e ignimbriti riolitiche, costituite da fenocristalli prevalentemente di plagioclasio e da ossidi di ferro (figg. 5.1.7, 5.1.8, 5.1.9). Come osservato con indagini puntuali SEM-EDS, tuttavia, la reattività di queste peculiari pozzolane appare estremamente contenuta, in quanto i bordi di reazione appaiono estremamente esigui, con minimo arricchimento in Ca. Infatti, le matrici, nelle immediate vicinanze dei clasti appaiono invece eminentemente calciche, come dimostrato con analisi areali EDS (figg. 5.1.10 e 5.1.11). Si è potuto quindi osservare una limitata reattività agli immediati intorno del vetro vulcanico, a differenza di una maggiore reazione della componente fittile. Ciò dimostra un limitato potere idraulicizzante di queste particolari pozzolane vulcaniche.

Minoritaria è la componente sabbiosa dell'aggregato, anche in questo caso costituita da clasti quarzoso-feldspatici (plagioclasio). Una componente accessoria degli impasti è costituita da clasti di lave vulcaniche (andesiti, verosimilmente locali). Tra gli aggregati è presente anche un frammento di osso animale, forse calcinato. Tracce minime di pomice sono state anche osservate.

Campione	Gruppo	Legante	Lumps	Porosità	Aggregati
TMAR_12, TMAR_13, TMAR_14	1a	calcico, micritico, omogeneo	grumi di calce (+) relitti di cottura (-)	vughs (++) channels (--)	Quarzo (++) ; Quarziti (+); Feldspati (+); Graniti/granitoidi (+); Pomice (++) ; Clasti carbonatici (--); Clasti vulcanici (-); Arenaria (--); Pirosseni (--); Conchiglie marine (--); Fr. fittile (--)
TMAR_15	1b	calcico, micro-sparitico, disomogeneo	relitti di cottura (-)	vughs (++)	Quarzo (++) ; Quarziti (+); Granitoidi (+); Feldspati (++) ; Pomice (+); Clasti vulcanici (-); Conchiglie marine (--); Arenaria (--); Clinopirosseni (--); Tufo (--); Calcarenite (-);
TMAR_17	outlier	calcico, micritico, omogeneo	grumi di calce (++)	vughs (+) vescicles (+)	Fr. fittili (+++); Ossidiana (++) ; Clasti vulcanici (+); Feldspati (-); Quarzo (-); Pomice (--)

Tabella 5.1.1. Caratterizzazione petrografica e tessiturale delle malte analizzate. +++ = prevalente; ++ = frequente; + = presente; - = scarso; -- = occasionale.

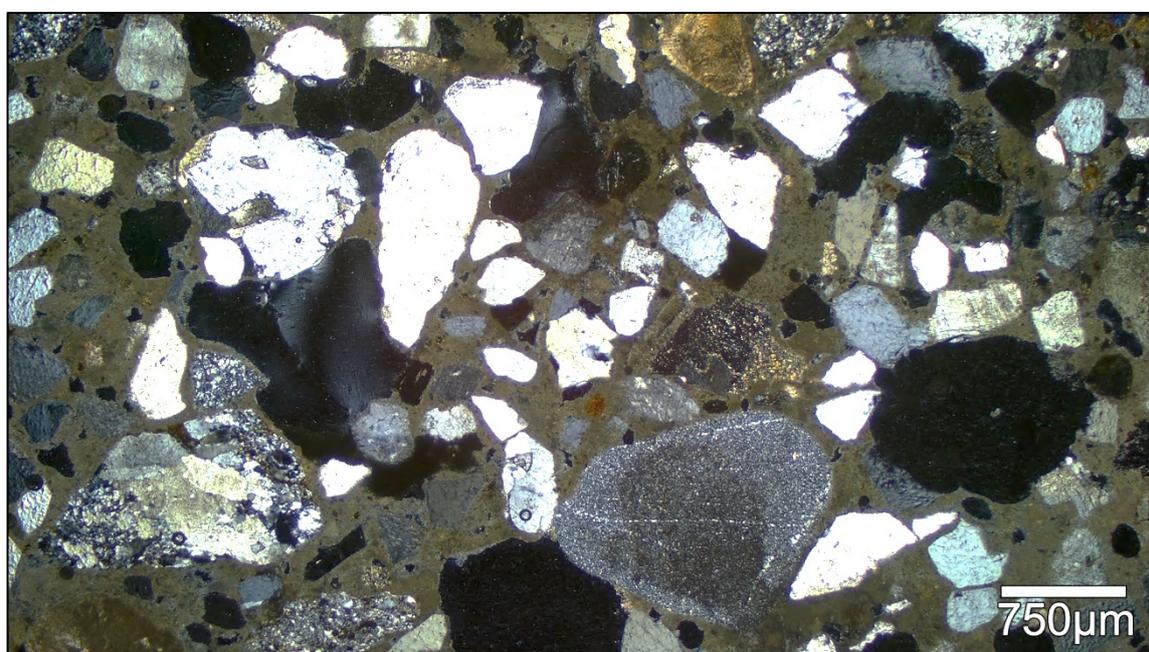


Fig. 5.1.1. Micrografia a basso ingrandimento con microscopio ottico a luce trasmessa a nicol incrociati del campione TMAR_12. La maggior parte dell'aggregato è costituito da clasti di quarzo e quarziti o k-feldspato; in basso un clasto di granito; diversi vughs subarrotondati (vuoti).

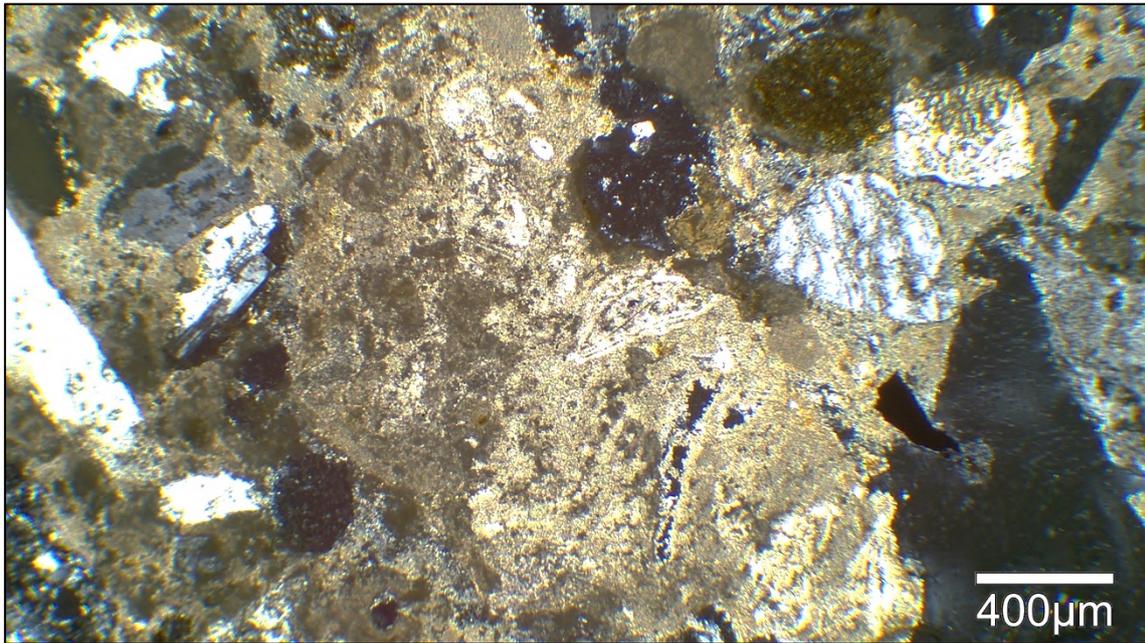


Fig. 5.1.2. Dettaglio del campione TMAR_13 a nicol incrociati: al centro si osserva un relitto di calcinazione di calcare fossilifero con resti di bioclasti, tra cui gasteropodi.

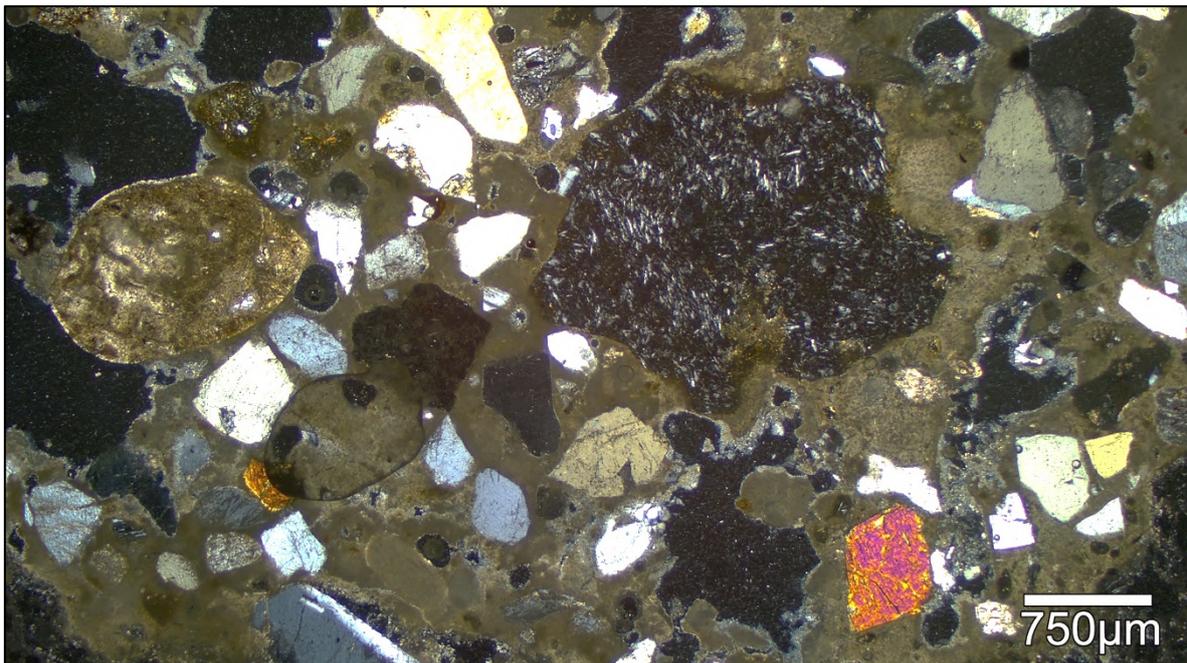


Fig. 5.1.3. Dettaglio del campione TMAR_14. Al centro un clasto di pomice a tessitura porfiritica con una minima reattività con il legante circostante; a sinistra un relitto di cottura; in basso a destra si osserva un cristallo di pirosseno.

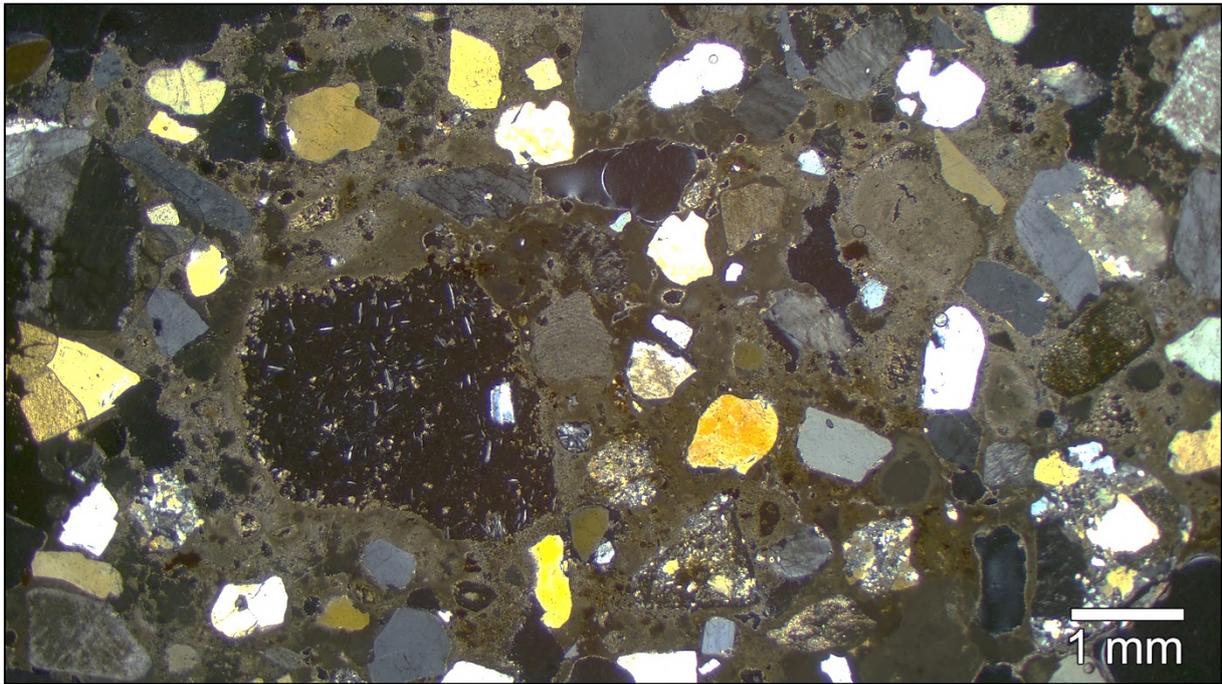


Fig. 5.1.4. Campione TMAR_15: tessitura variabile micritica/micro-sparitica del legante; al centro clasto di pomice a tessitura labilmente porfirica con bordo di reazione marcato; si osservano clasti di quarzo, quarziti; in basso clasti di arenaria; sporadiche calcareniti. Impasto leggermente grasso.



Fig. 5.1.5. Dettaglio del campione TMAR_15 a nicol paralleli; al centro si osserva un relitto di cottura con bioclasti e fossili di alghe rosse.

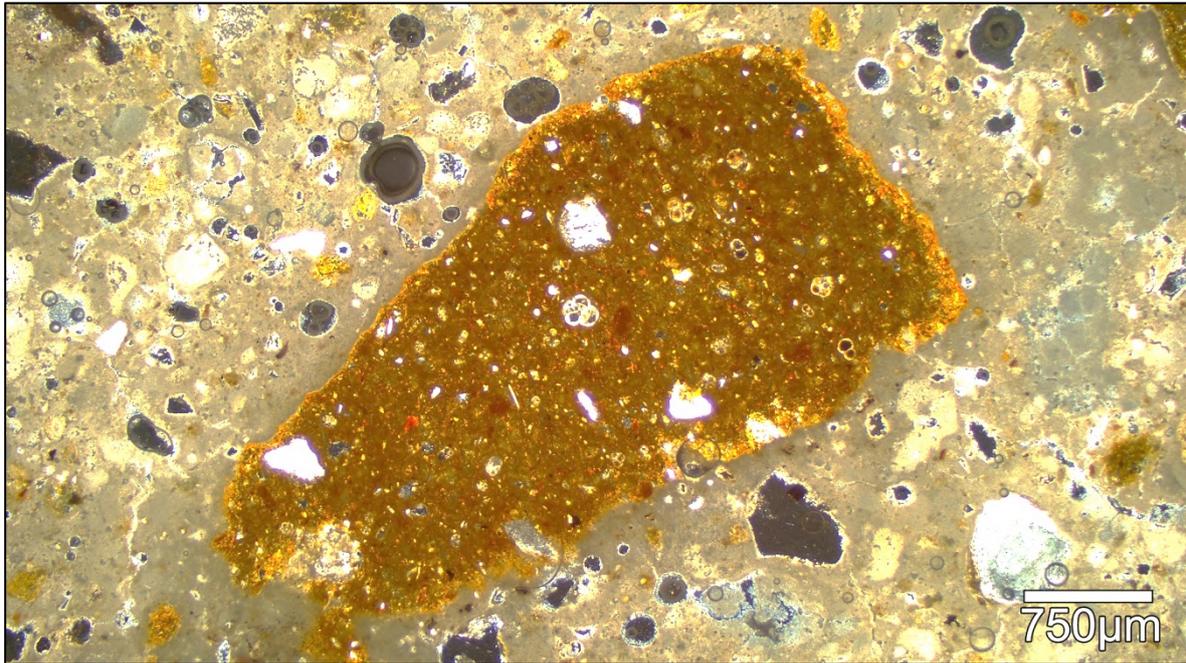


Fig. 5.1.6. Dettaglio a nicol incrociati di un frammento fittile del campione TMAR_17, con evidenti fenomeni di reazione pozzolanica lungo i bordi.

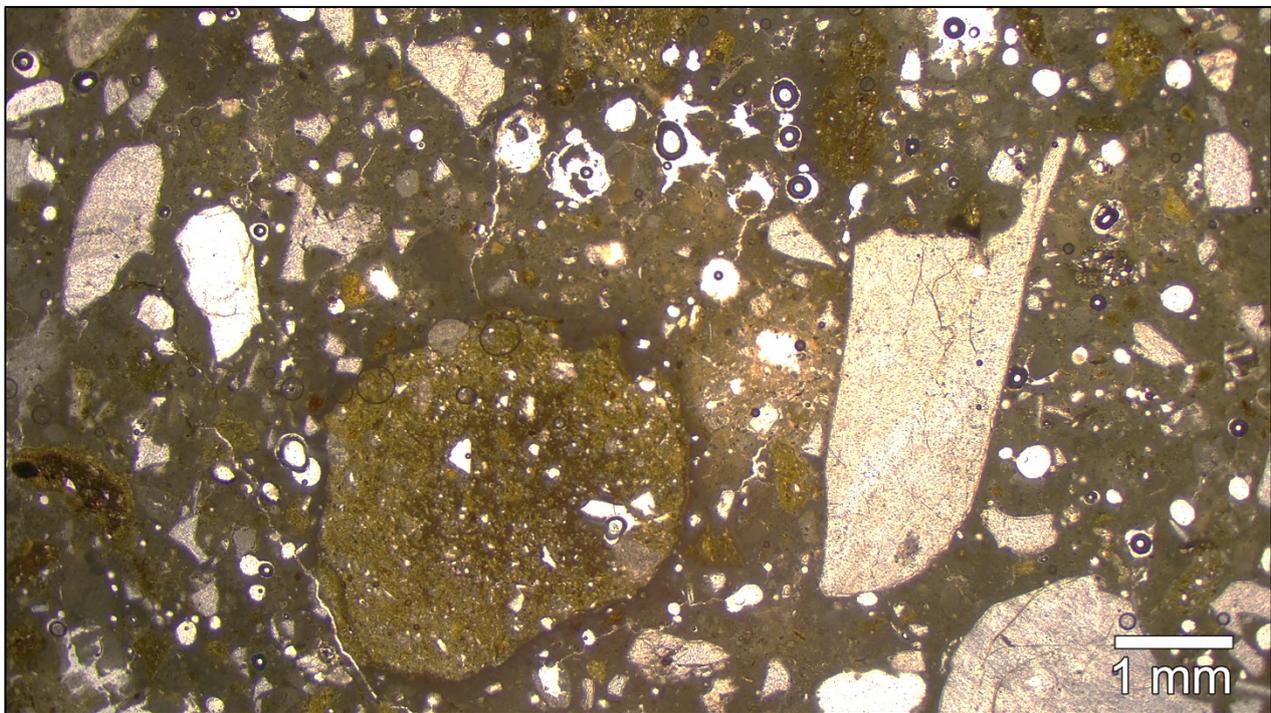


Fig. 5.1.7. Micrografia a basso ingrandimento del campione TMAR_17 a nicol paralleli; frammento fittile grossolano al centro; a destra un clasto di ossidiana, di cui si osserva la sua matrice vetrosa.

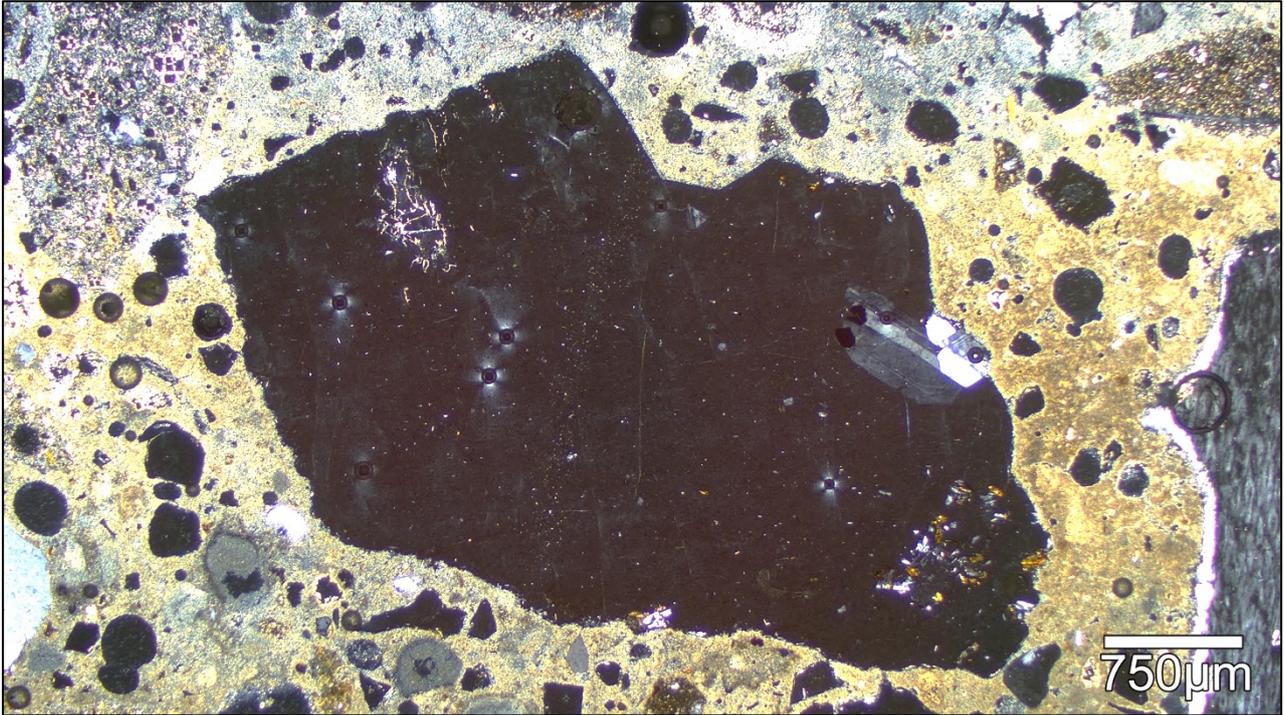


Fig. 5.1.8. Dettaglio a nicol incrociati di un clasto di ossidiana del campione TMAR_17, contenente fenocristalli di feldspati calcici con inclusioni di minerali opachi (ossidi di ferro); nullo è il bordo di reazione con il legante circostante.

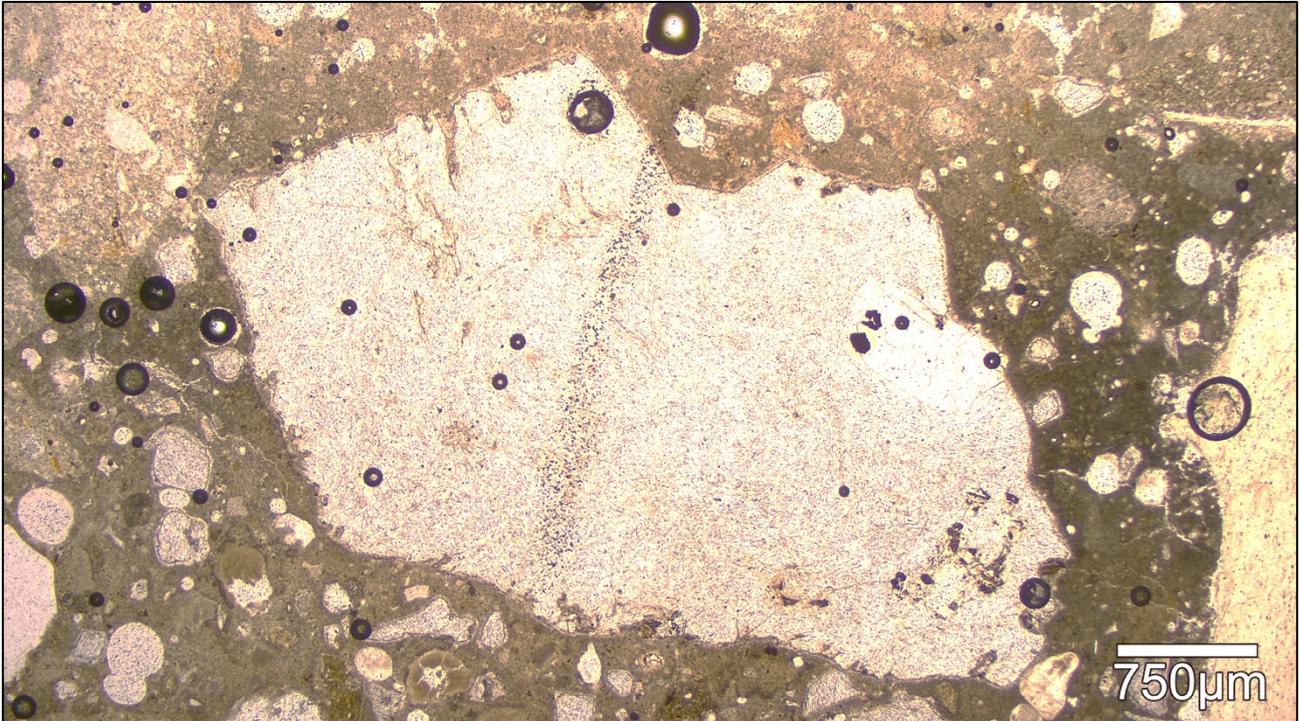


Fig. 5.1.9. Clasto di ossidiana del campione TMAR_17 osservato a nicol paralleli; si evidenzia la matrice vetrosa del clasto, distinta lievemente da quella feldspatica del plagioclasio.

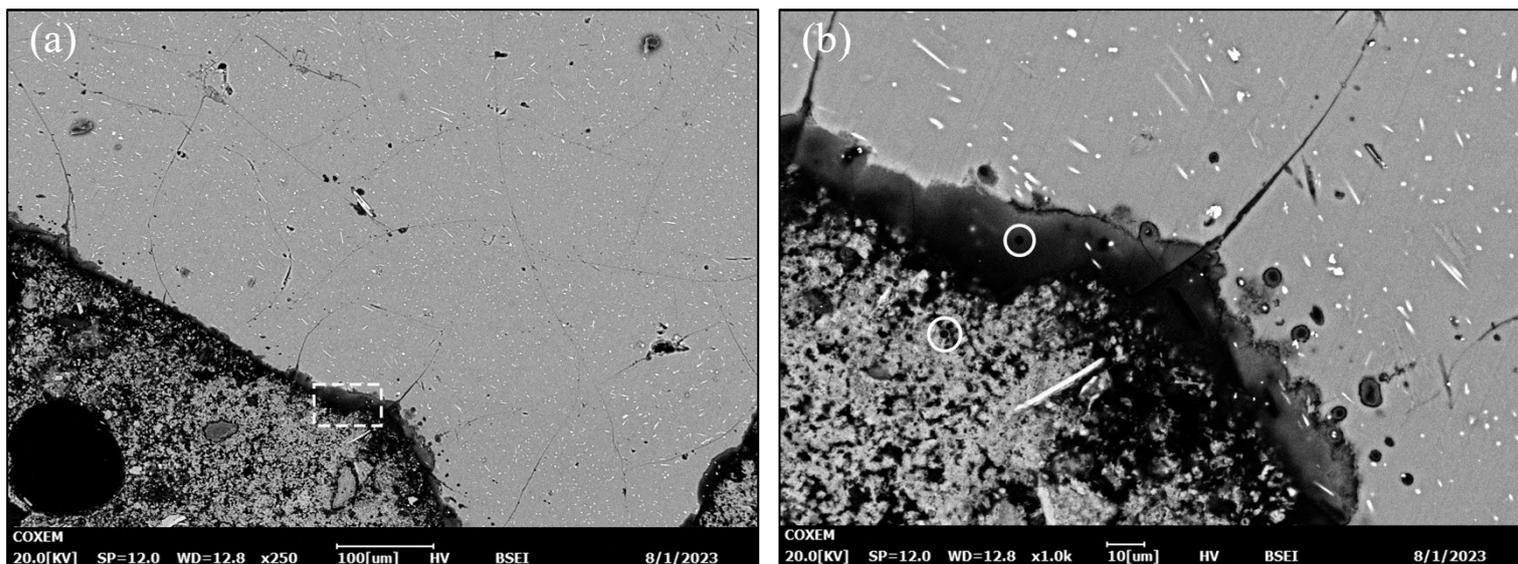


Fig. 5.1.10. Immagini SEM (elettroni retrodiffusi) per descrivere la reattività di un'interfaccia tra un clasto di ossidiana e la matrice del legante nel campione di malta TMAR_17: (a) clasto di ossidiana; (b) ingrandimento dell'area tratteggiata nella Figura (a).

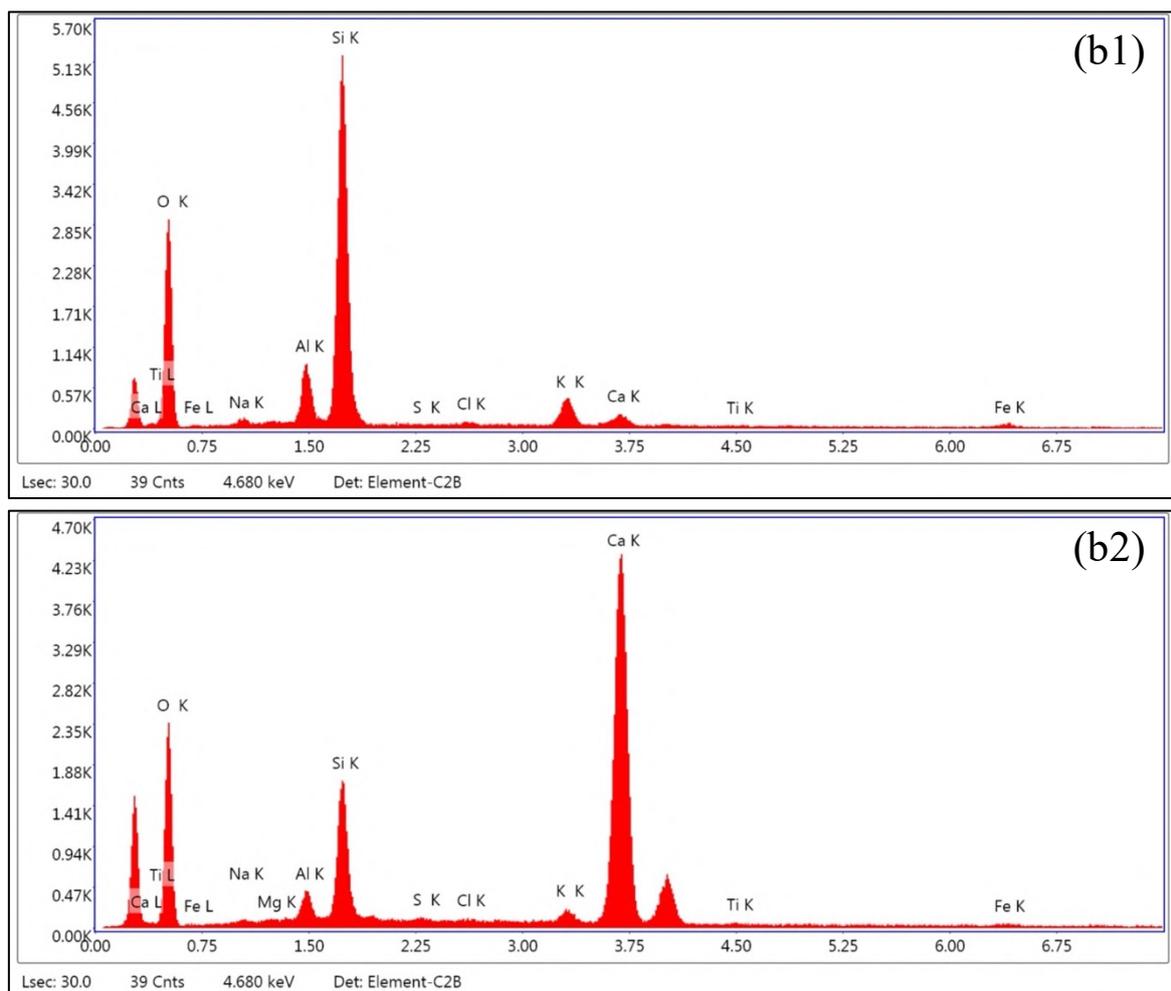


Fig. 5.1.11. (b1) spettro EDS dell'interfaccia del clasto di ossidiana con il legante; (b2) spettro EDS della matrice del legante.

5.2 Provenienza delle pozzolane vulcaniche

La provenienza delle pozzolane vulcaniche è stata determinata sulla base geochimica dei campioni sottoposti ad analisi XRF e SEM. Dodici campioni di rocce vulcaniche, di cui un tufo (TMAR_7) e undici pomici (TMAR_1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 16), sono stati analizzati a XRF, ottenendo un profilo geochimico degli elementi maggiori (tabella 5.2.1). Oltre ai campioni di pomici e tufi, sono stati presi in esame frammenti di ossidiana contenuti in TMAR_17 e sottoposti ad indagine in microscopia elettronica a scansione (SEM). Il profilo geochimico è stato ottenuto sulla media dei valori estrapolati con puntuali analisi EDS su aree sane (non reagite) di sette clasti di vetro vulcanico (tabella 5.2.2).

%Ox	TMAR_1	TMAR_2	TMAR_3	TMAR_4	TMAR_5	TMAR_6	TMAR_7	TMAR_8	TMAR_9	TMAR_10	TMAR_16
SiO ₂	60,67	59,56	60,82	60,21	60,52	55,71	59,22	61,84	60,95	61,51	59,51
TiO ₂	0,44	0,45	0,45	0,47	0,44	0,45	0,44	0,45	0,44	0,46	0,46
Al ₂ O ₃	18,22	18,65	18,82	18,24	19,05	18,58	17,70	18,71	18,09	18,88	18,55
Fe ₂ O ₃	3,37	3,63	3,48	3,25	3,55	3,30	3,28	3,48	4,06	3,67	3,68
MnO	0,18	0,13	0,15	0,16	0,14	0,15	0,12	0,17	0,13	0,15	0,14
MgO	0,22	0,47	0,61	0,42	0,28	0,15	0,52	0,44	0,58	0,22	0,42
CaO	3,61	2,69	2,22	2,65	3,72	8,20	4,48	2,61	1,89	2,43	3,48
Na ₂ O	4,98	4,73	5,89	5,74	4,55	5,54	5,29	5,25	5,83	5,03	4,44
K ₂ O	7,48	9,33	8,72	8,43	8,47	7,62	8,32	8,02	8,88	8,23	9,03
P ₂ O ₅	0,05	0,11	0,08	0,05	0,06	0,02	0,10	0,05	0,09	0,07	0,09
L.O.I.	2,30	7,60	8,30	9,97	6,69	18,77	10,19	2,75	11,53	2,05	9,43

Tabella 5.2.1. Profili XRF dei clasti vulcanici (pomici e tufo) analizzati.

Clasto	01	02	03	05	06	07	08
Na₂O	4,30	4,20	4,43	4,53	5,07	4,67	4,46
MgO	0,01	0,04	0,29	0,22	0,33	0,06	0,15
Al₂O₃	15,17	15,22	15,08	15,23	15,29	14,93	15,07
SiO₂	72,02	71,70	71,56	71,64	71,23	72,17	72,03
P₂O₅	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SO₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,02
Cl₂O	0,02	0,12	0,28	0,12	0,15	0,08	0,16
K₂O	5,08	5,20	4,77	4,94	4,58	4,78	4,68
CaO	1,57	1,60	1,58	1,51	1,50	1,47	1,51
TiO₂	0,05	0,11	0,20	0,09	0,05	0,07	0,10
MnO	0,00	0,06	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe₂O₃	1,78	1,74	1,77	1,71	1,77	1,76	1,82

Tabella 5.2.2. Media delle analisi puntuali dei clasti di ossidiana nel campione TMAR_17.

I valori di tutti i clasti analizzati (pomici, tufo, ossidiane) sono stati riportati nel TAS⁵⁸ (Total Alkali vs. Silica), un diagramma binario che permette di confrontare i campioni e osservare una loro prima distinzione sulla base delle proporzioni di silicio (SiO₂) contro la somma degli elementi alcalini (Na₂O + K₂O). Il TAS offre una prima discriminazione della distribuzione geochemica dei clasti vulcanici, dove ne sono stati riportati i profili degli elementi maggiori in relazione con l'impronta geochemica dei distretti vulcanici di attività magmatica plio-quadernaria presenti nella penisola italiana, come riportato nella letteratura scientifica⁵⁹. Gli areali distributivi presi in considerazione sono stati recuperati da pubblicazioni già edite⁶⁰. Da quanto osservato, è possibile distinguere due diversi gruppi: le pomici e il tufo ricadono nei campi delle rocce a chimismo trachitico e fonolitico, mentre le ossidiane presentano un chimismo riolitico, dovuto all'elevato contenuto di silicio (fig. 5.2.1a). Dal primo gruppo si distacca il campione TMAR_6. Tale differenza è verosimilmente non imputabile ad una effettiva diversità geochemica ma probabilmente per un profilo alterato, come osservabile dall'elevato contenuto di calcio e da un'elevata L.O.I. (loss on ignition), legata chiaramente alla presenza di carbonati intrusivi antropogenici mobilitatisi nelle cavità del campione o a prodotti di reazione pozzolanica.

⁵⁸ Le Bas *et alii* 1986.

⁵⁹ Peccerillo 2005.

⁶⁰ Dilaria *et alii* 2023c, 578 fig. 8; Dilaria, Marinello, Zara 2022, 183 fig. 8.

Le rocce vulcaniche (pomici e tufo) risultano compatibili con il chimismo dei prodotti vulcanici campani, con specifico riferimento alla zona flegrea (fig. 5.2.1, b) e in parte vesuviana, tra cui alcuni riconducibili agli episodi eruttivi più antichi (fig. 5.2.1, c). Elementi di compatibilità si possono riscontrare anche nel distretto vulcanico laziale, ma non con la zona albana, connotata per rocce nettamente sotto-sature in silice (fig. 5.2.1, d). Meno evidente risulta la compatibilità con il chimismo con le Isole Eolie, e in particolar modo con alcuni prodotti piroclastici fonolitici dell'isola di Vulcano (fig. 5.2.1, e). Infine, si possono escludere le compatibilità con i prodotti vulcanici del distretto sardo di Montiferro, incompatibili per la loro natura effusiva di dense lave (fig. 5.2.1, f). Il profilo geochimico dei clasti di ossidiana del campione TMAR_17 è invece compatibile con i prodotti piroclastici del distretto sardo di Monte Arci o di Sant'Antioco, ma non si può escludere a priori anche una possibile corrispondenza anche con i prodotti piroclastici riolitici delle Isole Eolie, in particolar modo di Lipari (fig. 5.2.1, e-f).

Considerando una certa variabilità del TAS, gli elementi in traccia sono fondamentali per confermare l'esatta provenienza delle pozzolane vulcaniche. Le tracce, conteggiate in ppm (parte per milione), sono state acquisite con le analisi XRF delle pomici e del tufo (tabella 5.2.3). Purtroppo, questa tecnica non è stata applicata invece sulle ossidiane in quanto si tratta di inclusioni minute che non forniscono abbastanza materiale per un'analisi efficace con tecnica XRF (almeno 2 grammi).

Per quanto riguarda i campioni analizzati con XRF invece, sono stati utilizzati i rapporti tra Zirconio (Zr), Ittrio (Y), Niobio (Nb), Neodimio (Nd), Rubidio (Rb), basandosi sui dati geochimici della letteratura scientifica che hanno dimostrato come questi elementi (o rapporti tra questi elementi) siano utili per una discriminazione delle provenienze dei prodotti vulcanici in oggetto⁶¹. Sulla base delle analisi di Zr/Y contro Nb/Y, riportando gli intervalli distribuzionali prodotti in lavori già editi, si è potuto discriminare i distretti vulcanici della zona laziale con quelli campani, osservando come tutti i clasti in esame ricadano principalmente nel campo della provincia magmatica campana (fig. 5.2.2). Per alcuni dei clasti analizzati è possibile rilevare una sovrapposizione marginale anche con il distretto laziale dei Colli Albani, però da escludersi dal momento che i campioni non risultano compatibili né macroscopicamente con le *harenae fossicae* citate da Vitruvio, né, come già visto, al TAS. Usufruendo come riferimento del database dei profili geochimici di prodotti piroclastici geologici editi in letteratura per la regione campana, in possesso dal Dipartimento dei Beni Culturali di Padova, si è potuto analizzare con maggior precisione i termini di affinità con le principali unità del distretto campano. Forti corrispondenze si osservano con i campioni geologici dell'area flegrea e di Ischia, con più marginali affinità con i prodotti vesuviani, connotati da rapporti Nb/Y

⁶¹ Marra *et alii* 2013; Marra *et alii* 2016.

tendenzialmente più bassi (fig.5.2.3, a). Più dirimente è stata l'analisi dei rapporti di Nd vs Rb, che hanno permesso di escludere del tutto il distretto vesuviano, contraddistinto da valori di Nd molto bassi, mentre è osservabile una maggior compatibilità con il distretto flegreo e possibilmente con il vulcanismo di Ischia, per via delle elevate concentrazioni di Nd (fig. 5.2.3, b).

Pertanto, sulla base di questi dati, sembra confermarsi una compatibilità geochemica e pertanto una provenienza geologica dei clasti con i distretti vulcanici del Golfo di Napoli, in particolar modo con l'area flegrea o Ischia.

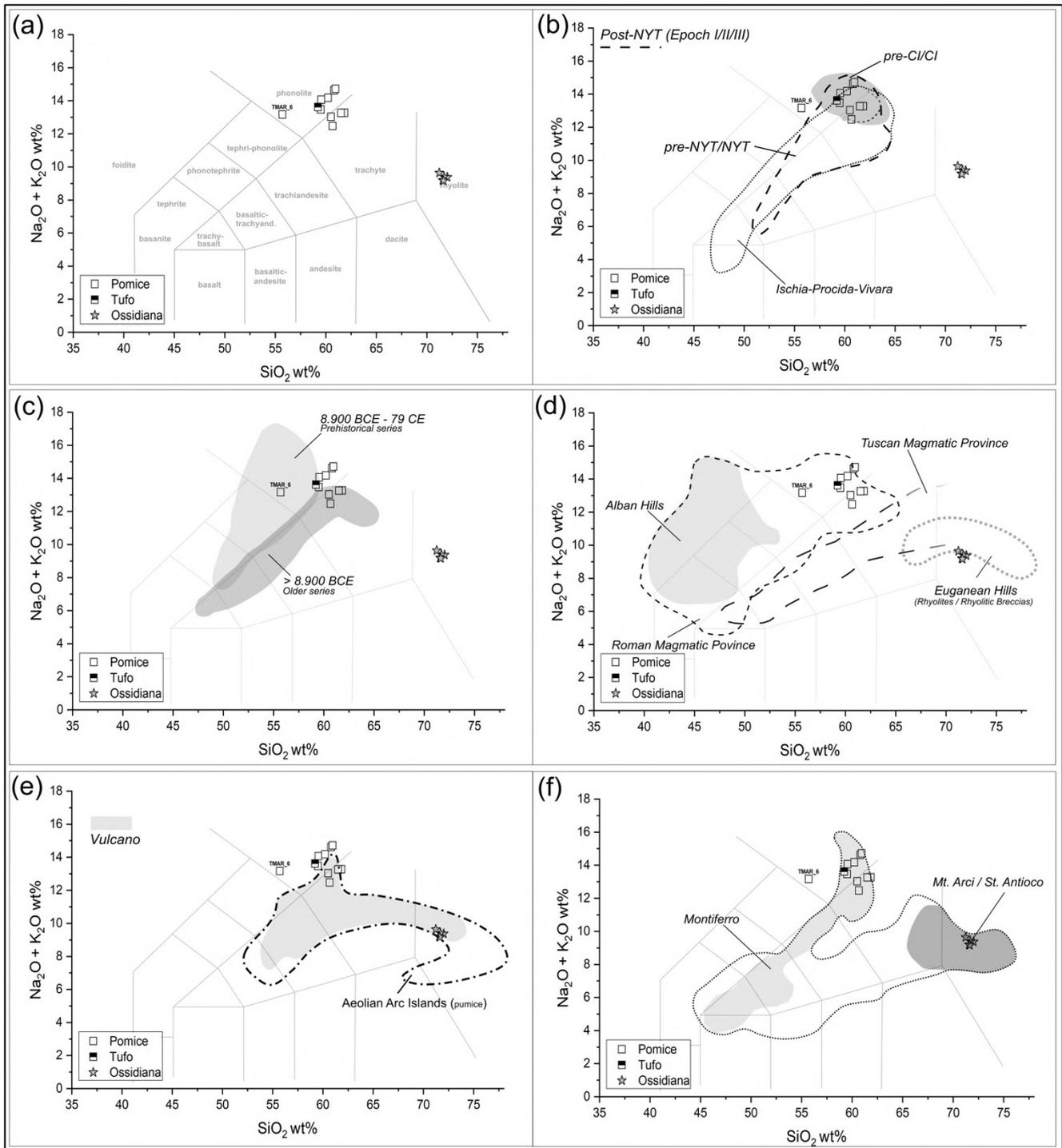


Fig. 5.2.1. Grafici TAS (Total Alkali vs. Silica) dei campioni grossolani di pomice e tufo, e dei clasti di ossidiana provenienti dalle Terme a Mare di Nora comparati con i prodotti vulcanici dei distretti magmatici italiani mostranti affinità petrochimica: **(a)** distribuzione dei campioni in relazione al chimismo delle rocce vulcaniche; **(b)** distribuzione dei campioni in relazione ai prodotti flegrei delle fasi eruttive dell’Ignimbrite Campana (CI), Tufo Giallo Napoletano (NYT), post-NYT e delle attività vulcaniche di Ischia/Procida-Vivara; **(c)** distribuzione dei campioni in relazione alle due principali *facies* eruttive di Somma-Vesuvio; **(d)** distribuzione dei campioni in relazione ai campi occupati dai prodotti delle province magmatiche romane, toscane, e dei Colli Euganei; **(e)** distribuzione dei campioni in relazione ai campi occupati dai prodotti piroclastici delle Isole Eolie; **(f)** distribuzione dei campioni in relazione ai prodotti vulcanici della provincia magmatica sarda.

ppm	TMAR_1	TMAR_2	TMAR_3	TMAR_4	TMAR_5	TMAR_6	TMAR_7	TMAR_8	TMAR_9	TMAR_10	TMAR_16
S	146	70	609	356	78	445	199	57	74	116	88
Sc	13	14	14	12	14	22	15	14	17	14	17
V	29	47	35	24	36	12	55	28	47	39	33
Cr	<6	<6	<6	<6	<6	<6	9	<6	10	<6	<6
Co	6	6	5	4	<3	4	4	7	4	3	<3
Ni	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	3	<3	<3
Cu	230	11	13	95	7	13	190	10	14	5	8
Zn	121	79	75	128	77	91	65	101	79	87	92
Ga	14	4	<3	14	7	<3	9	10	<3	8	<3
Rb	397	325	323	338	321	487	375	418	329	392	402
Sr	85	370	168	78	256	115	178	115	222	161	214
Y	47	32	47	53	33	58	36	59	47	50	48
Zr	733	469	602	715	557	662	466	755	490	648	538
Nb	93	50	70	87	64	77	63	85	58	73	61
Ba	39	356	123	68	348	334	339	71	300	82	207
La	132	79	99	112	87	104	91	123	97	93	95
Ce	270	161	201	230	182	215	184	246	193	200	193
Nd	88	70	83	84	78	91	70	98	75	86	74
Pb	42	45	24	23	36	27	<5	53	8	34	64
Th	74	44	55	58	51	62	45	68	47	60	53
U	20	14	15	19	13	16	10	21	11	19	15

Tabella 5.2.3. Elementi in traccia delle rocce vulcaniche analizzate tramite XRF (pomici e tufo).

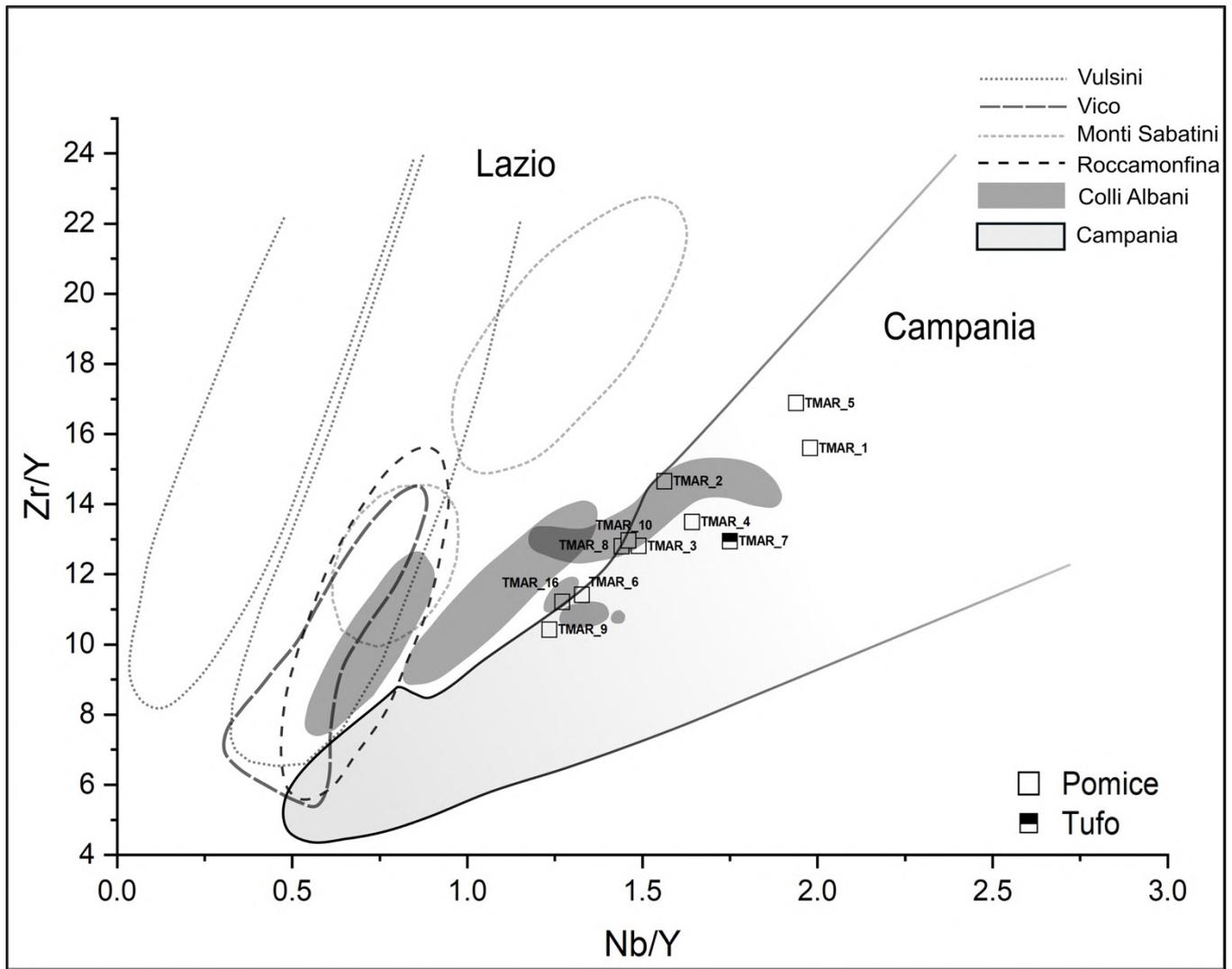


Fig. 5.2.2. Diagramma Nb/Y vs. Zr/Y dei campioni di pomice e tufo in relazione ai campi occupati dalle province magmatiche romane, toscane, e campane.

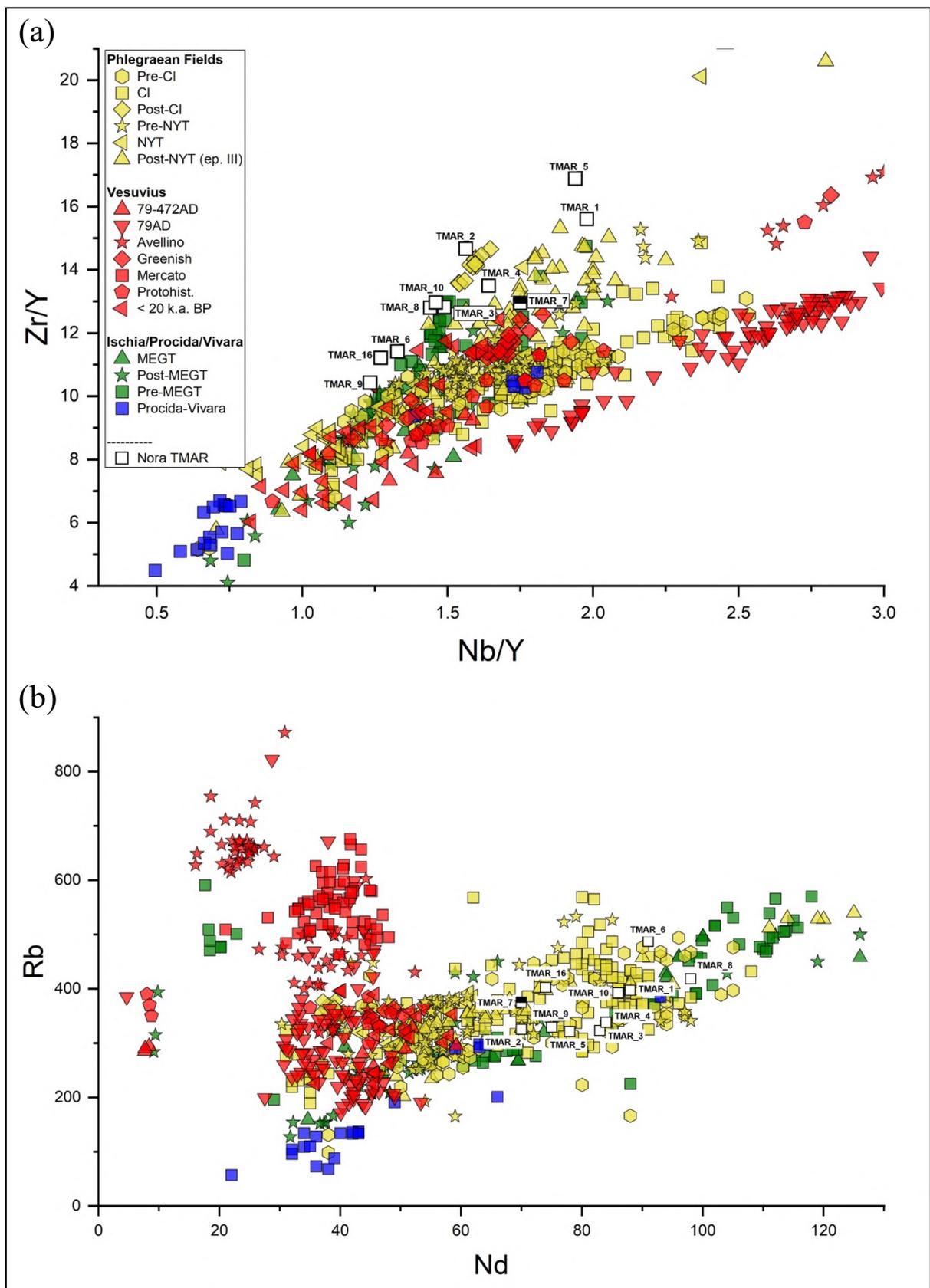


Fig. 5.2.3. Diagramma degli elementi in traccia dei campioni di pomice e tufo a confronto con i prodotti vulcanici dell'area campana: diagrammi Nb/Y vs. Zr/Y (a) e Nd vs. Rb (b) delle rocce piroclastiche (pomice e tufo) in relazione ai campi composizionali dell'area campana.

Capitolo 6

Interpretazioni archeologiche

Le analisi archeometriche hanno permesso di studiare la composizione petro-mineralogica dei campioni di miscela legante, di identificare gruppi con caratteristiche composizionali e tessiturali simili, e di determinare la provenienza delle materie prime, locali e non, con un buon margine di precisione. Un aspetto di interesse ha riguardo la definizione delle provenienze dei materiali pozzolanici vulcanici presenti nei composti cementizi analizzati. I dati ottenuti dalle analisi dimostrano che le rocce piroclastiche usate nelle miscele strutturali delle Terme a Mare di Nora sono state procurate principalmente dal Golfo di Napoli (fig. 6.1).



Fig. 6.1. Foto satellitare del Golfo di Napoli (foto dalla National Aeronautics and Space Administration).

Questa prova suggerisce diverse considerazioni per la discussione. In primo luogo, l'impiego di pozzolane vulcaniche in miscele a base di calce è diffuso a Nora, soprattutto in età imperiale, ed è testimoniato da vari edifici, come il Tempio Romano⁶², il santuario di Esculapio⁶³, diverse cisterne dell'antica città⁶⁴, e l'acquedotto (fig. 6.2)⁶⁵.

⁶² Dilaria *et alii* 2023.

⁶³ Dilaria, Marinello, Zara 2022.

⁶⁴ Bonetto, Dilaria 2021.

⁶⁵ Buganza 2022/2023.



Fig. 6.2. Lacerti dei restanti piloni dell'acquedotto presso la chiesa di Sant'Efisio (foto di Buganza L.).

Inoltre, il caso delle Terme a Mare non è isolato per quanto riguarda la provenienza del materiale pozzolanico dall'area flegrea, a dimostrazione di quanto sia probabile che in questi secoli fosse attivo un commercio continuo e organizzato di pozzolane vulcaniche dalla Baia di Napoli fino a Nora. Questo fenomeno di commercializzazione riflette l'impulso costruttivo del secolo, che ha portato alla nascita di numerosi edifici monumentali e a diversi rifacimenti strutturali in tutta la città. Si assiste così a un'estensione del sistema commerciale durante il periodo romano di Nora: maestranze, prodotti, aree di estrazione intra-regionali durante l'età repubblicana, per poi passare, tra il II e III secolo d.C., ad una fitta rete di scambi extra-regionale, a partire dalla fornitura di materiale pozzolanico, senza escludere una verosimile commissione diretta dall'area campana, con notevoli innovazioni nell'ambito costruttivo, come le strutture in *opus caementicium* in associazione con l'opera vittata e vittata-mista, impiegate nella costruzione dei principali monumenti medio-imperiali della città.

Un altro aspetto riguarda la funzione delle strutture in cui è stata utilizzata la pozzolana campana. Nonostante la presenza di *pulvis puteolana* nelle infrastrutture marittime sia confermata in diversi contesti⁶⁶, il suo impiego nelle miscele strutturali di edifici fuori terra risulta comune nei siti

⁶⁶ Brandon *et alii* 2014.

attorno alla Baia di Napoli⁶⁷. Tuttavia, la commercializzazione extra-regionale del materiale a fini strutturali per monumenti su terra non era infrequente, come già osservato a Nora nel già citato Tempio Romano, confermando l'affermazione di Vitruvio sull'uso della pozzolana per il rinforzo strutturale di strutture cementizie e non solamente per la realizzazione di miscele idrauliche (*non modo ceteris aedificiis praestat firmitates, sed etiam moles cum struuntur in mari, sub aqua solidescunt*)⁶⁸. Empiricamente quindi era riconosciuto il fatto che la prodigiosa *pulvis* permettesse non solo di ottenere materiali idrorepellenti ma, nel complesso, anche composti cementizi più tenaci e durevoli. Infatti, considerando la presenza di pozzolana in tutti i campioni analizzati, l'uso di rocce piroclastiche nelle Terme a Mare era sicuramente finalizzato a migliorare la capacità di coesione complessiva delle miscele presenti nelle murature e nelle volte dell'edificio termale. Tuttavia, le analisi in laboratorio hanno dimostrato che il trattamento della *pulvis puteolana* è stato verosimilmente poco efficace, poiché l'uso di pozzolane vulcaniche grossolane e poco macinate limita le aree di interazione con il legante, risultando nel complesso poco reagite. Ciò ha portato ad un prodotto tecnologicamente debole, probabilmente realizzato da maestranze non pienamente capaci.

Tuttavia, l'utilizzo di pozzolane campane connota la maggior parte dei campioni analizzati, e pertanto possiamo ipotizzarne un utilizzo massiccio e intensivo nella costruzione nella maggior parte degli elementi strutturali dell'edificio, dai corpi delle strutture murarie alle volte. Infatti, i risultati delle analisi hanno dimostrato come i campioni di malta, appartenenti al gruppo 1 (TMAR_12, TMAR_13, TMAR_14), presentino caratteristiche composizionali simili, in particolare TMAR_13 e TMAR_14, provenienti dalle volte in crollo degli atri dell'impianto termale, confermando una possibile unitarietà costruttiva delle porzioni voltate dell'edificio.

Un campione leggermente differente, rientrando nel sottogruppo 1b, è TMAR_15. Esso mostra una tessitura micro-sparitica e disomogenea, con aggregati più grossolani e con un bordo di reazione più marcato nelle pozzolane. Questa diversità potrebbe dipendere semplicemente dalla presenza di più gruppi di lavoro all'interno di un ampio cantiere, e quindi da una mano d'opera diversa, con l'applicazione di tecniche di preparazione leggermente diversificate. In alternativa potrebbe fornire indicazione su una diversa fase di cantiere, possibilmente dopo una pausa stagionale.

Di grande interesse, invece, sono gli aggregati presenti nel campione outlier TMAR_17, che è sostanzialmente una malta di cocciopesto, con abbondanti frammenti fittili misti a clasti di ossidiana e ignimbriti riolitiche, con caratteristiche tessiturali e geochemiche differenti da quelle che contraddistinguono le pozzolane vulcaniche degli altri campioni. In questo campione, le analisi al

⁶⁷ Miriello D. *et alii* 2010; Rispoli *et alii* 2019.

⁶⁸ Vitruvio, *De Architectura*, 2.6.1.

SEM hanno evidenziato una maggior reattività dell'aggregato fittile con il legante calcico, confermando la possibile natura idraulica delle matrici, conferita però prevalentemente dal materiale di origine fittile. Di contro, le pozzolane vulcaniche presenti nel campione risultano poco reagite con il legante. Questa ridotta reattività potrebbe derivare non tanto dal trattamento del materiale, visto la presenza di shards e frammenti macinati abbastanza finemente, quanto dalla natura del materiale stesso. L'ossidiana è una roccia silicatica molto densa e compatta, ricca di silicio e pertanto perfetta per dar luogo a fasi di silicati di calcio idrati (C-S-H), ma presenta una tessitura molto compatta, completamente diversa da quella porosa della pomice impiegata negli altri campioni. Questo studio però dovrà essere approfondito con analisi più dettagliate sul materiale pozzolanico.

Nondimeno, l'uso di ossidiana come pozzolana nella malta del campione TMAR_17 appare particolare ma non del tutto inusuale nel panorama norense. Presenza di ossidiane e perliti è attestata solamente in alcuni edifici, come il Teatro Romano⁶⁹ e le Piccole Terme⁷⁰, e il suo impiego all'interno delle Terme a Mare, probabilmente di natura idraulizzante, non è chiaro e necessita di ulteriori campionamenti e approfondite indagini. Le analisi al SEM sui sette clasti di ossidiana hanno fornito inoltre un profilo geochimico degli elementi maggiori che, comparato a dati geochimici riguardanti i diversi affioramenti di rocce vulcaniche riolitiche nella penisola italiana, ha permesso di individuare come sorgente estrattiva probabile il complesso sardo di Monte Arci, senza escludere però una possibile provenienza dal distretto delle Isole Eolie. In termini archeologici, l'uso di pozzolana vulcanica locale trova confronto a Nora durante l'età repubblicana, con un impiego massiccio nella costruzione delle gettate cementizie del Teatro Romano di I secolo d.C. (figg. 6.3, 6.4). Studi passati hanno dimostrato come questo sfruttamento di materie prime locali sia venuto meno con il passaggio all'età imperiale a favore di una fitta rete commerciale di prodotti pozzolanici importati dalla penisola italiana, che, nell'edilizia monumentale norense, sembrano essersi sostituiti ai precedenti materiali regionali nel corso dell'età medio imperiale⁷¹. Il campione TMAR_17 testimonia però come alcuni prodotti locali non siano stati sostituiti del tutto dalla pozzolana flegrea, continuando ad essere utilizzati, seppur in quantità ridotte, anche dopo l'età repubblicana. Da ciò, l'impiego di materiale locale nelle Terme a Mare presuppone la possibile presenza di maestranze di origine sarda, probabilmente specializzate nella realizzazione di specifici frangenti architettonici, in questo caso di una vasca verosimilmente rivestita in *sectile*. Ad oggi, non ci sono però dati per escludere che il campione rappresenti un rifacimento o un restauro dell'ambiente riscaldato di epoche successive, ma questa ipotesi appare comunque meno verosimile rispetto alla prima.

⁶⁹ Columbu, Garau, Luglie 2019.

⁷⁰ Stizia *et alii* 2021.

⁷¹ Bonetto, Dilaria 2021.



Fig. 6.3. Veduta da sud-est del teatro di Nora

(da <https://nora.beniculturali.unipd.it/gli-edifici/edifici-pubblici/teatro/>, ultima consultazione 24/11/2023).

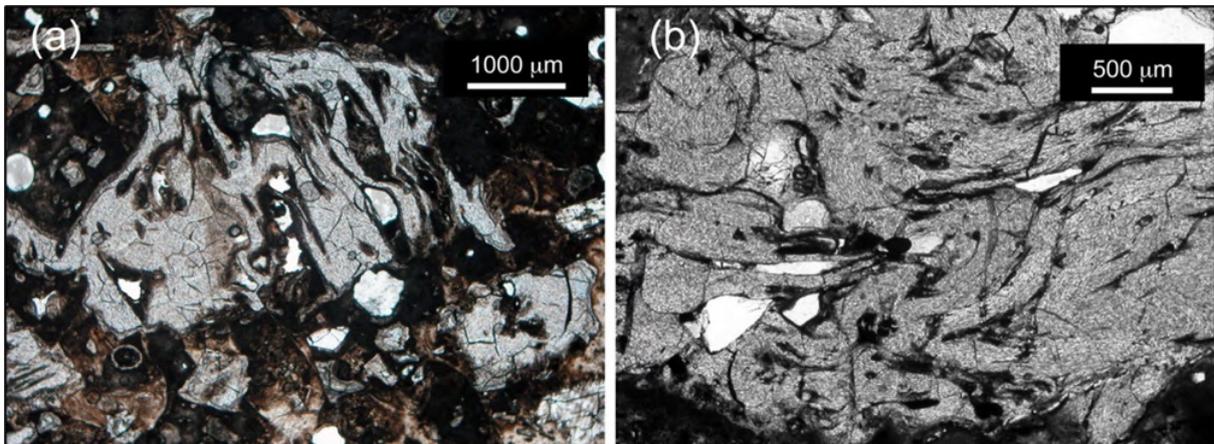


Fig. 6.4. Micrografia al microscopio polarizzato di un aggregato pozzolanico di malta del teatro di Nora: (a-b) frammento di vetro vulcanico con evidente struttura vacuolare e fluida (da Columbu, Garau, Luglie 2019).

In conclusione, lo studio delle malte ha permesso di ricostruire aspetti importanti della tecnologia costruttiva dell'edificio e della commercializzazione di materie prime, osservando un uso, seppur minimo, di prodotti ancora locali all'interno del cantiere d'età imperiale. Se ne deduce la probabile compresenza di maestranze di estrazione sociale e forse provenienza differente, specializzate nella costruzione di determinati frangenti architettonici, utilizzando materiali differenti, forse specifici nel caso di TMAR_17 e probabilmente di estrazione sarda.

Bibliografia

Arcolao C., Dal Bo' A. 2001, Lo stucco: cultura, tecnologia, conoscenza, Bressanone 2001, Ed. Libreria Progetto Padova, 2001.

Artioli G., Secco M., Addis A. 2019, The Vitruvian legacy: mortars and binders before and after the Roman world, in Artioli G., Oberti R. (a cura di), *EMU Notes in Mineralogy*, 20/4, 151-202.

Asolati M., Bonetto J., Zara A. 2018, Un deposito rituale di antoniniani dal settore orientale dell'abitato di Nora (Sardegna), in Sorda S. (a cura di), *Annali* 64, Roma, 99-146.

Bonetto J. 2009, L'insediamento di età fenicia, punica e romana repubblicana nell'area del foro di Nora, in Bonetto J., Ghiotto A. R., Novello M. (a cura di), *Nora. Il foro romano – Storia di un'area urbana dall'età fenicia alla tarda antichità*, Scavi di Nora I, Padova, 41-169.

Bonetto J. 2013, L'abitato arcaico: cultura materiale e relazioni con gli insediamenti indigeni, in Van Dommelen P., Roppa A. (a cura di), *Materiali e contesti nell'età del ferro sarda*, Rivista di studi fenici XLI, Pisa – Roma, 173-182.

Bonetto J. 2014, Nora e il mare. Linee metodologiche della ricerca, in Bonetto J. (a cura di), *Nora e il mare. I. Le ricerche di Michel Cassien (1978-1984)*, Scavi di Nora 4, Padova, 3-10.

Bonetto J. 2021a, Nora fenicia. Nuovi dati e nuove letture, in Bondi S. F., Botto M., Garbati G., Oggiano I. (a cura di), *Tra le coste del Levante e le terre del tramonto. Studi in ricordo di Paolo Bernardini*, Collezione di studi fenici 51, Roma, 195-208.

Bonetto J. 2021b, Nora nel V secolo: dall'emporio fenicio alla colonia cartaginese, in Roppa A., Botto M., van Dommelen P. (a cura di), *Dinamiche insediative, forme rituali e cultura materiale nel V secolo a.C.*, Il Mediterraneo Occidentale dalla fase fenicia all'egemonia cartaginese, Roma, 91-106.

Bonetto J., Bridi E., Carraro F., Dilaria S., Mazzariol A. 2020, La necropoli fenicia e punica di Nora (Sardegna, Italia): nuovi dati dagli scavi 2014-2018, in Perez C. S., Gonzalez R. E. (a cura di), *Unviaje entre el Oriente y el Occidente del Mediterráneo. Actas del IX Congreso Internacional de Estudios Fenicios y Púnicos*, Mytra 5, Mérida, 1047-1064.

Bonetto J, Carraro F., Minella I. 2016, Il tophet ritrovato, in Angiolillo S., Giuman M., Carboni R., Cruccas E. (a cura di), *Nora antiqua*, Scavi di Nora V, Perugia, 245-251.

Bonetto J., Dilaria S. 2021, Circolazione di maestranze e saperi costruttivi nel Mediterraneo antico. Il caso dei rivestimenti in malta delle cisterne punico-romane di Nora (Cagliari, Sardegna). ATTA, Atlante tematico di Topografia Antica, 31, 495–520.

Bonetto J., Ghiotto A. R. 2013, Nora nei secoli dell’Alto Medioevo, in Martorelli R. (a cura di) con la collaborazione di Marini S., *Settecento-Millecento - Storia, archeologia e arte nei “secoli bui” del Mediterraneo*, Cagliari, 271-299.

Brandon C. J., Hohlfelder R. L., Jackson M. D., Oleson J. P. 2014, *Building for Eternity The History and Technology of Roman Concrete Engineering in the Sea*, Oxford.

Buganza L. 2022/2023, Analisi archeometriche su alcune infrastrutture idrauliche della zona periurbana di Nora (Sardegna), tesi di laurea triennale, rel. Dott. S. Dilaria, Università degli studi di Padova.

Carraro F., Metelli M. C. 2018, Spazio marino, in Bonetto J., Bejor G., Bondi S. F., Giannattasio B., Giuman M., Tronchetti C. (a cura di), *Nora – Pula*, Sardegna archeologica 1, Sassari, 10-11.

Columbu S., Garau A.M., Lugliè C. 2019, Geochemical characterisation of pozzolanic obsidian glasses used in the ancient mortars of Nora Roman theatre (Sardinia, Italy): Provenance of raw materials and historical–archaeological implications. *Archaeol. Anthropol. Sci.*, 11, 2121–2150.

Daniele D, Gratziu C. 1996, Marmo e calcite spatca di vena: termini di un equivoco sull’intonaco vitruviano, *Annali della Scuola Normale Superiore di Pisa I,2*, Pisa, 541-548.

Dilaria S. 2018, La necropoli fenicia e punica occidentale, in Bonetto J., Bejor G., Bondi S. F., Giannattasio B., Giuman M., Tronchetti C. (a cura di), *Nora – Pula*, Sardegna archeologica 1, Sassari, 110-113.

Dilaria S., Marinello A., Zara A. 2022, Analisi archeometriche delle malte aeree e pozzolaniche del tempio di Esculapio. Risultati preliminari, in Bonetto J., Zara A. (a cura di), *Quaderni norensi* 9, Padova, 175-186.

Dilaria S., Secco M. 2022, *Mortar Recipes Through the Ages. A Brief Review of Data From Prehistory to Late Antiquity*, Archeologija I Prirodne Nauke 18, Belgrado, 113-126.

Dilaria S. 2023, *La tecnica dell'affresco romano ad Aquileia: un preliminare confronto tra la fonte vitruviana e il dato archeologico*, in Santucci A. (a cura di), Pittura, luce, colore AIRPA IV, Roma, 259-264.

Dilaria S., Secco M., Bonetto J., Ricci G., Artioli G. 2023a, *Making Ancient Mortars Hydraulic. How to Parametrize Type and Crystallinity of Reaction Products in Different Recipes*, Conservation and Restoration of Historic Mortars and Masonry Structures, RILEM 42, 36-52.

Dilaria S., Secco M., Ghiotto A. R., Furlan G., Giovanardi T., Zorzi F., Bonetto J. 2023b, Early exploitation of Neapolitan pozzolan (*pulvis puteolana*) in the Roman theatre of Aquileia, Northern Italy, Scientific reports 13,4110, 1-15.

Dilaria S., Previato C., Bonetto J., Secco M., Zara A., De Luca R., Miriello D. 2023c, Volcanic Pozzolan from the Phlegraean Fields in the Structural Mortars of the Roman Temple of Nora (Sardinia), *Heritage* 2023, 6, 567-587.

Ghiotto A. R. 2004, Gli impianti termali, in Ghiotto A. R. (a cura di), *L'architettura romana nelle città della Sardegna*, Antenor quaderni 4, Roma, 109-134.

Ghiotto A. R. 2018, Il foro romano, in Bonetto J., Bejor G., Bondi S. F., Giannattasio B., Giuman M., Tronchetti C. (a cura di), *Nora – Pula*, Sardegna archeologica 1, Sassari, 32-39.

Ghiotto A. R., Zara A. 2020, Nora tra III e I secolo a.C.: la graduale transizione da città punica a città romana, in Bonetto J., Carboni R., Giuman M., Zara A. (a cura di), *Nora antiqua II – Nora dalla costituzione della provincia all'età augustea*, Scavi di Nora IX, Roma, 3-18.

Ginouvès R., Martin R. 1985, Matériaux minéraux, in Ginouvès R., Martin R. (a cura di), *Matériaux, techniques de construction, techniques et formes du décor*, Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine. Tome I., Roma, 29-46.

Le Bas M. J. R., Le Maitre W., Streckeisen A. & Zanettin B. 1986, IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks, a chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrol.* 27(3), 745–750.

Marra F., D'Ambrosio E., Sottili G., Ventura G. 2013, *Geochemical fingerprints of volcanic materials: Identification of a pumice trade route from Pompeii to Rome*, in Geological Society of America Bulletin, 125, 3-4, pp. 556-577.

Marra F., Anzidei M., Benini A., D'Ambrosio E., Gaeta M., Ventura G., Cavallo A. 2016, *Petrochemical features and source areas of volcanic aggregates used in ancient Roman maritime concretes*, in Journal of Volcanology and Geothermal Research, 328, pp. 59-69.

Melis S., Columbu S. 2000, *Les matériaux de construction à l'époque romaine et leur rapport avec les anciennes carrières: l'exemple du théâtre de Nora (Sardaigne SO - Italie)*, in *La pierre dans la ville antique et médiévale*, Actes du colloque d'Argentomagus Tours (Argenton-sur-Creuse, Saint-Marcel, 30-31/03/1998), eds. J. Lorenz, D. Tardy, G. Coulon, (= RACF, supplément 18), Argenton-sur-Creuse, pp. 103-117.

Minoja M. E. 2013, Nora, sette punti di vista sulla città, LANX 14, 2013, 1-6.

Miriello D., Barca D., Bloise A., Ciarallo A., Crisci G.M., De Rose T., Gattuso C., Gazineo F., La Russa M.F. 2010, Characterisation of archaeological mortars from Pompeii (Campania, Italy) and identification of construction phases by compositional data analysis. *J. Archaeol. Sci.*, 37, 2207–2223.

- Nervi C. 2018, L'età romana, in Bonetto J., Bejor G., Bondi S. F., Giannattasio B., Giuman M., Tronchetti C. (a cura di), *Nora – Pula*, Sardegna archeologica 1, Sassari, 127-131.
- Peccerillo A. 2005, *Plio-Quaternary Volcanism in Italy: Petrology* (Geochemistry. Springer, NY).
- Pecchioni E., Frantini F., Cantisani E. 2008, *Le malte antiche e moderne: tra tradizione e innovazione*, Bologna.
- Pecchioni E., Frantini F., Cantisani E. 2014, *Atlante delle malte antiche in sezione sottile al microscopio ottico*, Firenze.
- Pesce G. 1972a, Terme a mare, in Pesca G. (a cura di), *Nora. Guida agli scavi*, Cagliari, 83-86.
- Pesce G. 1972b, Terme centrali, in Pesca G. (a cura di), *Nora. Guida agli scavi*, Cagliari, 69-73.
- Previato C. 2016, Nora e il suo territorio: inquadramento geologico, in Bonetto J., Bejor G., Bondi S. F., Giannattasio B., Giuman M., Ghiotto A. R. (a cura di), *Nora. Le cave di pietra della città antica*, Scavi di Nora 6, Roma, 13-17.
- Previato C. 2023, Building public baths outside Rome: the case study of Nora (Sardinia), in N. Mugnai (a cura di), *Architectures of the Roman world. Models, Agency, Reception*, Oxford, 123-136.
- Rispoli C., De Bonis A., Guarino V., Graziano S. F., Di Benedetto C., Esposito R., Morra V., Cappelletti P. 2019, The ancient pozzolanic mortars of the Thermal complex of Baia (Campi Flegrei, Italy), *Journal of Cultural Heritage* 2019, 40, 143-154.
- Shaw, J. (1973) Minoan Architecture, Materials and Techniques. *Annuario*, NS XXXIII, Roma.
- Sickels Lauren-Brook, 1981 - Organic additives in mortars. Edinburgh Architecture Research, Vol. 8, University of Edinburgh (Publisher), Dept. of Architecture, 1981, 7-20.

Stizia F., Beltrame M., Lisci C., Mirão J. 2021, Micro Destructive Analysis for the Characterization of Ancient Mortars: A Case Study from the Little Roman Bath of Nora (Sardinia, Italy), *Heritage* 2021, 4, 2544-2560.

Tronchetti C. 1985, Le Terme a Mare, in Tronchetti C. (a cura di), *Nora. Recenti studi e scoperte*, Pula, 71-81.

Tronchetti C. 2018a, La storia di Nora, in Bonetto J., Bejor G., Bondì S. F., Giannattasio B., Giuman M., Tronchetti C. (a cura di), *Nora – Pula*, Sardegna archeologica 1, Sassari, 12-16.

Tronchetti C. 2018b, La storia delle ricerche, in Bonetto J., Bejor G., Bondì S. F., Giannattasio B., Giuman M., Tronchetti C. (a cura di), *Nora – Pula*, Sardegna archeologica 1, Sassari, 16-21.

Tronchetti C. 2018c, Le Terme a Mare, in Bonetto J., Bejor G., Bondì S. F., Giannattasio B., Giuman M., Tronchetti C. (a cura di), *Nora – Pula*, Sardegna archeologica 1, Sassari, 86-92.

Wentworth C.K. 1922, A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediment, *Journal of Geology* 30, 5, 377-392.

Wright, G.R.H. 2005, *Ancient Building Technology, Volume 2: Materials*, Brill, Leiden, The Netherlands.