



**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 su alcune infrastrutture  
idrauliche della zona periurbana di Nora  
(Sardegna)**

*Relatore:*

Dott. Simone Dilaria

*Correlatore:*

Prof. Jacopo Bonetto

Laureanda: Laura Buganza

Matricola: 2009808

Anno Accademico 2022/2023



# INDICE

<b>Introduzione</b> .....	1
<b>1. Ubicazione geo-topografica e storia del sito di Nora</b> .....	3
1.1. Lineamenti geologici e topografici .....	3
1.2. L'età preromana .....	4
1.3. L'età romana .....	6
1.4. L'età post romana e la fine dell'insediamento .....	8
<b>2. Le malte antiche: origine, definizione e proprietà</b> .....	9
2.1. L'origine dei leganti .....	9
2.2. Le miscele leganti antiche: materie prime e processo produttivo .....	11
2.2.1. Leganti .....	11
2.2.2. Aggregati: Tipologie e rapporto con il legante .....	14
2.2.3. Additivi .....	17
2.3. Le tipologie di miscele leganti documentate a Nora .....	17
<b>3. I contesti di studio</b> .....	21
3.1. L'acquedotto .....	21
3.1.1. Datazione .....	21
3.1.2. Il tracciato ipotetico .....	22
3.1.3. Lo stato di conservazione delle strutture .....	23
3.1.4. Analisi tecnico-costruttiva delle strutture .....	25
3.2. Le cisterne T60 e T61 nel saggio 4 della necropoli fenicio-punica occidentale .....	26
3.2.1. L'area di scavo: il saggio 4 .....	26
3.2.2. Le evidenze funerarie fenicio-puniche .....	28
3.2.3. Le evidenze di età romana e l'infrastruttura idraulica di conservazione dell'acqua .....	29
3.2.4. La fase di abbandono dell'edificio .....	30
<b>4. Campionamento e metodi archeometrici</b> .....	31
4.1. I campioni e le loro strutture .....	31
4.1.1. I campioni dell'acquedotto .....	32

4.1.2. I campioni dalle cisterne T60 e T61 .....	33
4.2. Analisi in microscopia ottica (OM) .....	35
4.3. Analisi in fluorescenza a raggi X (XRF) .....	36
<b>5. Risultati delle analisi archeometriche .....</b>	<b>37</b>
5.1. Caratterizzazione petrografico-mineralogica delle miscele leganti .....	37
5.2. Provenienza delle pozzolaniche vulcaniche .....	48
5.2.1. Analisi degli elementi maggiori .....	50
5.2.2. Analisi degli elementi in traccia .....	53
<b>6. Sintesi. Considerazioni archeologiche e tecnico-costruttive .....</b>	<b>57</b>
6.1. Le miscele leganti dell'acquedotto .....	57
6.2. Le miscele leganti dell'infrastruttura idraulica del saggio 4 e la possibile correlazione con l'acquedotto .....	60
<b>Bibliografia.....</b>	<b>67</b>
<b>Ringraziamenti .....</b>	<b>73</b>



# INTRODUZIONE

Questo studio, progetto di una tesi di laurea triennale, vuole affrontare una prima analisi degli aspetti strutturali e materici di alcune infrastrutture per la conservazione dell'acqua presso il sito archeologico di Nora (Sardegna), con un approccio multi-analitico integrato di carattere archeologico-archeometrico. Nello specifico, l'oggetto dello studio saranno le miscele leganti impiegate in queste infrastrutture, ossia l'acquedotto e un sistema di conservazione dell'acqua messo in luce nella necropoli fenicio-punica occidentale nel corso degli scavi condotti dall'Università di Padova nel 2021 e 2022.

L'elaborato si apre, nel primo capitolo, con un inquadramento storico-topografico del centro di Nora, sito collocato all'estremità sud-occidentale del Golfo di Cagliari, di fondazione fenicio-punica ma in seguito sviluppatosi in forme propriamente urbane nel corso dell'età romana con continuità di vita fino alle soglie del Medioevo. Nel capitolo due si propone un inquadramento teorico e tecnico-scientifico sulle miscele leganti, e le loro caratteristiche composizionali e terminologiche. Nel terzo capitolo segue la descrizione delle evidenze relative ai due contesti, mentre nel quarto si tratta delle fasi di campionamento e delle metodologie di analisi archeometrica utilizzate per questa indagine. Infine, nel capitolo quinto sono presentati i risultati analitici ottenuti dallo studio, mentre nel capitolo sesto, i risultati archeometrici sono contestualizzati nel background archeologico di riferimento, con le interpretazioni archeologiche che da essi scaturiscono.

Nello specifico, l'analisi dei composti cementizi di questi due particolari contesti ha permesso di caratterizzare la loro composizione petrografico-mineralogica e geo-chimica, le tecniche e i materiali impiegati, e definire la provenienza degli aggregati locali e non locali (pozzolane vulcaniche) in essi impiegati. Oltre a questi obiettivi, si è potuto indagare la possibile correlazione dell'infrastruttura pubblica con il complesso idraulico presente nell'immediato suburbio della città, sulla base del confronto delle miscele leganti e la comune provenienza degli aggregati impiegati nella loro realizzazione.

Per quanto riguarda l'indagine analitica, sono state utilizzate due tecniche differenti. L'analisi al microscopio ottico a luce trasmessa (OM) delle sezioni sottili delle miscele leganti, sia dell'acquedotto che dei rivestimenti idraulici del serbatoio del saggio 4, è stata impiegata per la caratterizzazione composizionale petrografico-mineralogica delle miscele. L'analisi in

fluorescenza a raggi X (XRF) è stata invece finalizzata alla definizione del profilo geo-chimico dei clasti vulcanici impiegati come aggregati nelle miscele leganti al fine di individuarne la provenienza sulla base del confronto con dati da letteratura.

I risultati ottenuti hanno portato ad una conoscenza più approfondita delle evidenze archeologiche in esame. In particolar modo, interessante è stato il riscontro dell'impiego di pozzolana vulcanica dall'area campana del Golfo di Napoli nei composti, sia dell'acquedotto che nella maggior parte delle miscele di rivestimento del serbatoio. Sulla base dei confronti con altre strutture norensi dove tale materiale risulta impiegato, è stato possibile contestualizzare la costruzione dell'acquedotto nel quadro cronologico della media età imperiale, a conferma di ciò che le fonti archeologiche già presupponevano, e di valutare le forme di impiego della pozzolana vulcanica in ambito strutturale per il rinforzo dei nuclei cementizi. Per quanto riguarda il complesso idraulico presso la necropoli occidentale, la caratterizzazione dei rivestimenti idraulici ha permesso di identificare almeno due "fasi di rivestimento" dell'impianto, e una datazione relativa di ciascuna fase. Il possibile legame tra il serbatoio e l'infrastruttura pubblica, alla luce del confronto delle miscele leganti, a supporto di altre informazioni desunte da analisi dimensionali e tecnico-costruttive, ha permesso di avere nuovi spunti circa una verosimile correlazione tra le due infrastrutture.

# CAPITOLO 1

## Ubicazione geo-topografica e storia del sito di Nora

Il sito archeologico di Nora è situato all'estremità occidentale del Golfo di Cagliari, e benché sia stato oggetto di curiosità già dal XIX secolo da parte di molti viaggiatori sia italiani che europei, venne indagato solamente a partire dal 1890, con i primi veri e propri scavi di F. Vivonet e F. Nissardi. Quasi un decennio più tardi, Giovanni Patroni eseguì alcuni sondaggi nell'area dell'istmo. L'intervento più esteso si deve all'allora soprintendente Gennaro Pesce (1952-1960)<sup>1</sup>. Il sito è tuttora in corso di scavo e studio da parte della Missione Archeologica, condotta dal 1990 da alcuni importanti atenei italiani, tra cui Padova, Milano, Genova e Cagliari. L'area di Capo di Pula conosce una lunga storia di frequentazioni, rapporti commerciali e culturali. Nel corso dei secoli, l'occupazione dapprima nuragica, poi fenicio-punica e infine romana ha profondamente mutato e plasmato l'aspetto della città. Risultante di questo processo è un insediamento urbano pluristratificato, in vita senza soluzione di continuità dall'età del Bronzo fino all'alto Medioevo.

### 1.1. Lineamenti geologici e topografici

L'antica città di Nora s'installava sul promontorio di Capo di Pula. Questa piccola lingua di terra collegata all'entroterra tramite un istmo sabbioso, si sviluppa in due punte: una verso sud (Punta 'e su Coloru) e una verso est (Punta del Coltellazzo) (fig. 1.1)<sup>2</sup>. Nel corso dei secoli, il profilo costiero è stato profondamente alterato dall'attività erosiva marina e dal continuo innalzamento del livello del mare. A seguito di nuove e approfondite indagini condotte dall'Università di Padova, si è potuta documentare un'elevazione del livello di oltre un metro dall'età romana ad oggi<sup>3</sup>. Dal punto di vista geologico, la penisola è costituita da affioramenti di roccia vulcanica coperti da più recenti banchi di arenaria. Questi litotipi vennero largamente impiegati in molte delle strutture dell'insediamento. Data l'origine vulcanica dei principali promontori dell'istmo (Colle di Tanit e Coltellazzo), una roccia molto utilizzata nell'edilizia

---

<sup>1</sup> Bonetto et al. 2018, 16-18.

<sup>2</sup> Tronchetti 2001, 8-9.

<sup>3</sup> Bonetto et al. 2022 (b), 27-62.

norense è l'andesite. È questa un tipo di roccia magmatica effusiva, originatasi da magmi leggermente sottosaturi in silice, di colore grigio chiaro o bruno nerastro, con variazioni di tonalità legate a vari fattori di formazione<sup>4</sup>. L'altro litotipo comunemente impiegato nell'edilizia è l'arenaria, i cui affioramenti si trovano lungo i declivi delle formazioni andesitiche fino a 4 m sul livello del mare (cd. panchina tirreniana). Attraverso il riconoscimento della fauna fossile depositata, è stato possibile ricondurre la formazione di questi depositi arenitici al periodo Tirreniano (ca.154.000-120.000 anni fa, Pleistocene superiore)<sup>5</sup>.



*Figura 1.1: Veduta aerea della penisola di Nora da sud-ovest (foto da <https://nora.beniculturali.unipd.it/>).*

## 1.2. L'età preromana

La prima frequentazione umana dell'area attorno al sito di Nora da parte di gruppi nuragici risale forse addirittura all'età Bronzo recente (1400-1100 circa a.C.). La loro presenza è attestata da pochi ma importanti rinvenimenti ceramici rinvenuti in diversi settori della penisola<sup>6</sup>, e da pochi resti attribuiti da A. La Marmora nel XIX secolo ad un nuraghe, in località

---

<sup>4</sup> Di Gregorio 2000, 5-9.

<sup>5</sup> Melis, Columbo 2000, 103-117.

<sup>6</sup> Bonetto et al. 2018, 12.

Sa Guardia Mongiassa presso la chiesa di S. Efisio<sup>7</sup>, ma di cui oggi non si ha una documentazione certa e approfondita. A partire dall'VIII secolo a.C., Nora diviene un emporio per il commercio stagionale dei Fenici, in stretto contatto con le comunità locali. La sua importanza ci è segnalata dalla celebre *stele di Nora*, un'iscrizione di carattere rituale datata verso la metà dell'VIII sec., in cui appare per la prima volta il nome della Sardegna: *SRDN*<sup>8</sup>. Nonostante fonti classiche come Pausania (Paus. *Periegesi*, X, 17, II d.C.) ne ricordino la fondazione e il primato di più antica città della Sardegna<sup>9</sup>, dal punto di vista archeologico l'abitato fenicio si consolidò tra VII e VI sec. a.C. Ne sono prova le tracce di capanne, testimoniate da numerose buche di palo, forse strutturate con alzati in mattone crudo, rinvenute nell'area sottostante al Foro Romano e al cd. Tempio romano.<sup>10</sup> L'antica necropoli fenicia situata a ovest della penisola, è databile agli inizi del VII secolo a.C. (area dell'ex Marina Militare, ancora in corso di scavo dall'Ateneo di Padova). Si tratta di sepolture ad incinerazione costituite da piccole fosse scavate nel banco arenitico o da ciste realizzate con scapoli lapidei, dotate di corredi ceramici simili per classi e forme a quelli del rituale funerario arcaico. Benché organizzata in questa fase, la necropoli mantenne la sua funzione durante tutta l'epoca punica (V-III secolo a.C.). Il rito dell'inumazione andò a sostituire quello dell'incinerazione del periodo precedente, attestato dalle tombe ad ipogeo anch'esse ricavate dalla 'panchina' arenitica<sup>11</sup>. Nei primi decenni del VI sec. a.C., alla presenza fenicia si sostituì quella cartaginese. I coloni punici si stanziarono in modo stabile, attraverso una precisa organizzazione dello spazio abitato, l'erezione di luoghi di culto e la costruzione di nuove necropoli. Della città di questa fase non si rinvengono però molte testimonianze, poiché obliterate dall'urbanizzazione romana. Fanno eccezione la fondazione del tempio di Tanit, alcuni resti di fortificazione sulla Punta del Coltellazzo e una serie di strutture in muratura rinvenute sotto l'area forense<sup>12</sup>. Le due necropoli, sia quella occidentale (fig. 1.2), che insiste sopra la precedente necropoli fenicia, che orientale di nuova creazione, e il Tofet situato nella periferia della città antica, costituiscono le maggiori fonti di informazione che abbiamo per quanto riguarda la fase punica di Nora. I ricchissimi corredi rinvenuti nelle tombe ipogee, hanno restituito molti esemplari di ceramica prodotta localmente, o importata dalla Grecia,

---

<sup>7</sup> Della Marmora 1840, 39.

<sup>8</sup> Bonetto et al. 2018, 12.

<sup>9</sup> Tronchetti 2001, 12.

<sup>10</sup> Bonetto 2009, 63-65.

<sup>11</sup> Bonetto et al. 2020 (a), 1047.

<sup>12</sup> Bonetto 2021, 92-93.



amuleti, gioielli in metalli preziosi di origine orientale ed oggetti di ornamento personale. Questi dati ci mostrano come la città tra V e IV secolo a.C. fosse incredibilmente sviluppata grazie al suo ruolo di snodo commerciale, che ne favorì contatti ad ampio raggio.



*Figura 1.2: La necropoli fenicio-punica occidentale (foto da drone acquisita durante la campagna di scavo 2022).*

### 1.3. L'età romana

A seguito delle vicende politico-militari della prima guerra punica (261-241 a.C.), il dominio romano si estese in Sardegna con l'istituzione della provincia di *Sardinia et Corsica* nel 227 a.C. La città di Nora iniziò così progressivamente ad espandersi per via dell'incremento demografico, con la creazione di quartieri a destinazione sia residenziale che artigianale e commerciale<sup>13</sup>. L'area della necropoli punica fu interessata da un chiaro intervento di rifunzionalizzazione, testimoniato dall'interruzione delle sepolture, dalla conversione degli ipogei in cisterne e dallo sfruttamento dell'affioramento di materiale lapideo per la

---

<sup>13</sup> Ghiotto, Zara 2020, 3-20.

realizzazione di costruzioni in città<sup>14</sup>. A partire dalla prima età augustea (40-20 a.C.), a Nora venne concesso lo status di *municipium*. Da questo momento il volto della città mutò notevolmente attraverso una fase di grande attività edilizia, con la costruzione di due importanti edifici pubblici: il foro e il teatro (fig. 1.3). In età medio imperiale, tra la fine del II e gli inizi del III sec. d.C., si vide un altro periodo di grandi interventi urbanistici in diversi settori della penisola, che andarono a definire definitivamente l'assetto urbanistico della città come visibile ancora oggi. La città venne dotata di ben 4 impianti termali (fig. 1.4), sontuose *domus* private di notevoli dimensioni, dotate di ricchi apparati decorativi. L'ingente quantità di acqua richiesta da questi nuovi complessi rese necessaria la costruzione di nuovi serbatoi per la conservazione dell'acqua e di un acquedotto<sup>15</sup>, importante infrastruttura che tuttavia non si è conservata interamente e su cui si tratterà più approfonditamente in questo elaborato. La ricchezza e l'importanza commerciale della città in questo periodo ci sono testimoniate dall'abbondanza di materiali importati da diverse aree del mediterraneo antico.



Figura 1.3: Il teatro (foto da <https://nora.beniculturali.unipd.it/>).

<sup>14</sup> Bonetto et al. 2020 (b), 1047-1048.

<sup>15</sup> Bonetto et al. 2018, 13-15.





*Figura 1.4: Le terme a mare (foto di Z. Caneva).*

#### 1.4. L'Età post-romana e la fine dell'insediamento

In età tardoantica Nora, così come tutto l'Impero, conobbe un periodo di forte crisi economica e instabilità politica. In questa fase, in città sono ancora attestati interventi edilizi, ristrutturazioni di stabili preesistenti e poche strutture di nuova fabbricazione, tra cui la costruzione della Basilica cristiana nel lato occidentale della penisola nel corso del IV sec.<sup>16</sup>. Tra IV-VII secolo d.C. Nora mantenne ancora attivi importanti rapporti commerciali, come quello con l'Africa e la sua capitale Cartagine, come testimoniato dalla presenza di ceramiche di importazione, quali la ceramica sigillata africana. L'arrivo dei Vandali nel 455 d.C. non segnò quindi la fine dell'esistenza dell'insediamento, che continuò a vivere fino ai primi decenni del VIII sec d.C.<sup>17</sup>. Tuttavia, il tessuto urbano iniziò lentamente a destrutturarsi, per cui alcune zone cominciarono a perdere la loro funzione e successivamente furono abbandonate. Della città di Nora si persero le testimonianze intorno alla prima metà dell' VIII sec. d.C. con l'avvento degli Arabi nell'isola, con un conseguente incremento dell'importanza della vicina Cagliari, e con la destinazione del territorio norense ad uso prevalentemente agricolo<sup>18</sup>.

---

<sup>16</sup> Bonetto, Ghiotto 2013, 273.

<sup>17</sup> Garau, Rendeli 2006, 1247-1278.

<sup>18</sup> Bonetto, Ghiotto 2013, 286.



## CAPITOLO 2

### Le miscele leganti antiche: origini, definizione e proprietà

#### 2.1. L'origine delle miscele leganti

In ambito costruttivo si parla di miscela legante per intendere quei composti plastici, che hanno la capacità di indurire a contatto con l'aria. Esistono diverse tipologie di miscele differenziabili a seconda dei loro principali costituenti e delle loro applicazioni. Grazie alla loro versatilità, le miscele leganti sono state impiegate a lungo nel tempo e in una moltitudine di contesti. Per esempio, nell'edilizia per legare le murature, per rivestire pareti, soffitti oppure cisterne, per la preparazione di pavimenti ma anche in ambito artistico per la decorazione di pareti e sculture<sup>19</sup>.

Uno dei primi leganti sperimentati dalla razza umana fu l'argilla, impiegata in Medio Oriente già dalle prime fasi del Neolitico (X millennio)<sup>20</sup>. Essa veniva impiegata per rivestire muri, consolidare pavimenti e impermeabilizzare i tetti in materiale deperibile, e persino come legante per strutture in pietra e mattoni crudi<sup>21</sup>. Tuttavia, l'evoluzione di costruzioni sempre più complesse ha determinato la necessità di materiali differenti per la creazione del legante, in modo tale da garantire maggior solidità alle strutture ed ai rivestimenti. Intorno alla seconda metà del X millennio, nacquero così i leganti a base di calce, costituiti da rocce carbonatiche cotte ad alte temperature. I calcari calcinati venivano solitamente mescolati ad acqua e ad una parte di altri materiali per lo più inorganici, definiti come aggregati, formando così un materiale plastico in grado di indurire col tempo, comunemente chiamato 'miscela legante'. Uno dei primissimi esempi di produzione di malta di calce risale al periodo Natufiano (10.400-10.000 a.C.), rinvenuto nella cd. grotta Hayonim nell'attuale stato di Israele. La tecnologia produttiva si diffuse con diverse applicazioni in tutta l'area Levantina per secoli, fino allo sviluppo della civiltà Minoica (II millennio a.C.), dove le miscele leganti vennero impiegate nella decorazione di pareti dipinte e come rivestimento idraulico per cisterne. È proprio in ambito greco-cipriota che si approfondirono e si migliorarono le caratteristiche di impermeabilità delle malte,

---

<sup>19</sup> Pecchioni, Fratini, Cantisani 2008, 15.

<sup>20</sup> Pecchioni, Fratini, Cantisani 2008, 15.

<sup>21</sup> Artioli, Secco, Addis 2019, 152.

attraverso l'uso sistematico di materiali pozzolanici come i frammenti fittili polverizzati, con la formulazione delle prime malte di cocciopesto.

I Romani raccolsero questa eredità, utilizzarono ampiamente le miscele leganti in molti frangenti dell'edilizia, standardizzandone la produzione e facendone una vera e propria arte, perdurata nei secoli fino al XVIII secolo<sup>22</sup> e soppiantata solo dall'introduzione del cemento moderno (cd. cemento Portland) agli albori del XIX secolo. In epoca romana gli architetti cominciarono a formalizzare le ricette per produrre malte e calcestruzzi di buona qualità, identificando le materie prime migliori e le proporzioni della miscela. Tuttavia, molte di queste informazioni non sono abbastanza chiare, e solo in pochi casi la descrizione dei prodotti impiegati ci è giunta sufficientemente dettagliata da poterci permettere di associare i composti antichi con le terminologie attuali (ex. Cocciopesto, malta di calce, pozzolana ecc.). Tra i numerosi trattati di edilizia antica si distingue per celebrità e completezza il *De architectura* di Marco Vitruvio Pollione (I secolo a.C.). In poco tempo, la sua opera divenne un modello autorevole seguito non solo in età romana, ma anche nei secoli successivi a partire dal Medioevo e per tutto il Rinascimento<sup>23</sup>. Secondo Vitruvio, una malta ideale si preparava in questa maniera: *“Quando la calce sarà spenta, bisognerà mischiarla in questo modo: si metterà una parte di calce con tre parti di sabbia di cava o due di sabbia di fiume o di mare; queste sono le proporzioni ottimali che potranno essere ulteriormente migliorate se alla sabbia di mare e di fiume si aggiunge una terza parte di cocci di tegole pestati”*<sup>24</sup>.

Nonostante la consistente presenza di questo materiale in ambito archeologico, i leganti antichi sono rimasti a lungo una tra le classi di materiali da costruzione meno considerata e insufficientemente indagata negli studi del settore. Solamente negli ultimi decenni, le miscele leganti antiche sono diventate oggetto di studio approfondito. Se ne indagano i processi produttivi, le differenti ricette, le proprietà fisico-meccaniche, la composizione chimica e l'origine delle materie prime, per trarne informazioni utili non solo da un punto di vista storico-culturale e scientifico, ma anche nell'ottica di una definizione di possibili applicazioni in ambito restaurativo.

---

<sup>22</sup> Artioli, Secco, Addis 2019, 165.

<sup>23</sup> Dilaria c.s., cap. 2.5.

<sup>24</sup> Vitr. 2.5.1.

## 2.2. Le miscele leganti antiche: materie prime e processo produttivo

Il termine ‘miscela legante’ definisce una miscela di componenti inorganici e, talvolta, organici che uniti all’acqua s’induriscono, rendendo il composto solido. Alla miscela si aggiunge generalmente anche un terzo costituente, definito aggregato, che ha la funzione di degrassante. Si devono tuttavia distinguere due tipologie all’interno della stessa categoria delle ‘miscele leganti’, le quali si differenziano sostanzialmente per la dimensione granulometrica degli elementi costituenti, le ‘malte’ e i calcestruzzi. Le malte sono impasti in cui gli inclusi non superano la dimensione di 5.0/8.0 mm. I ‘calcestruzzi’ (dal latino *calcis structio*) sono composti più grossolani, con inclusi che mediamente tendono a superare la dimensione di 5.0/8.0 mm<sup>25</sup>. Le normative moderne (standard UNI 10924: 2001) prevedono che una miscela legante, sia essa malta o calcestruzzo, deve essere costituita da quattro componenti: il legante, l’acqua, gli aggregati ed eventuali additivi. Di seguito si presenteranno ciascuno dei sopracitati elementi e le relative proprietà.

### 2.2.1 Leganti

I leganti sono il componente principale di una miscela legante. Quando impastati con l’acqua formano masse plastiche che induriscono per dar luogo ad un composto unico, dotato di compattezza, in grado di resistere alle sollecitazioni meccaniche e agli agenti atmosferici. Questi materiali sono spesso definiti ‘litoidi’, perché derivanti da rocce e altri tipi di sedimenti e ne mantengono anche i comportamenti.

Il principale legante usato in antico è la calce, che si ottiene attraverso la cottura ad alte temperature (ca. 850°C) di rocce sedimentarie di tipo carbonatico, come i calcari e le dolomie, oppure di rocce metamorfiche, come i marmi<sup>26</sup>. In base alle condizioni secondo cui l’impasto fa presa, i leganti a base di calce vengono classificati tradizionalmente in aerei, cioè che induriscono a contatto con l’aria, o idraulici, se possono far presa anche in ambiente umido o a diretto contatto con l’acqua.

#### ***Calce aerea***

Come già anticipato, la calce è un composto che si ottiene dalla cottura di rocce carbonatiche, ossia ricche in carbonato di calcio (CaCO<sub>3</sub>). Si possono utilizzare calcari puri, ossia aventi

---

<sup>25</sup> Ginouvès, Martin 1985, 50-52.

<sup>26</sup> Pecchioni, Fratini, Cantisani 2008, 27.

concentrazioni di  $\text{CaCO}_3$  pari o superiori al 98%, o anche calcari magnesiaci e dolomie, contenenti magnesio in percentuali variabili. Da questi ultimi si ottengono calci magnesiache o dolomitiche, anche note come calci “magre”, mentre le prime sono note come calci “calciche” altresì dette “calci grasse”.

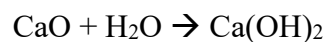
Il ciclo produttivo, conosciuto tradizionalmente come ‘ciclo della calce’ (fig. 2.1), prevede che la pietra calcarea venga fatta calcinare in appositi forni a temperature elevate comprese tra gli 850-900°C, in modo tale che il carbonato di calcio che la costituisce venga dissociato, trasformandosi in ossido di calcio ( $\text{CaO}$ ) con conseguente emissione di anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ). Tale reazione termodinamica da luogo alla cd. ‘calce viva’, materiale altamente caustico che necessita di essere immerso in acqua e lasciato macerare per un certo lasso di tempo variabile prima di essere utilizzato. Il processo di spegnimento della calce porta ad un’ulteriore reazione chimica, reagendo con l’acqua e formando l’idrossido di calcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (portlandite). Al termine del processo di spegnimento e idratazione, prima della messa in opera, la calce idrata viene mescolata con acqua e altri elementi, aggregati ed eventuali additivi, per ottenere una malta o un calcestruzzo. Il ciclo si conclude con la ‘carbonatazione’, momento in cui attraverso l’assorbimento di  $\text{CO}_2$  atmosferica la portlandite si riconverte in carbonato di calcio, rilasciando vapore acqueo, e il composto solidifica facendo presa sulle superfici con cui è a contatto<sup>27</sup>.

Le reazioni:

Calcinazione



Spegnimento calce viva (calcica)



Presa della calce spenta calcica e carbonatazione



---

<sup>27</sup> Dilaria c.s., cap. 2.2.1.

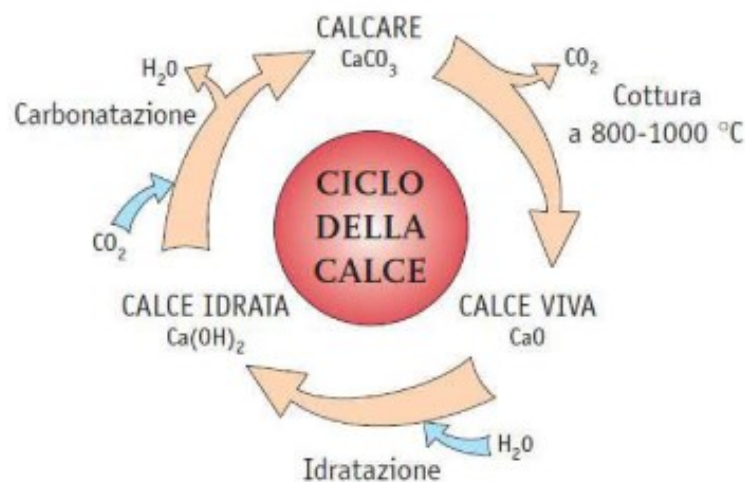


Figura 2.1: Schema del ciclo della calce (da B. Bellocchi 2018, 16, fig 5).

### ***Calce Idraulica naturale***

Le calci aeree fanno presa solo in ambiente asciutto a contatto con l'aria, ma se in presenza di acqua non fanno alcuna reazione in quanto non riescono ad intraprendere il processo di carbonatazione. Ciononostante, è possibile ottenere calci idrauliche naturali a partire dalla calcinazione di calcari 'impuri'. Con questo termine si definiscono quelle rocce calcaree contenenti quantità variabili di argilla (tra il 6% e il 20%), perciò ricche di  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Normalmente sia il silicio ( $\text{SiO}_2$ ) che l'allumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sono stabili e pertanto non reattivi. Se presenti sotto forma di impurezze in una roccia calcarea (ad esempio nelle marne), una volta che il materiale viene sottoposto a calcinazione a temperature elevate e successivamente spento in acqua, si possono ricombinare con il calcio e l'idrogeno precipitando in idrati, paracrystallini o tendenzialmente amorfi (dalla stechiometria atomica variabile) e generalmente definiti C-S-H (silicato di calcio idrato), C-A-H (alluminato di calcio idrato) o C-A-S-H (silico-alluminato di calcio idrato). Per via della loro insolubilità in acqua, il composto può indurire anche in ambienti umidi, non aerei. Oltre alle evidenti proprietà idrorepellenti, le miscele leganti prodotte con calce idraulica naturale possono presentare anche notevoli capacità di resistenza meccanica<sup>28</sup>.

Lo sviluppo delle peculiari fasi idrauliche appena definite si può avere anche tra una calce aerea e alcuni particolari aggregati, attraverso però un processo non termico ma chimico che avviene sostanzialmente a temperatura ambiente e definito in letteratura come "reazione pozzolanica".

<sup>28</sup> Dilaria c.s., cap. 2.2.1.

Ciò avviene mediante l'aggiunta al legante dei cd. aggregati 'pozzolanici', che verranno illustrati di seguito in questo capitolo.

### 2.2.2. Aggregati: Tipologie e rapporto con il legante

L'aggregato è un materiale che può essere di origine naturale (ad es. sabbia e ghiaia) o artificiale (ad. es. elementi fittili) che, all'interno dell'impasto di legante ed acqua, permette di evitare la formazione di fratture e fessurazioni durante il processo di indurimento, contrastando il naturale ritiro del legante dovuto all'evaporazione dell'acqua presente nell'impasto. Di fatto, gli aggregati mescolati assieme al legante costituiscono una sorta di 'impalcatura' all'interno del corpo della miscela legante. La scelta del tipo di aggregato dipende dalle caratteristiche fisiche e meccaniche di quest'ultimo, dalla sua disponibilità ed economicità. Si possono distinguere tre categorie di aggregati: a) clasti di elementi litici, allo stato naturale (sabbie e ghiaie) o artificialmente lavorati (schegge e frammenti di rocce); b) elementi di origine animale (bioclasti), quali le conchiglie; c) materiali a comportamento "pozzolanico", a loro volta distinguibili in naturali (rocce vulcaniche) o artificiali (frammenti fittili, scorie di ferro)<sup>29</sup>.

Un ulteriore, ma fondamentale, elemento di caratterizzazione di una miscela legante è il suo rapporto tra il legante e l'aggregato. La quantità di legante rispetto a quella dell'aggregato ha importanti conseguenze sulle proprietà e la resa finale di una malta. Il rapporto teoricamente ottimale è quello  $L/A \approx 1/3$ , tuttavia non sempre questa proporzione si riscontra nelle malte antiche. Spesso si incontrano impasti di provenienza archeologica con rapporti inferiori a  $1/3$  ( $\approx 1/2 - 1/1.5$ ), definite malte magre, le quali sono più soggette a disgregazioni a causa di un'insufficiente quantità di legante in grado di mantenere una coesione con tutti gli aggregati. All'opposto, rapporti maggiori a  $1/3$  determinano impasti grassi maggiormente sottoposti a fessurazioni da ritiro<sup>30</sup>.

Diverse sono le tipologie di aggregati impiegate in epoca antica, tra le più comuni, la sabbia. Sabbie e ghiaie erano largamente utilizzate nelle miscele leganti, potevano provenire da bacini differenti, ad esempio depositi fluviali, lacustri o di cava. Di rado e altamente sconsigliato, era l'utilizzo della sabbia marina, poiché l'alto contenuto di salsedine poteva alterare la presa. Secondo Vitruvio, per poter ricorrere alla sabbia di mare era imperativo sottoporla a lavaggio<sup>31</sup>.

---

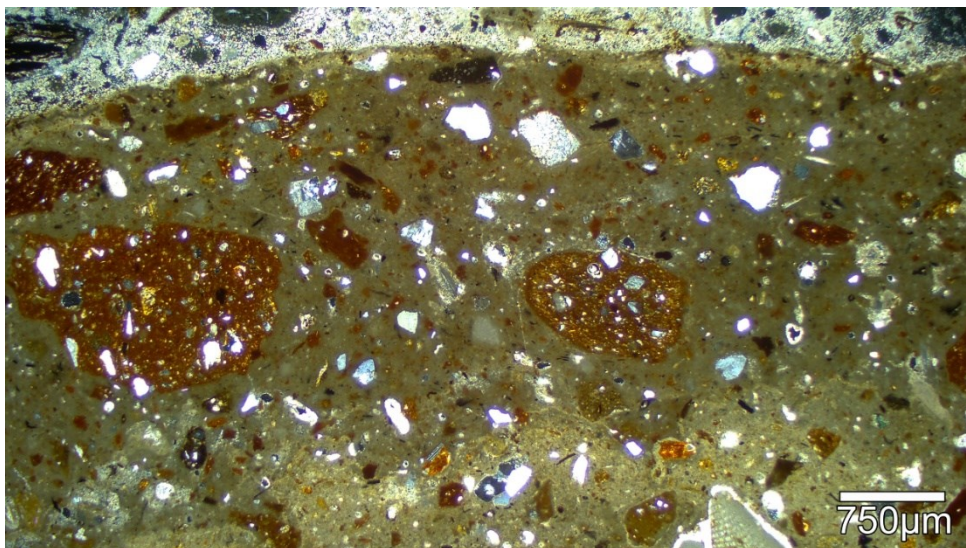
<sup>29</sup> Dilaria c.s., cap. 2.2.3.

<sup>30</sup> Pecchioni, Fratini, Cantisani 2014, 17.

<sup>31</sup> Vitr. 2.4.2.

Generalmente le sabbie erano mal classate, ovvero con granulometria variabile e non selezionata. Tuttavia, la compresenza di granuli più grandi e più piccoli all'interno dell'impasto permette di utilizzare meno legante e diminuire i fenomeni di ritiro. Dove non era possibile reperire alcun tipo di sabbia, si potevano utilizzare polveri ottenute dalla macinazione di rocce carbonatiche oppure di gusci di conchiglie, grazie alla loro composizione carbonatica<sup>32</sup>.

Un'altra categoria di aggregati impiegata era quella degli aggregati pozzolanici. Questi componenti ricchi in alluminio e silicio aggiunti all'impasto legante vanno ad interagire chimicamente con la calce, portando alla formazione di fasi minerali idrauliche (C-S-H). L'impiego di questi aggregati permetteva di migliorare le proprietà fisico-meccaniche e conferire capacità idraulicizzanti alle malte. Si possono considerare materiali con comportamento pozzolanico il cd. cocchiopesto (fig. 2.2) e il vetro vulcanico. Il primo è un composto di frammenti ceramici e laterizi macinati più o meno finemente. Per vetro vulcanico, invece, s'intendono quei prodotti piroclastici frutto di eruzioni vulcaniche di tipo esplosivo, come le pomici (fig. 2.3) e i tufi cineritici<sup>33</sup>. Il processo chimico generato è il medesimo di quello che avviene nelle calce idrauliche naturali (v. supra), con l'unica differenza che, gli aggregati pozzolanici non necessitano una fonte di calore ulteriore per reagire.



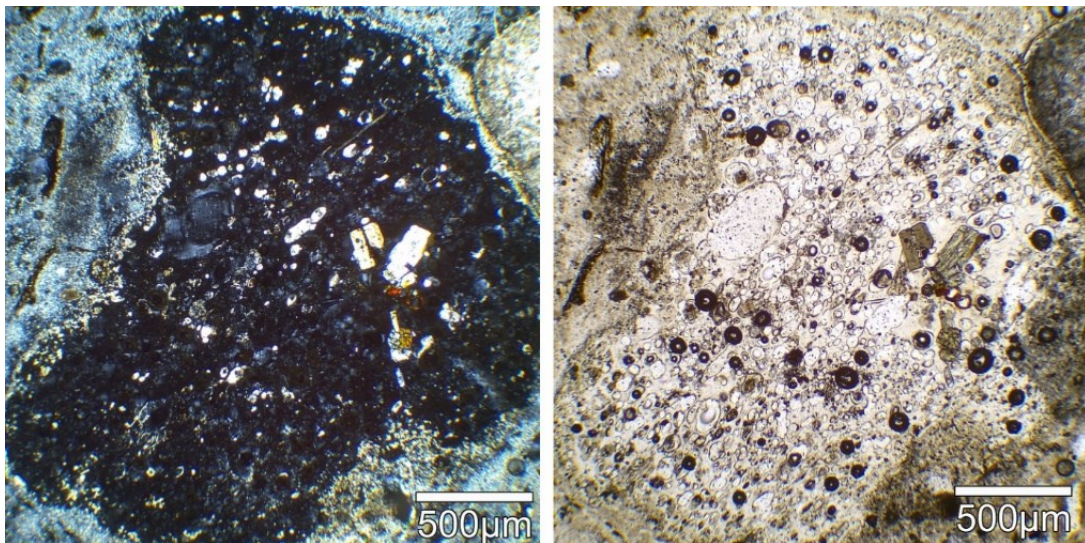
*Figura 2.2: Micrografia di dettaglio al microscopio ottico a luce polarizzata di una malta di cocchiopesto, ricca di frammenti fittili di varie dimensioni (nicol paralleli).*

<sup>32</sup> Pecchioni, Fratini, Cantisani 2008, 92.

<sup>33</sup> Dilaria c.s., cap. 2.2.3.



Sempre nel trattato vitruviano, viene raccomandato l'uso di sabbia vulcanica, la pozzolana (*pulvis puteolanus*), che egli definisce in questo modo: «Esiste una specie di polvere che per natura possiede qualità straordinarie: si trova a Baia (a nord di Napoli, nel comprensorio vulcanico dei Campi Flegrei) e nelle terre circostanti al Vesuvio. Questa polvere, mischiata con calce e pietre frantumate, rende la muratura talmente stabile che si indurisce non solo negli edifici normali, ma anche sotto l'acqua<sup>34</sup>. Dunque, già dal I secolo a.C. autori come Vitruvio e anche Plinio il vecchio nei loro scritti parlavano di *pulvis puteolanus*<sup>35</sup> per riferirsi ai materiali lapidei cavati nelle prossimità dell'antica città di Pozzuoli, ovvero le rocce piroclastiche (tufo cineritico e pomice) presenti nell'area del Golfo di Napoli, dai Campi Flegrei fino al Vesuvio. La pozzolana veniva quindi impiegata come aggregato nella preparazione delle miscele leganti per migliorarne le proprietà meccaniche e per le sue note capacità idraulicizzanti<sup>36</sup>. Recenti indagini stanno dimostrando come la commercializzazione della pozzolana flegrea fosse diffusa in tutto l'Impero Romano, impiegata in diversi contesti architettonici, dalle murature in opera cementizia, ai rivestimenti idraulici e alle strutture dei porti marittimi<sup>37</sup>.



*Figura 2.3: Micrografia di dettaglio al microscopio ottico a luce polarizzata di un clasto di pomice con all'interno alcuni cristalli di biotite. Immagine acquisita a nicol incrociati e nicol paralleli.*

---

<sup>34</sup> Vitr. 2.6.1.

<sup>35</sup> Plin.nat. 16.202, 35.166.

<sup>36</sup> Dilaria et al. 2023, 568.

<sup>37</sup> Brandon et al. 2014, 6-7.



### 2.2.3. Additivi

“Per additivo s’intende una sostanza aggiunta alla miscela costituente la malta, al fine di migliorarne le caratteristiche, la lavorabilità, le prestazioni”<sup>38</sup>. In antichità venivano frequentemente impiegati materiali di origine organica, sia di tipo vegetale che animale. A seconda delle risorse disponibili e delle diverse tradizioni locali, i costruttori hanno utilizzato molte sostanze differenti, per cui non è semplice stilare un elenco definito. Gli additivi più comuni comunque erano la stoppa, il carbone vegetale, olii, resine, il grasso, lo sterco cotto e altri prodotti animali, i quali potevano avere funzioni differenti. Per esempio, in età romana veniva consigliato l’utilizzo di fibre vegetali, come la paglia, il crine, o la stoppa, con fine degrassante e di miglioramento delle proprietà elastiche e di ritenzione idrica dei composti. Oltre a questi materiali, nei territori del Mediterraneo di influenza culturale fenicio-punico<sup>39</sup> era pratica comune aggiungere all’impasto legante frustoli carboniosi e ceneri organiche. In particolare la cenere, essendo questa ricca in silicio, era in grado di reagire con il legante innescando una reazione di tipo pozzolanico, in maniera simile a quanto detto in relazione agli “aggregati pozzolanici”. Impasti di questo genere venivano perciò impiegati per impermeabilizzare strutture per la conservazione dell’acqua<sup>40</sup>.

### 2.3. Le tipologie di miscele leganti documentate a Nora

Come anticipato qui di sopra, in epoca antica la produzione di miscele leganti era innanzitutto una produzione di tipo artigianale, legata strettamente alla disponibilità delle risorse, alla loro economicità, al contesto di applicazione e alle conoscenze dei costruttori. In questa sede si prenderanno in esame solamente alcune delle principali tipologie di leganti attestate in ambito archeologico, e già riscontrate nel sito di Nora e nei contesti che saranno oggetto di studio in questo elaborato, escludendo altre tipologie antiche che tuttavia erano largamente impiegate come lo stucco e le malte di gesso.

---

<sup>38</sup> Pecchioni, Fratini, Cantisani 2008, 105.

<sup>39</sup> Lancaster 2019, 35-38.

<sup>40</sup> Bonetto, Dilaria 2021, 508.

Generalmente s'identificano le malte di calce con l'acronimo inglese "lime mortar" (**LM**), le quali presentano principalmente sabbia come aggregato. A questo nominativo si possono aggiungere altre sigle che definiscono la tipologia di ulteriori materiali impiegati nell'impasto.

La categoria di malte **LM-PUM** è caratterizzata da un'associazione di sabbia e porzioni variabili di clasti vulcanici piroclastici, prevalentemente pomici e saltuariamente frammenti di tufo. In alcuni casi all'impasto legante come quello appena sopra descritto, si può riscontrare una frazione minoritaria di frammenti fittili millimetrici e sub-millimetrici (**LM-PUM/fp** o **PUM-CP**). A livello macroscopico le malte PUM-CP si presentano con colorazione di massa variabile da tonalità bianco-rosate a giallo pallide.

Le malte di cocchiopesto sono costituite da un legante di calce aerea e una porzione di aggregato costituita da frammenti fittili di dimensioni variabili, da grossolani (**CPG**) a subcentimetrici (**CP**) oppure da polvere fittile micrometrica inferiore al 1 mm (**CPFP**, **CPFP/pum**). È da notare come spesso sia presente anche una componente secondaria d'aggregato sabbioso. A livello macroscopico il cocchiopesto si presenta con colorazioni tendenzialmente rossastre, che tuttavia possono variare a seconda della ceramica impiegata. Questa tipologia di malte possiede peculiari capacità pozzolaniche, per via dell'interazione tra la calce legante e la frazione fittile submillimetrica e micrometrica. Nel caso dei cocchiopesti grossolani (**CPG**), nonostante la potenziale pozzolanicità dell'aggregato fittile, la bassa superficie specifica dei frammenti e l'assenza di polvere micrometrica limitano le aree di reazione alle porzioni di interfaccia con la componente legante, e dunque ne diminuiscono la capacità idraulicizzante. Un'ulteriore categoria di malte di cocchiopesto prevede che all'impasto legante appena sopra descritto venga aggiunta anche un'importante quantità di carbone e ceneri, quest'ultime con funzione di additivo a carattere pozzolanico (**CP-ASH**; **CPFP-ASH**)<sup>41</sup>.

Oltre alla presenza di aggregati a comportamento pozzolanico, esistono tipologie di malte di calce nelle quali si fa abbondante uso di ceneri e carboni di origine organica in qualità di additivi (**LM-ASH**). Queste componenti oltre a contribuire al caratteristico colore grigiastro o grigionerastro, conferiscono alle malte evidenti caratteristiche pozzolaniche, dovute principalmente alla reazione della calce legante con la componente silicatica e alluminosa delle ceneri organiche<sup>42</sup>.

---

<sup>41</sup> Bonetto, Dilaria 2021, 503-504.

<sup>42</sup> Bonetto, Dilaria 2021, 501.

In sede di analisi su materiali di provenienza archeologica, si è giunti a riconoscere una nuova variante di una tipologia di miscela legante già attestata prima nell'edilizia norense. Si tratta di malte costituite da legante di calce nelle quali sono presenti contemporaneamente pomici, elementi fittile frantumati e componenti carboniosi in parti circa uguali (**PUM-CP-ASH**). È chiaro, dunque, come questo tipo di miscela legante presenti marcate proprietà idraulicizzanti, e perciò sia stata impiegata per rivestire strutture per la conservazione dell'acqua, come le cisterne T60 e T61 che saranno oggetto di analisi in questo elaborato.

Qui di seguito alla tabella 2.1 sono riportate tutte le tipologie appena descritte.

Nome	Sigla	Legante	Aggregato (Sabbia)	Aggregato (Pomice e tufi)	Aggregato (fr.ceramici)	Additivi (Cenere)
Malta di calce	LM	Calce	X			
Malta di calce con pomici	LM-PUM	Calce	X	X		
Malta di calce con pomici e minoritaria polvere fittile	LM-PUM/fp	Calce	X	X	X	
Cocciopesto grossolano	CPG	Calce	X		X	
Cocciopesto con frammenti fittili (< 5 mm)	CP; CP/pum	Calce	X	X	X	
Cocciopesto con frammenti fittili ( $\leq 1$ mm)	CPFP; CPFP/pum	Calce	X	X	X	
Cocciopesto con frammenti fittili o polvere fittile ricco in frazione carboniosa	CP-ASH; CPFP-ASH	Calce	X		X	X
Malta di calce ricca in frazione carboniosa	LM-ASH	Calce	X			X
Malta di calce ricca in frazione carboniosa a ridotta frazione fittile	LM-ASH/fp	Calce	X		X	X
Malta di calce con pomici, frazione carboniosa e ridotta frazione fittile (1/3)	PUM-CP-ASH	Calce	X	X	X	X

*Tabella 2.1: Elenco riassuntivo delle tipologie di miscele leganti attestate nei contesti edilizi di Nora.*



## CAPITOLO 3

### I contesti di studio

In questo capitolo, si cercherà di approfondire lo stato delle conoscenze su due particolari contesti della città di Nora, di cui se ne analizzeranno nel dettaglio gli aspetti strutturali e materici con un approccio multi-analitico di carattere archeologico e archeometrico. Nello specifico, si tratterà l'acquedotto nell'ottica di una sua possibile correlazione con un sistema di conservazione dell'acqua messo in luce nel corso degli scavi condotti dall'Università di Padova nella necropoli occidentale nel 2021 e 2022. Tale complesso è costituito da due cisterne e una canaletta di adduzione, le quali testimoniano chiaramente la rifunzionalizzazione a fini economico-produttivi dell'area funeraria fenicio-punica durante il periodo romano. Per ciascun contesto si procederà con l'analisi delle tecniche costruttive a cui seguiranno analisi petrografico-mineralogiche e chimiche delle miscele leganti utilizzate, i cui risultati saranno presentati nel capitolo 5.

#### 3.1. L'acquedotto

##### 3.1.1. Datazione

In età severiana, tra la fine del II e i primi decenni del III secolo d.C., Nora conobbe una fase di importanti rinnovamenti edilizi (vedi capitolo 1.3.). Sin dall'epoca punica, ma soprattutto in seguito, la città venne dotata di una notevole quantità di pozzi e cisterne per l'approvvigionamento e la conservazione dell'acqua sia di falda che piovana. Tuttavia, per rendere possibile una costante fornitura di acqua ai quartieri residenziali e ai diversi complessi termali di nuova edificazione si costruì l'acquedotto pubblico<sup>43</sup>. La presenza del nuovo sistema di approvvigionamento idrico non segnò però la fine dei sistemi precedenti, che vennero probabilmente mantenuti, soprattutto in ambito domestico-residenziale. Una delle tipologie di cisterna più frequentemente attestata a Nora è quella cd. 'a bagnarola', largamente riscontrata a Cartagine, nel Nord Africa e in molti dei siti mediterranei orbitanti sotto l'influenza punica,

---

<sup>43</sup> Bonetto et al. 2018, 115.

tra cui la Sardegna<sup>44</sup>. In molteplici contesti dell’Africa settentrionale e della Siria era pratica comune sfruttare cisterne e serbatoi anche di età precedente come raccoglitori di riserva collegati agli acquedotti<sup>45</sup>. Perciò la moltitudine di cisterne relative all’età romana repubblicana e alto imperiale mantennero la loro funzione e vennero restaurate per tutta la durata di vita della città contestualmente all’edificazione dell’acquedotto, addirittura costruendone di nuove<sup>46</sup>. Alcune peculiarità nella tecnica edilizia, quali il modulo dei paramenti in laterizi e la conformazione delle *armillae* in sesquipedali, sono perfettamente confrontabili con quelle attestate in città presso le Terme a Mare, di piena età severiana. Questo dato può suggerire che la costruzione dell’acquedotto sia avvenuta in concomitanza a quella del principale impianto termale, datato con buona sicurezza tra II e III secolo d.C. Il legame tra i due complessi continua almeno fino al V secolo d.C., quando sia le terme che l’acquedotto sono sottoposti a importanti lavori di ristrutturazione. L’intervento all’acquedotto tra il 425 e 450 d.C. è testimoniato da una fonte epigrafica, nella quale sono persino citati i nomi di coloro che ordinarono e seguirono i lavori [*Salvis d(omi)n(is) n(ostris duobus) / [T]heodosio et Placido Valentiniano, s[emper Aug(ustis) duobus]. / Sub]ductos olim latices patrieque nega[tos / re]stituit populis puro Flaviolus am[ne], / cu[ra]nte / [V]alerio Euhodio principale ac / primore eiusdem urbis.*]<sup>47</sup>.

### 3.1.2. Il tracciato ipotetico

Ad oggi lo stato di conservazione alquanto lacunoso dell’importante infrastruttura idraulica ha reso difficile definirne con precisione il percorso, sia fuori che dentro la città. Ciononostante, non sono completamente assenti resti, dati archeologici e fonti utili a ricostruirne il contesto e formulare qualche ipotesi ricostruttiva (fig. 3.1). Il *caput aquae* si può ricondurre con abbastanza probabilità al luogo in cui se ne rinvennero le ultime rovine, in località Sa Guardia Mongiasa a circa 1,5 km da Nora. Quest’area umida vicino al centro di Pula (10 m s.l.m.) rimane la più plausibile come sorgente, per la presenza ancora oggi di una vegetazione caratteristica dei terreni umidi-paludosi<sup>48</sup>. Da questo punto lo *specus* subaereo correva verso la città, sostenuto da arcate rette da piloni in opera cementizia con paramenti in laterizio, alti non meno di 6 m. Questo aspetto costruttivo è dovuto al fatto che l’acquedotto nel suo percorso incontrava due punti leggermente elevati, uno all’origine dell’istmo presso la chiesetta di S.

---

<sup>44</sup> Cespa 2018, 244.

<sup>45</sup> Adam 2008, 272.

<sup>46</sup> Cespa 2018, 276.

<sup>47</sup> Ghiotto 2004, 148.

<sup>48</sup> Paoletti 1997, 159.

Efisio (4 m s.l.m) e uno all'inizio del promontorio roccioso di Nora<sup>49</sup>. Per mantenere la quota e la pendenza dello *specus* mediamente costanti era necessario che l'altezza dei piloni diminuisse gradualmente in modo tale da consentire la distribuzione in pressione. Al termine dell'istmo, giunto all'ingresso della città in corrispondenza dell'area dell'ex Marina Militare, è probabile che l'acquedotto si ramificasse per andare ad alimentare i vari settori abitativi di Nora, sia la punta occidentale che quella orientale<sup>50</sup>. Dopo aver rifornito le cd. Terme di Levante e la fontana sulla strada A-B, esso raggiungeva la parte centrale della città e le pendici meridionali del colle di Tanit, sino al supposto *castellum aquae* a pianta rettangolare, del quale si riconosce solamente il basamento pavimentato in *opus caementicium*, ed una fontana sulla via D-E. Da qui la redistribuzione delle acque avveniva per mezzo di fontane e di condutture che servivano tutta l'area circostante. La presenza dell'acquedotto o di una sua ramificazione è testimoniata anche nel quartiere occidentale dell'abitato, dove si trovano una fontana, una *domus* dotata di un piccolo ninfeo lungo la via G-H, e due importanti complessi termali: le Piccole Terme e le Terme a Mare<sup>51</sup>.



*Figura 3.3: Collocazione delle strutture murarie relative all'acquedotto romano nel territorio di Nora (foto da Piu 2007, fig.1, 197).*

### 3.1.3. Lo stato di conservazione delle strutture

I resti relativi ai piloni si riscontrano nel territorio compreso tra Pula e Nora, alcuni ancora *in situ*, altri in stato di crollo e alcuni scomparsi (fig. 3.2). Nonostante lo stato di conservazione lacunoso, dalla poca documentazione a noi giunta, sia di carattere epigrafico che fotografico, raccolta a partire dalla seconda metà del XIX secolo, è comunque possibile ricavare alcune

<sup>49</sup> Paoletti 1997, 160.

<sup>50</sup> Bonetto et al. 2018, 115.

<sup>51</sup> Ghiotto 2004, 147-148.

informazioni sulle tecniche edilizie e sull'ipotetico tracciato. A. Della Marmora nel suo resoconto di viaggio “*Viaggio in Sardegna*” riporta graficamente i resti di un nuraghe (cd. Guardia Is Mongias) in prossimità della chiesa di S. Efsio, vicino al quale sono presenti dei lacerti murari identificati da lui come strutture dell'acquedotto romano<sup>52</sup>. Nella campagna di scavo maggio-giugno del 1901 condotta nell'istmo di Nora, G. Patroni notò nelle prossimità del muro ellittico allora interpretato come parte dell'anfiteatro ligneo un “muro assai poderoso”, probabilmente relativo all'acquedotto prima del suo ingresso in città<sup>53</sup>. Tra il 1906 e il 1912, l'archeologo inglese T. Ashby durante delle ricognizioni nella campagna circostante Nora fotografò una serie di pilastri conservati sia in alzato che in stato di crollo, disposti in apparente sequenza lineare, ancora una volta riconducibili all'infrastruttura cittadina<sup>54</sup>. Alcune delle strutture meglio conservate si trovano attualmente presso l'ingresso dell'hotel “Baia di Nora” e nel giardino di un'abitazione privata nei pressi di Pula (Villa Ada) (fig. 3.3). Qui, insieme ai pilastri ancora *in situ* si trovano anche due strutture a pianta quadrata, interpretate come *piscinae limariae*<sup>55</sup> o più probabilmente come cisterne<sup>56</sup>.



*Figura 3.2: Lacerti di opus caementicium relativi ai piloni dell'acquedotto, presso la chiesa di Sant'Efsio (foto autore).*

<sup>52</sup> Della Marmora 1840, 39, tav. 5 fig. 2.

<sup>53</sup> Patroni 1901, 370.

<sup>54</sup> Bonetto 2014, 301 n. 183.

<sup>55</sup> Adam 2008, 272.

<sup>56</sup> Piu 2016, 191.





Figura 4.3: Pilastro all'interno del giardino di Villa Ada (foto da Piu 2007, fig. 4, 194).

#### 3.1.4. Analisi tecnico-costruttiva delle strutture

Dalle strutture appena citate, dato il loro grado d'integrità, sono stati ottenuti importanti dati sulla tecnica edilizia. I piloni si presentano leggermente rastremati (2,13 x 2,13 m alla base, 1,75 x 1,75 m alla sommità) con un'altezza massima stimata di 3,15 m<sup>57</sup>. Al fine di mantenere un equilibrio statico e aumentare la superficie di carico, le fondazioni costituite da blocchetti in arenaria locale hanno una sezione quadrata maggiore di 15-20 cm per lato rispetto alla base dei pilastri<sup>58</sup>. Questi erano realizzati con un nucleo in *opus caementicium* e paramenti in laterizi, principalmente bessali<sup>59</sup> fratti lungo la diagonale alternati ca. ogni 1 m ad un filare di bipedali. Il modulo di cinque laterizi alternati ad altrettanti interstizi in malta di calce è mediamente di 0,27 m (fig. 3.3). A seguito del restauro tardoantico si riscontra un notevole

---

<sup>57</sup> Ghiotto 2004, 146.

<sup>58</sup> Paoletti 1997, 160.

<sup>59</sup> Adam 2008, 159.

cambiamento nella tecnica edilizia dei piloni, osservabile nei resti del giardino di Villa Ada, con l'impiego di un'opera cementizia meno raffinata e paramento esterno più irregolare, reso tramite l'impiego di scapoli di andesite<sup>60</sup>. Le arcate presentano un'armilla di sesquipedali, a volte sostituiti da due bessali, e tra di esse vi era un paramento in opera mista a fasce costituito da uno o più filari di bessali alternati ad una fila di blocchetti in arenaria di dimensioni irregolari. L'apice dell'estradosso era regolarizzato tramite un corso di bipedali sul quale poggiava lo *specus*, oggi scarsamente conservato<sup>61</sup>. Esso era posizionato su di una preparazione realizzata in malta di calce ed un filare di bipedali. Da quanto ricostruibile dalle tracce rimaste in negativo, la condotta aveva una sezione rettangolare, con il fondo di 0,60 m e spallette alte almeno 0,80 m. Purtroppo non si rinvennero tracce dell'originaria copertura. Il tratto di arcata meglio conservata è largo 1,40 m<sup>62</sup>. La maggior parte degli acquedotti e dei ponti romani presentavano campate brevi e piloni di grossa sezione in rapporto alla luce coperta. Questo è dovuto a due ragioni tecniche, ovvero ripartire meglio i carichi sui piedritti e diminuirne le sollecitazioni statico-meccaniche<sup>63</sup>. Perciò nell'acquedotto norense, la distanza tra i piloni è improbabile che superasse di molto i 2 m.

### 3.2 Le cisterne T60 e T61 nel saggio 4 della necropoli fenicio-punica occidentale

#### 3.2.1. L'area di scavo: il saggio 4

Dal 2013 l'ateneo di Padova sta indagando il settore settentrionale dell'istmo che collega la penisola di Nora alla terraferma. Qui sono emerse significative evidenze legate alla presenza di una necropoli di età fenicia, con continua frequentazione fino all'età punica (saggio 1 e 3) e successiva trasformazione in area di cava e produttiva nel corso della piena età romana. L'impianto necropolare si impostava sul banco arenitico naturale ed era esteso verosimilmente verso sud e ovest in direzione dell'antica linea di riva e del porto<sup>64</sup>. Gli obiettivi delle ricerche sono indirizzati verso una migliore conoscenza dell'effettiva estensione dell'area e della sua articolazione cronologica ed evolutiva, dal contesto sepolcrale antico fino alle fasi di riuso di età romana. Dal 2021, si è aperta una nuova area di scavo verso NE (saggio 4) posta a circa 7

---

<sup>60</sup> Paoletti 1997, 161.

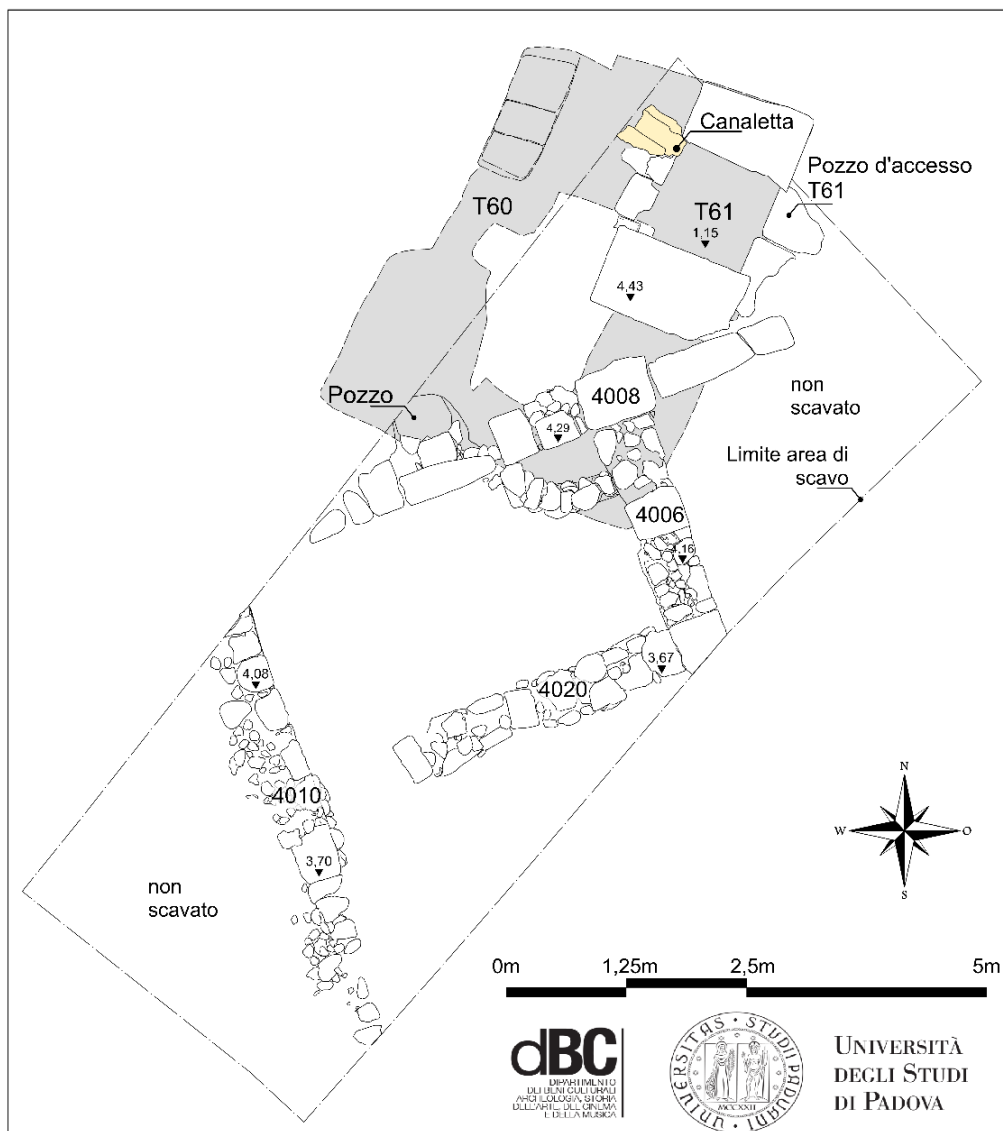
<sup>61</sup> Ghiotto 2004, 147.

<sup>62</sup> Paoletti 1997, 161.

<sup>63</sup> Giuliani 2006, 81.

<sup>64</sup> Bonetto et al. 2018, 111.

m del saggio 1, dove effettivamente le ultime due campagne di scavo hanno restituito evidenze di carattere funerario<sup>65</sup>. Nel limite nord del saggio di scavo è emerso un breve tratto di roccia in posto ad una quota di 4,3 m s.l.m. ca., quindi più alto di circa un metro rispetto alle quote a cui si trova presso il saggio 1, dimostrando come il banco di arenite, in origine, dovesse digradare lievemente da NE verso SO (ca. 13°).



*Tavola III.I: Pianta generale dell'area di scavo del saggio 4 allo stato di fatto al termine della campagna di scavo 2022 (elaborazione autore).*

<sup>65</sup> Bonetto et al. 2022 (a), 243.

### 3.2.2. Le evidenze funerarie fenicio-puniche

Finora, nel saggio 4, non si è rinvenuta ancora nessuna evidenza di sepolture arcaiche seppur non si possa escludere la possibilità che ne emergano durante le future indagini. Sono invece stati documentati importanti interventi di età punica e romana, testimoniati dalla realizzazione di due tombe a camera incise nel banco roccioso (T60 e T61), dal loro cambio di destinazione d'uso in cisterne e dalla costruzione di un edificio, la cui funzione non è ancora ben chiara<sup>66</sup>. L'inquadramento cronologico degli ipogei è dato sulla base della loro tecnica costruttiva, confrontabile con le tipologie puniche già attestate a Nora<sup>67</sup>. Entrambe le tombe sono parallele tra loro e orientate in senso NE-SW (T60: lung. ca. 4,46 m, largh. ca. 1,35 m; T61: lung. ca. 4,70 m, largh. ca. 1,2 m; areale complessivo ca. 12 m<sup>2</sup>). Della più settentrionale (T60) si conservano in situ le lastre di copertura originarie in arenaria che sigillavano l'anticamera. Diversamente accadde per la T61, che venne riaperta in un momento successivo al suo abbandono e fortemente rimaneggiata durante le attività di ristrutturazione. Il pozzo d'accesso all'anticamera della T61 (fig. 3.4) (ca. 1,08 m per lato, alt. alla base ca. 2,95 m) a E si presenta parzialmente scavato nella roccia in posto, e sui lati N, W e S costruito con conci lapidei di arenaria messi in opera a secco, di forma sub quadrangolare e di pezzatura variabile<sup>68</sup>.



*Figura 3.4: Pozzo di accesso all'anticamera della tomba T61 (foto di lavoro, campagna di scavo 2022).*

---

<sup>66</sup> Bonetto et al. 2022 (a), 258.

<sup>67</sup> Bonetto et al. 2022 (a), 260.

<sup>68</sup> Dati schede USS 4090, 4091, 4110.

### 3.2.3. Le evidenze di età romana e l'infrastruttura idraulica di conservazione dell'acqua

Quanto avviene dopo il periodo d'uso degli ipogei a scopo funerario non può essere datato con estrema precisione, perciò si tratteranno gli interventi relativi all'età romana in termini di posteriorità rispetto alla fase punica e di successione diacronica tra di essi. Una volta cessate di servire come sepolture, entrambe le tombe vennero interamente spoliate del loro contenuto e successivamente convertite in cisterne tramite l'applicazione di un rivestimento di malta idraulica. Le due anticamere vennero collegate da un "corridoio" con copertura ad arco, in modo tale da sfruttare a pieno la capienza di un unico grande serbatoio<sup>69</sup>. Verosimilmente, nello stesso periodo lo spazio circostante venne interessato da attività sistematiche di cavatura dell'arenaria, comprovate da alcuni tagli verticali che incidono il banco arenitico in diversi punti. In un momento successivo, ancora inquadrabile in età romana, l'area di cava venne colmata da un'esigua quantità di scarichi di terra (ca. 4 m) volti alla regolarizzazione del suolo e all'impianto di un edificio (tav. III.I), di cui si rinvennero due vani, dei quali uno messo in luce per tutti i suoi quattro lati, con dimensioni di 4 x 2 m ca. I due ambienti erano collegati tra loro da una sorta di passaggio posto sul lato occidentale dell'edificio, con andamento NW-SE. Si conservano in alzato quattro setti murari (USS 4006, 4008, 4010, 4020) che sfruttano i fronti di cava precedenti come fondazione. I muri più settentrionali legati tra di loro (USS 4006 e 4008) sono realizzati con tecnica a ritti (*opus africanum*). Questa tecnica, di origine fenicio-punica e diffusa dall'Africa settentrionale, risulta largamente impiegata a Nora quasi esclusivamente in ambito dell'edilizia domestica<sup>70</sup>. Si tratta di pilastri verticali, sia di arenaria che andesite, il cui spazio tra loro viene colmato da scapoli lapidei legati con malta di terra e di pezzatura inferiore, maggiormente in arenaria più che in andesite, e rari frammenti fittili. Le altre due strutture (USS 4010 e 4020), invece, sono costituite da filari di grossi ciottoli e blocchi quadrati di arenaria e andesite legati insieme da malta di terra. All'interno dei vani si trova una sequenza di pavimenti in battuto, di diversa fattura e relativi ad alternate fasi di vita, rimaneggiamento e abbandono dell'edificio<sup>71</sup>. Per ora, una preliminare analisi dei materiali ceramici rinvenuti nei livelli di crollo dell'edificio permetterebbe di datare queste attività all'età tardo imperiale<sup>72</sup>. Nel tratto centrale del muro più a N (4008) è presente una sorta di struttura trilitica interamente in arenaria, costituita da due lastre verticali che sorreggono un

---

<sup>69</sup> Dati dal diario di scavo 30/09/2022.

<sup>70</sup> Ghiotto 2004, 25-26.

<sup>71</sup> Bonetto et al. 2022 (a), 261.

<sup>72</sup> Bonetto et al. 2022 (a), 264.

architrave. Una terza lastra di arenaria viene impiegata come “tamponatura” di questo sistema. Oltre tale lastra, forse rimovibile, vi è un pozzo sub-circolare inciso nella roccia, che scende verticalmente allargandosi fino a intercettare entrambe le tombe. Nel corso della campagna 2022, nell’allargamento NE del saggio 4 è stata messa in luce una canaletta di adduzione presso l’imboccatura della cisterna T61 (fig. 3.4), interamente realizzata con laterizi. Il tetto, rinvenuto crollato sul suo riempimento d’obliterazione, era costituito da una tegola con le alette rivolte verso l’alto e aveva una larghezza originaria di 39 cm ca. Le pareti con buona probabilità erano costituite da frammenti di laterizi impilati e il fondo costituito da un laterizio messo di piatto. L’ingombro doveva essere di ca. 20 x 12 cm. La piccola struttura poggiava su una stesura di malta estesa verso sud, ed era rivestita di malta di calce sia internamente che esternamente<sup>73</sup>.

### 3.2.4. La fase di abbandono dell’edificio

In un momento non ben definito tra l’età tardo imperiale e quella tardoantica, l’edificio individuato presso il saggio 4 cessò di essere utilizzato e andò incontro ad un lento deterioramento. Lo scavo stratigrafico ha permesso di documentare molto bene queste fasi di abbandono e crollo del complesso. Gli alzati in crudo o *pisé*<sup>74</sup> si disgregarono, così come le coperture di cui però non se ne rinvennero evidenze. Sia i vani che l’interno delle cisterne vennero poi colmati da scarichi di immondezzaio, contenenti abbondante materiale ceramico, fittile e lapideo, ma anche alcuni elementi in metallo (principalmente chiodi), grumi di malta e tegole<sup>75</sup>.

---

<sup>73</sup> Dati scheda US 4076.

<sup>74</sup> Adam 2008, 62-63.

<sup>75</sup> Bonetto et al. 2022 (a), 264.

## CAPITOLO 4

### Il campionamento e metodi archeometrici

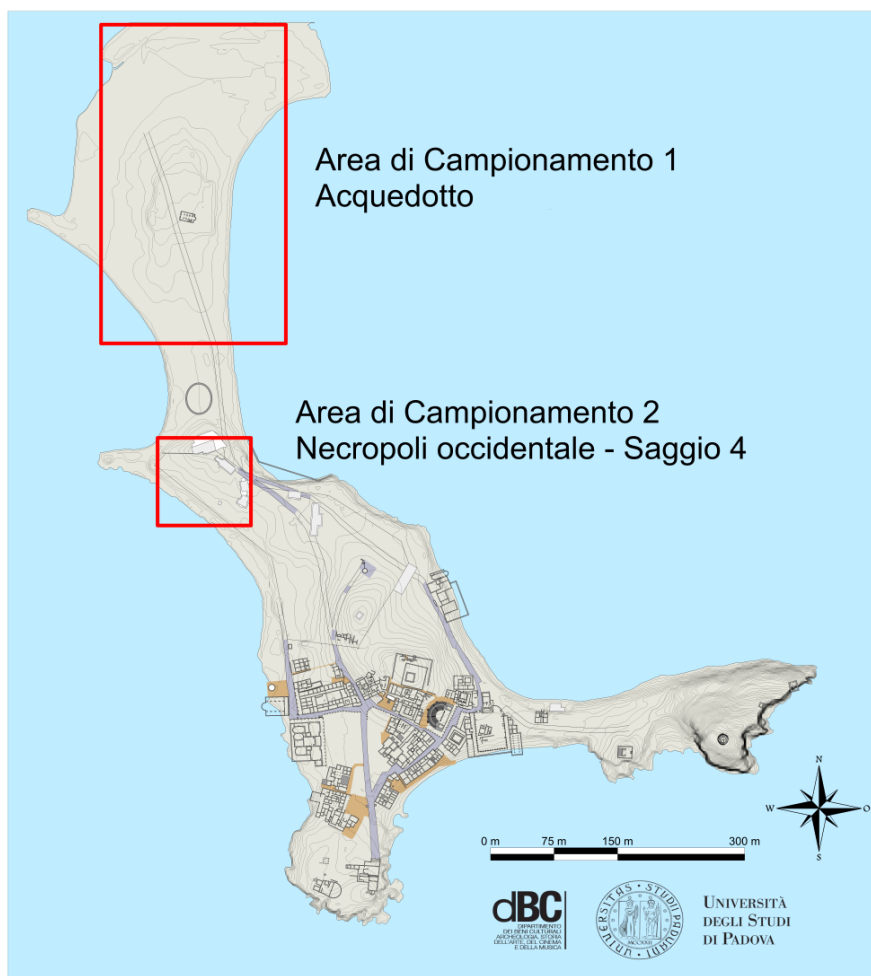
Da entrambi i contesti appena presentati sono stati prelevati campioni di materiale archeologico, i quali sono stati raccolti dalle strutture in situ per essere sottoposti ad analisi laboratoriali. L'obiettivo di queste indagini è finalizzato a definire la composizione di tali materiali e la loro provenienza, in particolar modo per quanto riguarda alcuni clasti di rocce vulcaniche incluse nelle miscele leganti e non compatibili con i litotipi geologici locali. Da diverse porzioni strutturali delle strutture oggetto di studio sono stati prelevati con martello e scalpello campioni di grandezza pluri-centimetrica rappresentativi della loro composizione e nel caso dei leganti, delle eventuali stratigrafie interne.

Nello specifico, dei campioni di miscela legante, principalmente costituiti da malta idraulica, la composizione petrografico-mineralogica e l'aspetto tessiturale sono stati caratterizzati mediante microscopia ottica in sezione sottile (OM). Per i clasti vulcanici, più precisamente costituiti prevalentemente da rocce piroclastiche (pomici e tufi), sono state effettuate analisi chimiche in fluorescenza a raggi X (XRF), volte a definirne il profilo geochimico utile a stabilirne la provenienza sulla base del confronto con dati da letteratura.

Di seguito si presentano i dati sul campionamento, e l'apparato analitico strumentale delle singole tecniche di analisi archeometrica adottate in questo studio.

#### 4.1 I campioni e le loro strutture

Dalle strutture oggetto di studio sono stati prelevati 14 campioni da due aree distinte (tav. IV.I), 7 dall'acquedotto e 7 dalle cisterne della necropoli occidentale (tab. 4.1).



*Tavola IV.I: Pianta generale della penisola di Nora e le principali aree di campionamento (elaborazione autore).*

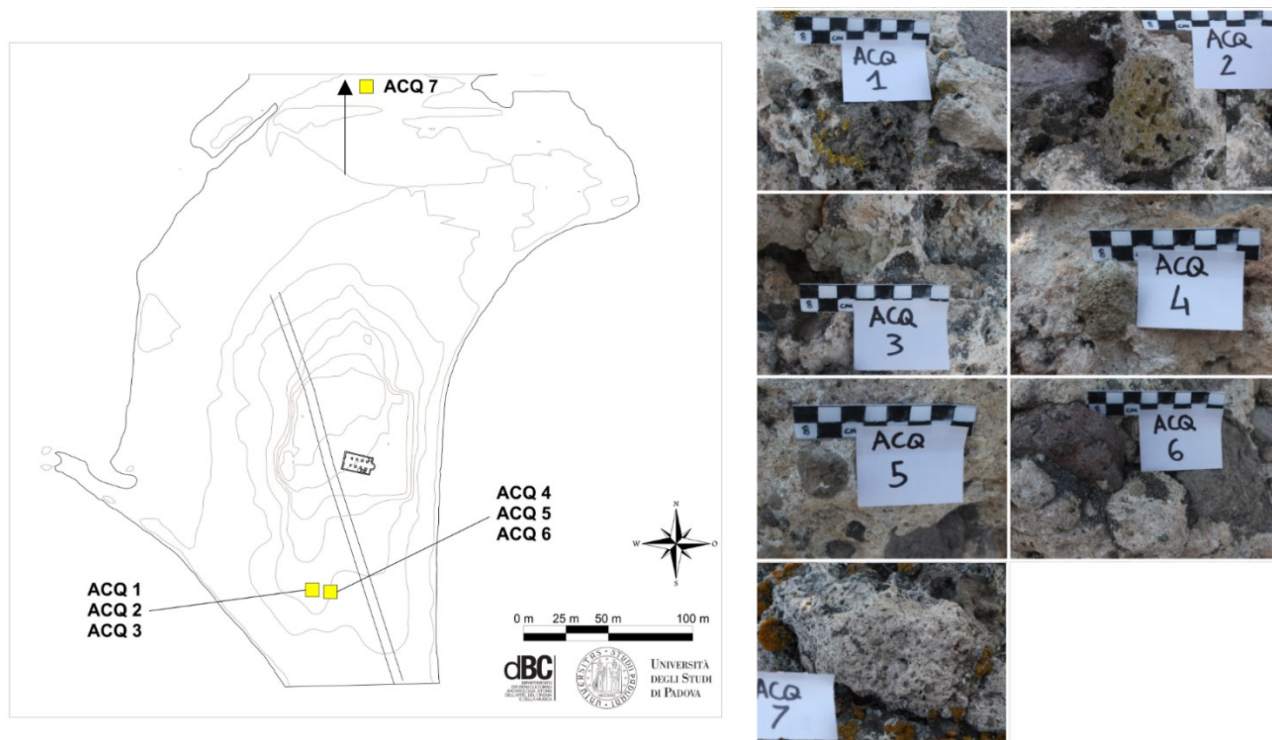
#### 4.1.1. I campioni dell'acquedotto

Per quanto riguarda il campionamento dell'acquedotto, sono stati prelevati sette campioni provenienti da alcuni lacerti del nucleo in opera cementizia interno ai piloni ubicati davanti alla chiesa di Sant'Ef시오, ad eccezione del campione ACQ7 proveniente da un pilone presso la cd. casa Su Faru (ca. 200m a N della chiesa di Sant'Ef시오) (tav. IV.II). Quattro di questi sono frammenti di clasti piroclastici, nello specifico pomici, con colorazioni che variano dal marrone al nero al giallo e aventi un grado di porosità variabile (ACQ1, ACQ2, ACQ4, ACQ5). Il campione ACQ3 è invece un frammento di tufo, che presenta una colorazione macroscopica nei toni del verde chiaro. Queste tipologie di roccia non sono riconducibili al panorama litologico locale, costituito principalmente da rocce magmatiche intrusive compatte a



chimismo andesitico-dacitico<sup>76</sup>. Le pomice e i tufi sono invece caratteristici dei distretti vulcanici a carattere eruttivo esplosivo<sup>77</sup>.

Gli ultimi due campioni provenienti dai lacerti dell'acquedotto sono di malta pozzolanica (ACQ6, ACQ7), così definita poiché all'interno dell'impasto di ciascun campione sono stati riconosciuti, già per via macroscopica, numerosi inclusi millimetrici di pomice.



*Tavola IV.II: Campioni prelevati dalle strutture dell'acquedotto e relative posizioni in pianta. (elaborazione autore).*

#### 4.1.2. I campioni delle cisterne T60 e T61

Dal complesso di cisterne della necropoli occidentale sono stati prelevati sette campioni di materiale legante relativi a quattro elementi strutturali differenti (tav. IV.III). Dalla cisterna T61 sono stati campionati il rivestimento parietale (MM\_4062\_R1), il pavimento in cocciopesto (MM\_4062\_P1), e lo zoccolo di raccordo alla base della cisterna (MM\_4062\_Z1). Dalla cisterna T60 sono stati prelevati due campioni, uno del rivestimento parietale interno all'anticamera (MM\_4061\_R1) e uno relativo all'arco di copertura del corridoio che collega le due cisterne (MM\_4061\_R2). Infine, sono stati presi un campione di

<sup>76</sup> Di Gregorio et al. 2000, 17 tav. 1; Peccerillo 2005, 259.

<sup>77</sup> Peccerillo 2005, 141-142.

rivestimento dal pozzo sub circolare (MM\_4050\_R1) e un campione di malta d'allettamento della canaletta che si immette nella cisterna T61 (MM\_4076\_M1).

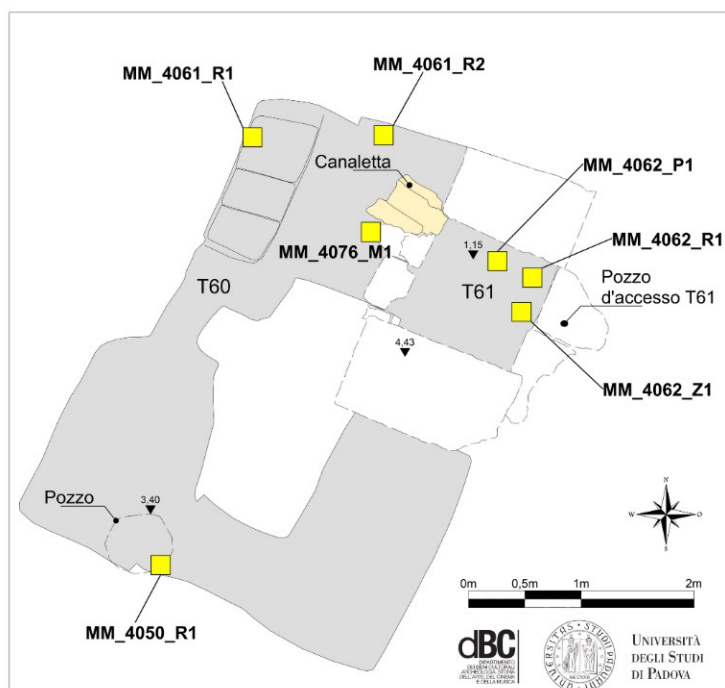


Tavola IV.III: Campioni prelevati dalle strutture del Saggio 4 e relative posizioni in pianta (elaborazione autore).

Campione	Tipo	Descrizione	Struttura	Posizione
ACQ1	Pietra	Pomice nera	Acquedotto	nucleo opus caementicium
ACQ2	Pietra	Pomice marrone	Acquedotto	nucleo opus caementicium
ACQ3	Pietra	Tufo verde chiaro	Acquedotto	nucleo opus caementicium
ACQ4	Pietra	Pomice gialla	Acquedotto	nucleo opus caementicium
ACQ5	Pietra	Pomice marrone chiaro compatta	Acquedotto	nucleo opus caementicium
ACQ6	Malta	Malta pozzolanica	Acquedotto	nucleo opus caementicium
ACQ7	Malta	Malta pozzolanica	Acquedotto (tratto nord)	nucleo opus caementicium
MM_4062_P1	Malta	Cocciopesto	Cisterna (T61)	Pavimento
MM_4062_Z1	Malta	Malta pozzolanica	Cisterna (T61)	“Zoccolo”
MM_4062_R1	Malta	Malta pozzolanica	Cisterna (T61)	Rivestimento parietale
MM_4061_R1	Malta	Malta pozzolanica	Cisterna (T60)	Rivestimento
MM_4061_R2	Malta	Malta pozzolanica	Cisterna (T60)	Rivestimento
MM_4050_R1	Malta	Malta pozzolanica	Pozzo	Rivestimento
MM_4076_M1	Malta	Malta di calce	Canaletta	Malta di allettamento

Tabella 4.2: Elenco dei materiali campionati, con le relative descrizioni, porzioni strutturali di provenienza e posizioni.

## 4.2. Analisi in microscopia ottica (OM)

L'analisi delle sezioni sottili in microscopia ottica a luce polarizzata (OM = Optical Microscopy) permette di determinare le caratteristiche petrografico-mineralogiche e tessiturali delle miscele leganti. I campioni di legante sono stati sottoposti a taglio petrografico con troncatrice per ottenere una sezione trasversale, sufficientemente rappresentativa dei diversi strati di rivestimento. Attraverso l'utilizzo 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. Una volta portati a questo spessore infatti i minerali osservati al microscopio a luce trasmessa presentano colorazioni caratteristiche e diagnostiche, che ne permettono la caratterizzazione ed il riconoscimento.

L'apparato strumentale utilizzato per l'analisi delle sezioni sottili è costituito dal microscopio Leica DM750 P, attrezzato con fotocamera digitale integrata FLEXACAM C1. Lo studio petrografico è stato eseguito in luce polarizzata trasmessa operando sia a nicol paralleli sia a nicol incrociati (con l'analizzatore inserito).

La descrizione petrografica dei composti è stata effettuata in accordo con le direttive della norma UNI 11176: 2006 "Beni culturali: descrizione petrografica di una malta", che riguarda:

- Descrizione macroscopica, che consiste nell'osservazione delle caratteristiche strutturali e morfologiche visibili ad occhio nudo, ossia:
  - definizione della stratigrafia (numero, spessore dei singoli strati);
  - descrizione del colore;
  - valutazione della coesione complessiva del composto (determinata empiricamente).
- Descrizione microscopica che ha riguardato:
  - descrizione del legante di ciascuno strato, ossia 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.)<sup>78</sup>.

#### 4.3. Analisi in fluorescenza a raggi X (XRF)

L'analisi della fluorescenza a raggi X è finalizzata alla caratterizzazione della composizione chimica degli elementi maggiori e in traccia dei campioni di rocce vulcaniche. L'analisi è stata eseguita con un 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 pomici e di tufo previamente puliti al fine di rimuovere contaminazioni ambientali e post-deposizionali, sono stati successivamente macinati alla dimensione granulometrica di 180 µm in un mortaio d'agata, fino ad ottenere circa 2-3 grammi di polvere. Per determinare il valore di perdita al fuoco (L.O.I - Loss On Ignition) i campioni sono stati sottoposti a cottura in un forno elettrico a muffola alla temperatura di 860°C per circa 20 minuti, e poi a 980°C per circa 2 ore. I campioni per l'analisi sono stati trasformati in perle utilizzando tetraborato di litio (Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>) 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, and P (espressi come percentuale dei relativi ossidi), mentre gli elementi in traccia (espressi in ppm) sono S, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, La, Ce, Nd, Pb, Th, e U. Il valore di perdita al fuoco (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.

---

<sup>78</sup> Pecchioni, Fratini, Cantisani 2014.

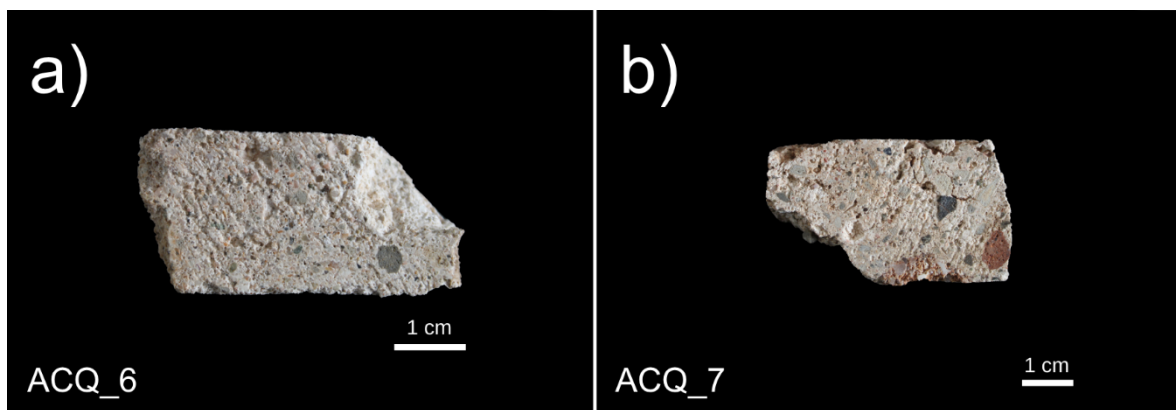
## CAPITOLO 5

### Risultati delle analisi archeometriche

#### 5.1 Caratterizzazione petrografico-mineralogica delle miscele leganti

L'analisi al microscopio ottico ha permesso di caratterizzare per via petrografico-mineralogica e tessiturale i campioni in analisi e di ascriverli a due macro categorie, definite rispettivamente Gruppo A e Gruppo B. Questa prima suddivisione è dovuta principalmente alle differenti porzioni strutturali nelle quali le miscele leganti sono impiegate.

Il Gruppo A comprende i campioni di miscela legante prelevati dall'acquedotto (ACQ6, ACQ7) (fig. 5.1), e si tratta dunque di materiale relativo al nucleo in opera cementizia dei pilastri.



*Figura 5.5: Sezione dei campioni ACQ6 e ACQ7.*

All'interno del Gruppo B, invece sono state raggruppate le malte di rivestimento idraulico delle strutture del saggio 4: le cisterne T60 e T61 e il pozzo di captazione per l'acqua (MM\_4061\_R1, MM\_4061\_R2, MM\_4062\_R1, MM\_4062\_Z1, MM\_4050\_R1) (fig. 5.2). Inoltre, all'interno di questo gruppo è stata effettuata un'ulteriore divisione in base alle caratteristiche morfologiche, composizionali e tessiturali dei rivestimenti, descritti nel dettaglio in seguito.

Infine, la coppia di campioni MM\_4062\_P1 e MM\_4076\_M1 (fig. 5.3) sarà presa in considerazione al di fuori dei due raggruppamenti principali, costituendo sostanzialmente degli *outliers* indipendenti. Essi sono riferibili a strutture differenti e hanno una composizione non confrontabile con quella degli altri campioni. Il primo proviene dal rivestimento pavimentale della cisterna T61 e il secondo dalla malta di allettamento della canaletta che vi si immette.

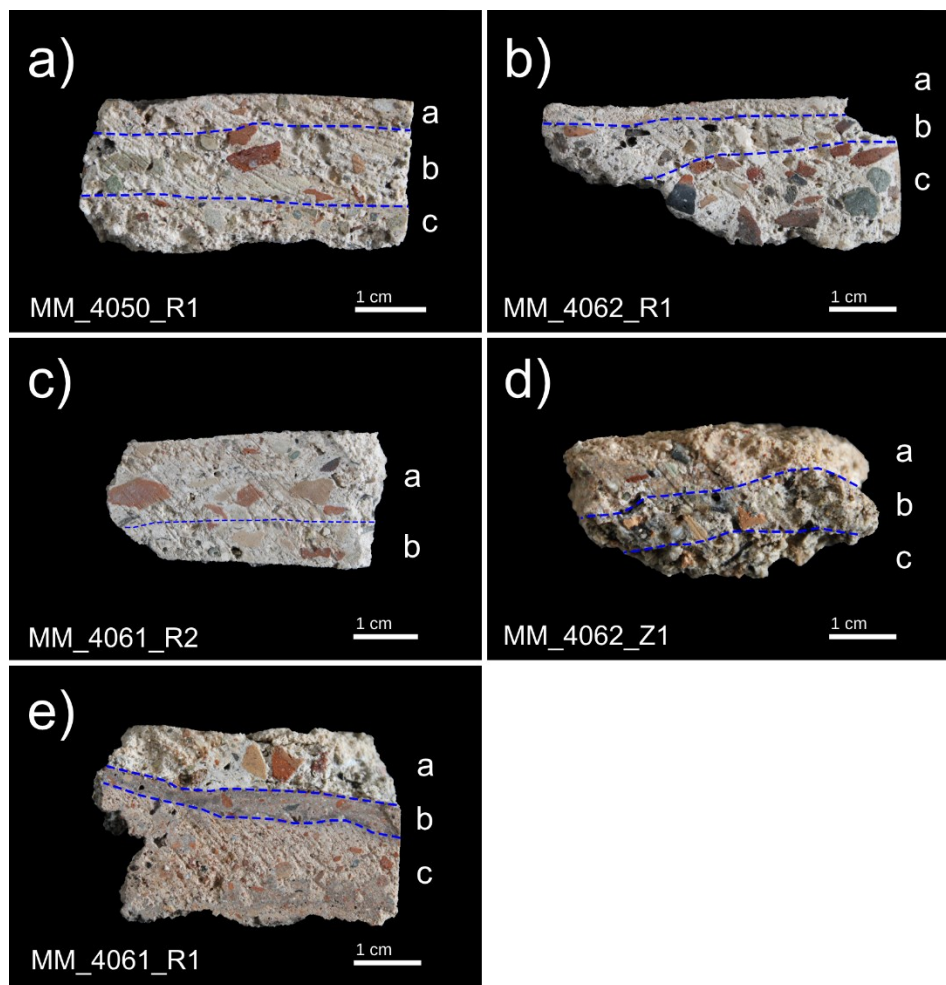


Figura 5.6: Sezione dei campioni del gruppo B. I primi quattro campioni appartengono al sottogruppo B1 (a, b, c, d); il campione MM\_4061\_R1 appartiene al sottogruppo B2 (e).

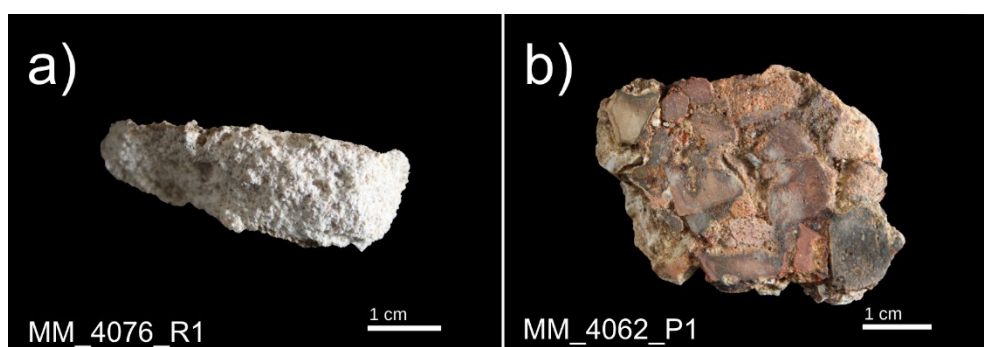


Figura 5.7: Sezione dei campioni MM\_4076\_M1 e MM\_4062\_P1.

### Gruppo A

Macroscopicamente i campioni del gruppo A presentano colore grigio chiaro, ed hanno un aspetto arenaceo-conglomeratico. Al microscopio ottico, entrambi i campioni hanno un legante calcico, con aspetto tessiturale micritico e una struttura omogenea. L'impasto è tendenzialmente 'grasso', ossia



presenta proporzioni tra legante e aggregato superiori a 1:2 (circa 1:1,5)<sup>79</sup>. La porosità è rilevante (intorno al 15%), e maggiormente elevata nel campione ACQ7, dove, oltre a pori vescicolari (*vughs*, *vesicles*), si osservano numerose fratture o cavità planari (fig. 5.4, c-d). Sono presenti numerosi grumi di calce di dimensioni millimetriche, e saltuari relitti di calcareniti fossilifere parzialmente calcinati (fig. 5.5).

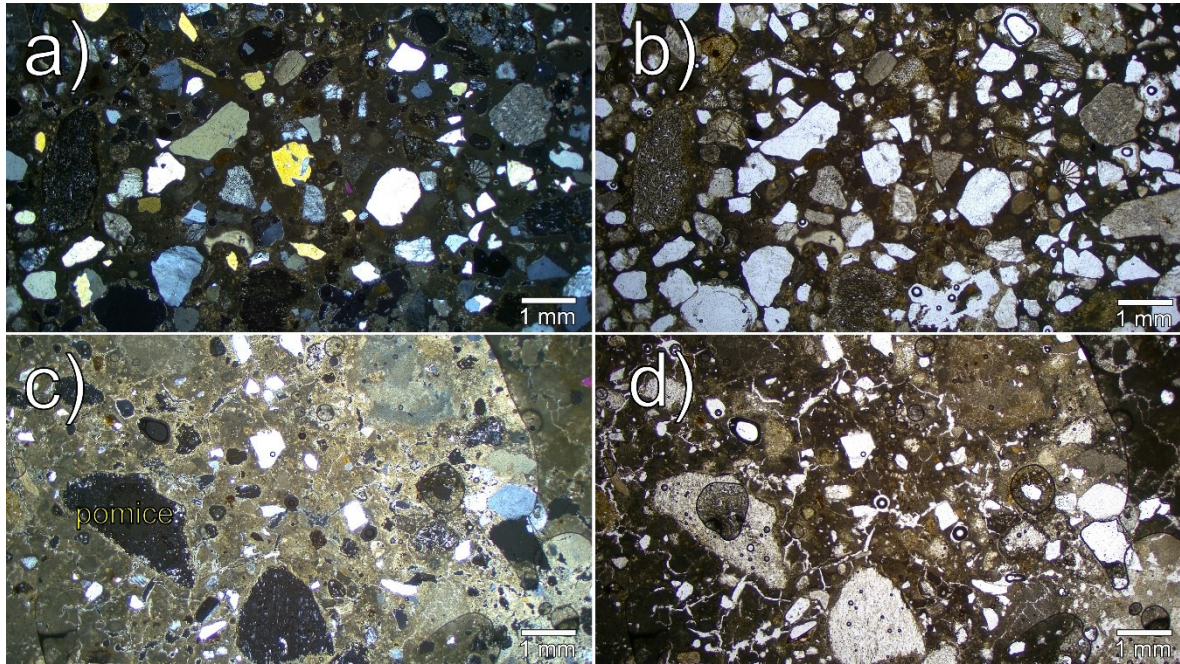


Figura 5.8: Micrografie di dettaglio in microscopia ottica a luce polarizzata, in luce trasmessa (LT) a nicol incrociati (XN) e nicol paralleli (PN); (a-b) area rappresentativa del campione ACQ6 (LT-XN, LT-PN), (c-d) area rappresentativa del campione ACQ7 (LT-XN, LT-PN).



Figura 5.9: Micrografia di dettaglio in microscopia ottica a luce polarizzata, in luce trasmessa (LT) a nicol paralleli (PN) di un relitto di calcinazione. Si nota la tessitura delle alghe rosse fossili presenti all'interno della calcarenite fossilifera.

<sup>79</sup> V. nota 30 al capitolo 2.2.2.



L'aggregato, di carattere bimodale, è caratterizzato da una rilevante concentrazione di sabbia medio-grossolana (75-50%) di granulometria millimetrica e sfericità da angolosa a subangolosa. Dal punto di vista petrografico-mineralogico, la sabbia è principalmente costituita da quarzo e quarziti, in quantità contenuta si osservano altri minerali silicatici quali feldspati e miche (biotite), scarsi frammenti di clasti vulcanici (lave andesitiche), granitoidi e bioclasti (gusci di conchiglia, echinodermi) (fig. 5.6, b-c-d-e-f).

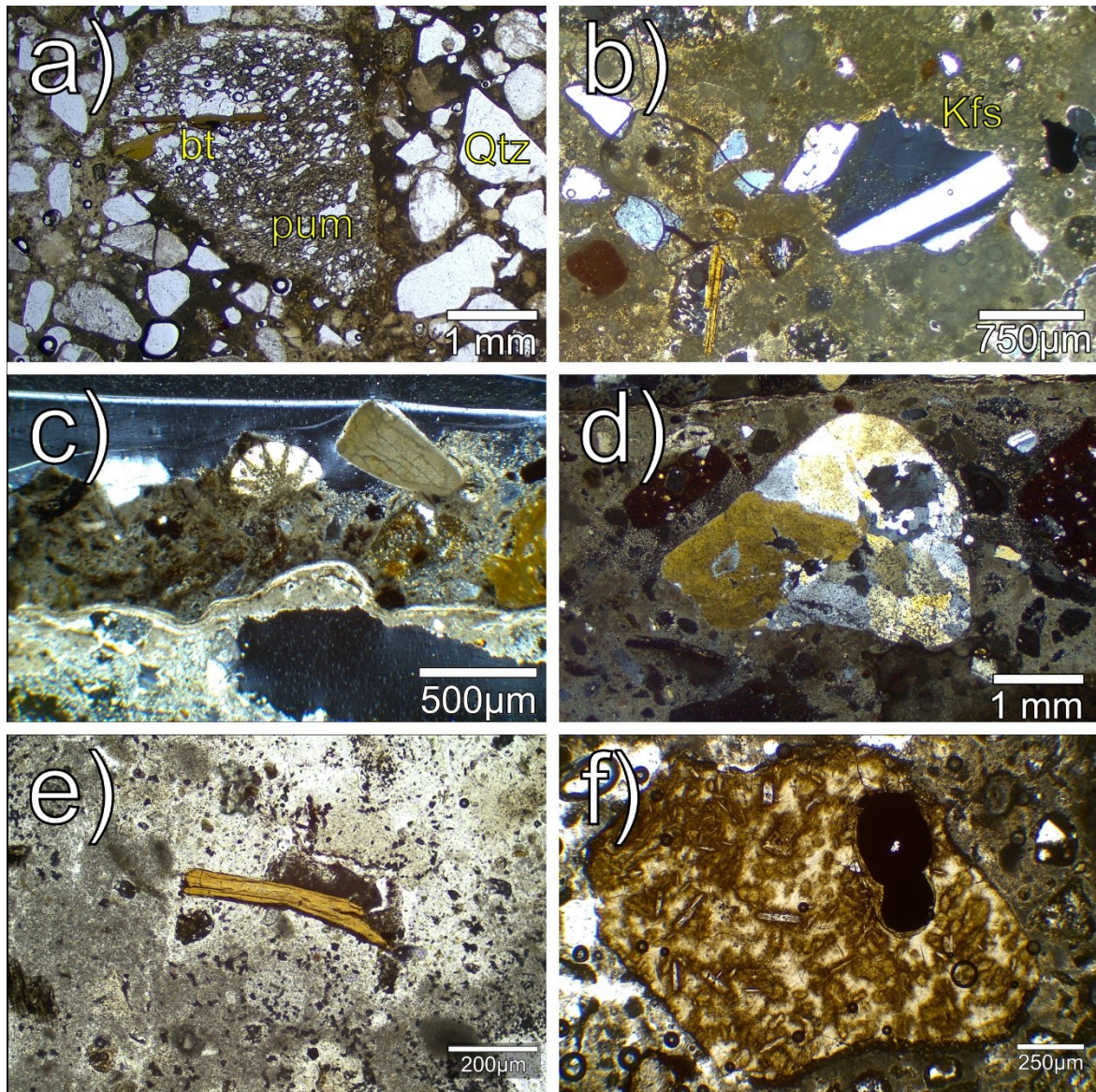


Figura 5.10: Micrografie di dettaglio delle principali tipologie di aggregato. Immagini in microscopia ottica a luce polarizzata, in luce trasmessa (LT) a nicol incrociati (XN) e nicol paralleli (PN). a) Clasto di pomice, con all'interno un cristallo di biotite e intorno numerosi cristalli di quarzo (LT-PN). b) K-feldspato (sanidino) (LT-XN). c) Frammento di echinoderma (LT-XN). d) Clasto di granitoide (LT-XN). e) Cristallo di biotite (LT-PN). f) Clasto di lava andesitica (LT-PN).

L'altra componente rilevante di aggregato è definita dalla presenza di clasti grossolani di pozzolana vulcanica, principalmente pomice (25-50%) e scarsi frammenti di tufo (< 10%). La presenza di questo tipo di aggregati permette di definire la miscela come LM-PUM<sup>80</sup>. I frammenti piroclastici si presentano mal classati, con una granulometria tendenzialmente grossolana (~ 2,5 mm). I clasti di pomice sono caratterizzati da una tessitura afirica, con sporadici fenocristalli di biotite (fig. 5.6, a). La consistente granulometria di questi aggregati, benché pozzolanici, riduce la reazione pozzolanica all'interfaccia con il legante. Pertanto, si sospetta che la capacità idraulica della miscela sia limitata.

### **Gruppo B**

Per quanto riguarda i campioni del gruppo B, la situazione risulta più complessa. Già alla scala macroscopica, si evidenzia un sostanziale elemento discriminante nella composizione di queste miscele, che porta a suddividere questo gruppo in due sottocategorie, definite rispettivamente B1 e B2, sulla base del numero e composizione degli strati costituenti i rivestimenti. Infatti, le malte di rivestimento di entrambe le cisterne e del pozzo (campioni MM\_4061\_R2, MM\_4062\_R1, MM\_4062\_Z1, MM\_4050\_R1) si presentano pluristratificate con almeno 3 strati, e con presenza di aggregati di tipo pozzolanico (sottogruppo B1). Solo il campione MM\_4061\_R1, proveniente dalla cisterna T60, differisce dagli altri per composizione e tipologia di strati, ed è pertanto stato ascritto al sottogruppo B2.

#### *Sottogruppo B1*

Ad osservazione macroscopica, i campioni del sottogruppo B1 presentano colore grigio chiaro, con un aspetto generalmente conglomeratico (fig. 5.2, a-b-c-d). L'ordine e la composizione delle stesure dei vari campioni è perfettamente la stessa in tutti i campioni, con differenze limitate allo spessore degli strati ed alla granulometria degli aggregati. Le stesure sono state distinte in ordine alfabetico *a*, *b*, *c*, dove *a* indica lo strato superiore, *b* quello mediano e infine *c* lo strato inferiore. Lo spessore di ogni stesura è variabile, ma mediamente aumenta dallo strato più esterno *a* (dove è di ca. 6 mm), verso i più profondi strati *b* e *c* (dove si attesta tra gli 8 mm e i 10 mm rispettivamente). L'unica eccezione è data dal campione MM\_4061\_R2, il quale presenta uno stesura superficiale di ca. 1 mm<sup>81</sup>. Il legante è di calce aerea con tessitura tendenzialmente micritica negli strati *a*, diventando sparitica

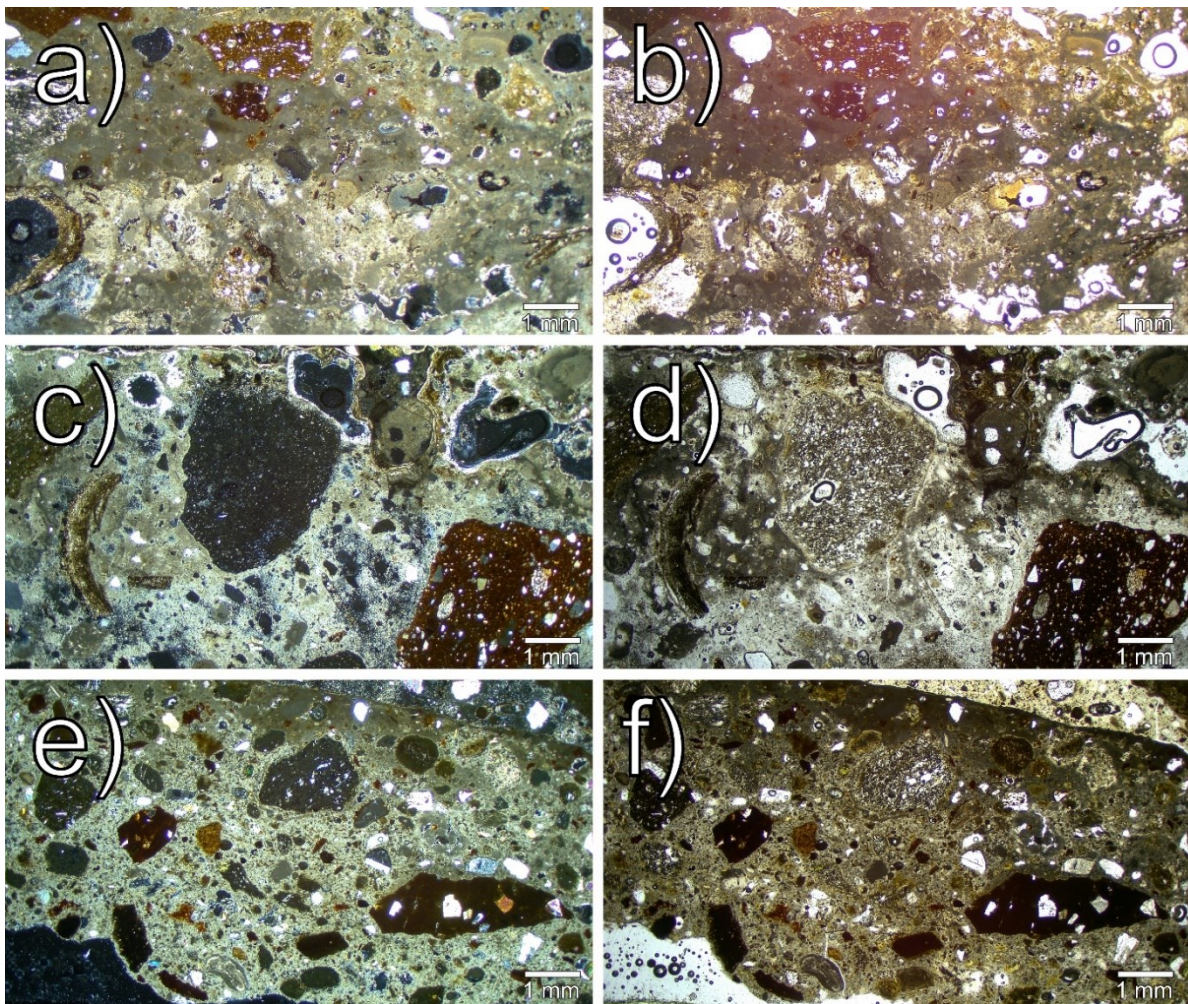
---

<sup>80</sup> V. capitolo 2.3.

<sup>81</sup> Lo strato più superficiale del campione MM\_4061\_R2 si presenta come un sottile skin superficiale mal conservato, forse riferibile ad un piccolo restauro puntuale il quale non si può descrivere in maniera approfondita. Il campione in oggetto è mancante dello strato più profondo *c*, forse a causa di fattori di campionamento o per una questione intenzionale legata al suo impiego nella volta dell'arco.



nelle stesure inferiori. La struttura appare invece disomogenea. L'impasto ha un rapporto legante:aggregato di ca. 1:1,5 in ogni strato. A questo dato si associa una rilevante porosità, attorno al 20%. Sono presenti frequenti grumi di calce di dimensioni millimetriche e rari relitti di calcinazione (fig. 5.7, a-b). La componente di aggregato in queste malte è particolarmente eterogenea, poiché si riscontra la compresenza, in proporzioni pressoché eguali, tra sabbia, frammenti fittili e pozzolana vulcanica. Inoltre, tra gli additivi si osservano frustoli carboniosi e cenere. L'aggregato è bimodale e tendenzialmente poco classato. Esso è rappresentato da sabbie locali, clasti vulcanici e frammenti fittili, tendenzialmente sub-angolosi, indice di macinazione meccanica, aventi dimensioni che variano da millimetriche (2,5 mm) a micrometriche (ca. 10-20  $\mu\text{m}$ ). Le sabbie impiegate, non molto dissimili da quelle osservate nelle miscele dell'acquedotto, sono costituite da quarzo e quarziti, feldspati e miche (biotite), granitoidi e rari bioclasti (gusci di conchiglia, echinodermi) (fig. 5.6).



*Figura 5.11: Micrografie di dettaglio in microscopia ottica a luce polarizzata, in luce trasmessa (LT) a nicol incrociati (XN) e nicol paralleli (PN) degli strati del gruppo B1. a-b) Area rappresentativa degli strati a (LT-XN, LT-PN). c-d) Area rappresentativa degli strati b (LT-XN, LT-PN). e-f) Area rappresentativa degli strati c (LT-XN, LT-PN).*

In questi composti tuttavia, i frammenti di lave andesitiche risultano del tutto assenti. La porzione pozzolanica è definita da clasti vulcanici, prevalentemente pomici, e frammenti fittili. Le pomici si presentano mediamente grossolane (500  $\mu\text{m}$  – 1 mm), scarsamente classate e con distribuzione disomogenea (fig 5.7, c-d). I clasti sono caratterizzati da una tessitura afirica, con saltuari fenocristalli di biotite e k-feldspato. I frammenti ceramici frantumati all'interno dell'impasto sono generalmente poco classati, ma si osserva come negli strati superficiali (*a*) le loro dimensioni siano particolarmente ridotte, mentre negli strati inferiori la loro granulometria diventi sempre più grossolana (~ 5 mm). Oltre alla frazione d'aggregato, additivi con funzione pozzolanica sono anche le tracce di materiale organico carbonizzato (cenere e carboni) presenti nei composti in concentrazioni leggermente subordinate rispetto agli altri elementi pozzolanici (fig.5.7, e-f). Si rilevano infine fibre vegetali (ca. 10%), quest'ultime identificabili dalla traccia in negativo lasciata dalla loro decomposizione.

Sulla base di queste considerazioni, le stesure del sottogruppo B1 si avvicinano alla tipologia PUM-CP<sup>82</sup>, ma costituiscono una variante di quest'ultima, qui definita PUM-CP-ASH in quanto la componente di cenere organica è rilevante al punto da costituire una terza frazione pozzolanica, impiegata in proporzioni quasi eguali con frammenti fittili e piroclastiti vulcaniche.

### *Sottogruppo B2*

Il sottogruppo B2 è definito dal solo campione MM\_4061\_R1, miscela legante di rivestimento idraulico della cisterna T60. Il rivestimento è caratterizzato da tre stesure di malta con differente composizione e spessore. Lo strato superiore (*a*) di 7 mm presenta caratteristiche composizionali del tutto confrontabili con la tipologia qui sopra descritta per il gruppo B1 (PUM-CP-ASH), con minime variazioni per quanto concerne la porosità e la quantità degli aggregati (fig. 5.8, a-b). L'interfaccia tra questo strato superficiale e il successivo (*b*) presenta un profilo liscio e tendenzialmente rettilineo con uno *skin* di carbonatazione superficiale (fig. 5.8, c-d), dovuto alla prolungata esposizione all'aria. Potrebbe pertanto identificare non uno strato preparatorio ma una superficie esteriore di finito, pertinente ad una serie di rivestimenti di una fase precedente<sup>83</sup>.

Gli strati sottostanti (*b* spesso 2,5 mm, *c* spesso 18 mm) sono costituiti da malta di cocciopesto con abbondanti additivi organici che conferiscono all'impasto, principalmente di colore rosato, sfumature grigio-scure ben visibili già ad occhio nudo (fig. 5.2, e). L'aspetto macroscopico è conglomeratico. Il legante è di calce aerea, nel livello *b* si presenta con un aspetto tessiturale micritico e strutturalmente omogeneo con quasi totale assenza di grumi di calce, imputabili quindi ad una buona calcinazione

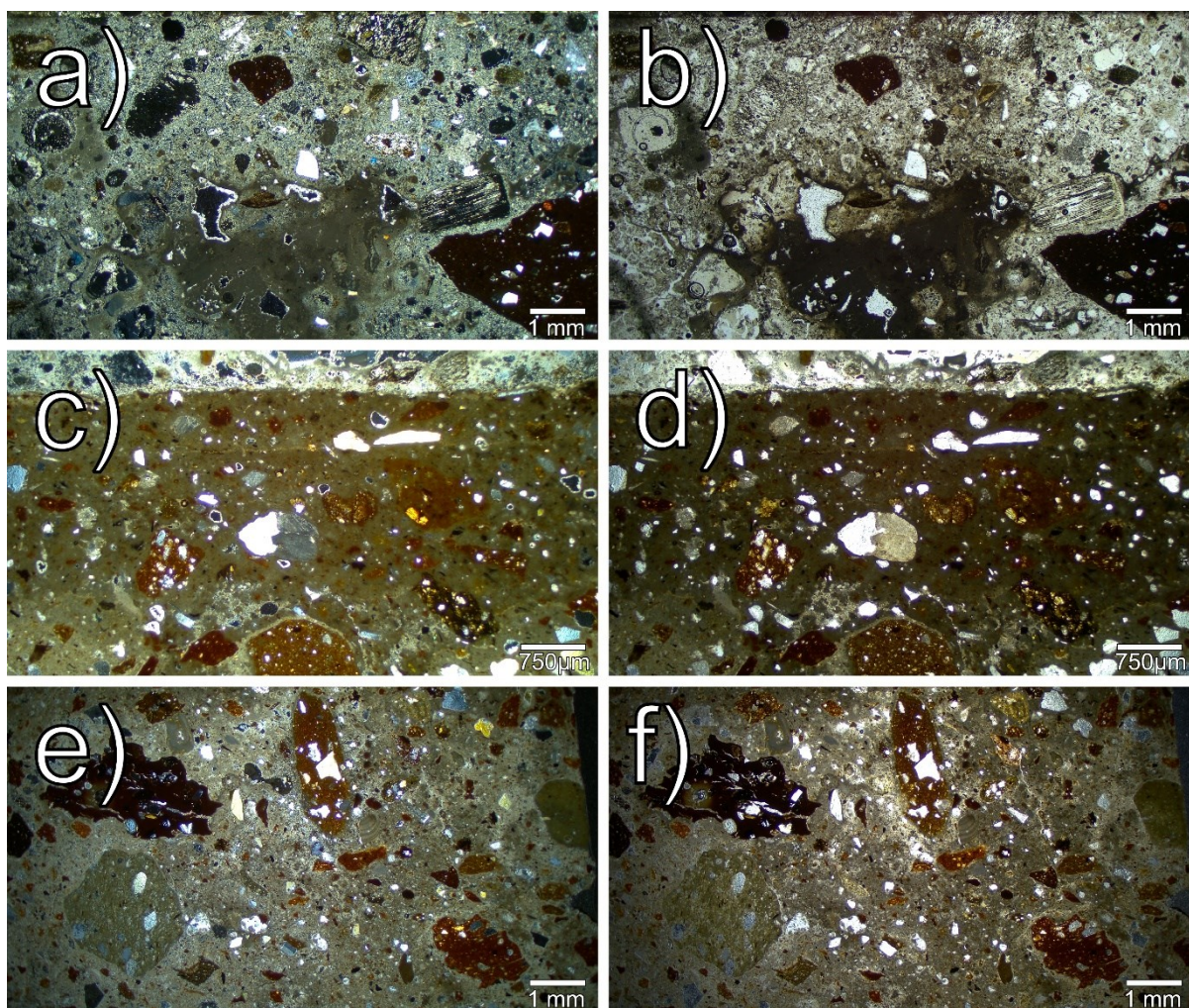
---

<sup>82</sup> V. capitolo 2.3.

<sup>83</sup> Bonetto, Dilaria 2021, 500-501.



della materia prima e ad una adeguata miscelazione del composto. La tessitura del legante nel livello *c* è invece sparitica, con una struttura tendenzialmente disomogenea e una discreta quantità i grumi di calce (ca. 15%) e saltuari relitti di calcinazione.



*Figura 5.12: Micrografie di dettaglio in microscopia ottica a luce polarizzata, in luce trasmessa (LT) a nicol incrociati (XN) e nicol paralleli (PN); a-b) area rappresentativa dello strato a del gruppo B2 (LT-XN, LT-PN), c-d) area rappresentativa dello strato b del gruppo B2 (LT-XN, LT-PN), e-f) area rappresentativa dello strato c del gruppo B2 (LT-XN, LT-PN).*

In entrambi gli strati si riscontra una ridotta porosità (1-2%), determinando una buona coesione dell'impasto. Il rapporto legante:aggregato è tipico delle malte grasse (1:1,5), quindi maggiore rispetto al rapporto ideale 1:2. La frazione di aggregato è bimodale, tendenzialmente poco classata e costituita principalmente da sabbia (50-75%) e frammenti fittili (50-75%). Dal punto di vista petrografico-mineralogico si riscontra un'abbondante quantità di quarzo e quarziti (> 50%), e in maniera ridotta feldspati, biotite e clasti di lave andesitiche (< 1%). Sia le sabbie che la componente

fittile sub-angolosa presentano differenti classi granulometriche, con inclusi che variano da poche decine di micron fino alcuni millimetri (fig. 5.8, e-f). Per quanto riguarda la componente additiva, si riscontra un'abbondante quantità di cenere organica molto fine e ben miscelata nell'impasto (25-50%).

A seguito di tali osservazioni, la malta dello strato superiore *a* si può ascrivere alla tipologia PUM-CP-ASH, mentre quelle sottostanti, carenti di pozzolana vulcanica, alla categoria ASH-CP<sup>84</sup>.

### ***Outliers***

Il campione MM\_4062\_P1, riferibile al rivestimento pavimentale della cisterna T61, è costituito da cocciopesto grossolano<sup>85</sup>, di colore bruno-rossastro (fig. 5.3, b). Il legante di calce è in quantità minoritaria rispetto all'aggregato, con proporzioni L:A di 1:3. Si presenta con una tessitura sparitica, e una struttura complessivamente omogenea, sono presenti rari grumi di calce, e così come rari sono i relitti di calcareniti (1-2%). Si osserva una ridotta presenza di pori e cavità nell'impasto (1-2%), così come di fratture planari dovute a fenomeni di ritiro. I frammenti ceramici centimetrici costituiscono l'aggregato principale (ca. 80%) (fig. 5.9, a-b), a cui si aggiunge una componente secondaria di sabbia (ca. 15%). La sabbia è caratterizzata da una granulometria medio-grossolana (tra 200 µm e 1 mm), e con inclusi di quarzo con una sfericità subarrotondata, e da sporadici cristalli di feldspati, miche e gusci di conchiglia.

Sulla base di questa composizione, il campione risulta pienamente compatibile con la tipologia CPG, tipico dei rivestimenti pavimentali delle cisterne norensi<sup>86</sup>.

Il campione MM\_4076\_M1, infine, proviene dalla malta di allettamento della canaletta. Si tratta di una malta di calce (LM)<sup>87</sup>, con aspetto macroscopico conglomeratico e una colorazione grigio chiara (fig. 5.3, a). Il legante presenta una tessitura micro-sparitica e una struttura disomogenea. All'interno dell'impasto sono presenti numerosi grumi di calce plurimillimetrici, e limitati relitti di calcinazione derivati dalla cottura di calcareniti fossilifere. Si osservano molteplici pori e cavità, anche di dimensioni pluri-millimetriche (fig. 5.9, c-d), e saltuarie fratture planari. L'aggregato è costituito esclusivamente da sabbia medio-grossolana moderatamente classata, caratterizzata da un elevato quantitativo di quarzo, e secondariamente da altri componenti quali feldspati e miche (biotite), clasti vulcanici (lave andesitiche), granitoidi e bioclasti (gusci di conchiglia, echinodermi). Gli aggregati

---

<sup>84</sup> V. capitolo 2.3.

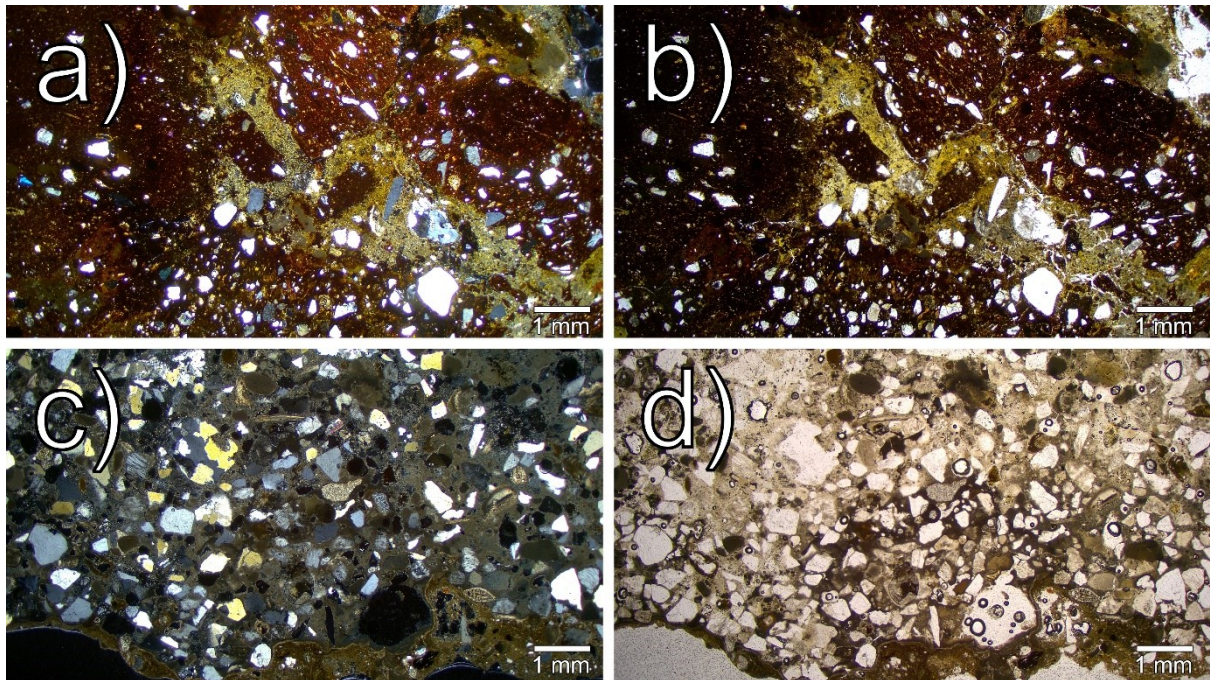
<sup>85</sup> V. capitolo 2.3.

<sup>86</sup> Bonetto, Dilaria 2021, 505.

<sup>87</sup> V. capitolo 2.3.



presentano una sfericità subangolosa, e dimensioni variabili da micrometriche a millimetriche. Non si rilevano aggregati di tipo pozzolanico. La proporzione tra il legante e l'aggregato è di circa 1:2.



*Figura 5.13: Micrografie di dettaglio in microscopia ottica a luce polarizzata, in luce trasmessa (LT) a nicol incrociati (XN) e nicol paralleli (PL); a-b) area rappresentativa del campione MM\_4062\_P1 (LT-XN, LT-PL), c-d) area rappresentativa del campione MM\_4076\_MI (LT-XN, LT-PL).*

Le principali caratteristiche delle miscele analizzate sono riportate nella tabella qui di seguito (tab. 5.1).



	Gruppo A	Gruppo B1	Gruppo B2		Outliers
Campioni	ACQ6, ACQ7	MM_4061_R2, MM_4062_R1, MM_4062_Z1, MM_4050_R1	MM_4062_R1		MM_4062_P1 MM_4076_M1
Funzione	Strutturale	Rivestimento	Rivestimento		Pavimento
N° di strati	-	3 (a, b, c)	1 (a)	2 (b, c)	-
Tipologia	LM_PUM	PUM-CP-ASH	PUM-CP-ASH	ASH-CP	LM
Legante	Calce, micritica, omogenea. Grumi di calce (++) ; Relitti di cottura (- -)	Calce, micro-sparitica, disomogenea. Grumi di calce (+); Relitti di cottura (- -)	Calce, micro-sparitica, omogenea. Grumi di calce (+); Relitti di cottura (- -)	Calce, sparitica, disomogenea. Grumi di calce (- -); Relitti di cottura (- -)	Calce, micro-sparitica, disomogenea. Grumi di calce (++) ; Relitti di cottura (- -)
Porosità	Pori (+); Fratture planari (-)	Pori (+); Fratture planari (-)	Pori (++) ; Fratture planari (+)	Pori (-); Fratture planari(- -)	Pori (++) ; Fratture planari (- -)
Aggregati e additivi	Quarzo/quarziti (+++); Feldspati (++) ; Clasti di andesiti/daciti (-); Bioclasti (- -); Granitoidi (- -); Miche (- -); Pozzolane vulcaniche (++)	Quarzo/quarziti (+); Feldspati (- -); Bioclasti (- -); Miche (- -); Pozzolane vulcaniche (+); Frammenti fittili (+); Carbone e ceneri (-)	Quarzo/quarziti (+); Feldspati (- -); Clasti di andesiti/daciti (- -); Miche (- -); Granitoidi (- -); Pozzolane vulcaniche (+); Frammenti fittili (+); Carbone e ceneri (-)	Quarzo/quarziti (+++); Feldspati (- -); Clasti di andesiti/daciti (- -); Miche (- -); Frammenti fittili (++++); Carbone e ceneri (++)	Quarzo/quarziti (++++); Feldspati (+); Clasti di andesiti/daciti (- -); Miche (- -); Bioclasti (- -); Granitoidi (- -);

Tabella 5.1: Caratterizzazione petrografica e tessiturale delle malte analizzate. ++++ = dominante (>75%), +++ = abbondante (75-50%), ++ = ricorrente (50-20%), + = presente (20-7,5%), - = saltuario (7,5 - 2%), - - = scarso (< 2%).

## 5.2 Provenienza delle pozzolane vulcaniche

La determinazione della provenienza delle pozzolane impiegate nell'opera cementizia dell'acquedotto è stata principalmente basata sul confronto dei profili geo-chimici dei campioni archeologici con i profili geo-chimici tratti da letteratura di rocce effusive e piroclastiti geologiche originatesi nel corso delle attività magmatiche Plio-Quaternarie dei principali distretti vulcanici italiani<sup>88</sup>. Gli elementi chimici maggiori (95-99%) e quelli in traccia (0.1%) costituenti le rocce magmatiche sono particolarmente informativi per distinguere i distretti vulcanici d'origine<sup>89</sup> e, in particolar modo, gli elementi in traccia, che sono strettamente legati al chimismo del magma e delle singole camere magmatiche, permettendo quindi di tracciare con buon margine di precisione le zone di affioramento.

Come già detto, le analisi geochemiche sono state effettuate tramite XRF sui campioni di rocce grossolane provenienti dalle strutture dell'acquedotto. Stando a quanto osservato, dalla preliminare analisi macroscopica della tessitura dei campioni lapidei in oggetto, si tratta di rocce di origine piroclastica. Quattro di queste sono pomice estremamente vacuolari (ACQ1, ACQ2, ACQ4, ACQ5) (fig. 5.10, a-b-d-e), mentre una sola è un tufo (ACQ3) (fig. 5.10, c). Gli elementi maggiori e gli elementi in traccia ottenuti dall'analisi XRF sono riportati di seguito alle tabelle 5.2 e 5.3.

Va inoltre precisato che, benché le pomice si rinvenivano anche in forma di aggregato fino in alcuni dei campioni di miscele leganti dei rivestimenti idraulici delle strutture del saggio 4 (v. paragrafo 5.1), non è stato possibile prelevare campioni di dimensioni sufficienti da poter essere analizzati con la tecnica della fluorescenza a raggi X (XRF). Ciononostante, tramite l'analisi in microscopia ottica è stato possibile riscontrare un'assoluta omogeneità tessiturale e mineralogica tra le piroclastiti vulcaniche presenti nella porzione di aggregato delle miscele dell'acquedotto e delle infrastrutture idrauliche (fig. 5.7, c-d), pertanto si suppone – con buona probabilità – che esse possano avere la stessa provenienza dei cinque campioni più grossolani, analizzati tramite XRF.

Nello specifico, l'analisi della provenienza delle piroclastiti vulcaniche è stata svolta per fasi distinte, a livelli di approfondimento via via maggiori, analizzando dapprima alcuni elementi maggiori, per poi passare agli elementi in traccia.

---

<sup>88</sup> Peccerillo 2005.

<sup>89</sup> Peccerillo 2020, 80.

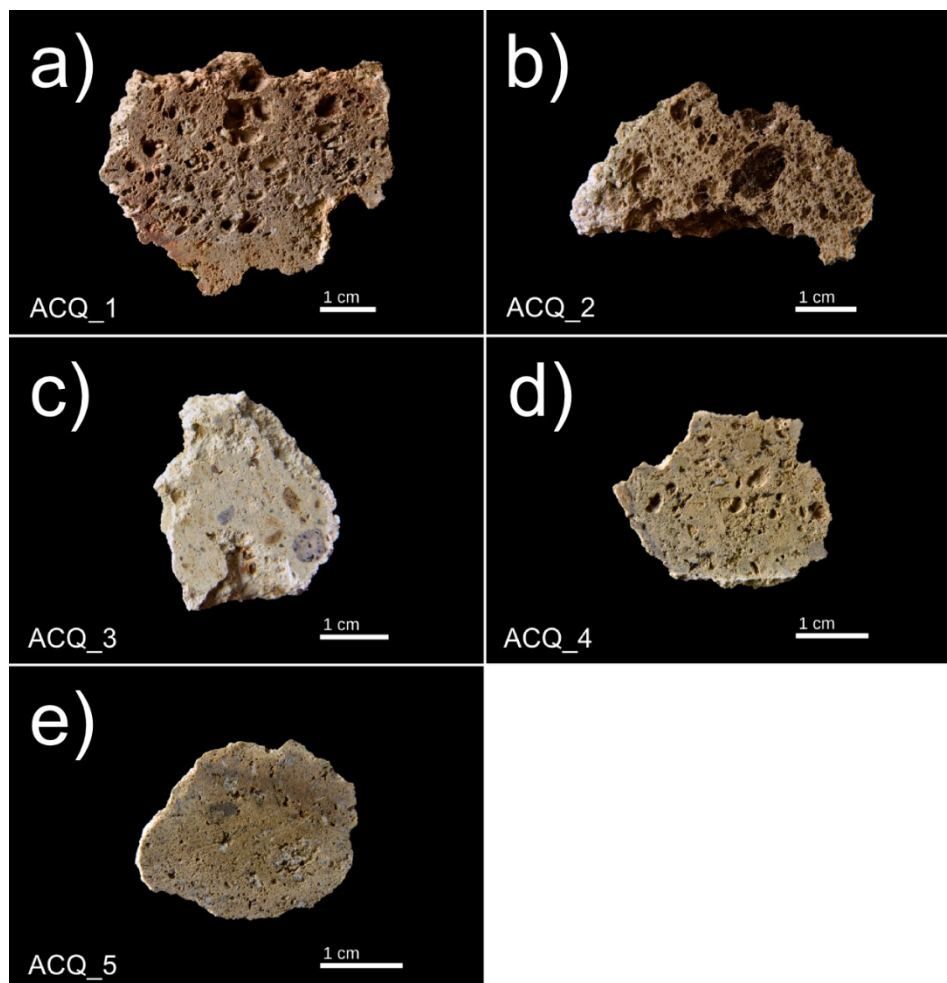


Figura 5.10: Sezione dei campioni di clasti vulcanici prelevati dall'acquedotto. a-b-d-e) Pomici di colore marrone-giallastro. c) Tufo verde.

Elemento	ACQ_01	ACQ_02	ACQ_03	ACQ_04	ACQ_05
<b>SiO<sub>2</sub></b>	60.35	60.66	54.50	61.72	60.19
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.48	0.45	0.44	0.39	0.44
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	18.79	18.97	17.15	16.98	18.48
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3.82	3.43	3.50	2.23	3.44
<b>MnO</b>	0.17	0.15	0.11	0.17	0.15
<b>MgO</b>	0.33	0.28	0.86	0.53	0.31
<b>CaO</b>	2.29	2.50	12.65	5.73	4.87
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	5.40	4.99	3.65	4.17	4.93
<b>K<sub>2</sub>O</b>	7.99	8.08	8.52	8.49	7.84
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.15	0.28	0.25	0.07	0.08
<b>Tot</b>	99.77	99.79	101.63	100.48	100.73
<b>L.O.I.</b>	4.68	6.25	17.26	8.88	5.53

Tabella 5.2: Elementi maggiori delle rocce piroclastiche analizzate espressi come percentuale dei relativi ossidi.

Elemento	ACQ 01	ACQ 02	ACQ 03	ACQ 04	ACQ 05
<b>S</b>	122	203	552	1876	3759
<b>Sc</b>	16	<3	30	18	18
<b>V</b>	40	38	74	21	35
<b>Cr</b>	8	<6	11	10	6
<b>Co</b>	<3	<3	<3	<3	3
<b>Ni</b>	3	<3	<3	<3	<3
<b>Cu</b>	11	27	12	11	7
<b>Zn</b>	114	110	73	56	106
<b>Ga</b>	8	12	<3	<3	3
<b>Rb</b>	429	387	407	408	367
<b>Sr</b>	141	153	565	125	217
<b>Y</b>	55	32	32	52	50
<b>Zr</b>	643	527	389	788	601
<b>Nb</b>	74	60	47	93	69
<b>Ba</b>	94	90	729	235	84
<b>La</b>	107	93	78	153	101
<b>Ce</b>	219	198	152	294	210
<b>Nd</b>	85	77	61	102	81
<b>Pb</b>	75	83	28	46	65
<b>Th</b>	61	53	35	80	59
<b>U</b>	16	18	8	13	17

*Tabella 5.3: Elementi in traccia delle rocce piroclastiche analizzate espressi in ppm (parti per milione).*

### 5.2.1. Analisi degli elementi maggiori

Per quanto riguarda gli elementi maggiori, riportare i dati nel grafico TAS (Total Alkali-Silica)<sup>90</sup> ha permesso una preliminare scrematura. Questo diagramma, infatti, si utilizza per classificare le rocce vulcaniche in base al rapporto tra il silicio (Si) e la somma degli elementi alcalini (Na e K)<sup>91</sup> espressi in ossidi. È stato così osservato che il profilo geochimico delle pomice ACQ1, ACQ2, ACQ4, ACQ5 ricade sul confine tra l'intervallo trachitico e quello fonolitico (fig. 5.11, a). Il profilo dei campioni analizzati rapportato con gli intervalli delle piroclastiti vulcaniche dei distretti magmatici dell'Italia peninsulare e insulare trova confronti con l'area dei Campi Flegrei, in particolare con le eruzioni dell'Ignimbrite Campana (CI 39.800-12.000 BP), del Tufo Giallo Napoletano (NYT, 12.000-8.400 BP) e degli episodi eruttivi più tardi (post-NYT < 8.400 BP) (fig. 5.11, b). Inoltre, si riscontra una certa compatibilità anche con la serie delle eruzioni più antiche vesuviane (> 8.900 BP) (fig. 5.11, c).

<sup>90</sup> Le Bas et alii 1986.

<sup>91</sup> Il contenuto di Si, Na e K viene espresso come percentuale dei relativi ossidi (SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O).

I campioni sono altresì compatibili con gli intervalli caratteristici dei distretti vulcanici etrusco-laziali, ad esclusione dei Colli Albani (fig. 5.11, d) e con il chimismo trachitico-fonolitico di alcuni prodotti vulcanici delle Isole Eolie, in particolar modo con alcune serie dell'isola di Vulcano (fig. 5.11, e).

Tuttavia, le piroclastiti in analisi non trovano confronti con quelle riolitiche della Sardegna, in particolare con i distretti di Monte Arci e Sant'Antioco, ma coinciderebbero con il profilo geochemico di alcuni prodotti vulcanici di Montiferro. Per queste ultime si tratta però di dense rocce effusive che non sono quindi compatibili come genesi con i clasti in analisi (fig. 5.11, f). Il campione di tufo ACQ3 sembra distinguersi con evidenza dai profili degli altri campioni e dagli intervalli di confronto. Questo distacco non sembra essere legato ad una differenza geochemica geogenica ma ad un'alterazione del campione: ne sono prova i valori di calcio (Ca) anomali (> 5 %) e il valore di perdita al fuoco particolarmente elevato (L.O.I = 17.26%) (tab. 5.2). Questi valori sono legati alla presenza di carbonati intrusivi nel campione, dovuti alla presenza di calce del legante o di fluidi arricchiti in calcio, permeati nelle porosità della roccia anche a seguito dei fenomeni reattivi pozzolanici e/o per via della cinetica di presa dei composti cementizi.

In sostanza, il confronto degli elementi maggiori con il diagramma TAS dei differenti distretti vulcanici italiani non sembra però dare informazioni utili per definire con precisione la provenienza di queste pozzolane, pur dimostrando la loro origine non locale.

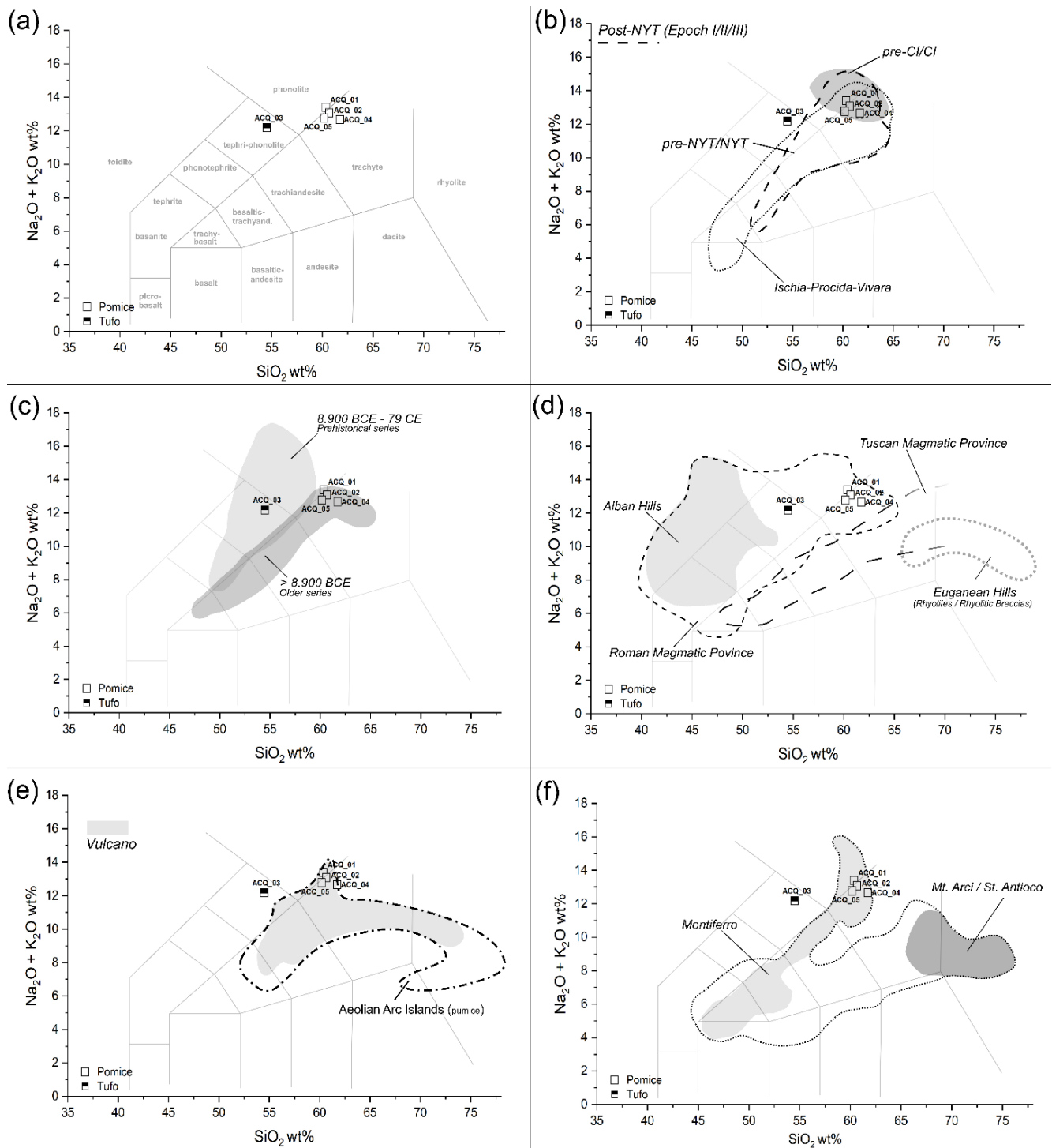


Figura 5.11: Grafici TAS per la determinazione della provenienza delle piroclastiti vulcaniche sulla base del rapporto  $SiO_2 / Na_2O + K_2O$ . a) Distribuzione dei campioni in relazione al chimismo delle rocce vulcaniche in accordo a Le Bas et al. 1986; b) Distribuzione dei campioni in relazione ai prodotti flegrei delle fasi eruttive dell'Ignimbrite Campana (CI), Tufo Giallo Napoletano (NYT) e post-NYT (dati da Peccerillo 2005, Morra et al. 2010; Marra et al. 2016); c) Distribuzione dei campioni in relazione a due delle tre principali facies eruttive di Somma-Vesuvio (dati da Peccerillo 2005; Morra et al. 2010); d) Distribuzione dei campioni in relazione ai prodotti piroclastici del distretto vulcanico etrusco-laziale, e il distretto dei Colli Euganei (dati da Peccerillo 2005); e) Distribuzione dei campioni in relazione ai prodotti relativi alle eruzioni di Vulcano e delle Isole Eolie (dati da Peccerillo 2005); f) Distribuzione dei campioni in relazione ai prodotti vulcanici della provincia magmatica sarda (dati da Peccerillo 2005; Lustrino, Melluso, Morra 2007).

### 5.2.2. Analisi degli elementi in traccia

Alcuni elementi in traccia sono altamente informativi e permettono di definire con un maggiore livello di risoluzione l'origine delle pomici, come osservato grazie ad alcuni importanti studi di letteratura<sup>92</sup>. In questa sede sono stati utilizzati come elementi per il confronto il Niobio (Nb), l'Ittrio (Y), lo Zirconio (Zr), il Rubidio (Rb) e il Neodimio (Nd).

Sulla base del preliminare diagramma che mette in relazione il rapporto tra Nb e Y contro quello tra Zr e Y (fig. 5.12), i campioni sembrano ricadere nell'intervallo dei prodotti piroclastici del distretto campano, mentre non trovano compatibilità con la provincia magmatica etrusco-laziale e la zona dei Colli Albani, un distretto quest'ultimo ampiamente coltivato in antichità per l'approvvigionamento di materiale piroclastico, ed impiegato diffusamente nell'edilizia dell'Urbe come pozzolana naturale. Si tratta delle cd. *harenae fossiciae*<sup>93</sup>, le pozzolane romane citate nel trattato vitruviano, con diversi nomi (*nigra, rubra, cana* ecc..) e riconducibili alle formazioni geologiche note come "Pozzolane Rosse", "Pozzolane Nere" e "Pozzolanelle"<sup>94</sup>.

Per procedere verso un grado di dettaglio maggiore i dati dei campioni in analisi sono stati elaborati ulteriormente all'interno di due grafici per confrontarli con i profili geochemici di piroclastiti geologiche dell'area campana, che sono stati raccolti in un dataset attualmente predisposto per i ricercatori dell'Università di Padova. Sulla base del rapporto dei due diagrammi Nb/Y vs. Zr/Y (fig. 5.13, a) e – soprattutto – Nd vs. Rb (fig. 5.13, b), è stato possibile isolare i profili dei tre principali distretti campani, e osservare l'intervallo nel quale i campioni ricadevano. In particolare le pomici (ACQ1, ACQ2, ACQ4, ACQ5) e il tufo (ACQ3) sembrano essere pienamente compatibili con il distretto flegreo (in particolar modo le attività eruttive più tarde NYT e post-NYT), labilmente con quello dell'isola di Ischia e totalmente incompatibili con il distretto vesuviano e quello delle altre isole di Procida e Vivara (fig. 5.13, b).

---

<sup>92</sup> Marra et al. 2013; Brandon et al. 2014.

<sup>93</sup> Vitr. 2.4.1.

<sup>94</sup> Jackson et al. 2007.



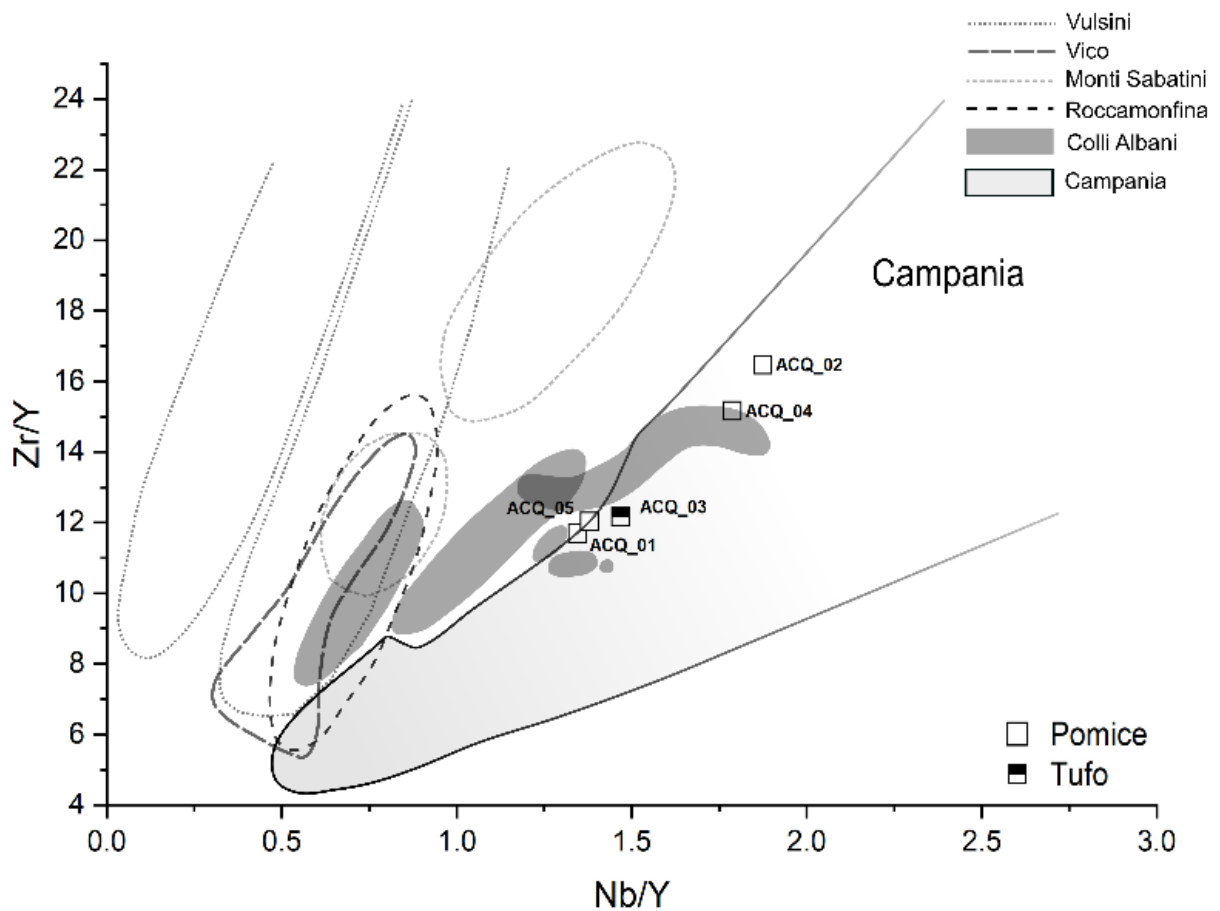


Figura 5.12: Diagramma a dispersione in relazione al rapporto Nb/Y vs. Zr/Y. Distribuzione dei campioni in relazione alle province magmatiche romana, toscana e campana (dati da Marra, D'Ambrosio 2013).

Pertanto, tramite la lettura di questi risultati si può confermare la provenienza delle pozzolane impiegate nell'acquedotto di Nora dall'area vulcanica del Golfo di Napoli, all'interno della regione definita da Vitruvio per l'approvvigionamento della prodigiosa *pulvis puteolana*, che l'autore riconduceva agli intorni del moderno abitato di Pozzuoli, da Cuma fino alle falde del Vesuvio<sup>95</sup>.

<sup>95</sup> V. capitolo 2.2.2.

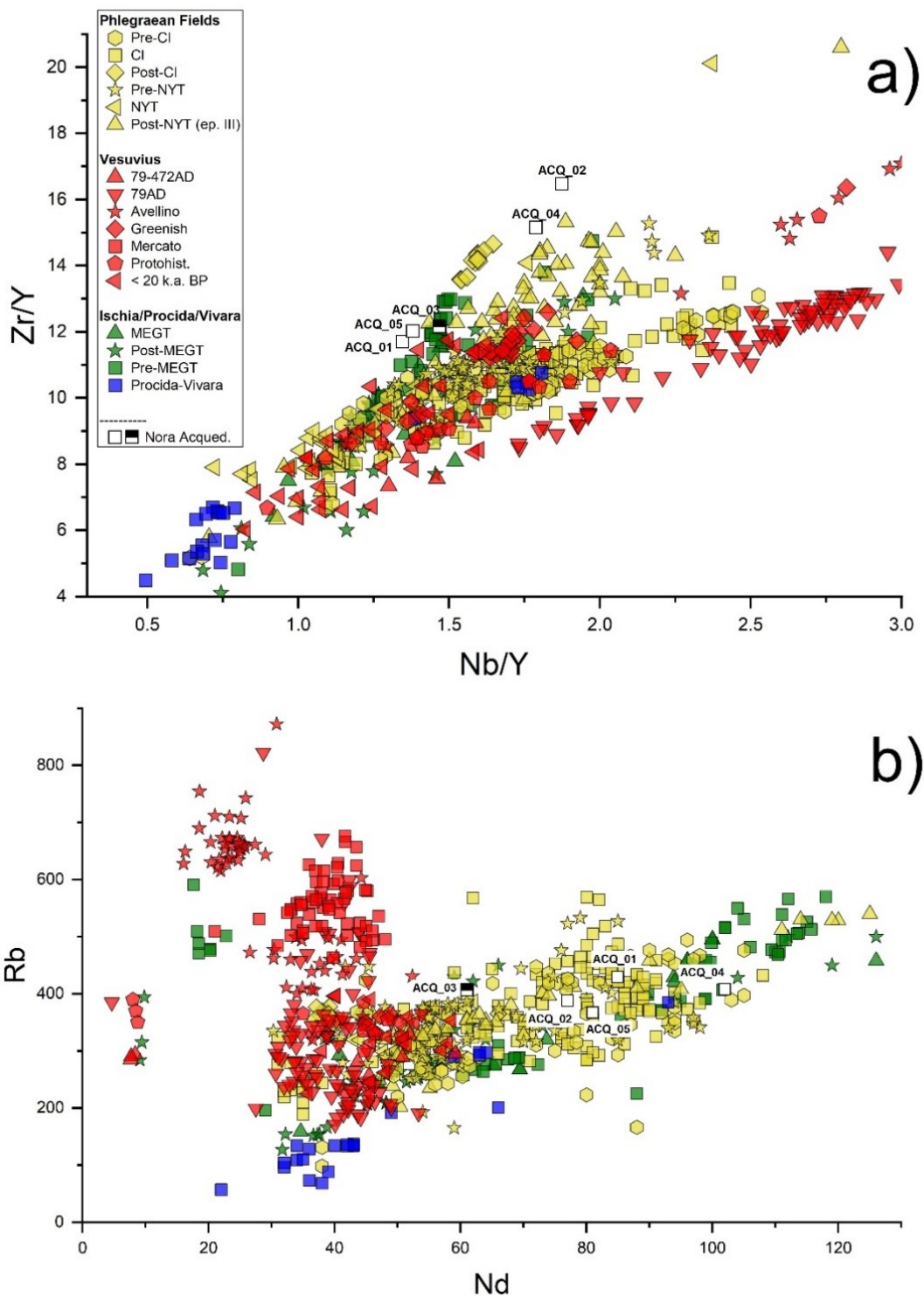


Figura 5.13: Diagrammi per la determinazione della provenienza delle rocce piroclastiche dell'area campana in base agli elementi in traccia. a) Grafico Nb/Y vs. Zr/Y che mostra la distribuzione dei campioni in relazione ai distretti vulcanici flegreo, vesuviano e delle isole di Ischia, Procida e Vivara; b) Grafico Nd/Rb che mostra la distribuzione dei campioni in relazione ai distretti vulcanici flegreo, vesuviano e delle isole di Ischia, Procida e Vivara.



## CAPITOLO 6

### Sintesi. Considerazioni archeologiche e tecnico-costruttive

Le analisi archeometriche condotte in questo studio hanno permesso di indagare ad un elevato livello di dettaglio due particolari contesti costruttivi nell'immediato suburbio dell'antica città di Nora, l'acquedotto e il grande serbatoio del saggio 4 della necropoli fenicio-punica occidentale. I risultati presentati nel capitolo precedente aprono infatti una serie di questioni interpretative, sia di carattere tecnico-costruttivo che storico-commerciale.

Di seguito si prenderanno innanzitutto in esame i due contesti singolarmente, per discuterne i risultati analitici e proporre una preliminare interpretazione. Infine si discuterà della possibile correlazione dell'acquedotto con il complesso idraulico individuato nel saggio 4, riprendendo ed argomentando le supposizioni già proposte all'inizio di questo elaborato, alla luce dei risultati analitici.

#### 6.1 Le miscele leganti dell'acquedotto

La miscela legante delle porzioni dell'acquedotto, ascrivibile al gruppo A, è caratterizzata da un legante di calce aerea, e la porzione di aggregato costituita da sabbie locali e da grossolani clasti vulcanici impiegati come aggregato pozzolanico, principalmente pomici e tufi cineritici in concentrazioni e dimensioni variabili, provenienti dalla zona del Golfo di Napoli. La presenza di questi aggregati, visibili già macroscopicamente, è stata ulteriormente confermata grazie all'osservazione in microscopia ottica delle sezioni sottili.

Questa composizione è particolarmente interessante, considerando soprattutto il fatto che in queste miscele la pozzolana venne usata nelle gettate di opera cementizia dei piloni e non nei rivestimenti, ad esempio dello *specus*<sup>96</sup>, e pertanto non in virtù delle sue potenziali capacità "idraulicizzanti". Va infatti ricordato che, oltre ad essere considerata come materiale d'eccellenza nell'architettura marittima, dato che rendeva possibile la presa dei composti

---

<sup>96</sup> Le evidenze legate alla condotta dell'acquedotto sono molto limitate e il loro stato di conservazione è particolarmente lacunoso, per cui sarebbe azzardato escludere la presenza di pozzolana nelle malte di rivestimento dello *specus*. Su questo aspetto si rimanda quindi a futuri studi.

cementizi anche in ambiente anaerobico e sommerso, la *pulvis puteolana* poteva essere altresì impiegata per incrementare le proprietà fisico-meccaniche dei composti cementizi<sup>97</sup>, così come riportato da Vitruvio (*non modo ceteris aedificiis praestat firmitates, sed etiam moles cum struuntur in mari, sub aqua solidescunt*)<sup>98</sup>, in virtù del fatto che la reazione pozzolanica porta ad un incremento delle capacità coesive complessive del materiale legante. Pertanto, non deve stupire il fatto che essa sia stata impiegata all'interno dell'opera cementizia dei piloni dell'acquedotto, strutture notevolmente sottoposte a stress meccanici vista l'imponenza che l'infrastruttura doveva avere in origine<sup>99</sup>. Tuttavia, l'effettiva capacità di queste malte sembrerebbe limitata. Sebbene non siano state effettuate analisi SEM (microscopia elettronica a scansione) che dimostrino l'effettiva presenza di fasi idrate (C-S-H)<sup>100</sup> prodotte dalla reazione pozzolanica con il legante calcico, i clasti vulcanici osservati non sembrano aver reagito adeguatamente con il legante, anche per via della loro granulometria piuttosto grossolana. Ciò ha portato pertanto ad una resa non del tutto efficace delle proprietà di questi composti cementizi.

Cionondimeno, a Nora, l'utilizzo della pomice campana o di altri materiali di origine vulcanica nelle miscele leganti con funzione strutturale è stata recentemente riconosciuta in diversi edifici di carattere pubblico riferibili ad un orizzonte cronologico pienamente imperiale (II-III d.C.). In particolar modo, nelle miscele leganti strutturali di alcuni complessi, quali il Tempio Romano al foro<sup>101</sup> (fig. 6.1, fig. 6.2), il Tempio di Esculapio<sup>102</sup> e le Terme a Mare<sup>103</sup>, dove si è riscontrato l'uso di piroclastiti vulcaniche, le cui analisi archeometriche e geochimiche ne hanno dimostrato la provenienza dalla regione flegrea, comune a quella dell'acquedotto.

---

<sup>97</sup> Dilaria et al. 2023, 568

<sup>98</sup> Vitr. 2.6.1.

<sup>99</sup> V. capitolo 3.1.4.

<sup>100</sup> V. capitolo 2.2.1.

<sup>101</sup> Dilaria et al. 2023, 581.

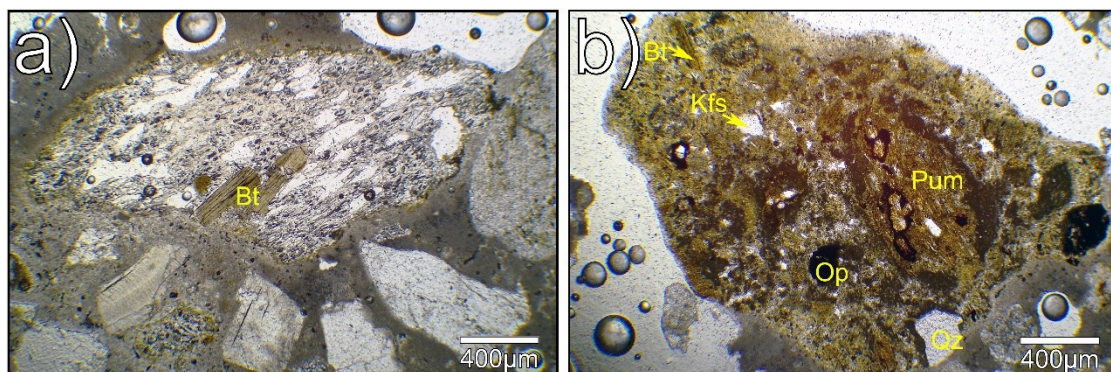
<sup>102</sup> Dilaria et al. 2022, 183.

<sup>103</sup> Caneva 2022/2023.



*Figura 6.1: Tempio romano al Foro (foto da Dilaria et al. 2023, figura 1, 569).*

Alla luce di ciò, l'impiego di pozzolana flegrea d'importazione in città sembra essere particolarmente intenso proprio in questo periodo dell'età imperiale, nel quale si assiste alla realizzazione di un programma razionale e strutturato di rinnovamento nell'edilizia pubblica norense. In questo frangente, non solo si ricorse a nuove tecniche costruttive (adozione dell'opera vittata), ma si assiste a importanti forme di approvvigionamento trans-regionali di materiale da costruzione, con collegamenti chiaramente strutturati e sistematici con l'area del Golfo di Napoli da cui proviene il materiale reattivo utilizzato nella produzione di malte e calcestruzzi.



*Figura 6.2: Micrografie di dettaglio di alcuni aggregati pozzolanici presenti nelle miscele leganti del Tempio romano al Foro. Immagini in microscopia ottica a luce polarizzata, in luce trasmessa (LT) a nicol paralleli (PN). a) Clasto di pomice, con all'interno un cristallo di biotite; b) Frammento sub-millimetrico di tufo con clasti di pomice e fenocristalli di biotite (Bt), K-feldspati (Kfs), minerali opachi (Op), e frammenti di quarzo (Qz) (foto da Dilaria 2023, figura 4, 573).*

Precedentemente alle innovazioni di questo periodo, un esempio di utilizzo di prodotti piroclastici nelle miscele leganti è rappresentato dal teatro (I sec. d.C.), nelle cui malte strutturali l'aggregato pozzolanico è definito da vetro vulcanico (ossidiane e perliti riolitiche) di origine locale, che indagini geochimiche effettuate in anni recenti hanno ricondotto al distretto vulcanico di Monte Arci<sup>104</sup>. L'impiego di questo materiale a fini strutturali venne quindi sempre meno in età imperiale, in quanto soppiantato dalla pozzolana campana d'importazione, con evidenze d'uso sempre più labili e circoscritte<sup>105</sup>. Pertanto, sulla base di queste evidenze, la costruzione dell'acquedotto cittadino rientrerebbe perfettamente nel quadro di rinnovamento edilizio che investe la città durante l'età medio-imperiale (II-III sec d.C.), a riprova di quanto già indiziato sulla base dei precedenti studi archeologici<sup>106</sup>.

## 6.2 Le miscele leganti dell'infrastruttura idraulica del saggio 4 e la possibile correlazione con l'acquedotto

L'analisi delle miscele leganti che rivestono il serbatoio rinvenuto nel saggio 4 ha portato a nuove considerazioni circa la tecnica di rivestimento dell'infrastruttura fornendo importanti spunti per una più approfondita lettura cronologica delle evidenze strutturali messe in luce nel settore. Seppur già da analisi macroscopica si sia osservato una pluri-stratificazione dei rivestimenti, come tipico nelle cisterne di Nora<sup>107</sup>, un'attenta osservazione microscopica delle stesure ha dimostrato come la composizione e la microstratigrafia delle malte della cisterna T60 differisca da quella della T61. Nello specifico, gli strati *b* e *c* nel campione MM\_4061\_R1 (sottogruppo B2), relativo al rivestimento della T60, sono costituiti da cocchiopesto ricco in frazione carboniosa (ASH-CP), mentre lo strato superiore *a* è caratterizzato da malta del tipo PUM-CP-ASH, con una frazione di aggregato pozzolanico eterogenea costituita da pomici, frammenti fittili e – subordinatamente – ceneri organiche. Quest'ultima tipologia è la medesima che si rinviene in tutte e tre le stesure che rivestono la cisterna T61, l'arco di giunzione dei due ipogei e il pozzo di captazione (sottogruppo B1). Inoltre, si potrebbe pensare che gli strati di cocchiopesto *b* e *c* dell'invaso T60 siano delle stesure preparatorie per lo strato superiore di

---

<sup>104</sup> Columbu, Garau 2017, 257.

<sup>105</sup> Caneva 2022/2023.

<sup>106</sup> V. capitolo 3.1.1.

<sup>107</sup> Secco et al. 2020.



malta pozzolanica, tuttavia la presenza di un marcato profilo di carbonatazione nell'interfaccia che separa le stesure *a* e *b* risulta essere una superficie di finito a lungo esposta all'aria, a dimostrazione di come gli strati ASH-CP, pertinenti al rivestimento originario, siano precedenti alla stesura dello strato *a* (PUM-CP-ASH)<sup>108</sup>. Quest'ultimo è invece verosimilmente contestuale al rivestimento delle altre strutture, in questa fase di rinnovo ed ampliamento del serbatoio. Sulla base di queste evidenze sembrerebbe dunque che l'ipogeo T60 venga rifunzionalizzato e convertito in cisterna in una fase cronologicamente molto più antica rispetto a quella del rivestimento della T61 e della creazione del grande serbatoio a "doppia camera".

In termini cronologico-culturali, la tipologia di miscela legante ASH-CP rimanda a tradizioni costruttive del mondo fenicio-punico (Nord Africa, Spagna meridionale, Sardegna, Levante)<sup>109</sup>, connotate dall'impiego sistematico di cenere organica a funzione impermeabilizzante nelle malte. Questa tecnologia, una volta trasferita in Sardegna nel periodo di dominazione fenicio-punica dell'isola, venne mantenuta a Nora anche in seguito alla romanizzazione della città e rimase in uso almeno fino alle soglie dell'età imperiale, come visto con precedenti studi<sup>110</sup>. Dopo questo momento, stando a quanto osservato, la realizzazione di malte con pozzolane vulcaniche sembrerebbe diffondersi nell'edilizia norense, anche nell'ambito dei rivestimenti di cisterne, andando quindi a sostituirsi progressivamente alla tradizione precedente. Di conseguenza, il riscontro di pomice e tufo in qualità di aggregato pozzolanico nei rivestimenti idraulici relativi all'arco di giunzione dei due ipogei, all'invaso e al pozzo di captazione porterebbe confermare come l'ingente intervento di ampliamento del serbatoio ad un periodo successivo al cambio di destinazione d'uso della tomba T60. Sulla base del confronto con le attestazioni e la comune provenienza della pozzolana impiegata in altri contesti architettonici della città, questo intervento nella zona periurbana potrebbe essere contestuale con la grande fase di rinnovo edilizio vissuto dalla città nel corso dell'età medio-imperiale. A questa fase sarebbe da ricondurre anche la messa in opera della canaletta di adduzione attigua alla cisterna T61, costituita in laterizi allettati su semplice malta di calce (LM)<sup>111</sup> senza alcun additivo pozzolanico in quanto la struttura non aveva funzione di conservazione dell'acqua, come tipico per questi apparati<sup>112</sup>.

---

<sup>108</sup> In aggiunta, nel caso si fosse trattato di strati preparatori, oltre all'assenza del profilo di carbonatazione, si sarebbero dovute rinvenire stesure di cocchiopesto anche negli altri rivestimenti.

<sup>109</sup> Lancaster 2019, 37.

<sup>110</sup> Secco et al. 2020; Bonetto, Dilaria 2021.

<sup>111</sup> V. capitolo 2.3.

<sup>112</sup> Dilaria cs.

Da questi dati preliminari sembra palesarsi un certo divario cronologico tra perlomeno l'ultima grande fase di ristrutturazione del serbatoio con malte del sottogruppo B1 (PUM-CP-ASH) e la costruzione dell'edificio (fig. 6.3) che, attualmente, sulla base della preliminare analisi dei materiali ceramici raccolti nel corso delle campagne di scavo e l'analisi delle tecniche costruttive dei corpi murari, sembrerebbe riferibile al periodo tardoantico (IV-V secolo d.C.). Di conseguenza, benché non siano ancora chiare le funzioni dell'edificio, è altamente improbabile che la sua realizzazione sia contemporanea a quella del grande serbatoio e del suo sistema di adduzione. Questa affermazione è supportata anche da altri aspetti.

Innanzitutto, non sembra verosimile un impiego e un approvvigionamento di pozzolana vulcanica dal Golfo di Napoli in fasi così tarde, e soprattutto in età post-tetrarchica quando le relazioni commerciali, in particolare di materiali da costruzione, subirono un drastico calo. Questa rimane, al momento, una mera supposizione se si considerano esclusivamente le evidenze riscontrate a Nora, poiché le attestazioni commerciali nella penisola per questo periodo sono molto differenti, con variabili situazioni locali e dinamiche regionali<sup>113</sup>.

Inoltre, se il complesso idraulico fosse vissuto in fase con l'edificio non si dovrebbe riscontrare una tale incoerenza tra le tecniche costruttive e, in particolar modo, nella tipologia dei materiali leganti impiegati. Ad esempio, la canaletta presenta un allettamento di malta di calce, materiale che teoricamente si sarebbe potuto impiegare come legante per le strutture murarie dei vani realizzate in tecnica a ritti, le quali sono invece legate con semplice malta di terra.

Pertanto, pur non avendo ad oggi a disposizione datazioni radiometriche dei rivestimenti idraulici<sup>114</sup>, è verosimile che l'edificio – più tardo – abbia sfruttato le cisterne in età tardoantica, data la presenza di una piccola porta trilitica nel muro di uno dei vani<sup>115</sup> (US 4008), collocata immediatamente davanti al pozzo subcircolare del serbatoio<sup>116</sup>.

---

<sup>113</sup> Lancaster et al. 2011, 725.

<sup>114</sup> È in programma l'esecuzione di datazioni 14C sui carboni presenti nelle malte dei rivestimenti del serbatoio.

<sup>115</sup> V. capitolo 3.2.3

<sup>116</sup> Purtroppo per risolvere queste complesse questioni cronologiche sarebbero necessari più approfonditi studi e ulteriori dati, che le future indagini archeologiche potranno fornire.

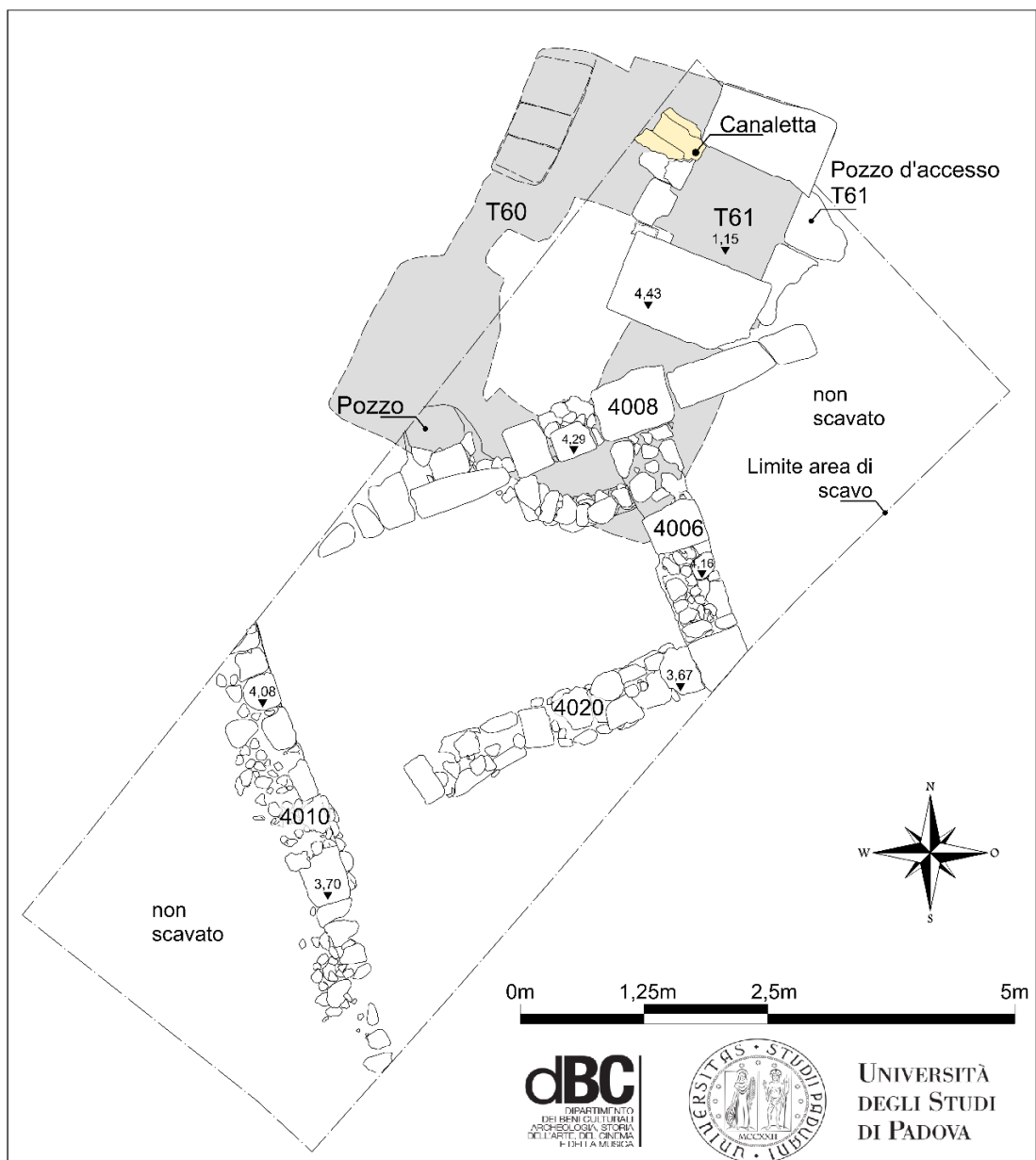


Figura 6.3: Pianta generale dell'area di scavo del saggio 4 allo stato di fatto al termine della campagna di scavo 2022. In evidenza le principali strutture (elaborazione autore).

Alla luce di quanto detto, l'analisi del serbatoio individuato nel saggio 4, dalla conformazione strutturale, alla composizione delle miscele leganti e alle sue "fasi di rivestimento", apre un possibile scenario legato alla sua correlazione con l'acquedotto cittadino. Come analizzato precedentemente in questo elaborato, in diversi contesti archeologici e in particolar modo nel mondo dell'Africa romana, era solito collocare cisterne e serbatoi ausiliari dell'acquedotto per far fronte a periodi di siccità<sup>117</sup>.

<sup>117</sup> V. capitolo 3.1.1.

A Nora, in un certo momento dell'età romana, una parte dell'area periurbana della città, che occupava l'ormai defunzionizzata necropoli fenicio-punica, andò incontro ad una notevole trasformazione. Come già detto, nel saggio 4, uno di questi interventi consiste nella “ristrutturazione” del serbatoio, allargando la cisterna T60, già precedentemente intonacata, in un più grande vaso, che venne infine reintonacato con le malte del tipo PUM-CP-ASH. È quindi verosimile ipotizzare che questa importante opera di ristrutturazione, volta ad aumentare la capienza del serbatoio, fosse finalizzata a creare un bacino di conservazione a servizio dell'acquedotto, il quale sulla base delle ricostruzioni più recenti, doveva correre a poca distanza dal quartiere periurbano.

A supportare questa ipotesi vi sono inoltre una serie di considerazioni, che riguardano l'uso dei materiali correlato alle evidenze archeologiche e alla loro cronologia. Innanzitutto, è ben noto che la stragrande maggioranza delle cisterne di Nora fosse sfruttata per la raccolta e la conservazione dell'acqua piovana, a cui era spesso associata una canaletta di adduzione<sup>118</sup>. La presenza di una canaletta che s'immette direttamente nella cisterna T61 lascia presupporre che questo serbatoio, a seguito dell'ampliamento, fosse alimentato da un più ampio sistema di canalizzazione con una fonte continua d'acqua.

Molto importante è anche l'analisi e il confronto delle miscele leganti, da cui si osserva che in entrambi i complessi – sia l'acquedotto che il serbatoio – sono state impiegate piroclastiti vulcaniche flegree in qualità di aggregato. Nel caso dell'acquedotto, la pozzolana è presente nelle malte dell'opera cementizia interna ai piloni, e dunque con funzione strutturale, mentre per le cisterne essa venne utilizzata come terza componente d'aggregato pozzolanico nella malta di rivestimento idraulico, in aggiunta al prevalente cocchiopesto e alla frazione minoritaria di ceneri organiche. Sarebbe dunque possibile correlare l'attività di rivestimento del grande serbatoio nella necropoli occidentale ad un orizzonte cronologico medio-imperiale, contestuale alla costruzione dell'acquedotto e alla circolazione della pozzolana flegrea in città.

Infine, si può prendere in considerazione un altro fattore propriamente tecnico-dimensionale. La capacità volumetrica dell'vaso, pari a ca. 25 m<sup>3</sup>, che è stata ottenuta secondo una stima basata sul modello tridimensionale della struttura effettuato nel corso dello scavo, considerando gli ingombri delle due tombe a camera puniche e i pozzi di accesso. Il volume d'acqua che poteva contenere il serbatoio è sicuramente importante dato che mediamente la maggior parte delle cisterne “urbane” norensi conteneva in media ca. 10 m<sup>3</sup> di acqua, valore medio

---

<sup>118</sup> Cespa 2018, 244.

approssimativo considerando la grande varietà morfologica e volumetrica degli invasi. I volumi ricostruiti per il serbatoio del saggio 4 possono essere messi in relazione con una serie di cisterne presenti in città, con capienze comprese tra i 20 e i 30 m<sup>3</sup>, fino a ca. 60 m<sup>3</sup>, e dotate di sistemi di adduzione. Queste strutture sono tutte inquadrabili in contesti di carattere pubblico e quasi sicuramente legate all'acquedotto cittadino. Alcuni di questi serbatoi servivano come riserva idrica dei principali complessi termali, per esempio le cisterne C17 e C18 prossime alle Terme a Mare<sup>119</sup> e la C46 alle Terme di Levante<sup>120</sup>. Un altro elemento di confronto si può riconoscere in una struttura a doppia camera distante ca. 50 m a est dalla necropoli lungo la costa (fig. 6.4), il cui rivestimento idraulico parzialmente conservato potrebbe definirla come cisterna. Stando alle misure effettuate sulle porzione visibile oggi, quest'ultima presentava una portata considerevole pari a ca. 60 m<sup>3</sup>, 30 m<sup>3</sup> a camera.

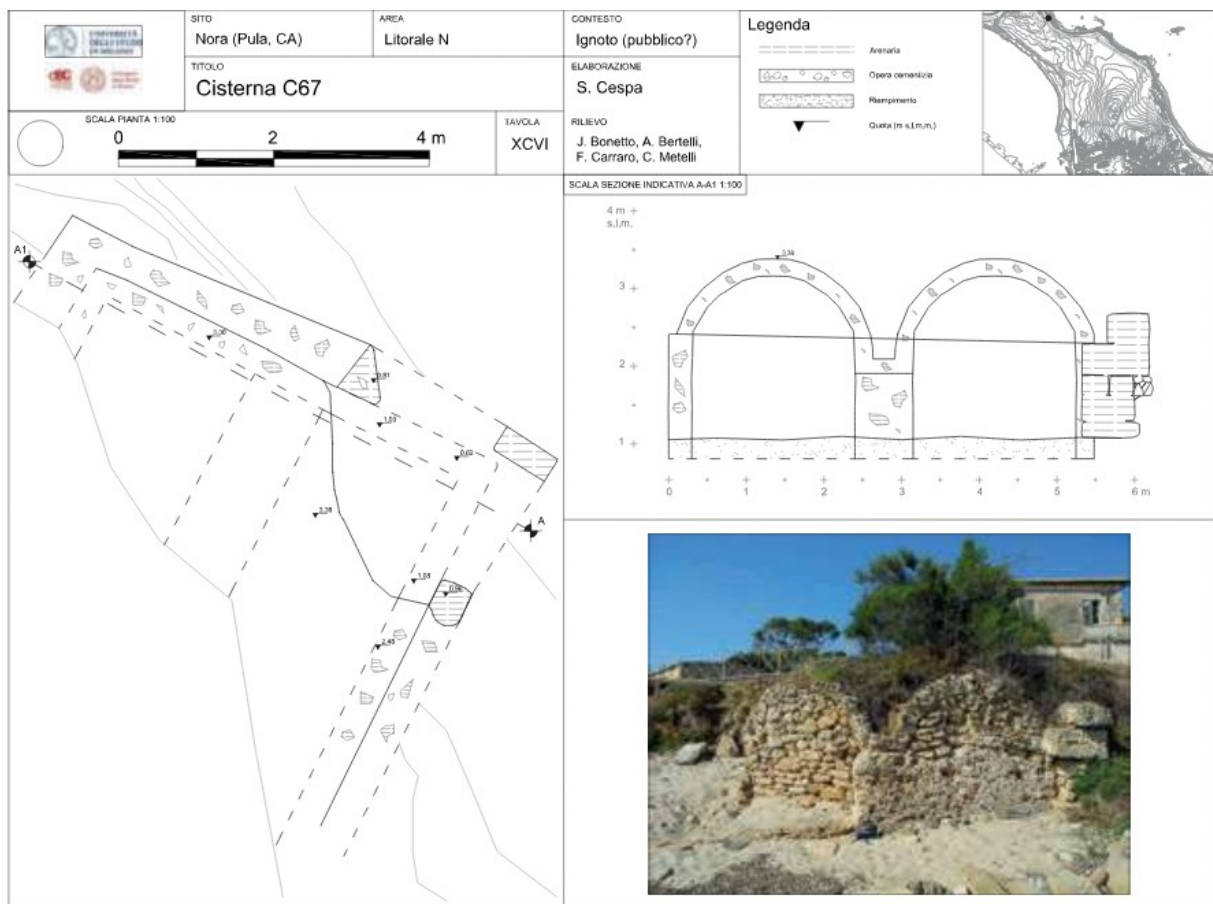


Figura 6.4: Scheda riassuntiva delle evidenze relative alla cisterna C67 presso il litorale nord (immagine da Cespa 2018, 157).

<sup>119</sup> Cespa 2018, 92-93.

<sup>120</sup> Cespa 2018, 136-137.



Nonostante non siano chiari né la funzione né il contesto, data la sua capacità questo possibile serbatoio risulta essere “il complesso più grande conservatosi lungo la fascia costiera del “litorale N”<sup>121</sup>. Considerando la notevole vicinanza delle due cisterne all’acquedotto, e le importanti capacità volumetriche messe in relazione con altre strutture affini, è quindi verosimile supporre uno stretto legame tra il serbatoio del saggio 4 e l’infrastruttura pubblica, e ricontestualizzare pertanto la destinazione d’uso di quest’area della necropoli nel corso dell’età romana imperiale.

---

<sup>121</sup> Cespa 2018, 156-157.

## BIBLIOGRAFIA

Adam J.P. 2008, *L'arte di costruire presso i romani. Materiali e tecniche*, Milano (prima ed. 1988), 77, 257-284,.

Artioli G., Secco M., Addis A. 2019, The Vitruvian legacy: mortars and binders before and after the Roman world, in *EMU Notes in Mineralogy Vol. 20*, London, 151–202.

Bellocci B. 2018, Malte per interventi di manutenzione, conservazione, restauro. Determinazione del modulo elastico mediante prove di laboratorio, tesi di laurea magistrale in Ingegneria Edile, Rel. Zerbinatti M., Politecnico di Torino, 16, figura 5.

Bonetto J. 2009, L'insediamento di età fenicia, punica e romana repubblicana nell'area del foro di Nora, in J. Bonetto, A.R. Ghiotto, M. Novello (a cura di), *Nora. Il foro romano. Storia di un'area urbana dall'età fenicia alla tarda antichità, I. Lo scavo*, Padova, 41-243.

Bonetto J. 2014, Pula. Nora, Acquedotto romano, in G. Manca di Mores (a cura di), *La Sardegna di Thomas Ashby. Paesaggi, archeologia, comunità. Fotografie 1906-1912*, Sassari, 301, n. 183.

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

Bonetto J., Ghiotto A.R. 2013, Nora nei secoli dell'alto medioevo, in R. Martorelli (a cura di), *Settecento-Millecento: Storia, Archeologia e Arte nei "secoli bui" del Mediterraneo*, Cagliari, 271-290.

Bonetto et al. 2018, Bonetto J., Bejor G., Bondì S.F., Giannattasio B.M., Giuman M., Tronchetti C., *Sardegna Archeologica. Nora, Pula. Guide e itinerari*, Sassari.

Bonetto et al. 2020 (a), Bonetto J., Carboni R., Giuman M., Zara A. (a cura di) 2020, *Nora antiqua II. Nora dalla costituzione della provincia all'età augustea*, Atti del Convegno di Studi (Pula, 5-6/10/2018), Roma.

Bonetto et al. 2020 (b), 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 S.C.Pérez, E.R. González (a cura di), *Un viaje entre el Oriente y el Occidente del Mediterráneo*, Actas del IX Congreso Internacional de Estudios Fenicios y Púnicos, Mytra 5, Mérida, 1047-1064.

Bonetto et al. 2022 (a), Bonetto J., Balcon S., Berto S., Bridi E., Carraro F., Dilaria S., Mazzariol A., Ruberti N., La necropoli fenicia e punica di Nora: Saggi 1 e 4. Indagini 2021, *Quaderni Norensi*, 9, 241-272.

Bonetto et al. 2022 (b), Bonetto J., Carraro F., Metelli M.C., Vacchi M., Venturoli A., Rossi V., Le variazioni del livello del mare e l'articolazione dell'abitato di Nora (Sardegna, Italia) tra età nuragica e tarda età romana, *Archaeologia maritima mediterranea. An International Journal on Underwater Archaeology*, Pisa, Roma, 27-62.

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, *ATTA*, 31, Roma, 495-520.

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, 6-7.

Caneva Z. 2022/2023, *Analisi archeometriche sulle malte e le pozzolane vulcaniche delle Terme a Mare di Nora*, tesi di laurea triennale, relatore dott. S. Dilaria, Università degli studi di Padova.

Cespa S. 2018, *Nora. I sistemi di approvvigionamento idrico*, Roma.

Columbu S., Garau A.M. 2017, Mineralogical, petrographic and chemical analysis of geomaterials used in the mortars of Roman Nora theatre (south Sardinia, Italy), *Italian Journal of Geoscience*, vol. 136, n. 2, 238-262.

Della Marmora A. 1840, *Viaggio in Sardegna, II. Le antichità*, trad. it. a cura di V. Martelli (ed.1927), Cagliari, 39.

Dilaria S. c.s., *Archeologia e archeometria delle miscele leganti di Aquileia romana e tardo antica (II sec. A.C. – VI sec. d.C.)*, Costruire nel mondo antico 8, Roma.

Dilaria S., Marinello A., Zara A. 2022, Analisi archeometriche delle malte aeree e pozzolaniche del tempio di Esculapio. Risultati preliminari, *Quaderni Norensi*, 9, 225-238.

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

Di Gregorio F., Floris C., Matta P. 2000, Lineamenti geologici e geomorfologici della penisola di Nora, in C. Tronchetti (a cura di), *Ricerche su Nora I (anni 1990-1998)*, Cagliari, 5-9.

Garau E., Rendeli M. 2006, Tra Africa e Sardinia: mobilità di merci, genti (?) a Nora nella tarda antichità, in A. Akerraz, A. Akerraz, P. Ruggeri, A. Siraj, C. Vismar (a cura di), *L’Africa Romana. Mobilità delle persone e dei popoli, dinamiche migratorie, emigrazioni ed immigrazioni nelle province occidentali dell’Impero romano*, Atti del XVI convegno di studio (Rabat, 15-19/12/2004), Roma, 1247-1278.

Ghiotto A.R. 2004, *L’architettura romana nelle città della Sardegna*, Roma, 146-148.

Ghiotto A.R., Zara, A. 2020, Nora tra III e I secolo a.C.: la graduale transizione da città punica a città romana, in J. Bonetto, R. Carboni, M. Giuman, A. Zara (a cura di), *Nora antiqua II. Nora dalla costituzione della provincia all’età augustea*, Atti del Convegno di Studi (Pula, 5-6/10/2018), Roma, 3-20.

Ginouvès R. and Martin R. 1985, *Dictionnaire méthodique de l’architecture grecque et romaine*, École française d’Athènes École française de Rome, vol. 1, 50-52.

Giuliani C.F. 2006, *L’edilizia nell’antichità*, Roma, 81.

Jackson M., Marra F., Deocampo D., Vella A., Kosso C., Hay, R. 2007, Geological observations of excavated sand (harenae fossiciae) used as fine aggregate in Roman pozzolanic mortars, *Journal of Roman Archaeology*, 20, 25-53.

Lancaster L.C., Sottili G., Marra F., Ventura G. 2011, Provenancing of lightweight volcanic stones used in ancient roman concrete vaulting: evidence from Rome, *Archaeometry*, Volume 53, 4, 661-872.

Lancaster L.C. 2019, Pozzolans in mortar in the roman empire: an overview and thoughts on future work, in I.F. Ortega, S. Bouffler (a cura di), *Archéologies Méditerranéennes: Mortiers et hydraulique en Méditerranée antique*, Aix-en-Provence, 31-39.

Le Bas M.J.R., Le Maitre W., Streckeisen A., Zanettin, B. 1986, IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks, A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram, *J. Petrol.*, 27, 745–750.

Marra F., D'ambrosio E. 2013, Trace element classification diagrams of pyroclastic rocks from the volcanic districts of central Italy: the case study of the ancient roman ships of Pisa, *Archaeometry*, 55, 6, 993-1019.

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 J. Lorenz, D. Tardy, G. Coulon (a cura di) *La pierre dans la ville antique et médiévale*, Actes du colloque d'Argentomagus, Tours, 103-117.

Paoletti S. 1997, Nora V. Soluzioni tecniche dell'acquedotto romano di Nora, *Quaderni della Soprintendenza archeologica per le Province di Cagliari e Oristano*, 14, 159-164.

Patroni G. 1901, Nora. Scavi eseguiti nel perimetro di quella antica città e in una delle sue necropoli durante i mesi di maggio e giugno 1901, in *"Notizie degli Scavi"*, 365-381.

Peccerillo A. 2005, Plio-quadernary volcanism in Italy; Petrology, geochemistry, geodynamics, Springer, 259, 141-142.

Peccerillo A. 2020, Campania volcanoes: petrology, geochemistry, and geodynamic significance, in Benedetto De Vivo, Harvey E. Belkin, Giuseppe Rolandi (a cura di), *Vesuvius, Campi Flegrei, and Campanian Volcanism*, Elsevier, 79-120.

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



Pecchioni E., Fratini F., Cantisani E. 2014, *Atlante delle malte antiche in sezione sottile al microscopio*, Firenze.

Piu F. 2016, L'acquedotto di Nora: studi e prospettive, in S. Angiolillo, M. Giuman, R. Carboni, E. Cruccas (a cura di), *Nora antiqua*, Atti del Convegno di Studi (Cagliari, Cittadella dei Musei, 3-4/10/2014), Perugia, 191-195.

Secco M., Dilaria S., Bonetto J., Addis A., Tamburini S., Preto N., Ricci G., Artioli G. 2020, Technological transfers in the Mediterranean on the verge of Romanization: Insights from the waterproofing renders of Nora (Sardinia, Italy), *Journal of Cultural Heritage*, 44, 63–82.

Tronchetti C. 2001, *Nora. Sardegna archeologica. Guide e itinerari*, Sassari, (prima ed.1986).



## Ringraziamenti

Alla fine di questo lavoro, piuttosto asettico e pragmatico a cui però mi sono dedicata con molta passione, vorrei ritagliare uno spazio per alcune considerazioni sincere e personali.

Prima di tutto, devo ringraziare la mia famiglia. Tutti quanti, ognuno di voi, che a modo vostro mi avete sempre supportato. Grazie. A mia madre e mio padre, che da quando ne ho memoria mi hanno sempre mostrato il mondo, e ciò che c'è di bello in esso, in primo luogo la storia e la cultura. A mio fratello Marco e le mie sorelle Elena, Silvia e Sara che sono sempre stati un modello per me. In special modo Sara, con cui più da vicino condivido la vita e ogni esperienza che affronto. E a tutti i miei fantastici nipoti Diana, Elsa, Aurora ed Edoardo.

Ringrazio le mie care amiche Giulia, Giada, Monica, Alessia e Gaia perché sono per me un punto fisso e sicuro, che in questi anni non si sono mai stancate di ascoltare me, i miei racconti e i 'fun-fact' assurdi.

Un grazie anche a tutti i colleghi e amici incontrati lungo questo percorso. Con alcuni di loro ho condiviso le migliori esperienze in classe, in laboratorio, in città, dentro e fuori lo scavo. Un grazie speciale a Zeno, amico prima che collega, con cui ho condiviso molto di questi tre anni. Ad accumunarci lo stesso scavo, lo stesso 'maestro' e la stessa passione per le malte, che ci ha portato a realizzare una tesi su di esse.

Ci tengo particolarmente a ringraziare i docenti Jacopo Bonetto e Caterina Previato che, in maniere differenti, hanno contribuito alla mia crescita personale sia come studentessa che come archeologa, e per tutte le opportunità che mi hanno concesso.

Infine, assolutamente non meno importante, voglio ringraziare di cuore il mio Relatore, il Dottore Simone Dilaria. Oltre all'incredibile supporto fornitomi per la realizzazione di questo elaborato, gli sarò sempre grata per il rispetto e tutto ciò che mi ha insegnato in questi anni su questo meraviglioso ambito di studi, e soprattutto in scavo.